

BỘ QUỐC PHÒNG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

LÊ VŨ ĐAN THANH

NGHIÊN CỨU ĐÀN HỒI KHÍ ĐỘNG CỦA CÁNH VẦY
Kiểu CÁNH CÔN TRÙNG SỬ DỤNG
MÔ HÌNH CƠ HỆ NHIỀU VẬT

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật
Mã số: 9 52 01 01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIÊN SỸ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – NĂM 2023

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG**

Người hướng dẫn khoa học:

TS Nguyễn Anh Tuấn

PGS.TS Đặng Ngọc Thanh

Phản biện 1: GS.TSKH Nguyễn Đức Cường

Phản biện 2: GS.TS Nguyễn Thế Mịch

Phản biện 3: PGS.TS Lã Đức Việt

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số 6161/QĐ-HV, ngày 13 tháng 11 năm 2023 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại: Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi:giờ..... ngày.....tháng..... năm 2023

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự
- Thư viện Quốc gia

MỞ ĐẦU

1. Lý do lựa chọn đề tài luận án

Thiết bị bay (TBB) cánh vẫy siêu nhỏ phỏng côn trùng hiện đang rất được quan tâm nghiên cứu trên thế giới với nhiều ứng dụng trong các lĩnh vực dân sinh và quốc phòng như do thám, tìm kiếm cứu hộ cứu nạn, thu thập thông tin môi trường. So với các TBB truyền thống, TBB loại này có các đặc tính khí động vượt trội ở chế độ bay với số Reynolds nhỏ và trung bình, tiếng ồn nhỏ, tính cơ động cao và có hình dạng lý tưởng để ngụy trang.

Các TBB cánh vẫy phỏng côn trùng thường có cơ chế vẫy cánh nhiều bậc tự do ở gốc cánh với tần số vẫy cao nên các đặc điểm khí động và động lực học trở nên rất phức tạp. Cánh thường được làm từ vật liệu nhẹ và đàn hồi để giảm khối lượng, nên kết cấu cánh bị biến dạng lớn trong quá trình bay. Vì vậy, nghiên cứu hiện tượng đàn hồi khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng là một vấn đề có ý nghĩa quan trọng, nhưng chưa được nghiên cứu đầy đủ. Do đó, luận án “*Nghiên cứu đàn hồi khí động của cánh vẫy kiểu cánh côn trùng sử dụng mô hình cơ hệ nhiều vật*” có tính thời sự, khoa học và thực tiễn cao. Giải quyết tốt được đề tài này, sẽ là cơ sở để xây dựng công cụ tính toán nhanh đàn hồi khí động, có độ tin cậy cao, ứng dụng trong thiết kế, chế tạo TBB phỏng côn trùng.

2. Mục đích nghiên cứu của luận án

Xây dựng mô hình mô phỏng tương tác kết cấu – chất lưu (FSI) cho cánh vẫy kiểu côn trùng sử dụng mô hình cơ hệ nhiều vật, nghiên cứu các đặc tính đàn hồi khí động của cánh. Từ đó đề xuất các khuyến cáo trong tính toán, thiết kế TBB phỏng côn trùng.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu: Cánh vẫy đàn hồi kiểu cánh côn trùng thực hiện các chuyển động mô phỏng chuyển động vẫy ngoài tự nhiên, chịu các tải trọng khí động do tương tác giữa dòng khí và cánh.

Phạm vi nghiên cứu: Nghiên cứu đàn hồi khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng được mô hình hóa dưới dạng cơ hệ nhiều vật. Các tính toán được áp dụng cho cánh loài bướm *Manduca Sexta* ở chế độ bay treo.

4. Nội dung và cấu trúc luận án

Luận án gồm có phần mở đầu, 04 chương chính và phần kết luận, danh mục các công trình nghiên cứu của tác giả, các tài liệu tham khảo và phụ lục.

Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu.

Chương 2. Mô hình mô phỏng FSI cho cánh vẫy kiểu côn trùng.

Chương 3. Kiểm chứng mô hình tính toán.

Chương 4. Nghiên cứu đàn hồi khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng.

5. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp phân tích, tổng hợp để nghiên cứu các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan, làm rõ mục tiêu, nhiệm vụ của luận án; Phương pháp toán học, lý thuyết cơ học, lý thuyết động lực học, khí động lực học để phân tích và xây dựng mô hình động lực học, xây dựng các quan hệ toán học và giải hệ phương trình vi phân; So sánh kết quả nghiên cứu với các kết quả nghiên cứu bằng thực nghiệm, các phương pháp khác đã được công bố để khẳng định tính đúng đắn của mô hình toán học và chương trình tính toán.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

6.1. Ý nghĩa khoa học

- Cách tiếp cận động lực học hệ nhiều vật là hướng nghiên cứu mới so với các phương pháp tính toán tương tác kết cấu - chất lưu cho cánh vẫy truyền thống. Khi áp dụng cách tiếp cận này, cơ hệ có số bậc tự do giảm xuống và trở nên đơn giản hơn so với việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, trong khi các đặc tính phi tuyến vẫn được mô tả đầy đủ;

- Các kết quả nghiên cứu chuyên sâu liên quan tới hiện tượng đàn hồi khí động của cánh vẫy sẽ góp phần làm sáng tỏ các cơ chế bay quan trọng mà hiện nay các nhà khoa học vẫn chưa tìm ra được câu trả lời đầy đủ.

6.2. Ý nghĩa thực tiễn

- Các kết quả nghiên cứu của luận án sẽ góp phần quan trọng trong việc xây dựng các thiết kế cho TBB cánh vẫy phục vụ các mục đích khoa học cũng như các nhiệm vụ thực tiễn phát triển kinh tế, xã hội và bảo vệ an ninh, chủ quyền;

- Cách tiếp cận mới theo hướng động lực học hệ nhiều vật có thể được áp dụng cho kết cấu của các đối tượng khác như máy bay, cánh quạt trực thăng, các dạng rô-bốt sử dụng cơ cấu mềm.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về thiết bị bay cánh vẫy phỏng côn trùng

Các TBB cánh vẫy phỏng côn trùng có những đặc điểm được các nhà khoa học trong các lĩnh vực phỏng sinh học, cơ học, kỹ thuật hàng không quan tâm. Các TBB loại này có kích thước nhỏ, khả năng bay treo tốt, tính cơ động cao ở vận tốc thấp, ít tiếng ồn, phù hợp cho các nhiệm vụ do thám trong không gian kín như tòa nhà, hang động, địa đạo.

Trong quá trình thiết kế, chế tạo TBB phỏng côn trùng, các nhà khoa học thường dựa trên các đặc tính kết cấu, động lực học của côn trùng trong tự nhiên. Trong đó, thiết kế cánh là nhiệm vụ quan trọng nhất do cánh côn trùng đồng thời vừa là cơ quan tạo lực nâng, lực đẩy cũng như điều khiển. Cánh côn trùng thường là một tấm màng da được trợ lực bởi các gân. Cơ chế vẫy cánh nhiều bậc tự do ở gốc cánh, tần số vẫy cao, kết hợp với sự biến dạng của kết cấu khiến cho các đặc điểm khí động và động lực học của côn trùng trở nên rất phức tạp.

1.2. Tổng quan về tình hình nghiên cứu đàn hồi khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng

Nhằm tiệm cận tới cánh của các loài côn trùng trong tự nhiên, cánh TBB cánh vẫy thường làm bằng vật liệu nhẹ được gia cường bằng các gân các-bon. Hiện tượng biến dạng của cánh khi chịu tải khí động là không thể tránh khỏi và có ảnh hưởng lớn đến các đặc tính bay. Do đó, việc nghiên cứu đàn hồi khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng là vấn đề có ý nghĩa quan trọng trong quá trình thiết kế.

1.2.1. Các phương pháp nghiên cứu đàn hồi khí động cánh vẫy

Đã có nhiều nghiên cứu về đàn hồi khí động của cánh vẫy, trong đó sử dụng một số phương pháp như sau:

a) *Phương pháp thực nghiệm*: sử dụng camera tốc độ cao để tái tạo lại động học của cánh [66], phương pháp đo vận tốc ảnh hạt để nghiên cứu dòng chảy [67], sử dụng mô hình rô-bốt thu nhỏ [4]. Để làm rõ bản chất vật lý, cần phải đo đồng thời các thông số động học, biến dạng, dòng chảy và các lực khí động. Điều này đòi hỏi các trang thiết bị thí nghiệm hết sức đắt tiền và phức tạp.

b) *Phương pháp tổng hợp dao động*: đây là phương pháp mô phỏng FSI phổ biến nhất, dựa trên việc phân tích các dạng dao động riêng và nguyên lý chồng chất tuyến tính của chúng [5-7]. Các mô hình kết cấu này thường được kết hợp với tải khí động thu được từ các phương pháp tính toán bậc thấp theo lý

thuyết phần tử cánh BET [6, 7], hoặc từ phương pháp xoáy không dừng UVLM [5]. Cách tiếp cận dựa trên tổng hợp dao động có lợi thế là không quá phức tạp, tiết kiệm được khối lượng tính toán, nhưng phải sử dụng giả thiết biến dạng nhỏ, nên không mô tả được bản chất phi tuyến của các biến dạng lớn xuất hiện trên các kết cấu cánh côn trùng mềm khi bay.

c) *Phương pháp kết hợp CFD và CSD*: kết hợp giữa phương pháp động lực học chất lưu CFD và phương pháp động lực học kết cấu CSD [8-10, 70]. Phương pháp này có độ chính xác cao nhưng đòi hỏi khối lượng tính toán lớn và khó hội tụ.

d) *Cách tiếp cận động lực học hệ nhiều vật*: cánh được mô phỏng bằng một hệ các vật gắn với nhau bằng lò xo. Cánh tiếp cận này có ưu điểm là có số bậc tự do nhỏ, thời gian tính toán nhanh, cho phép mô phỏng các biến dạng lớn của hệ phi tuyến. Các nghiên cứu sử dụng phương pháp này trước đây chủ yếu tập trung vào đối tượng cánh hai chiều [11, 12, 72]. Một số tác giả nghiên cứu bài toán đàn hồi khí động ba chiều nhưng mới chỉ dừng lại ở mức độ đơn giản [73-75].

1.2.2. Kết quả nghiên cứu đàn hồi khí động cánh vẫy kiểu côn trùng

Các nghiên cứu cho thấy rằng biến dạng có ảnh hưởng lớn đến đặc tính khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng. Biến dạng thụ động của cánh có thể làm tăng lực nâng [83, 86], nhưng khi biến dạng uốn quá lớn sẽ làm suy giảm các xoáy mép trước và giảm khả năng tạo lực [84, 85, 87]. Tuy vậy, chưa có nhiều nghiên cứu chuyên sâu về tối ưu độ cứng của cánh vẫy, do các chương trình mô phỏng FSI bậc cao thường rất phức tạp và đòi hỏi nhiều thời gian tính toán. Các nghiên cứu về tối ưu độ cứng thường chỉ giới hạn trong các mô hình giải tích [88-91]. Các kết quả cho thấy có sự liên quan chặt chẽ giữa điều kiện bay tối ưu của cánh côn trùng và tỉ lệ tần số riêng $f_1^* = \frac{f_1}{f}$, là tỉ lệ giữa tần số dao động riêng thứ nhất của kết cấu cánh và tần số vẫy.

Các tham số động học như tần số vẫy, giá trị trung bình và biên độ của các góc Euler là các tham số động học quan trọng đối với cánh vẫy, đây cũng chính là các tham số điều khiển chính của thiết bị bay cánh vẫy và côn trùng [76, 77]. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu trước đây, việc khảo sát các tham số này chủ yếu được tiến hành bằng thực nghiệm [31, 35, 49]. Các nghiên cứu mô phỏng chỉ được thực hiện cho trường hợp cánh cứng [80-82] và chưa có các nghiên cứu mô phỏng tương tự đối với cánh mềm.

1.3. Kết quả nghiên cứu đạt được từ các công trình đã công bố và những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

Kết quả đạt được từ các công trình đã công bố:

- Đàn hồi khí động có ảnh hưởng lớn các đặc tính của TBB cánh vẫy kiểu côn trùng, nhưng các phương pháp nghiên cứu về hiện tượng này vẫn còn nhiều hạn chế. Phương pháp thực nghiệm đòi hỏi chi phí cao và trang thiết bị hiện đại. Phương pháp sử dụng nguyên lý chồng chất các dạng dao động riêng tuy đơn giản nhưng phải dựa trên giả thiết về biến dạng nhỏ, vốn không đặc trưng cho cánh côn trùng. Một số tác giả kết hợp giữa CSD và CFD, nhưng phương pháp này đòi hỏi cấu hình máy tính cao và thời gian tính toán lâu, nên không phù hợp với các tính toán tối ưu hoặc nghiên cứu tham số.

- Hầu hết các nghiên cứu gần đây về cánh vẫy đều cho thấy rằng cánh mềm với độ cứng thích hợp sẽ tạo ra lực nâng và hiệu suất năng lượng tốt hơn cánh cứng tuyệt đối. Độ cứng tối ưu của cánh có liên quan mật thiết với tỉ lệ tần số riêng f_1^* . Nhưng do sự phức tạp của các thực nghiệm và phương pháp mô phỏng FSI nên các kết quả đưa ra chủ yếu dựa trên các phương pháp giải tích hoặc mô hình bậc thấp.

- Quá trình bay của côn trùng được phát động và điều khiển bởi các chuyển động nhiều bậc tự do phức tạp ở gốc cánh; do đó đã có nhiều nghiên cứu về ảnh hưởng của các tham số động học ở gốc cánh đến các đặc tính khí động và năng lượng. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu này chỉ được thực hiện bằng thực nghiệm, các nghiên cứu mô phỏng chỉ áp dụng cho đối tượng cánh cứng.

Từ các nhận xét nêu trên tác giả đề xuất một số vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu sau:

- Phát triển phương pháp mô phỏng cho đối tượng TBB cánh vẫy sử dụng cánh mềm có thể mô hình hóa được các tính chất phi tuyến của các biến dạng lớn với khối lượng tính toán hợp lý.

- Nghiên cứu phân tích các đặc tính đàn hồi khí động đặc trưng của TBB cánh vẫy kiểu côn trùng, xác định mối liên hệ giữa biến dạng và cơ chế chuyển động cánh phức tạp của TBB kiểu côn trùng và côn trùng cánh vẫy;

- Nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng kết cấu đến các đặc trưng tạo lực và năng lượng của cánh vẫy.

Qua quá trình tìm hiểu, nghiên cứu của bản thân, tác giả thấy rằng việc sử dụng mô hình mô phỏng FSI kết hợp giữa cơ hệ nhiều vật và phương pháp xoáy

không dùng UVLM trong nghiên cứu đàn hồi khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng là vấn đề có tính thời sự và có ý nghĩa khoa học.

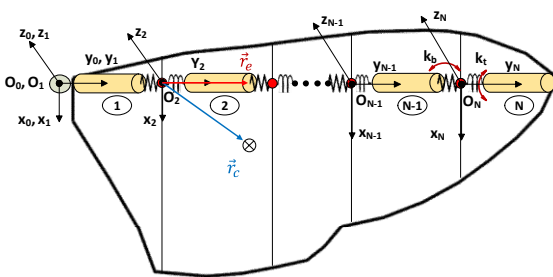
1.4. Những nội dung nghiên cứu trong luận án

- Xây dựng chương trình mô phỏng động lực học kết cấu dựa trên cách tiếp cận cơ hệ nhiều vật cho đối tượng cánh vẫy kiểu cánh côn trùng;
- Xây dựng phương pháp kết nối mô hình khí động lực học không dùng UVLM và mô hình động lực học hệ nhiều vật để giải quyết các bài toán tương tác kết cấu – chất lưu FSI phức tạp, đặc trưng của cánh vẫy;
- Nghiên cứu đàn hồi khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng, phân tích ảnh hưởng của biến dạng đến đặc trưng tạo lực và năng lượng. Thực hiện khảo sát ảnh hưởng của các tham số động học và phân bố độ cứng kết cấu đến đặc tính bay. Từ đó đề xuất các khuyến cáo trong thiết kế TBB cánh vẫy siêu nhỏ phỏng côn trùng.

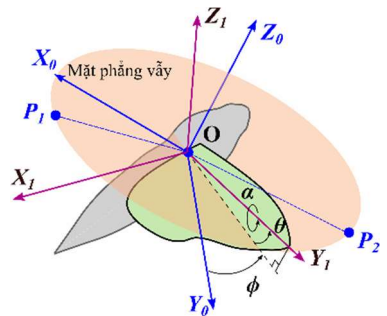
CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH MÔ PHỎNG FSI CHO Cánh VẪY KIỂU CÔN TRÙNG

2.1. Mô hình kết cấu cánh vẫy kiểu côn trùng

Kết cấu cánh côn trùng được mô hình hóa bằng một dầm Euler-Bernoulli chịu uốn và xoắn quanh trục đàn hồi. Dầm sau đó được xấp xỉ hóa dưới dạng hệ gồm N vật cứng độ dài Δl nối với nhau bằng các lò xo uốn và xoắn (Hình 2.1).



Hình 2.1. Mô hình hệ vật-lò xo



Hình 2.2. Các góc Euler

Trong mỗi chu kỳ vẫy, cánh chuyển động tương đối so với một mặt phẳng gọi là mặt phẳng vẫy được xác định thông qua 3 điểm: điểm gốc cánh và vị trí của mút cánh tại cuối mỗi nửa chu kỳ vẫy. Hệ trục tọa độ $(OX_0Y_0Z_0)$ gắn với mặt phẳng vẫy, gồm các trục OX_0Y_0 nằm trong mặt phẳng vẫy sao cho trục OX_0 nằm

trong mặt phẳng đối xứng dọc của côn trùng, trục OZ_0 vuông góc với mặt phẳng vậy. Hệ vật được phát động bởi chuyển động ở gốc cánh tương đương với vật thứ nhất, được xác định bởi 3 góc Euler (Hình 2.2): góc quét ϕ , góc xoay α , góc lên – xuống θ . Nếu coi cánh là cứng tuyệt đối và OY_1 là đường nối gốc cánh và mút cánh, thì góc ϕ được định nghĩa là góc giữa hình chiếu của OY_1 lên mặt phẳng vậy với trục OY_0 . θ là góc giữa OY_1 và hình chiếu của nó trên mặt phẳng vậy, α là góc giữa dây cung cánh và mặt phẳng vậy khi góc θ bằng không.

Vị trí và hướng tương đối của vật thứ k ($k > 1$) so với vật thứ $k - 1$ được xác định bởi các góc uốn θ_k và xoắn α_k của lò xo thứ $k - 1$. Tọa độ suy rộng dùng để xác định trạng thái của hệ là $\Phi = [\theta_2, \alpha_2, \theta_3, \alpha_3, \dots, \theta_N, \alpha_N]^T$.

Động năng của vật thứ k được xác định theo công thức:

$$T_k = \frac{1}{2} \omega_k^{kT} I_k^k \omega_k^k + \frac{1}{2} m_k V_k^{ckT} V_k^{ck}, \quad (2.1)$$

trong đó: m_k , I_k^k , V_k^{ck} , ω_k^k tương ứng là khối lượng, tenxơ mô men quán tính, vận tốc trọng tâm và vận tốc góc của mỗi vật xác định trong hệ tọa độ cục bộ. Các đại lượng V_k^{ck} và ω_k^k được tính dựa trên vận tốc của các vật trước đó và ma trận chuyển tương ứng.

Phương trình Lagrange đối với tọa độ suy rộng η_j có dạng:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\eta}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial \eta_j} = \sum_{m=h_j}^N (C_j^m \dot{\Phi}) + \sum_{m=h_j}^N (F_j^m - G_j^m) = Q_j, \quad (2.2)$$

trong đó: $T = \sum_{k=2}^N T_k$ là tổng động năng của tất cả các vật, C_j^m , F_j^m , G_j^m là các hệ số khai triển, Q_j là lực suy rộng theo tọa độ suy rộng η_j . Lực suy rộng là tổng của hai thành phần: $Q_j = Q_j^e + Q_j^a$, trong đó, Q_j^e là lực suy rộng thu được từ lực đàn hồi của lò xo, Q_j^a là lực suy rộng do tải khí động gây ra.

Kết hợp phương trình Lagrange (2.2) theo tất cả các tọa độ suy rộng, có thể đưa ra được phương trình chuyển động của hệ dưới dạng ma trận tổng quát như sau:

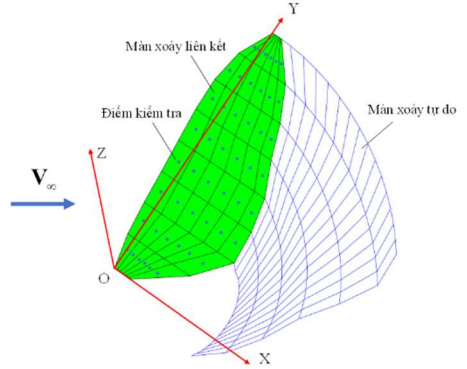
$$M(\Phi, \dot{\Phi}, t) \ddot{\Phi} + H(\Phi, \dot{\Phi}, t) = Q(\Phi, \dot{\Phi}, t), \quad (2.3)$$

trong đó, $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \\ \dots \\ \mathbf{M}_{2N+1} \end{bmatrix}$, $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \dots \\ H_{2N-2} \end{bmatrix}$, $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_{2N-2} \end{bmatrix}$ tương ứng là các ma trận

khối lượng, ma trận độ cứng và ma trận lực suy rộng, với $\mathbf{M}_j = \sum_{m=h(\eta_j)}^N \mathbf{C}_j^m$, $H_j = \sum_{m=h(\eta_j)}^N (F_j^m - G_j^m)$.

2.2. Mô hình khí động lực học UVLM

Tải khí động được xác định bằng phương pháp xoáy không dừng UVLM. Theo đó, cánh được chia thành các tấm mà trên đó có các khung xoáy tứ giác với lưu tốc bằng nhau, tạo thành màn xoáy liên kết (Hình 2.3). Khi dòng khí chảy bao qua cánh, phía sau cánh hình thành vết xoáy có dạng màn mỏng, chuyển động tự do cùng các phần tử của dòng khí, gọi là màn xoáy tự do. Trên mỗi khung xoáy của cánh có một điểm kiểm tra nằm tại tâm khung xoáy.



Hình 2.3. Mô hình khí động UVLM

Điều kiện biên chảy không thấm Neumann được áp dụng tại các điểm kiểm tra trên các tấm, từ đó thu được hệ phương trình đại số để xác định lưu tốc của mỗi khung xoáy. Chênh áp giữa mặt dưới và mặt trên của mỗi tấm được tính theo công thức Bernoulli:

$$\Delta p_i(t) = \rho \left[(\mathbf{V}_i(t) \times \boldsymbol{\gamma}_i(t)) \cdot \mathbf{n}_i + \frac{\partial \Gamma_i(t)}{\partial t} \right] \quad (2.4)$$

trong đó, ρ là khối lượng riêng của không khí; $\mathbf{V}_i(t)$ là vận tốc tương đối của dòng khí đối với bề mặt cánh tại điểm kiểm tra của tấm thứ i ; $\boldsymbol{\gamma}_i(t)$ là vectơ xoáy bề mặt của tấm thứ i ; \mathbf{n}_i là vectơ pháp tuyến; $\Gamma_i(t)$ là lưu tốc của các đoạn xoáy trên tấm thứ i .

Khí động lực học của cánh côn trùng có tính không dừng lớn, với một cơ chế tăng lực nâng quan trọng là xoáy mép trước (XMT). Các XMT này giữ cho dòng khí không bị tách khỏi mặt trên cánh kể cả ở các góc tấn lớn, dẫn đến tăng

đáng kể góc tấn tới hạn và lực nâng. Lực nâng bổ sung do XMT được tính bằng lý thuyết tương tự lực hút của Polhamus [38] theo công thức:

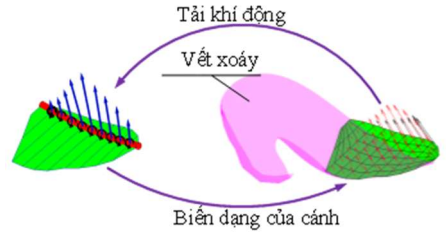
$$F_s = \frac{\pi}{16} \frac{\eta_s \rho \Gamma_{LE}^2}{\Delta x_{LE} \cos \Lambda_{LE}}, \quad (2.5)$$

trong đó, η_s là hệ số ảnh hưởng, Γ_{LE} là lưu tốc của đoạn xoáy đặt tại mép trước, Δx_{LE} và Λ_{LE} là độ dài panel và góc mũi tên tại mép trước.

2.3. Mô hình tích hợp mô phỏng FSI hai chiều

Chương trình mô phỏng FSI cho cánh côn trùng mềm là sự kết hợp giữa mô hình tính toán động lực học nêu trong mục 2.1 và mô hình tính toán khí động UVLM nêu trong mục 2.2. Mô hình FSI do luận án phát triển là dạng hai chiều, bài toán động lực học và bài toán khí động lực học được giải đồng thời.

Có sự trao đổi thông tin hai chiều giữa hai mô hình, theo đó biến dạng của cánh ở mô hình động lực học được sử dụng để nội suy cập nhật vị trí của các nút trên lưới khí động tại mỗi bước lặp để từ đó xác định tải khí động; tải khí động phân bố trên cánh được quy về dạng các mô men và lực tập trung tác dụng lên mô hình động lực học để xác định trạng thái biến dạng mới của cánh



Hình 2.4. Mô hình FSI hai chiều

Tại thời điểm $t+dt$ thực hiện các bước sau:

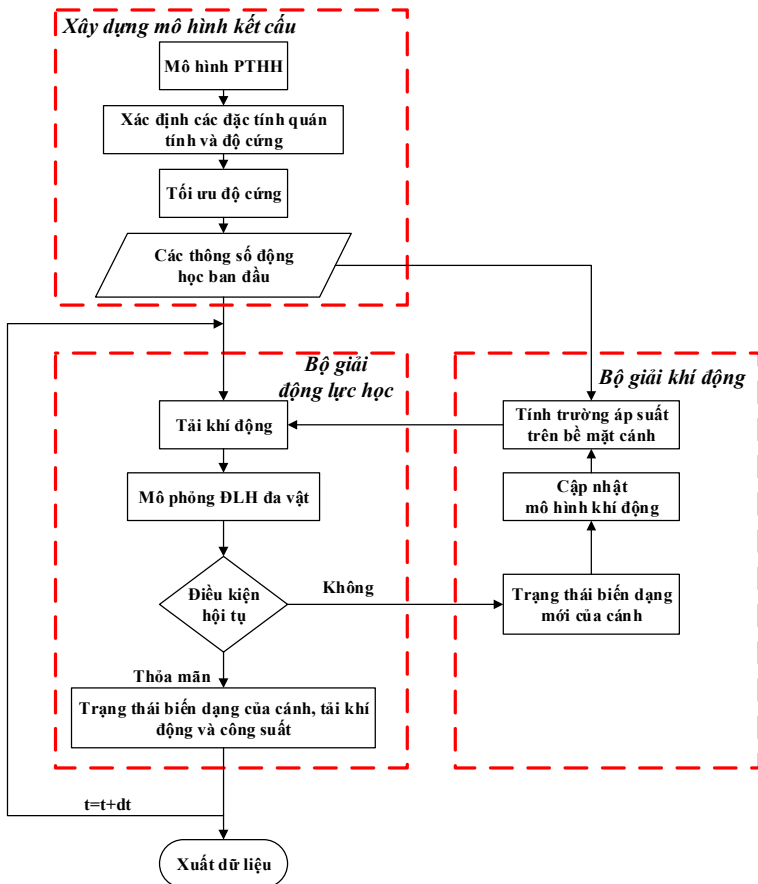
- *Bước 1*: Sử dụng biến dạng của cánh ở bước thời gian t để tính vị trí mới của vết xoáy. Tính toán chênh áp Δp_i trên mỗi ô lưới bằng phương pháp UVLM theo mục 2.2.

- *Bước 2*: Tải khí động phân bố trên cánh được quy về dạng các mô men và lực tập trung tác dụng lên các vật trong mô hình động lực học, từ đó đưa ra ma trận lực suy rộng mới \mathbf{Q} . Giải hệ phương trình chuyển động (2.3) với lực suy rộng mới thu được trạng thái biến dạng mới của cánh. Hệ phương trình vi phân (2.3) được giải bằng cách sử dụng sơ đồ tích phân Hilber–Hughes–Taylor (HHT) kết hợp với phương pháp quasi-Newton dựa trên lý thuyết tìm đường.

- *Bước 3*: Trạng thái mới của cánh lại được sử dụng như dữ liệu đầu vào của bước 1 để đưa vào chương trình tính khí động, cứ thế quá trình được lặp lại cho đến khi đạt được sai số cần thiết.

- *Bước 4*: Xác định trạng thái cuối cùng của cánh và trường lực khí động tại thời điểm $t+dt$.

Chương trình được viết bằng ngôn ngữ lập trình FORTRAN, có sử dụng thư viện OpenMP để tính toán song song nhằm giảm thời gian mô phỏng. Sơ đồ giải thuật của quá trình xây dựng mô hình cánh côn trùng mềm và mô phỏng FSI được biểu diễn trên Hình 2.5.

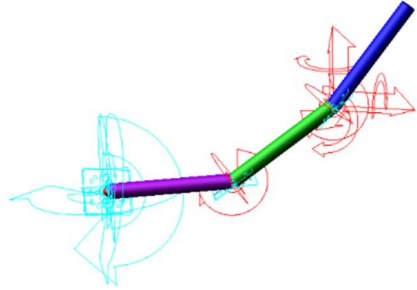
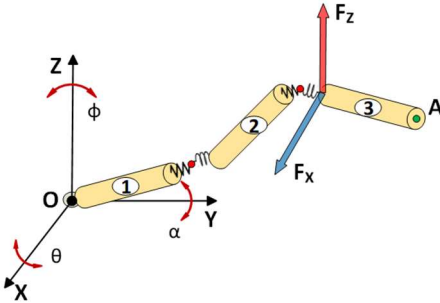


Hình 2.5. Sơ đồ giải thuật của mô hình tính toán FSI

CHƯƠNG 3. KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN

3.1 Kiểm chứng chương trình tính toán động lực học

Tính chính xác của chương trình tính toán động lực học hệ nhiều vật được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả mô phỏng cho một mô hình đơn giản với kết quả từ phần mềm thương mại MSC/ADAMS. Mô hình để kiểm chứng gồm ba vật cứng có cùng độ dài, nối với nhau bằng các lò xo uốn và xoắn (Hình 3.1).

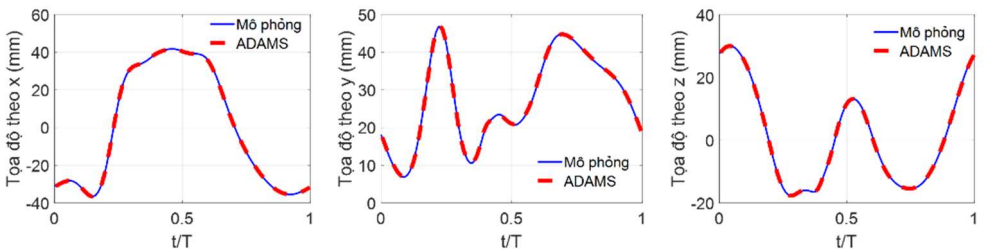


Hình 3.1 Mô hình hệ nhiều vật

Hình 3.2 Mô hình trong MSC/ADAMS

Hệ được phát động bởi chuyển động của khớp cầu ở gốc vật 1, xác định bởi ba góc Euler ϕ, α, θ . Tại vị trí nối giữa vật 2 và vật 3 tác dụng các lực theo phương X và Z với quy luật tuần hoàn. Các đặc trưng quán tính và động lực học của hệ được xác định dựa trên cánh côn trùng thật.

Xét điểm A nằm tại đầu mút của vật thứ ba. Trên Hình 3.3 biểu diễn so sánh tọa độ điểm A theo các trục trong một chu kỳ vẫy giữa mô phỏng và kết quả thu được từ MSC/ADAMS. Kết quả giữa hai phương pháp là trùng khớp nhau. Điều này khẳng định tính chính xác của mô hình động lực học do luận án xây dựng.



Hình 3.3. So sánh tọa độ điểm A theo các trục tọa độ

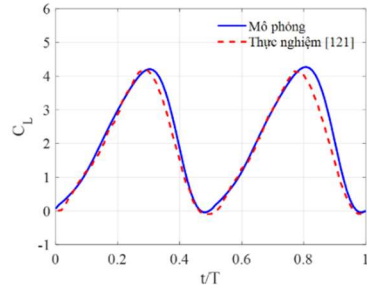
3.2 Kiểm chứng mô hình khí động

Để kiểm chứng mô hình khí động, tiến hành mô phỏng và so sánh với kết quả thực nghiệm của Lua và cộng sự [121] cho mô hình cánh cứng dựa trên cánh

bướm *Manduca Sexta*. Cánh vẫy theo 3 bậc tự do tại gốc cánh, các góc Euler biến thiên theo quy luật dạng tuần hoàn dựa trên chuyển động bay treo của côn trùng thực tế :

$$\begin{aligned}\phi(t) &= \frac{\pi}{3} \cos(2\pi ft) \\ \alpha(t) &= -\frac{\pi}{3} \sin(2\pi ft) \\ \theta(t) &= 0\end{aligned}\quad (3.1)$$

Kết quả tính toán hệ số lực nâng trong một chu kỳ vẫy được biểu diễn trên Hình 3.4. Hệ số lực nâng trung bình trong một chu kỳ thu được từ mô phỏng là 2,06, khá gần với giá trị thực nghiệm là 2,08, sai số 1,17%. Điều này chứng tỏ tính chính xác của mô hình tính toán khí động UVLM.



Hình 3.4. So sánh hệ số lực nâng

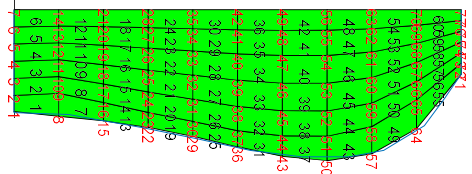
3.3 Kiểm chứng mô hình tính toán tương tác kết cấu – chất lưu FSI

Mô hình tính toán tương tác kết cấu – chất lưu FSI được kiểm chứng bằng cách so sánh với kết quả thực nghiệm trên mô hình cánh mềm của Yoon và cộng sự [10]. Trong thực nghiệm này, Yoon và cộng sự nghiên cứu biến dạng và lực khí động cho cánh của một thiết bị bay cánh vẫy siêu nhỏ FWMAV. Cánh được chế tạo từ màng Mylar và gia cố bằng các gân dọc theo sải cánh. Cánh vẫy quanh trục thẳng đứng với góc quét ϕ có dạng tuần hoàn như sau:

$$\phi = \phi_a(1 - \cos 2\pi ft), \quad (0.2)$$

trong đó, biên độ vẫy cánh $\phi_a = 82^\circ$ và tần số vẫy $f = 24 \text{ Hz}$.

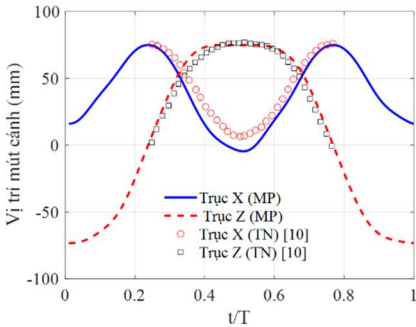
Hình 3.5 biểu diễn lưới khí động trên bề mặt cánh được xây dựng trong chương trình xoáy không dừng UVLM. So sánh vị trí của mút cánh theo các trục X và Z trong một chu kỳ vẫy trên Hình 3.6 cho thấy, kết quả giữa mô phỏng và thực nghiệm là khá sát nhau.



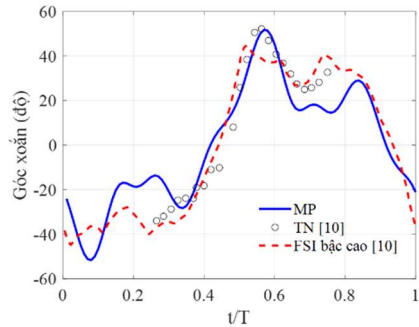
Hình 3.5. Mô hình khí động của cánh FWMAV

Hình 3.17 biểu diễn sự so sánh góc xoắn ở mút cánh giữa chương trình mô phỏng, thực nghiệm và kết quả mô phỏng bằng FSI bậc cao. Có sự khác biệt giữa

kết quả mô phỏng và các kết quả từ nghiên cứu của Yoon và cộng sự, tuy nhiên xu hướng biến thiên của góc xoắn vẫn tương đối phù hợp. Sự khác biệt của góc xoắn có thể giải thích do sự mất đi của một số dạng dao động riêng bậc cao khi xấp xỉ kết cấu bằng mô hình dầm. Kể cả phương pháp FSI bậc cao cũng không mô tả hết được các biến dạng phức tạp này. Đối với kết cấu cánh côn trùng, các gân có dạng hình côn và phân bố dày hơn, nên ảnh hưởng của các dạng dao động riêng cục bộ là không đáng kể, dẫn đến mô phỏng bằng kết cấu dầm sẽ cho kết quả chính xác hơn.



Hình 3.6. So sánh vị trí mút cánh



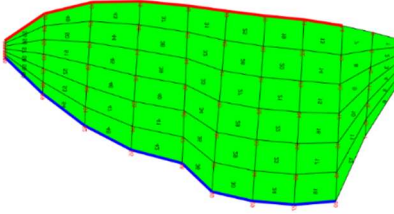
Hình 3.7. So sánh góc xoắn ở mút cánh

Kết quả tính toán mô phỏng cho thấy, lực nâng trung bình của cánh trong một chu kỳ vẫy là 61,1 mN. Kết quả đo được từ thực nghiệm [10] là 59,0 mN. Sai số giữa mô phỏng và thực nghiệm là tương đối nhỏ, chỉ 3,6 %.

CHƯƠNG 4

NGHIÊN CỨU ĐÀN HỒI KHÍ ĐỘNG CỦA CÁNH VẪY KIỂU CÔN TRÙNG

Mô hình tính toán FSI do luận án phát triển được sử dụng để nghiên cứu đàn hồi khí động cho mô hình cánh loài bướm *Manduca Sexta*. Loài bướm này được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu do sự phổ biến của chúng trong ngành côn trùng học với rất nhiều công bố cả về thực nghiệm và mô phỏng. Ngoài ra, chúng có sải cánh lớn nên công nghệ hiện tại có thể chế tạo được các TBB cánh vẫy có kích thước tương đương. Một số đặc tính hình học và khối lượng của cánh loài *Manduca Sexta* được biểu diễn trong Bảng 4.1. Mô hình khí động lực học trong UVLM được biểu diễn trên Hình 4.1.



Hình 4.1. Mô hình khí động cánh *Manduca Sexta*

Bảng 4.1 Đặc trưng của cánh loài bướm *Manduca Sexta*

Đại lượng	Đơn vị	Giá trị
Khối lượng cánh	<i>mg</i>	43,4
Diện tích cánh	<i>mm</i> ²	815,33
Độ dài cánh	<i>mm</i>	48,3
Dây cung trung bình	<i>mm</i>	18,4

4.1. Cánh côn trùng trong chế độ bay treo

Luận án tiến hành nghiên cứu các đặc tính khí động lực học và biến dạng của cánh loài bướm *Manduca Sexta* trong chế độ bay treo. Các góc Euler đặc trưng cho chuyển động ở gốc cánh được xấp xỉ bằng các hàm tuần hoàn dạng:

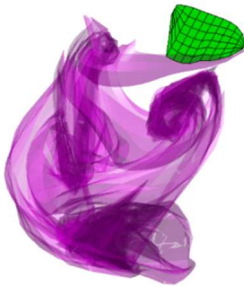
$$\begin{aligned}
 \phi_1(t) &= \phi_0 + \phi_a \cos\left(2\pi ft + \frac{\pi}{180} \delta_\phi\right), \\
 \theta_1(t) &= \theta_0 + \theta_a \cos\left(4\pi ft + \frac{\pi}{180} \delta_\theta\right), \\
 \alpha_1(t) &= \alpha_0 + \alpha_a \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{180} \delta_\alpha\right)
 \end{aligned}
 \tag{0.1}$$

Các thông số động học cho chế độ bay treo được xác định dựa trên dữ liệu thực nghiệm [62] và thể hiện trong bảng 4.2.

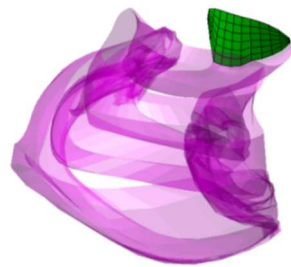
Bảng 4.2 Các thông số động học khi bay treo của loài bướm *Manduca sexta*

Thông số	<i>f</i> (Hz)	ϕ_0 (độ)	ϕ_a (độ)	δ_ϕ (độ)	θ_0 (độ)	θ_a (độ)	δ_θ (độ)	α_0 (độ)	α_a (độ)	δ_α (độ)
Giá trị	26,1	10	50	18	-10	0	0	90	-45	0

Hình 4.2 biểu diễn kết quả mô phỏng cánh và vết xoáy sau cánh.



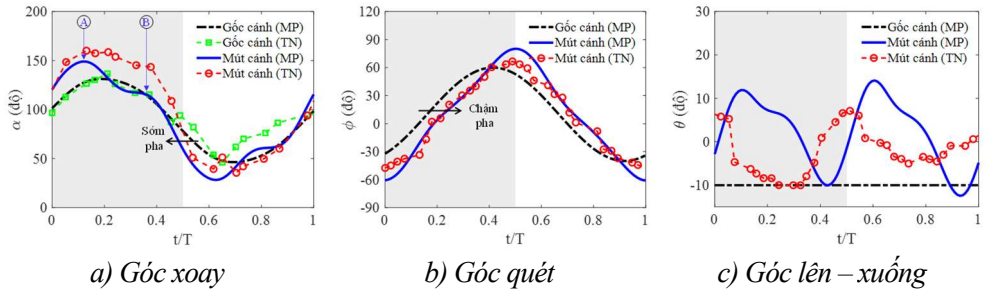
a) Cánh cứng



b) Cánh mềm

Hình 4.2. Hình dạng mô phỏng cánh vẫy và vết xoáy sau cánh

Kết quả mô phỏng sự biến thiên các góc Euler ở gốc cánh và mút cánh trong một chu kỳ vẫy được biểu diễn trên Hình 4.3.



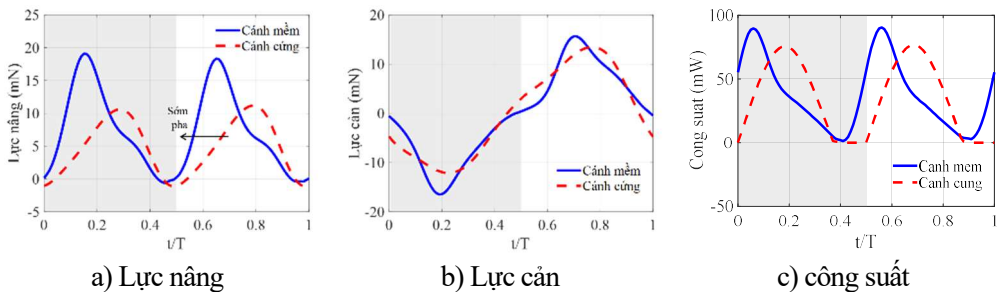
Hình 4.3. So sánh các góc Euler trong một chu kỳ vẫy cánh

❖ Nhận xét:

- Chương trình tính toán đã mô phỏng lại được các góc quét ϕ và góc xoay α khá giống với thực nghiệm. Có sự sớm pha của góc α và chậm pha của góc ϕ ở khu vực gần mút cánh, tương tự như kết quả mô phỏng thu được từ [9].

- Góc lên – xuống θ dao động với biên độ khoảng 10° , tương ứng với biên độ dao động trong thực nghiệm. Như vậy, các chuyển động phức tạp ở mút cánh một phần là do các dao động kết cấu bị động gây ra, không hoàn toàn là chuyển động có chủ đích của côn trùng.

Biến thiên của lực nâng, lực cản và công suất để bay treo trong một chu kỳ được tính toán và biểu diễn trên Hình 4.4.



Hình 4.4. Sự biến thiên của lực khí động và công suất trong một chu kỳ vẫy

❖ Nhận xét

- Lực nâng trung bình trong mỗi chu kỳ vẫy của cánh mềm là 7,26 mN, xấp xỉ một nửa trọng lượng của côn trùng (14 mN). Giá trị này lớn hơn nhiều giá trị

tương ứng của cánh cứng, chỉ bằng 4,78 mN. Như vậy, cánh mềm sinh ra lực nâng đủ để nâng đỡ trọng lượng của côn trùng khi bay treo còn cánh cứng thì không. Nguyên nhân chính của hiện tượng này là do với cùng một quy luật chuyển động ở góc cánh, biên độ góc quét ϕ ở mút cánh của cánh mềm tăng từ 50° lên 67° so với cánh cứng do biến dạng uốn. Một nguyên nhân khác có thể là do sự sớm pha của góc xoay α ở khu vực gần mút cánh, vốn đã được nhiều nghiên cứu khác chứng minh là có thể cải thiện đặc tính khí động của cánh vẫy [35, 122].

- Sử dụng cánh mềm cũng làm tăng công suất, chủ yếu do sự tăng lên của lực cản. Trong nghiên cứu cánh vẫy, thường sử dụng đại lượng công suất trung bình trên mỗi đơn vị lực η , được tính bằng tỉ lệ giữa công suất trung bình P^m và lực nâng trung bình trong một chu kỳ vẫy L^m : $\eta = \frac{P^m}{L^m}$. Đại lượng này được dùng để đánh giá hiệu quả tạo lực của cánh, giá trị này càng nhỏ thì hiệu suất năng lượng của cánh càng cao. Kết quả cho thấy, giá trị này của cánh cứng là 4,86 ($W \cdot N^{-1}$), của cánh mềm là 3,45. Như vậy, hiệu suất năng lượng của cánh mềm tăng 29% so với cánh cứng.

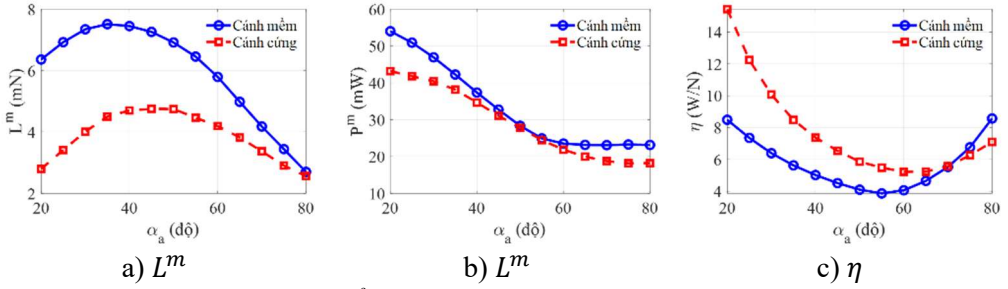
4.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số động học đến đặc tính đàn hồi khí động

Trong phần này sẽ khảo sát ảnh hưởng các thông số động học quan trọng như biên độ và giá trị trung bình của các góc Euler cũng như tần số vẫy đến đặc tính đàn hồi khí động của cánh côn trùng. Các giá trị cơ sở và khoảng khảo sát của mỗi thông số được trình bày trong Bảng 4.3.

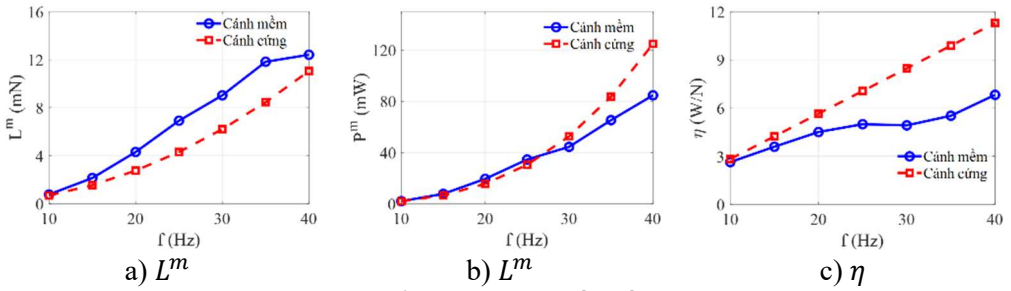
Bảng 0.3 Khoảng khảo sát của các tham số

Tham số	Tên gọi	Giá trị cơ sở	Khoảng khảo sát
α_a (độ)	Biên độ góc xoay	45	[20 ÷ 80]
f (Hz)	Tần số vẫy	26,1	[10 ÷ 40]
ϕ_a (độ)	Biên độ góc quét	50	[20 ÷ 80]
θ_0 (độ)	Giá trị trung bình góc lên - xuống	-10	[-20 ÷ 20]
θ_a (độ)	Biên độ góc lên - xuống	0	[-10 ÷ 10]

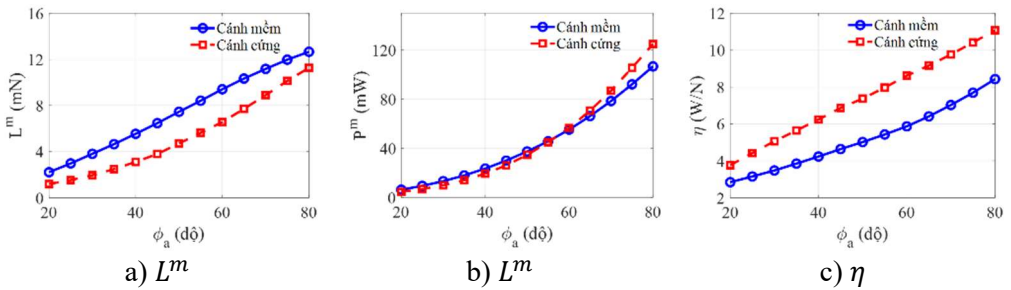
Với mỗi trường hợp, tiến hành xác định lực nâng trung bình L^m và công suất trung bình P^m trong mỗi chu kỳ vẫy, công suất trung bình cho một đơn vị lực η . Kết quả khảo sát các tham số được biểu diễn trên các Hình 4.5 - Hình 4.9.



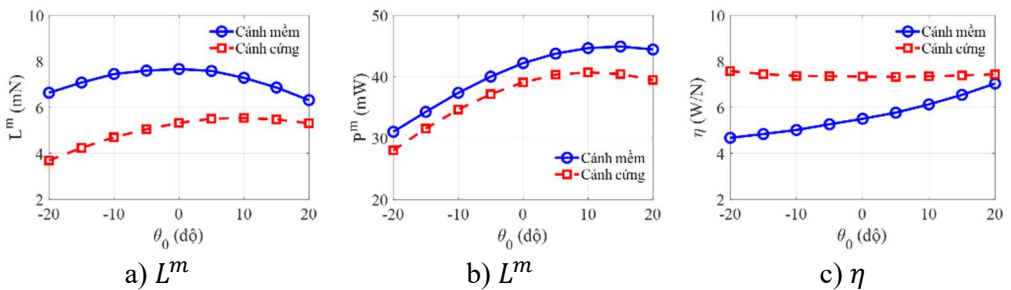
Hình 4.5. Ảnh hưởng của biên độ góc xoay



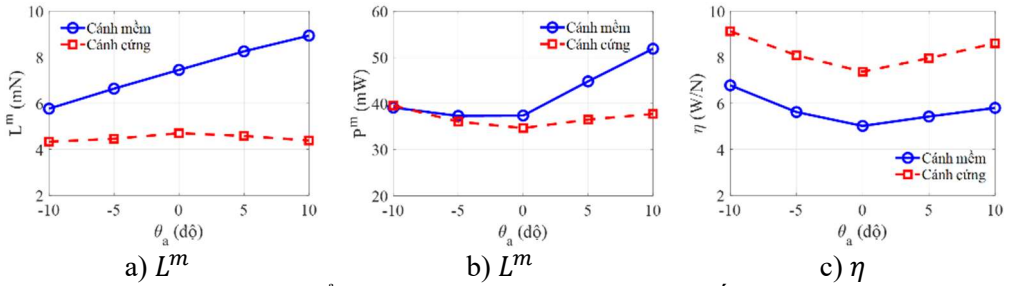
Hình 4.6. Ảnh hưởng của tần số vấp



Hình 4.7. Ảnh hưởng của biên độ góc quét



Hình 4.8. Ảnh hưởng của giá trị trung bình góc lên - xuống



Hình 4.9. Ảnh hưởng của biên độ góc lên - xuống

❖ Nhận xét:

- **Biên độ góc xoay α_a :** lực nâng lớn nhất đạt được khi $\alpha_a \approx 45^\circ$ với cánh cứng, và $\alpha_a \approx 35^\circ$ với cánh mềm. Nguyên nhân là do đối với cánh mềm, biến dạng xoắn làm tăng biên độ góc xoay α dọc theo sải cánh, nên lực nâng lớn nhất xảy ra ở α_a nhỏ hơn. Cánh mềm đạt hiệu suất năng lượng tốt nhất ở biên độ góc xoay α_a bằng 55° , nhỏ hơn giá trị tương đương của cánh cứng là 65° .

- **Tần số vẫy và biên độ góc quét ϕ_a :** Ảnh hưởng của việc thay đổi tần số vẫy f và biên độ góc quét ϕ_a khá tương tự nhau. Khi tăng tần số và biên độ góc quét, công suất và lực nâng cũng như hiệu suất năng lượng tăng lên.

- **Giá trị trung bình của góc lên - xuống θ_0 :** Lực nâng của cánh cứng đạt giá trị lớn nhất ở θ_0 khoảng 10° do hiệu ứng xoay bổ sung [82]. Đối với cánh mềm, lực nâng lớn nhất khi θ_0 bằng 0° .

- **Biên độ góc lên - xuống θ_a :** Biên độ góc lên - xuống hầu như không có ảnh hưởng đến lực nâng của cánh cứng nhưng làm tăng đáng kể lực nâng của cánh mềm. Khi $\theta_a = 0$ thì cả cánh cứng và cánh mềm đều đạt hiệu suất tốt nhất, chứng tỏ chuyển động lên-xuống của cánh không có lợi về mặt năng lượng, tương tự như kết quả thu được từ một số nghiên cứu trước đây [78, 81]. Điều này càng khẳng định giả thiết rằng chuyển động lên xuống của cánh không phải là chuyển động có chủ đích của côn trùng, nhiều khả năng đó chỉ là hệ quả của biến dạng kết cấu cánh và cơ cấu đàn hồi ở vị trí nối giữa thân với cánh.

4.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng kết cấu cánh đến đặc tính đàn hồi khí động

Phân bố độ cứng dọc theo sải cánh được xác định dựa trên dữ liệu thực nghiệm và có thể được xấp xỉ bằng hàm mũ có dạng:

$$\begin{aligned} EI &= a_1^b \exp(-a_2^b \bar{r}) \\ GJ &= a_1^t \exp(-a_2^t \bar{r}), \end{aligned} \quad (4.2)$$

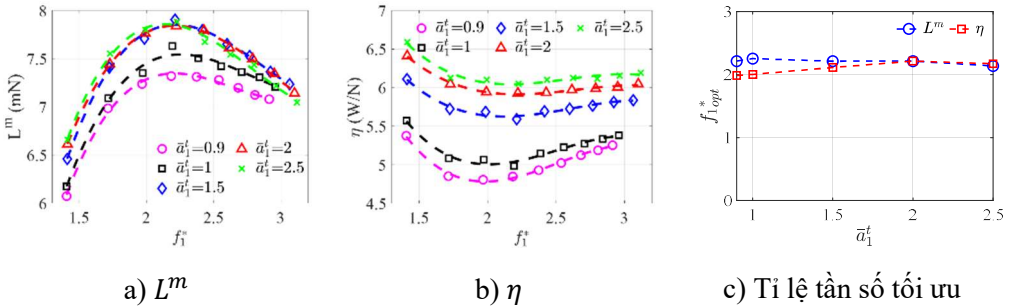
trong đó, EI và GJ tương ứng là độ cứng uốn và độ cứng xoắn, \bar{r} là tọa độ tương đối dọc theo sải cánh. Lần lượt thay đổi các giá trị a_i^b và a_i^t ($i = 1, 2$) trong (4.2), với mỗi trường hợp phân bố độ cứng tiến hành xác định:

- Tần số dao động riêng thứ nhất f_1 của cánh và tỉ lệ tần số riêng f_1^* .
- Lực nâng trung bình trong một chu kỳ vẫy L^m và công suất trung bình cho mỗi đơn vị lực η .

Trong các đồ thị dưới đây, sử dụng các ký hiệu \bar{a}_i^b và \bar{a}_i^t ($i = 1, 2$) là tỉ lệ giữa giá trị khảo sát của a_i^b và a_i^t so với giá trị tương ứng của cánh sinh học.

4.3.1. Ảnh hưởng của các hệ số a_1^b và a_1^t

Các hệ số a_1^b và a_1^t đặc trưng cho độ lớn của phân bố độ cứng chống uốn và chống xoắn dọc theo sải cánh.



Hình 4.9. Ảnh hưởng của các hệ số a_1^b và a_1^t

❖ Nhận xét:

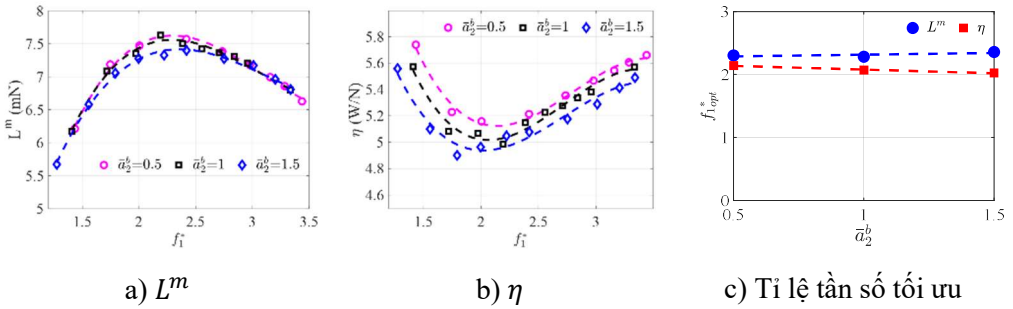
- Quy luật biến thiên của L^m và η theo f_1^* là khá tương đồng với các giá trị khác nhau của \bar{a}_1^t .

- Khi giảm độ cứng chống xoắn về cơ bản sẽ làm tăng hiệu suất năng lượng nhưng giảm lực nâng trung bình. Lúc này, biến dạng của cánh cũng tăng lên.

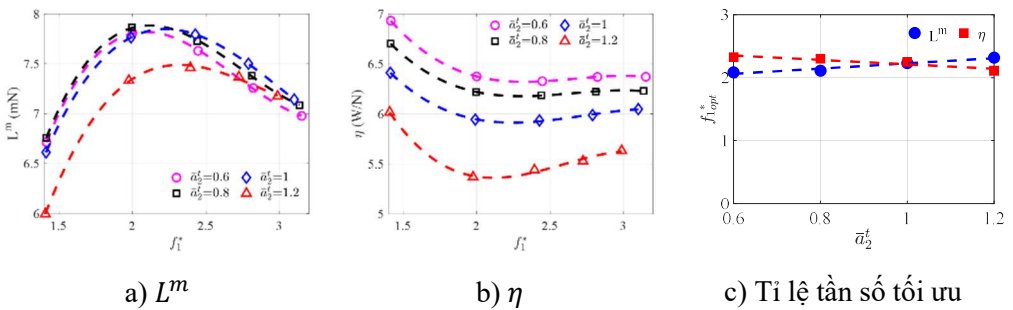
- Hình 4.9c biểu diễn tỉ lệ tần số riêng tối ưu f_{1opt}^* theo lực nâng và hiệu suất năng lượng. Có thể thấy, giá trị tối ưu f_{1opt}^* đều xấp xỉ giá trị 2 với các giá trị khác nhau của \bar{a}_1^t . Cần chú ý rằng, loài bướm *Manduca Sexta* có tần số vẫy khoảng 26 Hz, và tần số dao động riêng thứ nhất của kết cấu cánh khoảng 57 Hz. Như vậy tỉ lệ tần số của cánh sinh học bằng 2,2, khá gần với giá trị thu được từ mô phỏng. Ngoài ra, nhiều loài côn trùng tự nhiên như chuồn chuồn, ve sầu và bọ cánh cứng cũng có tỉ lệ tần số riêng trong khoảng từ 1,5 đến 2,5 [94].

4.3.2. Ảnh hưởng của dạng độ cứng chống uốn và chống xoắn

Dạng độ cứng chống uốn và chống xoắn dọc theo sải cánh được đặc trưng bởi các hệ số a_2^b và a_2^t . Khi các hệ số này càng lớn thì độ cứng chống uốn hoặc chống xoắn ở mút cánh càng nhỏ. Trên các Hình 4.10 và 4.11 biểu diễn ảnh hưởng của a_2^b và a_2^t đến L^m và η , cũng như tỉ lệ tần số riêng tối ưu f_{1opt}^* .



Hình 4.10. Ảnh hưởng của hệ số a_2^b



Hình 4.11. Ảnh hưởng của hệ số a_2^t

❖ **Nhận xét:**

- Khi $\bar{\alpha}_2^b$ và $\bar{\alpha}_2^t$ tăng thì η giảm, nghĩa là hiệu suất năng lượng tăng lên. Như vậy, cánh có độ cứng uốn hoặc xoắn ở mút cánh nhỏ sẽ có hiệu suất năng lượng tốt hơn.

- Trong tất cả các trường hợp, tỉ lệ tần số tối ưu $f_{1\ opt}^*$ vẫn xấp xỉ giá trị 2.

4.4. Phân tích kết quả và ứng dụng trong thiết kế TBB kiểu côn trùng

Khảo sát chế độ bay treo cho thấy biến dạng của cánh mềm gây ra lệch pha các góc Euler giữa gốc cánh và mút cánh. Biến dạng uốn cũng làm tăng biên độ của góc quét ở mút cánh, điều này làm tăng đáng kể lực nâng của cánh mềm so với cánh cứng. Lực nâng của cánh mềm vừa đủ để nâng khối lượng của côn trùng khi bay treo.

Kết quả khảo sát các tham số động học cho thấy, xu hướng ảnh hưởng của các thông số động học đến các đặc tính đàn hồi khí động của cánh cứng và cánh mềm là khá giống nhau. Tuy nhiên, có một số khác biệt như sau:

- Trong hầu hết các trường hợp, cánh mềm có khả năng tạo lực nâng và hiệu suất năng lượng tốt hơn cánh cứng.

- Do biến dạng xoắn thụ động ở mút cánh, cánh mềm có xu hướng đạt biên độ góc xoay tối ưu nhỏ hơn khoảng 10° so với cánh cứng.

- Ở các tần số và biên độ quét nhỏ, cánh mềm cần công suất lớn hơn so với cánh cứng. Xu hướng ngược lại xảy ra ở các tần số và biên độ quét lớn.

- Về chuyển động lên – xuống của cánh, hiệu suất năng lượng tối ưu của cánh cứng đạt được khi cánh hơi nâng lên do hiệu ứng xoay bổ sung. Đối với cánh mềm, do biến dạng uốn nên giá trị tối ưu đạt được khi cánh có vị trí thấp hơn, tương ứng với góc lên - xuống trung bình âm. Hơn nữa, cần lưu ý rằng đối với cả hai mô hình, hiệu suất năng lượng tốt nhất đạt được khi biên độ góc lên - xuống bằng không. Điều này củng cố giả thiết rằng các dạng quỹ đạo chuyển động phức tạp của cánh côn trùng trong tự nhiên như dạng số 8, dạng chữ O, dạng chữ U liên quan tới chuyển động lên – xuống của cánh có thể chủ yếu do biến dạng thụ động của kết cấu hoặc của các nhóm cơ lồng ngực chứ không hoàn toàn là chuyển động có chủ đích của côn trùng.

Tiến hành khảo sát ảnh hưởng của độ cứng cho thấy:

- Trong tất cả các trường hợp, lực nâng cũng như hiệu suất năng lượng đạt giá trị lớn nhất khi tần số dao động riêng thứ nhất gấp khoảng hai lần tần số vẫy.

Giá trị này tương tự như của loài bướm *Manduca Sexta* cũng như một số loài côn trùng khác trong tự nhiên.

- Khi độ cứng chống xoắn giảm thì hiệu suất năng lượng tăng lên. Nhưng, khi đó cánh bị biến dạng nhiều hơn và lực nâng bị giảm đi đáng kể.

- Cánh có độ cứng ở mút cánh nhỏ sẽ có hiệu suất năng lượng tốt hơn. Cánh của côn trùng tự nhiên đạt được điều này là do các gân thường có dạng hình côn, đường kính lớn ở gốc và nhỏ dần về phía mút cánh.

Từ những kết quả trên, có thể đưa ra một số khuyến cáo cho quá trình thiết kế, chế tạo TBB cánh vẫy kiểu côn trùng như sau:

- Sử dụng cánh mềm cơ bản sẽ cho lực nâng và hiệu suất năng lượng tốt hơn cánh cứng.

- Có thể bỏ qua chuyển động lên – xuống của cánh khi thiết kế động học cho chuyển động ở gốc cánh, hay nói cách khác không nhất thiết phải tạo ra các quỹ đạo cánh phức tạp như trong tự nhiên. Điều này đồng thời làm giảm số lượng cảm biến và cơ cấu chấp hành cho chuyển động này, giúp giảm khối lượng và độ phức tạp của TBB.

- Trong quá trình thiết kế, cần tiến hành phân tích dao động riêng của kết cấu cánh. Nên lựa chọn độ cứng sao cho tỉ lệ giữa tần số dao động riêng thứ nhất và tần số vẫy gần với giá trị tối ưu. Giảm độ cứng chống xoắn của cánh sẽ tăng hiệu suất năng lượng, nhưng cần đảm bảo đủ lực nâng và độ bền kết cấu.

- Nên thiết kế phân bố gân tăng cứng trên bề mặt cánh sao cho độ cứng ở mút cánh nhỏ để tiết kiệm năng lượng.

KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu lý thuyết và tính toán số trong luận án, rút ra các kết luận:

1. Kết quả đạt được của luận án

- Xây dựng mô hình tính toán FSI cho cánh vẫy kiểu côn trùng, trong đó kết cấu cánh được mô hình hóa dưới dạng hệ vật – lò xo, kết hợp với mô hình khí động lực học dựa trên phương pháp xoáy không dừng UVLM. Mô hình động lực học và mô hình khí động có sự trao đổi thông tin qua lại với nhau để tạo thành mô hình FSI hai chiều hoàn chỉnh.

- Xây dựng phương pháp giải hệ phương trình chuyển động phi tuyến dựa trên phương pháp Quasi-Newton và lý thuyết tìm đường. Độ tin cậy của mô hình

tính toán được kiểm chứng bằng cách so sánh với nhiều số liệu mô phỏng và thực nghiệm đã được công bố.

- Thực hiện khảo sát các đặc tính đàn hồi khí động của cánh cứng và cánh mềm ở chế độ bay treo. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ ảnh hưởng của biến dạng đến sự thay đổi lực khí động và công suất tiêu thụ của cánh.

- Thực hiện khảo sát ảnh hưởng các thông số động học và độ cứng của cánh lên đặc tính tạo lực nâng và hiệu suất năng lượng. Trên cơ sở kết quả khảo sát, luận án đã đưa ra được các đánh giá cụ thể và khuyến cáo cho việc tính toán thiết kế TBB phỏng côn trùng.

2. Những đóng góp mới của luận án

- Xây dựng mô hình động lực học phi tuyến và chương trình mô phỏng FSI hai chiều hiệu năng cao trong nghiên cứu đàn hồi khí động kết cấu cánh vẫy kiểu cánh côn trùng dựa trên hướng tiếp cận động lực học cơ hệ nhiều vật.

- Nghiên cứu đặc tính đàn hồi khí động của cánh ở chế độ bay treo, khảo sát ảnh hưởng của các tham số động học chính (biên độ, tần số vẫy, giá trị trung bình của các góc Euler,...), độ cứng kết cấu (quy luật phân bố của độ cứng chống uốn, chống xoắn) tới các đặc tính đàn hồi khí động (lực nâng, công suất,...) của kết cấu cánh, từ đó rút ra các kết luận, nhận xét, khuyến cáo có giá trị khoa học và thực tiễn trong nghiên cứu TBB phỏng côn trùng.

3. Hướng phát triển tiếp theo của luận án

TBB phỏng côn trùng vẫn là hướng nghiên cứu mới và có nhiều vấn đề cần làm sáng tỏ. Hiện nay luận án chỉ đang nghiên cứu chế độ bay treo của côn trùng, trong tương lai có thể áp dụng cho các chế độ bay tiến hoặc bay lên – xuống. Mô hình cánh mềm cũng có thể được tiếp tục phát triển cho mô hình côn trùng đầy đủ với thân và các cánh mềm, từ đó làm rõ sự tương tác qua lại giữa chuyển động của thân và cánh.

Ngoài ra, việc bay với trạng thái cánh không nguyên vẹn không phải là hiếm trong thực tế đối với TBB và côn trùng cánh vẫy. Các nghiên cứu trước đây chủ yếu dựa trên các thực nghiệm đối với các loài côn trùng và TBB cánh vẫy hoặc dựa trên các mô hình mô phỏng khí động lực học cho cánh cứng. Việc nghiên cứu đặc tính đàn hồi khí động và năng lượng thông qua các mô hình tương tác kết cấu – chất lưu của cánh vẫy mềm khi bị phá hủy một phần vẫn chưa được thực hiện. Do đó, mô hình FSI của luận án có thể được áp dụng để làm rõ vấn đề này.

Ngoài áp dụng cho cánh vẫy kiểu côn trùng, cách tiếp cận mới theo hướng động lực học hệ nhiều vật được phát triển trong luận án có thể được áp dụng cho kết cấu của các đối tượng khác như cánh máy bay có độ dẫn dài lớn, cánh quạt trực thăng, các dạng rô-bốt sử dụng cơ cấu mềm.

CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Vu Đan Thanh Le**, Anh Tuan Nguyen, Ngoc Thanh Dang, (2023), *Multibody-dynamics approach to study the deformation and aerodynamics of a flexible insect wing*, AIAA Journal Vol. 61, No. 6 (2023), pp. 2500-2516 (ISI/SCI, Q1). doi: doi/abs/10.2514/1.J061928

2. **Vu Đan Thanh Le**, Anh Tuan Nguyen, Ngoc Thanh Dang, and Van Binh Phung, (2022), *A Multibody Dynamics Approach to Study an Insect-Wing Structure*, in Modern Mechanics and Applications, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022, Chapter 12, pp. 149-157.

https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6_12 (SCOPUS).

3. **Lê Vũ Đan Thanh**, Nguyễn Anh Tuấn, Đặng Ngọc Thanh, (2022), *Nghiên cứu ảnh hưởng của yếu tố biến dạng đến các đặc tính khí động của cánh vẫy kiểu côn trùng ở chế độ bay treo*, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật số, 17(04), pp. 44-53. doi: 10.56651/lqdtu.jst.v17.n04.402.

4. **Lê Vũ Đan Thanh**, Đặng Ngọc Thanh, Nguyễn Anh Tuấn, (2022), *Nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng đến lực nâng của cánh vẫy kiểu côn trùng*, Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI, Hà Nội, 02-03/12/2022, pp 33 – 40.

5. **Lê Vũ Đan Thanh**, Nguyễn Anh Tuấn, Đặng Ngọc Thanh, (2022), *Nghiên cứu ảnh hưởng của lực khí động đến biến dạng cánh của thiết bị bay cánh vẫy phỏng côn trùng*, Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ lần thứ 17, Hà Nội, 3/2022, pp 635 – 643.

6. **Lê Vũ Đan Thanh**, Đặng Ngọc Thanh, Nguyễn Anh Tuấn, Tạ Đức Hải, (2023), *Nghiên cứu ảnh hưởng của biên độ góc xoay đến lực nâng của cánh vẫy kiểu côn trùng*, Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 25, Hà Nội, 21-23/7/2022, pp 597-603.