

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

Nguyễn Chí Thọ

**PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG KẾT CẤU HỆ DẦM,
KHUNG KHÔNG GIAN CÓ LẮP THIẾT BỊ TIÊU TÁN
NĂNG LƯỢNG CHỊU TẢI TRỌNG NGẪU NHIÊN**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2021

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

Nguyễn Chí Thọ

**PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG KẾT CẤU HỆ DẦM,
KHUNG KHÔNG GIAN CÓ LẮP THIẾT BỊ TIÊU TÁN
NĂNG LƯỢNG CHỊU TẢI TRỌNG NGẪU NHIÊN**

Chuyên ngành: Kỹ thuật XDCTĐB

Mã ngành: 9.58.02.06

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. Nguyễn Trí Tá

Hà Nội - 2021

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào.

TÁC GIẢ

Nguyễn Chí Thọ

LỜI CẢM ƠN

Tác giả luận án xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành đối với PGS.TS Nguyễn Trí Tá đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ và cho nhiều chỉ dẫn khoa học có giá trị cốt lõi giúp cho tác giả hoàn thành luận án này. Tác giả trân trọng sự động viên, khuyến khích và những kiến thức khoa học, cũng như chuyên môn mà thầy hướng dẫn đã chỉ dẫn trong quá trình làm luận án, chia sẻ cho tác giả trong nhiều năm qua, giúp cho tác giả nâng cao năng lực khoa học, phương pháp nghiên cứu, tư duy phát triển, công nghệ hiện đại, tư duy kỹ năng nghề nghiệp thiết thực và lòng yêu nghề.

Tác giả trân trọng cảm ơn tập thể Bộ môn Xây dựng công trình quốc phòng, Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Phòng Sau đại học - Học viện Kỹ thuật Quân sự đã tạo mọi điều kiện thuận lợi, hợp tác trong quá trình nghiên cứu. Tác giả xin trân trọng cảm ơn GS.TSKH Nguyễn Đông Anh, TS Lê Anh Tuấn đã cung cấp cho tác giả nhiều tài liệu quý hiếm, các kiến thức khoa học hiện đại và nhiều lời khuyên bổ ích, có giá trị đích thực.

Tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn đối với những người thân thương trong gia đình đã đồng lòng, động viên, quan tâm và chia sẻ những khó khăn với tác giả, giúp đỡ tác giả trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Trân trọng!

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT	vi
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU	vii
DANH MỤC CÁC BẢNG	ix
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ	x
MỞ ĐẦU	1
Chương 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU.....	7
1.1. Đặt vấn đề.....	7
1.2. Tổng quan về các giải pháp chính để giảm dao động.....	8
1.2.1. Các giải pháp về hình học.....	9
1.2.2. Các giải pháp về kết cấu	10
1.2.3. Giải pháp cách ly nền.....	10
1.2.4. Giải pháp sử dụng các TBTTNL.....	11
1.2.5. Giải pháp điều khiển tích cực, nửa tích cực.....	11
1.3. Phương pháp sử dụng các TBTTNL	11
1.4. Tổng quan về phương pháp tính toán công trình chịu tải trọng ngẫu nhiên sử dụng TBTTNL TMD.....	12
1.4.1. Giới thiệu về TMD.....	12
1.4.2. Tình hình nghiên cứu trên thế giới về tính toán công trình chịu tải trọng ngẫu nhiên có sử dụng TBTTNL TMD	14
1.4.3. Tình hình nghiên cứu trong nước về tính toán công trình chịu tải trọng ngẫu nhiên nhưng không sử dụng TBTTNL.....	19
1.4.4. Tình hình nghiên cứu trong nước về tính toán công trình có sử dụng TBTTNL không chịu tải trọng ngẫu nhiên	22
1.4.5. Tình hình nghiên cứu trong nước về tính toán công trình có sử dụng TBTTNL chịu tải trọng ngẫu nhiên	24
1.5. Nghiên cứu về Mạng Nơ ron nhân tạo và ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong nghiên cứu dao động công trình.....	26
1.6. Nhận xét các kết quả chính đã đạt được và những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu.....	29

1.7. Những nội dung chính của luận án cần tập trung giải quyết	30
1.8. Kết luận chương 1	30
Chương 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT QUÁ TRÌNH NGẪU NHIÊN VÀ THUẬT TOÁN PHẦN TỬ HỮU HẠN TÍNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA HỆ KẾT CẤU DẦM, KHUNG KHÔNG GIAN CÓ LẮP TBTTNL CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NGẪU NHIÊN	32
2.1. Cơ sở lý thuyết của quá trình ngẫu nhiên	32
2.1.1. Đại lượng ngẫu nhiên và các đặc trưng xác suất của nó.....	32
2.1.2. Một số hàm phân phối xác suất thường gặp	35
2.1.3. Quá trình ngẫu nhiên.....	37
2.1.4. Quá trình ngẫu nhiên dừng.....	43
2.1.5. Hàm mật độ phổ	47
2.2. Công thức phần tử hữu hạn tính toán cho dầm chịu uốn.....	53
2.2.1. Phần tử dầm không có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD	54
2.2.2. Phần tử dầm có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD	60
2.3. Công thức phần tử hữu hạn tính toán khung không gian.....	61
2.3.1. Khung không gian không có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD.....	61
2.3.2. Khung không gian có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD.....	68
2.4. Thuật toán giải phương trình dao động cưỡng bức của kết cấu chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên	74
2.5. Chương trình tính và kiểm tra độ tin cậy của chương trình.....	75
2.5.1. Giới thiệu chương trình tính.....	75
2.5.2. Kiểm tra độ tin cậy bằng bài toán dao động riêng	76
2.6. Kết luận	78
Chương 3. KHẢO SÁT MỘT SỐ YẾU TỐ ĐẾN ĐÁP ỨNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA HỆ KẾT CẤU DẦM, KHUNG KHÔNG GIAN CÓ LẮP TBTTNL CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NGẪU NHIÊN	79
3.1. Khảo sát ảnh hưởng của một số thông số đến dao động riêng của kết cấu có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng.....	79
3.1.1. Bài toán khảo sát đối với dầm có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng ...	79
3.1.2. Bài toán khảo sát đối với khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng	87
3.2. Khảo sát ảnh hưởng của một số thông số đến đáp ứng động lực học của	

dầm, khung không gian chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên	89
3.2.1. Một số đặc trưng quan trọng của quá trình ngẫu nhiên	89
3.2.2. Bài toán động lực học của dầm chịu tải trọng ngẫu nhiên.....	91
3.2.3. Bài toán động lực học của khung không gian chịu tải trọng ngẫu nhiên	95
3.3. Kết luận	98
Chương 4. MẠNG NƠ RON NHÂN TẠO VÀ ÁP DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO	99
4.1. Cơ sở lý thuyết mô hình trí tuệ nhân tạo.....	100
4.2. Mạng nơ ron nhân tạo	101
4.2.1. Nơron và mạng nơron	101
4.2.2. Mạng truyền thẳng đa tầng.....	107
4.2.3. Các kỹ thuật trong huấn luyện mạng nơron.....	110
4.2.4. Thiết kế mạng nơ ron cho các ứng dụng.....	112
4.3. Áp dụng trí tuệ nhân tạo vào dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu	114
4.4. Áp dụng trí tuệ nhân tạo vào dự đoán thông số tối ưu của TMD	120
4.5. Kết luận chương 4	122
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	123
NHỮNG CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ	125
TÀI LIỆU THAM KHẢO	126
PHỤ LỤC CHƯƠNG TRÌNH TÍNH	

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

3d - TMD	Three Dimensional Pendulum Tuned Mass Damper
AI	Artificial Intelligence
ANFIS	Adaptive Network Fuzzy Inference System
ANN	Artificial Neural Network
CN	Công nghiệp
DDCH	Dao động có hại
ĐLNN	Đại lượng ngẫu nhiên
d - MTMD	Distributed Multiple Tuned Mass Damper
FFT	Fast Fourier Transform
PSD	Power Spectral Density
PTHH	Phân tử hữu hạn
QTNN	Quá trình ngẫu nhiên
TBTTNL	Thiết bị tiêu tán năng lượng
TLCD	Tuned Liquid Column Damper
TMD	Tuned Mass Damper
TTNN	Tải trọng ngẫu nhiên
LATS	Luận án tiến sĩ

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

A	Ma trận hệ số
A_e	Công của ngoại lực, của lực quán tính và của lực cản
B	Ma trận vi phân hàm dạng
C	Ma trận cản tổng thể
c	Hệ số cản trên một đơn vị độ dài dầm
c_e	Ma trận cản phần tử
D	Ma trận vật liệu
D_{QQ_j}	Phương sai của đáp ứng
E	Mô đun đàn hồi của vật liệu,
E, G	Mô đun đàn hồi và mô đun trượt của vật liệu
F	Diện tích mặt cắt ngang của dầm, thanh
f_T	Lực tập trung
I_y	Mô men quán tính của mặt cắt ngang dầm
I_y, I_z	Mô men quán tính của tiết diện đối với các trục y và z trong hệ tọa độ địa phương.
J_p	Mô men quán tính độ cực của tiết diện
K	Ma trận độ cứng tổng thể của kết cấu
k_e	Ma trận độ cứng phần tử
H (ω)	Ma trận hàm truyền của hệ
M	Ma trận khối lượng tổng thể
m	Khối lượng trên đơn vị độ dài dầm
m_e	Ma trận khối lượng phần tử
m_e^{pb}	Ma trận khối lượng phân bố
m_{pb}	Ma trận khối lượng phân bố trên một đơn vị phần tử thanh
m_T	Khối lượng trong hệ giảm dao động TMD
m_p	Mô men quán tính của m trên một đơn vị chiều dài thanh

$\mathbf{N}_u, \mathbf{N}_v, \mathbf{N}_w$	Ma trận hàm dạng
$\mathbf{p}(x, t)$	Véc tơ lực phân bố trên phần tử
$\mathbf{p}_e$	Véc tơ lực nút phần tử thanh
$\mathbf{P}_e(t)$	Véc tơ lực nút phần tử
$\mathbf{p}_{pb}(x, t)$	Véc tơ lực phân bố trên một đơn vị phần tử thanh
$\mathbf{p}_w$	Tải trọng phân bố trên đơn vị độ dài dầm
$\mathbf{p}_u, \mathbf{p}_v, \mathbf{p}_w, \mathbf{p}_\varphi$	Lực phân bố trên một đơn vị chiều dài thanh
$\mathbf{Q}, \mathbf{F}$	Véc tơ chuyển vị tổng thể và véc tơ lực tổng thể của kết cấu
$\mathbf{q}$	Véc tơ chuyển vị nút của phần tử thanh
$\mathbf{q}_e$	Véc tơ chuyển vị nút phần tử thanh trong hệ tọa độ địa phương
$\bar{\mathbf{q}}_e$	Véc tơ chuyển vị nút phần tử thanh trong hệ tọa độ tổng thể
$\mathbf{S}_{FF}(\omega)$	Ma trận phổ của đầu vào
$\mathbf{S}_{QQ}(\omega)$	Ma trận phổ đầu ra
$\mathbf{T}_e$	Ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ địa phương sang hệ tọa độ tổng thể
u, v, w	Các chuyển vị thẳng dọc theo các trục tọa độ x, y, z
$S_{xx}(\omega)$	Mật độ phổ tại tần số ω đối với mỗi thể hiện $x(t)$.
w_T	Chuyển vị của khối lượng m_T trong hệ giảm dao động TMD
$X_T(\omega)$	Biến đổi Fourier của hàm $x(t)$.
φ	Góc xoay quanh trục x của dầm
θ_z, θ_y	Các góc xoay quanh của mặt cắt ngang dầm quanh các trục z và y
$(\sigma_{Q_i Q_j})^2$	Bình phương của độ lệch chuẩn

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 2.1. So sánh ba tần số dao động riêng đầu tiên.....	78
Bảng 3.1. Sự thay đổi của các tần số dao động riêng đầu tiên theo tỷ số m_{T2}/m_0 .	80
Bảng 3.2. Sự thay đổi của ba tần số dao động riêng đầu tiên theo c_T .	81
Bảng 3.3. Sự thay đổi của ba tần số dao động riêng đầu tiên theo k_T .	82
Bảng 3.4. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên	83
Bảng 3.5. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu theo c_{T1} .	84
Bảng 3.6. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu theo k_{T1} .	85
Bảng 3.7. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của cơ hệ theo tỷ số m_T/m_0 .	87
Bảng 3.8. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của cơ hệ theo k_T .	88
Bảng 3.9. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của cơ hệ theo c_T .	88
Bảng 3.10. Giá trị các tham số của TMD khi lắp tại $a/2$ và tại vị trí $a/4$.	92
Bảng 3.11. Kết quả S_{wc}/S_{wc0} phụ thuộc vào khối lượng m_{T2} .	93
Bảng 3.12. Kết quả S_{wc}/S_{wc0} phụ thuộc vào số lượng TMD	94
Bảng 3.13. Giá trị các tham số của TMD khi lắp một và ba TMD.....	94
Bảng 4.1. Các thông số đầu vào và đầu ra	118
Bảng 4.2. Các tham số đầu vào và đầu ra của mô hình	119
Bảng 4.3. Giá trị đầu vào và giá trị dự đoán thông số tối ưu của TMD đối với dầm chịu tải trọng ngẫu nhiên.....	121

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Hình 0.1. Công trình cầu Long Biên – Hà Nội	1
Hình 0.2. Công trình ngọn hải đăng trên đảo Đá Lát - Trường Sa.	2
Hình 0.3. Cầu Chương Dương – Hà Nội.	3
Hình 0.4. Công trình nhà dầm DKI.....	4
Hình 1.1. Một số mô hình TMD lắp vào kết cấu chính.	12
Hình 1.2. Mô hình dao động bậc 2 chịu kích động điều hoà.....	13
Hình 1.3. Hệ thống con lắc điều hòa (tuned mass damper).....	14
Hình 1.4. Một số công trình thực có gắn TMD ở Mỹ.....	15
Hình 2.1. Các thể hiện của một quá trình ngẫu nhiên.....	38
Hình 2.2. Quan hệ giữa phương sai và mật độ phổ.....	48
Hình 2.3. Phổ của quá trình ngẫu nhiên ồn trắng.....	51
Hình 2.4. Hai trường hợp đặc biệt của quá trình ngẫu nhiên ồn trắng	51
Hình 2.5. Phổ của một quá trình dải hẹp.....	52
Hình 2.6. Phổ dải hẹp điển hình và quá trình tương ứng.....	53
Hình 2.7. Phần tử dầm hai điểm nút chịu uốn.....	54
Hình 2.8. Biến dạng của phần tử dầm chịu uốn.....	57
Hình 2.9. Phần tử dầm hai điểm nút và tương tác giữa TMD với dầm	60
Hình 2.10. Mô hình phần tử thanh không gian	61
Hình 2.11. Các thành phần chuyển vị của phần tử thanh không gian (a) và lực phân bố tác dụng lên phần tử thanh không gian (b).....	62
Hình 2.12. Các thành phần chuyển vị trong hệ tọa độ địa phương	69
Hình 2.13. Sơ đồ khối chương trình tính	75
Hình 2.14. Dầm có 1 TMD	76
Hình 2.15. Hệ khung không gian	77
Hình 2.16. Sơ đồ lưới chia phần tử khung không gian	77
Hình 3.1. Dầm có gắn một TMD	79
Hình 3.2. Dầm gắn ba TMD.....	80

Hình 3.3. Mô hình hệ giàn không gian với thiết bị tiêu tán năng lượng (TMD).	87
Hình 3.4. Tải ngẫu nhiên biến đổi trong miền thời gian.....	90
Hình 3.5. Dầm có 1 TMD lắp tại vị trí $a/4$	92
Hình 3.6. Đáp ứng S_{wc} phụ thuộc vị trí TMD	92
Hình 3.7. Phổ đáp ứng chuyển vị của điểm giữa dầm phụ thuộc khối lượng m_{T2} ...	93
Hình 3.8. Phổ đáp ứng chuyển vị của điểm giữa dầm phụ thuộc số lượng TMD ...	94
Hình 3.9. Đáp ứng S_{wc} phụ thuộc vào số lượng TMD	95
Hình 3.10. Đáp ứng phổ chuyển vị khi m_T thay đổi.....	96
Hình 3.11. Đáp ứng phổ chuyển vị khi $m_T = 10\%m_0$ và khi không có TMD .	96
Hình 3.12. Đáp ứng phổ chuyển vị khi k_T thay đổi	97
Hình 3.13. Đáp ứng phổ chuyển vị khi c_T thay đổi	97
Hình 4.1. Một neuron.....	102
Hình 4.2. Đồ thị hàm kích hoạt bậc thang.	103
Hình 4.3. Đồ thị hàm kích hoạt Sign.....	103
Hình 4.4. Đồ thị hàm kích hoạt tuyến tính.....	104
Hình 4.5. Đồ thị hàm kích hoạt sigmoid.....	104
Hình 4.6. Hàm tanh.	105
Hình 4.7. Các kiến trúc mạng	106
Hình 4.8. Kiến trúc các mạng truyền thẳng đa tầng.....	107
Hình 4.9. Sơ đồ khối chương trình áp dụng AI.....	115
Hình 4.10. Mô hình mạng trí tuệ nhân tạo với 4 tham số đầu vào	116
Hình 4.11. Mô hình mạng trí tuệ nhân tạo với 3 tham số đầu vào	117
Hình 4.12. Mô hình mạng trí tuệ nhân tạo với 6 tham số đầu vào và 1 tham số đầu ra	121

MỞ ĐẦU

Nghiên cứu về dao động luôn gắn chặt với kỹ thuật hiện đại và đóng vai trò quan trọng trong thiết kế, thi công xây dựng các công trình, cũng như trong đánh giá ổn định, độ bền của công trình. Đây là nhiệm vụ phức tạp vì có rất nhiều yếu tố có thể ảnh hưởng đáng kể đến hệ kỹ thuật hoặc kết cấu mà rất khó xác định rõ ràng. Chẳng hạn, trong việc thiết kế tòa nhà cao tầng, các yếu tố ảnh hưởng đến độ an toàn là nền đất, vật liệu xây dựng, gió và động đất. Các yếu tố này có thể gây ra các ứng xử có tính chất thay đổi bất thường làm cho công trình nhanh xuống cấp, hư hỏng, thậm chí bị phá hủy đột ngột.



Hình 0.1. Công trình cầu Long Biên - Hà Nội

Có rất nhiều hệ kết cấu chịu các tác động ngẫu nhiên như vậy, chẳng hạn như các kết cấu trên biển chịu tác động của gió và các đợt sóng ngẫu nhiên, các phương tiện giao thông chịu tác động ngẫu nhiên gây ra bởi mặt đường không bằng phẳng, ... Các hệ phải được thiết kế để chịu được, với xác suất nhất định, các mức độ khắc nghiệt có thể có của kích động mà chúng gặp trong suốt quá trình vận hành, do đó ảnh hưởng của các kích động ngẫu nhiên rất được quan tâm, coi trọng.

Các số liệu thống kê gần đây cho thấy, trong thế kỷ 21, công nghệ giảm dao động có hại là một trong những quan tâm hàng đầu của rất nhiều cơ quan nghiên cứu khoa học, cơ sở nghiên cứu và ứng dụng... Dao động có hại

(DDCH) xuất hiện trong nhiều lĩnh vực: Phương tiện giao thông chịu kích động mặt đường; tàu thủy và các công trình ngoài khơi chịu tác động sóng gió; các tháp vô tuyến, cao ốc chịu tác động gió và động đất; các cầu treo chịu tải trọng gió bão; các thiết bị, tuốc bin hoạt động với tốc độ cao... các DDCH này nguy hiểm và cần được quan tâm thích đáng vì 3 lý do: Sự tăng lên về quy mô kết cấu, tốc độ máy móc, cường độ kích động của ngoại tải; Sự cấp thiết về việc giảm giá thành các công trình lớn; Yêu cầu cao về an toàn cho các công trình quan trọng.



Hình 0.2. Công trình ngọn hải đăng trên đảo Đá Lát - Trường Sa.

Trước đây, phương pháp phổ biến giảm dao động cho công trình là tăng cường độ cứng. Tuy nhiên, phương pháp này gặp phải vấn đề về chi phí và độ phức tạp. Vì thế, hiện nay thế giới đã phát triển công nghệ sử dụng các thiết bị tiêu tán năng lượng (TBTTNL) để giảm dao động. Việc sử dụng các TBTTNL có nhiều ưu điểm như hiệu quả kinh tế, tăng tuổi thọ công trình, cài đặt và thay thế đơn giản. Với hiệu quả đem lại cả về kỹ thuật và kinh tế, công nghệ sử dụng các thiết bị TBTTNL đã và đang là hướng triển vọng của thế giới, là một phương pháp hiệu quả dùng để giảm dao động công trình.

Hiện nay, việc xây dựng các tòa nhà cao tầng, các công trình giao thông như tuyến tàu cao tốc...đang đặt ra hàng loạt vấn đề cần được nghiên cứu và ứng dụng, trong đó có việc phát triển các TBTTNL để dập tắt các dao động có

hại trong đó có các dao động do chịu tác dụng của kích động ngẫu nhiên nhằm nâng cao chất lượng và tuổi thọ công trình. Thật vậy, việc thành phố Hà Nội đang tiến hành xây dựng các tuyến đường sắt trên cao, do khoảng cách giữa các ga ngắn, nên gia tốc của đoàn tàu rất lớn, khiến cho việc giảm rung lắc trở nên quan trọng. Việc xây dựng các cây cầu cáp treo như cầu Mỹ Thuận, cầu Kiên, cầu Đà Nẵng, cầu Bãi Cháy, cầu Nhật Tân đều đòi hỏi phải nghiên cứu dập tắt các dao động có hại bằng các TBTTNL. Nhiều cây cầu đã xây dựng từ lâu, bị quá tải nên thường chịu các dao động quá tiêu chuẩn cho phép khiến cho việc giao thông đi lại gặp khó khăn, nguy hiểm cần có các biện pháp khắc phục.



Hình 0.3. Cầu Chương Dương - Hà Nội.

Trong lĩnh vực các công trình liên quan đến an ninh - quốc phòng hiện nay, việc sửa chữa gia cố các công trình DK trên biển đang rất được quan tâm. Do việc giảm ma sát giữa các cọc trụ và nền san hô, các công trình DK hiện nay bị dao động lớn khiến cho chất lượng và tuổi thọ các công trình ngày càng giảm. Việc sử dụng các TBTTNL cho các công trình này có khả năng mở ra một phương án sửa chữa hiệu quả. Các công trình quân sự nhất là các công trình ven biển, trên đảo và vùng bãi cạn... là những công trình phục vụ cho chiến đấu, các công trình này có thể chịu tác dụng của các kích động ngẫu nhiên. Do đó, ta có thể sử dụng các TBTTNL để giảm dao động công trình và phòng tránh tác dụng vượt tải cho người, các trang thiết bị đặt trong công trình. Ngoài ra, nước ta đang phát triển công nghiệp đóng tàu biển trọng tải lớn, công nghiệp

dầu khí, giàn khoan biển... Tất cả các lĩnh vực này đều có nhu cầu áp dụng các biện pháp giảm những dao động có hại.

Để dễ tính toán các cây cầu, tòa nhà cao tầng, người ta có thể sử dụng nhiều mô hình khác nhau, nhưng mô hình đơn giản và được sử dụng nhiều là mô hình dạng dầm, khung không gian.



Hình 0.4. Công trình nhà dầm DKI.

Từ những phân tích trên, cho thấy đề tài *“Phân tích dao động kết cấu hệ dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên”* có ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn.

Mục đích và nhiệm vụ nghiên cứu của luận án:

+ **Mục đích của luận án:** Sử dụng thuật toán phương pháp phần tử hữu hạn, thiết lập phương trình dao động của kết cấu hệ dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tác dụng của tải trọng động ngẫu nhiên. Đồng thời, sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo AI để dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu, dự đoán thông số tối ưu của TBTTNL (TMD - Tuned Mass Damper), đây là tiền đề để áp dụng giải quyết những vấn đề khác trong cơ học, rút ra những kết luận có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

+ Nhiệm vụ nghiên cứu bao gồm:

- Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, thiết lập phương trình dao động của hệ kết cấu dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng (TMD) chịu tác dụng của tải trọng động ngẫu nhiên.

- Xây dựng chương trình tính toán dao động của hệ kết cấu dầm, khung không gian có lắp TBTTNL chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên.

- Phân tích đáp ứng dao động cho dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên, khảo sát số trên nhiều lớp bài toán khác nhau để đưa ra các nhận xét có ý nghĩa.

- Sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo để dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu, dự đoán thông số tối ưu của TBTTNL (TMD) đây là tiền đề để áp dụng giải quyết những vấn đề khác trong cơ học.

- Trên cơ sở kết quả tính toán là tài liệu tham khảo có giá trị trong việc thiết kế và ứng dụng các kết cấu có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên trong thực tế.

+ **Đối tượng nghiên cứu:** Hệ kết cấu dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng (TMD) chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên.

+ **Phạm vi nghiên cứu:** khảo sát số đáp ứng động lực học của hệ kết cấu dầm, khung không gian chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên, trong đó kết cấu có lắp thêm một hoặc nhiều thiết bị tiêu tán năng lượng.

+ **Phương pháp nghiên cứu:** Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết để tính toán dao động của kết cấu dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên. Áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để xây dựng thuật toán, chương trình tính toán và khảo sát số các lớp bài toán. Đồng thời áp dụng trí tuệ nhân tạo AI.

+ **Cấu trúc của luận án:** Gồm phần mở đầu, bốn chương, phần kết luận và kiến nghị, tài liệu tham khảo.

Mở đầu: Trình bày tính cấp thiết của luận án và cấu trúc của luận án

Chương 1: Tổng quan vấn đề nghiên cứu

Trình bày tổng quan về tình hình nghiên cứu phân tích dao động công trình chịu kích động ngẫu nhiên, nghiên cứu về giảm dao động công trình có sử dụng TBTTNL mà cụ thể là sử dụng các TMD, các kết quả đạt được từ các công trình đã công bố trong nước và nước ngoài. Trên cơ sở những vấn đề cần tiếp tục

nghiên cứu, đề xuất mục tiêu, nội dung và phương pháp nghiên cứu của luận án.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết của quá trình ngẫu nhiên và thuật toán phần tử hữu hạn tính động lực học của hệ kết cấu dầm, khung không gian có lắp TBTTNL chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên.

Đưa ra khái niệm cơ bản của quá trình ngẫu nhiên. Trình bày lý thuyết về các đặc trưng của quá trình ngẫu nhiên. Các lý thuyết trình bày trong chương này là cơ sở toán học tính toán các đáp ứng của cơ hệ (dầm, khung không gian) chịu tải trọng ngẫu nhiên.

Xây dựng được thuật toán PTHH và chương trình tính toán cho bài toán tính toán động lực học của kết cấu khung không gian, dầm chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên.

Thiết lập mô hình phần tử hữu hạn, tính toán động lực học cho kết cấu khung không gian, dầm chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên, trong đó kết cấu có lắp thêm TBTTNL TMD.

Chương 3: Khảo sát một số yếu tố đến đáp ứng động lực học của hệ kết cấu dầm, khung không gian có lắp TBTTNL chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên.

Khảo sát ảnh hưởng của một số thông số đến dao động riêng của hệ kết cấu dầm, khung không gian có lắp TBTTNL.

Khảo sát ảnh hưởng của một số thông số đến đáp ứng động lực học của hệ kết cấu dầm, khung không gian có lắp TBTTNL chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên.

Chương 4. Mạng Nơron nhân tạo và áp dụng trí tuệ nhân tạo

Đưa ra lý thuyết về mạng Nơron nhân tạo.

Áp dụng trí tuệ nhân tạo vào dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu hệ dầm, khung không gian và dự đoán thông số tối ưu của TBTTNL TMD.

Kết luận và kiến nghị

Trình bày những kết quả chính, những đóng góp mới của luận án và các kiến nghị.

Tài liệu tham khảo

Chương 1

TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Đặt vấn đề

Một chuyển động lặp lại trong một khoảng thời gian được gọi là dao động. Sự đong đưa của con lắc là ví dụ cơ bản về hiện tượng dao động. Lý thuyết dao động liên quan đến việc nghiên cứu chuyển động dao động của một vật và lực tác dụng lên nó.

Dao động là một hiện tượng rất phổ biến trong tự nhiên và trong kỹ thuật. Hiện tượng dao động xuất hiện trong rất nhiều lĩnh vực của khoa học, không chỉ trong vật lý, cơ học, mà còn trong điện, điện tử, hóa học, sinh học, thiên văn học và trong lĩnh vực xây dựng... Các tòa nhà cao tầng, các cây cầu, các phương tiện giao thông (ô tô, tàu thủy, máy bay,...),... là các hệ dao động mà chúng ta hay gặp trong cơ khí, xây dựng và giao thông. Nếu không được kiểm soát (điều khiển), dao động có thể dẫn đến những tình huống hư hỏng. Chẳng hạn, dao động của máy công cụ hoặc máy công cụ bị rơi (chuyển động lạch cách) có thể dẫn đến gia công không đúng các chi tiết. Sự phá hoại kết cấu có thể xảy ra do các ứng suất động lớn phát triển trong các trận động đất hoặc thậm chí dao động do gió gây ra. Những rung động quá mức của máy bơm, máy nén và các máy công nghiệp khác có thể gây ra dao động của cấu trúc xung quanh, dẫn đến hoạt động kém hiệu quả cho máy, đồng thời tiếng ồn mà chúng tạo ra có thể gây khó chịu cho con người.

Các nghiên cứu về dao động luôn gắn chặt với kỹ thuật hiện đại và đóng vai trò quan trọng trong thiết kế, chế tạo, đánh giá ổn định, độ bền của công trình. Đây là nhiệm vụ phức tạp vì có nhiều yếu tố ngẫu nhiên có ảnh hưởng đáng kể đến hệ kỹ thuật hoặc kết cấu, khó xác định nó rõ ràng. Có rất nhiều hệ kết cấu chịu các tác động ngẫu nhiên như các kết cấu trên biển chịu tác động của gió và sóng, các phương tiện giao thông chịu tác động ngẫu nhiên gây ra bởi mặt đường không bằng phẳng,... Vì các hệ đều được thiết kế để chịu được, với xác suất nhất định, các mức độ khắc nghiệt ngẫu nhiên có của kích động

mà chúng có thể gặp trong suốt quá trình vận hành, nên ảnh hưởng của các kích động ngẫu nhiên luôn được quan tâm. Do đặc điểm của các tải trọng này là ngẫu nhiên theo thời gian, nên các bài toán dao động được mô hình hóa dựa trên lý thuyết xác suất và quá trình ngẫu nhiên. Do kích động là các lực ngẫu nhiên nên các đáp ứng như dịch chuyển, vận tốc cũng có tính chất ngẫu nhiên. Bởi vậy, trong phân tích dao động ngẫu nhiên, kết quả của các đáp ứng được biểu diễn dưới dạng trung bình theo nghĩa xác suất. Sự tồn tại nghiệm chính xác rất quan trọng, thứ nhất nó cho phép khẳng định tính đúng đắn của mô hình được thiết lập khi đối chiếu với các số liệu đo đạc trong thực tế, thứ hai nó cho phép ước lượng được các thông số cần điều chỉnh và điều khiển trong các bài toán thiết kế sơ bộ, thiết kế chính xác hay kiểm tra.

Quá trình dao động của công trình là một quá trình tích lũy, chuyển hoá và tiêu tán năng lượng do các tác động bên ngoài cũng như do các nguyên nhân bên trong công trình gây ra. Vấn đề đặt ra là các kỹ sư xây dựng cần thiết lập như thế nào vào quá trình biến đổi năng lượng đó, để có thể khống chế dao động của công trình trong giới hạn cho phép. Từ đó, các giải pháp chống dao động cho công trình ra đời cùng với các thiết bị hoạt động theo các cơ chế khác nhau.

Trong thời đại ngày nay, kỹ thuật điều khiển dao động công trình đã trở thành một lĩnh vực ngày càng được các kỹ sư xây dựng quan tâm. Dựa trên thành tựu khoa học kỹ thuật của nhiều ngành khác nhau như vật liệu, năng lượng, cơ điện tử, cơ học, điều khiển học... khá nhiều giải pháp chống dao động đã được nghiên cứu và phát triển.

1.2. Tổng quan về các giải pháp chính để giảm dao động

Dao động và va chạm là hai hiện tượng thường gặp trong tự nhiên và kỹ thuật. Dao động và va chạm có thể có ích hoặc có hại tùy thuộc vào trường hợp cụ thể. Đối với các hệ kỹ thuật, rất nhiều dạng dao động và va chạm có hại.

Trong lĩnh vực xây dựng công trình quốc phòng, các công trình như sở chỉ huy chịu tác dụng của sóng xung kích..., nhà giàn DKI, các thiết bị quân sự như các loại súng cỡ lớn hoặc xe chở súng đều cần được giảm giạt để tăng

độ chính xác và tăng hiệu quả chiến đấu, các tàu chiến cần có hệ thống cân bằng và ổn định tự động vì các loại tàu này có sự thay đổi vận tốc và quỹ đạo rất lớn. Các hệ thống cân bằng và ổn định đều dựa trên kỹ thuật hiện đại về chống các dao động có hại.

Trong lĩnh vực xây dựng dân dụng, các công trình hiện đại ngày càng cao và dài nên khả năng dao động càng lớn. Những loại công trình cao, dài, nhẹ và mảnh trở nên rất phổ biến như các tháp vô tuyến, các cao ốc, các cầu nhịp lớn, cầu dây văng, cầu treo, ống khói, các tháp cầu trong quá trình xây dựng... Đối với loại công trình này, các tải trọng động như tải trọng do gió, dòng chảy, sóng, động đất, phương tiện giao thông, va đập..., sẽ gây ra các dao động nguy hiểm cho công trình. Các phương pháp giảm dao động và va chạm thường dựa trên cơ sở giảm hoặc cách ly lực kích động, thay đổi tần số riêng để tránh cộng hưởng, tăng cản cho cơ hệ.

Một số giải pháp chính để giảm dao động cụ thể như sau [4], [5]:

1.2.1. Các giải pháp về hình học

Đây là giải pháp áp dụng cho các loại tải trọng như sóng, gió. Vì tải trọng sóng, gió phụ thuộc vào diện tích và hình dạng mặt chắn nên nếu thay đổi những yếu tố này thì có thể giảm được tác động của sóng gió. Ví dụ các nhà cao tầng có thể sử dụng các giải pháp như vát góc, tạo các lỗ thoát gió, tạo các rìa, sườn... để giảm hệ số khí động từ đó sẽ giúp làm giảm các đáp ứng.

- Kích thước nhà phải hợp lý, tránh nhà mảnh và dài. Bố trí mặt bằng các bộ phận cần hợp lý, nên bố trí mặt bằng nhà đơn giản dạng chữ nhật, tránh mặt bằng có thể tạo túi hứng gió như mặt bằng hình chữ L, chữ T và chữ U...

- Khi bố trí nhà tập trung thành cụm nên bố trí các nhà so le tránh bố trí thẳng hàng vì dễ hình thành túi gió hoặc luồng gió xoáy.

- Có thể bố trí các cửa sổ tường đối diện nhau, có thể bố trí cửa trên mái để gió vào nhà không tạo không gian nhà thành túi gió. Từ đó có thể giảm được khả năng tốc mái và áp lực của gió tác dụng lên tường.

- Ngoài ra có thể điều chỉnh hình dạng của các tường bao che bên ngoài

để giảm tác động của tải trọng gió lên tường như tường chắn hình răng cưa, tường chắn có lỗ, tường chắn góc.

1.2.2. Các giải pháp về kết cấu

1.2.2.1. Tăng khối lượng kết cấu

Việc tăng khối lượng sẽ làm giảm gia tốc do các lực sinh ra dưới tác dụng của tải trọng sóng, gió... Tuy nhiên, việc tăng khối lượng kết cấu không có tác dụng với trường hợp tải gia tốc nền.

Dù sao, giải pháp tăng khối lượng kết cấu là một giải pháp ít được sử dụng vì làm tăng giá thành vật liệu cũng như giá thành móng. Hơn thế nữa, khi xảy ra động đất thì tăng khối lượng là một giải pháp có nhiều rủi ro.

1.2.2.2. Tăng độ cứng k cho kết cấu

Tăng độ cứng kết cấu có thể được thực hiện bằng việc sử dụng các dầm, cột với đường kính lớn hơn, sử dụng các thanh giằng, dầm chia, tường chống trượt, trụ đỡ.

Tăng độ cứng sẽ làm giảm thành phần chuyển dịch tĩnh, làm giảm chuyển dịch và gia tốc. Tuy nhiên, giải pháp này rất ít có hiệu quả giảm gia tốc nếu cần quá bé, ít có tác dụng giảm gia tốc trong dao động tự do. Ngoài ra còn góp phần làm tăng tần số dao động.

1.2.3. Giải pháp cách ly nền

Mục đích là giảm độ cứng kết cấu. Đây là giải pháp áp dụng đối với tải dạng gia tốc nền. Theo đó các thiết bị cách ly được đặt giữa kết cấu với nền, qua đó làm giảm tác động của tải gia tốc nền theo phương ngang tác động vào kết cấu. Giải pháp sử dụng các thiết bị cách ly được sử dụng rất rộng rãi để giúp kết cấu có khả năng chống lại động đất. Các thiết bị cách ly cần có 3 tính chất chủ yếu sau:

- Đủ cứng theo phương thẳng đứng để chịu được tất cả các tải do trọng lực gây ra;
- Đủ cứng khi chịu tải trọng ngang với cường độ nhỏ như tải gió;

- Đủ mềm khi chịu tải trọng ngang với cường độ lớn như động đất.

Tuy nhiên, giải pháp này chỉ áp dụng với trường hợp tải gia tốc nền như động đất. Không giảm được đáp ứng tĩnh.

1.2.4. Giải pháp sử dụng các TBTTNL

Mục đích là nhằm làm tăng độ cứng kết cấu. Các TBTTNL không chỉ có hiệu quả giảm dao động cả chuyển dịch lẫn gia tốc mà còn có tác dụng tăng độ tin cậy của thiết kế. Tuy nhiên, không có hiệu quả đối với đáp ứng tĩnh, nếu cứng quá gây hiện tượng cứng quá tới hạn, không giảm được dao động tự do.

1.2.5. Giải pháp điều khiển tích cực, nửa tích cực

Giải pháp này là sử dụng các thiết bị sinh ra các lực được điều khiển, tác động vào kết cấu để giảm dao động. Giải pháp có ưu điểm là có thể đạt được mục tiêu điều khiển tối ưu. Tuy nhiên, công nghệ phức tạp, đòi hỏi các đầu đo trực tuyến, bộ điều khiển tốc độ cao, máy tạo lực lớn và các thuật toán điều khiển ổn định.

1.3. Phương pháp sử dụng các TBTTNL

Các TBTTNL hoạt động trên nguyên tắc năng lượng, được lắp đặt với mục đích hấp thụ và chuyển một phần năng lượng của hệ kết cấu thành dạng năng lượng khác, từ đó làm giảm dao động hoặc va chạm có hại của hệ kết cấu đó. Năng lượng của kết cấu có thể được tiêu tán qua một số hiện tượng:

- Tính đàn nhớt của vật liệu rắn như polime, cao su, ...
- Tính nhớt của chất lỏng như dầu silicon;
- Ma sát giữa các bề mặt vật liệu tiếp xúc;
- Biến dạng dẻo của vật liệu;
- Chuyển động trong từ trường;
- Sự tiêu tán năng lượng của các vật liệu “thông minh” như vật liệu áp điện, chất lỏng từ biến, chất lỏng điện biến, ...

Do sự đa dạng của các hiện tượng tiêu tán năng lượng nên chủng loại của các TBTTNL khá phong phú và phù hợp với những ứng dụng kỹ thuật khác nhau.

Đối với các công trình xây dựng, các TBTTNL có một số ưu điểm chính sau đây:

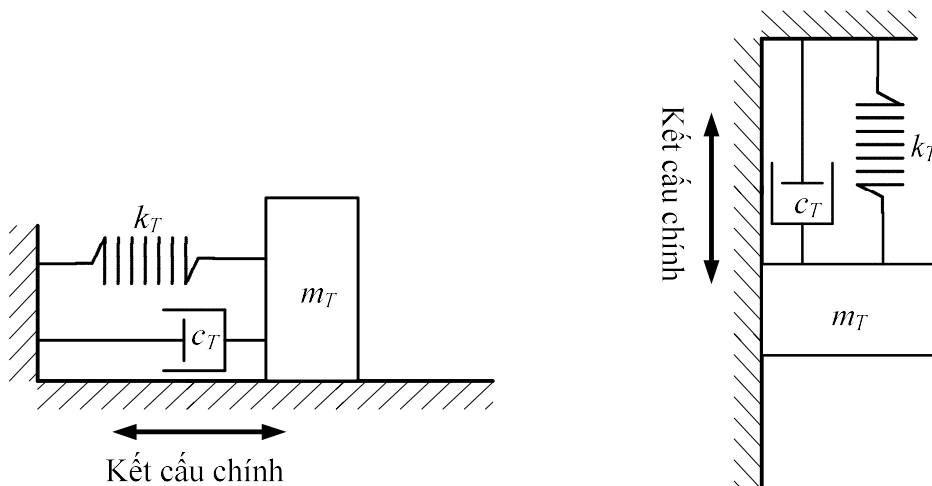
- Hiệu quả về kỹ thuật: các TBTTNL có hiệu quả giảm dao động vì nó được thiết kế tối ưu dựa trên đáp ứng động. Một số TBTTNL, ngoài hiệu quả giảm chuyển dịch còn giảm gia tốc của kết cấu (điều này thông thường khó có thể thực hiện với biện pháp gia cố).

- Hiệu quả về kinh tế: do không làm tăng nhiều khả năng chịu tải của kết cấu và khối lượng không quá lớn, việc bổ sung các TBTTNL không làm thay đổi nhiều đến kết cấu. Trong khi đó, bằng biện pháp gia cố, khối lượng kết cấu thường tăng lên nhiều gây tốn kém.

- Dễ lắp đặt và bảo dưỡng: việc lắp đặt và tháo dỡ các TBTTNL thường không đòi hỏi quá trình thi công quá phức tạp và tốn kém.

1.4. Tổng quan về phương pháp tính toán công trình chịu tải trọng ngẫu nhiên sử dụng TBTTNL TMD

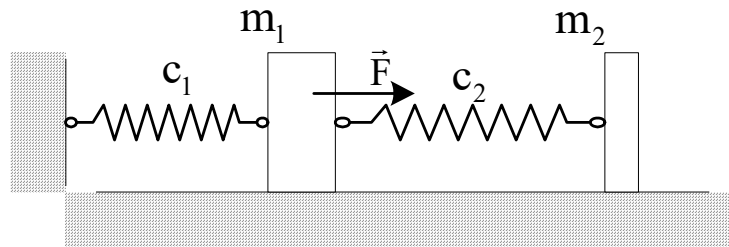
1.4.1. Giới thiệu về TMD



Hình 1.1. Một số mô hình TMD lắp vào kết cấu chính.

Một trong những biện pháp hiệu quả để giảm dao động trong các hệ cơ học là sử dụng các bộ hấp thụ dao động, điển hình là các thiết bị TMD (Tuned Mass Dampers) gồm khối lượng - lò xo - giảm chấn. Trong đó, lò xo có một đầu nối với khối lượng m_T và bộ giảm chấn c_T , một đầu còn lại được nối với kết cấu chính để truyền năng lượng từ kết cấu chính xuống TMD, năng lượng này

được tích tụ trong cả khối lượng và lò xo của TMD, rồi được tiêu tán bằng bộ giảm chấn của TMD (thông qua tiêu hao bởi ma sát của bộ giảm chấn), một số mô hình TMD điển hình chỉ ra như trên hình 1.1.



Hình 1.2. Mô hình dao động bậc 2 chịu kích động điều hoà.

Ý tưởng về sự hấp thụ dao động trong các hệ cơ học được Hermann Frahm [83] đề xuất lần đầu tiên vào năm 1911. Tác giả xét mô hình xích dao động bậc 2 như trên hình 1.2, trong đó m_1 , m_2 lần lượt là khối lượng vật thứ nhất và vật thứ hai; c_1 , c_2 lần lượt là độ cứng lò xo 1 và 2. Có lực điều hoà $F = F_0 \sin(pt)$ đặt vào khối lượng thứ nhất, để dập tắt dao động cưỡng bức của khối lượng này, đặt thêm khối lượng và lò xo thứ 2. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng: nếu chọn các thông số thoả mãn điều kiện $\sqrt{\frac{c_2}{m_2}} = p$ thì năng lượng

chuyển động của vật 1 được truyền sang vật 2 và kết quả là biên độ dao động bình ổn của khối lượng thứ nhất bằng 0.

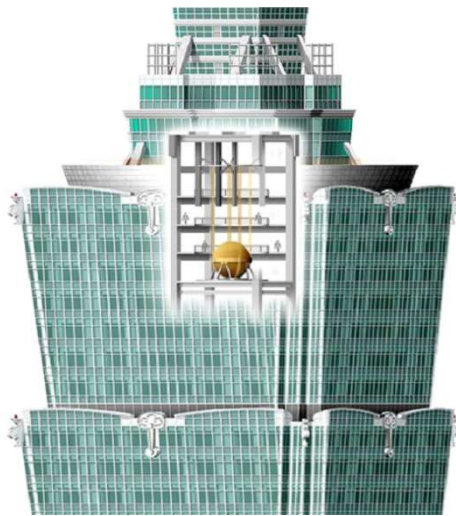
Hệ gồm khối lượng m_2 , lò xo c_2 là một bộ hấp thụ dao động TMD đơn giản nhất. Trong mô hình đã nêu, hệ được dập tắt dao động (vật thứ nhất) và vật hấp thụ dao động (vật thứ hai) đều là những hệ 1 bậc tự do, hệ hỗn hợp là hệ 2 bậc tự do và sự hấp thụ chỉ xảy ra trong các hệ hỗn hợp nhiều bậc tự do. Nhiều nghiên cứu tiếp theo đối với các hệ nhiều bậc tự do cho thấy khả năng các thông số trạng thái (chuyển vị, vận tốc) có thể được triệt tiêu hoặc giảm đáng kể ứng với các thông số thích hợp của bộ phận hấp thụ dao động. Phạm vi ứng dụng của các bộ hấp thụ TMD là rất rộng lớn, có thể là trong các công trình xây dựng, cầu đường sắt cao tốc, cầu dây văng...

1.4.2. Tình hình nghiên cứu trên thế giới về tính toán công trình chịu tải trọng ngẫu nhiên có sử dụng TBTNL TMD

Có nhiều cách khác nhau để giảm dao động của các kết cấu như gia cố các chất làm cứng lên cấu trúc để tăng cường độ cứng tổng thể của nó, sử dụng các vật liệu đặc biệt có cường độ cao, thêm các thiết bị TMD, ... Trong đó, các thiết bị tiêu tán năng lượng như thiết bị TMD được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng kỹ thuật trên thế giới. Đã có nhiều nghiên cứu trên thế giới về các kết cấu sử dụng thiết bị tiêu tán năng lượng.

Phát minh TMD lần đầu tiên được đề xuất bởi Frahm [83], tác giả đã đề xuất, phát minh ra thiết bị tiêu tán năng lượng (giảm dao động) cho các vật rắn.

Trên cơ sở các đề xuất, phát minh của Frahm, tác giả Den [72] đã viết cuốn sách về dao động cơ học, trong đó đã đề cập đến các thiết bị tiêu tán năng lượng, tác giả cũng đã trình bày một tần số tối ưu cổ điển và giảm dao động cho kết cấu dưới tải trọng điều hòa.



Hình 1.3. Hệ thống con lắc điều hòa (tuned mass damper) lắp đặt trên đỉnh tòa nhà Taipei 101 ở Đài Bắc.

Trong bài báo [79], Elias và Matsagar đã trình bày các nghiên cứu mới nhất về điều khiển dao động của kết cấu trong đó sử dụng các bộ giảm chấn điều khiển dạng thụ động. Kết cấu được nghiên cứu chịu tác động của tải trọng gió và động đất, đây là dạng tải trọng có tính chất ngẫu nhiên và khó xác định

quy luật cụ thể. Các thông số cụ thể của bộ TMD được khảo sát chi tiết, kết hợp với các nghiên cứu thực nghiệm.

Nghiên cứu giảm dao động cho tòa nhà cao tầng bằng cách sử dụng các thiết bị tiêu tán năng lượng TMD cũng được chỉ ra trong các công trình [96], [103], [105]. Weisner KB [105] đã đưa ra các tiêu chí tối ưu và ứng dụng TMD ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả giảm dao động, trong đó kết cấu tòa nhà cao tầng chịu tác dụng của tải trọng gió. Venanzi [103] trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế tối ưu của thiết bị tiêu tán năng lượng TMD cho các tòa nhà cao tầng với các thông số ngẫu nhiên, quy trình tối ưu hóa dựa trên kỹ thuật mô phỏng Monte Carlo nâng cao và thuật toán di truyền.



(a)



(b)

a. Tòa nhà điều hành bay ở Washington, b. Tòa nhà ở Boston,

Hình 1.4. Một số công trình thực có gắn TMD ở Mỹ.

Zheng Lu và cộng sự [93] đã trình bày kết quả nghiên cứu giảm dao động cho tòa nhà cao tầng sử dụng thiết bị tiêu tán năng lượng TMD kết hợp giữa bộ giảm chấn truyền thống và bộ giảm chấn dạng hạt của kết cấu tòa nhà cao tầng chịu tác dụng của tải trọng gió. Mô hình tòa nhà được sử dụng trong nghiên cứu có tỷ lệ là 1:200 so với mô hình thực tế. Trong bài báo đưa ra phương pháp phân tích thích hợp dựa trên khái niệm về bộ giảm chấn tác động đơn chiếc tương đương.

Kaynia và cộng sự [90] đã trình bày kết quả nghiên cứu đáp ứng trong

miền thời gian của cơ hệ 1 bậc tự do trong trường hợp có và không có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD. Các tác giả cũng sử dụng phương pháp phân tích tương đương cho thấy các giá trị tỷ lệ đáp ứng được phân tán rộng rãi và tỷ lệ đáp ứng trung bình được đánh giá nhỏ hơn bằng các tính toán dao động ngẫu nhiên.

Tuan và Shang [102] đã trình bày kết quả nghiên cứu điều khiển dao động cho tòa nhà 101 tầng ở Đài Bắc trong đó sử dụng thiết bị tiêu tán năng lượng TMD. Kết cấu chịu tác dụng của tải trọng gió và kích thích địa chấn từ xa. Tác giả đã sử dụng phương pháp PTHH để xây dựng các phương trình và đưa ra kết quả phân tích đáp ứng dao động chi tiết bằng các mô phỏng số.

Domizio và đồng nghiệp [78] đã nghiên cứu hiệu quả sử dụng TMD trong việc ngăn chặn sự sụp đổ của một kết cấu chịu một loạt các chấn động gần. Kết cấu được xem xét là khung thép không gian 4 tầng có gắn TMD với các khối lượng khác nhau được kết hợp. Từ một loạt các phân tích động phi tuyến, trong đó thang đo của các lần ghi địa chấn được điều chỉnh, biên độ tối thiểu của mỗi bản ghi tạo ra sự sụp đổ kết cấu đã được phát hiện.

Krenk và Høgsberg [91] trình bày kết quả nghiên cứu khả năng hấp thụ dao động kết cấu đàn nhớt dưới tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên. Các tham số tối ưu của bộ tiêu tán năng lượng được đưa ra trên cơ sở các thông số thay đổi của kết cấu, tải trọng ngẫu nhiên của nền đất được coi như quá trình dừng dạng ồn trắng.

Trong công trình [84], Fujino và Abe đã đưa ra các đặc tính của bộ điều khiển dao động (TMD) cho kết cấu hai bậc tự do được nghiên cứu bằng cách sử dụng kỹ thuật nhiễu loạn. Trên cơ sở giải pháp nhiễu loạn, thu được các công thức liên quan đến thiết kế TMD cho các loại tải khác nhau; chúng được biểu diễn dưới dạng hàm của tỷ lệ khối lượng, tỷ lệ điều chỉnh, tỷ lệ giảm chấn của TMD và tỷ lệ giảm chấn của kết cấu. Gergesi và Vickery [85] đã trình bày kết quả nghiên cứu tối ưu của bộ giảm dao động dạng con lắc, cơ hệ hai bậc tự do được gắn thiết bị giảm dao động dạng con lắc, thông qua khảo sát, bộ số liệu

thiết kế cho thiết bị giảm dao động được đưa ra.

Sun và Jahangiri [100] đã trình bày nghiên cứu đề xuất bộ điều khiển dao động hai phương (theo hướng phía trước và phía bên) để giảm đáp ứng dao động của Tuabin gió ngoài khơi. Một mô hình phân tích của Tuabin gió kết hợp với 3d-PTMD được thiết lập trong đó sự tương tác giữa các cánh quạt, tháp và 3d-PTMD được mô hình hóa. Tải trọng khí động học được tính toán bằng phương pháp “Blade Element Momentum”. Phổ JONSWAP được thông qua để tạo dữ liệu sóng. Tải sóng được tính bằng phương trình Morisons phối hợp với lý thuyết dải. Thông qua cách tiếp cận nghiên cứu bằng phương pháp số, công thức thiết kế của 3d-PTMD đã được thu thập và kiểm tra trên mô hình Tuabin gió cơ bản 5MW.

Matteo và các cộng sự [94] trình bày một cách tiếp cận trực tiếp, đơn giản cho thiết kế tối ưu của một thiết bị tiêu tán năng lượng dạng cột chất lỏng, tác giả xem xét một tải ngẫu nhiên dạng ồn trắng. Trên cơ sở này, một quy trình tối ưu hóa trực tiếp các tham số thiết kế TLCD (Tuned Liquid Column Damper) được thực hiện và các biểu đồ thiết kế tối ưu được trình bày dưới dạng một công cụ thiết kế thực tế sẵn sàng để sử dụng. So sánh với các tham số tối ưu thu được khi xem xét kỹ thuật tuyến tính hóa thống kê lặp cổ điển chứng minh độ tin cậy của phương pháp đã đề xuất. Hiệu suất của kết cấu nhiều tầng có điều khiển bằng TLCD gắn tại tầng đầu tiên được kiểm tra và so sánh với kết cấu không có TLCD để nghiên cứu khả năng giảm dao động của hệ khi có thêm TLCD, trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng bộ 44 chuyển động mặt đất được ghi làm kích thích ban đầu.

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm của tác động của bộ giảm chấn của các thiết bị điều khiển thụ động lên điều khiển dao động của kết cấu đã được chỉ ra trong công trình nghiên cứu của Bigdeli và Kim [69]. Ba thiết bị tiêu tán năng lượng được xem xét bao gồm bộ điều khiển dao động dạng khối lượng TMD, bộ điều khiển dao động dạng chất lỏng TLD (Tuned Liquid Damper), bộ điều khiển dao động dạng cột chất lỏng TLCD gắn lên cấu trúc nhà thép ba tầng

được chia tỷ lệ kết hợp với mỗi thiết bị được sử dụng để đánh giá hiệu quả giảm chấn của mỗi bộ điều khiển. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy các thông số về khối lượng và cản nhớt của các thiết bị tiêu tán năng lượng dạng thụ động là yếu tố chính trong việc triệt tiêu dao động của kết cấu. Biến đổi nhanh Fourier FFT (Fast Fourier Transform), các chế độ tần số và tổng khối lượng thiết bị được sử dụng để tính các giá trị Mật độ phổ năng lượng PSD (Power Spectral Density).

Lievens và cộng sự [92] đã đề xuất một phương pháp tối ưu mạnh (a robust optimisation approach) để thiết kế TMD nhằm giảm dao động cho cầu đi bộ, trong đó có tính đến các tham số ngẫu nhiên. Mục đích là để giảm thiểu khối lượng của TMD, được coi như là yếu tố cho chi phí thiết kế; bằng cách điều chỉnh các giá trị khối lượng, độ cứng và cản nhớt của TMD. Jiménez-Alonso và Andrés [89] lại đưa ra phương pháp tối ưu hóa thiết kế trạng thái cơ bản (a motion-based design optimization method) nhằm mục đích đảm bảo ứng xử toàn diện trong điều kiện ngẫu nhiên. Các hoạt động của người đi bộ được mô hình hóa theo đề xuất của Synpex.

Tributsch và Adam [101] đã đánh giá hiệu suất giảm dao động của các bộ điều khiển dao động TMDs dựa trên các bộ chuyển đổi mặt đất được ghi lại. Đối với mô hình đơn giản nhất của bộ TMD, điều chỉnh tối ưu các tham số TMD được thảo luận và đánh giá trong bài báo. Việc giảm đáp ứng bằng cách áp dụng TMD được định lượng tùy thuộc vào thời điểm kết cấu, giảm chấn vốn có của kết cấu độc lập và tỷ lệ khối lượng TMD so với khối lượng kết cấu.

Domenico và Ricciardi [75] đã nghiên cứu thiết kế chống động đất của các tòa nhà biệt lập với TMD gắn ở tầng hầm. Bài báo trình bày khả năng giảm dao động cho kết cấu tòa nhà cao tầng bằng thiết bị tiêu tán, điều khiển dao động được gắn ở tầng hầm tòa nhà. Các mô hình độc lập khi nghiên cứu được xem xét; các vật liệu đặc biệt như cao su cốt sợi, vật liệu đàn hồi được nghiên cứu nhằm giảm khả năng dao động cho tòa nhà.

Ngoài ra, Domenico và cộng sự [74], [76], [77] còn nghiên cứu đưa ra

các bộ thông số tối ưu của thiết bị TMD để giảm khả năng dao động của kết cấu dưới tác dụng của các tải trọng mang tính ngẫu nhiên như gió, động đất...

Hiệu quả của các bộ tiêu tán năng lượng TMD được đặt phân bố trên ống khói để điều khiển đa chế độ (multimode control) của ống khói đã được Elias và các đồng nghiệp nghiên cứu chi tiết như trong công trình [80]. Một ống khói bê tông được xem xét ở đây là tập hợp của hai phần tử dầm (2D), mỗi phần tử được giả định là có đường kính không đổi trên chiều dài phần tử. Tải trọng gió được mô phỏng bằng phổ gió Kaimal. Phản ứng của ống khói sẽ được kiểm soát bằng cách cài đặt các bộ tiêu tán năng lượng TMD. Các vị trí thích hợp của TMD được xác định dọc theo chiều cao của ống khói dựa trên các dạng dao động không bị kiểm soát (its uncontrolled mode shapes) của nó. Các phương trình vi phân kết hợp của hệ được thiết lập và giải quyết bằng phương pháp lặp của Newmark.

Takuya Hashimoto và cộng sự trong [87] sử dụng thiết bị tiêu tán năng lượng TMD để giảm dao động của tòa nhà chịu tác dụng của tải trọng động. Một tòa nhà biệt lập và có khả năng phục hồi với TMD tỷ lệ khối lượng lớn được giới thiệu; ở đây chủ yếu cho tải trọng động đất; trong đó TMD tỷ lệ khối lượng lớn được đặt tại tầng hầm.

1.4.3. Tình hình nghiên cứu trong nước về tính toán công trình chịu tải trọng ngẫu nhiên nhưng không sử dụng TBTTNL

Việc nghiên cứu tính toán công trình chịu tải trọng ngẫu nhiên cũng được một số nhà khoa học trong nước quan tâm nghiên cứu và đã đạt được một số kết quả nhất định.

Trong các công trình nghiên cứu [37], [38], [58], các tác giả Nguyễn Văn Hợi và Lê Anh Tuấn đã nghiên cứu phản ứng động ngẫu nhiên phi tuyến của công trình biển bằng phương pháp Monte-Carlo và mô phỏng số. Đầu vào trong tính toán của các tác giả là tải trọng sóng biển, còn đầu ra là chuyển vị, nội lực của kết cấu. Các đại lượng trên là các quá trình ngẫu nhiên.

Ngô Vi Long [44] đã dùng phương pháp kỹ thuật điều khiển chủ động

để chống dao động cho công trình. Tác giả đã tiến hành mô phỏng một số bài toán điều khiển chủ động dao động công trình trên phần mềm Matlab 5.3. Đó là các bài toán điều khiển chủ động một hệ kết cấu một bậc tự do, chịu các tải trọng hình sin và tải ngẫu nhiên.

Phạm Khắc Hùng [39] đã tính toán các công trình cao dạng thép trụ (trong vô tuyến truyền hình, các nhà cao tầng, tượng đài...) chịu áp lực do chuyển động khí quyển. Giải bài toán mô hình xác suất ngẫu nhiên, vật lý, với giả thiết coi tải trọng là quá trình dừng và chuẩn, kết cấu là hệ thanh trục giao (bài toán phẳng).

Nghiên cứu sử dụng phương pháp trung bình hóa để khảo sát các hệ phi tuyến một chiều và nhiều bậc tự do để nghiên cứu các hệ dao động chịu kích động ngẫu nhiên trong các phương tiện giao thông vận tải có vận tốc lớn như máy bay, tên lửa, tàu biển được trình bày trong công trình của Kiều Thế Đức [32]. Kết hợp sử dụng phương pháp lập phương trình FPK (Focket - Planc - Konmogorop) để giải các bài toán cơ học phi tuyến, ngẫu nhiên và nhiều bậc tự do. Tác giả coi kích động ngẫu nhiên là ồn trắng. Hệ cơ học được mô tả là hệ phương trình phi tuyến yếu có ma trận cơ bản là ma trận hằng số.

Đỗ Anh Cường [24] đã nêu ra tình hình nghiên cứu động lực học biển, tính chất tương tác phi tuyến giữa phần tử thanh với sóng biển. Tính toán thiết kế các công trình biển có kết cấu hệ thanh chịu tải trọng sóng biển. Tác giả áp dụng phương pháp PTHH rời rạc hóa kết cấu hệ thanh không gian dạng tổng quát. Tương tác giữa phần tử thanh với sóng biển xác định bằng công thức Morison và lý thuyết sóng tuyến tính Eri.

Nghiên cứu xác định và đánh giá dao động lắc của công trình biển nổi kích thước lớn được Nguyễn Quốc Hòa trình bày trong công trình [36], trong đó hình dạng bất kỳ chịu tác dụng của sóng biển trong hai trường hợp: Bài toán lắc tiền định của công trình biển nổi neo đứng và bài toán lắc ngẫu nhiên của công trình biển nổi không neo. Trong đó, sóng ngẫu nhiên được coi là quá trình ngẫu nhiên dừng chuẩn có trung bình không (sóng biển được xem là quá trình

ngẫu nhiên dừng, chuẩn, trung bình không).

Đỗ Văn Đệ [30] đã áp dụng các phương pháp của lý thuyết độ tin cậy vào tính toán công trình biển trọng lực chịu tải trọng sóng ngẫu nhiên. Xác định tải trọng sóng ngẫu nhiên tác dụng lên công trình biển trọng lực theo lý thuyết sóng nhiễu xạ và theo công thức Morison bằng phương pháp giải tích.

Trong công trình [34], Ninh Quang Hải đã nghiên cứu để đưa tiêu chuẩn tuyến tính hóa tương đương ngẫu nhiên dựa trên phương trình FPK cho hệ ngẫu nhiên n bậc tự do. Xây dựng công thức tuyến tính hóa theo tiêu chuẩn này trong trường hợp hệ ngẫu nhiên phi tuyến cấp n , áp dụng tiêu chuẩn này cho các hệ Vanderpol, Poffing chịu kích động ồn trắng và kích động ồn màu cấp 1 và cấp 2. Phương pháp tuyến tính hóa tương đương ngẫu nhiên và tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình khu vực đã được Lưu Xuân Hùng trình bày cụ thể trong công trình [40]. Trong đó có phân tích mô men đáp ứng bậc 2 và số trôi trung bình, xác suất vượt. Đối tượng nghiên cứu của tác giả là các hệ cơ học có độ phi tuyến trung bình và mạnh, một bậc tự do và nhiều bậc tự do chịu kích động ồn trắng.

Đào Văn Tuấn [59], [60] đã ứng dụng phương pháp PTHH, xây dựng thuật toán và chương trình tính toán công trình biển dạng khung chịu tải trọng ngẫu nhiên.

Bằng việc đưa ra đề xuất một kỹ thuật mới kết hợp hai phương pháp kinh điển là phương pháp trung bình và phương pháp tuyến tính hoá, Dương Ngọc Hào [35] đã nghiên cứu hệ dao động phi tuyến yếu chịu kích động tuần hoàn và ngẫu nhiên yếu. Luận án nghiên cứu đặc trưng xác suất của đáp ứng của hệ dao động phi tuyến yếu một bậc tự do chịu đồng thời kích động tuần hoàn và ngẫu nhiên yếu trong miền cộng hưởng chính, được mô tả bởi phương trình vi phân ngẫu nhiên cấp hai.

Phương pháp phần tử hữu hạn đã được Nguyễn Thái Chung và các cộng sự [14], [19], [20], [22], [23] sử dụng để xây dựng thuật toán và chương trình tính nhằm phân tích động lực học của kết cấu công trình biển hệ thanh trên nền

san hô chịu tác dụng của tải trọng sóng và gió theo mô hình bài toán không gian khi hệ kết cấu - nền san hô không tương tác và tương tác. Trong đó tải trọng sóng tính theo lý thuyết sóng Stoke bậc 2 và tải trọng gió tính theo phương pháp đáp ứng vận tốc gió theo thời gian.

Kết cấu công trình biển cố định hệ thanh trên nền san hô (mô phỏng công trình DKI) chịu tác dụng của tải trọng sóng và gió được Nguyễn Văn Chinh nghiên cứu cụ thể trong công trình [18]. Tải trọng sóng biển được xác định theo lý thuyết sóng tuyến tính Airy và công thức Morison, tải trọng gió là hàm của thời gian.

1.4.4. Tình hình nghiên cứu trong nước về tính toán công trình có sử dụng TBTTNL không chịu tải trọng ngẫu nhiên

Do ý nghĩa thực tiễn của việc sử dụng TBTTNL làm giảm đáng kể dao động đối với kết cấu chính, nên việc nghiên cứu đáp ứng của kết cấu công trình có thiết bị tiêu tán năng lượng đã được các nhà khoa học trong nước tìm hiểu và nghiên cứu, điển hình như một số công bố dưới đây:

Nguyễn Duy Chinh [27] đã thiết lập phương trình vi phân chuyển động chuyển động của hệ con lắc ngược có lắp đồng thời hai bộ hấp thụ dao động TMD - D và TMD - N để giảm dao động theo phương thẳng đứng và ngang của hệ con lắc ngược. Tiếp theo đó, tác giả lại tiếp tục nghiên cứu tìm nghiệm giải tích tham số tối ưu của bộ hấp thụ dao động TMD-D cho hệ con lắc ngược [28], [29]. Sau đó tác giả áp dụng các kết quả tìm được để giảm dao động cho một nhịp cầu giao thông.

Phân tích các kết cấu có lắp các thiết bị tiêu tán năng lượng đã được Nguyễn Đông Anh và cộng sự chỉ ra cụ thể trong công trình [7], trong đó có chỉ ra hiệu quả giảm dao động đáng kể của các hệ này khi được lắp thêm thiết bị tiêu tán năng lượng. Đỗ Anh Cường [26] đã sử dụng phương pháp bán giải tích để nghiên cứu lựa chọn tham số tối ưu của bộ hấp thụ TMD.

Để giảm dao động rung lắc cho công trình DKI, Nguyễn Hoa Thịnh và cộng sự [55], [56] đã đề xuất có thể lắp vào công trình DKI hai bộ TMD để tiêu

tán năng lượng cho hệ. Một bộ TMD được đặt theo hướng tác động của sóng biển để giảm dao động lắc ngang. Một bộ TMD khác được đặt theo hướng thẳng đứng để giảm dao động thẳng đứng và chống nhỏ cọc.

Nguyễn Thái Chung và các cộng sự [21] đã nghiên cứu giảm giao động của công trình DKI chịu tác dụng của tải trọng sóng sử dụng mô hình tương tác đầy đủ hệ thanh không gian - nền san hô và thiết bị tiêu tán năng lượng TMD.

Trong các công trình [3], [4], [12], [13], Nguyễn Đông Anh và đồng nghiệp đã nghiên cứu dao động của con lắc ngược có lắp bộ hấp thụ dao động. Tuy nhiên, các nghiên cứu đó mới chỉ xét đến dao động lắc ngang của con lắc ngược. Nhưng trong thực tế nhiều công trình có dạng con lắc ngược, ngoài thành phần dao động lắc ngang nó còn dao động theo phương thẳng đứng.

Ngoài ra, phân tích khả năng giảm dao động của công trình nhà cao tầng bằng chất lỏng được Đoàn Mộng Xanh nghiên cứu và chỉ ra cụ thể như trong công trình [64].

Trong công trình [5], tác giả nêu lên ý nghĩa của việc lắp đặt các thiết bị tiêu tán năng lượng đang là một phương pháp được sử dụng nhiều trên thế giới nhằm giảm dao động của các công trình dài và mảnh, từ đó nâng cao tuổi thọ, giảm các hư hỏng của công trình. Các tác giả đã giới thiệu chương trình tiếng việt Sava do các tác giả xây dựng, có chức năng phân tích và thiết kế các thiết bị tiêu tán năng lượng cho kết cấu. Chương trình được áp dụng để tính toán thiết bị cản nhớt tuyến tính nhằm giảm dao động cho dây cáp lắp trên cầu dây văng Bến Cốc, tỉnh Hà Tây (cũ).

Mai Lự [46] đã nghiên cứu tối ưu hệ TMD để giảm dao động cộng hưởng trong cầu đường sắt cao tốc, đặc biệt là các kết cấu có đa đỉnh cộng hưởng gần nhau. Quá trình cực tiểu hàm đối tượng được dựa trên thuật toán DK để tối ưu các tham số của hệ cản TMD một cách trực tiếp và đồng thời trên các mode dao động khác nhau. Trong bài báo này, các tham số của hệ TMD được tối ưu trực tiếp và đồng thời trên các mode khác nhau để tìm ra sự phối hợp giữa các tham số động học trong thiết bị TMD và làm cho chúng hoạt động

hiệu quả ổn định nhất có thể. Lời giải của phương pháp đề xuất trong nghiên cứu này thu được bằng một thủ tục duy nhất dựa trên thuật toán lặp DK và thậm chí có thể xét các tham số động học không chắc chắn của hệ kết cấu (norm-bounded uncertainty parametes) trong tiêu chuẩn tối ưu H_∞ .

1.4.5. Tình hình nghiên cứu trong nước về tính toán công trình có sử dụng TBTTNL chịu tải trọng ngẫu nhiên

Các công trình quân sự nhất là các công trình ven biển, trên đảo và vùng bãi cạn... là những công trình phục vụ cho chiến đấu, các công trình này có thể chịu tác dụng của các kích động ngẫu nhiên. Do đó, ta có thể sử dụng các TBTTNL để giảm dao động công trình và phòng tránh tác dụng vượt tải cho người, các trang thiết bị đặt trong công trình. Do ý nghĩa thực tiễn của việc sử dụng các TBTTNL trong đó có TMD làm giảm đáng kể dao động đối với kết cấu chính, nên việc nghiên cứu đáp ứng của kết cấu công trình có thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên đã được các nhà khoa học trong nước tìm hiểu và nghiên cứu, điển hình như một số công bố dưới đây:

Trong các công trình [4], [5], Nguyễn Đông Anh và Lã Đức Việt đã phân tích về các biện pháp, phương pháp sử dụng các thiết bị năng lượng và ứng dụng của chúng. Nguyễn Đông Anh [1] đã thực hiện đề tài nghiên cứu các thiết bị tiêu tán năng lượng chống dao động có hại phục vụ các công trình kỹ thuật trong đó có tính toán công trình biển dạng khung sử dụng TBTTNL chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên. Còn trong công trình [2], Nguyễn Đông Anh và Đỗ Anh Cường đã mô phỏng chống dao động cho kết cấu hệ thanh và ứng dụng cho công trình biển. Kết quả mô phỏng hiệu quả giảm dao động đối với kết cấu hệ thanh chịu tác động của một số dạng tải trọng động khác nhau được trình bày cụ thể trong [4], trong đó phương trình dao động của hệ hỗn hợp được thiết lập bằng phương pháp PTHH trong miền thời gian.

Nguyễn Đông Anh cùng các cộng sự [6], [8] đã xây dựng phần mềm mô phỏng chống dao động cho các dạng kết cấu có gắn thiết bị tiêu tán năng lượng. Các tác giả đã phân tích dao động thẳng đứng của hệ gồm n khối lượng mắc

nối tiếp nhờ các liên kết đàn hồi và cản nhớt, chịu kích động ngẫu nhiên của gia tốc nền, bộ hấp thụ là một TMD được mắc nối tiếp vào khối lượng trên cùng, hệ số độ cứng k và hệ số cản c của TMD là tham số cần tối ưu. Trong công trình [8], các tác giả đã phân tích dao động của toa xe nhiều bậc tự do dưới kích động của biến dạng mặt đường được mô hình như một quá trình ngẫu nhiên, việc giảm dao động được thực hiện nhờ lắp thêm 4 bộ TMD có cùng thông số (khối lượng m , hệ số cứng k , hệ số cản c), các tham số tối ưu được xác định là các hệ số k và c của các TMD.

Tiếp nối các nghiên cứu đã có, Nguyễn Đông Anh và các đồng nghiệp [9], [10] đã nghiên cứu phương pháp lựa chọn các thông số của bộ giảm chấn cho hệ nhiều bậc tự do chịu kích động ồn màu, và tính toán bộ hấp thụ dao động cho mô hình dầm. Không chỉ dừng lại ở tính toán lý thuyết, Nguyễn Đông Anh và cộng sự [11] đã tiến hành thí nghiệm giảm dao động cho mô hình DKI bằng TBTTNL. Nguyễn Chi Sáng [50]-[51] đã đưa ra phương pháp tính toán bộ hấp thụ dao động cho hệ nhiều bậc tự do chịu kích động ngẫu nhiên. Nghiên cứu thuật toán và chương trình xác định giá trị tối ưu của một số tham số đối với mô hình hệ một bậc tự do gắn nhiều TMD. Nguyễn Bá Nghị [48] đã nghiên cứu tính toán hệ TMD cho cơ hệ một bậc tự do nhằm giảm thành phần dao động tần số riêng. Phương pháp bán giải tích đã được Đỗ Văn Thơm [57] sử dụng để nghiên cứu giảm dao động đối với hệ một bậc tự do bằng bộ hấp thụ dao động TMD nhiều bậc tự do, trong đó tải trọng tác dụng lên hệ dạng ồn trắng và có đưa ra các giá trị tham số tối ưu của TMD để dao động của hệ là bé nhất.

Đỗ Thị Ngọc Tam [53] đã nghiên cứu khả năng ứng dụng thuật toán Hybrid vào thiết kế TMD cho nhà cao tầng chống tác nhân động đất. Dựa vào đặc điểm phổ năng lượng động đất thường có dạng dải hẹp, bài báo đã đề xuất cách tính toán để lựa chọn các thông số cơ học ban đầu TMD hợp lý gần với nghiệm tối ưu của bài toán. Các ví dụ số trong báo cáo được tính toán, phân tích bằng ngôn ngữ lập trình Matlab và kết quả tính toán cho thấy tham số TMD thiết kế theo thuật toán này cho khả năng giảm chấn cho nhà lớn ($>30\%$).

1.5. Nghiên cứu về Mạng Nơ ron nhân tạo và ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong nghiên cứu dao động công trình

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển của khoa học và kỹ thuật, việc áp dụng các mô hình trí tuệ nhân tạo để giải quyết các bài toán phức tạp trong khoa học cũng như trong cơ học là một yêu cầu quan trọng. Mô hình ANN (Artificial Neural Network) là một trong những loại trí tuệ nhân tạo dựa trên mô phỏng quá trình làm việc song song, ô ạt của bộ não con người và mô tả về cách thức hoạt động của bộ não. Trong thực tế, các chức năng nút mạng thần kinh có thể được xử lý nhiều nhiệm vụ cùng một lúc với sự tiêu tốn thời gian ít hơn để giải quyết các vấn đề.

Nói cách khác, cách dễ dàng hơn để nhấn mạnh định nghĩa mới về AI (Artificial Intelligence) này là mạng thần kinh là hộp đen, có thể dự đoán dữ liệu đầu ra từ đầu vào cụ thể. Cụ thể, sau quá trình tra cứu, mạng lưới thần kinh có khả năng nhận thức được sự tương đồng từ các mẫu đầu vào mới. Đã có một số ấn phẩm khoa học về việc sử dụng AI trong việc phân tích các ứng xử cơ học như công trình [106], đây là trang web trong đó có chứa thông tin, định nghĩa, giới thiệu về mạng lưới Nơron thần kinh, cơ sở của phương pháp ANN.

Trong công trình [88], Ahmed Issa đã trình bày thuật toán trí tuệ nhân tạo ANN để điều khiển, tính toán quá trình gia công laser các chi tiết vi mô theo thuật toán di truyền

Ye và cộng sự [107] đã giải quyết một thuật toán di truyền (Genetic algorithm - Gas) để đạt được thiết kế tối ưu hóa cho các yếu tố quang học nhiễu xạ (Diffractive Optical Elements - DOE's) cho việc định hình chùm tia laser. Một hệ thống định hình chùm tia laser được nghiên cứu bằng thuật toán di truyền, trong đó một chùm tia laser thông qua biến đổi Gaussian được chuyển đổi thành chùm Bhip không có thứ tự. Thuật toán này khai thác bản chất toàn cục của các thuật toán di truyền.

Kết quả nghiên cứu tối ưu cho quy trình gia công đột, dập có sử dụng lý thuyết tối ưu hóa đàn kiến được nghiên cứu và trình bày bởi Wang và Xie [104].

Đây là một trong các dạng thuật toán tối ưu được sử dụng hiệu quả nhờ các quy luật, dự đoán theo tập quán, thói quen của đàn kiến.

Shen và cộng sự [99] đã nghiên cứu quá trình nhiệt dẻo rất phức tạp. Mô phỏng mô hình phân tử hữu hạn rất tốn thời gian và phân tích công kênh để tính toán góc uốn. Một mô hình cho góc uốn trong hình thành laser được xây dựng bằng logic mờ thích nghi được gọi là hệ thống suy luận mờ mạng thích nghi (Adaptive Network Fuzzy Inference System - ANFIS). Mô hình ANFIS được đào tạo với dữ liệu thí nghiệm được công bố, trong đó các tham số quá trình hình thành laser bao gồm độ dày của tấm, công suất laser, đường kính chùm tia laser và tốc độ quét. Mô hình ANFIS được đào tạo cũng được thử nghiệm trên các thí nghiệm không liên quan đến dữ liệu đào tạo trước đó. Hiệu suất của mô hình ANSIF được tối ưu hóa như một chức năng của một loại chức năng thành viên và số lượng chức năng thành viên. Mô hình ANFIS được tối ưu hóa dự đoán tốt kết quả so với dữ liệu thử nghiệm. Dựa trên mô hình đã thiết lập, kết quả phân tích của các tham số quy trình cho thấy góc uốn tối đa có thể đạt được bằng cách chọn đường kính chùm tia laser hợp lý với các thông số hình thành laser khác.

Deus và Mazumder [71] đã trình bày một mô hình hai chiều của lớp phủ laser được phát triển, sử dụng gói phần mềm sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn ABAQUS. Nó cho phép nghiên cứu trường nhiệt độ phát triển ở mặt phẳng trung tâm của vật liệu. Trường nhiệt độ này cung cấp đầu vào cho phân tích ứng suất nhiệt, trong đó giả sử biến dạng phẳng tổng quát. Mục tiêu của bài báo hiện tại là thực hiện đánh giá định lượng các ứng suất dư phát triển ở vật liệu hai lớp, như là một hàm của các tham số quá trình như tốc độ quét, công suất laser và tốc độ nạp bột.

Trong công trình [98], Shabani và Mazahery đã đưa ra mạng nơ ron nhân tạo (ANN) là một hệ thống tính toán động phi tuyến thích hợp cho các mô phỏng các bài toán khó mô tả bằng các mô hình vật lý, thay vì dựa vào một số giả định được xác định trước, dữ liệu được sử dụng để tạo thành mô hình. Để

dự đoán các tính chất cơ học của A356 bao gồm ứng suất, độ bền kéo và phần trăm kéo dài, một phương pháp tương đối mới sử dụng mạng thần kinh nhân tạo và kỹ thuật phần tử hữu hạn được trình bày kết hợp dữ liệu tính chất cơ học ở dạng điều kiện hóa rắn thử nghiệm và mô phỏng.

Esmailzadeh và Aghaie-Khafri [81] đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và mạng nơ ron nhân tạo (ANN) để mô phỏng biến dạng ECAP của hợp kim nhôm AA2024.

Nghiên cứu xây dựng mạng nơ ron nhân tạo nhằm phân tích kết cấu cũng được chỉ ra trong các công trình [66], [86]. Abambres và cộng sự [66] đề xuất một công thức dựa trên mạng nơ ron nhân tạo (ANN) để ước tính tải trọng uốn đàn hồi của dầm chịu liên kết tựa đơn dưới tải trọng dọc phân bố đều. Bộ dữ liệu 3645 điểm sử dụng trong thiết kế ANN được lấy từ phân tích phần tử hữu hạn tham số mở rộng được thực hiện trong phần mềm ABAQUS. Các biến độc lập đã sử dụng làm đầu vào ANN như sau: chiều dài chùm tia, đường kính mở, chiều rộng lưới, chiều cao mặt cắt ngang, độ dày lưới, chiều rộng mặt bích, độ dày mặt bích và khoảng cách giữa cạnh mở cuối cùng và hỗ trợ kết thúc. Mô hình đề xuất cho thấy một tiềm năng mạnh mẽ như một công cụ thiết kế hiệu quả. Các lỗi tương đối tối đa và trung bình trong số 3645 điểm dữ liệu được tìm thấy lần lượt là 3,7% và 0,4%, trong khi thời gian tính toán trung bình trên mỗi điểm dữ liệu nhỏ hơn một mili giây cho bất kỳ máy tính cá nhân hiện tại nào.

Mehdi Nikoo và các cộng sự [95] đã sử dụng mạng Nơ-ron nhân tạo (ANN) mô phỏng tần số dao động riêng đầu tiên, sử dụng chiều dài dầm, mômen quán tính và tải trọng tác dụng lên dầm làm tham số đầu vào cho bộ dữ liệu gồm 100 mẫu. Ba phương pháp tối ưu hóa Heuristic khác nhau được sử dụng để đào tạo ANN: thuật toán di truyền (GA), thuật toán tối ưu hóa đám hạt (particle swarm optimization algorithm) và thuật toán cạnh tranh kiểu chủ nghĩa đế quốc (imperialist competitive algorithm). Kết quả cho thấy, trong việc xác định tần số tự nhiên của dầm cong-son, mô hình ANN được đào tạo sử dụng GA vượt trội hơn các mô hình khác về độ chính xác.

Còn trong công trình [70], Chena và Huang sử dụng phương pháp phân tích kết cấu để thiết kế của dầm Timoshenko với bộ tiêu tán năng lượng TMD chịu tác dụng của tải trọng điều hòa. Ma trận độ cứng động của phần tử dầm Timoshenko được sử dụng để nghiên cứu các đáp ứng động cho toàn dải tần số. Một hệ thống tự do hai cấp được đề xuất đơn giản và phương pháp của Hartog được sử dụng để nghiên cứu các đặc tính động của TMDs. Một số công thức quan trọng cho các tham số thiết kế (như tỷ lệ khối lượng và tỷ lệ độ cứng, tỷ lệ giảm chấn tối ưu của TMD và giới hạn trên của chúng) và một loạt các biểu đồ thiết kế được trình bày cho các ứng dụng thực tế.

1.6. Nhận xét các kết quả chính đã đạt được và những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

Qua các công trình nghiên cứu đã được công bố, có thể rút ra những kết quả đạt được như sau:

- Nghiên cứu giảm dao động cho kết cấu sử dụng thiết bị tiêu tán năng lượng TMD, trong đó kết cấu chính có thể là dầm, tòa nhà, chịu nhiều loại tải trọng khác nhau như tải trọng gió, động đất, phương pháp được sử dụng nhiều trong các công trình này là phương pháp giải tích. Tuy nhiên, công trình nghiên cứu giảm dao động cho kết cấu chịu tải trọng ngẫu nhiên bằng thiết bị tiêu tán năng lượng, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn vẫn còn hạn chế.

- Nghiên cứu sử dụng mạng trí tuệ nhân tạo AI vào giải quyết các vấn đề trong thực tế kỹ thuật, trong đó cũng mới chỉ có một nghiên cứu đề cập đến cấu trúc và thiết kế dầm có lắp thiết bị TMD chịu tải trọng điều hòa. Các công trình nghiên cứu đến việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo vào dự đoán ứng xử cơ học của các kết cấu thanh, dàn, khung không gian còn khiêm tốn.

Qua các kết quả đã công bố, tác giả nhận thấy một số vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu như sau:

- Tính toán dao động riêng, dao động cưỡng bức của các kết cấu dạng dầm, khung không gian, tấm, vỏ có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải

trọng ngẫu nhiên;

- Nghiên cứu đáp ứng của kết cấu dầm, giàn, khung không gian có khả năng hấp thụ dao động tốt;

- Sử dụng mạng trí tuệ nhân tạo nhằm dự đoán các ứng xử cơ học của kết cấu.

1.7. Những nội dung chính của luận án cần tập trung giải quyết

- Xây dựng mô hình bài toán hệ dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên.

- Xây dựng quan hệ ứng xử cơ học của hệ dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên. Từ đó thiết lập phương trình cân bằng cho toàn bộ kết cấu.

- Xây dựng thuật toán phần tử hữu hạn và chương trình trên máy tính để giải bài toán động lực học của hệ dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên.

- Sử dụng mạng trí tuệ nhân tạo để dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu dầm, hệ khung và dự đoán thông số tối ưu của TMD.

- Khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố đến đáp ứng động của dầm, hệ khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên. Trên các kết quả tính toán có được, đưa ra các nhận xét có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, giúp ích cho việc thiết kế, chế tạo và ứng dụng các kết cấu dạng này trong thực tế.

1.8. Kết luận chương 1

Các kết cấu hệ thanh, dầm, khung không gian đã và đang được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực công trình, xây dựng, trong quá trình làm việc, chúng có thể chịu tác dụng của nhiều loại tải trọng khác nhau biến đổi một cách ngẫu nhiên. Việc tính toán ứng xử cơ học kết cấu của các kết cấu hệ thanh, dầm, khung không gian có và không có thiết bị tiêu tán năng lượng đã được nhiều nhà khoa học trong nước và trên thế giới quan tâm nghiên cứu bằng nhiều cách

tiếp cận khác nhau. Tuy nhiên, các nghiên cứu tính toán cho hệ kết cấu dầm, hệ giàn không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng dạng khối lượng - lò xo - con lắc (TMD) chịu tải trọng ngẫu nhiên vẫn còn hạn chế.

Vì vậy, vấn đề ***"Phân tích dao động kết cấu hệ dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên"*** mà luận án đưa ra là rất cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, các kết quả nghiên cứu góp phần làm dày thêm các nghiên cứu về đáp ứng động lực học của cơ hệ dạng dầm, khung không gian chịu tải trọng ngẫu nhiên. Kết quả nghiên cứu có khả năng định hướng ứng dụng trong quá trình thiết kế, chế tạo và sử dụng các kết cấu dạng này trong thực tiễn.

Chương 2

CƠ SỞ LÝ THUYẾT QUÁ TRÌNH NGẪU NHIÊN VÀ THUẬT TOÁN PHẦN TỬ HỮU HẠN TÍNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA HỆ KẾT CẤU DẦM, KHUNG KHÔNG GIAN CÓ LẮP TBTTNL CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NGẪU NHIÊN

Trong tính toán các công trình, nhiều kết cấu thực tế được mô hình hóa đơn giản dưới dạng các mô hình dầm, thanh và khung không gian. Chương này trình bày cơ sở lý thuyết của quá trình ngẫu nhiên và thuật toán phần tử hữu hạn tính toán động lực học của hệ kết cấu dầm, khung không gian chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên. Trên cơ sở lý thuyết tính toán có được, hoàn toàn có thể đơn giản một số thành phần để thu được thuật toán phần tử hữu hạn cho dầm, khung không gian, đây là nền tảng cơ sở quan trọng để tiến hành khảo sát số ảnh hưởng của một số yếu tố đến phản ứng động cho kết cấu này sẽ được trình bày ở chương 3 đồng thời là cơ sở khoa học cho việc thiết lập mạng nơ ron nhân tạo chương 4 vào giải quyết một vấn đề thực tế đặt ra. Luận án chỉ tập trung vào khảo sát đáp ứng của hệ dầm, khung không gian chịu tải trọng ngẫu nhiên dừng, do vậy chương này cũng tập trung nhiều giới thiệu về quá trình ngẫu nhiên dừng.

2.1. Cơ sở lý thuyết của quá trình ngẫu nhiên

2.1.1. Đại lượng ngẫu nhiên và các đặc trưng xác suất của nó

2.1.1.1. Đại lượng ngẫu nhiên

Đại lượng ngẫu nhiên (hay còn gọi là biến ngẫu nhiên) là đại lượng có thể nhận các giá trị khác nhau một cách ngẫu nhiên. Đại lượng ngẫu nhiên (ĐLNN) là rời rạc nếu các giá trị có thể có của nó là rời rạc. Ngược lại, nếu các giá trị có thể có của nó lấp đầy một khoảng nào đó thì gọi là ĐLNN liên tục.

Ký hiệu $X, Y, \dots$ là các đại lượng ngẫu nhiên và $x, y, \dots$ là giá trị có thể có của nó. Như vậy, X mang tính ngẫu nhiên, còn x là giá trị cụ thể quan sát được khi phép thử đã tiến hành - được gọi là thể hiện của X .

2.1.1.2. Các đặc trưng xác suất của đại lượng ngẫu nhiên

a. Hàm phân phối và hàm mật độ xác suất

Đối với các ĐLNN rời rạc, phân phối xác suất của nó được thể hiện bằng bảng phân phối có dạng [25], [73]:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n & \dots \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n & \dots \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

trong đó $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$ là các giá trị có thể có của X , còn $p_1, p_2, \dots, p_n, \dots$ là xác suất tương ứng để giá trị x của X nhận giá trị x_i , tức là $p_i = P\{x = x_i\}$.

Đối với các ĐLNN liên tục, hàm phân phối xác suất của x được xác định bằng hàm số:

$$F(x) = P\{X < x\} \quad (2.2)$$

Hàm phân phối có các tính chất sau:

$$0 \leq F(x) \leq 1 \quad \forall x \quad (2.3)$$

$$F(+\infty) = \lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1 \quad (2.4)$$

$$F(-\infty) = \lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0 \quad (2.5)$$

$$P(a < X < b) = F(b) - F(a) \quad (2.6)$$

Hàm phân phối xác suất $F(x)$ có một hạn chế là không thể hiện rõ phân phối xác suất ở lân cận một điểm nào trên trục số, vì vậy đối với biến ngẫu nhiên liên tục, có hàm $F(x)$ khả vi, người ta đưa ra khái niệm hàm mật độ xác suất.

Hàm mật độ xác suất của X được xác định bởi đạo hàm của hàm phân phối theo biến x , tức là [73]:

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X < x + \Delta x)}{\Delta x} = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2.7)$$

Nói cách khác $f(x)dx$ là xác suất để ĐLNN X nhận giá trị x . Với định nghĩa trên, ta có:

$$f(x) \geq 0 \quad (2.8)$$

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (2.9)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (2.10)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.11)$$

b. Kỳ vọng, phương sai và độ lệch chuẩn

Kỳ vọng của đại lượng ngẫu nhiên X , ký hiệu là m_X hoặc $M(X)$ hoặc $\langle X \rangle$.

Nếu đại lượng ngẫu nhiên là rời rạc có phân phối xác suất p_i thì:

$$m_X = \sum_i x_i p_i \quad (2.12)$$

Nếu đại lượng ngẫu nhiên là liên tục có hàm mật độ xác suất $f(x)$ thì:

$$m_X = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \quad (2.13)$$

Phương sai của đại lượng ngẫu nhiên x , ký hiệu là D_X hoặc $D(X)$.

Nếu đại lượng ngẫu nhiên là rời rạc có phân phối xác suất p_i thì:

$$D_X = \sum_i (x_i - m_X)^2 p_i \quad (2.14)$$

Nếu đại lượng ngẫu nhiên là liên tục có hàm mật độ xác suất $f(x)$ thì:

$$D_X = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_X)^2 f(x) dx \quad (2.15)$$

Sử dụng các tính chất của kỳ vọng ta có thể biến đổi (2.15) về dạng tương đương thuận tiện trong tính toán hơn như sau:

$$D_x = \langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle = \langle X^2 + \langle X \rangle^2 - 2X\langle X \rangle \rangle = \langle X^2 \rangle + \langle X \rangle^2 - 2\langle X \rangle\langle X \rangle \quad (2.16)$$

hay

$$D_x = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \quad (2.17)$$

Nếu X rời rạc thì:

$$D_x = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \quad (2.18)$$

Nếu X liên tục thì:

$$D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx - \left(\int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \right)^2 \quad (2.19)$$

Độ lệch chuẩn của đại lượng ngẫu nhiên X ký hiệu là σ_x hoặc $\sigma(X)$:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} \quad (2.20)$$

2.1.2. Một số hàm phân phối xác suất thường gặp

2.1.2.1. Phân phối đều

Đại lượng ngẫu nhiên liên tục X được gọi là tuân theo luật phân phối đều trên đoạn $[a, b]$ nếu X có hàm mật độ xác suất như sau [25], [73]:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}; x \in [a, b] \\ 0; x \notin [a, b] \end{cases} \quad (2.21)$$

Khi đó, kỳ vọng $m_x = \frac{a+b}{2}$, phương sai $D_x = \frac{(b-a)^2}{12}$.

Phân phối đều có vai trò quan trọng trong mô phỏng các đại lượng ngẫu nhiên.

2.1.2.2. Phân phối chuẩn (phân bố Gauss)

Đây là phân phối liên tục quan trọng và có ứng dụng rộng rãi nhất. ĐLNN được gọi là tuân theo luật phân phối chuẩn nếu hàm mật độ của nó có dạng:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (2.22)$$

Các tham số m_x, σ_x trong (2.22) cũng chính là các số đặc trưng quan trọng của phân phối chuẩn, nên thường sử dụng ký hiệu $N(m_x, \sigma_x)$ để mô tả phân phối chuẩn. Đồ thị hàm mật độ của phân phối chuẩn có dạng hình chuông, có trục đối xứng là đường thẳng đứng $x = m_x$ và đạt max tại $x = m_x$. Nếu lấy lân cận σ_x của $x = m_x$ thì phần diện tích chắn bởi $f(x)$, trục hoành và các đường thẳng $x = m_x \pm \sigma_x$ sẽ có diện tích bằng 68,26% (đơn vị diện tích), đó cũng chính là xác suất để $|X - m_x| < \sigma_x$, tức là:

$$P\{|X - m_x| < \sigma_x\} = 0.6826 \quad (2.23)$$

Tương tự, ta cũng có:

$$P\{|X - m_x| < 2\sigma_x\} = 0.9544 \quad (2.24)$$

$$P\{|X - m_x| < 3\sigma_x\} = 0.9973 \quad (2.25)$$

Trường hợp đặc biệt khi $m_x = 0$, $\sigma_x = 1$ thì ta nói X có phân phối chuẩn được chuẩn hóa.

2.1.2.3. Phân bố Rayleigh

Phân phối Rayleigh áp dụng cho các ĐLNN dương. Hàm phân bố xác suất có dạng [25]:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} & \text{khi } x \geq 0 \\ 0 & \text{khi } x < 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

Hàm mật độ xác suất có dạng:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma_x^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} & \text{khi } x \geq 0 \\ 0 & \text{khi } x < 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Giá trị trung bình bằng:

$$m_x = \int_0^{\infty} xf(x)dx = \sigma_x \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (2.28)$$

Do m_x và σ_x có liên hệ với nhau theo (2.28) nên phân bố này là phân bố một tham số. Phân phối này thường sử dụng trong lý thuyết bản và trong nghiên cứu phân phối biên độ sóng biển.

2.1.2.4. Phân bố Weibull

Hàm phân phối Weibull áp dụng cho các đại lượng ngẫu nhiên dương. hàm phân bố xác suất có dạng [25]:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^a} & \text{khi } x \geq 0 \\ 0 & \text{khi } x < 0 \end{cases} \quad (2.29)$$

trong đó a, c là các tham số dương. Hàm mật độ xác suất có dạng:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{a}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{a-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^a} & \text{khi } x \geq 0 \\ 0 & \text{khi } x < 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

Trường hợp riêng, khi $a = 2$ thì phân phối Weibull chính là phân phối Rayleigh.

2.1.2.5. Phân bố Maxwell

Hàm mật độ xác suất có dạng [25]:

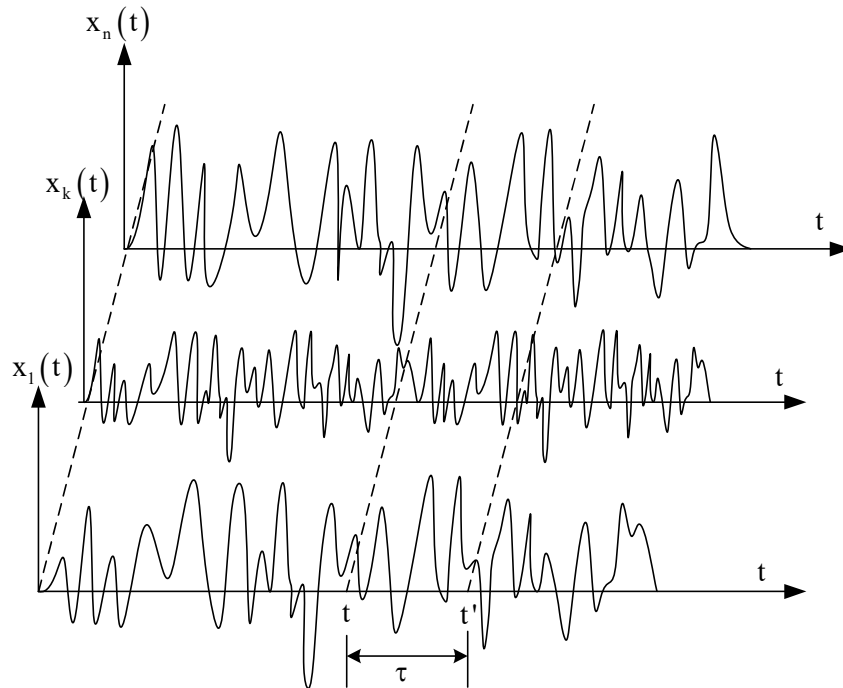
$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^2}{c^3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{2c^2}} & \text{khi } x \geq 0 \\ 0 & \text{khi } x < 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

2.1.3. Quá trình ngẫu nhiên

2.1.3.1. Định nghĩa

Những quá trình có thể mô tả được bằng một hàm $x(t)$ của thời gian gọi là quá trình tiền định. Những quá trình phụ thuộc thời gian nhưng không mô tả được tường minh bằng một hàm $x(t)$ cụ thể, giá trị của nó tại mỗi thời điểm đã cho là một ĐLNN được gọi là quá trình ngẫu nhiên (hay hàm ngẫu nhiên). Tùy từng trường hợp, ĐLNN sẽ nhận một trong các hàm $x_k(t)$ thuộc một tập hợp $X(t)$ nào đó (hình 2.1). Tập hợp $X(t)$ của tất cả các hàm $x_k(t)$ có thể có của đại

lượng ngẫu nhiên được gọi là quá trình ngẫu nhiên (QTNN). Mỗi hàm $x_k(t)$ được gọi là một thể hiện của QTNN $X(t)$. Ký hiệu QTNN là $X(t) = \{x_k(t)\}$ với $x_k(t)$ là thể hiện thứ k của nó.



Hình 2.1. Các thể hiện của một quá trình ngẫu nhiên

Trong các trình bày tiếp theo, tùy theo QTNN có thể là các hàm kích động (tải trọng, chuyển vị cưỡng bức, ...), có thể là đáp ứng của hệ (chuyển vị, vận tốc, gia tốc, nội lực, ...), sẽ có ký hiệu tương ứng, còn trong chương này sử dụng ký hiệu chung là $X(t)$.

2.1.3.2. Các đặc trưng xác suất của quá trình ngẫu nhiên

a. Hàm phân phối xác suất

Với mỗi $t = t_0$ cố định thì $\{x_k(t)\}$ là một ĐLNN vô hướng nên *phân phối xác suất* tại một thời điểm của $\{x_k(t)\}$ - ký hiệu $f_1(x, t)$ là phân phối của $\{x_k(t_0)\}$. Luật phân phối n thời điểm, ký hiệu $f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t_1, t_2, \dots, t_n)$ là phân phối đồng thời của QTNN tại n thời điểm $t_1, t_2, \dots, t_n$. Nếu biết luật phân phối n chiều của QTNN ta có thể tính được luật phân phối của nó với số chiều bé hơn n

theo công thức lặp sau [25], [73]:

$$f_{n-1}(x_1 \dots x_{n-1}; t_1 \dots t_{n-1}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_n(x_1 \dots x_n; t_1 \dots t_n) dx_n \quad (2.32)$$

Để mô tả đầy đủ một thể hiện $\{x_k(t)\}$ cần phải biết luật phân phối của nó tại mọi thời điểm.

b. Giá trị trung bình và phương sai

Tại mỗi thời điểm t_0 nào đó, các hàm $x_k(t)$ nhận các giá trị ngẫu nhiên $x_k(t_0)$, giá trị trung bình của tất cả các phần tử $x_k(t_0)$ là $m_x(t_0)$. Khi t_0 thay đổi từ 0 đến $+\infty$ thì $m_x(t_0)$ là hàm phụ thuộc thời gian, ký hiệu là $m_x(t)$, $M[X(t)]$ hoặc $\langle X(t) \rangle$ - gọi là giá trị trung bình của $X(t)$.

Phương sai của $X(t)$ được định nghĩa bằng hệ thức [25], [73]:

$$D_x(t) = M[(X(t) - m_x(t))^2] \quad (2.33)$$

Độ lệch chuẩn:

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)} \quad (2.34)$$

Nếu $Y(t) = c(t)X(t)$ với $c(t)$ là hàm tiền định thì:

$$m_y(t) = c(t)m_x(t) \quad (2.35)$$

$$D_y(t) = c^2(t)D_x(t) \quad (2.36)$$

c. Hàm tương quan

Tại một thời điểm t_0 , giá trị trung bình của tất cả các tích $x_i(t_0)x_j(t'_0)$ với $t'_0 = t_0 + \tau$, ký hiệu là $K_{xx}(t_0, t'_0)$ [25], [73]:

$$K_{xx}(t_0, t'_0) = \langle X(t_0) \cdot X(t'_0) \rangle \quad (2.37)$$

thể hiện tương quan giữa 2 thời điểm t_0 và t'_0 của hàm ngẫu nhiên $X(t)$. Khi t_0 thay đổi từ 0 đến $+\infty$ thì $K_{xx}(t, t')$ với $t' = t + \tau$ sẽ là một hàm của 2 biến (t, t') . Như vậy, *hàm tương quan* của quá trình $X(t)$ là giá trị trung bình của các

tích $X(t).X(t')$:

$$K_{xx}(t, t') = \langle X(t).X(t') \rangle \quad (2.38)$$

Để đơn giản, có thể thay ký hiệu hai chỉ số của hàm tương quan bằng ký hiệu với một chỉ số, tức là viết $K_x(t, t')$ thay cho $K_{xx}(t, t')$.

Nếu biết hàm mật độ xác suất tại 2 thời điểm (t, t') thì:

$$K_x(t, t') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x(t))(x' - m_x(t')) f_2(x, x'; t, t') dx dx' \quad (2.39)$$

Khi QTNN được cho dưới dạng các thể hiện của nó $\{x_k(t)\}$ các công thức trên có thể được thay thế bởi các công thức sau (lấy trung bình theo tập hợp):

$$\begin{aligned} m_x(t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t) \\ D_x(t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k(t) - m_x(t))^2 \\ K_x(t, t') &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k(t) - m_x(t))(x_k(t') - m_x(t')) \end{aligned} \quad (2.40)$$

với điều kiện các thể hiện của QTNN có cùng khả năng xuất hiện trong điều kiện như nhau.

Hàm tương quan chuẩn được định nghĩa bằng biểu thức:

$$\rho_x(t, t') = \frac{K_x(t, t')}{\sigma_x(t)\sigma_x(t')} \quad (2.41)$$

Nếu $Y(t) = c(t)X(t)$ với $c(t)$ là hàm tiền định thì:

$$K_y(t, t') = c(t)c(t')K_x(t, t') \quad (2.42)$$

Tương quan chéo của hai hàm ngẫu nhiên $X(t), Y(t)$ được định nghĩa như sau:

$$K_{xy}(t, t') = \langle X(t)Y(t') \rangle \quad (2.43)$$

Chú ý rằng:

$$K_{xy}(t, t') \neq K_{xy}(t', t) \quad (2.44)$$

$$K_{xy}(t, t') = K_{yx}(t, t') \quad (2.45)$$

Hàm tương quan chéo chuẩn được định nghĩa như sau:

$$\mu_{xy}(t, t') = \frac{K_{xy}(t, t')}{\sigma_x(t)\sigma_y(t')} \quad (2.46)$$

Xác định hàm tương quan chuẩn của hàm ngẫu nhiên sau đây: $X(t) = Ae^{-\alpha t}$ với A là $\bar{Y}_0, \bar{X}$ có giá trị trung bình m_A , phương sai D_A , α là hằng số.

Giá trị trung bình tính theo (2.35): $m_x(t) = m_A e^{-\alpha t}$.

Phương sai tính theo (2.33):

$$D_x(t) = \left\langle \left(Ae^{-\alpha t} - m_A e^{-\alpha t} \right)^2 \right\rangle = e^{-2\alpha t} \left\langle (A - m_A)^2 \right\rangle = e^{-2\alpha t} D_A \quad (2.47)$$

Hàm tương quan tính theo (2.38):

$$\begin{aligned} K_x(t, t') &= \left\langle \left(Ae^{-\alpha t} - m_A e^{-\alpha t} \right) \left(Ae^{-\alpha t'} - m_A e^{-\alpha t'} \right) \right\rangle \\ &= e^{-\alpha(t+t')} \left\langle (A - m_A)^2 \right\rangle = e^{-\alpha(t+t')} D_A \end{aligned} \quad (2.48)$$

Độ lệch chuẩn:

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)} = \sigma_A e^{-\alpha t} \quad (2.49)$$

Tương quan chuẩn:

$$\mu_x(t, t') = \frac{K_x(t, t')}{\sigma_x(t)\sigma_x(t')} = \frac{D_A e^{-\alpha(t+t')}}{\sigma_A^2 e^{-\alpha t} e^{-\alpha t'}} = 1 \quad (2.50)$$

d. Tích phân và đạo hàm của hàm ngẫu nhiên

Khi đã biết các đặc trưng xác suất của hàm ngẫu nhiên $X(t)$ thì tích phân

$Y(t) = \int_0^t X(\tau) d\tau$ là một hàm ngẫu nhiên, có những đặc trưng xác suất như sau [25]:

$$m_y(t) = \left\langle \int_0^t X(\tau) d\tau \right\rangle = \int_0^t \langle X(\tau) \rangle d\tau = \int_0^t m_x(\tau) d\tau \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned}
K_y(t, t') &= \left\langle (Y(t) - m_y(t))(Y(t') - m_y(t')) \right\rangle \\
&= \left\langle \int_0^t [X(\tau) - m_x(\tau)] d\tau \cdot \int_0^{t'} [X(\tau') - m_x(\tau')] d\tau' \right\rangle \quad (2.52) \\
&= \int_0^t \int_0^{t'} \langle X(\tau) - m_x(\tau) \rangle \langle X(\tau') - m_x(\tau') \rangle d\tau d\tau'
\end{aligned}$$

hay:

$$K_y(t, t') = \int_0^t \int_0^{t'} K_x(\tau, \tau') d\tau d\tau' \quad (2.53)$$

Đạo hàm của $Y(t) = \frac{d}{dt} X(t)$ là một hàm ngẫu nhiên, có những đặc trưng xác suất như sau:

$$m_y(t) = \left\langle \frac{d}{dt} X(t) \right\rangle = \frac{d}{dt} \langle X(t) \rangle = \frac{d}{dt} m_x(t) \quad (2.54)$$

$$K_y(t, t') = \frac{\partial^2 K_x(t, t')}{\partial t \partial t'} \quad (2.55)$$

Đối với phương trình vi phân tuyến tính bậc nhất:

$$\dot{Y} + kY = X(t) \quad (2.56)$$

trong đó $X(t)$ là hàm ngẫu nhiên với các đặc trưng xác suất $m_x(t), K_x(t, t')$ đã biết. Nghiệm tổng quát của phương trình (2.56) có dạng:

$$Y = Y_0 e^{-kt} + \int_0^t e^{-k(t-\tau)} X(\tau) d\tau \quad Y = Y_0 e^{-kt} + \int_0^t e^{-k(t-\tau)} X(\tau) d\tau \quad (2.57)$$

với $Y_0 = Y(0)$ là ĐLNN có giá trị trung bình m_0 và phương sai D_0 đã biết.

Khi đó, giá trị trung bình của hàm $Y(t)$ là:

$$m_y(t) = \langle Y_0 e^{-kt} \rangle + \int_0^t \langle e^{-k(t-\tau)} X(\tau) d\tau \rangle = m_0 e^{-kt} + \int_0^t e^{-k(t-\tau)} m_x(\tau) d\tau \quad (2.58)$$

Hàm tương quan của $Y(t)$ là:

$$K_y(t, t') = \left\langle \left(\bar{Y}_0 e^{-kt} + \int_0^t e^{-k(t-\tau)} \bar{X}(\tau) d\tau \right) \left(\bar{Y}_0 e^{-kt'} + \int_0^{t'} e^{-k(t'-\tau')} \bar{X}(\tau') d\tau' \right) \right\rangle \quad (2.59)$$

trong đó $\bar{Y}_0, \bar{X}$ tương ứng là các hàm quy tâm của Y_0, X . Giả thiết $\bar{Y}_0, \bar{X}$ độc lập thì sau một số biến đổi ta có:

$$K_y(t, t') = D_0 e^{-k(t+t')} + \int_0^t \int_0^{t'} e^{-k(t-\tau)} e^{-k(t'-\tau')} K_x(\tau, \tau') d\tau d\tau' \quad (2.60)$$

2.1.4. Quá trình ngẫu nhiên dừng

2.1.4.1. Định nghĩa và một số tính chất

Quá trình ngẫu nhiên $X(t)$ được gọi là quá trình dừng nếu các đặc trưng xác suất của nó gần như không phụ thuộc vào thời gian t , cụ thể là [25], [73]:

- Giá trị trung bình là hằng số:

$$m_x(t) = \text{const} \quad (2.61)$$

- Phương sai là hằng số:

$$D_x(t) = \text{const} \quad (2.62)$$

- Hàm tương quan không phụ thuộc vào các thời điểm lấy tương quan, mà chỉ phụ thuộc vào khoảng thời gian giữa 2 thời điểm. Tức là:

$$K_x(t, t') = K_x(t + t_0, t' + t_0) \text{ với mọi } t_0 \quad (2.63)$$

trong (2.63) nếu ta thay $t_0 = -t'$ thì:

$$K_x(t, t') = K_x(t - t', 0) = K_x(\tau) \quad (2.64)$$

Hàm tương quan là *hàm của chỉ một biến* $\tau = t' - t$ là khoảng cách giữa 2 thời điểm lấy tương quan, nó còn được gọi là *hàm tự tương quan*, ký hiệu là $R_x(\tau)$:

$$R_x(\tau) = \langle X(t) X(t + \tau) \rangle \quad (2.65)$$

Hàm tự tương quan của quá trình dừng biểu diễn theo (2.65) có những tính chất sau, $R_x(\tau)$ là hàm chẵn:

$$R_x(\tau) = R_x(-\tau) \quad (2.66)$$

$$R_x(\infty) = 0 \quad (2.67)$$

Hàm tự tương quan tại cùng thời điểm t bất kỳ ($\tau = t' - t = 0$) có giá trị lớn nhất so với hàm tương quan tại những thời điểm khác nhau ($\tau \neq 0$), giá trị đó bằng phương sai của hàm $x(t)$:

$$D_x = R_x(0) \geq |R_x(\tau)| \quad (2.68)$$

Nếu biết hàm mật độ phân phối hai thời điểm của $\{x_k(t)\}$ thì:

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 f(x_1, x_2, \tau) dx_1 dx_2 \quad (2.69)$$

Nếu biết tất cả các thể hiện $x_k(t)$ thì:

$$R_x(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t) x_k(t + \tau) \quad (2.70)$$

2.1.4.2. Quá trình Ergodic

Quá trình Ergodic là QTNN dừng mà các đặc trưng xác suất của nó chỉ cần lấy đối với một thể hiện bất kỳ. Khi đó, phép lấy trung bình theo tập hợp được xác định bằng phép lấy trung bình theo thời gian của một thể hiện bất kỳ.

$$\text{Giá trị trung bình: } m_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.71)$$

$$\text{Phương sai: } D_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (2.72)$$

$$\text{Hàm tự tương quan: } R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t + \tau) dt \quad (2.73)$$

trong đó $x(t)$ là một thể hiện bất kỳ của quá trình được xem xét. Điều kiện đủ để quá trình ngẫu nhiên dừng là quá trình Ergodic được cho bởi [25]:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T [R_x(\tau) - m_x^2] d\tau = 0 \quad (2.74)$$

2.1.4.3. Phép biến đổi Fourier

Đối với hàm $x(t)$ không tuần hoàn, thỏa mãn điều kiện $I = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty$,

tồn tại phép biến đổi Fourier như sau:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.75)$$

với:
$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.76)$$

Hệ thức (2.76) gọi là phép biến đổi Fourier thuận từ hàm $x(t)$ trong miền thời gian sang hàm $X(\omega)$ trong miền tần số, $X(\omega)$ gọi là ảnh Fourier của $x(t)$. Hệ thức (2.75) gọi là phép biến đổi Fourier ngược từ hàm $X(\omega)$ trong miền tần số sang hàm $x(t)$ trong miền thời gian, $X(\omega)$ gọi là ảnh ngược của $x(t)$. Thật vậy từ (2.75) và (2.76) ta có:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega \tau} d\tau \right]}_{X(\omega)} e^{i\omega t} d\omega \quad (2.77)$$

Thay $e^{-i\omega t}$ trong móc vuông nhờ công thức Euler: $e^{-i\omega t} = \cos \omega t - i \sin \omega t$ thì:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t) (\cos \omega t - i \sin \omega t) d\tau \right]}_{X(\omega)} e^{i\omega t} d\omega =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{\left[\underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t d\tau}_{a(\omega)} - i \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \sin \omega t d\tau}_{b(\omega)} \right]}_{X(\omega)} e^{i\omega t} d\omega \quad (2.78)$$

Do đó:
$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [a(\omega) - ib(\omega)] e^{i\omega t} d\omega \quad (2.79)$$

với:
$$a(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \quad (2.80)$$

$$b(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt \quad (2.81)$$

Như vậy, ảnh fourier $X(\omega)$ (là hàm phức) có thể tính qua các hàm thực $a(\omega), b(\omega)$:

$$X(\omega) = a(\omega) - ib(\omega) \quad (2.82)$$

Viết (2.82) dưới dạng modul và argument :

$$X(\omega) = |X(\omega)| e^{-i\varphi(\omega)} \quad (2.83)$$

với:
$$|X(\omega)| = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} \quad (2.84)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{b(\omega)}{a(\omega)} \quad (2.85)$$

$X(\omega)$ biểu diễn theo (2.76) hoặc (2.83) gọi là *mật độ phổ phức*, modul $|X(\omega)|$ của nó biểu diễn theo (2.84) gọi là *mật độ phổ thực* (đôi lúc gọi tắt là mật độ phổ), giá trị của nó chính bằng hàm mật độ $A(\omega)$ xác định theo $A(\omega) = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}$, còn $\varphi(\omega)$ gọi là *mật độ phổ pha*. Hàm *mật độ phổ công suất* được định nghĩa tương tự $A^2(\omega) = a^2(\omega) + b^2(\omega)$, tức là :

$$|X(\omega)|^2 = a^2(\omega) + b^2(\omega) \quad (2.86)$$

Biến đổi Fourier (2.76) có ý nghĩa vật lý như sau : $X(\omega)$ và $x(t)$ cùng biểu diễn một đại lượng vật lý. Hàm $x(t)$ biểu diễn quan hệ biên độ - thời gian, còn hàm $x(\omega)$ biểu diễn quan hệ biên độ - tần số. Sự phân tích tần số của $x(t)$ yêu cầu biết toàn bộ $x(t)$. Trong thực tế chỉ biết được $x(t)$ trong đoạn hữu hạn $[0, t]$ nên không thể biết được các tần số của nó ở bước $\Delta\omega$ bé hơn $2\pi/t$. Tương tự, muốn biết giá trị của $x(t)$ thì phải có dải tần số rộng vô tận.

2.1.5. Hàm mật độ phổ

2.1.5.1. Định nghĩa

Nếu $x(t)$ là thể hiện của một QTNN dừng thì $\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt = \infty$ do đó biến đổi Fourier của hàm $x(t)$ không tồn tại. Tuy nhiên, trong thực tế thể hiện $x(t)$ luôn được quan trắc trong khoảng thời gian hữu hạn. Do đó phổ $X(\omega)$ được thay bởi biến đổi Fourier hữu hạn trong miền thời gian $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$, ký hiệu là $X_T(\omega)$ và được xác định như sau:

$$X_T(\omega) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.87)$$

Xét giá trị trung bình bình phương theo thời gian của hàm $x(t)$ trong miền hữu hạn $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$, ta có:

$$\langle x^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |X_T(\omega)|^2 d\omega \right] \quad (2.88)$$

Hoán vị phép lấy tích phân và giới hạn nhận được:

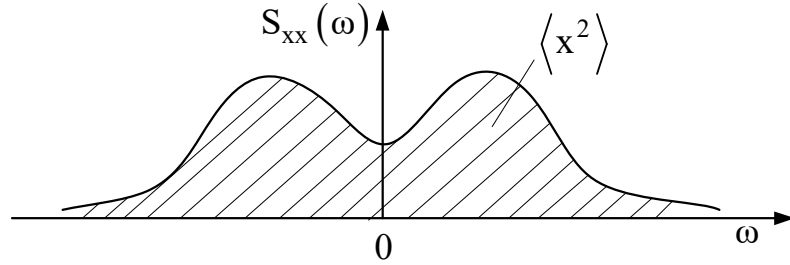
$$\langle x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\underbrace{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \frac{|X_T(\omega)|^2}{2\pi}}_{S_{xx}(\omega)} \right) d\omega \quad (2.89)$$

$$\text{Biểu thức dưới dấu tích phân: } S_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \frac{|X_T(\omega)|^2}{2\pi} \quad (2.90)$$

được gọi là *hàm mật độ phổ* của quá trình $x(t)$.

Như vậy: diện tích của biểu đồ hàm mật độ phổ trong toàn miền tần số là phương sai của hàm ngẫu nhiên dừng (hình 2.2). Thứ nguyên của $S_{xx}(\omega)$

bằng thứ nguyên của x^2 nhân với thứ nguyên của thời gian t (s). Ví dụ $x(t)$ là chuyển vị dài đo bằng mét thì thứ nguyên của $S_{xx}(\omega)$ là m^2s .



Hình 2.2. Quan hệ giữa phương sai và mật độ phổ

Với ký hiệu (2.90), ta có:

$$\langle x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega \quad (2.91)$$

2.1.5.2. Công thức Wiener - Chintchin

Quan hệ giữa hàm mật độ phổ và hàm tự tương quan của quá trình ngẫu nhiên dừng, Ergodic được xác định xuất phát từ định nghĩa hàm tự tương quan của nó [25], [73]:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) x(t+\tau) d\tau \quad (2.92)$$

Theo biến đổi Fourier: $x(t+\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega(t+\tau)} d\omega$ (2.93)

nên:
$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left[x(t) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega(t+\tau)} d\omega \right] dt \quad (2.94)$$

Hoán vị 2 phép lấy tích phân trong công thức trên ta có:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[X(\omega) \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{i\omega t} dt \right] e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2.95)$$

Thành phần $\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{i\omega t} dt$ trong ngoặc vuông ở (2.95) chính là ảnh liên

hợp của hàm $x(t)$ (tức là thay i bởi $-i$), ký hiệu là $X^*(\omega)$. Do đó:

$$\frac{dR_{xx}(\tau)}{d\tau} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t-\tau) \dot{x}(t) dt \quad (2.96)$$

Theo định nghĩa hàm mật độ phổ (2.90) ta có:

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2.97)$$

như vậy là:

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.98)$$

Các hệ thức (2.97) và (2.98) gọi là *công thức Wiener - Chintchin*, xác định quan hệ giữa hàm mật độ phổ và hàm tự tương quan: $S_{xx}(\omega)$ là ảnh Fourier của $\frac{R_x(\tau)}{2\pi}$.

Như vậy, hàm mật độ phổ có 2 cách định nghĩa: định nghĩa bằng phép biến đổi Fourier theo (2.90), định nghĩa bằng hàm tự tương quan theo (2.98).

Từ (2.97) ta có: $R_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega$, mặt khác $R_x(0) = \langle x^2 \rangle$ nên ta cũng

nhận được hệ thức $\langle x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega$ (phương sai của quá trình $x(t)$ là diện tích của biểu đồ hàm mật độ phổ trong miền tần số).

2.1.5.3. Các tính chất của hàm mật độ phổ

Hàm mật độ phổ có những tính chất sau:

Với định nghĩa theo (2.90), $S_{xx}(\omega)$ là hàm thực không âm [25]:

$$S_{xx}(\omega) \geq 0 \quad (2.99)$$

Mật độ phổ là hàm chẵn: $S_{xx}(\omega) = S_{xx}(-\omega)$ (2.100)

Do $S_{xx}(\omega)$ là hàm chẵn nên (2.91) có thể viết thành:

$$\langle x^2 \rangle = 2 \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega \quad (2.101)$$

Phổ vận tốc và phổ gia tốc:

- Đối với quá trình dừng, đạo hàm theo thời gian của hàm tự tương quan là:

$$\frac{dR_{xx}(\tau)}{dt} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t-\tau) \dot{x}(t) dt \quad (2.102)$$

- Đạo hàm (2.102) theo t ta có:

$$\frac{d^2 R_{xx}(\tau)}{dt^2} = - \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}(t-\tau) \dot{x}(t) dt = -R_{\dot{x}\dot{x}}(\tau) \quad (2.103)$$

Theo (2.97) và tính chất của phép biến đổi Fourier ta có:

$$\frac{d^2 R_{xx}(\tau)}{dt^2} = - \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_{xx}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2.104)$$

So sánh (2.103) và (2.104) rút ra:

$$R_{\dot{x}\dot{x}}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_{xx}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\dot{x}\dot{x}}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2.105)$$

$$\text{Vậy nên:} \quad S_{\dot{x}\dot{x}}(\omega) = \omega^2 S_{xx}(\omega) \quad (2.106)$$

$$\text{Tương tự ta cũng có:} \quad S_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega) = \omega^4 S_{xx}(\omega) \quad (2.107)$$

2.1.5.4. Momen phổ, chiều rộng phổ

Momen bậc n của hàm ngẫu nhiên $x(t)$ được định nghĩa bằng biểu thức [25], [73]:

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^n S_{xx}(\omega) d\omega \quad (2.108)$$

Đối với hàm ngẫu nhiên quy tâm ($m_0 = 0$) ta có:

$$\langle x^2 \rangle = \sigma_x^2 = R_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega = m_0 \quad (2.109)$$

$$\langle \dot{x}^2 \rangle = \sigma_{\dot{x}}^2 = R_{\dot{x}\dot{x}}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_{xx}(\omega) d\omega = m_2 \quad (2.110)$$

$$\langle \ddot{x}^2 \rangle = \sigma_{\ddot{x}}^2 = R_{\ddot{x}\ddot{x}}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^4 S_{xx}(\omega) d\omega = m_4 \quad (2.111)$$

$$\langle x\dot{x} \rangle = R_{x\dot{x}}(0) = 0 \quad (2.112)$$

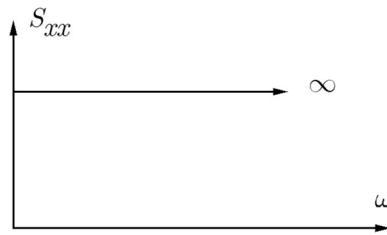
$$\langle x\ddot{x} \rangle = R_{x\ddot{x}}(0) = -R_{\dot{x}\dot{x}}(0) = -m_2 \quad (2.113)$$

$$\langle \dot{x}\ddot{x} \rangle = R_{\dot{x}\ddot{x}}(0) = 0 \quad (2.114)$$

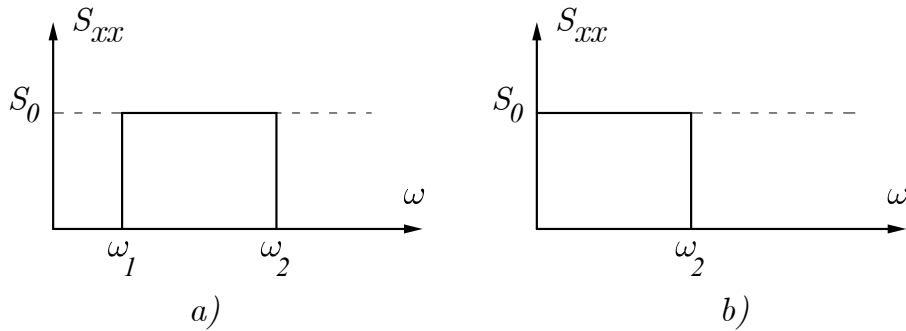
Tham số chiều rộng phổ được định nghĩa như sau:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (2.115)$$

- *Phổ dải rộng* được đặc trưng bởi đường cong phổ trải rộng ra trên một dải tần số khá lớn. Trường hợp điển hình là quá trình ngẫu nhiên dừng mà phổ của nó có giá trị không đổi đối với mọi ω (hình 2.3), quá trình ngẫu nhiên như vậy được gọi là quá trình ngẫu nhiên ồn trắng. Trong thực tế hay gặp quá trình ngẫu nhiên ồn trắng giới hạn trong một phạm vi tần số từ ω_1 đến ω_2 (hình 2.4).



Hình 2.3. Phổ của quá trình ngẫu nhiên ồn trắng



Hình 2.4. Hai trường hợp đặc biệt của quá trình ngẫu nhiên ồn trắng

Hàm tự tương quan đối với quá trình này được xác định nhờ định lý Wiener - Chintschin:

$$R_x(t) = 2 \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) \cos \omega t d\omega = 2S_0 \int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \omega t d\omega = 2S_0 \frac{\sin \omega_2 t - \sin \omega_1 t}{t} \quad (2.116)$$

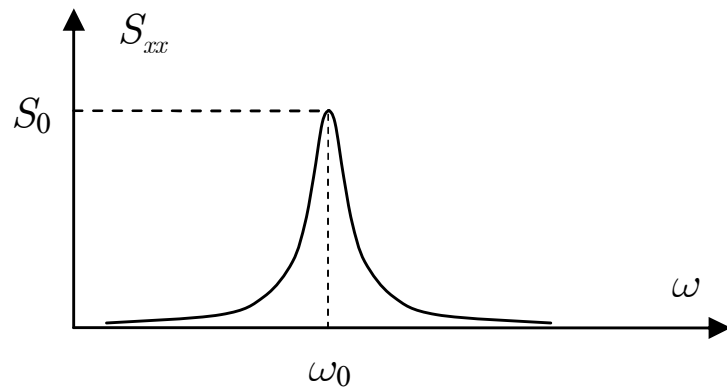
$$\text{Nếu } \omega_1 = 0 \text{ thì: } R_{xx}(t) = 2S_0 \frac{\sin \omega_2 t}{t} \quad (2.117)$$

Các momen phổ khi đó bằng:

$$\begin{aligned} m_0 &= 2S_0 \int_0^{\omega_2} d\omega = 2S_0 \omega_2 \\ m_2 &= 2S_0 \int_0^{\omega_2} \omega^2 d\omega = \frac{2}{3} S_0 \omega_2^3 \\ m_4 &= 2S_0 \int_0^{\omega_2} \omega^4 d\omega = \frac{2}{5} S_0 \omega_2^5 \end{aligned} \quad (2.118)$$

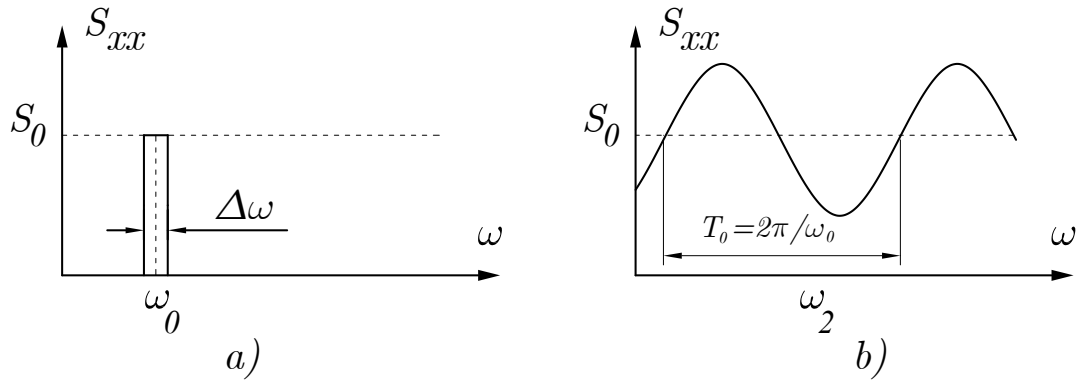
$$\text{Chiều rộng phổ bằng: } \varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} = \frac{2}{3} \quad (2.119)$$

Phổ dải hẹp được đặc trưng bởi hàm phổ có giá trị lớn trong một phạm vi hẹp của tần số ω quanh một tần số ω_0 nào đó và có điểm cực đại rõ ràng còn các giá trị khác là rất nhỏ (hình 2.5).



Hình 2.5. Phổ của một quá trình dải hẹp

Trường hợp điển hình, phổ dải hẹp có dạng như trên hình 2.6a và quá trình ngẫu nhiên tương ứng có dạng như hình 2.6b.



Hình 2.6. Phổ dải hẹp điển hình và quá trình tương ứng

Khi đó, phương sai và hàm tự tương quan lần lượt là:

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega = 2S_0\Delta\omega \quad (2.120)$$

$$R_{xx}(t) = 2 \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) \cos \omega t d\omega = S_0 \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} \cos \omega t d\omega \quad (2.121)$$

Cho $\Delta\omega \rightarrow 0$ thì $K_{xx}(t) \approx 2S_0\Delta\omega \cos \omega_0 t = \sigma_x^2 \cos \omega_0 t$. Như vậy đối với phổ hẹp lý tưởng tại tần số ω_0 thì hàm tương quan là hàm điều hòa tần số ω_0 , mật độ phổ là hàm Dirac. Đối với phổ hẹp lý tưởng, các momen phổ bằng:

$$\begin{aligned} m_0 &= 2S_0\Delta\omega = \sigma_x^2 \\ m_2 &= 2S_0 = 2S_0\Delta\omega\omega_0^2 = \sigma_x^2\omega_0^2 \\ m_4 &= 2S_0\Delta\omega\omega_0^4 = \sigma_x^2\omega_0^4 \end{aligned} \quad (2.122)$$

Chiều rộng phổ: $\varepsilon = 0$.

2.2. Công thức phân tử hữu hạn tính toán cho dầm chịu uốn

* Các giả thiết cơ bản:

- Kết cấu làm việc trong miền đàn hồi
- Dầm, thanh không gian thỏa mãn lý thuyết cổ điển Euler – Bernoulli.
- Tải trọng ngẫu nhiên tác động lên kết cấu là loại ngẫu nhiên dừng.

2.2.1. Phần tử dầm không có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD

Xét phần tử dầm chịu uốn có chiều dài a , mặt cắt ngang không đổi, giả thiết dầm làm việc trong giới hạn đàn hồi, trường chuyển vị của một điểm bất kỳ có tọa độ z thỏa mãn lý thuyết dầm Euler - Bernoulli, do đó ta có thể viết như sau [15, 16, 54, 65, 67, 82]:

$$\begin{cases} u(x, z, t) = u_0(x, 0, t) + z\theta_y \\ w(x, z, t) = w_0(x, 0, t) \end{cases} \quad (2.123)$$

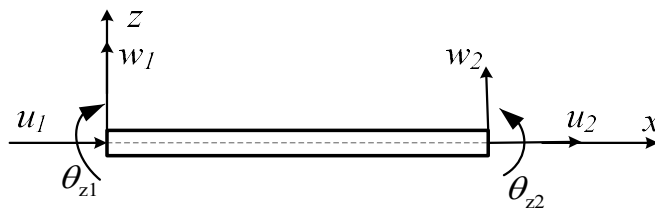
trong đó u, w là chuyển vị dọc theo trục x và z của điểm bất kỳ trên mặt cắt ngang của dầm; u_0, w_0 là các chuyển vị tại trục trung hòa của dầm dọc theo trục x và z ; còn $\theta_y = \frac{\partial w}{\partial x}$ là góc xoay của mặt cắt ngang dầm quay trục y vuông góc với mặt phẳng xz .

Chuyển vị của mọi điểm theo phương vuông góc trục dầm $w(x)$ được chọn là đa thức xấp xỉ bậc 3:

$$w(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 \quad (2.124)$$

hay:

$$w(x) = P(x)a \quad (2.125)$$



Hình 2.7. Phần tử dầm hai điểm nút chịu uốn

trong đó, véc tơ $P(x)$ được xác định theo công thức:

$$P(x) = \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \end{Bmatrix} \quad (2.126)$$

và véc tơ tham số a được tính bởi công thức:

$$\mathbf{a} = \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} \quad (2.127)$$

Hàm $w(x)$ theo công thức (2.125) phải thỏa mãn đồng nhất chuyển vị và đạo hàm bậc nhất tại hai điểm nút của phần tử. Sử dụng phần tử dầm hai điểm nút, mỗi nút có 3 bậc tự do (hình 2.7), vecto chuyển vị nút phần tử được biểu diễn bởi công thức:

$$\mathbf{q}_{we} = \mathbf{A}\mathbf{a} \quad (2.128)$$

trong đó:

$$\mathbf{q}_{we} = \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_{y1} \\ w_2 \\ \theta_{y2} \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix}_e \quad (2.129)$$

là véc tơ chuyển vị nút gồm 6 bậc tự do (03 bậc tự do tại mỗi nút).

Còn ma trận hệ số $\mathbf{A}$ được xác định bởi:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & a^3 \\ 0 & 1 & 2a & 3a^2 \end{bmatrix} \quad (2.130)$$

Ma trận $\mathbf{A}$ này tồn tại nghịch đảo:

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3/a^2 & -2/a & 3/a^2 & -1/a \\ 2/a^3 & 1/a^2 & -2/a^3 & 1/a^2 \end{bmatrix} \quad (2.131)$$

Từ công thức (2.128) ta suy ra: $\mathbf{a} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{q}_{we} \quad (2.132)$

Thay véc tơ $\mathbf{a}$ thu được từ (2.132) vào công thức (2.125) ta biểu diễn được hàm chuyển vị $w(x)$ theo vecto chuyển vị nút $\mathbf{q}_{we}$ dưới dạng sau:

$$w(x) = P(x)A^{-1}q_{we} = N_w q_{we} \quad (2.133)$$

trong đó, N_w là ma trận hàm dạng :

$$N_w = [N_{1w} \quad N_{2w} \quad N_{3w} \quad N_{4w}] \quad (2.134)$$

với:

$$\begin{cases} N_{1w}(x) = 1 - 3\frac{x^2}{a^2} + 2\frac{x^3}{a^3} \\ N_{2w}(x) = x \left(1 - 2\frac{x}{a} + \frac{x^2}{a^2} \right) \\ N_{3w}(x) = 3\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{x^3}{a^3} \\ N_{4w}(x) = x \left(-\frac{x}{a} + \frac{x^2}{a^2} \right) \end{cases} \quad (2.135)$$

Xây dựng tương tự như đối với chuyển vị dọc trục $u_0(x)$ của phần tử dầm, ta có:

$$u_0(x) = N_u q_{ue} \quad (2.136)$$

trong đó, N_u là ma trận hàm dạng:

$$N_u(x) = [N_{1u}(x) \quad N_{2u}(x)] = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{a} & \frac{x}{a} \end{bmatrix} \quad (2.137)$$

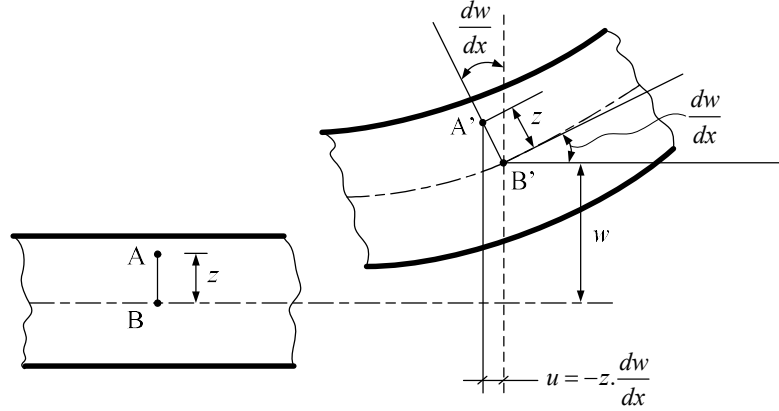
và véc tơ chuyển vị nút: $q_{ue} = \begin{Bmatrix} u_{01} \\ u_{02} \end{Bmatrix}_e \quad (2.138)$

Theo [45, 105], khi dầm chịu uốn mặt cắt ngang của dầm còn là phẳng, khi biến dạng và xoay đi góc $\theta_y = \frac{\partial w}{\partial x}$. Do đó chuyển vị dọc trục u và độ võng w có quan hệ (như hình 2.8):

$$u = u_0 + z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.139)$$

trong đó z là khoảng cách từ điểm đang xét tới đường trung hòa.

Biến dạng dọc trục dầm: $\varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} + z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ (2.140)



Hình 2.8. Biến dạng của phần tử dầm chịu uốn

Thay biểu thức (2.133) vào biểu thức (2.140), ta được:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial N_u}{\partial x} q_{ue} + z \frac{\partial^2 N_w}{\partial x^2} q_{we} = \mathbf{B}_u q_{ue} + \mathbf{B}_w q_{we} = \mathbf{B} \mathbf{q}_e \quad (2.141)$$

trong đó:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_u & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_w \end{bmatrix}; \mathbf{B}_u = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{N}_u; \mathbf{B}_w = z \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{N}_w; \mathbf{q} = \{q_u \quad q_w\}^T \quad (2.142)$$

Biểu thức thế năng biến dạng trong phần tử dầm có dạng sau [15, 16, 54, 67, 82]:

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \left(EF \int_0^a [u'(x, t)]^2 dx + EI_y \int_0^a [w''(x, t)]^2 dx \right) \quad (2.143)$$

trong đó, E là mô đun đàn hồi của vật liệu, F là diện tích mặt cắt ngang của dầm, và I_y là mô men quán tính của mặt cắt ngang dầm.

Viết dưới dạng ma trận, ta thu được biểu thức thế năng như sau:

$$\begin{aligned} \Pi_e &= \frac{1}{2} \int_0^a \mathbf{D} [\mathbf{B}(x) \mathbf{q}(t)]^2 dx = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T(t) \left[\int_0^a \mathbf{B}^T(x) \mathbf{D} \mathbf{B}(x) dx \right] \mathbf{q}(t) \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{q}^T(t) \mathbf{k}_e \mathbf{q}(t) \end{aligned} \quad (2.144)$$

trong đó, $\mathbf{k}_e$ là ma trận độ cứng phần tử, có biểu thức:

$$\mathbf{k}_e = \int_0^a \mathbf{B}^T(x) \mathbf{D} \mathbf{B}(x) dx \quad (2.145)$$

với ma trận hằng số vật liệu:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} EF & 0 \\ 0 & EI_y \end{bmatrix} \quad (2.146)$$

Thay các ma trận thành phần vào ma trận độ cứng (2.145), ta có biểu thức tường minh của ma trận độ cứng như sau:

$$\mathbf{k}_e = \int_0^a \begin{bmatrix} \frac{EF}{a} & 0 & 0 & -\frac{EF}{a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_y}{a^3} & \frac{6EI_y}{a^2} & 0 & -\frac{12EI_y}{a^3} & \frac{6EI_y}{a^2} \\ 0 & 0 & \frac{4EI_y}{a} & 0 & -\frac{6EI_y}{a^2} & \frac{2EI_y}{a} \\ & & & \frac{EF}{a} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{12EI_y}{a^3} & -\frac{6EI_y}{a^2} \\ & & & & & \frac{4EI_y}{a} \end{bmatrix} dx \quad (2.147)$$

Biểu thức công của ngoại lực, lực quán tính và của lực cản được viết như sau:

$$\begin{aligned} A_e = & - \left\{ \int_0^a \mathbf{p}_w(x, t) w(x, t) dx \right. \\ & \left. + \int_0^a -m \ddot{u}(x, t) u(x, t) dx + \int_0^a -m \ddot{w}(x, t) w(x, t) dx \right\} \\ & - \frac{1}{2} \left\{ \int_0^a -c \dot{u}(x, t) u(x, t) dx + \int_0^a -c \dot{w}(x, t) w(x, t) dx \right\} \end{aligned} \quad (2.148)$$

hoặc viết dưới dạng thu gọn dưới dạng ma trận:

$$\begin{aligned} A_e = & -\mathbf{q}^T(t) \int_0^a \mathbf{N}^T(x) \mathbf{p}(x, t) dx + \frac{1}{2} \mathbf{q}^T(t) \int_0^a \mathbf{N}^T(x) \mathbf{N}(x) dx m_e^{\text{pb}} \ddot{\mathbf{q}}(t) \\ & + \frac{1}{2} \mathbf{q}^T(t) \int_0^a \mathbf{N}^T(x) \mathbf{N}(x) dx c \dot{\mathbf{q}}(t) \end{aligned} \quad (2.149)$$

trong đó:

- m là khối lượng trên đơn vị độ dài dầm.
- c là hệ số cản trên một đơn vị độ dài dầm.
- p_w là tải trọng phân bố trên đơn vị độ dài dầm.
- $p(x,t)$ là véc tơ lực phân bố trên phần tử:

$$p(x,t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ p_w(x,t) \end{Bmatrix} \quad (2.150)$$

- m_e^{pb} là ma trận khối lượng phân bố:

$$m_e^{pb} = \begin{bmatrix} m_u & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & m_w \end{bmatrix}; m_u = m_w = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \quad (2.151)$$

Viết gọn lại biểu thức (2.149), ta được:

$$A_e = -\mathbf{q}_e^T(t) \mathbf{P}_e(t) + \frac{1}{2} \mathbf{q}_e^T(t) m_e \ddot{\mathbf{q}}_e(t) + \frac{1}{2} \mathbf{q}_e^T(t) c_e \dot{\mathbf{q}}_e(t) \quad (2.152)$$

trong đó: m_e là ma trận khối lượng phần tử; $\mathbf{P}_e(t)$ là véc tơ lực nút phần tử và c_e là ma trận cản phần tử. Chúng được xác định như sau:

$$m_e = \frac{ma}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22a & 0 & 54 & -13a \\ 0 & 0 & 4a^2 & 0 & 13a & -3a^2 \\ & & & 140 & 0 & 0 \\ & & & & 156 & -22a \\ dx & & & & & 4a^2 \end{bmatrix} \quad (2.153)$$

$$c_e = \frac{ca}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22a & 0 & 54 & -13a \\ 0 & 0 & 4a^2 & 0 & 13a & -3a^2 \\ & & & 140 & 0 & 0 \\ & & & & 156 & -22a \\ dx & & & & & 4a^2 \end{bmatrix}; \mathbf{P}_e(t) = \int_0^a \mathbf{N}^T(x) p_w(x,t) dx \quad (2.154)$$

Theo nguyên lý dừng của thế năng toàn phần, ta có phương trình:

$$\frac{\partial V}{\partial q_i} = \frac{\partial (\Pi_e + A_e)}{\partial q_i} = 0; (q_i = u, w, \theta_y) \quad (2.155)$$

Thay các biểu thức thế năng, công ở trên vào biểu thức (2.152), ta thu được

phương trình dao động cưỡng bức của phần tử dầm chịu uốn có dạng như sau:

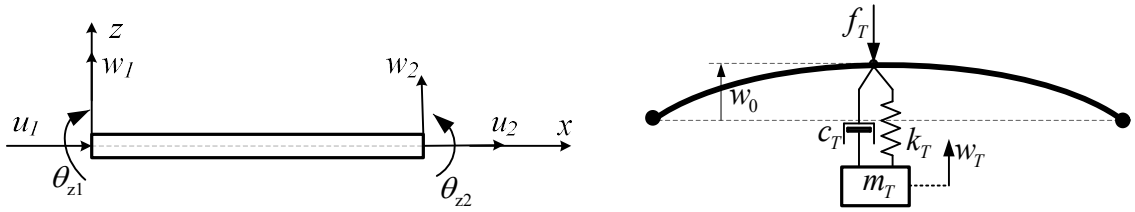
$$\mathbf{m}_e \ddot{\mathbf{q}}_e(t) + \mathbf{c}_e \dot{\mathbf{q}}_e(t) + \mathbf{k}_e \mathbf{q}_e(t) = \mathbf{P}_e(t) \quad (2.156)$$

2.2.2. Phần tử dầm có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD

Xét phần tử dầm có lắp TMD (hình 2.9), TMD chỉ chuyển vị theo phương thẳng đứng tương ứng với chuyển vị w_0 của dầm này.

Gọi w_T là chuyển vị của khối lượng m_T trong hệ giảm dao động TMD, từ đây ta viết được phương trình dao động của khối lượng m_T :

$$m_T \ddot{w}_T + c_T (\dot{w}_T - \dot{w}_0) + k_T (w_T - w_0) = 0 \quad (2.157)$$



Hình 2.9. Phần tử dầm hai điểm nút và tương tác giữa TMD với dầm

Lực tập trung f_T do TMD tác dụng lên dầm được tính như sau:

$$f_T = k_T (w_T - w_0) + c_T (\dot{w}_T - \dot{w}_0) \quad (2.158)$$

trong đó:

$$w_0 = \mathbf{N}_w \mathbf{q}_e; \quad \dot{w}_0 = \frac{\partial w_0}{\partial t} = \mathbf{N}_w \dot{\mathbf{q}}_e; \quad \mathbf{N}_w = \sum_{i=1}^2 [0, \mathbf{N}_{wi}, 0] \quad (2.159)$$

Kết hợp hai phương trình dao động của dầm và của TMD ta được hệ phương trình dao động của phần tử có lắp TMD như sau:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_e & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & m_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_e \\ \ddot{w}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_e + \mathbf{c}_T \mathbf{N}_w^T \mathbf{N}_w & -\mathbf{c}_T \mathbf{N}_w^T \\ -\mathbf{c}_T \mathbf{N}_w & \mathbf{c}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_e \\ \dot{w}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_e + \mathbf{k}_T \mathbf{N}_w^T \mathbf{N}_w & -\mathbf{k}_T \mathbf{N}_w^T \\ -\mathbf{k}_T \mathbf{N}_w & \mathbf{k}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_e \\ w_T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_e(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.160)$$

Như vậy, khi lắp thêm 1 TMD thì hệ phương trình dao động của phần tử dầm được tăng lên 1 phương trình tương ứng với 1 phương trình của TMD được lắp thêm như phương trình (2.160). Lúc đó, ma trận khối lượng, ma trận độ

cứng, ma trận cản của phần tử dầm được cộng thêm các hàng, cột chứa các thành phần khối lượng m_T , độ cứng k_T và hệ số cản c_T của TMD.

Sau khi tập hợp và khử điều kiện biên, ta thu được phương trình dao động cưỡng bức của dầm có dạng [15, 16, 54, 65]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{K}\mathbf{Q} = \mathbf{F} \quad (2.161)$$

trong đó $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ lần lượt là ma trận khối lượng tổng thể, ma trận cản tổng thể, ma trận độ cứng tổng thể của kết cấu, $\mathbf{Q}$ và $\mathbf{F}$ là véc tơ chuyển vị tổng thể và véc tơ lực tổng thể của kết cấu.

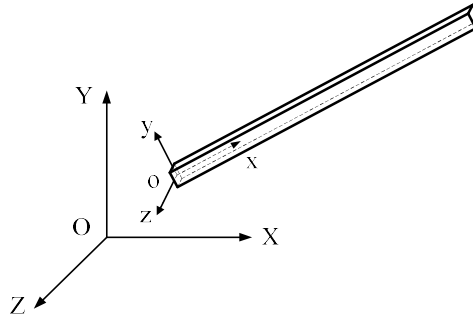
2.3. Công thức phần tử hữu hạn tính toán khung không gian

2.3.1. Khung không gian không có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD

Xét phần tử thanh không gian trong hệ tọa độ địa phương và hệ tọa độ tổng thể như trên hình 2.10. Véc tơ chuyển vị $\mathbf{u}(x, t)$ tại một điểm bất kỳ thuộc phần tử trong hệ tọa độ địa phương gồm 6 thành phần như sau [15, 16, 54, 65]:

$$\mathbf{u} = [u \ v \ \theta_z \ w \ \theta_y \ \varphi]^T \quad (2.162)$$

trong đó: u, v, w là các chuyển vị thẳng dọc theo các trục tọa độ x, y, z ; φ là góc xoắn quanh trục x của dầm; θ_z, θ_y là các góc xoay quanh của mặt cắt ngang dầm quanh các trục z và y .



Hình 2.10. Mô hình phần tử thanh không gian

Chúng được xác định theo công thức sau:

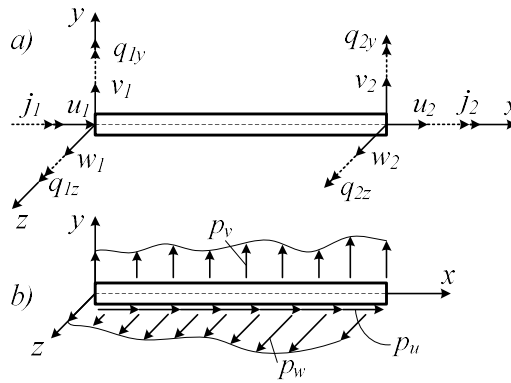
$$\begin{cases} \theta_z = \frac{\partial v}{\partial x} \\ \theta_y = \frac{\partial w}{\partial x} \end{cases} \quad (2.163)$$

Ta có thể viết nhóm lại véc tơ chuyển vị nút $\mathbf{q}$ của phần tử thanh không gian gồm bốn thành phần như sau:

$$\mathbf{q}_e(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_u(t) \\ \mathbf{q}_v(t) \\ \mathbf{q}_w(t) \\ \mathbf{q}_\varphi(t) \end{Bmatrix}_e \quad (2.164)$$

trong đó:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_u(t) = \{u_1 & u_2\}^T \\ \mathbf{q}_v(t) = \{v_1 & \theta_{1z} & v_2 & \theta_{2z}\}^T \\ \mathbf{q}_w(t) = \{w_1 & \theta_{1y} & w_2 & \theta_{2y}\}^T \\ \mathbf{q}_\varphi(t) = \{\varphi_1 & \varphi_2\}^T \end{cases} \quad (2.165)$$



Hình 2.11. Các thành phần chuyển vị của phần tử thanh không gian (a) và lực phân bố tác dụng lên phần tử thanh không gian (b)

Trường chuyển vị của một điểm bất kỳ thuộc thanh không gian sẽ được nội suy thông qua ma trận hàm dạng và véc tơ chuyển vị nút như sau:

$$\mathbf{u}(x, t) = \mathbf{N}(x) \mathbf{q}_e(t) \quad (2.166)$$

trong đó, $\mathbf{N}$ là ma trận các hàm dạng và được xác định bởi

$$\mathbf{N}(x) = \begin{bmatrix} N_u(x) & & & \\ & N_v(x) & & \\ & & N_w(x) & \\ & & & N_\varphi(x) \end{bmatrix} \quad (2.167)$$

trong đó, các hàm dạng Hermite được sử dụng nhằm thỏa mãn sự liên tục cả về chuyển vị cũng như đạo hàm bậc nhất của chuyển vị tại các điểm nút, chúng

được biểu diễn dưới dạng:

$$\mathbf{N}_u(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} N_{1u}(\mathbf{x}) & N_{2u}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (2.168)$$

$$\mathbf{N}_v(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} N_{1v}(\mathbf{x}) & N_{2v}(\mathbf{x}) & N_{3v}(\mathbf{x}) & N_{4v}(\mathbf{x}) \\ \frac{dN_{1v}(\mathbf{x})}{dx} & \frac{dN_{2v}(\mathbf{x})}{dx} & \frac{dN_{3v}(\mathbf{x})}{dx} & \frac{dN_{4v}(\mathbf{x})}{dx} \end{bmatrix} \quad (2.169)$$

$$\mathbf{N}_w(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} N_{1w}(\mathbf{x}) & N_{2w}(\mathbf{x}) & N_{3w}(\mathbf{x}) & N_{4w}(\mathbf{x}) \\ \frac{dN_{1w}(\mathbf{x})}{dx} & \frac{dN_{2w}(\mathbf{x})}{dx} & \frac{dN_{3w}(\mathbf{x})}{dx} & \frac{dN_{4w}(\mathbf{x})}{dx} \end{bmatrix} \quad (2.170)$$

$$\mathbf{N}_\phi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} N_{1\phi}(\mathbf{x}) & N_{2\phi}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (2.172)$$

trong đó các hàm dạng được cho cụ thể như sau:

$$N_{1v}(\mathbf{x}) = \left(1 - 3\frac{x^2}{a^2} + 2\frac{x^3}{a^3} \right); \frac{dN_{1v}(\mathbf{x})}{dx} = \left(-6\frac{x}{a^2} + 6\frac{x^2}{a^3} \right) \quad (2.173)$$

$$N_{2v}(\mathbf{x}) = \left(x - 2\frac{x^2}{a} + \frac{x^3}{a} \right); \frac{dN_{2v}(\mathbf{x})}{dx} = \left(1 - 4\frac{x}{a} + 3\frac{x^2}{a} \right) \quad (2.174)$$

$$N_{3v}(\mathbf{x}) = \left(3\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{x^3}{a^3} \right); \frac{dN_{3v}(\mathbf{x})}{dx} = \left(6\frac{x}{a^2} - 6\frac{x^2}{a^3} \right) \quad (2.175)$$

$$N_{4v}(\mathbf{x}) = \left(-\frac{x^2}{a^2} + \frac{x^3}{a^3} \right); \frac{dN_{4v}(\mathbf{x})}{dx} = \left(-2\frac{x}{a^2} + 3\frac{x^2}{a^3} \right) \quad (2.176)$$

$$N_{1w}(\mathbf{x}) = \left(1 - 3\frac{x^2}{a^2} + 2\frac{x^3}{a^3} \right); \frac{dN_{1w}(\mathbf{x})}{dx} = \left(-6\frac{x}{a^2} + 6\frac{x^2}{a^3} \right) \quad (2.177)$$

$$N_{2w}(\mathbf{x}) = \left(x - 2\frac{x^2}{a} + \frac{x^3}{a} \right); \frac{dN_{2w}(\mathbf{x})}{dx} = \left(1 - 4\frac{x}{a} + 3\frac{x^2}{a} \right) \quad (2.178)$$

$$N_{3w}(\mathbf{x}) = \left(3\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{x^3}{a^3} \right); \frac{dN_{3w}(\mathbf{x})}{dx} = \left(6\frac{x}{a^2} - 6\frac{x^2}{a^3} \right) \quad (2.179)$$

$$N_{4w}(\mathbf{x}) = \left(-\frac{x^2}{a^2} + \frac{x^3}{a^3} \right); \frac{dN_{4w}(\mathbf{x})}{dx} = \left(-2\frac{x}{a^2} + 3\frac{x^2}{a^3} \right) \quad (2.180)$$

$$N_{1\varphi}(x) = \left(1 - \frac{x}{a}\right); N_{2\varphi}(x) = \frac{x}{a} \quad (2.181)$$

với a là chiều dài của phần tử thanh.

Thế năng biến dạng của phần tử thanh có dạng như sau:

$$\begin{aligned} \Pi_e = \frac{1}{2} \left\{ EF \int_0^a [u'(x, t)]^2 dx + EI_z \int_0^a [v''(x, t)]^2 dx \right. \\ \left. + EI_y \int_0^a [w''(x, t)]^2 dx + GJ_p \int_0^a [\varphi''(x, t)]^2 dx \right\} \end{aligned} \quad (2.182)$$

trong đó:

- u', v', w', φ' là các đạo hàm của các thành phần chuyển vị tương ứng u, v, w, φ .

- E, G là mô đun đàn hồi của vật liệu và mô đun đàn hồi trượt của vật liệu.

- F là diện tích mặt cắt ngang của thanh.

- I_y, I_z là các mô men quán tính của mặt cắt ngang đối với các trục y và z trong hệ tọa độ địa phương. J_p là mô men quán tính độc cực của mặt cắt ngang.

Thay các thành phần chuyển vị vào biểu thức (2.182), sau khi tính toán và rút gọn lại ta được:

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \int_0^a \mathbf{D} [\mathbf{B}(x) \mathbf{q}_e(t)]^2 dx = \frac{1}{2} \mathbf{q}_e^T(t) \left[\int_0^a \mathbf{B}^T(x) \mathbf{D} \mathbf{B}(x) dx \right] \mathbf{q}_e(t) \quad (2.183)$$

trong đó:

- $\mathbf{B}$ là ma trận vi phân hàm dạng, có biểu thức:

$$\mathbf{B}(x) = \begin{bmatrix} N'_u(x) & & & \\ & N''_v(x) & & \\ & & N''_w(x) & \\ & & & N'_\varphi(x) \end{bmatrix} \quad (2.184)$$

- $\mathbf{D}$ là ma trận hằng số độ cứng vật liệu:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} EF & & & \\ & EI_z & & \\ & & EI_y & \\ & & & GJ_p \end{bmatrix} \quad (2.185)$$

Biểu thức công của ngoại lực, lực quán tính và của lực cản tác dụng lên phần tử thanh có dạng sau:

$$\begin{aligned} A_e = & - \left\{ \int_0^a p_u(x,t)u(x,t)dx + \int_0^a p_v(x,t)v(x,t)dx + \int_0^a p_w(x,t)w(x,t)dx + \right. \\ & \left. \int_0^a p_\varphi(x,t)\varphi(x,t)dx \right\} + \\ & - \frac{1}{2} \left\{ \int_0^a -m\ddot{u}(x,t)u(x,t)dx + \int_0^a -m\ddot{v}(x,t)v(x,t)dx + \int_0^a -m\ddot{w}(x,t)w(x,t)dx + \right. \\ & \left. \int_0^a -m_p\ddot{\varphi}(x,t)\varphi(x,t)dx \right\} + \quad (2.186) \\ & - \frac{1}{2} \left\{ \int_0^a -c\dot{u}(x,t)u(x,t)dx + \int_0^a -c\dot{v}(x,t)v(x,t)dx + \int_0^a -c\dot{w}(x,t)w(x,t)dx + \right. \\ & \left. \int_0^a -c_p\dot{\varphi}(x,t)\varphi(x,t)dx \right\} \end{aligned}$$

Sau khi thay các thành phần chuyển vị và lực tác dụng vào biểu thức (2.186) ta có thể viết gọn lại biểu thức này như sau:

$$\begin{aligned} A_e = & -\mathbf{q}_c^T(t) \int_0^a \mathbf{N}^T(x) \mathbf{p}_{pb}(x,t) dx + \frac{1}{2} \mathbf{q}_c^T(t) \int_0^a \mathbf{N}^T(x) \mathbf{N}(x) dx m_{pb} \ddot{\mathbf{q}}_c(t) \\ & + \frac{1}{2} \mathbf{q}_c^T(t) \int_0^a \mathbf{N}^T(x) \mathbf{N}(x) dx c \dot{\mathbf{q}}_c(t) \end{aligned} \quad (2.187)$$

trong đó:

- m là khối lượng phân bố trên một đơn vị độ dài thanh
- m_p là mô men quán tính của m trên một đơn vị chiều dài thanh:

$$m_p = mJ_p \quad (2.188)$$

- c là hệ số cản nhớt trên một đơn vị chiều dài thanh.
- p_u, p_v, p_w, p_φ là lực phân bố trên một đơn vị chiều dài thanh (hình 2.12).

- $\mathbf{p}_{pb}(x,t)$ là véc tơ lực phân bố trên một đơn vị phần tử thanh:

$$\mathbf{p}_{pb}(x,t) = \{p_u(x,t) \quad p_v(x,t) \quad p_w(x,t) \quad p_\varphi(x,t)\}^T \quad (2.189)$$

- $\mathbf{m}_{pb}$ ma trận khối lượng phân bố trên một đơn vị phần tử thanh:

$$\mathbf{m}_{pb} = \begin{bmatrix} m_u & & & \\ & m_v & & \\ & & m_w & \\ & & & m_\varphi \end{bmatrix}; \mathbf{m}_u = \mathbf{m}_v = \mathbf{m}_w = \begin{bmatrix} m & \\ & m \end{bmatrix}, \mathbf{m}_\varphi = \begin{bmatrix} m_p & \\ & m_p \end{bmatrix} \quad (2.190)$$

Sử dụng nguyên lý cực tiểu của năng lượng toàn phần đối với phần tử thanh, ta sẽ có biểu thức điều kiện cân bằng cho phần tử thanh

$$\frac{\partial V_e}{\partial q_e^i} = \frac{\partial (\Pi_e + A_e)}{\partial q_e^i} = 0 \quad (2.191)$$

Thay các biểu thức (2.183) và (2.187) vào phương trình (2.191) ta thu được phương trình dao động cưỡng bức của phần tử thanh không gian có dạng như sau:

$$\mathbf{m}_e \ddot{\mathbf{q}}_e(t) + \mathbf{c}_e \dot{\mathbf{q}}_e(t) + \mathbf{k}_e \mathbf{q}_e(t) = \mathbf{p}_e(t) \quad (2.192)$$

trong đó:

- $\mathbf{k}_e$ là các ma trận độ cứng phần tử thanh không gian:

$$\mathbf{k}_e = \int_0^a \mathbf{B}^T(x) \mathbf{D} \mathbf{B}(x) dx \quad (2.193)$$

$$\mathbf{k}_e = \begin{bmatrix} \frac{EF}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EF}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{a^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{a^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{a^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{a^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{a^3} & 0 & \frac{6EI_y}{a^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{a^3} & 0 & \frac{6EI_y}{a^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EGJ_p}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EGJ_p}{a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{a^2} & 0 & \frac{4EI_y}{a} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{a^2} & 0 & \frac{2EI_y}{a} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{a^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{a} & 0 & -\frac{6EI_z}{a^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{a} \\ -\frac{EF}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EF}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{a^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{a^2} & 0 & \frac{12EI_z}{a^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{a^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{a^3} & 0 & \frac{6EI_y}{a^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{a^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{a^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{EGJ_p}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EGJ_p}{a} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{a^2} & 0 & \frac{2EI_y}{a} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{a^2} & 0 & \frac{4EI_y}{a} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{a^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{a} & 0 & -\frac{6EI_z}{a^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{a} \end{bmatrix} \quad (2.194)$$

- $\mathbf{m}_e$, là ma trận khối lượng phần tử thanh không gian:

$$\mathbf{m}_e = \int_0^a \mathbf{N}^T(\mathbf{x}) \mathbf{N}(\mathbf{x}) m_{pb} d\mathbf{x} \quad (2.195)$$

$$\mathbf{m}_e = \frac{ma}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 0 & 0 & 0 & 22a & 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & -13a \\ 0 & 0 & 156 & 0 & 22a & 0 & 0 & 0 & 54 & 0 & -13a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{140J_p}{F} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 22a & 0 & 4a^2 & 0 & 0 & 0 & 13a & 0 & -3a & 0 \\ 0 & 22a & 0 & 0 & 0 & 4a^2 & 0 & 13a & 0 & 0 & 0 & -3a^2 \\ 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & 13a & 0 & 156 & 0 & 0 & 0 & -22a \\ 0 & 0 & 54 & 0 & 13a & 0 & 0 & 0 & 156 & 0 & -22a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{140J_p}{F} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -13a & 0 & -3a^2 & 0 & 0 & 0 & -22a & 0 & 4a^2 & 0 \\ 0 & -13a & 0 & 0 & 0 & -3a^2 & 0 & -22a & 0 & 0 & 0 & 4a^2 \end{bmatrix} \quad (2.196)$$

- $\mathbf{c}_e$ là ma trận cản phần tử thanh không gian:

$$\mathbf{c}_e = \mathbf{c} \int_0^a \mathbf{N}^T(\mathbf{x}) \mathbf{N}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2.197)$$

$$\mathbf{c}_e = \frac{ca}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 0 & 0 & 0 & 22a & 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & -13a \\ 0 & 0 & 156 & 0 & 22a & 0 & 0 & 0 & 54 & 0 & -13a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 22a & 0 & 4a^2 & 0 & 0 & 0 & 13a & 0 & -3a^2 & 0 \\ 0 & 22a & 0 & 0 & 0 & 4a^2 & 0 & 13a & 0 & 0 & 0 & -3a^2 \\ 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & 13a & 0 & 156 & 0 & 0 & 0 & -22a \\ 0 & 0 & 54 & 0 & 13a & 0 & 0 & 0 & 156 & 0 & -22a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -13a & 0 & -3a^2 & 0 & 0 & 0 & -22a & 0 & 4a^2 & 0 \\ 0 & -13a & 0 & 0 & 0 & -3a^2 & 0 & -22a & 0 & 0 & 0 & 4a^2 \end{bmatrix} \quad (2.198)$$

- $\mathbf{p}_e$ là véc tơ lực nút phần tử thanh:

$$\mathbf{p}_e(t) = \int_0^a \mathbf{N}(x)^T \mathbf{p}_{pb}(x, t) dx \quad (2.199)$$

2.3.2. Khung không gian có thiết bị tiêu tán năng lượng TMD

Khi lắp thêm TMD vào một phần tử thanh không gian, luận án chỉ xét dạng TMD tác dụng theo một phương của kết cấu, tính toán tương tự như đối với phần tử dầm có TMD, ta có phương trình dao động cưỡng bức của phần tử thanh không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng TMD có dạng như sau:

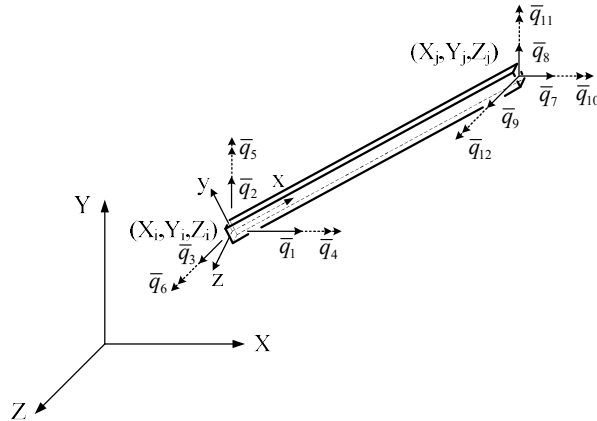
$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_e & 0 \\ 0 & \mathbf{m}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_e \\ \ddot{\mathbf{w}}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_e + \mathbf{c}_T \mathbf{N}_w^T \mathbf{N}_w & -\mathbf{c}_T \mathbf{N}_w^T \\ -\mathbf{c}_T \mathbf{N}_w & \mathbf{c}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_e \\ \dot{\mathbf{w}}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_e + \mathbf{k}_T \mathbf{N}_w^T \mathbf{N}_w & -\mathbf{k}_T \mathbf{N}_w^T \\ -\mathbf{k}_T \mathbf{N}_w & \mathbf{k}_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_e \\ \mathbf{w}_T \end{Bmatrix} = \{\mathbf{p}_e(t)\} \quad (2.200)$$

Phương trình phần tử hữu hạn vừa thiết lập ở trên chỉ tính toán đối với phần tử thanh không gian trong hệ tọa độ địa phương gắn liền với phần tử, khi tính toán cho toàn bộ kết cấu, các véc tơ của từng phần tử cần đưa về hệ tọa độ tổng thể của kết cấu. Sau đây, tác giả trình bày cụ thể công thức chuyển đổi từ hệ tọa độ địa phương sang hệ tọa độ tổng thể đối với véc tơ chuyển vị nút, véc tơ lực tính toán hoàn toàn tương tự. Mỗi quan hệ giữa véc tơ chuyển vị trong hệ tọa độ địa phương và hệ tổng thể có dạng [15, 16, 54, 65]:

$$\mathbf{q}_e = \mathbf{T}_e \bar{\mathbf{q}}_e \quad (2.201)$$

trong đó

- $\mathbf{q}_e$ là véc tơ chuyển vị nút phần tử thanh trong hệ tọa độ địa phương.
- $\bar{\mathbf{q}}_e$ là véc tơ chuyển vị nút phần tử thanh trong hệ tọa độ tổng thể.
- $\mathbf{T}_e$ là ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ địa phương sang hệ tọa độ tổng thể.



Hình 2.12. Các thành phần chuyển vị trong hệ tọa độ địa phương và trong hệ tọa độ tổng thể

Sau đây luận án diễn giải cách tìm ma trận chuyển đổi $\mathbf{T}_e$. Giả sử phần tử thanh có hai nút đánh số thứ tự là i và j (hình 2.12). Gọi xyz là hệ tọa độ địa phương gắn liền với phần tử và XYZ là hệ tọa độ tổng thể của kết cấu.

Tọa độ của nút i và j của phần tử thanh trong hệ tọa độ tổng thể lần lượt là X_i, Y_i, Z_i và X_j, Y_j, Z_j , ta dễ dàng tính được độ dài của phần tử thanh không gian theo công thức sau:

$$a = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2} \quad (2.202)$$

Ma trận chỉ phương của hệ trục tọa độ địa phương so với hệ trục tọa độ tổng thể được xác định theo công thức:

$$\mathbf{c}_{Tr} = \begin{bmatrix} c_{xX} & c_{xY} & c_{xZ} \\ c_{yX} & c_{yY} & c_{yZ} \\ c_{zX} & c_{zY} & c_{zZ} \end{bmatrix} \quad (2.203)$$

trong đó:

- c_{xX}, c_{xY}, c_{xZ} là các cosin chỉ phương của trục x so với các trục tổng thể X, Y và Z .
- c_{yX}, c_{yY}, c_{yZ} là các cosin chỉ phương của trục y so với các trục tổng thể X, Y và Z .

- c_{zX}, c_{zY}, c_{zZ} là các cosin chỉ phương của trục z so với các trục tổng thể X, Y và Z .

Luận án giả thiết trục x trùng với trục thanh trong hệ tọa độ địa phương, còn y và z là hệ trục chính trung tâm của thiết diện thanh. Do vậy, các cosin chỉ phương của các trục x, y, z đối với các trục tổng thể X, Y, Z được xác định bởi:

$$\begin{cases} c_{xX} = \frac{X_j - X_i}{a} \\ c_{xY} = \frac{Y_j - Y_i}{a} \\ c_{xZ} = \frac{Z_j - Z_i}{a} \end{cases} \quad (2.204)$$

Chúng ta biết trước vị trí của trục chính trung tâm của tiết diện yz , nên ta có thể hoàn toàn biết trước giá trị của góc β và γ , do đó:

$$c_{zY} = \cos\beta, c_{yY} = \cos\gamma \quad (2.205)$$

từ đó, bốn thành phần $c_{yX}, c_{yZ}, c_{zX}, c_{zZ}$ của ma trận chỉ phương $\mathbf{c}_{Tr}$ được xác định theo bốn hệ thức toán học trong hình học giải tích:

$$\begin{cases} c_{yX}^2 + c_{yY}^2 + c_{yZ}^2 = 1, \\ c_{zX}^2 + c_{zY}^2 + c_{zZ}^2 = 1, \\ c_{xX} + c_{yX} + c_{xY} + c_{yY} + c_{xZ} + c_{yZ} = 0, \\ c_{xX} + c_{zX} + c_{xY} + c_{zY} + c_{xZ} + c_{zZ} = 0. \end{cases} \quad (2.206)$$

Với cách đánh số và quy ước chiều dương của các hệ tọa độ địa phương xyz và hệ tọa độ tổng thể XYZ như trên hình 2.13, lúc này ma trận biến đổi tọa độ T từ hệ tọa độ cục bộ sang hệ tọa độ tổng thể đối với phần tử thanh không gian được tính theo công thức:

$$\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} c_{Tr} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{Tr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{Tr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{Tr} \end{bmatrix} \quad (2.207)$$

Tiến hành tập hợp ma trận và khử điều kiện biên, ta thu được phương

trình dao động cưỡng bức của kết cấu khung không gian có TMD có dạng:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{K}\mathbf{Q} = \mathbf{F} \quad (2.208)$$

trong đó $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ tương ứng là ma trận khối lượng tổng thể, ma trận cản tổng thể, ma trận độ cứng tổng thể của kết cấu, $\mathbf{Q}$ và $\mathbf{F}$ tương ứng là véc tơ chuyển vị tổng thể và véc tơ lực tổng thể của kết cấu.

Đối với bài toán dao động riêng không cản, phương trình có dạng như sau [15, 16, 54, 65]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{K}\mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (2.209)$$

Từ đó ta rút ra được phương trình xác định tần số dao động riêng và các dạng riêng:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (2.210)$$

Xét cơ hệ chịu tải trọng ngẫu nhiên có phương trình dao động cưỡng bức như (2.208), giả thiết lực tác dụng là quá trình ngẫu nhiên dừng, có giá trị trung bình là:

$$\mathbf{m}_F = \{m_{F_1} \quad m_{F_2} \quad \dots \quad m_{F_n}\}^T \quad (2.211)$$

Ma trận tương quan:

$$\mathbf{R}_F(\tau) = \langle \mathbf{F}(t)\mathbf{F}(t+\tau) \rangle \quad (2.212)$$

tức là phần tử $R_{F_i F_j} = \langle F_i(t)F_j(t+\tau) \rangle$ là tương quan giữa hai hàm F_i, F_j tại hai thời điểm t và $(t+\tau)$.

Để xác định véc tơ giá trị trung bình của đáp ứng, lấy trung bình hai vế của phương trình (2.208) ta có:

$$\mathbf{M}\langle \ddot{\mathbf{Q}} \rangle + \mathbf{C}\langle \dot{\mathbf{Q}} \rangle + \mathbf{K}\langle \mathbf{Q} \rangle = \langle \mathbf{F} \rangle \quad (2.213)$$

Do giả thiết $\mathbf{Q}$ là quá trình dừng, ergodic, tức là $\langle \mathbf{Q} \rangle = \text{const}$, ta có:

$$\langle \dot{\mathbf{Q}} \rangle = \frac{d}{dt} \langle \mathbf{Q} \rangle = 0; \quad \langle \ddot{\mathbf{Q}} \rangle = \frac{d^2}{dt^2} \langle \mathbf{Q} \rangle = 0 \quad (2.214)$$

$$\text{Do vậy từ (2.213) suy ra:} \quad \mathbf{K}\langle \mathbf{Q} \rangle = \langle \mathbf{F} \rangle \quad (2.215)$$

Suy ra:

$$\langle \mathbf{Q} \rangle = \mathbf{K}^{-1} \langle \mathbf{F} \rangle \quad (2.216)$$

Phương trình ảnh của (2.208) qua phép biến đổi Fourier là:

$$\mathbf{M}(i\omega)^2 \mathbf{Q}(\omega) + \mathbf{M}i\omega \mathbf{Q}_0 - \mathbf{M}\dot{\mathbf{Q}}_0 + \mathbf{C}i\omega \mathbf{Q}(\omega) - \mathbf{C}\mathbf{Q}_0 + \mathbf{K}\mathbf{Q}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (2.217)$$

$$\text{hay: } \left(-(i\omega)^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K} \right) \mathbf{Q}(\omega) + \left(\mathbf{M}i\omega \mathbf{Q}_0 - \mathbf{M}\dot{\mathbf{Q}}_0 - \mathbf{C}\mathbf{Q}_0 \right) = \mathbf{F}(\omega) \quad (2.218)$$

Với điều kiện đầu bằng 0 của chuyển vị và vận tốc, tức là $\mathbf{Q}_0 = \mathbf{0}$, $\dot{\mathbf{Q}}_0 = \mathbf{0}$ thì:

$$\left(\mathbf{M}i\omega \mathbf{Q}_0 - \mathbf{M}\dot{\mathbf{Q}}_0 - \mathbf{C}\mathbf{Q}_0 \right) = \mathbf{0} \quad (2.219)$$

Nên từ (2.218) rút ra:

$$\mathbf{Q}(\omega) = \left(-(i\omega)^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K} \right)^{-1} \mathbf{F}(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \mathbf{F}(\omega) \quad (2.220)$$

$$\text{trong đó: } \mathbf{H}(\omega) = \left(-(i\omega)^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K} \right)^{-1} \quad (2.221)$$

là ma trận hàm truyền của hệ.

Gọi ma trận phổ của đầu vào là $\mathbf{S}_{FF}(\omega)$ với các thành phần là $\mathbf{S}_{F_i F_j}(\omega)$, ma trận hàm truyền của hệ là $\mathbf{H}(\omega)$ với các thành phần là $\mathbf{H}_{ij}(\omega)$. Gọi $\mathbf{S}_{QQ}(\omega)$ là ma trận phổ của vectơ hàm q mà các thành phần của nó là $\mathbf{S}_{Q_i Q_j}(\omega)$. Ta sẽ xác định phương trình quan hệ giữa ma trận phổ đầu ra $\mathbf{S}_{QQ}(\omega)$, ma trận phổ đầu vào $\mathbf{S}_{FF}(\omega)$ và ma trận hàm truyền $\mathbf{H}(\omega)$.

Ma trận tự tương quan của vectơ đáp ứng $\mathbf{Q}$ là:

$$\mathbf{R}_{QQ}(\tau) = \mathbf{E}(\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T) \quad (2.222)$$

Thay $\mathbf{Q}$ bằng tích phân Duhamel đối với hệ nhiều bậc tự do:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{QQ}(\tau) &= \mathbf{E} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}(\tau_1) \mathbf{F}(t - \tau_1) d\tau_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{F}^T(t + \tau - \tau_2) \mathbf{h}^T(\tau_2) d\tau_2 \right. \\ &\quad \left. = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}(\tau_1) \mathbf{h}^T(\tau_2) \mathbf{E}(\mathbf{F}(t - \tau_1) \mathbf{F}^T(t + \tau - \tau_2)) d\tau_1 d\tau_2 \right) \end{aligned} \quad (2.223)$$

Do $\mathbf{E}(\mathbf{F}(t - \tau_1) \mathbf{F}^T(t + \tau - \tau_2)) = \mathbf{R}_{FF}(t + \tau_1 - \tau_2)$ nên

$$\mathbf{R}_{QQ}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}(\tau_1) \mathbf{h}^T(\tau_2) \mathbf{R}_{FF}(t + \tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (2.224)$$

Từ phương trình Wiener - Chinthin ta có:

$$\mathbf{S}_{QQ}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{R}_{QQ}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.225)$$

Thay (2.224) vào (2.225), ma trận các hàm mật độ phổ của đáp ứng là:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{QQ}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}(\tau_1) \mathbf{h}^T(\tau_2) \mathbf{R}_{FF}(\tau + \tau_1 - \tau_2) e^{-i\omega\tau} d\tau_1 d\tau_2 d\tau \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}(\tau_1) \mathbf{h}^T(\tau_2) \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{R}_{FF}(\tau + \tau_1 - \tau_2) e^{-i\omega\tau} d\tau \right) d\tau_1 d\tau_2 \end{aligned} \quad (2.226)$$

Đặt $\tau + \tau_1 - \tau_2 = \tilde{\tau}$, $\tau = \tilde{\tau} - \tau_1 + \tau_2$, ta có:

$$\mathbf{S}_{QQ}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}(\tau_1) e^{i\omega\tau_1} d\tau_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}^T(\tau_2) e^{-i\omega\tau_2} d\tau_2 \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{R}_{FF}(\tilde{\tau}) e^{-i\omega\tilde{\tau}} d\tilde{\tau} \quad (2.227)$$

$$\text{Tích phân thứ nhất:} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}(\tau_1) e^{i\omega\tau_1} d\tau_1 = \mathbf{H}^*(\omega) \quad (2.228)$$

$$\text{Tích phân thứ hai:} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{h}(\tau_2) e^{-i\omega\tau_2} d\tau_2 = \mathbf{H}^T(\omega) \quad (2.229)$$

$$\text{Tích phân thứ ba:} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{R}_{FF}(\tilde{\tau}) e^{-i\omega\tilde{\tau}} d\tilde{\tau} = 2\pi \mathbf{S}_{FF}(\omega) \quad (2.230)$$

Vậy nên:

$$\mathbf{S}_{QQ}(\omega) = \mathbf{H}^*(\omega) \mathbf{S}_{FF}(\omega) \mathbf{H}^T(\omega) \quad (2.231)$$

Với tải trọng ngoài ở dạng kích động ngẫu nhiên, ma trận tự tương quan của tải trọng ngoài $\mathbf{R}_{FF}$ sẽ được tính tương tự như hàm tự tương quan của véc tơ đáp ứng như công thức (2.222), thay vào biểu thức (2.230) sẽ tính được ma trận của phổ đầu vào. Ma trận hàm truyền $\mathbf{H}(\omega)$ được tính theo biểu thức (2.221) từ các ma trận độ cứng, ma trận khối lượng, ma trận cản của kết cấu. Từ các ma trận $\mathbf{R}_{FF}$ và $\mathbf{H}(\omega)$ ta sẽ tính được phổ đáp ứng trong miền tần số $\mathbf{S}_{QQ}(\omega)$ như công

thức (2.231).

Vì đây là QTNN dừng, nên diện tích của hàm mật độ phổ trong miền tần số chính là phương sai của hàm đáp ứng. Với hàm mật độ phổ của hàm kích động không đổi, giả sử là kích động ồn trắng, với mỗi bộ số liệu của các TMD, sẽ làm cho hàm mật độ đáp ứng khác nhau. Khi có tải trọng đầu vào, ta sẽ vẽ được hàm đáp ứng $S_{Q_i Q_j}(\omega)$ của các bậc tự do trong miền tần số khảo sát. Diện tích giới hạn bởi hàm đáp ứng trong miền tần số này chính là phương sai của đáp ứng ($D_{Q_i Q_j}$), đồng thời nó cũng là bình phương của độ lệch chuẩn $(\sigma_{Q_i Q_j})^2$. Khi tải tác dụng giống nhau, vì là quá trình dừng nên giá trị trung bình của đáp ứng cũng giống nhau, nên diện tích giới hạn bởi hàm đáp ứng trong miền tần số biểu hiện năng lượng của dao động

2.4. Thuật toán giải phương trình dao động cưỡng bức của kết cấu chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên

Các bước giải phương trình dao động cưỡng bức của kết cấu khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên gồm các bước như sau:

- Bước 1: Nhập các thông số đầu vào của kết cấu
- Bước 2: Tính các ma trận phần tử (ma trận độ cứng phần tử, ma trận khối lượng phần tử, ma trận cản phần tử).
- Bước 3: Tập hợp để thu được các ma trận tổng thể và véc tơ lực nút tổng thể của kết cấu.
- Bước 4: Xác định các đặc trưng động lực học của kết cấu: tần số dao động riêng, dạng dao động riêng, ma trận hàm truyền, ...
- Bước 5: Xác định hàm mật độ phổ của đáp ứng như biểu thức (2.227). Tính diện tích hàm mật độ phổ trong miền tần số như (2.231). Với mỗi bộ thông số đầu vào, ta xây dựng được phổ đáp ứng của hệ.

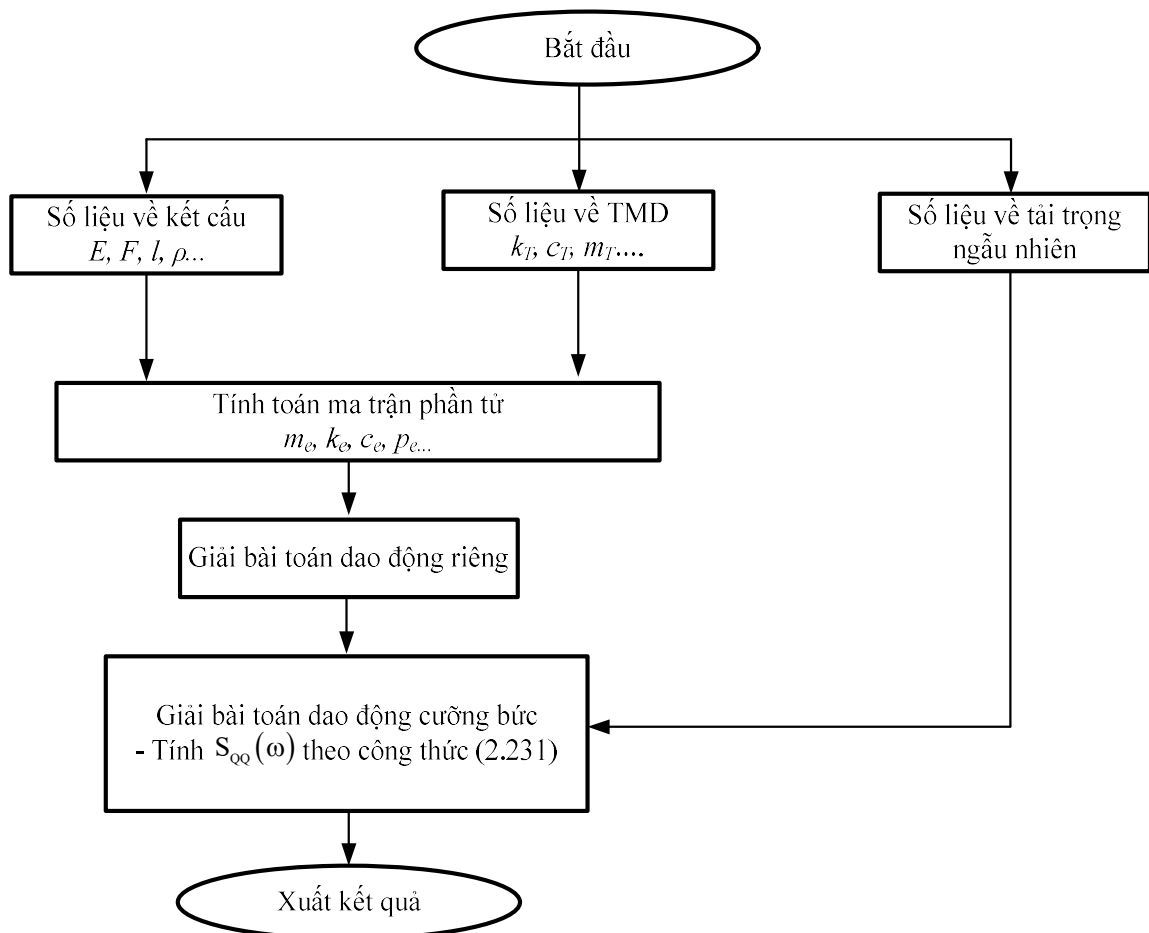
2.5. Chương trình tính và kiểm tra độ tin cậy của chương trình

2.5.1. Giới thiệu chương trình tính

Sơ đồ khối chương trình như hình 2.13.

Tác giả sử dụng ngôn ngữ lập trình Matlab để xây dựng bộ chương trình tính toán, chương trình gồm các modul chính sau:

- Modul nhập số liệu đầu vào;
- Modul chia lưới kết cấu thành các phần tử;
- Modul các ma trận chỉ số;
- Modul tập hợp các ma trận, véc tơ tổng thể của kết cấu ;
- Modul giải bài toán tần số dao động riêng kết cấu;
- Modul giải bài toán dao động cưỡng bức;
- Modul xuất kết quả.

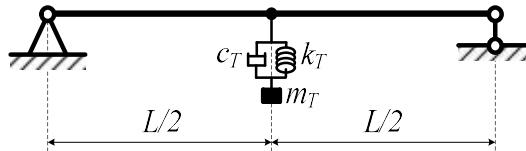


Hình 2.13. Sơ đồ khối chương trình tính

Chương trình tính toán của tác giả được kiểm tra độ tin cậy bằng cách so sánh kết quả với các bài toán tương tự của các tác giả đã công bố. Chương trình có thể xác định được tần số dao động riêng, tính toán đáp ứng phổ của đáp ứng chuyển vị trong miền tần số chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên. Ngoài ra, dựa vào sự thay đổi các thông số đầu vào ta có thể khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến đáp ứng động của kết cấu như: nhóm yếu tố hình học, nhóm yếu tố vật liệu, nhóm tải trọng và nhóm điều kiện liên kết.

2.5.2. Kiểm tra độ tin cậy bằng bài toán dao động riêng

Ví dụ kiểm chứng 1: Xét dầm dài 1m (hình 2.14), mặt cắt ngang $3 \times 2 \text{ cm}^2$, khối lượng riêng $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, $E = 2,10^{11} \text{ N/m}^2$. Có 1 TMD treo chính giữa dầm với tham số $m_T = 0,468 \text{ kg}$ ($m_T/m_0 = 10\%$), $k_T = 27058,08 \text{ N/m}$, $c_T = 100 \text{ Ns/m}$. Tần số dao động riêng đầu tiên của dầm tính theo Yung Hsiang Chen và Yen Hui Huang [70] là 33,55 Hz (tính theo lý thuyết dầm Timoshenko) và của tác giả (tính theo lý thuyết dầm Bernuli) là 33,62 Hz. Do lý thuyết tính toán khác nhau nhưng với dầm mỏng như vậy thì dùng lý thuyết Timoshenko hay Bernuli đều có kết quả tương đồng nên sai lệch giữa hai kết quả là chấp nhận được.

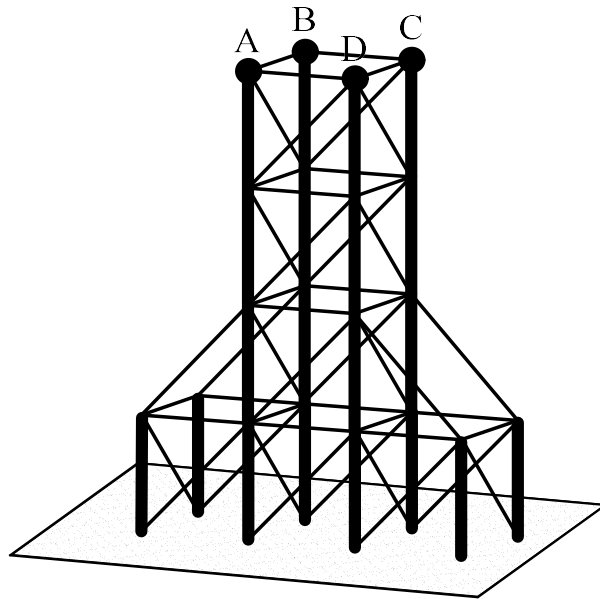


Hình 2.14. Dầm có 1 TMD

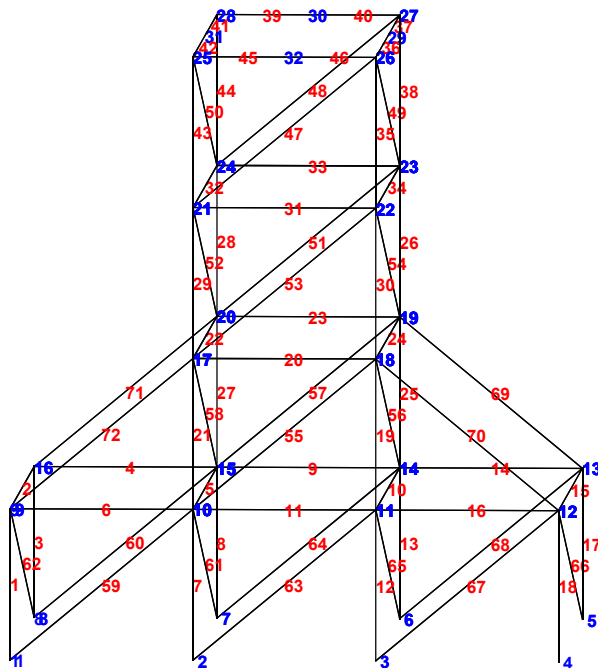
Ví dụ kiểm chứng 2: Tác giả tiến hành so sánh tần số dao động riêng của hệ khung không gian với mô hình như trên hình 2.15, mỗi thanh là ống tròn. Có hai loại ống, các thanh đứng có đường kính $D_0 = 0,5 \text{ m}$, diện tích mặt cắt ngang $F_0 = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, mô men quán tính chống uốn $J_{x0} = J_{z0} = 4,88 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$, mô men quán tính chống xoắn $J_{p0} = 9,76 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$; Các thanh giằng có đường kính: $D = 0,3 \text{ m}$, mặt cắt ngang có diện tích $F = 9,40 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$, các mô men quán tính chống uốn $J_x = J_z = 1,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$ và mô men quán tính chống xoắn $J_p = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$. Vật liệu chế tạo các thanh đều có cùng mô đun đàn hồi $E = 2,10^{11} \text{ N/m}^2$, mô đun đàn hồi trượt $G = 0,8 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, khối lượng riêng $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$. Bốn khối

lượng tập trung 4×27000 kG tại bốn điểm đỉnh của công trình (A, B, C, D). Chiều cao tổng thể của công trình là 20m.

Kết quả tính toán ba tần số dao động riêng tính bằng chương trình của luận án đã lập được so sánh với ba tần số dao động riêng đầu tiên tính bằng phần mềm SAP-2000 như trong bảng 2.1.



Hình 2.15. Hệ khung không gian



Hình 2.16. Sơ đồ lưới chia phần tử khung không gian

Bảng 2.1. So sánh ba tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu khung không gian

Nguồn kết quả	ω (rad/s)		
	ω_1	ω_2	ω_3
SAP-2000	4,437	6,375	6,784
Luận án	4,426	6,039	6,522
Sai số (%)	0,248	5,27	3.86

Chúng ta có thể thấy rằng kết quả giữa hai phương pháp là xấp xỉ nhau, sai số chỉ ra giữa hai kết quả tính toán trong bảng 2.1 có thể xuất hiện do sự sai lệch về lý thuyết xuất phát tính toán từng phần tử, số lượng phần tử không giống nhau và sai số này là có thể chấp nhận được.

Từ hai ví dụ tính toán trên đây, ta có thể kết luận thuật toán và chương trình mà luận án thiết lập đảm bảo độ tin cậy để tính toán.

2.6. Kết luận

Trong chương 2 tác giả đã đạt được một số kết quả chính như sau:

- Thiết lập được mô hình phần tử hữu hạn để tính toán động lực học cho kết cấu khung không gian, đảm chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên, trong đó kết cấu có lắp thêm thiết bị tiêu tán năng lượng TMD.
- Xây dựng được thuật toán PTHH cho bài toán tính toán động lực học của kết cấu khung không gian, đảm chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên.
- Xây dựng được bộ chương trình tính toán đáp ứng động lực học của hệ theo thuật toán đã thiết lập.
- Kiểm chứng độ tin cậy của chương trình tính với kết quả đã công bố cho thấy kết quả đảm bảo độ chính xác cần thiết.

Trên cơ sở thuật toán và chương trình đã lập trong chương này, tiếp theo ở chương 3, tác giả sẽ tiến hành khảo sát một số yếu tố đến đáp ứng động lực học của kết cấu hệ dầm và khung không gian chịu tải trọng ngẫu nhiên.

Chương 3

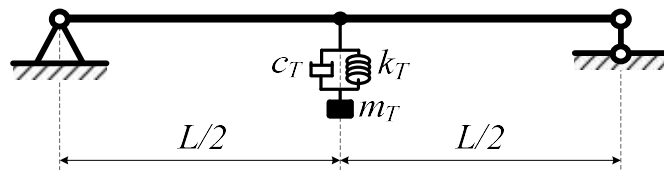
KHẢO SÁT MỘT SỐ YẾU TỐ ĐẾN ĐÁP ỨNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA HỆ KẾT CẤU DẦM, KHUNG KHÔNG GIAN CÓ LẮP TBTTNL CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NGẪU NHIÊN

Trên cơ sở lý thuyết và thuật toán phần tử hữu hạn đã trình bày ở Chương 2, trong nội dung Chương 3, tiến hành khảo sát số đáp ứng động lực học của kết cấu dầm, khung không gian chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên, trong đó kết cấu có lắp thêm một hoặc nhiều thiết bị tiêu tán năng lượng.

Việc khảo sát ảnh hưởng của các nhóm yếu tố tới đáp ứng động của kết cấu với từng trường hợp cụ thể, giúp những người thiết kế, chế tạo phát hiện ra những đặc tính mang tính chất đặc thù trong phạm vi khảo sát, giúp ích trong việc thiết kế và khai thác với loại kết cấu này. Trên cơ sở các kết quả khảo sát thu được, làm cơ sở đưa ra các cảnh báo để đảm bảo kết cấu hoạt động bình thường, có hiệu quả nhất, đảm bảo tính kinh tế.

3.1. Khảo sát ảnh hưởng của một số thông số đến dao động riêng của kết cấu có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng

3.1.1. Bài toán khảo sát đối với dầm có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng

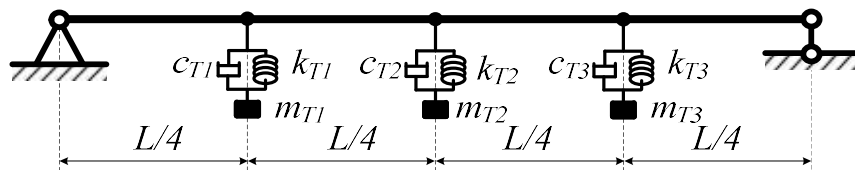


Hình 3.1. Dầm có gắn một TMD

Xem xét dầm phẳng liên kết tựa đơn có gắn TMD ở điểm chính giữa dầm như hình 3.1. Xét hai dầm, dầm 1 có chiều dài $L = 20\text{m}$, $b = h = 0,2\text{m}$; Dầm 2 có chiều dài $L = 9,6\text{ m}$, $b = h = 0,45\text{m}$; Hai dầm đều có $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, khối lượng riêng $\rho = 7800 \text{ kG/m}^3$. Đối với TMD có các thông số như sau $c_T = 100 \text{ Ns/m}$, và $k_T = 2000 \text{ N/m}$. Khối lượng m_T của TMD thay đổi sao cho giá trị của nó thay đổi trong khoảng $1\text{-}10\%m_0$, các tần số dao động riêng đầu tiên được thể hiện như trong bảng 3.1. Đối với trường hợp $m_T = 10\%m_0$, $k_T = 2000 \text{ N/m}$ và hệ số cản nhớt

$c_T = 10\text{-}1000 \text{ Ns/m}$, tần số dao động riêng đầu tiên được thể hiện như trong bảng 3.2; Đối với trường hợp $m_T = 10\%m_0$, $c_T = 100 \text{ Ns/m}$, và độ cứng của TMD $k_T = 100\text{-}10000 \text{ N/m}$, tần số dao động riêng đầu tiên được thể hiện như trong bảng 3.3.

Trong trường hợp gắn TMD ở ba vị trí (hình 3.2), một ở vị trí trung điểm, hai vị trí còn lại cách TMD ở giữa một khoảng là $L/4$, khối lượng của TMD thứ nhất bằng khối lượng của TMD thứ 3 $m_{T1} = m_{T3}$, các chỉ số TMD cũng được ghi rõ trong hình. Bằng cách thay đổi các khối lượng của TMD để tổng khối lượng của TMD không lớn hơn $10\%m_0$, tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu được thể hiện như trong bảng 3.4; Trong trường hợp $m_{T1} = m_{T2} = m_{T3} = 3\%m_0$, $c_{T1} = 10 - 1000 \text{ Ns/m}$ và $k_{T1} = 2000 \text{ N/m}$ ($c_{T1} = c_{T2} = c_{T3}$, và $k_{T1} = k_{T2} = k_{T3}$), tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu được thể hiện như trong Bảng 3.5. Cuối cùng, trong trường hợp $c_{T1} = 100 \text{ Ns/m}$ và $k_{T1} = 100\text{-}10000 \text{ N/m}$, tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu được thể hiện như trong bảng 3.6.



Hình 3.2. Dầm gắn ba TMD.

Bảng 3.1. Sự thay đổi của các tần số dao động riêng đầu tiên theo tỷ số m_T/m_0

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 1										
1	100	2000	1,161	5,093	19,933	63,312	0,887	1,178	5,093	19,937
2							0,631	1,171	5,093	19,937
3							0.516	1,169	5,093	19,937
4							0.447	1,169	5,093	19,937
5							0,400	1,169	5,093	19,937
6							0,365	1,169	5,093	19,937
7							0,338	1,168	5,093	19,937

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 1										
8							0,316	1,168	5,093	19,937
9							0,298	1,168	5,093	19,937
10							0,283	1,168	5,093	19,937
Dầm 2										
1	100	2000	11.298	48.964	131.900	181.170	0.578	11.298	48.964	131.900
2							0.408	11.298	48.964	131.900
3							0.333	11.298	48.964	131.900
4							0.289	11.298	48.964	131.900
5							0.258	11.298	48.964	131.900
v6							0.236	11.298	48.964	131.900
7							0.218	11.298	48.964	131.900
8							0.204	11.298	48.964	131.900
9							0.192	11.298	48.964	131.900
10							0.182	11.298	48.964	131.900

Bảng 3.2. Sự thay đổi của ba tần số dao động riêng đầu tiên theo c_T

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
	Dầm 1									
10	10	2000	1,161	5,093	19,933	63,312	0,283	1,168	5,093	19,937
	20						0,283	1,168	5,093	19,937
	100						0,283	1,168	5,093	19,937
	150						0,283	1,168	5,093	19,937
	300						0,283	1,168	5,093	19,937

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
	Dầm 1									
	500						0,283	1,168	5,093	19,937
	700						0,283	1,168	5,093	19,937
	800						0,283	1,168	5,093	19,937
	1000						0,283	1,168	5,093	19,937
	Dầm 2									
10	10	2000	11.298	48.964	131.900	181.170	0.182	11.298	48.964	131.900
	20						0.182	11.298	48.964	131.900
	100						0.182	11.298	48.964	131.900
	150						0.182	11.298	48.964	131.900
	300						0.182	11.298	48.964	131.900
	500						0.182	11.298	48.964	131.900
	700						0.182	11.298	48.964	131.900
	800						0.182	11.298	48.964	131.900
	1000						0.182	11.298	48.964	131.900

Bảng 3.3. Sự thay đổi của ba tần số dao động riêng đầu tiên theo k_T

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 1										
10	100	100	1,161	5,093	19,933	63,312	0,063	1,161	5,093	19,935
		500					0,142	1,162	5,093	19,936
		1000					0,200	1,164	5,093	19,936
		1500					0,245	1,166	5,093	19,936
		2000					0,283	1,168	5,093	19,937

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 1										
		3000					0,345	1,172	5,093	19,937
		5000					0,442	1,181	5,093	19,938
		8000					0,552	1,197	5,093	19,940
		10000					0,611	1,209	5,093	19,941
Dầm 2										
10	100	100	11.298	48.964	131.900	181.170	0.040	11.298	48.964	131.900
		500					0.091	11.298	48.964	131.900
		1000					0.129	11.298	48.964	131.900
		1500					0.158	11.298	48.964	131.900
		2000					0.182	11.298	48.964	131.900
		3000					0.223	11.298	48.964	131.900
		5000					0.289	11.298	48.964	131.900
		8000					0.365	11.298	48.964	131.900
		10000					0.408	11.298	48.964	131.900

Bảng 3.4. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu theo tỷ số m_{T2}/m_0 và m_{T1}/m_0

m_{T2}/m_0 (%)	m_{T1}/m_0 (%)	c_{T1} (Ns/m)	k_{T1} (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 3 TMD			
				f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 1											
1	4	10 ²	2000	1,161	5,093	19,933	63,312	0,447	0,450	0,888	1,185
1	3							0,516	0,519	0,888	1,186
1	2							0,631	0,638	0,888	1,187
1	1							0,876	0,900	0,901	1,193
2	4							0,447	0,450	0,631	1,179

m_{T2}/m_0 (%)	m_{T1}/m_0 (%)	c_{T1} (Ns/m)	k_{T1} (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 3 TMD			
				f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 1											
2	3							0,512	0,519	0,631	1,179
2	2							0,626	0,636	0,637	1,180
2	1							0,631	0,888	0,900	1,187
Dầm 2											
1	4	10 ²	2000	11.298	48.964	131.900	181.170	0.289	0.289	0.578	11.297
1	3							0.333	0.333	0.578	11.297
1	2							0.408	0.408	0.578	11.297
1	1							0.578	0.578	0.578	11.297
2	4							0.289	0.289	0.408	11.297
2	3							0.333	0.333	0.408	11.297
2	2							0.408	0.408	0.408	11.297
2	1							0.408	0.578	0.578	11.297

Bảng 3.5. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu theo c_{T1}

m_{T2}/m_0 (%)	m_{T1}/m_0 (%)	c_{T1} (Ns/m)	k_{T1} (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 3 TMD			
				f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 1											
3	3	10	2000	1,161	5,093	19,933	63,312	0,512	0,519	0,520	1,178
		20						0,512	0,519	0,520	1,178
		100						0,512	0,519	0,520	1,178
		150						0,512	0,519	0,520	1,178
		300						0,512	0,519	0,520	1,178
		500						0,512	0,519	0,520	1,178
		700						0,512	0,519	0,520	1,178
		800						0,512	0,519	0,520	1,178
		1000						0,512	0,519	0,520	1,178

m_{T2}/m_0 (%)	m_{T1}/m_0 (%)	c_{T1} (Ns/m)	k_{T1} (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 3 TMD			
				f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 2											
3	3	10	2.10^3	11.298	48.964	131.9	181.170	0.333	0.333	0.333	11.297
		20						0.333	0.333	0.333	11.297
		100						0.333	0.333	0.333	11.297
		150						0.333	0.333	0.333	11.297
		300						0.333	0.333	0.333	11.297
		500						0.333	0.333	0.333	11.297
		700						0.333	0.333	0.333	11.297
		800						0.333	0.333	0.333	11.297
		1000						0.333	0.333	0.333	11.297

Bảng 3.6. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu theo k_{T1}

m_{T2}/m_0 (%)	m_{T1}/m_0 (%)	c_{T1} (Ns/m)	k_{T1} (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 3 TMD			
				f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 1											
3	3	100	1000	1,161	5,093	19,933	63,312	0,365	0,367	0,368	1,168
			1500					0,445	0,450	0,451	1,173
			2000					0,512	0,519	0,520	1,178
			3000					0,621	0,636	0,637	1,190
			4000					0,708	0,734	0,735	1,205
			5000					0,780	0,821	0,822	1,224
			6000					0,838	0,899	0,900	1,246
			7000					0,886	0,971	0,973	1,274
			8000					0,924	1,037	1,040	1,306
			9000					0,953	1,100	1,103	1,343
			10000					0,976	1,159	1,162	1,382

m_{T2}/m_0 (%)	m_{T1}/m_0 (%)	c_{T1} (Ns/m)	k_{T1} (N/m)	Dầm không có TMD				Dầm gắn 3 TMD			
				f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Dầm 2											
3	3	100	1000	11.298	48.964	131.9	181.170	0.236	0.236	0.236	11.297
			1500					0.289	0.289	0.289	11.297
			2000					0.333	0.333	0.333	11.297
			3000					0.408	0.408	0.408	11.297
			4000					0.471	0.471	0.471	11.298
			5000					0.527	0.527	0.527	11.298
			6000					0.577	0.577	0.577	11.298
			7000					0.624	0.624	0.624	11.299
			8000					0.667	0.667	0.667	11.299
			9000					0.707	0.707	0.707	11.299
			10000					0.746	0.7462	0.7462	11.300

Từ các bảng số liệu 3.1 đến bảng số liệu 3.6, ta có thể rút ra một số nhận xét như sau:

- Trường hợp dầm gắn 1 TMD:

+ Khi tăng khối lượng của TMD, tần số dao động riêng đầu tiên giảm và các tần số dao động riêng còn lại gần như không thay đổi bởi sự tăng khối lượng này. Điều này là do đối với kết cấu, tần số dao động riêng đầu tiên f_1 là tần số dao động riêng của TMD, còn các tần số thứ hai trở lên là tần số dao động riêng của kết cấu chính, khi các thông số của TMD thay đổi thì tần số dao động riêng của kết cấu (từ f_2 trở lên) ít có sự thay đổi, tức là TMD có ảnh hưởng nhỏ đến các tần số dao động riêng của kết cấu chính.

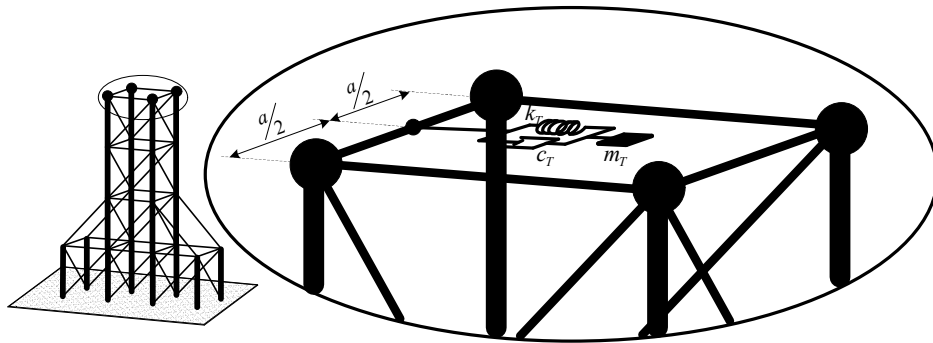
+ Khi m_T bằng giá trị 10% khối lượng của kết cấu, độ cứng của lò xo k là hằng số. Khi độ cản nhớt của TMD tăng trong khoảng 10 đến 1000 Ns/m, các tần số dao động riêng đầu tiên sẽ không thay đổi nhiều. Trong trường hợp này, cho thấy hệ số cản nhớt có ảnh hưởng nhỏ đến dao động tự do của kết cấu.

- Trường hợp dầm gắn 3 TMD: khi lắp thêm 3 TMD thì ba tần số đầu f_1 .

f_3 chính là ba tần số dao động riêng của các TMD, còn tần số thứ tư trở đi là tần số dao động của kết cấu chính. Dễ nhận thấy rằng tần số dao động riêng của kết cấu chính ít thay đổi khi lắp nhiều TMD, điều này cũng tương tự như khi kết cấu chính lắp 1 TMD.

3.1.2. Bài toán khảo sát đối với khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng

Xét hệ khung không gian với các thông số hình học và vật liệu được mô tả như trong ví dụ kiểm chứng 2 ở chương 2. Khi TMD được gắn ở điểm chính giữa ở thanh trên cùng (hình 3.3), tổng khối lượng của hệ là $m_0 = 1,114 \times 10^5$ kg. Khi khối lượng TMD m_T , độ cứng của lò xo và độ cản nhớt c_T thay đổi, các tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu trong trường hợp có và không có TMD được thể hiện như trong bảng 3.7, bảng 3.8 và bảng 3.9.



Hình 3.3. Mô hình hệ giàn không gian với thiết bị tiêu tán năng lượng (TMD)

Bảng 3.7. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của cơ hệ theo tỷ số m_T/m_0

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Hệ khung không có TMD				Hệ khung có 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
1	10^3	10^4	0,704	0,961	1,038	1,283	0,475	0,704	0,961	1,038
2							0,336	0,704	0,961	1,038
3							0,274	0,704	0,961	1,038
4							0,237	0,704	0,961	1,038
5							0,212	0,704	0,961	1,038
6							0,194	0,704	0,961	1,038
7							0,179	0,704	0,961	1,038

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Hệ khung không có TMD				Hệ khung có 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
8							0,168	0,704	0,961	1,038
9							0,158	0,704	0,961	1,038
10							0,150	0,704	0,961	1,038

Bảng 3.8. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của cơ hệ theo k_T

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Hệ khung không có TMD				Hệ khung có 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
10	10^3	5000	0,704	0,961	1,038	1,283	0,106	0,704	0,961	1,038
		7000					0,126	0,704	0,961	1,038
		8000					0,134	0,704	0,961	1,038
		10000					0,150	0,704	0,961	1,038
		12000					0,164	0,704	0,961	1,038
		15000					0,184	0,704	0,961	1,038
		18000					0,201	0,704	0,961	1,038
		20000					0,212	0,704	0,961	1,038
		25000					0,237	0,704	0,961	1,038

Bảng 3.9. Sự thay đổi tần số dao động riêng đầu tiên của cơ hệ theo c_T

m_T/m_0 (%)	c_T (Ns/m)	k_T (N/m)	Hệ khung không có TMD				Hệ khung có 1 TMD			
			f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
10	100	10^4	0,704	0,961	1,038	1,283	0,150	0,704	0,961	1,038
	500						0,150	0,704	0,961	1,038
	800						0,150	0,704	0,961	1,038
	1000						0,150	0,704	0,961	1,038
	1400						0,150	0,704	0,961	1,038
	1600						0,150	0,704	0,961	1,038
	1800						0,150	0,704	0,961	1,038
	2000						0,150	0,704	0,961	1,038
	2500						0,150	0,704	0,961	1,038

Từ các kết quả tính toán trên đây, ta rút ra nhận xét như sau: khi lắp thêm TMD vào kết cấu chính, tương tự như damping thêm TMD, tần số dao động riêng đầu tiên chính là tần số dao động của TMD, từ tần số thứ hai trở lên là tần số dao động của kết cấu khung, và tần số dao động của kết cấu chính không thay đổi khi thay đổi các thông số của TMD.

3.2. Khảo sát ảnh hưởng của một số thông số đến đáp ứng động lực học của dầm, khung không gian chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên

3.2.1. Một số đặc trưng quan trọng của quá trình ngẫu nhiên

Đối với quá trình ngẫu nhiên (QTNN), cần phải xử lý thống kê trên tập hợp của các thể hiện ngẫu nhiên để thu được các đặc trưng xác suất của quá trình. Thông thường nếu ta biết thể hiện ngẫu nhiên trong miền thời gian, qua các phép biến đổi sẽ thu được các đặc trưng xác suất trong miền tần số như hàm mật độ phổ, phương sai, ... Phần này sẽ trình bày phương pháp tiến hành nhằm đưa thể hiện ngẫu nhiên trong miền thời gian sang các đặc trưng xác suất trong miền tần số, làm cơ sở cho việc tính toán các đặc trưng xác suất của tải trọng ngẫu nhiên tác dụng lên kết cấu.

Gọi $x(t)$ là một thể hiện của QTNN dùng xác định trong khoảng thời gian T .

Mật độ phổ tại tần số ω đối với mỗi thể hiện $x(t)$ được tính bằng công thức sau:

$$S_{xx}(\omega) = \frac{2\pi}{T} |X_T(\omega)|^2 \quad (3.1)$$

trong đó: $X_T(\omega)$ là biến đổi Fourier của hàm $x(t)$ trong khoảng thời gian hữu hạn T .

Giả thiết hàm $x(t)$ đã được xác định tại N điểm cách đều nhau với khoảng thời gian Δt . Bắt đầu từ thời điểm $t_0=0$, tại thời điểm $t_k=k\Delta t$ giá trị của thể hiện được biểu diễn dưới dạng:

$$x(t_k) = x_k \text{ với } k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.2)$$

Như vậy, hàm $X_T(\omega)$ được xấp xỉ bằng chuỗi:

$$X_T(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp[-j\omega k \Delta t] \Delta t, \quad (3.3)$$

$$j = \sqrt{-1}.$$

Các giá trị rời rạc của tần số để tính (3.3) được chọn như sau:

$$\omega_n = n\Delta\omega = n \frac{2\pi}{N\Delta t} \text{ với } n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.4)$$

Đối với mỗi giá trị rời rạc của tần số có thể viết lại hàm (3.3) dưới dạng:

$$X_n = \frac{X_T(\omega_n)}{\Delta t} = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp\left[-j \frac{2\pi n k}{N}\right] \quad (3.5)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Công thức (3.1) tính đến (3.5) có dạng:

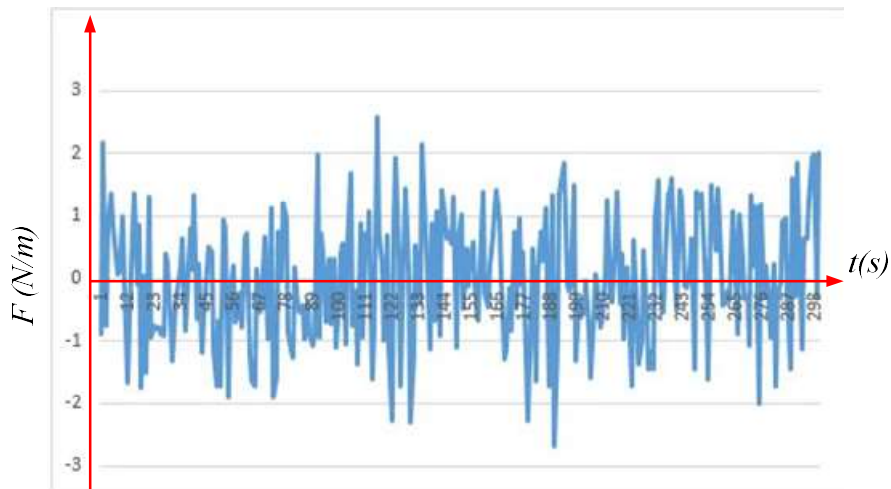
$$S_{xx}(\omega_n) = \frac{2\pi}{T} |X_T(\omega_n)|^2 = \frac{2\pi\Delta t}{N} |X_n|^2. \quad (3.6)$$

Phương sai D_x của QTNN là phần diện tích nằm dưới đường cong phổ:

$$D_x = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} S_{xx}(\omega) d\omega. \quad (3.7)$$

Độ lệch chuẩn:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} \quad (3.8)$$



Hình 3.4. Tải ngẫu nhiên biến đổi trong miền thời gian

3.2.2. Bài toán động lực học của dầm chịu tải trọng ngẫu nhiên

Một trong những biện pháp hiệu quả để giảm dao động trong các hệ cơ học là sử dụng các bộ hấp thụ dao động, điển hình là các thiết bị TMD gồm khối lượng - lò xo - giảm chấn. Nguyên tắc cơ bản của phương pháp này là tiêu tán một phần năng lượng dao động từ hệ chính tới bộ phận hấp thụ dao động được lắp thêm vào hệ chính. Vì sử dụng phương pháp số (chương trình tính được tác giả viết trên cơ sở lập trình bằng ngôn ngữ Matlab) nên không thể tìm được biểu thức dạng hiển các tham số của TMD, để tìm được các tham số của TMD nhằm làm giảm dao động cho hệ nhiều nhất, tác giả tiến hành thay đổi giá trị của đồng thời hai tham số độ cứng k_T và hệ số cản c_T của TMD, chỉ lưu ý rằng khối lượng của TMD không được vượt quá 10% khối lượng của kết cấu chính. Với mỗi bộ tham số của TMD, ta vẽ phổ đáp ứng chuyển vị S_{wc} của điểm giữa dầm trong miền tần số và tính diện tích miền đáp ứng của phổ chuyển vị này (J_{wc}), diện tích J_{wc} này thể hiện năng lượng dao động của hệ, diện tích này càng nhỏ thì khả năng giảm dao động của hệ càng tốt.

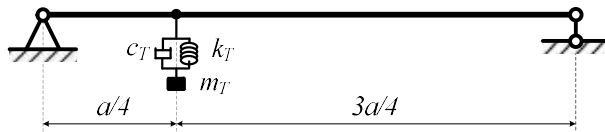
Xét dầm với các thông số hình học và vật liệu như trên ví dụ kiểm chứng 1 trong chương 2, dầm chịu tác dụng của tải trọng phân bố đều theo phương chuyển dịch của TMD. Các bài toán sau đây có thể xét các trường hợp dầm lắp thêm 1 đến nhiều TMD ở các vị trí khác nhau của dầm nhằm xem xét hiệu quả giảm dao động cưỡng bức của kết cấu chính. Như đã trình bày trong phần lý thuyết, khi cơ hệ chịu tải trọng ngẫu nhiên, diện tích giới hạn bởi đường cong đáp ứng phổ trong miền tần số thể hiện năng lượng dao động của hệ, khi lắp thêm TMD vào kết cấu chính, diện tích miền đáp ứng sẽ giảm xuống, khi diện tích miền này càng nhỏ thì cũng có nghĩa là hiệu quả giảm dao động của TMD đối với kết cấu chính càng lớn. Cũng xuất phát từ ý nghĩa này, các kết quả đầu ra của các tính toán dưới đây sẽ đề cập đến diện tích này.

3.2.2.1. Khảo sát ảnh hưởng của vị trí TMD

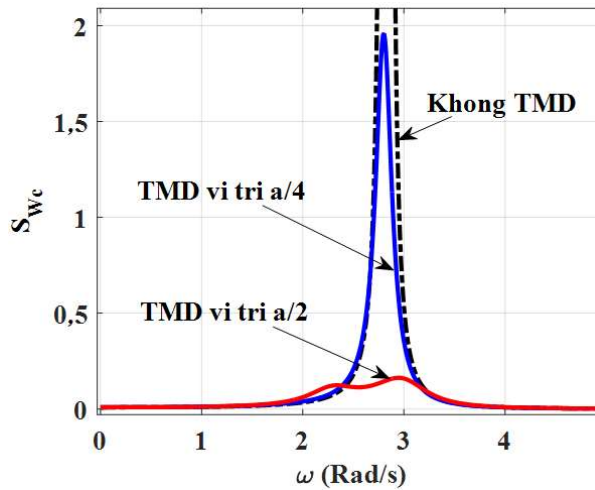
Xét trường hợp dầm chỉ lắp 1 TMD, xét hai trường hợp: TMD lắp tại chính giữa dầm (hình 3.1, $L = a$) và TMD lắp tại vị trí $a/4$ (hình 3.5): kết quả

tính toán thể hiện như trên hình 3.6 và trong bảng 3.10.

Từ kết quả có được, thấy rằng khi TMD được lắp tại vị trí chính giữa dầm, cũng là vị trí tập trung nhiều năng lượng nhất của dầm khi nó dao động, thì hiệu quả dập tắt dao động của TMD đối với kết cấu tăng lên rõ rệt, do vậy trong thiết kế, cần chọn vị trí có chuyển vị lớn nhất để lắp TMD nhằm thu được hiệu quả giảm dao động tốt nhất.



Hình 3.5. Dầm có 1 TMD lắp tại vị trí $a/4$



Hình 3.6. Đáp ứng S_{wc} phụ thuộc vị trí TMD

Bảng 3.10. Giá trị các tham số của TMD khi lắp tại $a/2$ và tại vị trí $a/4$ để có được giá trị J_{wc} nhỏ nhất

Vị trí lắp TMD	$m_T/m_{dầm}(\%)$	k_T	c_T	$J_{wc}/J_{wc0}(\%)$
TMD lắp tại $a/2$	6	15600	2860	9,55
TMD lắp tại $a/4$	6	11900	4640	15,90

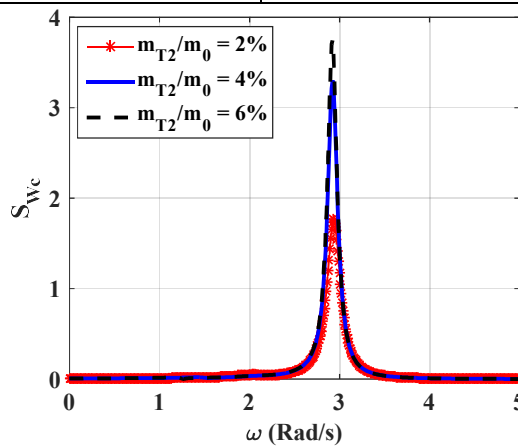
3.2.2.2. Khảo sát ảnh hưởng của khối lượng TMD

Xét dầm có 3 TMD (hình 3.2) với các tham số $k_{T1} = k_{T2} = k_{T3} = 4000$ N/m; $c_{T1} = c_{T2} = c_{T3} = 500$ Ns/m, khối lượng của hai TMD thứ nhất và thứ ba bằng nhau $m_{T1} = m_{T3} = 2\%m_0$, để xem xét ảnh hưởng của khối lượng TMD chính giữa dầm m_{T2} đến đáp ứng của dầm, tác giả thay đổi khối lượng m_{T2} từ 2 - $6\%m_0$.

Kết quả đáp ứng phổ chuyển vị của điểm giữa dầm thể hiện như trong hình 3.7. Kết quả tỷ số diện tích miền đáp ứng của phổ chuyển vị S_{wc}/S_{wc0} (%) thể hiện như trong bảng 3.11. Trong đó S_{wc0} là diện tích miền đáp ứng của phổ chuyển vị khi dầm không có TMD.

Bảng 3.11. Kết quả S_{wc}/S_{wc0} phụ thuộc vào khối lượng m_{T2}

m_{T2}	$m_{T2} = 2\%m_0$	$m_{T2} = 4\%m_0$	$m_{T2}=6\%m_0$
S_{wc}/S_{wc0} (%)	14,84	17,33	17,95



Hình 3.7. Phổ đáp ứng chuyển vị của điểm giữa dầm phụ thuộc khối lượng m_{T2}

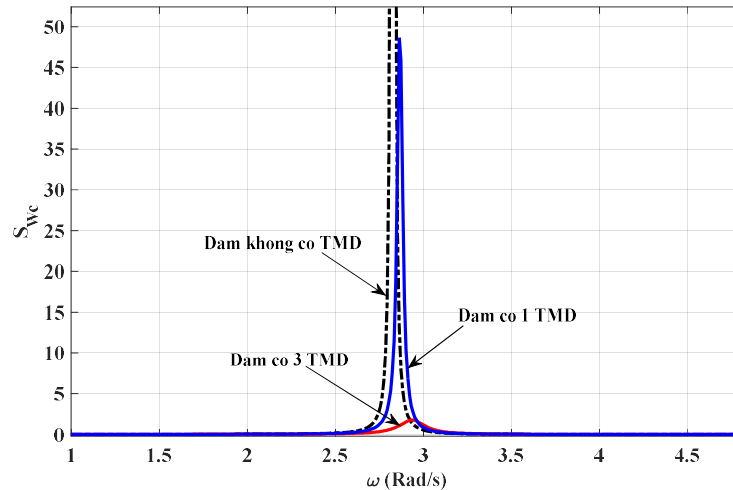
Từ kết quả này thấy rằng khi tăng khối lượng m_{T2} làm thay đổi không nhiều hình dáng của đường cong đáp ứng phổ chuyển vị trong miền tần số, tuy nhiên diện tích miền đáp ứng S_{wc} lại tăng lên, chứng tỏ hiệu quả giảm dao động trong trường hợp này giảm xuống khi tăng m_{T2} .

3.2.2.3. Khảo sát ảnh hưởng của số lượng TMD

- Khảo sát 1 về ảnh hưởng của số TMD: xét trường hợp có 1 TMD tại chính giữa dầm (hình 3.1): $m_T = 6\% m_0$, $k_T = 4000$ N/m; $c_T = 500$ Ns/m và trường hợp dầm có 3 TMD (hình 3.2): 1 TMD tại chính giữa dầm và 2 TMD tại vị trí $a/4$ và $3a/4$: $m_{T1} = m_{T2} = m_{T3} = 2\% m_0$; $k_{T1} = k_{T2} = k_{T3} = 4000$ N/m, $c_{T1} = c_{T2} = c_{T3} = 500$ Ns/m, lúc này tổng khối lượng của 3 TMD giữ không đổi bằng $6\% m_0$. Kết quả đáp ứng phổ chuyển vị của điểm giữa dầm thể hiện như trong hình 3.8. Kết quả tỷ số diện tích miền đáp ứng của phổ chuyển vị S_{wc}/S_{wc0} (%) thể hiện như trong bảng 3.12.

Bảng 3.12. Kết quả S_{wc}/S_{wc0} phụ thuộc vào số lượng TMD

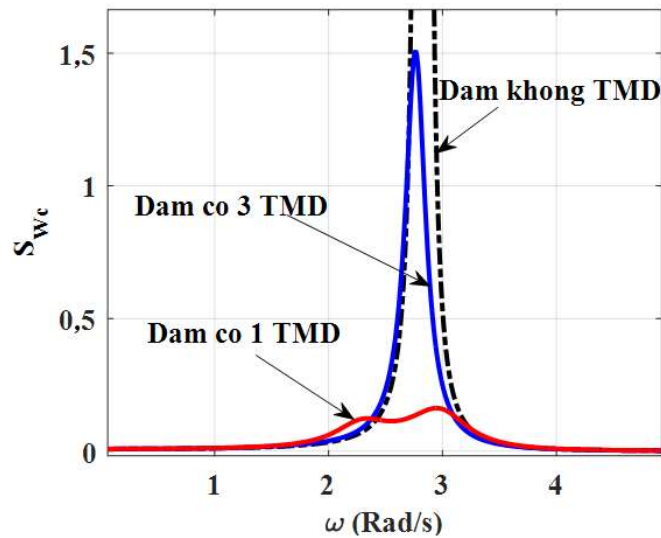
Số TMD	không có TMD	1 TMD	3 TMD
S_{wc}/S_{wc0} (%)	100	34,91	14,84

**Hình 3.8. Phổ đáp ứng chuyển vị của điểm giữa dầm phụ thuộc số lượng TMD**

- Khảo sát 2 về ảnh hưởng của số lượng của TMD: xét trường hợp dầm có một TMD tại chính giữa dầm, ký hiệu là TMD-1 (hình 3.1), và trường hợp dầm có ba TMD, một TMD lắp tại vị trí chính giữa, hai TMD lắp ở vị trí $a/4$ và $3a/4$, ký hiệu là TMD-3 (hình 3.2). Tuy nhiên, các thay số thay đổi khác so với khảo sát 1, các tham số như trong bảng 3.13. Tính toán tương tự như phần trên thu được các tham số của các TMD để được J_{wc} nhỏ nhất được thể hiện như trong bảng 3.13, và đồ thị phổ chuyển vị tại giữa dầm trong miền tần số được thể hiện như trong hình 3.9.

Bảng 3.13. Giá trị các tham số của TMD khi lắp một và ba TMD để có được giá trị J_{wc} nhỏ nhất

Trường hợp	$m_{T1}/m_{dầm}$ (%)	$m_{T2}/m_{dầm}$ (%)	$m_{T3}/m_{dầm}$ (%)	k_{T1} (N/m)	c_{T1} (Ns/m)	k_{T2} (N/m)	c_{T2} (Ns/m)	k_{T3} (N/m)	c_{T3} (Ns/m)	J_{wc}/J_{wc0} (%)
TMD-1	-	5	-	-	-	15600	2860	-	-	9,55
TMD-3	2	2	2	8000	2000	2931	841	8000	2000	14,74



Hình 3.9. Đáp ứng S_{wc} phụ thuộc vào số lượng TMD

Bảng 3.12, cho thấy TMD có tác dụng làm giảm rõ rệt dao động của kết cấu, khi lắp càng nhiều TMD thì có khả năng giảm dao động cho kết cấu càng tốt. Bảng 3.13 thấy rằng khi lắp một TMD tại chính giữa dầm thì hiệu quả giảm dao động cho kết cấu rõ rệt hơn.

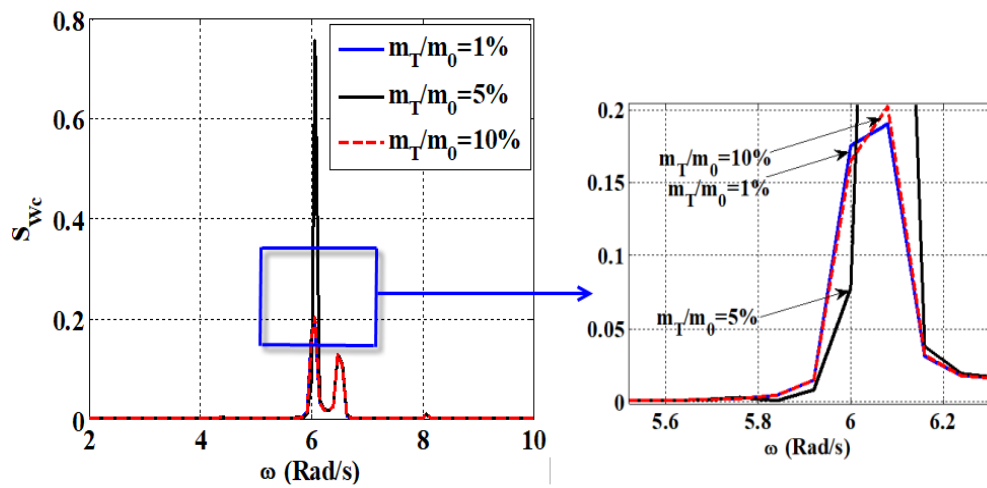
Từ đó cho nhận xét: tùy từng cơ hệ mà ta phải khảo sát để lựa chọn số lượng TMD cần lắp cho phù hợp.

3.2.3. Bài toán động lực học của khung không gian chịu tải trọng ngẫu nhiên

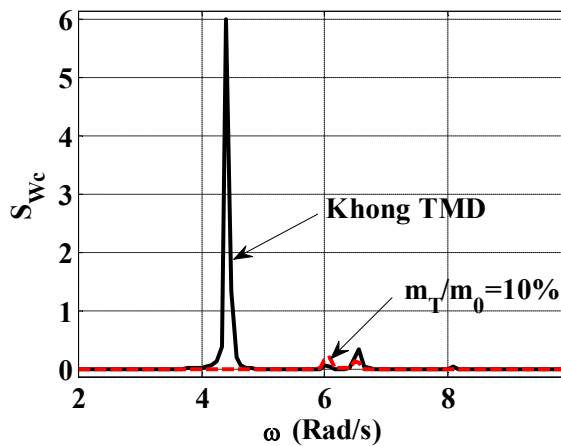
Xét hệ khung có thông số hình học và vật liệu như trong ví dụ kiểm chứng 2 ở chương 2, có 1 TMD được lắp chính giữa thanh ngang trên cùng như hình 3.3, khối lượng toàn bộ khung $m_0 = 1,1140 \cdot 10^5$ kg, tần số dao động riêng đầu tiên của dầm khi chưa lắp TMD là 4,426 rad/s, hệ khung chịu tác dụng của lực ngẫu nhiên dừng tập trung tại các nút 9, 12, 17, 18, 21, 22, 25, 26, 32 có dạng phổ ồn trắng $S_{FF}(\omega) = 1$. Với mỗi bộ số liệu của tham số khối lượng m_T , hệ số cản c_T và độ cứng lò xo k_T của TMD, đáp ứng của hệ khung sẽ khác nhau, sẽ vẽ được hàm đáp ứng $S_{Q_i Q_j}(\omega)$ của các bậc tự do trong miền tần số khảo sát. Diện tích giới hạn bởi hàm đáp ứng trong miền tần số càng nhỏ thì năng lượng dao động càng nhỏ và cũng mong muốn khi lắp thêm TMD sẽ làm giảm diện tích này càng nhiều càng tốt, tức là càng làm giảm dao động cho kết cấu.

3.2.3.1. Khảo sát ảnh hưởng của khối lượng TMD

Đối với trường hợp khảo sát này, hai tham số của TMD được cố định là $c_T = 10^3 \text{ Ns/m}$, $k_T = 2 \cdot 10^4 \text{ N/m}$, thay đổi khối lượng m_T sao cho $m_T/m_0 = 1 - 10\%$, kết quả phổ đáp ứng của chuyển vị ngang lớn nhất tại điểm giữa thanh trên cùng thể hiện như trên hình 3.10 và hình 3.11, từ đây thấy rằng TMD làm giảm đáng kể chuyển vị ngang lớn nhất tại đỉnh của hệ khung, đường cong phổ đáp ứng khi có TMD khác hẳn so với trường hợp không có TMD, và đáp ứng này của hệ tỷ lệ tuyến tính với sự tăng giảm của khối lượng m_T .



Hình 3.10. Đáp ứng phổ chuyển vị khi m_T thay đổi

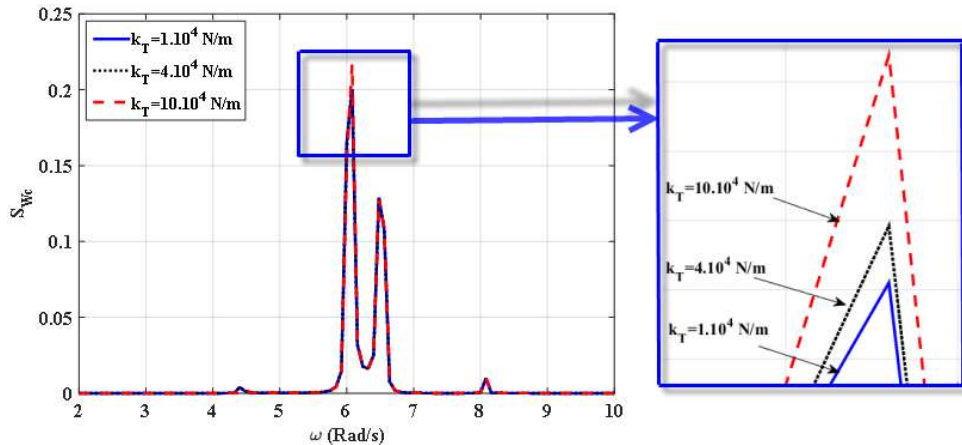


Hình 3.11. Đáp ứng phổ chuyển vị khi $m_T = 10\% m_0$ và khi không có TMD

3.2.3.2. Khảo sát ảnh hưởng của hệ số độ cứng của TMD

Nhằm làm rõ ảnh hưởng của hệ số độ cứng k_T của TMD: giữ $m_T/m_0 =$

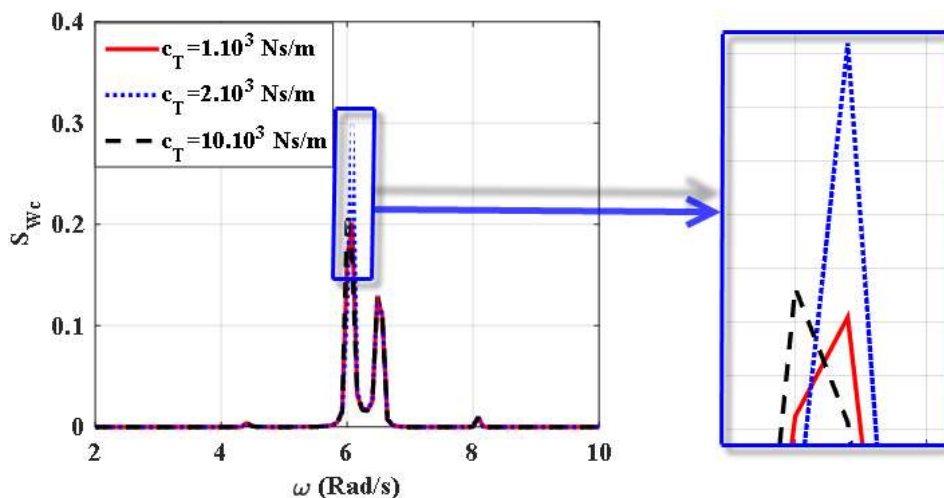
10%, $c_T = 10^3$ Ns/m, tăng hệ số k_T từ 1.10^4 N/m đến 10.10^4 N/m, kết quả đáp ứng phổ chuyển vị thể hiện như trên hình 3.12, kết quả cho thấy khi tăng độ cứng k_T thì giá trị lớn nhất của phổ đáp ứng của hệ cũng tăng lên. Tuy nhiên, hình dạng đường cong phổ đáp ứng trong miền tần số không thay đổi nhiều, chứng tỏ tăng độ cứng k_T trong khoảng đã xét không làm giảm đáp ứng của hệ.



Hình 3.12. Đáp ứng phổ chuyển vị khi k_T thay đổi

3.2.3.3. Khảo sát ảnh hưởng của hệ số độ cản của TMD

Khảo sát sự ảnh hưởng của hệ số cản c_T : giữ $m_T/m_0 = 10\%$, $k_T = 2.10^4$ N/m, tăng hệ số c_T từ 1.10^3 Ns/m đến 10.10^3 Ns/m, đường cong đáp ứng phổ chuyển vị thể hiện như trên hình 3.13, có thể dễ dàng thấy rằng hình dạng đường cong đáp ứng phổ chuyển vị gần tương đồng, tuy nhiên giá trị lớn nhất của phổ chuyển vị biến đổi không tỷ lệ với sự tăng lên của c_T .



Hình 3.13. Đáp ứng phổ chuyển vị khi c_T thay đổi

3.3. Kết luận

Trong chương 3 đã đạt được một số kết quả chính như sau:

Khảo sát các yếu tố ảnh hưởng của các tham số TMD đến đáp ứng dao động riêng và dao động cưỡng bức của kết cấu dầm, khung không gian chịu tải trọng ngẫu nhiên.

Qua khảo các kết quả số tính toán ảnh hưởng các yếu tố quan trọng đến đáp ứng động của kết cấu dầm và khung không gian chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên, trong đó kết cấu chính có lắp thêm thiết bị tiêu tán năng lượng TMD, luận án đưa ra một số nhận xét chính như sau:

- * Khi lắp thêm thiết bị tiêu tán năng lượng TMD vào kết cấu, làm thay đổi tần số dao động riêng cũng như làm giảm đáng kể dao động cho kết cấu chính.

- * Đối với dầm, khi lắp TMD vào vị trí chính giữa của dầm sẽ có tác dụng giảm dao động nhiều hơn so với các vị trí khác.

Chương 4

MẠNG NƠ RON NHÂN TẠO VÀ ÁP DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO

Có nhiều cách để xác định tần số dao động riêng của kết cấu: tính toán bằng tính toán lý thuyết, đo đạc bằng thực nghiệm, dự đoán bằng mạng trí tuệ nhân tạo (ANN),... Mỗi phương pháp có những ưu nhược điểm nhất định. Phương pháp tính toán lý thuyết và thực nghiệm đòi hỏi thời gian thao tác lâu, và cũng đảm bảo độ chính xác cần thiết. Tuy nhiên, đối với các kết cấu ngoài thực địa, khi xảy ra sự cố, để xác định các tham số đáp ứng cơ học của các kết cấu này bằng các phương pháp tính toán lý thuyết và thực nghiệm lại tốn thời gian không nhỏ, đối với các kết cấu lớn và nhiều bậc tự do thì đòi hỏi cấu hình máy tính đem theo rất cao. Các tham số đáp ứng cơ học của các kết cấu này có thể là thông số đầu vào cho các bài toán lớn hơn như chuẩn đoán kết cấu công trình, bài toán xử lý phá hủy đối với các kết cấu. Với những lý do như vậy thì phương pháp truyền thống như phương pháp tính toán và phương pháp thực nghiệm càng sẽ không còn thể hiện ưu điểm, nhất là đối với các công trình ở vùng sâu, vùng xa, hải đảo. Và ngày nay, cùng với sự phát triển của công nghệ 4.0, phương pháp dự đoán đáp ứng cơ học sử dụng trí tuệ nhân tạo (ANN) được sử dụng đem lại ưu điểm mà các phương pháp truyền thống không có được, đó là thời gian xử lý cực kỳ nhanh, chỉ cần huấn luyện trước, với bộ số liệu đầu vào hợp lý, thì thời gian xử lý để xuất kết quả đầu ra mong muốn là cực kỳ nhanh chóng và không đòi hỏi cấu hình máy móc với cấu hình cao (Việc sử dụng mạng trí tuệ nhân tạo cũng chính là một phương pháp của học máy-machine learning). Việc huấn luyện cho mạng nơ ron nhân tạo nhận biết đầu vào và đưa ra đầu ra sẽ được thực hiện trước tại nhà, tạo sự chủ động trong xử lý các tình huống. Chính vì ưu điểm như vậy mà luận án quyết định sử dụng mạng trí tuệ nhân tạo để dự đoán tần số dao động của kết cấu dầm, khung không gian. Đây là bài toán cơ bản để chứng minh khả năng của thuật toán có thể được sử dụng để dự đoán các đáp ứng cơ học khác của cơ hệ.

Chương này sẽ trình bày cơ sở lý thuyết về mạng nơ ron nhân tạo [61],

[69], [86], [95]. Đây là cơ sở khoa học cho việc thiết lập mạng nơ ron nhân tạo vào giải quyết một vấn đề thực tế đặt ra. Đồng thời sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo để dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu, dự đoán thông số tối ưu của TMD, đây là tiền đề để áp dụng giải quyết những vấn đề khác trong cơ học, rút ra những kết luận có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

4.1. Cơ sở lý thuyết mô hình trí tuệ nhân tạo

Ngày nay, việc sử dụng trí tuệ nhân tạo (AI - Artificial Intelligence)) trong việc giải quyết các vấn đề phức tạp trong khoa học và công nghệ nói chung và trong lĩnh vực cơ học là một xu hướng thú vị. Mô hình mạng nơ ron nhân tạo (ANN - Artificial Neural Network) là một trong những loại trí tuệ nhân tạo dựa trên mô phỏng quá trình làm việc song song của bộ não con người và mô tả về cách thức hoạt động của nó. Rõ ràng là các chức năng nút mạng thần kinh có thể được thực hiện nhiều công việc cùng một lúc với chi phí thời gian ít hơn để đưa ra kết quả đầu ra. Nói cách khác, cách dễ dàng hơn để giải thích khái niệm mới về AI này là mạng thần kinh là một hộp đen, có thể dự đoán kết quả đầu ra từ các đầu vào cụ thể.

Mặt khác, sau quá trình đào tạo, mạng lưới thần kinh có thể nhận ra sự tương đồng từ các mẫu đầu vào mới. Đối với nhiều hệ thống ANN đã được nghiên cứu, hệ thống mạng được sử dụng phổ biến nhất là mạng chuyển tiếp phản hồi nhiều lớp, là hệ thống được đề xuất trong đề tài này. Hệ thống cơ bản của mô hình ANN thường bao gồm ba lớp đặc biệt, lớp đầu vào, trong đó dữ liệu được đưa vào mô hình, lớp ẩn, nơi dữ liệu được tính toán và lớp đầu ra, nơi kết quả của ANN được xuất. Mỗi lớp bao gồm các nút được gọi là tế bào thần kinh. Trong một mạng nơ ron chuyển tiếp phản hồi, thông tin chỉ di chuyển theo một hướng, chuyển tiếp, từ các nơ-ron đầu vào, qua các nút ẩn đến các nơ-ron đầu ra. Mỗi tế bào thần kinh được liên kết với các tế bào thần kinh khác trong lớp xử lý (lớp thứ hai). Nó khác với các nơ-ron ở lớp đầu vào, chỉ nhận và chuyển các tín hiệu đầu vào sang các nơ-ron khác trong lớp ẩn, mỗi nơ-ron ở các lớp khác bao gồm ba thành phần chính; trọng số, độ lệch và hàm kích

hoạt, có thể là liên tục, tuyến tính hoặc phi tuyến. Các hàm kích hoạt tiêu chuẩn bao gồm, các hàm sigmoid phi tuyến (logig, tansig) và các hàm tuyến tính (poslin, purelin). Khi hệ thống của mạng nơ ron chuyển tiếp phản hồi đã được xác định hoàn toàn (bao gồm số lớp, số nơ-ron trong mỗi lớp, chức năng kích hoạt cho mỗi lớp), các trọng số và độ lệch là các tham số tự do duy nhất có thể được chỉnh sửa. Điều chỉnh các tham số này có thể thay đổi các giá trị đầu ra của mạng.

Để mô hình hóa một chức năng hoặc quy trình thực tế nhất định, các trọng số và độ lệch được sửa đổi để có được đầu ra mạng mong muốn trong phạm vi sai số. Thủ tục điều chỉnh này được gọi là một quá trình đào tạo. Các thuật toán đào tạo khác nhau được thực hiện tùy thuộc vào loại công việc mạng thần kinh được thực hiện. Thuật toán đào tạo ANN nổi tiếng là thuật toán nền. Thuật toán đào tạo này phân phối lỗi mạng để đạt được lỗi tối thiểu hoặc phù hợp nhất. Để biết chi tiết về một số loại cấu trúc ANN cũng như các thuật toán đào tạo, chúng ta có thể tìm thêm thông tin trong [61], [69], [86], [95].

Đối với các ứng dụng cơ học kết cấu, nhiều hệ cơ học cần phải có được tần số tự nhiên ngay lập tức của kết cấu, chẳng hạn như vấn đề liên quan đến cộng hưởng hoặc dự đoán vết nứt bằng cách xử lý tần số tự nhiên của cơ hệ. Theo mô hình ANN, chúng ta có thể dự đoán các phản ứng cơ học (ví dụ tần số tự nhiên) của các cấu trúc cơ học thông qua dữ liệu đầu vào.

Ngoài ra, sử dụng mô hình ANN tốn ít thời gian và bộ nhớ hơn, do đó có thể rút ngắn thời gian mô phỏng để xuất các tham số đầu ra (trong luận án này là tần số tự nhiên). Đây là một trong những lợi thế vượt trội của các mô hình ANN và chúng có thể được áp dụng đầy đủ để giải quyết các vấn đề phức tạp khác trong cơ học.

4.2. Mạng nơ ron nhân tạo

4.2.1. Nơron và mạng nơron

4.2.1.1. Nơron

Mạng nơron được tạo thành từ các nơron. Nơron nhân tạo là mô hình

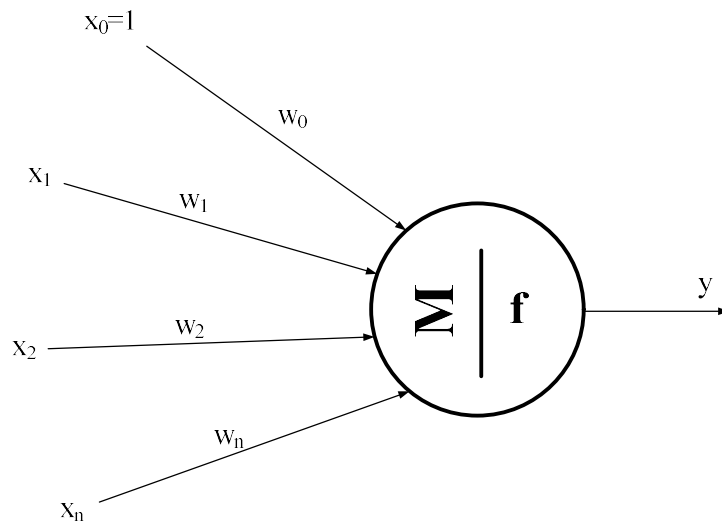
tính toán mô phỏng một số đặc trưng hoạt động của nơron sinh học trong não người, (sau này chúng ta sẽ gọi tắt nơron nhân tạo là nơron). Nơron là đơn vị xử lý gồm n ($n \geq 1$) đầu vào giá trị thực $x_1, \dots, x_n$ và một đầu ra cũng giá trị thực y .

Mỗi đầu vào được gán với một trọng số, ta ký hiệu trọng số gán với đầu vào thứ i là w_i . Quá trình xử lý thông tin trong nơron diễn ra như sau. Đầu tiên tổ hợp tuyến tính của các giá trị đầu vào được tính.

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0 \quad (4.1)$$

Tổng này chúng ta sẽ gọi là tổng trọng số. Giá trị s của tổng được truyền qua một hàm f để tính giá trị đầu ra: $y = f(s)$.

Hàm f trong mỗi nơron được gọi là hàm kích hoạt (activation function). Để cho gọn khi viết, chúng ta đưa thêm vào một đầu vào x_0 luôn luôn có giá trị là 1.



Hình 4.1. Một nơron.

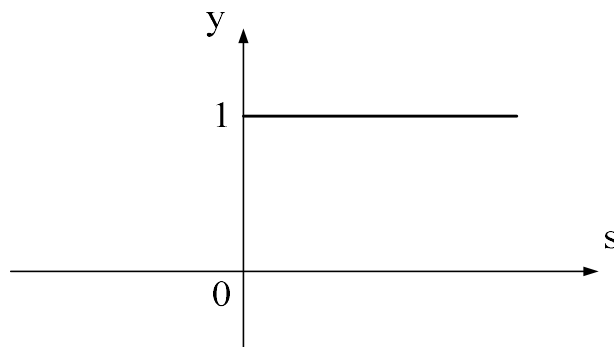
Với ký hiệu như thế ta có thể mô tả nơron như trong hình 4.1 và tổng trọng số có thể viết là:

$$s = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (4.2)$$

Về nguyên tắc, ta có thể lấy một hàm bất kỳ làm kích hoạt trong nơron. Sau đây là các hàm kích hoạt được sử dụng rộng rãi nhất.

1) Hàm bậc thang:

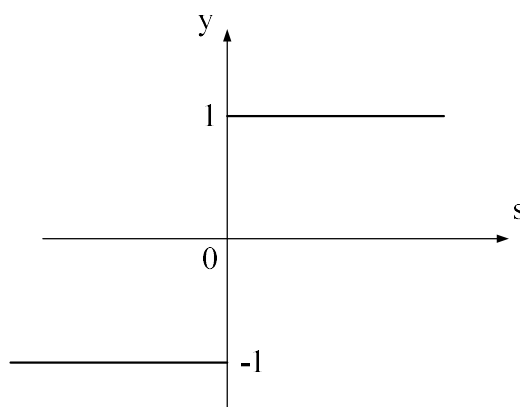
$$\text{step}(s) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } s \geq 0 \\ 0 & \text{nếu } s < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$



Hình 4.2. Đồ thị hàm kích hoạt bậc thang.

2) Hàm dấu:

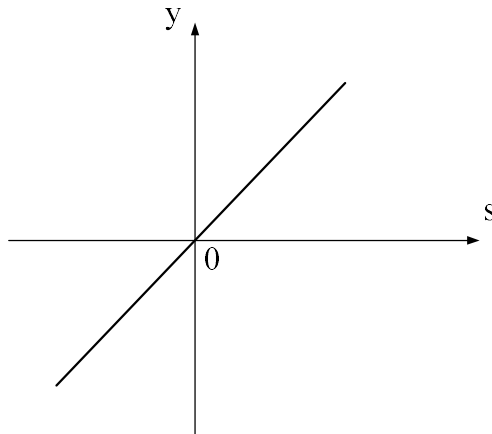
$$\text{sign}(s) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } s \geq 0 \\ -1 & \text{nếu } s < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$



Hình 4.3. Đồ thị hàm kích hoạt Sign.

3) Hàm tuyến tính:

$$f(s) = s \quad (4.5)$$



Hình 4.4. Đồ thị hàm kích hoạt tuyến tính.

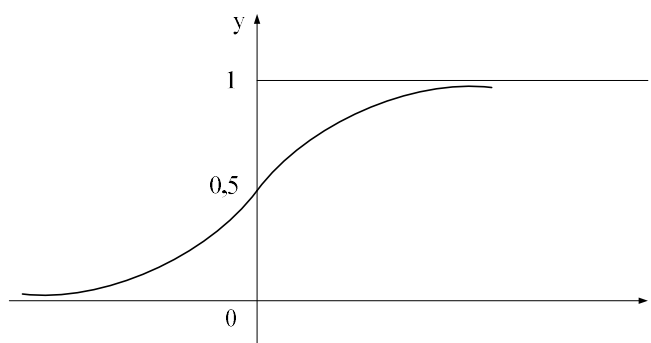
4) Hàm sigmoid (hàm chữ S):

$$\sigma(s) = \frac{1}{1 + \exp(-s)} \quad (4.6)$$

Đồ thị của hàm có dạng chữ S như trong hình 4.5 hàm đơn điệu tăng và nhận giá trị trong khoảng $(0,1)$. Hàm này có tính chất đặc biệt là đạo hàm của nó có thể biểu diễn qua chính nó, cụ thể là:

$$\sigma(s) = \sigma(s)[1 - \sigma(s)] \quad (4.7)$$

Sử dụng tính chất này để tính các đạo hàm riêng của hàm lỗi khi đưa ra thuật toán truyền ngược.



Hình 4.5. Đồ thị hàm kích hoạt sigmoid.

5) Hàm tanh (hyperbolic tangent sigmoid function):

Hàm này có đồ thị trong hình 4.6. Hàm đơn điệu tăng và nhận giá trị trong khoảng $(-1, +1)$. Hàm tanh là hàm lẻ và đạo hàm của nó cũng có thể biểu hiện qua chính nó, tức là:

$$\tanh(s) = -\tanh(s) \quad (4.8)$$

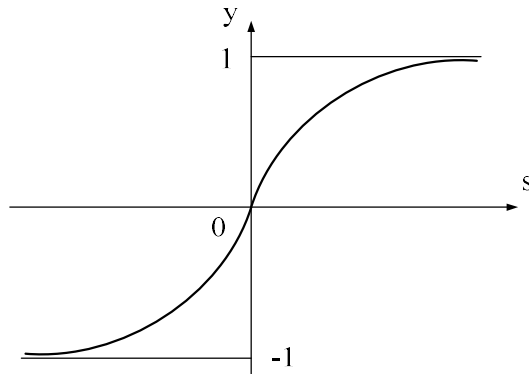
và

$$\tanh'(s) = 1 - [\tanh(s)]^2 \quad (4.9)$$

Trong các mạng nơron được nghiên cứu sau này, người ta thường sử dụng các hàm kích hoạt là hàm tuyến tính hoặc hàm sigmoid hoặc hàm tanh, vì các hàm này khả vi liên tục, do đó có thể sử dụng kỹ thuật tụt dốc gradient để thiết kế các thuật toán huấn luyện mạng.

Nơron với hàm kích hoạt là hàm sign được gọi là perceptron.

$$\tanh(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}} \quad (4.10)$$



Hình 4.6. Hàm tanh.

Từ các công thức (4.9) và (4.10), ta suy ra rằng, đầu ra y của nơron là hàm của các đầu vào $X_1, \dots, X_n$ của nơron.

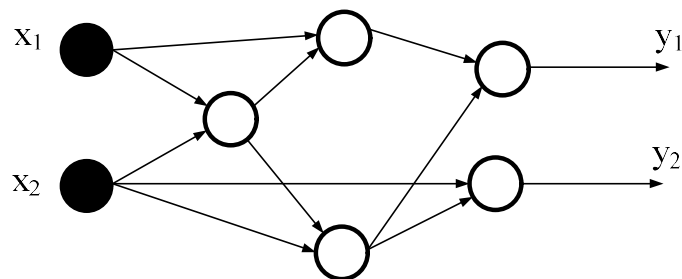
$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0\right) \quad (4.11)$$

Như vậy, mỗi nơron biểu diễn một hàm tuyến tính tổng quát.

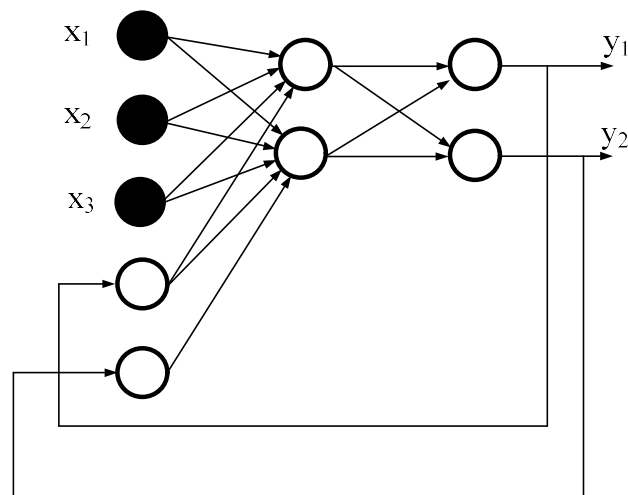
4.2.1.2. Mạng nơron

Để tăng khả năng biểu diễn hàm, các nơron được kết nối với nhau để tạo thành mạng, đầu ra của một nơron có thể được nối với đầu vào của một nơron khác (hoặc cũng có thể được nối với đầu vào của chính nó). Trong biểu diễn hình học của mạng thì sự kết nối đó được mô tả bởi mũi tên đi từ nơron có đầu

ra tới nơron có đầu vào được nối với nhau, và do đó mạng được biểu diễn bởi đồ thị định hướng với các đỉnh tương ứng với các nơron. Kiến trúc của mạng được quyết định bởi sự kết nối các nơron trong mạng. Có hai loại kiến trúc mạng chính: **kiến trúc mạng truyền thẳng (feed-forward network)** và **kiến trúc mạng phản hồi (feed-back network hoặc recurrent network)**. Trong các mạng truyền thẳng, các mũi tên trong mạng không tạo thành chu trình, hay nói cách khác mạng được biểu diễn bởi đồ thị định hướng không có chu trình. Tính chất này của mạng làm cho các đầu ra của mạng (các đầu ra không bị kết nối) là hàm hoàn toàn xác định của các đầu vào của mạng.



(a)



(b)

a. Mạng truyền thẳng

b. Mạng phản hồi

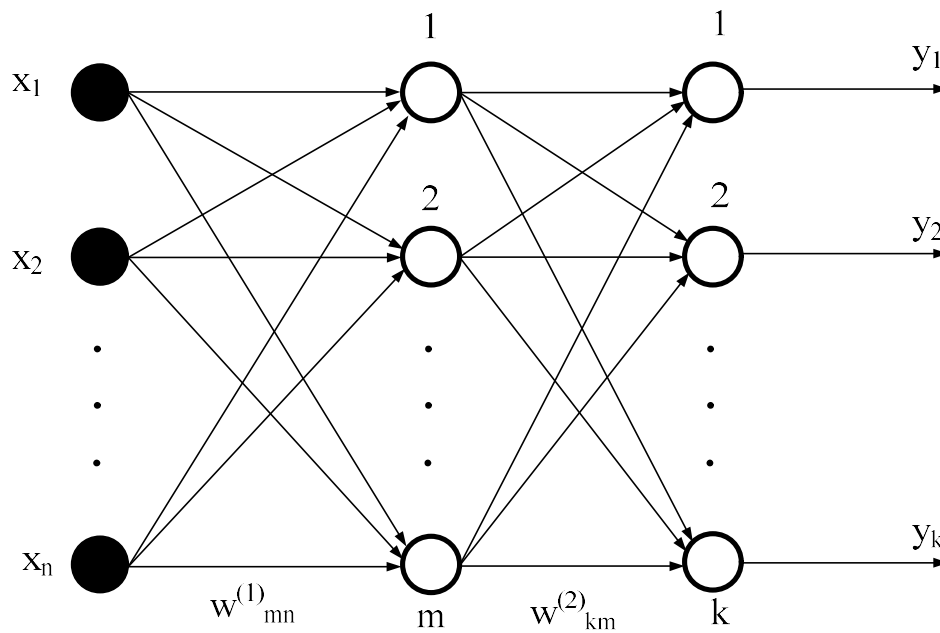
Hình 4.7. Các kiến trúc mạng

Hình 4.7a biểu diễn một mạng truyền thẳng. Khác với các mạng truyền thẳng, các mạng phản hồi có chứa chu trình, ví dụ về một mạng phản hồi được cho trong hình 4.7b. Mạng Hopfield, mạng Hamming là các ví dụ khác về mạng

phản hồi. Mạng phản hồi có kiến trúc như trong hình 4.7b đã được kiểm nghiệm là hiệu quả cho các nhiệm vụ học tiên đoán dữ liệu phụ thuộc thời gian. Lý thuyết về các mạng nơron rất phong phú, các mạng nơron có các ứng dụng rất đa dạng. Với mục đích sử dụng mạng nơron cho các vấn đề hồi quy và phân lớp, trong luận án chỉ quan tâm nghiên cứu các mạng truyền thẳng đa tầng.

4.2.2. Mạng truyền thẳng đa tầng

Trong mục này trình bày một kiến trúc mạng truyền thẳng được ứng dụng rộng rãi trong hồi quy và nhận dạng mẫu: **mạng truyền thẳng đa tầng (multilayer feedforward network)**. Trong kiến trúc này các nơron được sắp xếp thành các tầng.



Hình 4.8. Kiến trúc các mạng truyền thẳng đa tầng

Hình 4.8 mô tả một mạng ba tầng: tầng vào, tầng ra và một tầng ẩn. Các đơn vị của tầng vào không phải là các nơron mà chỉ là các “trạm” lưu các giá trị đầu vào. Các đơn vị của một tầng (trừ tầng ra) được nối với tất cả các đơn vị của tầng sau nó (*mạng kết nối đầy đủ*). Các đơn vị trong mỗi tầng được đánh số bắt đầu từ 1, 2, ... Chúng ta ký hiệu w_{ij} là trọng số của đường nối từ nơron thứ i ở một tầng tới nơron thứ j ở tầng sau. Về nguyên tắc không có gì hạn chế

lựa chọn các hàm kích hoạt ở các nơron. Tuy nhiên, để thuận tiện cho ký hiệu và tính toán, thường chọn cùng một hàm kích hoạt cho tất cả các nơron trong cùng một tầng. Các hàm kích hoạt ở tầng ẩn thường được chọn là hàm sigmoid, còn các hàm kích hoạt ở tầng ra là hàm tuyến tính hoặc hàm sigmoid hoặc hàm tanh... tùy thuộc vào mục tiêu của ứng dụng.

Mô tả quá trình tính toán diễn ra trong mạng. Đó là quá trình truyền thẳng các thông tin qua mạng, diễn giải điều này với mạng ba tầng trong hình 4.8. Đầu tiên các giá trị đầu vào $x_1, x_2, \dots, x_n$ được đưa vào mạng và được truyền tới tất cả các nơron của tầng ẩn. Mỗi nơron j của tầng ẩn sẽ thực hiện tính đầu ra z_j của nó, sự tính toán này gồm hai giai đoạn; đầu tiên tính tổng trọng số, sau đó truyền tổng này qua hàm kích hoạt để tính đầu ra. Giả sử h là hàm kích hoạt ở tầng ẩn này, khi đó ta có:

$$s_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + w_{j0} \quad (4.12)$$

$$z_j = h(s_j) = h\left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + w_{j0}\right) \quad (4.13)$$

Các tính toán trên được tiến hành đồng thời trên tất cả các nơron của tầng ẩn. Sau đó các đầu ra z_j đó được truyền tới tất cả các nơron của tầng sau (trong mạng này thì đó là tầng ra), tức là các z_j trở thành các đầu vào của các nơron ở tầng tiếp theo. Trong mạng hình 4.8, nếu ta ký hiệu y_k là đầu ra của nơron k của tầng ra và g là hàm kích hoạt ở tầng ra, thì tương tự như trên ta có

$$y_k = g\left(\sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + w_{k0}\right) \quad (4.14)$$

trong đó, m là số nơron của tầng ẩn. Cần lưu ý rằng, các trọng số w_{ji} và w_{kj} trong các công thức (4.13) và (4.14) là khác nhau, đáng lẽ phải ký hiệu chẳng hạn là $w_{ji}^{(1)}$ và $w_{kj}^{(2)}$, nhưng để dễ nhìn ta đã bỏ đi.

Thay các z_j được xác định bởi (4.13) vào (4.14), ta nhận được:

$$y_k = g\left(\sum_{j=1}^m w_{kj} h\left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + w_{j0}\right) + w_{k0}\right) \quad (4.15)$$

Như vậy, với mạng truyền thẳng đa tầng thì các đầu ra của mạng là hàm hoàn toàn xác định của các đầu vào (khi mà các trọng số trong mạng đã được xác định). Các hàm đó được tính bởi công thức khi mạng có ba tầng. Rõ ràng là nếu các hàm kích hoạt trong mạng được chọn không phải là hàm tuyến tính thì các hàm được biểu diễn bởi mạng (các đầu ra) không phải là hàm tuyến tính của các biến đầu vào.

Nếu thêm vào một biến đầu vào x_0 cho các nơon của tầng ẩn, giá trị của nó luôn luôn bằng 1, thì các đầu ra z_j trong công thức (4.13) được viết dưới dạng:

$$z_j = h\left(\sum_{i=0}^n w_{ji} x_{i0}\right) \quad (4.16)$$

Cũng như vậy, thêm vào biến đầu vào $z_0 = 1$ các nơon của tầng ra, khi đó công thức (4.14) có dạng sau:

$$y_k = g\left(\sum_{j=0}^m w_{kj} z_j\right) \quad (4.17)$$

Từ công thức (4.14) thấy rằng, các đầu ra của mạng truyền thẳng đa tầng là hàm tuyến tính tổng quát của các đầu vào với các hàm cơ sở z_j được xác định bởi (4.13). Tuy nhiên, sự khác biệt là các hàm cơ sở này chưa được xác định trước, mà phụ thuộc vào các trọng số w_{ji} , các trọng số này sẽ được xác định trong thời gian huấn luyện mạng, sử dụng các ví dụ huấn luyện. Chính vì thế, mô hình mạng truyền thẳng đa tầng linh hoạt thích ứng hơn với sự đa dạng của dữ liệu.

Nếu mạng chỉ có một tầng (tức là không có tầng ẩn), thì hàm biểu diễn bởi mạng là hàm tuyến tính tổng quát (dạng (4.13)). Nếu các hàm kích hoạt ở tầng ẩn là hàm tuyến tính thì mạng này chỉ tương đương với mạng một tầng.

Do đó, sau khi thiết kế mạng cho các ứng dụng thì mạng cần có ít nhất một tầng ẩn và các hàm kích hoạt ở các tầng ẩn cần được chọn là hàm sigmoid.

Mạng nơron truyền thẳng đa tầng là mô hình xấp xỉ hàm vạn năng. Khi thiết kế một mạng truyền thẳng cho một ứng dụng, nói chung, chỉ cần sử dụng mạng một hoặc hai tầng ẩn với hàm kích hoạt sigmoid. Khó khăn là số nơron trong tầng ẩn phụ thuộc vào hàm cần biểu diễn. Thế nhưng, trong các nhiệm vụ học, các hàm mục tiêu mà cần học lại hoàn toàn không được biết, chỉ biết các thông tin về nó thông qua các ví dụ huấn luyện.

4.2.3. Các kỹ thuật trong huấn luyện mạng nơron

Trong các ứng dụng thực tế, không thể chỉ cần áp dụng máy móc một trong các phương pháp huấn luyện trên; bởi vì hàm lỗi không phải là tuyến tính, cũng không phải là hàm lồi, nó có nhiều cực tiểu địa phương; mặt khác kiến trúc mạng đã lựa chọn có thể là quá phức tạp đối với mục tiêu cần học. Vì vậy áp dụng một phương pháp huấn luyện mạng có thể dẫn tới kết quả tồi, mạng thu được không có khả năng tổng quát hoá tốt. Trong mục này sẽ trình bày các kỹ thuật được sử dụng trong quá trình huấn luyện mạng. Chưa được chứng minh chặt chẽ bằng toán học, các kỹ thuật này chỉ mang tính heuristic, nhưng đã tỏ ra có ích trong nhiều áp dụng thực tế.

4.2.3.1. Chuẩn hoá dữ liệu

Véc tơ các giá trị đầu vào $X = (x_1, \dots, x_n)$ gồm các đặc trưng có thể có bản chất rất khác nhau, được đo bởi các độ đo rất khác nhau; chẳng hạn x_i có thể là trọng lượng được đo bằng kG, x_j có thể là chiều dài được đo bằng cm; hai đặc trưng có thể là chiều dài, nhưng một đặc trưng được đo bằng cm, còn đặc trưng kia đo bằng m. Giá trị bằng số của các đầu vào ảnh hưởng lớn đến sự điều chỉnh trọng số trong quá trình huấn luyện và ảnh hưởng lớn đến kết quả huấn luyện. Mặt khác, xem các đặc trưng có ảnh hưởng như nhau đến giá trị của hàm mục tiêu. Vì vậy, cần chuẩn hoá các dữ liệu đầu vào trước khi sử dụng để huấn luyện. Các dữ liệu đầu vào cần được chuẩn hoá sao cho giá trị trung

bình trên tập huấn luyện của mỗi đặc trưng là bằng 0 và các đặc trưng có cùng phương sai (variance). Việc chuẩn hoá dữ liệu đảm bảo cho các đặc trưng được xử lý bình đẳng trong quá trình điều chỉnh trọng số và cho phép đưa ra phạm vi các giá trị khởi tạo của các trọng số.

4.2.3.2. Khởi tạo bộ trọng số

Nếu các trọng số được khởi tạo bằng 0, thì sẽ dẫn đến các đạo hàm riêng bằng 0 và do đó thuật toán huấn luyện mạng sẽ không hoạt động. Vì vậy, vấn đề đặt ra là cần khởi tạo các trọng số bằng bao nhiêu? Nếu các trọng số được khởi tạo có giá trị gần bằng 0 bởi vì hàm sigmoid gần như là tuyến tính trong phạm vi gần 0 (có thể thấy điều đó từ đồ thị của hàm sigmoid), cho nên ở các bước cập nhật trọng số ban đầu mạng biểu diễn hàm xấp xỉ là hàm tuyến tính của các đầu vào, chỉ sau khi các trọng số có thời gian phát triển thì mạng mới có thể biểu diễn các hàm không tuyến tính phức tạp mong muốn. Mặt khác, việc chuẩn hoá các dữ liệu đầu vào dẫn đến kết quả là, các giá trị đầu vào có cả giá trị dương và giá trị âm, do đó các giá trị khởi tạo của các trọng số cũng cần có cả dương lẫn âm. Vì vậy, người ta đặt giá trị ban đầu của các trọng số là các số ngẫu nhiên gần 0, thông thường là các số ngẫu nhiên được lấy ra trong khoảng $(-0,7; +0,7)$.

4.2.3.3. Chọn tỉ lệ học

Các thuật toán huấn luyện mạng được thiết kế theo kỹ thuật tụt dốc gradient, nên tỉ lệ học $\eta > 0$ xác định độ lớn của bước chuyển dịch véc tơ W theo hướng của véc tơ gradient nhằm tìm đến điểm cực tiểu của hàm lỗi $E(W)$. Về nguyên tắc, tỉ lệ học cần được chọn đủ nhỏ để đảm bảo dãy các véc tơ trọng số đã được cập nhật hội tụ đến điểm cực tiểu (địa phương) của hàm lỗi (thực tế, khi dừng huấn luyện chỉ đạt tới điểm gần với điểm cực tiểu). Nếu chọn tỉ lệ học quá lớn thì vectơ trọng số W sẽ dao động xung quanh điểm cực tiểu. Chẳng hạn, muốn tìm cực tiểu của hàm trong không gian một chiều $y = (x - 3)^2$, thấy ngay hàm đạt cực tiểu tại điểm $x = 3$. Bây giờ ta chọn tỉ lệ học $\eta = 1$ và xuất phát tại $x_0 = 7$, đạo hàm của hàm số là $y' = 2(x - 3)$. Áp dụng thuật toán tụt dốc gradient,

ở các bước tiếp theo sẽ nhận được dãy điểm $x_1 = -1$; $x_2 = 7$; $x_3 = -1, \dots$, dãy này nhảy qua nhảy lại điểm cực tiểu. Trong thực tế, với mạng mà các kích hoạt là hàm sigmoid thì sự lựa chọn ban đầu $\eta = 1$ là thích hợp cho nhiều vấn đề, sau đó qua thực nghiệm có thể điều chỉnh.

4.2.4. Thiết kế mạng nơ ron cho các ứng dụng

Trong mục này sẽ thảo luận về các vấn đề liên quan đến việc thiết kế các mạng nơ ron cho các ứng dụng thực tế. Thông thường chỉ cần mạng hai tầng ẩn là đủ để biểu diễn một hàm mục tiêu bất kỳ. Do đó, khi thiết kế mạng nơ ron cho một ứng dụng cụ thể, chỉ cần sử dụng mạng với một hoặc hai tầng ẩn. Tuy nhiên, cũng có các trường hợp sử dụng nhiều hơn hai tầng ẩn là cần thiết. Cần hiểu rõ hơn về vai trò của các nơ ron trong tầng ẩn. Sau khi huấn luyện mạng bằng thuật toán truyền ngược để xác định một đặc trưng mới tiềm ẩn trong véc tơ đặc trưng đầu vào và liên quan nhiều nhất đến hàm mục tiêu cần học. Khả năng tự động phát hiện các đặc trưng mới tiềm ẩn trong dữ liệu đầu vào là một đặc điểm quan trọng của mạng nơ ron so với các mô hình khác. Càng nhiều tầng ẩn được sử dụng trong mạng, thì có nghĩa là càng đưa vào nhiều ánh xạ đặc trưng, mỗi tầng biểu thị một ánh xạ đặc trưng, từ các đặc trưng đầu vào nguyên thủy, tầng ẩn đầu tiên triết xuất ra các đặc trưng mới, rồi từ các đặc trưng mới này, tầng ẩn thứ hai lại triết xuất ra các đặc trưng mới, ... Cho nên khi vectơ đặc trưng đầu vào nguyên thủy phức tạp, gồm nhiều thành phần, mạng có thể có nhiều hơn hai tầng ẩn.

Khi thiết kế mạng nơ ron cho một ứng dụng thì số đầu vào và số đầu ra (số nơ ron ở tầng ra) là hoàn toàn xác định. Không có một phương pháp nào xác định được số nơ ron ẩn cần phải bằng bao nhiêu. Càng có nhiều đơn vị ẩn, mạng càng có khả năng biểu diễn các hàm phức tạp. Số nơ ron ẩn xác định số các trọng số trong mạng, mà số các trọng số có thể xem như số bậc tự do, do đó không nên có số các trọng số trong mạng nhiều hơn số các ví dụ huấn luyện. Người ta khuyên nên chọn số đơn vị ẩn sao cho số trọng số khoảng một phần

mười số ví dụ huấn luyện. Tuy nhiên, trong nhiều ứng dụng thành công, người ta sử dụng nhiều đơn vị ẩn, nhưng trong quá trình huấn luyện, để khắc phục hiện tượng quá khớp, người ta sử dụng các kỹ thuật đã trình bày trong mục 4.2.3, chẳng hạn sử dụng tập dữ liệu kiểm tra và dùng huấn luyện khi lỗi trên tập kiểm tra nhỏ, hoặc sử dụng kỹ thuật giảm trọng số.

Về thiết kế mạng nơron truyền thẳng, đa tầng cho các ứng dụng hồi quy và phân lớp. Đối với vấn đề hồi quy (dự đoán giá trị của hàm mục tiêu liên tục), nói chung cần sử dụng mạng một hoặc hai tầng ẩn (với hàm kích hoạt sigmoid hoặc hàm kích hoạt tanh) và tầng ra với hàm kích hoạt tuyến tính.

Thiết kế mạng cho phân lớp có nhiều sự lựa chọn hơn, chủ yếu liên quan đến lựa chọn hàm kích hoạt ở tầng ra và việc mã hóa các phân lớp. Giả sử cần phân các vector đặc trưng thành K lớp, khi đó cần thiết kế mạng có một hoặc hai tầng ẩn (với hàm kích hoạt sigmoid hoặc hàm kích hoạt tanh) và tầng ra có K nơron, *mỗi đầu ra của mạng biểu diễn một hàm phân biệt tương ứng với một lớp*. Các nơron ở tầng ra to có thể sử dụng hàm kích hoạt sigmoid hoặc hàm kích hoạt tanh. Cần lưu ý rằng hai hàm này có dạng điệu giống nhau, chỉ có miền giá trị của chúng là khác nhau, hàm sigmoid nhận giá trị trong khoảng $(0, 1)$, còn hàm tanh nhận giá trị trong khoảng $(-1, +1)$, tuy nhiên hàm tanh có ưu điểm là nó có giá trị trung bình 0 và phản đối xứng, tức là $\tanh(-s) = -\tanh(s)$, vì vậy với các dữ liệu đã chuẩn hóa thì sử dụng các hàm kích hoạt tanh sẽ dẫn tới huấn luyện nhanh hơn. Nếu ta chọn hàm kích hoạt cho các nơron ở tầng ra là hàm tanh và mã hóa nhãn lớp của lớp thứ k ($k = 1, \dots, K$) là vector K thành phần $T = (t_1, \dots, t_k)$, trong đó thành phần $t_k = 1$, còn tất cả các thành phần khác bằng -1 , thì bởi vì hàm tanh không bao giờ nhận giá trị $+1$ và -1 , do đó nếu muốn huấn luyện để các đầu ra o_k của mạng trùng với các giá trị mục tiêu t_k , thì điều đó sẽ ép buộc các trọng số phải tăng vô hạn. Để khắc phục, thay cho hàm tanh người ta sử dụng hàm kích hoạt các nơron ở tầng ra là hàm:

$$f(s) = a \tanh(b s) \quad (4.18)$$

trong đó $a = 1,716$ và $b = 2/3$ (hàm kích hoạt $f(s)$ sẽ có các tính chất như hàm tanh, nhưng nhận giá trị trong khoảng từ $-1,716$ đến $+1,716$ và nó gần như tuyến tính trong khoảng $-1 < s < +1$). Tóm lại, để phân thành K lớp ta có thể thiết kế mạng với tầng ra gồm K nơron với hàm kích hoạt là hàm (4.18) và nhãn lớp của lớp thứ k là vector K thành phần như đã nói ở trên.

Trong thực tế, để có một kiến trúc mạng tốt cho một ứng dụng, ta cần phải thử nghiệm, chẳng hạn sử dụng kỹ thuật kiểm tra chéo (cross-validation) để đánh giá các kiến thức, từ đó chọn ra một kiến trúc phù hợp với ứng dụng.

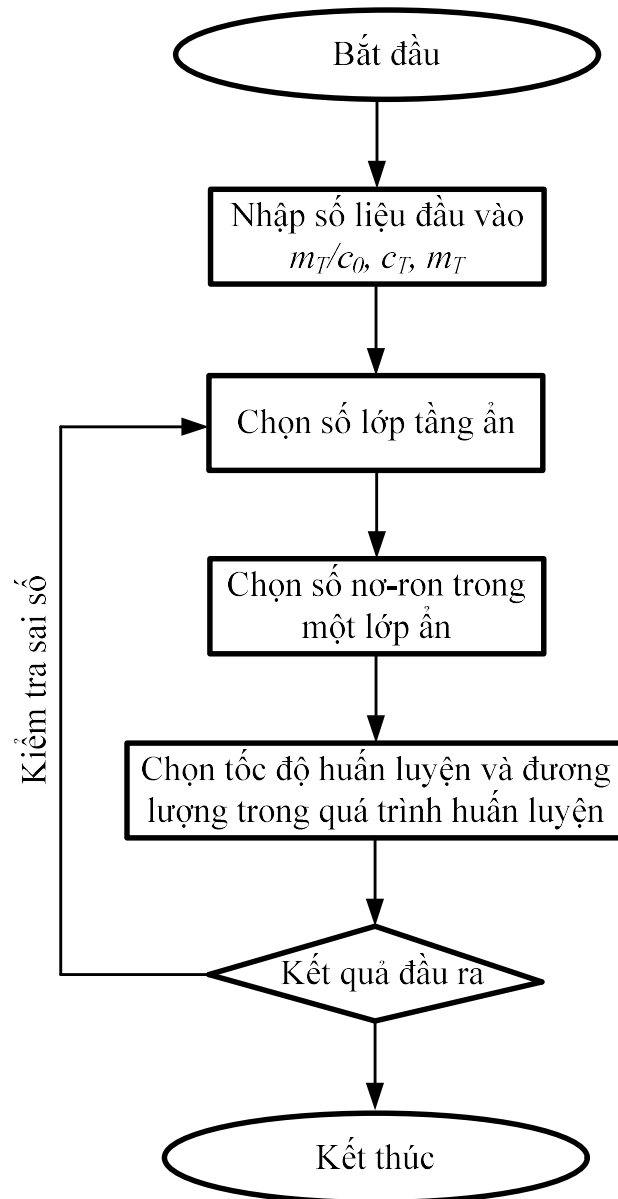
4.3. Áp dụng trí tuệ nhân tạo vào dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu

Trước tiên chọn bộ số liệu để huấn luyện mạng trí tuệ nhân tạo là bộ số liệu đầu vào của các TMD và các tần số cơ bản của kết cấu, đối với dầm có 3 TMD, mô hình mạng trí tuệ nhân tạo có 4 bộ số đầu vào gồm: m_{T2}/m_0 , m_{T1}/m_0 , c_T ($c_T = c_{T1} = c_{T2} = c_{T3}$), độ cứng k_T ($k_T = k_{T1} = k_{T2} = k_{T3}$) của TMD, và một bộ số liệu đầu ra là các tần số cơ bản (hình 4.10). Trong mô hình này, 27 số liệu được chọn ngẫu nhiên để đào tạo mạng trí tuệ nhân tạo (từ tổng 32 số liệu), 5 số liệu còn lại để làm số liệu kiểm tra. Tương tự như vậy, đối với hệ khung không gian gắn 1 TMD, mô hình mạng trí tuệ nhân tạo có 3 thông số đầu vào gồm: m_T/m_0 , c_T , k_T của TMD, và một bộ số liệu đầu ra là các tần số cơ bản. Có 22 số liệu được chọn ngẫu nhiên để đào tạo mạng trí tuệ nhân tạo (từ tổng 26 số liệu), 4 số liệu còn lại để kiểm tra (hình 4.11).

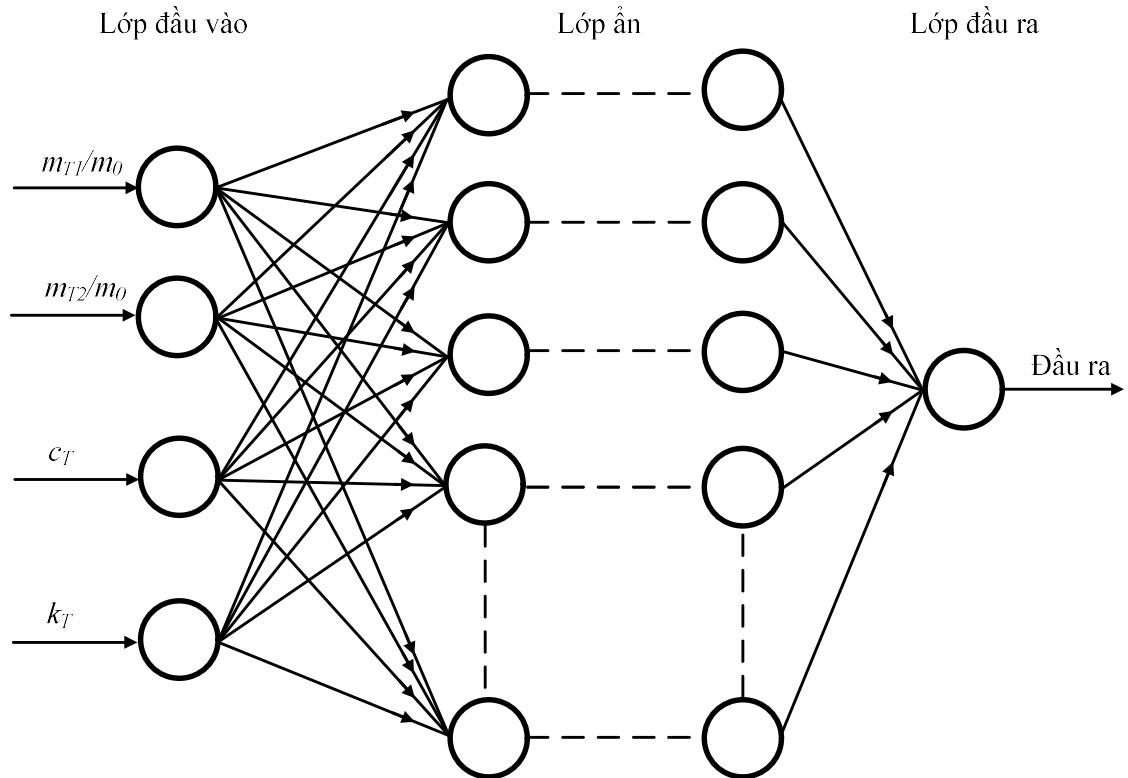
Trong nghiên cứu này, mô hình được đề xuất được thiết kế và tính toán trong môi trường MATLAB. Phương pháp định lượng không thể được sử dụng để đánh giá tốt nhất kết cấu mạng trí tuệ nhân tạo, vì vậy, phải tối ưu hóa độ tin cậy của mô hình trí tuệ nhân tạo (AI).

Một file số liệu đầu vào và đầu ra chứa cả các số liệu để đào tạo trong giai đoạn đào tạo. Một đến ba lớp số ẩn được chọn để phát hiện số lớp cần thiết để mô hình hóa quy trình. Trong mỗi một lớp ẩn, số lượng nút (nơ-ron) được

thay đổi trong phạm vi từ 4 đến 80 nơ-ron. Để kiểm soát cường độ của các cập nhật trọng số và sai lệch, tham số tốc độ huấn luyện được đặt trong quá trình mô phỏng. Do đó, thời gian huấn luyện của mạng trí tuệ nhân tạo phụ thuộc lớn vào việc lựa chọn giá trị này. Trong môi trường MATLAB, các trọng số được tự động điều chỉnh sau mỗi trường hợp dữ liệu huấn luyện. Ngoài ra, một tham số (giá trị động lượng) được sử dụng để làm giảm khả năng mô phỏng, có thể bị mắc kẹt trong tối ưu cục bộ.



Hình 4.9. Sơ đồ khối chương trình áp dụng AI



Hình 4.10. Mô hình mạng trí tuệ nhân tạo với 4 tham số đầu vào và một tham số đầu ra

Hơn nữa, tốc độ học tập thường được thiết lập trong khoảng từ 0,0001 đến 6,0 và phụ thuộc vào mô phỏng trong quá trình đào tạo và động lượng trong mô hình mạng trí tuệ nhân tạo được giữ lại với giá trị trung bình là 0,8. Để giảm thiểu lỗi đào tạo và tránh đào tạo quá mức, quá trình đào tạo cần phải được giám sát. Sau khi thử nghiệm một loạt các biến thể của lớp ẩn, thấy rằng một lớp ẩn bao gồm sáu nút đạt được dự đoán chính xác nhất về tần số.

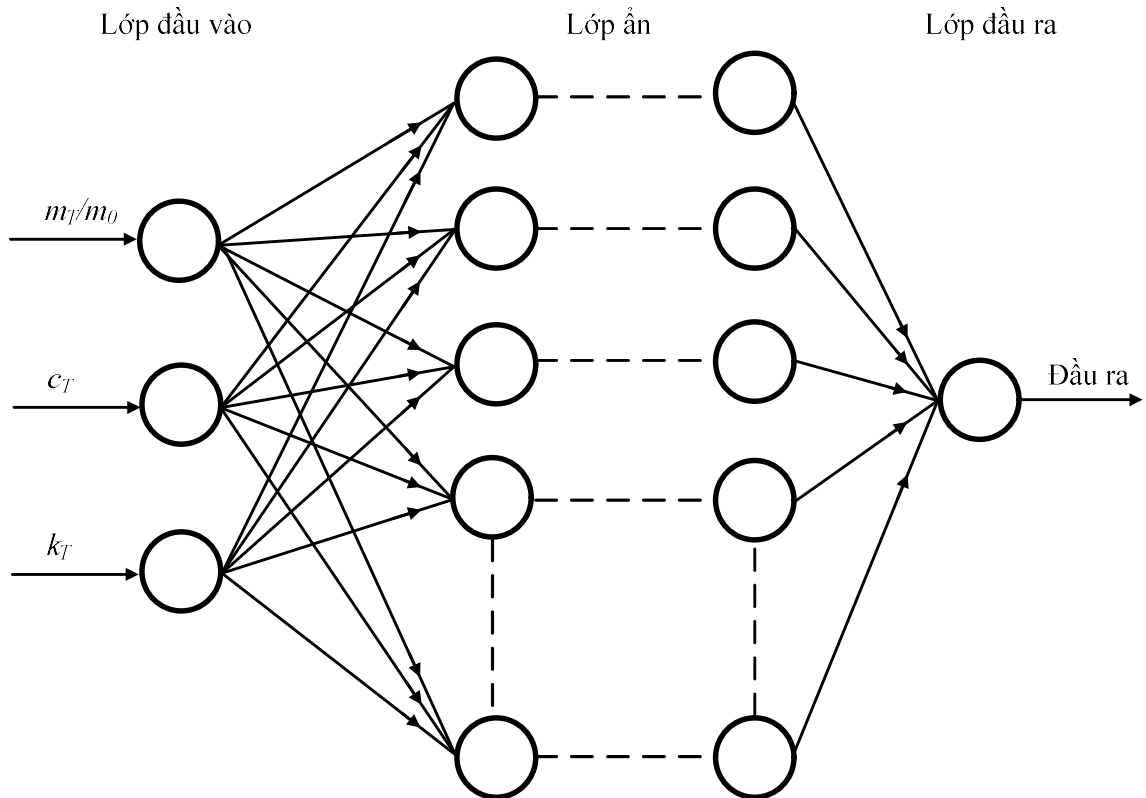
Các giá trị được tính toán và dự đoán của các tần số được liệt kê trong bảng 4.1 và bảng 4.2. Các giá trị in đậm là các giá trị được dự đoán chính xác. Các sai số trung bình được trình bày trong hàng áp chót của bảng 4.1 và bảng 4.2, trong đó sai lệch phần trăm (e_i) được xác định theo công thức sau:

$$e_i(\%) = \left(\frac{\text{Giá trị dự đoán} - \text{Giá trị tính toán}}{\text{Giá trị tính toán}} \right) \cdot 100 \quad (4.19)$$

Giá trị phần trăm trung bình lớn nhất được trình bày trong hàng cuối của bảng 4.1 và bảng 4.2, E_∞ thể hiện giá trị dự đoán sai lệch lớn nhất của mô

hình. Trong trường hợp này, cần các giá trị nhỏ nhất E_{∞} để nhận được giá trị dự đoán tốt nhất. Ở đây, E_{∞} có thể định nghĩa như sau:

$$E_{\infty} = \max_{i=1}^n (e_i) \quad (4.20)$$



Hình 4.11. Mô hình mạng trí tuệ nhân tạo với 3 tham số đầu vào và một tham số đầu ra

Từ bảng 4.1 và bảng 4.2, sai số lớn nhất (E_{∞}) là rất nhỏ; $E_{\infty} = 0,6499\%$ cho dầm, $E_{\infty} = 0,992\%$ cho hệ khung không gian.

Các kết quả tính toán này chứng minh rằng mô hình trí tuệ nhân tạo có thể dự đoán chính xác tần số cơ bản của các cơ hệ. Trong các bảng 4.1 và 4.2, cột “Mục tiêu” thể hiện thông số tần số cần xác định đối với kết cấu, nhưng thông số này đã biết trước bằng tính toán hoặc bằng đo đạc thực nghiệm, đây là số liệu đưa vào để kiểm chứng số liệu dự đoán bằng thuật toán AI; Cột “Dự đoán” thể hiện thông số dự đoán tần số bằng thuật toán AI.

**Bảng 4.1. Các thông số đầu vào và đầu ra
của mô hình mạng trí tuệ nhân tạo cho dầm có gắn 3 TMD**

Số TT	m_{T2}/m_0 (%)	m_{T1}/m_0 (%)	c_T (N.s/m)	k_T (N/m)	Mục tiêu f_1 (Hz)	Dự đoán f_1 (Hz)	Mục tiêu f_4 (Hz)	Dự đoán f_4 (Hz)
1	1	4.0	100	2000	0,447	0,447	1,185	1.1845
2	1	3.0	100	2000	0,516	0,516	1,186	1.186
3	1	2.0	100	2000	0,631	0,631	1,187	1.187
4	1	1.0	100	2000	0,876	0,876	1,193	1.193
5	2	4.0	100	2000	0,447	0,447	1,179	1.1776
6	2	3.0	100	2000	0,512	0,512	1,179	1.179
7	2	2.0	100	2000	0,626	0,6254	1,180	1.180
8	2	1.0	100	2000	0,631	0,631	1,187	1.187
9	3	3	100	2000	0,512	0,5118	1.178	1.1777
10	3	2	100	2000	0,516	0,516	1.179	1.179
11	3	1	100	2000	0,516	0,5159	1.186	1.186
12	4	3	100	2000	0,447	0,447	1.178	1.177
13	4	2	100	2000	0,447	0,4456	1.179	1.179
14	4	1	100	2000	0,447	0,447	1.185	1.185
15	5	2	100	2000	0,400	0,4026	1.178	1.177
16	5	1	100	2000	0,400	0,3979	1.185	1.185
17	3	3	10	2000	0,512	0,512	1,178	1.1777
18	3	3	20	2000	0,512	0,512	1,178	1.1777
19	3	3	100	2000	0,512	0,5118	1,178	1.1777
20	3	3	150	2000	0,512	0,5116	1,178	1.1777
21	3	3	300	2000	0,512	0,512	1,178	1.1776
22	3	3	500	2000	0,512	0,5117	1,178	1.1774
23	3	3	700	2000	0,512	0,5089	1,178	1.1774
24	3	3	800	2000	0,512	0,512	1,178	1.1774
25	3	3	1000	2000	0,512	0,512	1,178	1.1772
$E_{\text{Trung bình}} (\%)$						0.0240		0.0147
$E_{\infty} (\%)$						0.6499		0.1196

**Bảng 4.2. Các tham số đầu vào và đầu ra của mô hình
mạng trí tuệ nhân tạo cho hệ khung không gian có gắn 1 TMD**

Số TT	m_T/m_0 (%)	c_T (N.s/m)	k_T (N/m)	Mục tiêu f_1 (Hz)	Dự đoán f_1 (Hz)	Mục tiêu f_2 (Hz)	Dự đoán f_2 (Hz)
1	1	1000	10000	0,475	0,4748	0,704	0,704
2	2	1000	10000	0,336	0,3368	0,704	0,704
3	3	1000	10000	0,274	0,2724	0,704	0,704
4	4	1000	10000	0,237	0,2376	0,704	0,704
5	5	1000	10000	0,212	0,2136	0,704	0,704
6	6	1000	10000	0,194	0,1947	0,704	0,704
7	7	1000	10000	0,179	0,1793	0,704	0,704
8	8	1000	10000	0,168	0,1670	0,704	0,704
9	9	1000	10000	0,158	0,1575	0,704	0,704
10	10	1000	10000	0,150	0,1503	0,704	0,704
11	10	1000	5000	0,106	0,1059	0,704	0,704
12	10	1000	7000	0,126	0,126	0,704	0,704
13	10	1000	8000	0,134	0,1348	0,704	0,704
14	10	1000	10000	0,150	0,1503	0,704	0,704
15	10	1000	12000	0,164	0,1640	0,704	0,704
16	10	1000	15000	0,184	0,1829	0,704	0,704
17	10	1000	18000	0,201	0,2016	0,704	0,704
18	10	1000	20000	0,212	0,2141	0,704	0,704
19	10	1000	25000	0,237	0,2369	0,704	0,704
20	10	100	10000	0,150	0,1500	0,704	0,704
21	10	500	10000	0,150	0,1500	0,704	0,704
22	10	800	10000	0,150	0,1502	0,704	0,704
23	10	1000	10000	0,150	0,1503	0,704	0,704
24	10	1400	10000	0,150	0,1503	0,704	0,704
25	10	1600	10000	0,150	0,1502	0,704	0,704
26	10	1800	10000	0,150	0,150	0,704	0,704
27	10	2000	10000	0,150	0,1497	0,704	0,704
28	10	2500	10000	0,150	0,1501	0,704	0,704
$E_{\text{Trung bình}}$ (%)					0,0857		0
E_{∞} (%)					0,992		0

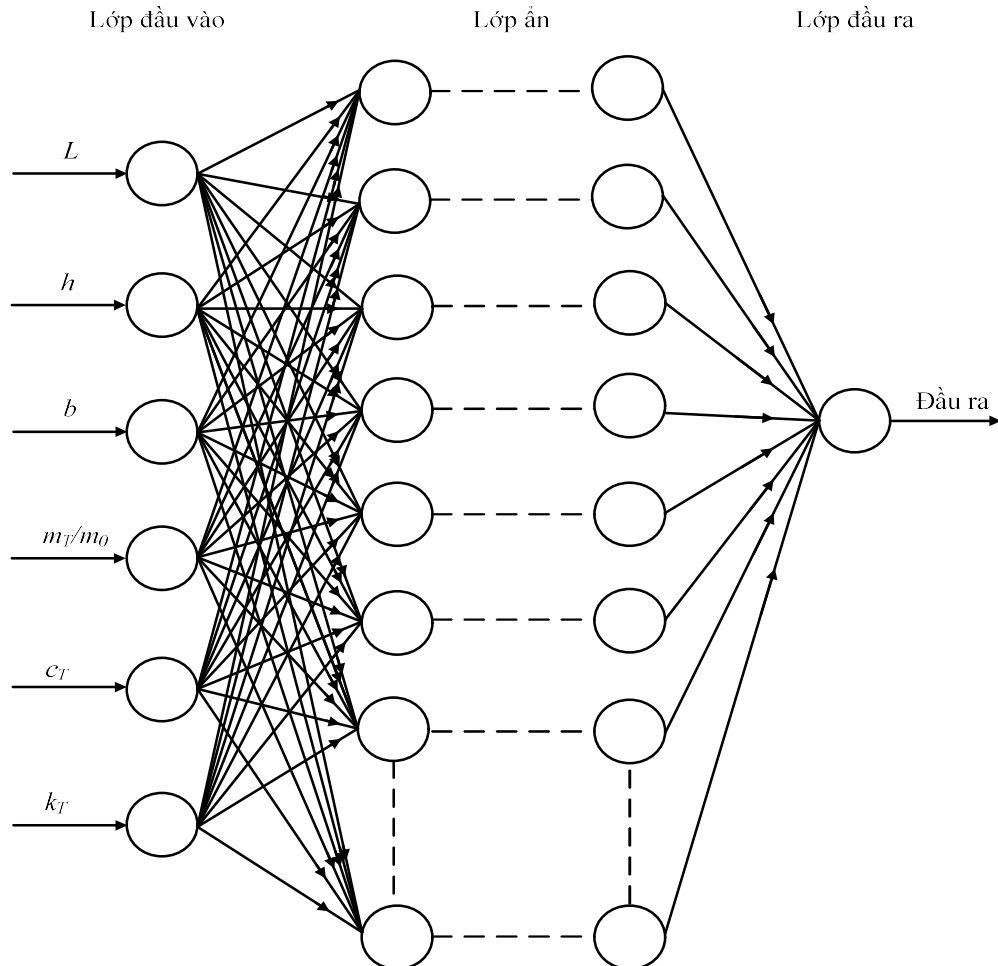
Việc dự đoán tần số tương đối chính xác đối với kết cấu là một điểm nổi bật của nghiên cứu này, là nền tảng để dự đoán các ứng xử cơ học cho rất nhiều bài toán cơ học phức tạp khác. Các cơ hệ phức tạp yêu cầu một lượng lớn để tính toán và việc sử dụng mô hình AI có thể dẫn đến kết quả chính xác. Do vậy, không cần tiến hành tính toán cho kết cấu ngay từ đầu nên sẽ làm tăng hiệu quả tính toán và mô phỏng. Nói cách khác, có thể áp dụng AI được đề xuất cho các mô hình khác mà chỉ cần các tham số đầu vào, mục tiêu đạt được, số lượng các số liệu đào tạo và kiểm tra. Bằng cách chọn xấp xỉ các số nút mạng neuron trong lớp ẩn và động lượng, hoàn toàn có thể tiên đoán kết quả đầu ra với độ chính xác có thể chấp nhận được so với mục tiêu ban đầu đặt ra. Ví dụ, xem xét một kết cấu có vết nứt, trong đó mỗi bộ số liệu của kết cấu như là chiều dài, góc lệch của vết nứt, vị trí vết nứt và quy luật thay đổi của tải trọng phân bố là các số liệu đầu vào. Các thông số đầu ra là sự phát triển của vết nứt. Đó chính là mục tiêu dự đoán khi áp dụng AI vào mô hình như vậy. Như vậy, bằng cách sử dụng mô hình AI, chúng ta hoàn toàn có thể huấn luyện các tình huống của số liệu đầu vào để dự đoán sự phát triển của vết nứt. Do đó, đây là một phương pháp có ý nghĩa trong khoa học; khi đó, chúng ta không cần chạy lặp lại bài toán tính toán về nứt mà tốn rất nhiều thời gian và tài nguyên số để tính toán, phân tích. Mô hình AI có thể đưa ra số liệu đầu ra (mục tiêu đạt được) ngay lập tức nên các kỹ sư có thể xử lý các vấn đề xảy ra nhanh nhất có thể.

4.4. Áp dụng trí tuệ nhân tạo vào dự đoán thông số tối ưu của TMD

Tiếp theo, luận án sẽ tiến hành sử dụng mô hình AI đã đề xuất để dự đoán thông số tối ưu của TMD.

Xét dầm có chiều dài L , chiều cao mặt cắt ngang của dầm h , bề rộng mặt cắt ngang dầm là b , dầm liên kết tựa đơn hai đầu, khối lượng của toàn bộ dầm là m_0 , dầm chịu tải trọng kích động ngẫu nhiên ồn trắng phân bố đều. Dầm có 1 TMD lắp tại chính giữa dầm với khối lượng m_T , độ cứng lò xo k_T và cản nhớt c_T . Mô hình AI đề xuất với 6 thông số đầu vào là $L, h, b, k_T, m_T/m_0, c_T$, thông số đầu ra được lựa chọn là c_T tối ưu để tỷ số J_{wc}/J_{wc0} đạt giá trị nhỏ nhất, tức là

tham số tối ưu để giảm dao động cho dầm là tốt nhất. Để giải quyết bài toán đặt ra, số tầng ẩn được lựa chọn là 7, mô hình được thể hiện như trên hình 4.12.



Hình 4.12. Mô hình mạng trí tuệ nhân tạo với 6 tham số đầu vào và 1 tham số đầu ra

Sau khi sử dụng mô hình AI để dự đoán thông số tối ưu c_T , kết quả dự đoán này được liệt kê như cột cuối cùng trong bảng 4.3. Từ đây thấy rằng giá trị dự đoán này rất sát với giá trị tính toán trực tiếp, sai số lớn nhất chỉ có 0,85%, và sai số trung bình 0,077%.

Bảng 4.3. Giá trị đầu vào và giá trị dự đoán thông số tối ưu của TMD đối với dầm chịu tải trọng ngẫu nhiên

STT	L (m)	h (m)	b (m)	k_T (N/m)	m_T/m_0	Mục tiêu c_T (N.s/m)	Dự đoán c_T (N.s/m)
1	57	0.45	0.45	14640	0.05	2075	2075
2	57	0.45	0.45	15760	0.06	3160	3160

STT	L (m)	h (m)	b (m)	k _T (N/m)	m _T /m ₀	Mục tiêu c _T (N.s/m)	Dự đoán c _T (N.s/m)
3	58	0.45	0.5	15520	0.055	3055	3055
4	59	0.5	0.5	14480	0.04	3020	3020
5	50	0.4	0.4	13440	0.045	1060	1060
6	50	0.4	0.4	13680	0.048	1375	1375
7	50	0.4	0.4	13840	0.05	1585	1585
8	50	0.4	0.4	14080	0.052	1795	1795
9	50	0.4	0.4	14560	0.058	2390	2401.3
10	50	0.4	0.4	14800	0.06	2565	2587
11	50	0.4	0.4	15280	0.065	3055	3055
12	60	0.5	0.5	14400	0.04	2670	2670
13	60	0.5	0.55	14720	0.04	3405	3405
14	60	0.5	0.55	13360	0.03	1515	1515
15	60	0.55	0.55	12560	0.02	990	990
16	40	0.35	0.35	12720	0.04	1235	1235
17	40	0.35	0.35	13360	0.05	2495	2500
18	40	0.35	0.35	13760	0.055	3090	3090
19	40	0.4	0.35	12400	0.03	2180	2180
20	40	0.4	0.4	12640	0.03	3160	3160
E _{Trung bình} (%)							0,077
E _∞ (%)							0,85

4.5. Kết luận chương 4

Chương 4 đã tiến hành tính toán một số vấn đề chính như sau:

- Các kiến thức cơ bản về mạng nơ ron nhân tạo, các kỹ thuật huấn luyện mạng nơ ron và cách thiết kế mạng nơ ron nhân tạo cho các ứng dụng cụ thể.

- Sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo để dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu hệ dầm, khung không gian và dự đoán thông số tối ưu của TMD.

Mô hình trí tuệ nhân tạo theo luận áp dụng có thể dùng để dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu và dự đoán thông số tối ưu của TMD, đây là thông số đầu vào quan trọng đối với nhiều bài toán động lực học kết cấu công trình, nhất là các vấn đề chuẩn đoán hư hỏng kết cấu, cũng như các bài toán liên quan đến hiện tượng cộng hưởng dao động, gây phá hủy kết cấu công trình.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Qua nghiên cứu nội dung trong luận án, tác giả đã đưa ra một số kết luận và kiến nghị.

1. Những kết luận chính:

1. Xây dựng được mô hình thuật toán và chương trình tính toán đáp ứng động lực học của hệ dầm, khung không gian theo thuật toán đã thiết lập. Kết quả đảm bảo độ chính xác cần thiết.

2. Khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng của các tham số TMD đến đáp ứng dao động riêng và dao động cưỡng bức của kết cấu dầm, khung không gian chịu tải trọng ngẫu nhiên như sau:

+ Khi lắp thêm TBTTNL TMD vào kết cấu, làm thay đổi tần số dao động riêng cũng như làm giảm đáng kể dao động cho kết cấu chính.

+ Đối với dầm, khi lắp TMD vào vị trí chính giữa của dầm sẽ có tác dụng giảm dao động nhiều hơn so với các vị trí khác.

3. Xây dựng được mô hình trí tuệ nhân tạo dùng để dự đoán tần số dao động riêng của kết cấu hệ dầm, khung không gian và dự đoán thông số tối ưu của TMD, đây là thông số đầu vào quan trọng đối với nhiều bài toán động lực học kết cấu công trình, nhất là các vấn đề chuẩn đoán tình trạng kết cấu, cũng như các bài toán liên quan đến hiện tượng cộng hưởng dao động, gây phá hủy kết cấu công trình.

3. Những đóng góp mới của luận án:

1. Sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn xây dựng thuật toán và chương trình tính các đặc trưng động lực học hệ dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng TMD chịu tải trọng ngẫu nhiên, chương trình tính đã được kiểm chứng và khẳng định độ tin cậy.

2. Nghiên cứu ảnh hưởng của TMD (vị trí, số lượng, đặc tính TMD) đến các đặc trưng động lực học hệ dầm, khung không gian. Từ đó rút ra một số nhận xét có ý nghĩa.

3. Sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo chuẩn đoán tần số riêng của hệ dầm,

khung không gian và dự đoán các thông số tối ưu của TMD.

Kết quả tính toán là tài liệu tham khảo có giá trị trong việc thiết kế và ứng dụng các kết cấu có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên trong thực tế.

4. Nhận xét và kiến nghị:

Qua tính toán với các bộ số liệu cụ thể, các nhận xét rút ra trong luận án, tác giả đưa ra một số nhận xét, kiến nghị như sau

1. Vấn đề tính toán đáp ứng của dầm, khung không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên là vấn đề mới và phức tạp, tuy nhiên luận án mới chỉ dừng lại ở tính toán lý thuyết. Để kiểm chứng lại lý thuyết tính toán này, cần phải có thực nghiệm kiểm chứng mới có thể áp dụng hiệu quả trong thực tế.

2. Mô hình trí tuệ nhân tạo mới chỉ được áp dụng vào bài toán dao động riêng của kết cấu và dự đoán thông số tối ưu của TMD, tuy nhiên có thể hoàn toàn sử dụng mô hình này vào giải quyết những vấn đề phức tạp hơn trong cơ học, đây là tiền đề quan trọng để các nhà cơ học tiếp cận dần với nền CN 4.0.

5. Hướng phát triển tiếp theo của luận án:

- Nghiên cứu kết cấu dầm cong, khung không gian phức tạp hơn có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng TMD chịu các loại tải trọng khác nhau như tải trọng khí động, tải trọng di động, tải trọng ngẫu nhiên,...

- Tính toán kết cấu dầm, khung, tấm vỏ có vết nứt chịu TTNN.

- Tính toán sự phát triển vết nứt trong kết cấu công trình dưới tác dụng của tải trọng nổ.

- Sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo vào chuẩn đoán vết nứt của kết cấu công trình.

NHỮNG CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Nguyen Chi Tho**, Nguyen Tri Ta and Do Van Thom (2019), *New numerical results for simulating of beams and space frame systems with tuned mass damper*, Materials 2019, Volume 12, Issue 8, 1329 (*bài báo thuộc danh mục ISI, IF = 3,057*).
2. **Nguyễn Chí Thọ**, Nguyễn Trí Tá và Nguyễn Xuân Bằng (2019), *Tính toán dao động của hệ giàn không gian có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên*, Tạp chí Xây dựng, số tháng 06/2019, tr.14-19.
3. **Nguyễn Chí Thọ**, Nguyễn Trí Tá và Vũ Văn Hoàng (2019), *Phân tích dao động của dầm có lắp thiết bị tiêu tán năng lượng chịu tải trọng ngẫu nhiên*, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, chuyên san Kỹ thuật công trình đặc biệt số 02, tháng 06/2019, tr.30-39.
4. **Nguyễn Chí Thọ** (2020), *Free vibration analysis of a multi-storey space frame system*, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, chuyên san Kỹ thuật công trình đặc biệt số 04, tháng 06/2020, tr.36-48.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Nguyễn Đông Anh (2015), *Nghiên cứu thiết kế, chế tạo thiết bị tiêu tán năng lượng chống dao động có hại phục vụ các công trình kỹ thuật*, Đề tài cấp nhà nước, mã số KC 05.30.
2. Nguyễn Đông Anh, Đỗ Anh Cường (2004), *Mô phỏng chống dao động cho kết cấu hệ thanh và ứng dụng trong công trình biển*, Tuyển tập các công trình HNKH toàn quốc Cơ học vật rắn biến dạng lần thứ VII, Đồ Sơn - Hải Phòng.
3. Nguyễn Đông Anh, Trần Chung, Lã Đức Việt (2003), *Nâng cao chất lượng và tuổi thọ công trình bằng các bộ hấp thụ dao động*, Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ hai về Sự cố và hư hỏng công trình xây dựng.
4. Nguyễn Đông Anh, Lã Đức Việt (2005), *Giảm dao động bằng thiết bị tiêu tán năng lượng*, Tuyển tập các công trình HNKH toàn quốc về sự cố công trình.
5. Nguyễn Đông Anh, Lã Đức Việt (2007), *Giảm dao động bằng thiết bị tiêu tán năng lượng*, NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ.
6. Nguyễn Đông Anh, Lã Đức Việt, Đỗ Anh Cường (2005), *Phần mềm mô phỏng chống dao động cho các dạng kết cấu có gắn thiết bị tiêu tán năng lượng*, Tuyển tập các công trình Hội nghị khoa học toàn quốc về sự cố công trình.
7. Nguyễn Đông Anh, Lã Đức Việt, Đỗ Anh Cường, Vũ Mạnh Lăng, Phạm Xuân Khang, Nguyễn Ngọc Long (2005), *Phân tích kết cấu có lắp các TBTTNL*, Hội nghị khoa học toàn quốc về sự cố và hư hỏng công trình xây dựng, Hà Nội.
8. Nguyễn Đông Anh, Ngô Hồng Huệ, Đặng Ngọc Anh, Vũ Đức Thanh (2002), *Ứng dụng điều khiển thụ động trong việc làm giảm dao động của toa xe*, Tuyển tập công trình Hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ 7.
9. Nguyễn Đông Anh, Phạm Minh Vương (2006), *Tính toán bộ hấp thụ dao động cho mô hình dầm*, Tuyển tập các công trình hội nghị Khoa học toàn quốc cơ học vật rắn biến dạng lần thứ VIII, Thái Nguyên.
10. Nguyễn Đông Anh, Kiều Thế Đức, Nguyễn Chỉ Sáng (2001), *Một phương pháp lựa chọn các thông số của bộ giảm chấn cho hệ nhiều bậc tự do chịu kích động ồn màu*, TC KH&KT, v.4, N97, tr. 58-66.
11. Nguyễn Đông Anh, Nguyễn Mạnh Hùng, Nguyễn Văn Tách, Phạm Tiến Đạt, Mai Quang Huy, Mai Quốc Vương (2005), *Thí nghiệm giảm dao động cho mô hình DKI bằng TBTTNL*, HNKH về công trình biển - DKI lần thứ II, Hà nội.
12. Nguyễn Đông Anh, Không Doãn Điền, Nguyễn Duy Chính (2004), *Nghiên cứu bộ hấp thụ dao động đối với hệ con lắc ngược*, Tạp chí KHKT Thủy Lợi và Môi trường, số 7, tr. 61-69

13. Nguyễn Đông Anh, Không Doãn Điền, Nguyễn Duy Chinh (2005), *Nghiên cứu ổn định vị trí cân bằng của con lắc ngược*, Tạp chí KHKT Thủy Lợi và Môi trường, số 8, tr. 19-23.
14. Lê Hoàng Anh (2016), *Phân tích động lực học kết cấu công trình biển hệ thanh cố định trên nền san hô chịu tác dụng của tải trọng sóng biển và gió theo mô hình bài toán không gian*, Luận án TSKT, Học viện KTQS, Hà Nội.
15. Nguyễn Quốc Bảo, Trần Nhất Dũng (2012), *Phương pháp phần tử hữu hạn (Lý thuyết và lập trình)*, tập 1 và tập 2, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
16. Nguyễn Thanh Bình, Nguyễn Tương Lai, Vũ Ngọc Quang, Lê Anh Tuấn (2009), *Giáo trình tính toán kết cấu bằng phương pháp phần tử hữu hạn*, Học viện Kỹ thuật quân sự.
17. Phạm Đình Ba, Nguyễn Thanh Bình (1995), *Động lực học công trình*, Học viện Kỹ thuật quân sự.
18. Nguyễn Văn Chinh (2013), *Phân tích động lực học công trình biển cố định trên nền san hô chịu tác dụng của tải trọng sóng và gió*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự.
19. Nguyễn Thái Chung, Lê Hoàng Anh (2015), *Tính toán động lực học công trình biển cố định hệ thanh không gian chịu tác dụng của tải trọng sóng và gió với mô hình lý thuyết sóng Stoke bậc 2*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển, Tập 15, Số 2, tr. 200-208.
20. Nguyễn Thái Chung, Lê Hoàng Anh, Đào Như Mai (2013), *Phân tích, đánh giá hiệu quả của một số giải pháp kết cấu đối với công trình biển DKI chịu tác dụng của tải trọng sóng và gió theo mô hình bài toán không gian*, Tuyển tập HNKH toàn quốc Cơ học vật rắn biến dạng lần thứ XI năm 2013, tr. 153-162
21. Nguyễn Thái Chung, Lê Hoàng Anh, Nguyễn Thanh Hưng (2015), *Nghiên cứu giảm giao động của công trình DKI chịu tác dụng của tải trọng sóng sử dụng mô hình tương tác đầy đủ hệ thanh không gian - nền san hô và thiết bị tiêu tán năng lượng TMD*, Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc năm 2015, Tập 1, tr. 185-192.
22. Nguyễn Thái Chung, Trần Văn Bình, Lê Xuân Thùy, Lê Hoàng Anh (2014), *Nghiên cứu thực nghiệm xác định phản ứng động của hệ liên hợp giàn thép không gian - bể chứa trên nền san hô tại đảo Song Tử Tây*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển, Tập 14, Số 4, tr. 398-405.
23. Nguyễn Thái Chung, Hoàng Xuân Lượm, Nguyễn Văn Chinh, Lê Hoàng Anh (2013), *Phân tích động lực học công trình biển cố định hệ thanh trên nền san hô chịu tác dụng của tải trọng sóng và gió*, Tuyển tập Hội nghị khoa học toàn quốc Cơ học vật rắn biến dạng lần thứ XI năm 2013, tr.163-173.

24. Đỗ Anh Cường (1995), *Tương tác cơ học giữa kết cấu hệ thanh không gian với sóng biển*, Học viện Kỹ thuật quân sự, Luận án PTS KHKT.
25. Đỗ Anh Cường (2009), *Dao động ngẫu nhiên*, NXB Quân đội nhân dân.
26. Đỗ Anh Cường và cs (2006), *Lựa chọn tham số tối ưu của bộ hấp thụ dao động TMD*, Tuyển tập HN Cơ học VRBD lần thứ 8, NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ, tr. 183-192.
27. Nguyễn Duy Chinh (2010), *Nghiên cứu giảm dao động cho công trình theo mô hình con lắc ngược chịu tác dụng của ngoại lực*, Viện Cơ học, LATs.
28. Nguyễn Duy Chinh (2016), *Tham số tối ưu của bộ hấp thụ dao động TMD-D cho con lắc ngược theo phương pháp cực tiểu hóa năng lượng*, Tạp chí KHCN Xây dựng, số 4/2016.
29. Khổng Doãn Điền, Nguyễn Duy Chinh (2005), *Nghiên cứu bộ hấp thụ dao động đối với hệ con lắc ngược*, Luận văn thạc sĩ Cơ học, Viện Cơ học Việt Nam, Hà Nội.
30. Đỗ Văn Đệ (1994), *Nghiên cứu động lực học tương tác giữa sóng nhiều xạ với công trình biển trọng lực*, Đại học Xây dựng Hà Nội, Luận án PTS KHKT.
31. Đỗ Văn Đệ và các tác giả (2005), *Phần mềm Sap 2000 ứng dụng vào tính toán công trình*, NXB Xây dựng.
32. Kiều Thế Đức (1992), *Dao động ngẫu nhiên phi tuyến của hệ nhiều bậc tự do và một số ứng dụng*, Viện Cơ học/Viện KH Việt Nam, Luận án PTS KHKT.
33. Ngô Minh Đức (2015), *Hướng dẫn sử dụng Etabs*, NXB Xây dựng.
34. Ninh Quang Hải (2000), *Phân tích dao động phi tuyến ngẫu nhiên bằng một số phương pháp gần đúng của cơ học phi tuyến*, Viện Cơ học, Luận án tiến sĩ.
35. Dương Ngọc Hào (2014), *Phân tích dao động phi tuyến trong hệ chịu kích động ngẫu nhiên và tuần hoàn*, Viện Cơ học, Luận án tiến sĩ kỹ thuật.
36. Nguyễn Quốc Hòa (1996), *Nghiên cứu tương tác động lực học giữa sóng biển và công trình biển nổi*, Đại học Xây dựng, Luận án TSKT.
37. Nguyễn Văn Hợi, Lê Anh Tuấn (2001), *Giải bài toán dao động ngẫu nhiên phi tuyến đối với hệ một bậc tự do bằng phương pháp mô phỏng*, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, số 94, tr. 61-68.
38. Nguyễn Văn Hợi, Lê Anh Tuấn (2002), *Giải bài toán dao động ngẫu nhiên phi tuyến của công trình biển dạng cột bằng phương pháp mô phỏng số*, Tạp chí Xây dựng, số 11, tr. 19-21.
39. Phạm Khắc Hùng (1977), *Xác định độ tin cậy của công trình dạng hệ thanh trục giao chịu tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên*, Đại học Xây dựng, Luận án PTS KHKT.
40. Lưu Xuân Hùng (2000), *Nghiên cứu ảnh hưởng của kích động ngẫu nhiên lên*

- hệ cơ học bằng phương pháp tuyến tính hóa tương đương*, Viện Cơ học, LATs.
41. Phạm Văn Hội, Nguyễn Quang Viên, và các tác giả khác (2006), *Kết cấu thép công trình dân dụng và công nghiệp*, NXB Khoa học và kỹ thuật.
 42. J. Wittenburg (2000), *Động lực học hệ vật rắn*, Nhà xuất bản Xây dựng.
 43. Nguyễn Văn Khang (1998), *Dao động trong kỹ thuật*, NXB Khoa học kỹ thuật.
 44. Ngô Vi Long (2003), *Chống dao động cho công trình bằng kỹ thuật điều khiển chủ động*, Hội nghị KH toàn quốc lần thứ 2 về Sự cố và hư hỏng công trình.
 45. Hoàng Xuân Lượng (chủ biên), Trần Minh (2003), *Sức bền vật liệu*, Học viện Kỹ thuật quân sự.
 46. Mai Lựu (2018), *Tối ưu hệ TMD để giảm dao động trong cầu đường cao tốc*, Tạp chí Khoa học công nghệ GTVT, số 26-02/2018, tr. 40-44.
 47. Muller P. C, Schiehlen W. O (1997), *Dao động tuyến tính*, Người dịch Nguyễn Đông Anh, NXB Xây dựng.
 48. Nguyễn Bá Nghị (2006), *Tính toán hệ TMD cho cơ hệ một bậc tự do nhằm giảm thành phần dao động tần số riêng*, Luận văn thạc sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội.
 49. Phùng Thị Nguyệt (2005), *Tính toán kết cấu với Sap 2000*, NXB Giao thông.
 50. Nguyễn Chỉ Sáng (2002), *Phương pháp tính toán bộ hấp thụ dao động cho hệ nhiều bậc tự do chịu kích động ngẫu nhiên*, Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 7, Hà Nội.
 51. Nguyễn Chỉ Sáng (2004), *Nghiên cứu thiết kế bộ hấp thụ dao động cho hệ nhiều bậc tự do*, Luận án TS cơ học, Viện Cơ học.
 52. Nguyễn Hoài Sơn, Đỗ Thanh Việt, Bùi Xuân Lâm (2000), *Ứng dụng MATLAB trong tính toán kỹ thuật*, Nhà xuất bản Đại học QG thành phố Hồ Chí Minh.
 53. Đỗ Thị Ngọc Tam (2017), *Áp dụng thuật toán Hybrid thiết kế TMD chống động đất*, Tạp chí Khoa học Đại học Thủ Dầu Một, số 1 (32) - 2017, tr. 87 - 91
 54. Chu Quốc Thắng (1997), *Phương pháp phần tử hữu hạn*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
 55. Nguyễn Hoa Thịnh, Nguyễn Đông Anh, Phạm Ngọc Nam, Hoàng Xuân Lượng, Đỗ Sơn, Nguyễn Xuân Kiều (2005), *Nghiên cứu xây dựng công nghệ giảm dao động cho công trình DKI bằng hệ tiêu tán năng lượng dạng con lắc - lò xo*, Hội nghị CTB - DKI.
 56. Nguyễn Hoa Thịnh, Nguyễn Đông Anh, Phạm Ngọc Nam, Hoàng Xuân Lượng (2004), *Nghiên cứu áp dụng công nghệ điều khiển kết cấu để giảm dao động cho các công trình DKI*, Tuyển tập các công trình Hội nghị khoa học toàn quốc Cơ học Vật rắn biến dạng lần thứ VII, Đồ sơn - Hải Phòng.
 57. Đỗ Văn Thơm (2010), *Nghiên cứu giảm dao động đối với hệ một bậc tự do*

- bằng bộ hấp thụ dao động TMD nhiều bậc tự do*, Luận văn thạc sỹ kỹ thuật.
58. Lê Anh Tuấn, *Phản ứng động ngẫu nhiên của công trình biển*, Hà Nội : Luận án tiến sỹ kỹ thuật, 2003.
 59. Đào Văn Tuấn (2016), *Nghiên cứu tính toán công trình biển dạng khung chịu tải trọng sóng ngẫu nhiên*. s.l. : Đề tài nghiên cứu KH, Đại học Hàng Hải, 2016.
 60. Đào Văn Tuấn (2016), *Tính toán công trình biển dạng khung chịu tải trọng sóng ngẫu nhiên*, Hội nghị quốc tế khoa học công nghệ Hàng Hải, 2016.
 61. Đinh Mạnh Tường (2014), *Học máy (Các kỹ thuật cơ bản và hiện đại)*, NXB Đại học quốc gia Hà Nội.
 62. Lều Thọ Trình (2006), *Cơ học kết cấu, tập 1 và tập 2*, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật.
 63. Bùi Đức Vinh (2006), *Phân tích và thiết kế kết cấu bằng phần mềm Sap 2000*, tập 1 và tập 2, NXB Thống kê.
 64. Đoàn Mộng Xanh (2005), *Phân tích khả năng giảm dao động của công trình nhà cao tầng bằng chất lỏng*, Luận văn cao học, Đại học Đà Nẵng.
 65. Nguyễn Mạnh Yên (2000), *Phương pháp số trong cơ học kết cấu*, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.

Tiếng Anh

66. Abambres M., Rajana K., Tsavdaridis K., Ribeiro T. (2019), *Neural Network-Based Formula for the Buckling Load Prediction of I-Section Cellular Steel Beams*, 8, Computers, p. 2.
67. Abu - Hilal M. (2003), *Forced vibration of Euler - Bernoulli beams by means of dynamic green functions*, J. Soun. Vib, Vol. 267 (2), pp. 191-207.
68. Bigdeli Y., Kim D. (2016), *Damping effects of the passive control devices on structural vibration control: TMD, TLCD for varying total masses*, 20, J. Civil Eng, pp. 301-308.
69. Bishop A. M. (2006), *Pattern recognition and machine learning*, LLC, 233 Spring Street, New York: Springer Science + Business Media.
70. Chen Y. H., Huang Y. H. (2004), *Timoshenko beam with tuned mass dampers and its design curves*, 278, J. Sound Vib, pp. 873-888.
71. De Deus A. M., Mazumder J. (1996), *Two-dimensional thermo-mechanical finite element model for laser cladding*, J. Laser Appl, pp. 174-183.
72. Den Hartog J. P. (1956), *Mechanical Vibrations*, Dover: New York, NY, USA, 1985; McGraw-Hill: New York, Ny, USA, 4th ed.
73. D. Lutes L., Sarkani S. (2004), *Random Vibrations (Analysis of Structural and Mechanical Systems)*, Elsevier Butterworth-Heinemann, 200 Wheeler Road,, Burlington, MA 01803, USA, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK

74. Domenico D. D., Ricciardi G. (2018), *An enhanced base isolation system equipped with optimal Tuned Mass Damper Inerter (TMDI)*, 47, Earthq. Eng. Struct. Dyn, pp. 1169-1192.
75. Domenico D. D., Ricciardi G. (2018), *Earthquake-resilient design of base isolated buildings with TMD at basement: Application to a case study*, G. 113, Soil Dyn. Earthq. Eng, pp. 503-521.
76. Domenico D. D., Ricciardi G. (2018), *Improving the dynamic performance of base-isolated structures via tuned mass damper and inerter devices: A comparative study*, 25, Struct. Control Hlth, p. e2234.
77. Domenico D. D., Ricciardi G. (2018), *Optimal design and seismic performance of tuned mass damper inerter (TMDI) for structures with nonlinear base isolation systems*, 47, Earthq. Eng. Struct. Dyn, pp. 2539-2560.
78. Domizio M., Ambrosini D., Curadelli O. (2015), *Performance of tuned mass damper against structural collapse due to near fault earthquakes*, J. Sound, Vol. 336, pp. 32-45.
79. Elias S., Matsagar V. (2017), *Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers*, Annual Reviews in Control, Vol. 44, pp. 129-156.
80. Elias S., Matsagar V., Datta, T. K. (2018), *Along-wind response control of chimneys with distributed multiple tuned mass dampers*, 26, Struct. Heal. Monit, p. e2275.
81. Esmailzadeh M., Aghaie - Khafri M. (2012), *Finite element and artificial neural network analysis of ECAP*, Comput. Mater. Sci, pp. 127-133.
82. Fish J., Belytschko T. (2007), *A First Course in Finite Elements*, John Wiley & Sons, Ltd.
83. Frahm H. (1911), *Device for Damped Vibrations of Bodies*, U.S.Patent 989,958, 30 October 1909.
84. Fujino Y., Abe, M. (1993), *Design formulas for tuned mass dampers based on A perturbation technique*, Earthq. Eng. Struct. Dyn, Vol. 23, pp. 833-854.
85. Gergesi R. R., Vickery B. J. (2005), *Optimum design of pendulum-type tuned mass dampers*, Struct. Tall Build, Vol. 14, pp. 353-368.
86. Haykin S. (1999), *Neural networks: A comprehensive foundation*, 2nd edition. NJ : Prentice Hall PTR Upper Saddle River.
87. Hashimoto T., Fujita K., Tsuji M., Takewaki I. (2015), *Innovative base-isolated building with large mass-ratio TMD at basement for greater earthquake resilience*, 1, Futur. Cities, p. 9.
88. Issa A. (2007), *Computational control of laser systems for micro-machining*,

Dublin: Ph.D. Thesis, Dublin City University.

89. Jiménez - Alonso J. F., Andrés Sáez A. (2018), *Motion-base ddesign of TMD for vibrating footbridges under uncertainty conditions*, 21, Smart Struct. Syst, pp. 7227-740.
90. Kaynia A. M., Veneziano D., Biggs J. M. (1961), *Seismic effectiveness of tuned mass dampers*, J. Struct. Div, Vol. 107, pp. 1465-1484.
91. Krenk S., Høgsberg J. (2008), *Tuned mass absorbers on damped structures under random load*, Probabilistic Eng. Mech, Vol. 23, pp. 408-415.
92. Lievens K., Lombaert G., Roeck G. D., Broeck P. V. D. (2016), *Robust design of a TMD for the vibration serviceability of a footbridge*, 123, Eng. Struct, pp. 408-418.
93. Lu Z., Wang D., Masri S. F., Lu X. (2016), *An experimental study of vibration control of wind-excited high-rise buildings using particle tuned mass dampers*, Smart Struct. Syst, Vol. 18, pp. 93-115.
94. Matteo A. D., Furtmüller T., Adam C., Pirrotta A. (2018), *Optimal design of tuned liquid column dampers for seismic response control of base-isolated structures*, Acta Mech 229, pp. 437-454.
95. Nikoo M., Hadzima - Nyarko M., Nyarko, E. K., Nikoo M. (2018), *Determining the natural frequency of cantilever beams using ann and heuristic search*, 32 (3), Applied Artificial Intelligence, pp. 309-334.
96. Pietrosanti D., M. De Angelis M., Basili M. (2017), *Optimal design and performance evaluation of systems with Tuned Mass Damper Inerter (TMDI)*, 46, Earthq. Eng. Struct. Dyn, pp. 1367-1388.
97. Salvi J., M. Rizzi E. (2011), *Minimax optimization of Tuned Mass Dampers under seismic excitation*, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, Eüodyn, pp. 1892-1899.
98. Shabani M. O., Mazahery A. (2011), *The ANN application in FEM modeling of mechanical properties of Al-Si alloy*, 35, Appl. Math. Model, pp. 5707-5713.
99. Shen H., Shi Y. J., Yao Z. Q., Hu J. (2006), *Fuzzy logic model for bending angle in laser forming*, Mater. Sci. Technol, pp. 981-986.
100. Sun C., Jahangiri V. (2018), *Bi-directional vibration control of offshore wind turbines using a 3D pendulum tuned mass damper*, Mech. Syst. N.a. Process, Vol. 105, pp. 338-360.
101. Tributsch A., Adam C. (2012), *Evaluation and analytical approximation of Tuned Mass Damper performance in an earthquake environment*, Tributsch, C. 10, Smart Struct. Syst, pp. 155-179.
102. Tuan A. Y., Shang, G. Q. (2014), *Vibration control in a 101 - Storey building using a tuned mass damper*, J. Appl. Sci, Vol. 17, pp. 141-156.

103. Venanzi I. (2015), *Robust optimal design of tuned mass dampers for tall building with uncertain parameters*, Struct. Multidiscipl. Optim, Vol. 51, p. 239.
104. Wang G. G., Xie S. Q. (2005), *Optimal process planning for a combined punch-and-laser cutting machine using ant colony optimization*, 43, Int. J. Prod, pp. 2195-2216.
105. Weisner K. B. (1979), *Tuned mass dampers to reduce building wind motion*, New York : In American Society of Civil Engineers, Vol. ASCE Convention and Exposition.
106. What is a Neural Net? <http://www.cormactech.com/neunet/whatis.html>, [Online] March 2, 2019.
107. Ye J. Y., Yuan X. C., Zhou G. Y. (2003), *A genetic algorithm for optimization design of diffractive optical elements in laser beam shaping*, 4594, Proceed. SPIE, pp. 118-127.