BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO BỘ QUỐC PHÒNG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

NGUYỄN VĂN THẮNG

NGHIÊN CỨU HIỆN TƯỢNG CỘNG HƯỞNG DAO ĐỘNG DO CÁC YẾU TỐ BẤT ĐỐI XỨNG VÀ CHUYỂN ĐỘNG QUAY QUANH TRỤC CỦA MẪU TÊN LỬA THĂM DÒ Ở TẦNG THẤP

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9 52 01 01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – NĂM 2026

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

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS Nguyễn Anh Tuấn

2. PGS. TS Vũ Quốc Trụ

Phản biện 1: GS. TS Nguyễn Thái Chung

Học viện Kỹ thuật quân sự

Phản biện 2: GS. TS Nguyễn Đình Kiên

Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Phản biện 3: PGS. TS Vũ Đình Quý

Đại học Bách khoa Hà Nội

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số ……/QĐ-HV, ngày … tháng … năm 2026 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật quân sự; họp tại: Học viện Kỹ thuật quân sự vào hồi 8 giờ 30 ngày … tháng … năm 2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

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

MỞ ĐẦU

Lý do chọn đề tài

Tên lửa thăm dò là lĩnh vực nghiên cứu có tính ứng dụng cao trong khoa học và quốc phòng, được nhiều quốc gia quan tâm phát triển. Thực tiễn cho thấy quá trình thiết kế - chế tạo vẫn tồn tại các sai số không mong muốn như lệch tâm khối lượng, lệch hướng lực đẩy, hay sai số hình học, dẫn đến các yếu tố bất đối xứng ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định chuyển động của tên lửa.

Với vận tốc lớn và môi trường khí quyển biến đổi phức tạp, các yếu tố bất đối xứng nhỏ có thể gây nên mô-men cảm ứng, dao động cộng hưởng hoặc khóa tần số, làm thay đổi quỹ đạo và thậm chí phá hủy cấu trúc tên lửa. Trong bối cảnh Việt Nam đang hướng tới làm chủ công nghệ tên lửa, việc nghiên cứu sâu ảnh hưởng của các yếu tố bất đối xứng là cấp thiết nhằm đảm bảo tính ổn định, an toàn và độ tin cậy của bay thử nghiệm.

Do đó, đề tài "***Nghiên cứu hiện tượng cộng hưởng dao động do các yếu tố bất đối xứng và chuyển động quay quanh trục của mẫu tên lửa thăm dò ở tầng thấp***" được lựa chọn nhằm góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho thiết kế, chế tạo, và kiểm chứng mô hình tên lửa trong điều kiện thực tế của Việt Nam.

Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là mô hình tên lửa thăm dò một tầng động cơ nhiên liệu rắn, không điều khiển hoạt động ở tầng thấp.

Mục đích và phạm vi nghiên cứu

- Mục đích: Xây dựng các mô hình tính toán và mô phỏng khí động và động lực học bay của tên lửa thăm dò khi tính đến đầy đủ các yếu tố đặc trưng về mặt khí động, động lực học; Khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố bất đối xứng của tên lửa thăm dò đến các tham số quỹ đạo bay và sự cộng hưởng dao động khi có chuyển động quay quanh trục; Đánh giá và đưa ra khuyến cáo.

- Phạm vi nghiên cứu: Hiện tượng cộng hưởng dao động và hiện tượng khóa tần số do sự bất đối xứng và chuyển động quay quanh trục của tên lửa thăm dò và các vấn đề động lực học có liên quan.

Nội dung nghiên cứu

- Nghiên cứu tổng quan về tên lửa thăm dò và các vấn đề động lực học, cộng hưởng chuyển động.

- Xây dựng phương pháp, mô hình tính toán xác định đặc trưng khí động và mô hình tính toán động lực học theo lý thuyết và chương trình mô phỏng động lực học bay cho tên lửa thăm dò.

- Kiểm chứng các phương pháp nghiên cứu và mô hình tính toán.

- Nghiên cứu hiện tượng cộng hưởng dao động và khóa tần số do các yếu tố bất đối xứng gây ra.

Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu trong luận án **d**ựa trên phân tích lý thuyết, tính toán và mô phỏng số, đồng thời kết hợp với một số dữ liệu thực nghiệm phục vụ kiểm chứng mô hình.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

- Luận án đã đề xuất và phát triển các phương pháp nghiên cứu, mô hình tính toán đặc tính khí động, động lực học có thể áp dụng cho tên lửa thăm dò nói riêng và các phương tiện bay tốc độ cao nói chung. Các mô hình lý thuyết và công cụ tính toán được xây dựng cho phép phân tích chi tiết các hiện tượng động lực học phức tạp như cộng hưởng và khóa tần số.

- Kết quả nghiên cứu trong luận án góp phần làm sáng tỏ cơ chế tương tác giữa các yếu tố bất đối xứng và chuyển động quay quanh trục của tên lửa thăm dò; từ đó đưa ra các khuyến nghị kỹ thuật nhằm hoàn thiện thiết kế, nâng cao tính năng hoạt động và độ tin cậy trong tương lai.

Bố cục của luận án

Cấu trúc chính của luận án gồm phần mở đầu, 4 chương, kết luận và phụ lục, tham khảo 76 tài liệu.

Chương 1 Nghiên cứu tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Chương 2 Xây dựng bài toán và các mô hình nghiên cứu

Chương 3 Xây dựng chương trình tính toán, mô phỏng và kiểm chứng

Chương 4 Phân tích cộng hưởng giữa dao động do sự bất đối xứng và chuyển động quay quanh trục

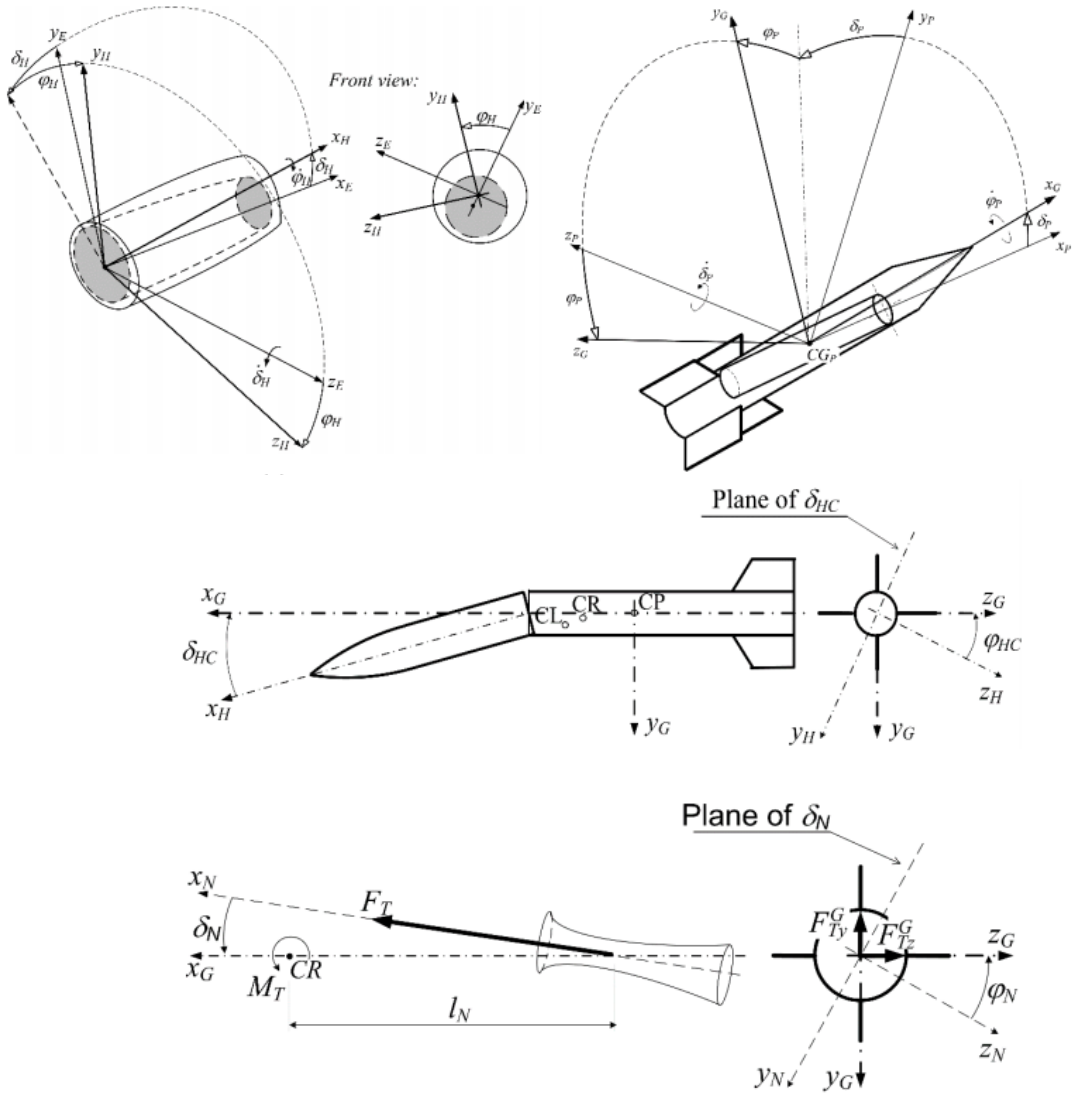
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Chương này trình bày khái niệm về tên lửa thăm dò cùng sơ đồ phối trí cấu trúc và các bộ phận chính của nó nhằm làm rõ đặc điểm hình học, nguyên lý hoạt động và phạm vi ứng dụng của loại phương tiện bay đặc thù này. Đồng thời, chương này cũng giới thiệu các mô hình nghiên cứu khí động học và động lực học bay đang được sử dụng hiện nay, từ các mô hình chất điểm đơn giản đến mô hình sáu bậc tự do, cùng với các kỹ thuật tính toán khí động như phương pháp panel, phương pháp bán thực nghiệm và mô phỏng số.

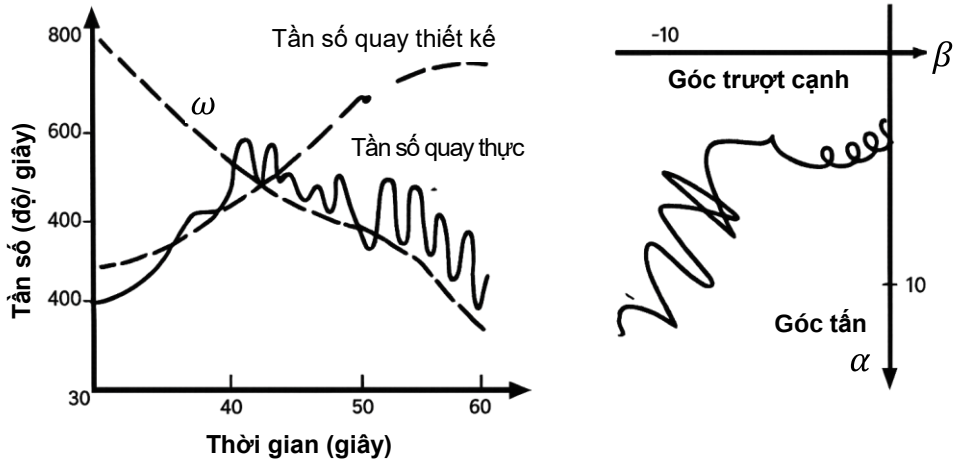
Bên cạnh đó, chương này cũng giới thiệu về các loại bất đối xứng điển hình của tên lửa thăm dò thường xuất hiện, như bất đối xứng khí động, lực đẩy và khối lượng (hình 1.1).

Nghiên cứu về tên lửa thăm dò vẫn còn khá hạn chế tại Việt Nam, chủ yếu là các nội dung và công bố liên quan tới các đề tài thiết kế chế tạo các mẫu tên lửa TV-01 và TV-02 do Học viện Kỹ thuật Quân sự thực hiện, thuộc Chương trình Khoa học và công nghệ cấp Quốc gia về công nghệ vũ trụ trong các giai đoạn từ 2012-2020.

Nhìn chung, các nghiên cứu về hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số của tên lửa thăm dò chủ yếu dựa vào các mô hình toán học và vật lý đơn giản; Chưa phân tích và khảo sát trong các mô hình mô phỏng bay với điều kiện thực tế. Bên cạnh đó, các vấn đề liên quan tới sự thay đổi khối lượng, trọng tâm và các đặc điểm quán tính khác cũng chưa được nghiên cứu một cách chi tiết và cụ thể hóa trong các phương trình động lực học tên lửa.



Hình 1. 1. Một số dạng bất đối xứng của tên lửa thăm dò.



Hình 1. 2. Hiện tượng khóa tần số xảy ra khi cộng hưởng các kênh chuyển động của tên lửa thăm dò [48]

Từ những khoảng trống nêu trên, luận án tập trung thực hiện các nội dung nghiên cứu chính như sau:

(1) Xây dựng mô hình tính toán khí động lực học đơn giản và hiệu quả cho tên lửa thăm dò dựa trên phương pháp panel kết hợp với các công thức

bán thực nghiệm, đồng thời kiểm chứng mô hình bằng dữ liệu thực nghiệm đã được công bố.

(2) Xây dựng mô hình động lực học bay 6 bậc tự do trên cơ sở các hệ số khí động thu được, có xét đến các yếu tố bất đối xứng và sự thay đổi của các thông số khối lượng, quán tính trong quá trình bay.

(3) Khảo sát hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số, đánh giá ảnh hưởng của chúng đến đặc tính động lực học bay cũng như sự biến thiên các tham số chuyển động trong vùng lân cận cộng hưởng.

Kết quả nghiên cứu của luận án góp phần làm sáng tỏ cơ chế của các hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số trong chuyển động tên lửa thăm dò do các yếu tố bất đối xứng; đồng thời đề xuất cách tiếp cận dựa trên việc kết hợp mô hình tính toán, mô phỏng và mô hình phân tích lý thuyết trong phân tích động lực học bay của các loại tên lửa và phương tiện bay tốc độ cao khác trong tương lai.

CHƯƠNG 2: XÂY DỰNG BÀI TOÁN VÀ MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

Để nghiên cứu động lực học liên quan tới sự cộng hưởng giữa dao động của tên lửa do các yếu tố bất đối xứng và chuyển động quay quanh trục cần giải quyết các bài toán khí động lực học, động lực học bay. Trong chương này, luận án trình bày các phương pháp để giải quyết các bài toán trên, bao gồm phương pháp panel kết hợp với các công thức bán thực nghiệm cho tính toán khí động lực học; các mô hình động lực học chất điểm và mô hình 6 bậc tự do; phương pháp xác định tần số dao động riêng và vận tốc quay quanh trục.

2.1. Xây dựng bài toán nghiên cứu

Hình 2. 1. Hình ảnh tên lửa TV-02.

Đối tượng nghiên cứu trong luận án là mẫu rút gọn một tầng của tên lửa thăm dò TV-02 thuộc đề tài "Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mẫu tên lửa thăm dò (Sounding Rocket) đưa thiết bị phục vụ nghiên cứu khoa học để thử nghiệm thu thập dữ liệu khí quyển tầng cao", mã số VT-CN.02/18-20. Thông số chính của tên lửa được thể hiện trên bảng dưới đây.

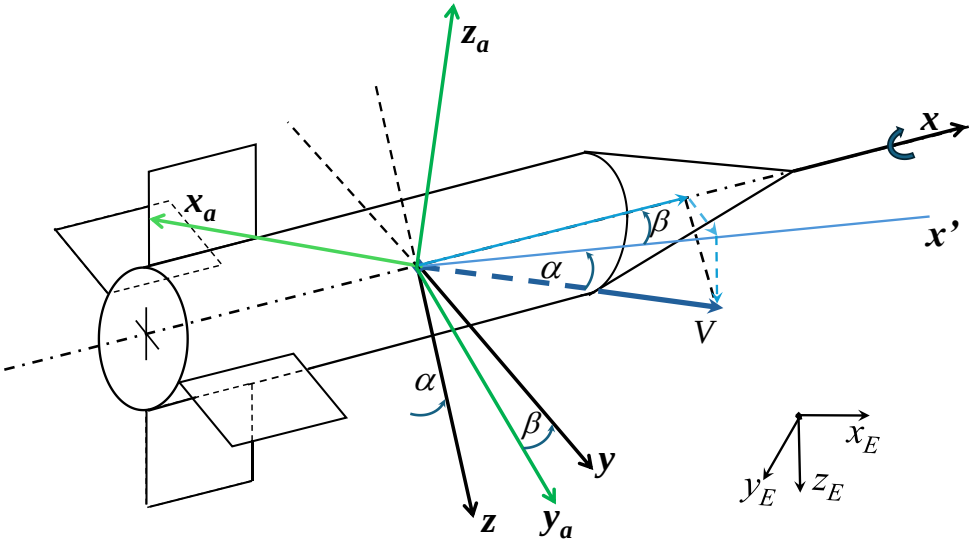
Bảng các tham số chính của tên lửa TV-02

Tham số	**Giá trị**
Khối lượng	27.3 kg
Đường kính thân	0.12 m
Chiều dài	2.018 m
Khối lượng thuốc phóng	16.7 kg
Thời gian cháy của thuốc phóng	4.25 s
Lực đẩy động cơ	5925 N

Chiều dài ray phóng	6 m
Góc phóng	83°
Chiều dài mũi	0.408 m
Chiều dài thân	1.610 m
Diện tích cánh đuôi	0.0124 m^2
Mô-men quán tính ban đầu	I_{xx} = 0.0619 kg.m^2, $I_{yy} = I_{zz}$ = 5.37 kg.m^2
Vị trí trọng tâm ban đầu (tính từ mũi)	1.2880 m

Do mẫu tên lửa thăm dò xem xét trong luận án có độ cao hoạt động (dưới 15 km) và thời gian hoạt động ngắn (dưới 2 phút), nên ảnh hưởng của độ cong bề mặt và chuyển động quay của trái đất là không đáng kể, có thể bỏ qua trong quá trình tính toán và khảo sát hiện tượng cộng hưởng.

Chính vì vậy, trong luận án này NCS chỉ sử dụng các hệ trục tọa độ Hệ tọa độ liên kết xyz với gốc tọa độ tại trọng tâm của tên lửa; Hệ trục tọa độ tốc độ $x_a y_a z_a$ với gốc tọa độ tại trọng tâm tên lửa; Hệ tọa độ mặt đất $x_E y_E z_E$ với gốc tọa độ tại vị trí phóng (hình 2.2).



Hình 2. 2. Các hệ trục tọa độ.

Các lực và mô-men khí động các trục trong hệ tọa độ liên kết được tính theo các công thức sau:

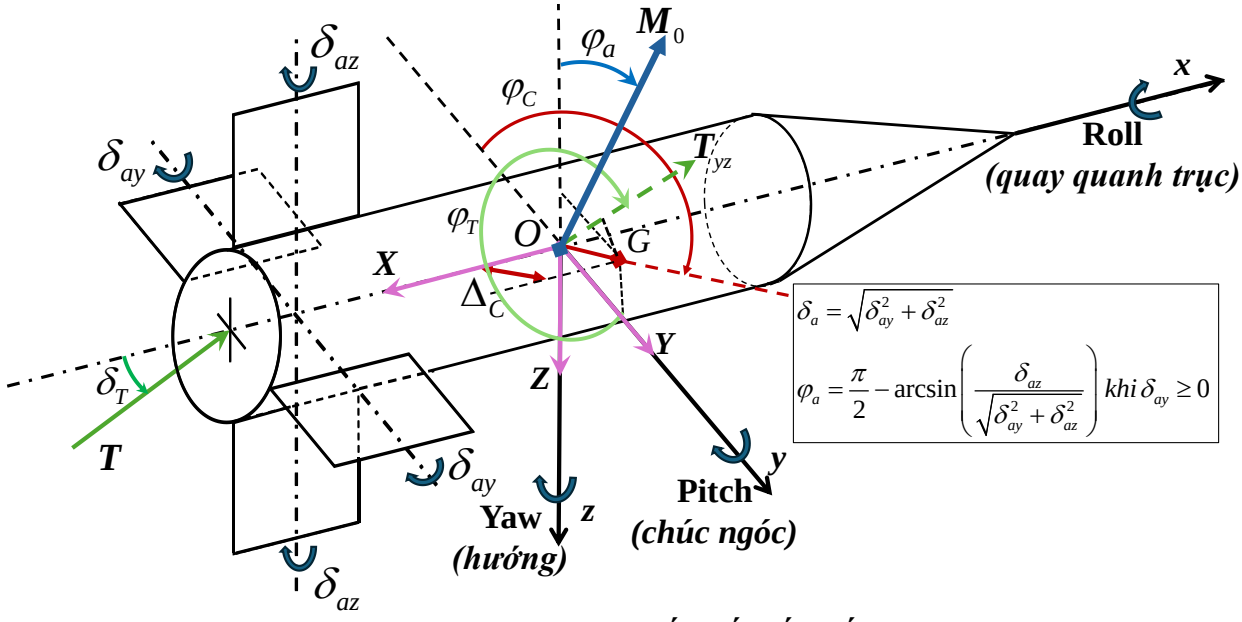
$$X = C_x \frac{\rho V^2}{2} S_{ref} \qquad Y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S_{ref} \qquad Z = C_z \frac{\rho V^2}{2} S_{ref}$$
$$L = C_l \frac{\rho V^2}{2} S_{ref} l_{ref} \quad M = C_m \frac{\rho V^2}{2} S_{ref} l_{ref} \quad N = C_n \frac{\rho V^2}{2} S_{ref} l_{ref} \tag{2.1}$$

Trong hệ trục tọa độ tốc độ, lực nâng và lực cản được xác định như sau:

$$Z_a = C_L \frac{\rho V^2}{2} S_{ref} \quad X_a = C_D \frac{\rho V^2}{2} S_{ref} \tag{2.2}$$

Trong đó: C_L, C_D lần lượt là lực nâng và lực cản của tên lửa.

Các yếu tố bất đối xứng được biểu diễn trên hình 2.3, trong đó: bất đối xứng khí động (δ_a , φ_a), lực đẩy (δ_T , φ_T), khối lượng (Δ_C , φ_C).

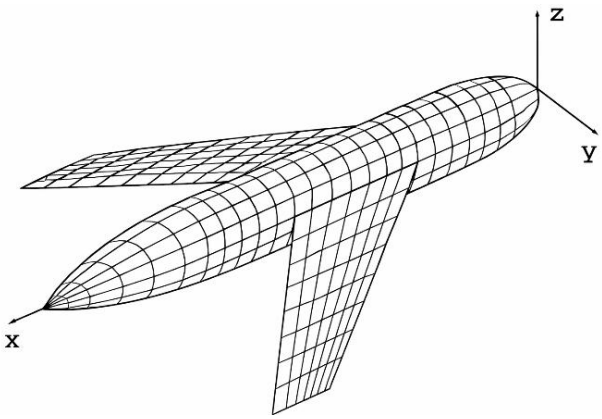


Hình 2.3. Các yếu tố bất đối xứng.

2.2. Phương pháp xác định các đặc tính khí động lực học

2.2.1. Phương pháp panel trong tính toán khí động lực học

Phương pháp panel mô phỏng trường dòng quanh các vật thể khí động có hình dạng phức tạp như máy bay hay tên lửa bằng cách phân chia bề mặt vật thể thành nhiều panel nhỏ, mỗi panel mang một phần tử kỳ dị (hình 2.4). Các giả thiết khi áp dụng phương pháp panel: dòng không nhớt; dòng chảy dừng.



Hình 2.4. Tổ hợp cánh - thân thiết bị bay điển hình.

Phương trình Prandtl-Glauert đặc trưng cho dòng thế có tính đến tính nén được biểu diễn như sau:

$$\left(1 - M_a^2\right)\varphi_{xx} + \varphi_{yy} + \varphi_{zz} = 0 \qquad (2.3)$$

Trong đó: M_a là số Mach; φ là hàm thế vận tốc nhiễu động, với $\varphi_{xx}, \varphi_{yy}, \varphi_{zz}$ là các đạo hàm riêng cấp 2 theo các tọa độ *x*, *y*, *z*.

Thế vận tốc của các phần tử kỳ dị:

- Đối với phần tử kỳ dị dạng dây với cường độ đơn vị:

$$\varphi_n = \int \frac{f_n(\xi)\,d\xi}{\left[\left(x-\xi\right)^2 + \left(1 - M^2\right)r^2\right]^{1/2}}. \qquad (2.4)$$

- Đối với phần tử kỳ dị dạng panel với cường độ đơn vị:

$$\varphi_n = \frac{K}{n}\iint \frac{f_n(\xi,\eta)d\xi d\eta}{\left\{(x-\xi)^2+\left(1-M_a^2\right)\left[(y-\eta)^2+z^2\right]\right\}^{1/2}} + \frac{1-K}{\pi}\iint \frac{z d\xi d\eta}{(y-\eta)^2+z^2}. \quad (2.5)$$

Ở đây f_n là hàm phân bố cường độ tại phần tử kỳ dị theo tọa độ, K là hằng số.

Hệ số áp suất C_p được xác định theo công thức sau:

$$C_p = \frac{2}{\gamma M_\infty^2}\left\{\left[1+\frac{\gamma-1}{2}M_\infty^2\left(1-\left(1+\Delta\bar{u}\right)^2+\Delta\bar{v}^2+\Delta\bar{w}^2\right)\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}-1\right\} \quad (2.6)$$

2.2.2. Phương pháp tính toán một số thành phần lực cản

Lực cản chính diện của tên lửa bao gồm ba thành phần:

$$C_{D0} = C_{D_p} + C_{D_f} + C_{D_b} \quad (2.7)$$

Lực cản áp suất được xác định từ phương pháp panel, còn hệ số lực cản ma sát và hệ số lực cản đáy xác định theo các công thức thực nghiệm sau:

$$C_{D_f} = 0.053\times\frac{l}{d}\frac{14.6M_a}{\left(\frac{\rho V^2}{2}l\right)^{0.2}} + \frac{n_f\times 0.023}{\left(\frac{\rho V^2}{2}c_{mac}\right)^{0.2}}\times 2\times\frac{S_f}{S_{ref}} \quad (2.8)$$

$$C_{D_b} = \left(0.12+0.13M_a^2\right) \ khi\, M_a<1; \qquad C_{D_b} = \frac{0.25}{M_a} \ khi\, M_a>1. \quad (2.9)$$

2.2.3. Phương pháp tính toán các thành phần khí động không dừng

Lực khí động pháp tuyến không dừng và mô-men chúc ngóc không dừng tác dụng lên thân tên lửa dựa trên lý thuyết Munk được biểu diễn trong hệ tọa độ liên kết như sau:

$$Z_{body} = -\rho\int_{body} S(x)\dot{w}(x)dx; \qquad M_{body} = \rho\int_{body} S(x)\dot{w}(x)xdx. \quad (2.10)$$

Các hệ số lực pháp tuyến và mô-men chúc ngóc như sau:

$$C_{Z(body)} = -\frac{1}{\frac{1}{2}V^2 S_{ref}}\int_{body} S(x)\left(\dot{\alpha}V-\dot{q}x\right)dx; \qquad M_{(body)} = \frac{1}{\frac{1}{2}V^2 S_{ref} l_{ref}}\int_{body} S(x)\left(\dot{\alpha}V-\dot{q}x\right)xdx. \quad (2.11)$$

Ta thu được các đạo hàm hệ số khí động không dừng cho thân tên lửa:

$$C_{Z_{\dot{\alpha}^*}(body)} = -\frac{4}{S_{ref} l_{ref}} \int_{body} S(x)dx \quad C_{Z_{\dot{q}^*}(body)} = \frac{8}{S_{ref} l_{ref}^2} \int_{body} S(x)xdx$$
$$C_{m_{\dot{\alpha}^*}(body)} = \frac{4}{S_{ref} l_{ref}^2} \int_{body} S(x)xdx \quad C_{m_{\dot{q}^*}(body)} = \frac{-8}{S_{ref} l_{ref}^3} \int_{body} S(x)x^2dx \tag{2.12}$$

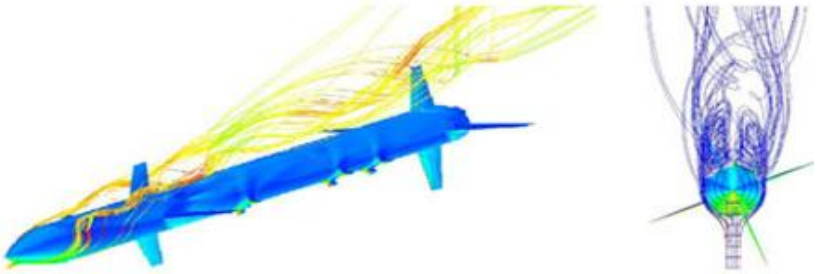
Các đạo hàm hệ số khí động không dừng theo thời gian cho cánh/đuôi xác định theo hiệu ứng khối lượng bổ sung:

$$C_{Z_{\dot{\alpha}^*(fin)}} = -\frac{n_f \pi}{l_{ref} S_{ref}} \int_{fin} c^2(y)dy; \quad C_{Z_{\dot{q}^*(fin)}} = \frac{2n_f \pi x_f}{S_{ref} l_{ref}^2} \int_{fin} c^2(y)dy;$$
$$C_{m_{\dot{\alpha}^*(fin)}} = \frac{n_f \pi x_f}{l_{ref} S_{ref}} \int_{fin} c^2(y)dy; \quad C_{m_{\dot{q}^*(fin)}} = -\frac{2n_f \pi x_f^2}{S_{ref} l_{ref}^3} \int_{fin} c^2(y)dy \tag{2.13}$$

Hệ số mô-men quay quanh trục không dừng và đạo hàm của nó được tính theo công thức:

$$C_l = -\frac{n_f}{\frac{1}{2}V^2 S_{ref} l_{ref}} \times \frac{\pi}{4} \dot{p} \int_{fin} c^2(y) ydy$$
$$C_{l_{\dot{p}^*}} = \frac{-2n_f \pi}{S_{ref} l_{ref}^3} \int_{fin} c^2(y) ydy \tag{2.14}$$

2.2.2. Phương pháp tính mô-men cảm ứng quanh trục dọc



Hình 2.5. Ảnh hưởng của tách dòng tại mũi tên lửa đến các cánh đuôi .

Dựa trên dữ liệu thực nghiệm, hệ số mô-men cảm ứng quanh trục dọc và biên độ được xác định:

$$C_{l_i} = C_{l_i}^a \sin(n\varphi_a) \tag{2.15}$$

$$C_{l_i}^a = \left(13.95\alpha_{sp}^3 - 3.17\alpha_{sp}^2 + 0.03\alpha_{sp}\right)\frac{d_{body} S_{fin}}{l_{ref} S_{ref}} \tag{2.16}$$

Trong đó, α_{sp} là góc tấn không gian; d_{body} và S_{fin} lần lượt là đường kính thân và diện tích cánh đuôi; l_{ref} và S_{ref} là độ dài và diện tích đặc trưng, trong nghiên cứu này được lựa chọn tương ứng với bán kính và diện tích mặt cắt thân; n - số lượng cánh đuôi; φ_a là góc quay quanh trục trong hệ tọa độ vận tốc và được xác

định như sau $\varphi_a = \arctan(\alpha / \beta)$ khi $\beta > 0$ và $\varphi_a = \pi + \arctan(\alpha / \beta)$ khi $\beta < 0$, với α, β là góc tấn và góc trượt cạnh (hình 2.5).

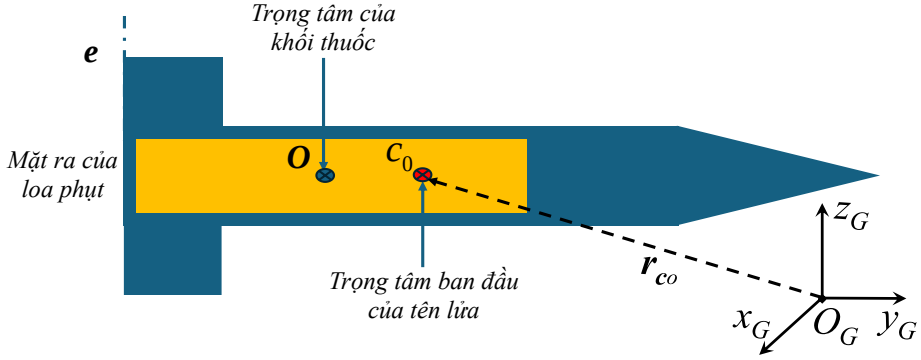
2.3. Mô hình động lực học của tên lửa thăm dò

2.3.1. Mô hình 6 bậc tự do có tính đến ảnh hưởng của sự thay đổi khối lượng

Hệ phương trình chuyển động được xây dựng như sau:

$$\begin{aligned}
&\mathbf{F}^b + \mathbf{F}_T^b + \Delta m \ddot{\mathbf{r}}_O^b + \dot{m}\dot{\mathbf{r}}_{Oe}^b + 2\dot{m}\boldsymbol{\omega}^b \times \mathbf{r}_{Oe}^b = m_0 \ddot{\mathbf{r}}_{c_0}^b \\
&\mathbf{M}_O^b + \mathbf{M}_T^b + \Delta \mathbf{I}^b \frac{d\boldsymbol{\omega}^b}{dt} + \boldsymbol{\omega}^b \times \left(\Delta \mathbf{I}^b \boldsymbol{\omega}^b\right) = \\
&= -m_0 \ddot{\mathbf{r}}_O^b \times \mathbf{r}_{Oc_0}^b + \mathbf{I}_0^b \frac{d\boldsymbol{\omega}^b}{dt} + \boldsymbol{\omega}^b \times \left(\mathbf{I}_0^b \boldsymbol{\omega}^b\right)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Ở đây, m_0 và $\mathbf{I}_0^b$ lần lượt là khối lượng và ten-zơ mô-men quán tính ban đầu; Δm và $\Delta \mathbf{I}^b$ là khối lượng và ten-zơ mô-men quán tính bị mất đi; $\mathbf{F}_T^b$ và $\mathbf{M}_T^b$ lần lượt là lực và mô-men do lực đẩy động cơ sinh ra; $\mathbf{F}^b$ và $\mathbf{M}_O^b$ là lực và mô-men ngoại lực; $\boldsymbol{\omega}^b$ là véc-tơ vận tốc góc; $\mathbf{r}$ là véc-tơ tọa độ không gian; chỉ số O dùng để chỉ vị trí tọa độ gốc gắn trên tên lửa được lựa chọn ở trọng tâm khối thuốc phóng; c_0 là vị trí trọng tâm ban đầu của tên lửa (hình 2.6).



Hình 2.6. Mô hình tên lửa cùng nhiên liệu.

2.3.2. Mô hình chuyển động góc của tên lửa thăm dò

Khi nghiên cứu đặc tính động lực học tức thời của tên lửa, ta bỏ qua ảnh hưởng của sự biến đổi khối lượng, đặc tính quán tính, vị trí trọng tâm, chọn gốc tọa độ tại vị trí tức thời của trọng tâm tên lửa, hệ phương trình chuyển động có dạng:

$$\begin{aligned}
&\mathbf{F}^b + \mathbf{F}_T^b = m\ddot{\mathbf{r}}_c^b \\
&\mathbf{M}_c^b + \mathbf{M}_T = \mathbf{I}^b \frac{d\boldsymbol{\omega}^b}{dt} + \boldsymbol{\omega}^b \times \left(\mathbf{I}^b \boldsymbol{\omega}^b\right)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Ở đây m, $\mathbf{I}^b$ và vị trí trọng tâm c là các đại lượng tức thời được xác định quanh thời điểm nghiên cứu.

Sau khi chiếu lên các trục tọa độ phương trình (2.18), ta thu được hệ phương trình động lực học mô tả chuyển động của tên lửa:

$$
\begin{aligned}
&X - mg\sin\theta = m\left(\dot{u} + qw - rv\right)\\
&Y + mg\cos\theta\sin\phi = m\left(\dot{v} + ru - pw\right)\\
&Z + mg\cos\theta\cos\phi = m\left(\dot{w} + pv - qu\right)\\
&L = I_x\dot{p} - I_{xz}\dot{r} + qr\left(I_z - I_y\right) - I_{xz}pq\\
&M = I_y\dot{q} + rp\left(I_x - I_z\right) - I_{xz}\left(p^2 - r^2\right)\\
&N = -I_{xz}\dot{p} + I_z\dot{r} + pq\left(I_y - I_x\right) + I_{xz}qr
\end{aligned}
\qquad (2.19)
$$

Trong đó: X, Y, Z – các lực khí động, L, M, N – các mô-men khí động trong hệ trục tọa độ liên kết; u, v, w – các vận tốc theo các trục; p, q, r – các vận tốc góc theo các trục trong hệ trục tọa độ liên kết.

Sử dụng các giả thiết để đơn giản hóa, đồng thời biến đổi bằng phương pháp thế, ta thu được phương trình của góc tấn và góc trượt cạnh như sau

$$
\begin{aligned}
&\ddot{\beta} + A_1\dot{\beta} - A_2\dot{\alpha} - B_1\beta + B_2\alpha = C_1;\\
&\ddot{\alpha} + A_1\dot{\alpha} + A_2\dot{\beta} - B_1\alpha - B_2\beta = C_2;\\
&\dot{p} = L / I_x.
\end{aligned}
\qquad (2.20)
$$

Trong đó các hệ số của hệ phương trình xác định như sau:

$$A_1 = \frac{QS_{ref}}{mV}\left(C_{L_\alpha} - \frac{ml_{ref}^2}{2I_y}\left(C_{m_{q^*}} + C_{m_{\dot{\alpha}^*}}\right)\right);\ A_2 = p\left(2 - \frac{I_x}{I_y}\right);$$

$$B_1 = \frac{C_{m_\alpha}QS_{ref}l_{ref}}{I_y} + \frac{C_{m_{\dot{\theta}}}QS_{ref}l_{ref}}{I_y}\frac{C_{N_\alpha}QS_{ref}}{mV} + p^2\left(1 - \frac{I_x}{I_y}\right);$$

$$B_2 = -p\frac{QS_{ref}}{mV}\left[C_{L_\alpha}\left(1 - \frac{I_x}{I_y}\right) - \frac{ml_{ref}^2}{2I_y}\left(C_{m_{q^*}} + C_{m_{\dot{\alpha}^*}}\right)\right];$$

$$C_1 = \left[\Delta C_{m_a}\cos\varphi_a + \left(C_A - \frac{T}{QS_{ref}}\right)\frac{\Delta_C}{l_{ref}}\cos\varphi_C\right]\frac{QS_{ref}l_{ref}}{I_y} + \frac{T\delta_T r_e}{I_y}\cos\varphi_T;$$

$$C_2 = \left[\Delta C_{m_a}\sin\varphi_a - \left(C_A - \frac{T}{QS_{ref}}\right)\frac{\Delta_C}{l_{ref}}\sin\varphi_C\right]\frac{QS_{ref}l_{ref}}{I_y} + \frac{T\delta_T r_e}{I_y}\sin\varphi_T.$$

Thông qua việc giải hệ phương trình (2.20), ta xác định được tần số dao động riêng ω_n của hệ (khi tên lửa không quay). Bằng cách phân tích các đại lượng này, ta sẽ tìm ra nguyên nhân của hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số, cũng như các hiệu ứng gây ra bởi các hiện tượng này.

Khi tên lửa quay quanh trục với vận tốc góc *p*, tần số dao động riêng của hệ sẽ tách thành 2 tần số riêng biệt $\omega_n\left(\sqrt{1-\frac{A_1^2}{4\omega_n^2}}\pm\frac{p}{\omega_n}\right)$. Khi đó, trong bài toán nghiên cứu cộng hưởng và khóa tần số, ta cần xem xét động thời cả hai tần số này.

2.3.3. Mô hình chất điểm

Mô hình chất điểm nhằm xây dựng quỹ đạo sơ bộ của tên lửa:

$$\mathbf{F}_a+\mathbf{F}_T+m\mathbf{g}=m\ddot{\mathbf{r}}, \tag{2.21}$$

trong đó: *m* là khối lượng tên lửa, **r** là tọa độ của tên lửa trong hệ tọa độ tốc độ, $\mathbf{F}_T$ là lực đẩy do động cơ tạo ra, $\mathbf{F}_a$ là lực khí động học, **g** là gia tốc trọng trường.

Phương trình (2.21) được giải theo phương pháp số dự đoán và chỉnh sửa với độ chính xác bậc 2 theo bước thời gian *dt*. Trước hết ta biểu diễn vận tốc tên lửa bởi $\mathbf{V}=\mathbf{V}(t)=\dot{\mathbf{r}}$, phương trình (2.21) được viết lại như sau:

$$\dot{\mathbf{V}}(t)=\frac{\mathbf{F}_a(V,r)}{m(t)}+\frac{\mathbf{F}_T(t)}{m(t)}+\mathbf{g} \tag{2.22}$$

2.4. Kết luận chương 2

Chương 2 đã giới thiệu:

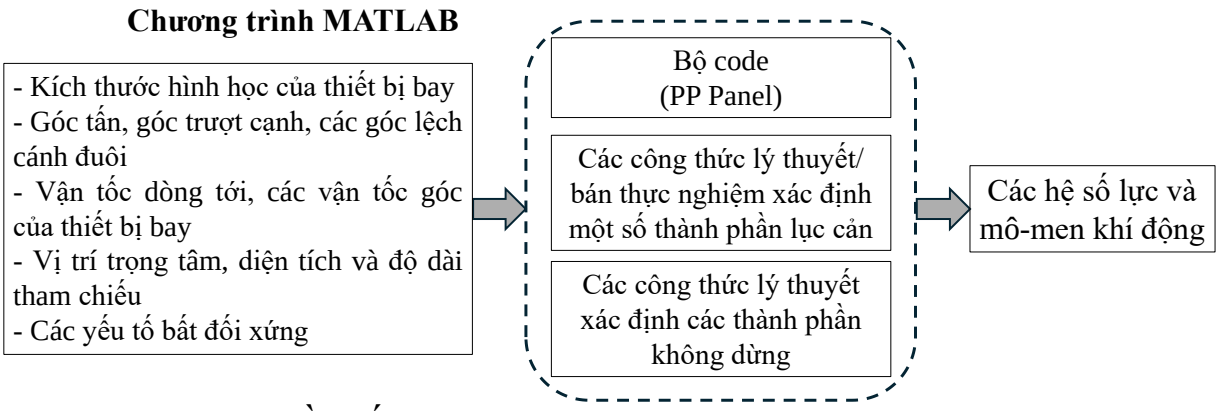
- Các tham số hình học - khối lượng, hệ trục tọa độ, các lực và mô-men tác dụng. Các dạng bất đối xứng và cách mô hình hóa chúng được trình bày rõ ràng và đưa vào phân tích.
- Phương pháp panel kết hợp công thức bán thực nghiệm để xác định trọn bộ hệ số khí động cho dải vận tốc rộng với thời gian tính toán ngắn, bao gồm hiệu ứng không dừng và mô-men cảm ứng.
- Các mô hình động lực học: Mô hình 6 bậc tự do mô tả chính xác sự biến thiên khối lượng, vị trí trọng tâm, đặc tính quán tính và cho phép tích hợp thuận lợi các yếu tố bất đối xứng; Mô hình chuyển động góc xây dựng hệ phương trình vi phân để phân tích cộng hưởng và khóa tần số, xác định góc tấn, góc trượt cạnh và tần số quay; Mô hình chất điểm xây dựng các tham số cơ bản của quỹ đạo bay.

CHƯƠNG 3: XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN, MÔ PHỎNG VÀ KIỂM CHỨNG

3.1. Chương trình tính toán khí động và kiểm chứng

3.1.1. Mô tả chương trình tính toán

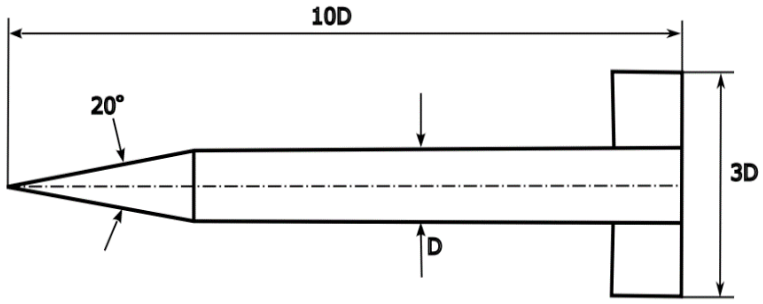
Chương trình tính toán khí động lực học được mô tả theo sơ đồ trên Hình 3.1. Các thành phần lực khí động không xác định được theo lý thuyết dòng thế (lực cản nhớt, lực cản đáy và các thành phần khí động không dừng) được bổ sung trong chương trình tính toán thông qua các công thức lý thuyết và bán thực nghiệm.



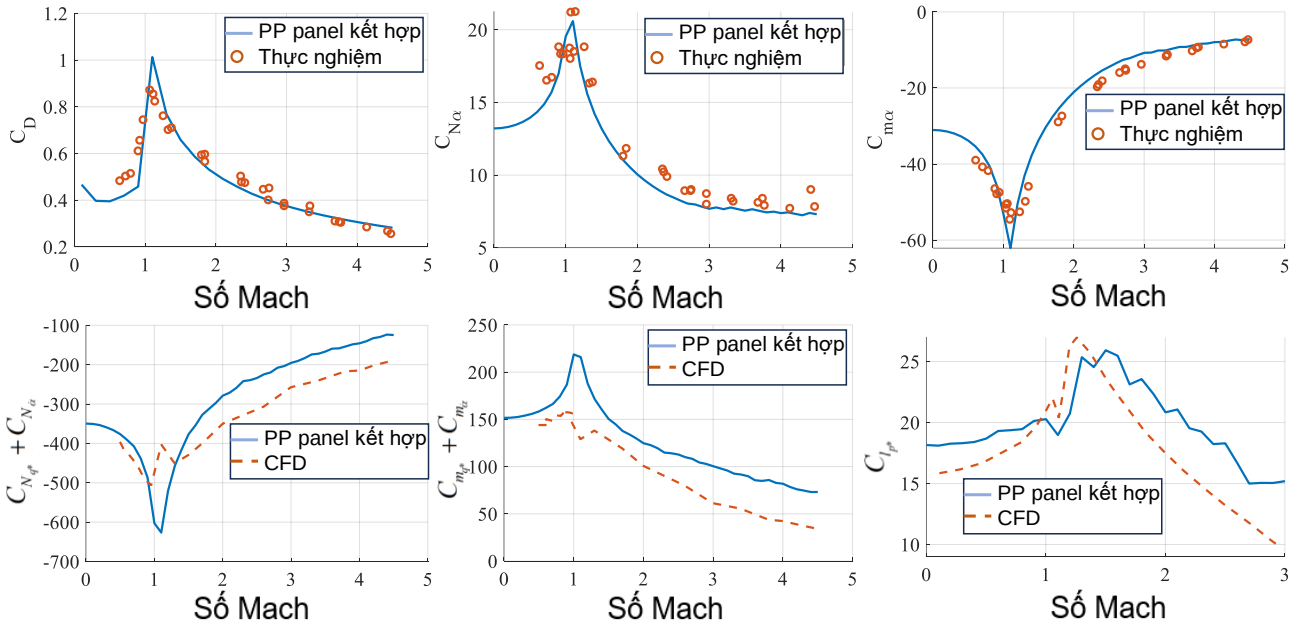
Hình 3.1. Sơ đồ khối của chương trình tính toán khí động cho tên lửa.

3.1.2. Kiểm chứng

Để kiểm chứng phương pháp và chương trình tính toán khí động, ta đưa vào mẫu tên lửa thăm dò đơn giản Finner (hình 3.2) và so sánh với kết quả thử nghiệm. các hệ số khí động được tính toán theo phương pháp panel kết hợp với các công thức lý thuyết bán thực nghiệm (hình 3.3).



Hình 3. 2. Mô hình mẫu tên lửa Finner (D=3 cm).



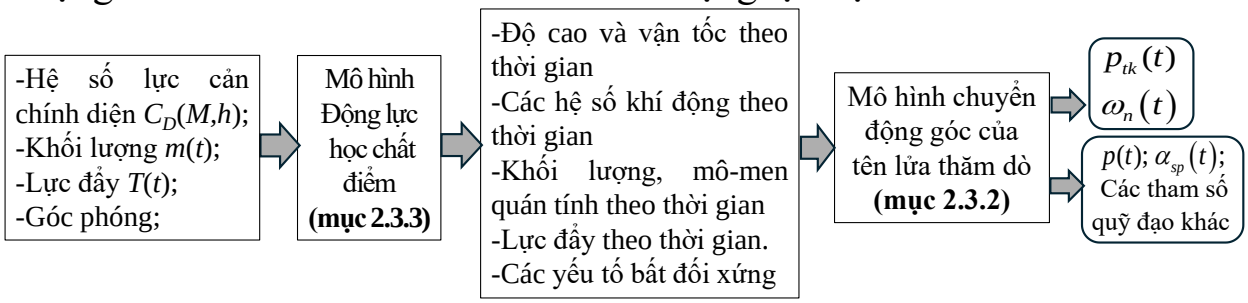
Hình 3. 3. Kết quả tính toán và kiểm chứng các hệ số lực và mô-men khí động

3.2. Chương trình tính toán, mô phỏng động lực học và kiểm chứng

Trong luận án này, chương trình tính toán, mô phỏng được xây dựng cho mẫu rút gọn của tên lửa TV-02 (hình 2.1). Việc kiểm chứng được thực hiện bằng cách so sánh kết quả mô phỏng với kết quả tính toán lý thuyết và một số dữ liệu từ thử nghiệm bắn bay.

3.2.1. Chương trình tính toán động lực học theo cách tiếp cận lý thuyết

Chương trình tính toán được thực hiện theo sơ đồ trên hình 3.4: Trước hết, áp dụng phương pháp tính toán khí động cho mô hình tên thăm dò đã nêu trong luận án, ta xác định được các hệ số khí động cùng các đạo hàm của chúng, được sử dụng làm đầu vào cho bài toán khảo sát động lực học.



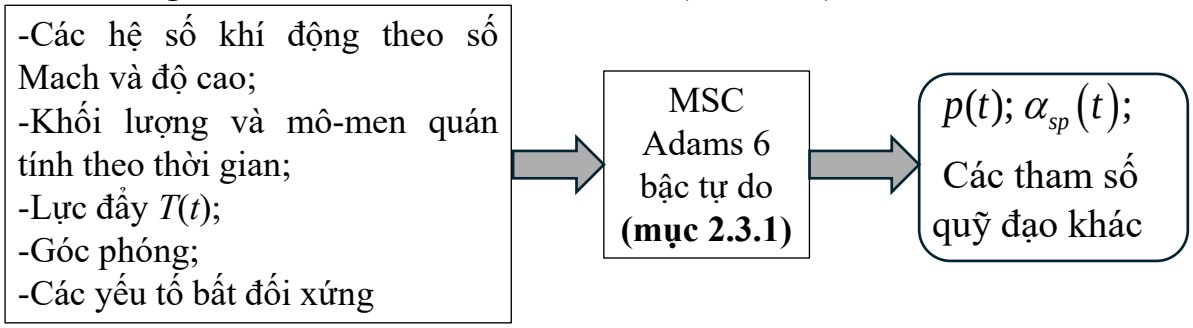
Hình 3. 4. Sơ đồ nguyên lý tính toán theo cách tiếp cận lý thuyết.

Các tham số được đưa vào mô hình lý thuyết để tính tần số dao động riêng của tên lửa ω_n và vận tốc quay quanh trục p_{tk} (mục 2.3.2), phục vụ dự đoán thời điểm cộng hưởng và nghiên cứu hiện tượng khóa tần số. Tiếp theo, chương trình MATLAB được xây dựng để giải hệ phương trình vi phân (2.58) bằng phương pháp số (mục 2.3.3), xác định diễn biến theo thời gian của góc tấn, góc trượt cạnh và vận tốc quay quanh trục, qua đó đánh giá định lượng hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số của tên lửa thăm dò.

Trong mô phỏng, các yếu tố bất đối xứng về khí động, khối lượng, lực đẩy và các góc δ_r (góc tạo chuyển động quay quanh trục tên lửa) khác nhau được xét đến nhằm phân tích sâu hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số. Đồng thời, ảnh hưởng của mô-men cảm ứng quay quanh trục được xem xét thông qua so sánh các trường hợp có và không có mô-men này, từ đó rút ra các nhận xét và kết luận.

3.2.2. Xây dựng chương trình mô phỏng động lực học bay 6 bậc tự do

Chương trình mô phỏng động lực học bay của tên lửa được xây dựng theo mô hình 6 bậc tự do (đã trình bày ở mục 2.4) với các hệ số lực và mô-men khí động được xác định theo mục 2.2. (hình 3.6).

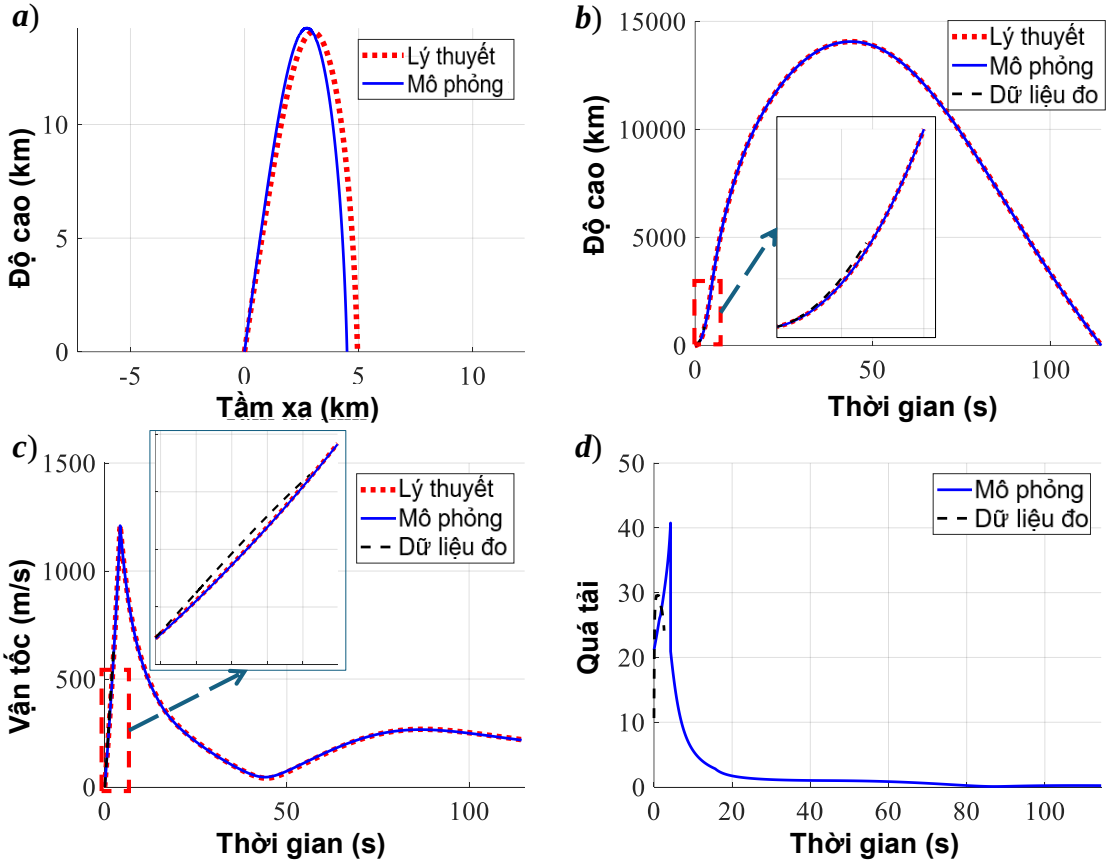


Hình 3. 5. Sơ đồ nguyên lý tính toán theo cách tiếp cận mô phỏng bay.

3.2.3. Kiểm chứng tính toán, mô phỏng động lực học bay

Để kiểm chứng độ tin cậy của các phương pháp tính toán, mô phỏng động lực học, trước hết ta so sánh kết quả quỹ đạo thu được từ mô hình chất điểm được lập trình tính toán trên MATLAB và mô hình mô phỏng 6 bậc tự

do xây dựng trên phần mềm MSC Adams với dữ liệu đo được trong quá trình phóng mẫu rút gọn của tên lửa thăm dò TV-02 (hình 3.6).



Hình 3. 6. Quỹ đạo sơ bộ của tên lửa

3.3. Kết luận chương

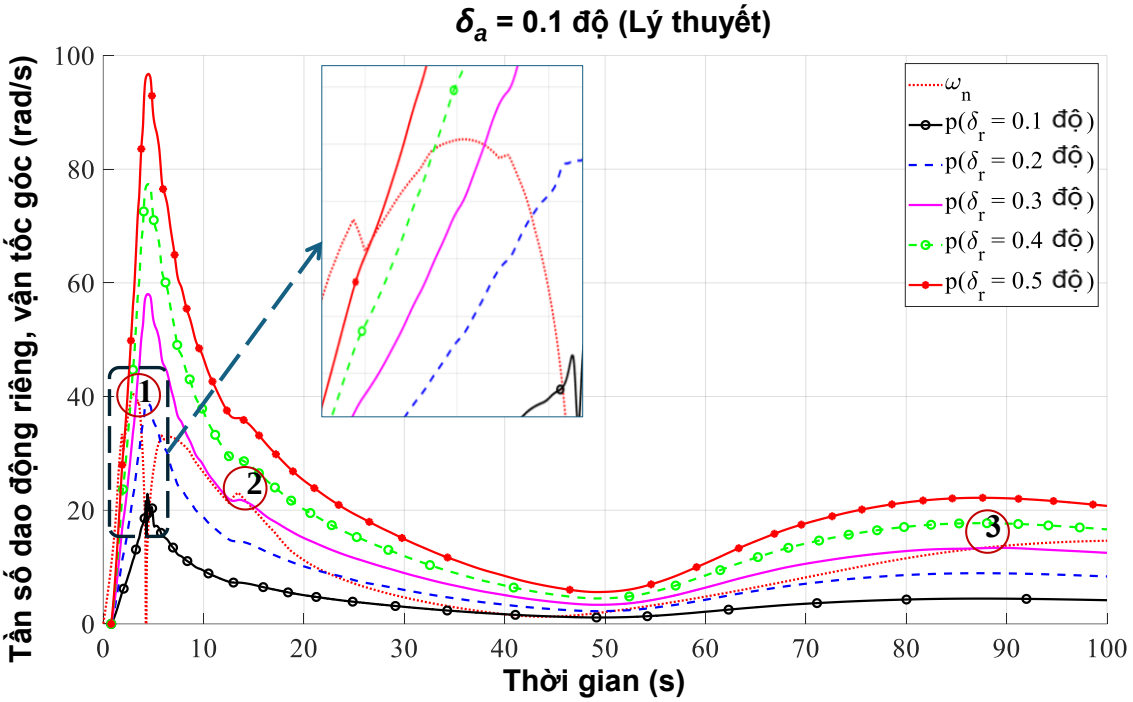
Trong Chương 3, nghiên cứu sinh xây dựng các chương trình tính toán động lực học và thực hiện kiểm chứng phương pháp nghiên cứu trên MATLAB nhằm tính quỹ đạo sơ bộ và các tham số bay; đồng thời, các chương trình xác định tần số dao động, tần số quay và dự đoán cộng hưởng, cũng như nghiên cứu mối liên hệ giữa cộng hưởng và hiện tượng khóa tần số, được phát triển dựa trên các cơ sở lý thuyết.

Chương 4: PHÂN TÍCH CỘNG HƯỞNG GIỮA DAO ĐỘNG DO SỰ BẤT ĐỐI XỨNG VÀ CHUYỂN ĐỘNG QUAY QUANH TRỤC

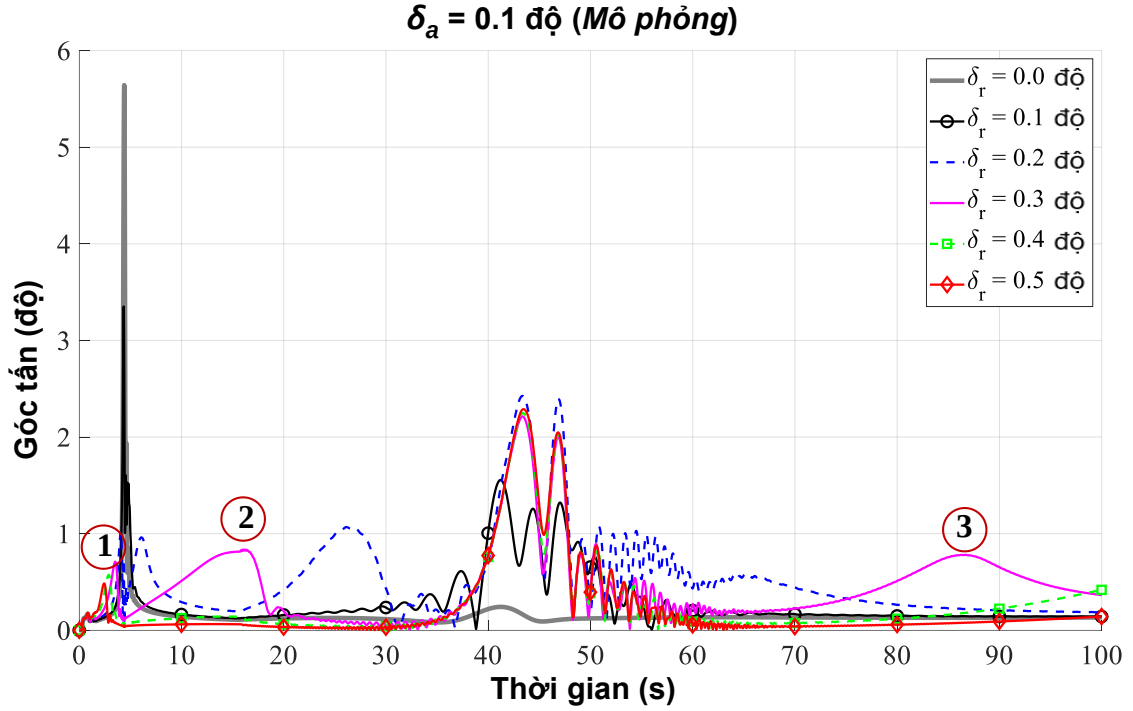
4.1. Xác định thời điểm cộng hưởng

Kết quả tính toán theo mô hình lý thuyết trên hình 4.1 cho thấy các đồ thị vận tốc góc quay quanh trục $p(t)$ ứng với góc lệch cánh đuôi $\delta_r = 0.1 \div 0.5$ độ lần lượt giao cắt với đường $\omega_n(t)$ tại những thời điểm khác nhau trong giai đoạn động cơ làm việc ($0 \div 4.2$ s). Nhận thấy khi $\delta_r = 0.3$ độ, đường $p(t)$ có 03 điểm giao cắt với đường $\omega_n(t)$, đây là các điểm nghi ngờ cộng hưởng.

Kết quả mô phỏng (hình 4.2) cũng cho thấy các đỉnh cộng hưởng xuất hiện tại các thời điểm tương ứng với các điểm nghi ngờ cộng hưởng mà mô hình lý thuyết đã chỉ ra ở hình 4.1 với góc lệch bất đối xứng $\delta_a = 0.1$ độ.



Hình 4. 1. Tần số dao động riêng và vận tốc góc quay quanh trục với các giá trị δ_r khác nhau.



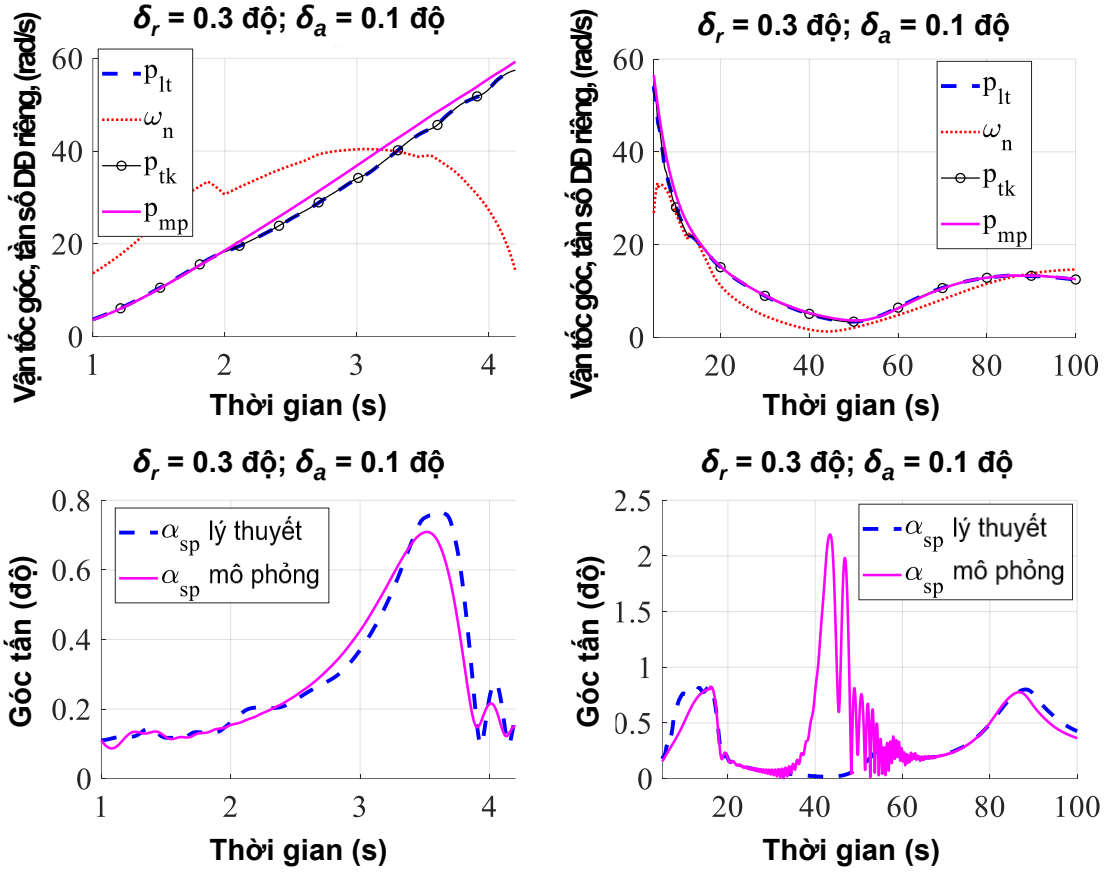
Hình 4. 2. Góc tấn không gian với các giá trị δ_r khác nhau khi δ_a = 0.1 độ.

4.2. Cộng hưởng và khóa tần số khi có bất đối xứng

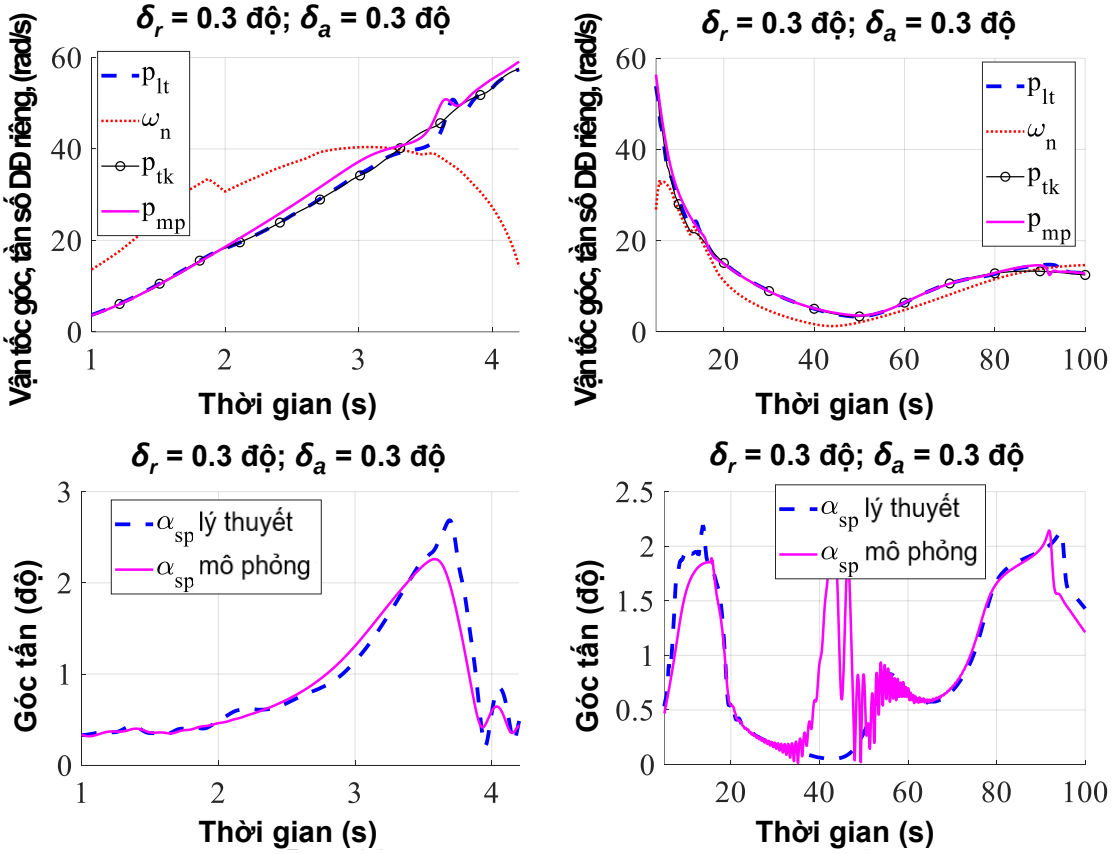
4.2.1. Bất đối xứng khí động

Khi δ_a = 0.1 độ, trên hình 4.3 xuất hiện 03 điểm cộng hưởng, tương ứng với 03 giao điểm của đồ thị $p(t)$ với $\omega_n(t)$. Khi đó, đồ thị $\alpha_{sp}(t)$ có 03 đỉnh cộng hưởng tương ứng các thời điểm $t \sim 3.4 \div 3.6$ s ; $16 \div 17$ s và $84 \div 86$ s, chứng tỏ hiện tượng cộng hưởng đã làm gia tăng giá trị của góc tấn không gian. Khi tăng δ_a lên 0.3 trong khi vẫn giữ nguyên giá trị δ_a = 0.3 độ, trong giai đoạn đầu

t = (0; 4.2 s) (hình 4.4) đường đồ thị của $p(t)$ vẫn bám theo $p_{tk}(t)$, tuy nhiên đã xuất hiện vị trí có xu hướng tách ra tại thời điểm t = (3.4÷3.6 s).

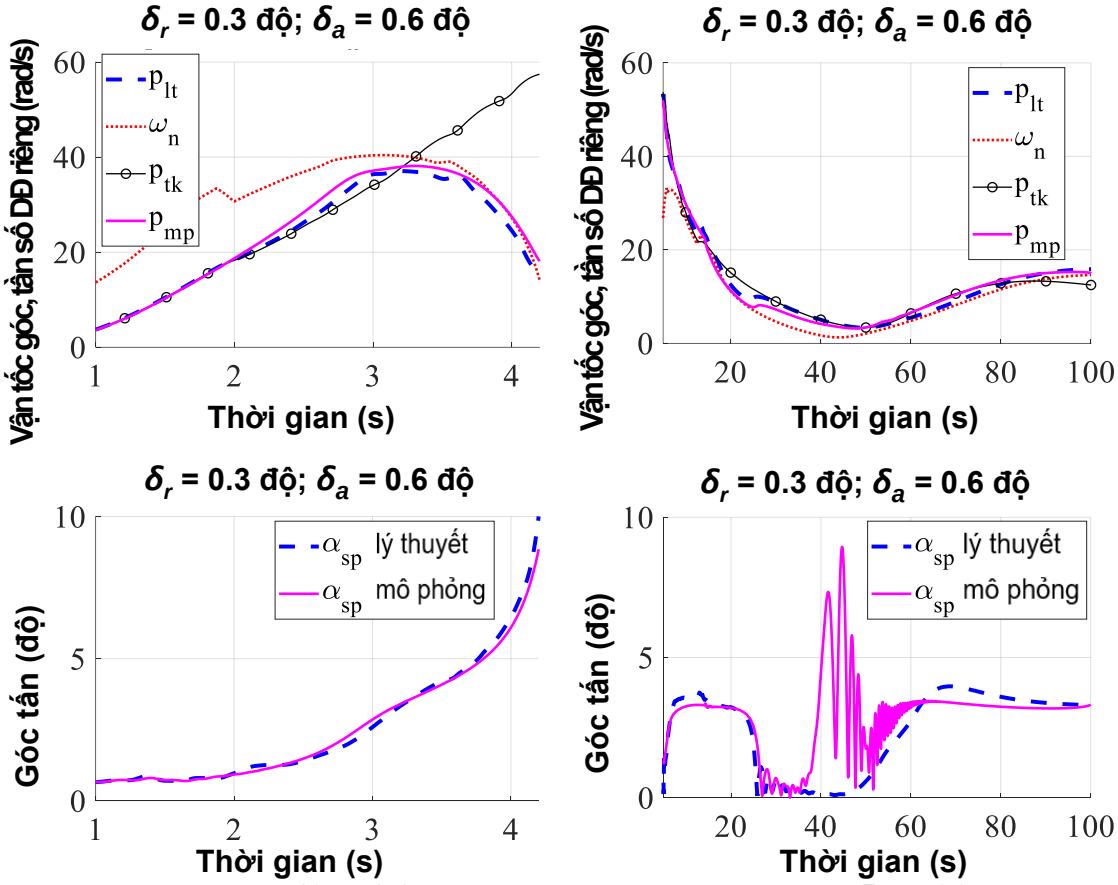


Hình 4. 3. Hiện tượng cộng hưởng khi δ_r = 0.3 độ và δ_a = 0.1 độ.



Hình 4. 4. Hiện tượng cộng hưởng khi δ_r = 0.3 độ và δ_a = 0.3 độ.

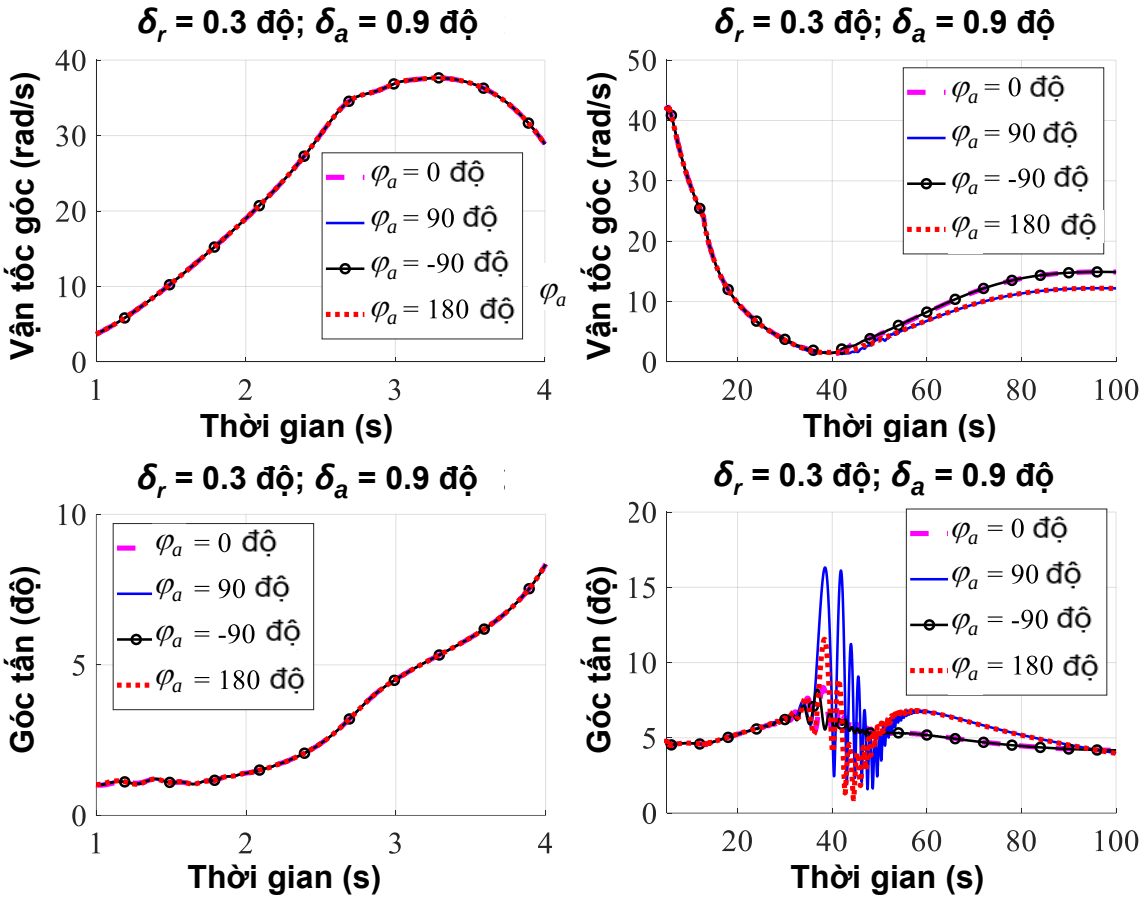
Khi δ_a = 0.6 độ (hình 4.5), hiện tượng cộng hưởng chuyển thành khóa tần số, đồ thị $p(t)$ trong giai đoạn đầu vẫn bám theo $p_{tk}(t)$, nhưng sau thời điểm cộng hưởng, nó đã bám theo đồ thị $\omega_n(t)$, đồng thời góc tấn duy trì giá trị cao trong giai đoạn này. Đây chính là hiện tượng khóa tần số xuất hiện khi yếu tố bất đối xứng đủ lớn. Các hình 4.3÷4.5 cũng cho thấy sự thống nhất giữa mô hình lý thuyết và mô phỏng, khi mà các giá trị của $p(t)$ và $\alpha_{sp}(t)$ của hai mô hình không có nhiều sự khác biệt trong suốt thời gian bay. Điều này khẳng định độ tin cậy của cả hai mô hình trong nghiên cứu hiện tượng khóa tần số.



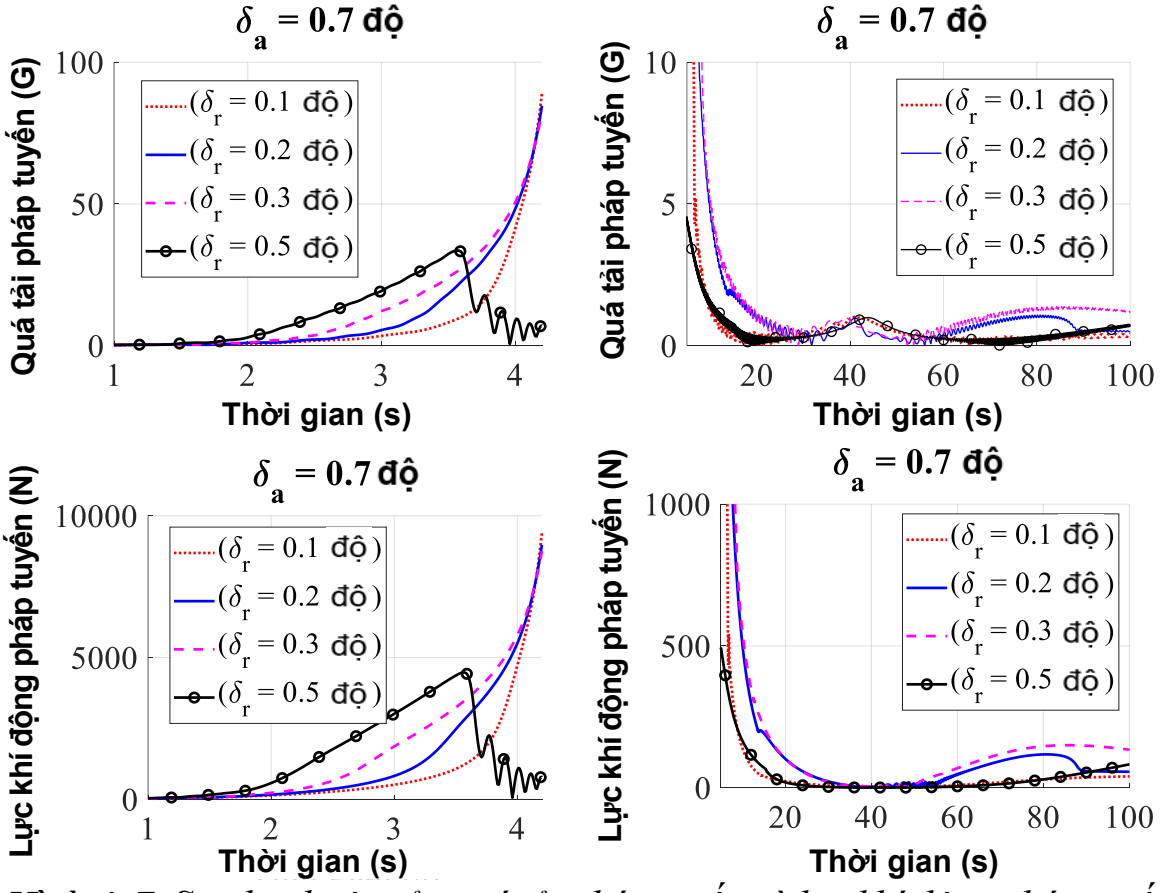
Hình 4. 5. Hiện tượng cộng hưởng khi δ_r = 0.3 độ và δ_a = 0.6 độ.

Tiếp theo, khảo sát trường hợp δ_r = 0.3 độ, δ_a = 0.9 độ với các hướng lệch φ_a khác nhau. Kết quả cho thấy ảnh hưởng của đại lượng góc hướng lệch đến giá trị của vận tốc góc quanh trục và góc tấn là không lớn, không làm thay đổi xu thế chung của kết quả (hình 4.6). Do đó, khi nghiên cứu động lực học tên lửa trong trường hợp có yếu tố bất đối xứng khí động, ta có thể bỏ qua ảnh hưởng của hướng lệch φ_a và chỉ chọn một giá trị đại diện để xem xét.

Để làm rõ ảnh hưởng của hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số đến các tham số động lực học bay, ta khảo sát ảnh hưởng đến quá tải pháp tuyến và lực khí động pháp tuyến khi δ_a = 0.7 độ. Kết quả cho thấy với δ_r = 0.3 độ và giá trị cực đại của các đại lượng này duy trì ở mức cao so với các trường hợp còn lại trong phần lớn thời gian bay (hình 4.7).



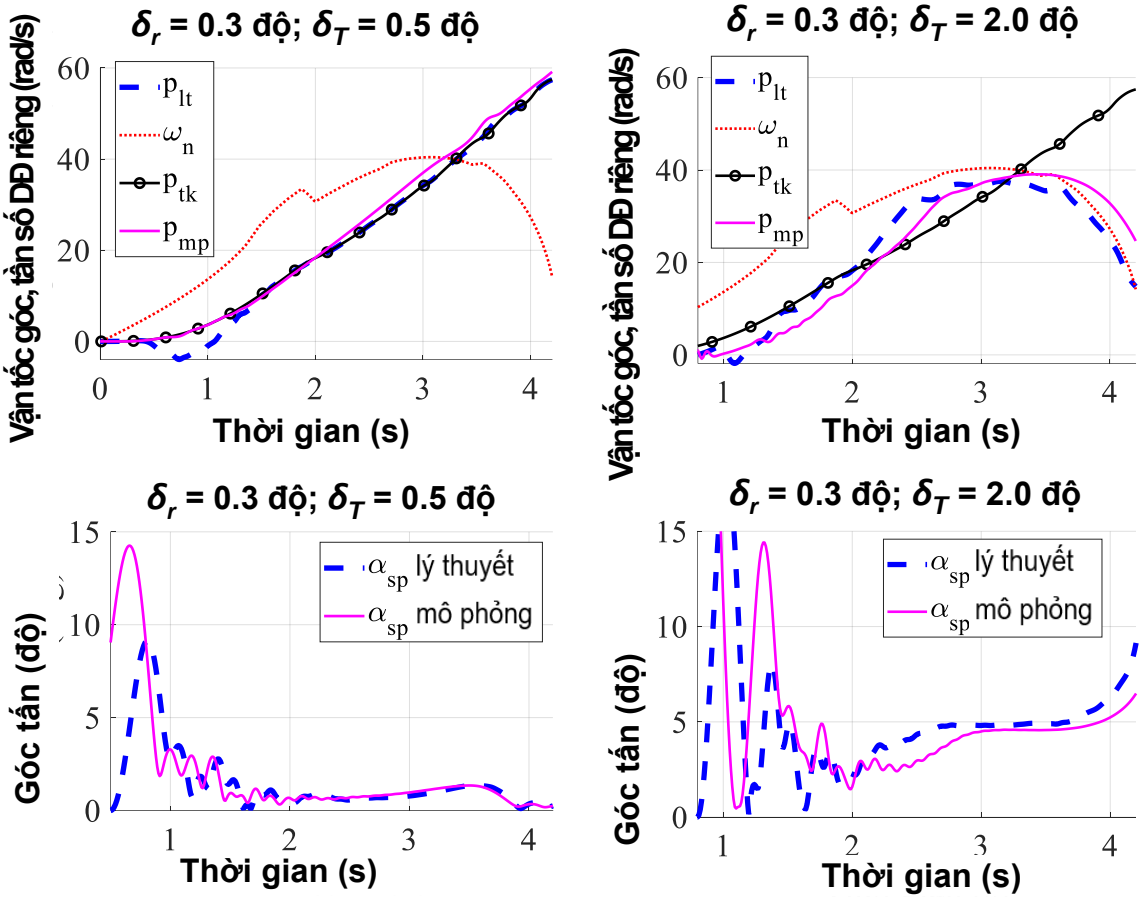
Hình 4. 6. Ảnh hưởng của hướng lệch φ_a khi δ_r = 0.3 độ và δ_a = 0.9 độ.



Hình 4. 7. Sự phụ thuộc của quá tải pháp tuyến và lực khí động pháp tuyến khi có bất đối xứng khí động với các giá trị khác nhau của δ_r (δ_a = 0.7 độ).

4.2.2. Bất đối xứng lực đẩy

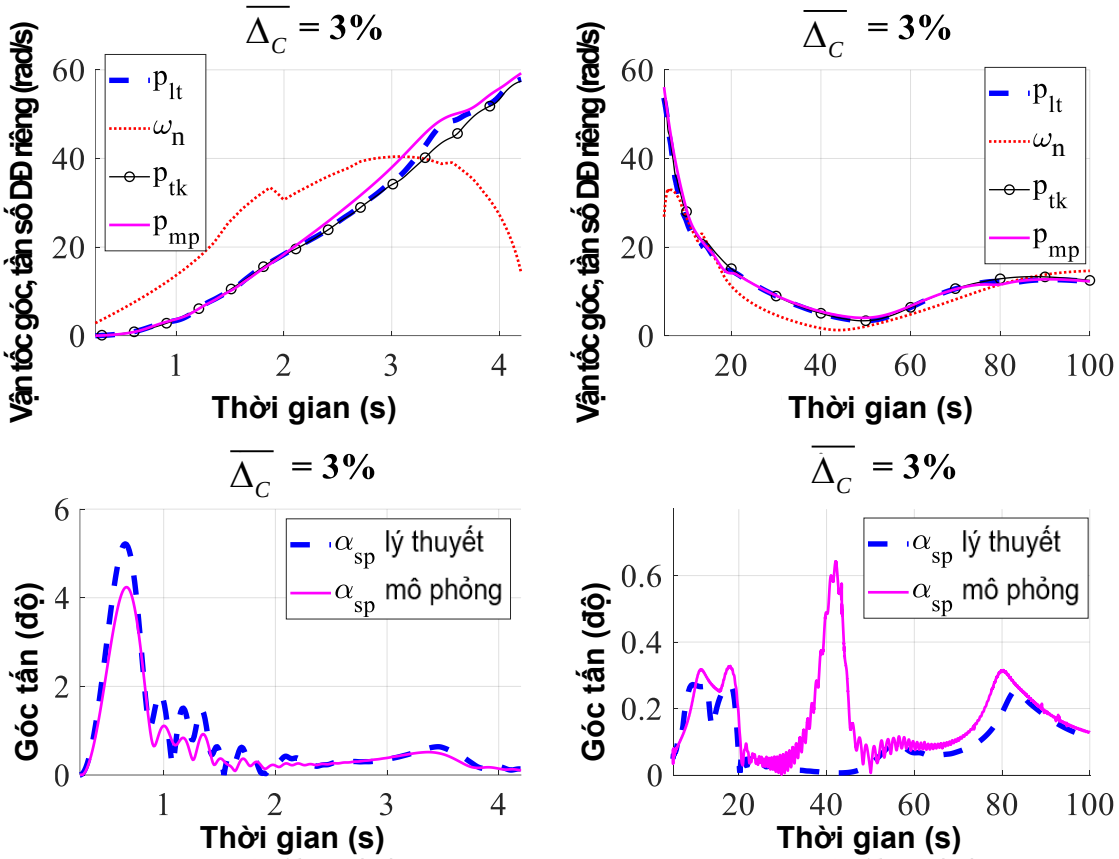
Bất đối xứng lực đẩy được thể hiện qua góc lệch δ_T của động cơ so với trục dọc và hướng lệch φ_T. Đối với bất đối xứng lực đẩy động cơ, ta chỉ xét giai đoạn tích cực của tên lửa thăm dò, khi động cơ còn hoạt động. Trên hình 4.8, khi δ_T = 0.5 độ, ta nhận thấy hiện tượng cộng hưởng xảy ra, chưa có khóa tần số, trong khi với δ_T = 2.0 độ, đường $p(t)$ đã bám theo đồ thị $\omega_n(t)$ ngay sau thời điểm cộng hưởng, đó là hiện tượng khóa tần số.



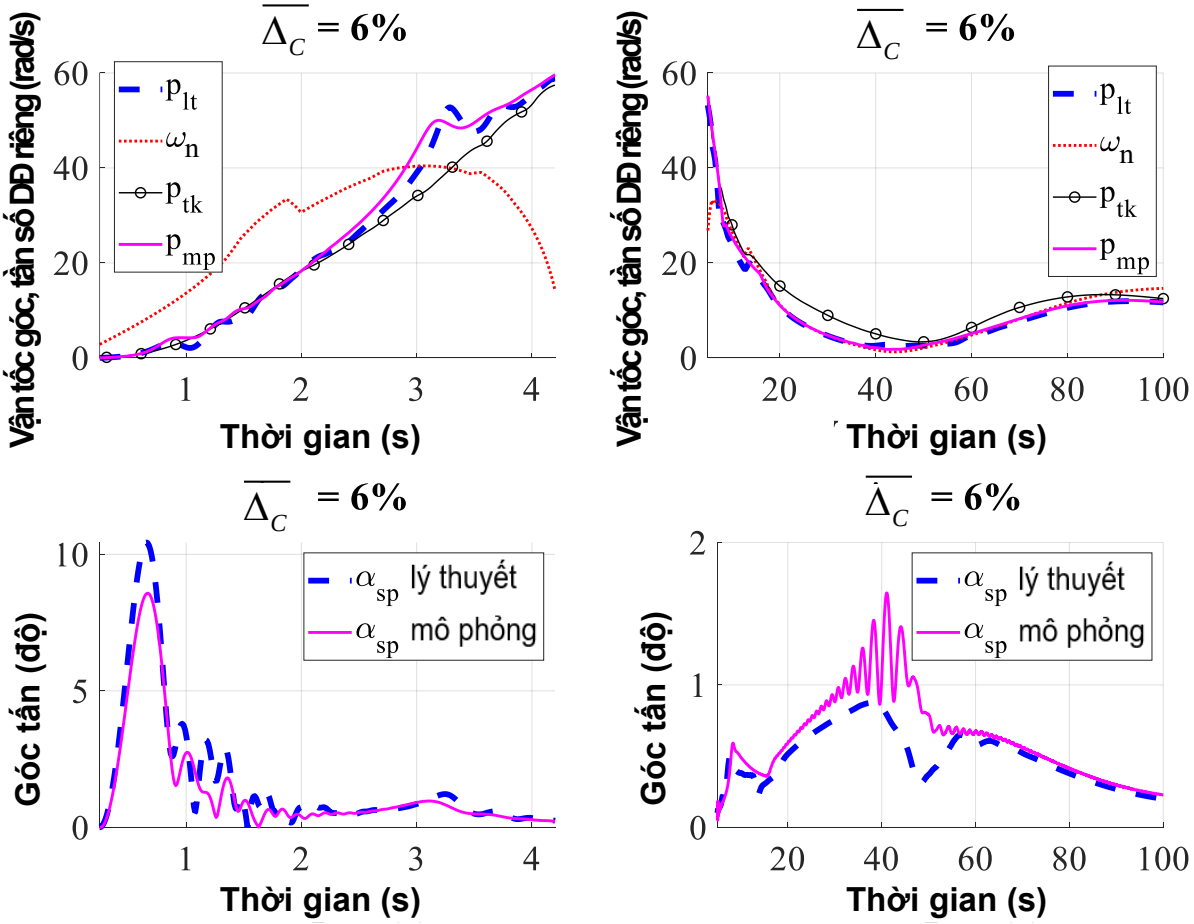
Hình 4. 8. Kết quả tính toán lý thuyết và mô phỏng khi δ_T = 0.5 và 2.0 độ.

4.2.3. Bất đối xứng khối lượng

Tiến hành khảo sát với các giá trị khác nhau của sự bất đối xứng khối lượng $\overline{\Delta_C}$, với $\overline{\Delta_C} = \dfrac{\Delta_C}{(d/2)} \times 100\%$, ta thấy trường hợp $\overline{\Delta_C}$ = 3%, đồ thị của $p(t)$ theo lý thuyết và mô phỏng đều bám theo đường thiết kế $p_{tk}(t)$ trong cả giai đoạn đầu và giai đoạn sau (hình 4.9). Điều này chứng tỏ mặc dù xuất hiện cộng hưởng, nhưng hiện tượng khóa tần số chưa xảy ra. Khi tăng $\overline{\Delta_C}$ lên 6%, hiện tượng khóa tần số chưa xuất hiện ở giai đoạn đầu khi động cơ hoạt động như trên hình 4.10, nhưng ở giai đoạn động cơ ngừng hoạt động, hiện tượng khóa tần số đã xuất hiện khi mà đồ thị của $p(t)$ đã không còn bám theo đường thiết kế $p_{tk}(t)$, mà bám sát vào đường $\omega_n(t)$ trong hầu hết thời gian bay. Điều này có thể được giải thích là do giai đoạn động cơ hoạt động, mô-men sinh ra bởi lực đẩy cân bằng với mô-men do lực cản chính diện gây ra.



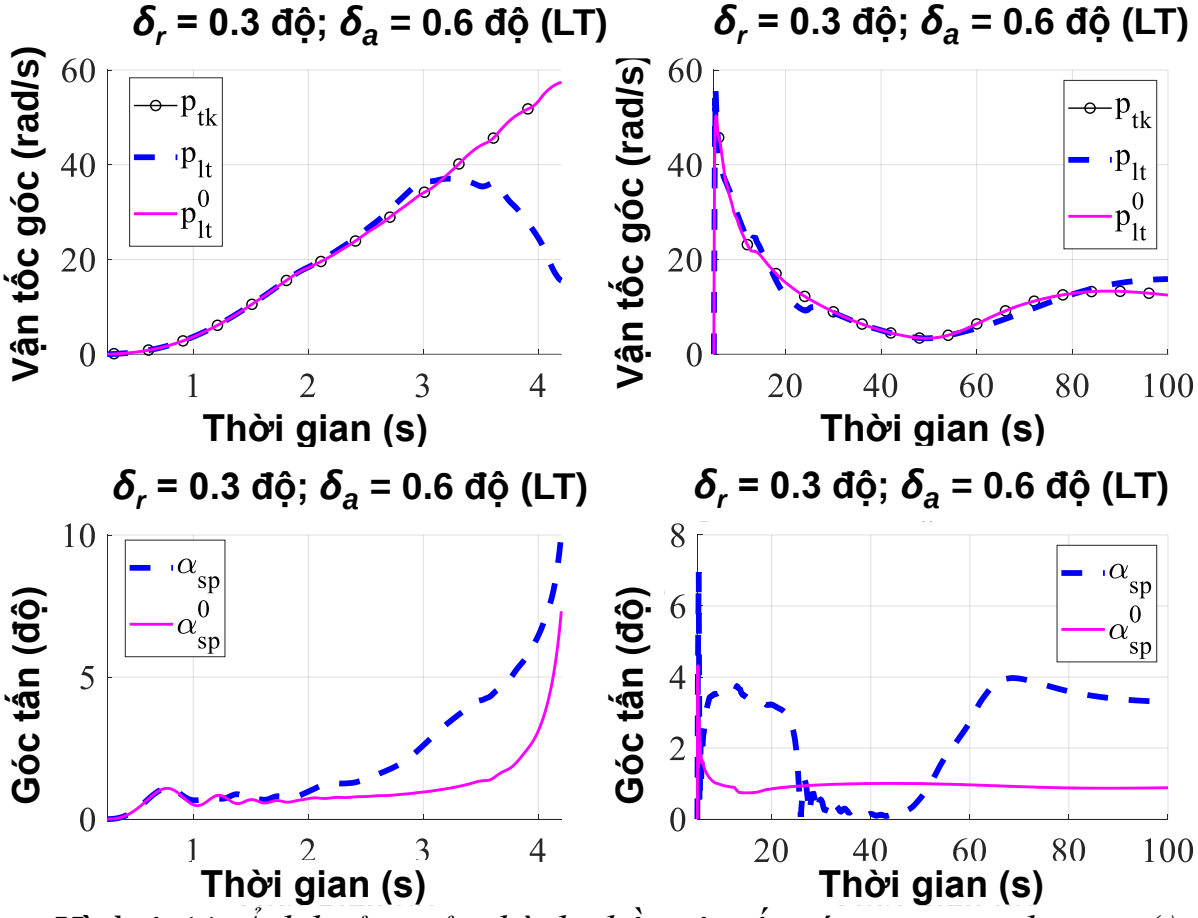
Hình 4. 9. Kết quả tính toán lý thuyết và mô phỏng khi $\overline{\Delta_C}$ *= 3 %.*



Hình 4. 10. Kết quả tính toán lý thuyết và mô phỏng khi $\overline{\Delta_C}$ *= 6 %.*

4.3. Ảnh hưởng của chuyển động quay quanh trục tới vấn đề cộng hưởng

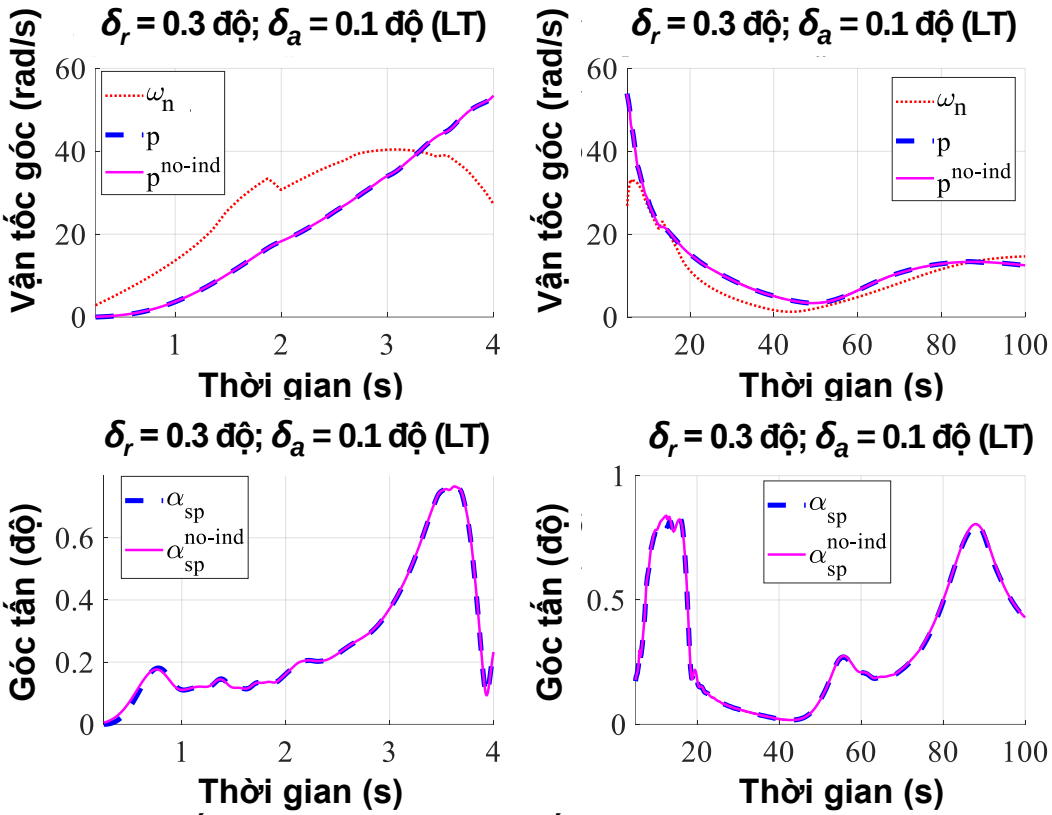
Kết quả cho trường hợp δ_r = 0.3 độ và δ_a = 0.6 độ (đủ lớn) như trên hình 4.11, ta thấy khi không tính đến các số hạng chứa thành phần vận tốc góc quay quanh trục $p(t)$, hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số không xuất hiện, trái ngược với trường hợp có tính đến các số hạng này. Cùng với các kết quả khảo sát đối với bất đối xứng lực đẩy và khối lượng có thể khẳng định sự tương tác giữa chuyển động quay quanh trục và dao động của tên lửa là nguyên nhân chính gây ra hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số.



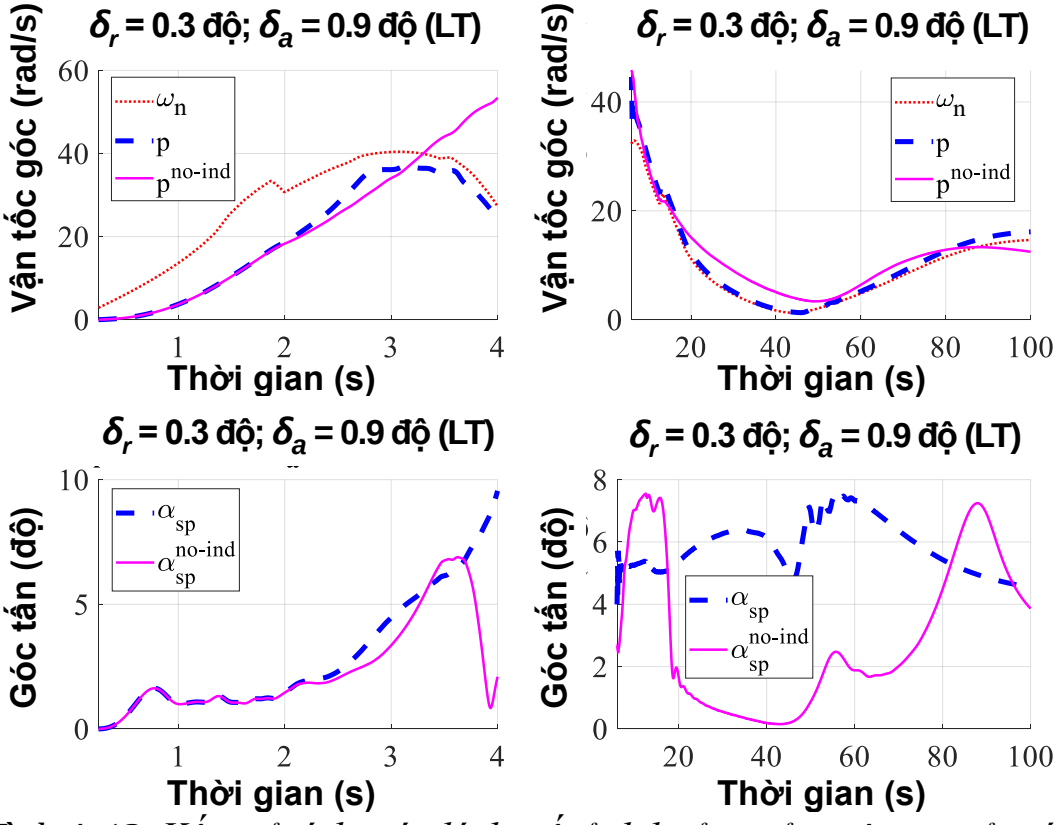
Hình 4. 11. Ảnh hưởng của thành phần vận tốc góc quay quanh trục p(t) đến hiện tượng cộng hưởng.

4.4. Ảnh hưởng của mô-men cảm ứng quanh trục dọc tới vấn đề cộng hưởng và hiện tượng khóa tần số

Khi δ_a = 0.1 độ (hình 4.12), các đồ thị của $p(t)$ và $\alpha_{sp}(t)$ tính toán theo mô hình lý thuyết trùng với trường hợp khi không tính đến mô-men cảm ứng (ký hiệu là chỉ số trên '*no-ind*'). Dễ dàng nhận thấy hiện tượng cộng hưởng xảy ra với cả hai trường hợp. Khi δ_a = 0.9 độ (hình 4.13), khi có tính đến mô-men cảm ứng quay quanh trục, hiện tượng khóa tần số xảy ra. Trong khi đó, khi bỏ qua thành phần mô-men này, chuyển động của tên lửa vẫn chỉ tương ứng với hiện tượng cộng hưởng thông thường. Do đó, có thể kết luận rằng mô-men cảm ứng quay quanh trục là nguyên nhân gây ra hiện tượng khóa tần số.



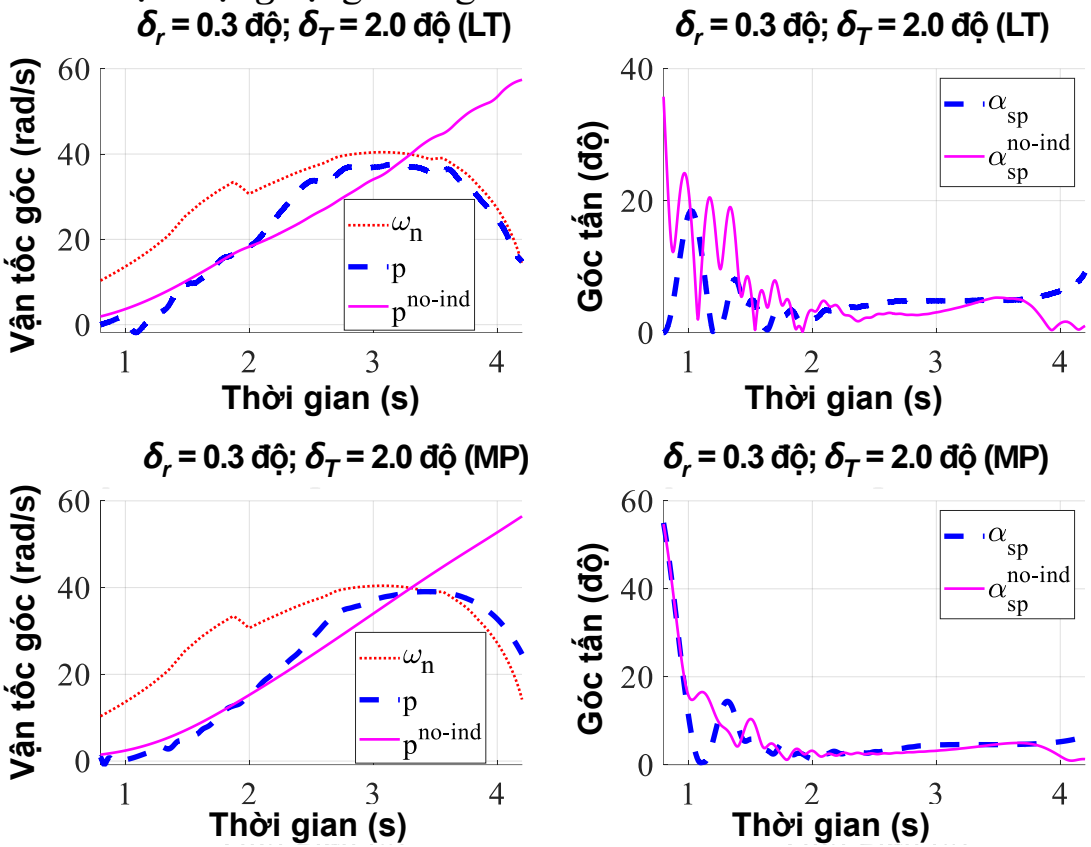
Hình 4. 12. Kết quả tính toán lý thuyết ảnh hưởng của mô-men cảm ứng quanh trục dọc (Bất đối xứng khí động khi δ_a = 0.1 độ).



Hình 4. 13. Kết quả tính toán lý thuyết ảnh hưởng của mô-men cảm ứng quanh trục dọc (Bất đối xứng khí động khi δ_a = 0.9 độ).

Kết quả tính toán cho trường hợp bất đối xứng lực đẩy và khối lượng, cũng cho thấy xu thế tương tự như trường hợp bất đối xứng khí động: khi giá trị bất

đối xứng nhỏ (hình 4.14), không có nhiều sự khác biệt giữa $p(t)$ và $\alpha_{sp}(t)$ có và không có mô-men cảm ứng, còn khi giá trị bất đối xứng tăng đủ lớn (hình 4.14), cả mô hình lý thuyết và mô phỏng đều chỉ ra rằng hiện tượng khóa tần số xảy ra với trường hợp có tính đến mô-men cảm ứng, trong khi nếu bỏ qua mô-men này thì chỉ còn hiện tượng cộng hưởng đơn thuần.



Hình 4. 14. Kết quả tính toán lý thuyết và mô phỏng ảnh hưởng của mô-men cảm ứng quanh trục dọc (Bất đối xứng lực đẩy khi δ_T = 2 độ).

4.4. Kết luận chương 4.

Chương 4 đã phân tích ảnh hưởng của các dạng bất đối xứng khí động, lực đẩy và khối lượng đến động lực học bay của tên lửa thăm dò, tập trung vào hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số.

Kết quả cho thấy, với mẫu tên lửa hiện tại, hiện tượng cộng hưởng xuất hiện khi $\delta_r \approx 0.3$ độ và có thể xảy ra ở các giai đoạn khác nhau của chuyến bay tùy theo dạng bất đối xứng. Khi mức độ bất đối xứng đủ lớn, cộng hưởng phát triển thành khóa tần số, làm vận tốc quay quanh trục bám theo tần số cộng hưởng và khiến góc tấn duy trì ở mức cao trong thời gian dài.

Trong các trường hợp cộng hưởng và khóa tần số, quá tải pháp tuyến và lực khí động pháp tuyến tăng mạnh và có thể duy trì kéo dài, tiềm ẩn ảnh hưởng đến kết cấu và thiết bị trên khoang. Chuyển động quay quanh trục làm thay đổi tần số dao động riêng của hệ, còn mô-men quay quanh trục cảm ứng đóng vai trò quyết định đối với hiện tượng khóa tần số, trừ trường hợp bất đối xứng khối lượng.

Kết quả tính toán từ mô hình lý thuyết và mô phỏng cho thấy sự tương đồng cao, khẳng định độ tin cậy của hai cách tiếp cận.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết quả đạt được

Luận án tiến hành khảo sát, phân tích đặc tính chuyển động của tên lửa trong suốt quá trình bay, đặc biệt tại thời điểm cộng hưởng và giai đoạn khóa tần số, đồng thời đề xuất phương pháp dự đoán thời điểm xảy ra cộng hưởng và phân tích nguyên nhân. Cụ thể như sau:

- Hoàn thiện việc xây dựng phương pháp panel kết hợp với các công thức lý thuyết và bán thực nghiệm phục vụ tính toán các hệ số khí động của tên lửa thăm dò, trong đó tính đến đầy đủ các thành phần khí động không dừng. Mô hình này đã được kiểm chứng thông qua việc so sánh với các kết quả thực nghiệm của các công trình nghiên cứu uy tín, đảm bảo độ tin cậy cao.

- Xây dựng được cách tiếp cận lý thuyết trong nghiên cứu động lực học tên lửa thăm dò dựa trên mô hình chất điểm (dùng để xác định quỹ đạo lý tưởng của tên lửa làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo), phương pháp xác định các tần số dao động và tần số quay quanh trục của tên lửa (dùng trong dự đoán các thời điểm có thể xảy ra cộng hưởng), mô hình phân tích cộng hưởng (dùng để phân tích nguyên nhân của các hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số).

- Xây dựng mô hình động lực học 6 bậc tự do của tên lửa thăm dò sử dụng trong khảo sát, phân tích động lực học bay của tên lửa và kiểm chứng độ tin cậy của các mô hình lý thuyết.

- Phân tích hiện tượng cộng hưởng và khóa tần số của tên lửa quay quanh trục: Khi mức độ bất đối xứng đủ lớn, cộng hưởng có thể dẫn đến hiện tượng khóa tần số, làm góc tấn và quá tải duy trì ở giá trị lớn trong thời gian dài. Mô-men cảm ứng quay quanh trục là nguyên nhân chính gây khóa tần số trong trường hợp bất đối xứng khí động và lực đẩy, trong khi với bất đối xứng khối lượng, hiện tượng này chủ yếu do mô-men khí động sinh ra bởi sự lệch tâm.

2. Những đóng góp mới của luận án

- Xây dựng được mô hình toán học mô tả chuyển động tổng quát trong không gian cho tên lửa thăm dò, có tính đến các yếu tố bất đối xứng, trong đó mô hình khí động được phát triển dựa trên phương pháp panel, kết hợp các công thức giải tích, bán thực nghiệm, có tính tới yếu tố không dừng.

- Xây dựng được mô hình lý thuyết, phân tích nguyên nhân và điều kiện hình thành của hiện tượng cộng hưởng, "khóa tần số" đối với tên lửa thăm dò ở độ cao thấp.

- Phân tích và lượng hóa được ảnh hưởng của các yếu đố bất đối xứng đến hiện tượng cộng hưởng và "khóa tần số", làm cơ sở đưa ra một số khuyến cáo kỹ thuật cho quá trình thiết kế, chế tạo, vận hành tên lửa thăm dò.

3. Kiến nghị về hướng nghiên cứu tiếp theo

- Mở rộng áp dụng các mô hình và phương pháp của luận án cho các đối tượng bay tương tự như tên lửa đẩy, đạn pháo và các phương tiện bay có chuyển động quay quanh trục;

-Tiếp tục hoàn thiện và phát triển mô hình toán học để nghiên cứu và phân tích sâu hơn bản chất của hiện tượng khóa tần số.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

1. Nguyễn Văn Thắng, Nguyễn Anh Tuấn, Lê Vũ Đan Thanh. *Đánh giá ảnh hưởng của xung lực tách tầng đến các tham số động lực học của tên lửa thăm dò khí quyển tầng cao*. Tuyển tập Hội nghị khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 25 (2023), 587-596 (*Hội nghị trong nước*)

2. Nguyễn Văn Thắng, Nguyễn Anh Tuấn, Vũ Quốc Trụ, Nguyễn Ngọc Hòa. Tính toán đặc trưng khí động của tên lửa thăm dò. HNKH các nhà nghiên cứu trẻ, Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2023, 983-990. (*Hội nghị trong nước*)

3. Nguyễn Văn Thắng, Nguyễn Anh Tuấn, Vũ Quốc Trụ, Nguyễn Lạc Hồng. *Nghiên cứu hiện tượng cộng hưởng chuyển động của tên lửa thăm dò*. Tuyển tập Hội nghị khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 26 (2024), 667-674. (*Hội nghị trong nước*)

4. Nguyễn Văn Thắng, Nguyễn Anh Tuấn, Vũ Quốc Trụ, Nguyễn Ngọc Hòa. *Xây dựng phương pháp nghiên cứu tính toán khí động không dừng cho tên lửa*. Tuyển tập Hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ, Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2024, 773-781. (*Hội nghị trong nước*)

5. Nguyen, V. T., Nguyen, A. T., Vu, Q. T., & Nguyen, L. H. (2024). Extended panel method to study sounding rocket aerodynamics. *International Journal of Sustainable Aviation*, *10*(3), 193-207. DOI: 10.1504/IJSA.2024.140659. (*Tạp chí Scopus, ESCI Index*)

6. Nguyen, V. T., Nguyen, A. T., Vu, Q. T., & Nguyen, L. H. (2024). Effects of unsteady aerodynamics on the flight dynamics of sounding rockets. The Fourth International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development - MMMS2024. *347-355*. DOI: *https://doi.org/10.1007/978-3-031-96126-7_43*. (*Hội nghị quốc tế - Scopus Index*)

7. Nguyen, V. T., Nguyen, A. T., & Vu, Q. T. (2024). Study the variation of the pitching frequency of sounding rockets. *Journal of Military Science and Technology*, *98*, 146-154. https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.98.2024, 146-154. (*Tạp chí trong nước*)

8. Nguyễn Văn Thắng, Nguyễn Anh Tuấn, Vũ Quốc Trụ, Nguyễn Ngọc Hòa. *Ảnh hưởng của mô-men quay quanh trục cảm ứng đến động lực học bay của tên lửa thăm dò*. Tuyển tập Hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ, Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2025, 1008-1017. (*Hội nghị trong nước*)

9. Nguyễn Văn Thắng, Nguyễn Anh Tuấn, Vũ Quốc Trụ, Nguyễn Ngọc Hòa (2025). Ảnh hưởng của mô-men cảm ứng quanh trục dọc tới cộng hưởng và khóa tần số. Chuyên san Bảo đảm Kỹ thuật quân sự/Tạp chí KH&KT (12/2025), ISSN 1859-0209, 153-168. (*Tạp chí trong nước*)