

Bài toán động lực học chuyển động của khí cụ bay trang bị động cơ turbine phản lực cỡ nhỏ

Mai Duy Phương*, Đặng Quang Giang

Viện Tên lửa/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

*Email liên hệ: phuongmd1975@gmail.com.

Nhận bài ngày 31/3/2021; Hoàn thiện ngày 09/8/2021; Chấp nhận đăng ngày 12/12/2021.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.76.2021.151-156>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp kết hợp bài toán động lực học chuyển động của khí cụ bay trong không gian với một số tham số hoạt động cơ bản của động cơ turbine phản lực cỡ nhỏ làm việc ở các chế độ bay khác nhau. Kết quả của bài toán này là một trong những bước hoàn thiện bài toán động lực học, tiếp cận đến kết quả thực tế chính xác hơn, hỗ trợ hiệu quả trong công tác thiết kế hệ thống, giảm số lần thực nghiệm đối với các đề tài thiết kế chế tạo khí cụ bay có sử dụng động cơ turbine phản lực cỡ nhỏ.

Từ khóa: Động lực học chuyển động; Động cơ turbine phản lực; Khí cụ bay.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ turbine phản lực (TBPL) cỡ nhỏ được phân loại là lớp động cơ có lực đẩy dưới 100 (KG). Chúng thường được sử dụng cho các loại khí cụ bay (KCB) không người lái đảm nhận các nhiệm vụ như đo đạc, quan trắc, chụp ảnh không lưu hay mục tiêu bay cho các loại vũ khí hàng không. Hiện nay, một số đơn vị như Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Viện Kỹ thuật Phòng không – Không quân đã và đang thực hiện một số đề tài nghiên cứu, thiết kế, chế tạo KCB sử dụng động cơ TBPL cỡ nhỏ để thực hiện các nhiệm vụ nói trên, bước đầu đạt được những thành công nhất định. Trong quá trình thiết kế, chế tạo bất kỳ một loại KCB nào, người thiết kế đều phải có đầy đủ những thông tin, tham số kỹ thuật mà sản phẩm có liên quan hay sử dụng. Tuy nhiên, các loại KCB do Việt Nam chế tạo vẫn phải sử dụng các động cơ TBPL mua từ nước ngoài, chúng chỉ có một số các thông tin kỹ thuật cơ bản nhưng hạn chế hoàn toàn những thông tin kỹ thuật chuyên sâu, cụ thể về tham số, đặc tính hoạt động của động cơ.

Động cơ TBPL là tác nhân gây ra chuyển động cho KCB (thể hiện qua các tham số tốc độ, độ cao) nhưng chính chuyển động đó lại tác động đến chế độ làm việc của động cơ TBPL (không phải do chính bản thân động cơ TBPL tự xác lập mà chúng được quyết định bởi điều kiện và trạng thái chuyển động của KCB). Đây là quan hệ ràng buộc của hai đối tượng.

Trong giai đoạn thiết kế sơ bộ, bắt buộc phải giải quyết bài toán động lực học chuyển động (ĐLHCD) của KCB trong không gian [1]. Trong bài toán này chưa xuất hiện các tham số thể hiện tham số hoạt động của động cơ một cách đầy đủ hoặc có thể được biểu thị bởi những giải thiết.

Chính vì thiếu các tham số hoạt động của động cơ nên trong giai đoạn thiết kế sơ bộ và giải bài toán ĐLHCD của KCB thường giả thiết bỏ qua sự biến đổi này hoặc tuyến tính hoá để làm cho bài toán đơn giản hơn, từ đó, kết quả bài toán nhận được chưa chính xác.

Khi tiến hành thiết kế hệ thống ở mức sâu hơn, tức là lặp lại chu trình thiết kế hệ thống để chính xác hoá các tham số hệ thống thì việc giải quyết bài toán ĐLHCD của KCB không thể bỏ qua được những đặc tính của của động cơ, bản chất của chúng được thể hiện dưới sự biến đổi và ràng buộc của các tham số lực đẩy (P), khối lượng (m), tốc độ (V).

Nhiệm vụ bài báo này nêu ra và cần giải quyết đó là: xây dựng một bài toán ĐLHCD của KCB trang bị động cơ TBPL ở dạng tổng quát hơn có xét đến một số tham số làm việc của ĐCTBPL trong từng điều kiện bay cụ thể.

2. XÂY DỰNG BÀI TOÁN

2.1. Các tham số của bài toán

2.1.1. Các tham số động lực học của KCB

Bài toán ĐLHCD của KCB trong không gian được biểu diễn bởi hệ gồm có 12 phương trình vi phân cấp 1[1]. Trong đó, cần quan tâm đến phương trình tốc độ chuyển động (số 1, 2, 3) và độ cao của KCB (số 8). Các phương trình này có chứa các tham số động lực học chuyển động của KCB bao gồm:

- Lực đẩy động cơ P (N);
- Khối lượng KCB m (kg);
- Độ cao KCB trong hệ tọa độ mặt đất di động y; tốc độ chuyển động của KCB (số M) hoặc giá trị của vector không tốc $\vec{V}$ (m/s).

2.1.2. Các điều kiện hoạt động của động cơ TBPL

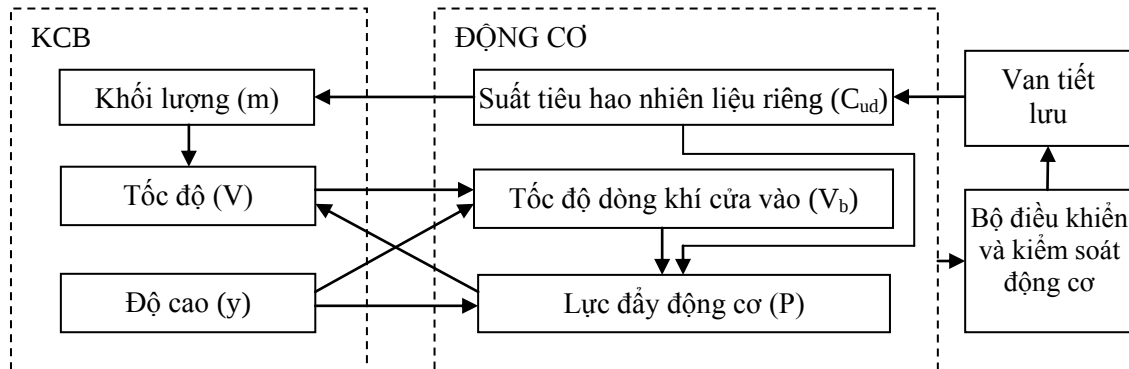
- Tốc độ dòng khí cửa vào V_b (m/s);
- Độ cao bay của máy bay (ảnh hưởng đến mật độ không khí trong tính toán lưu lượng);

Đồng thời giả thiết động cơ hoạt động ở một chế độ: tức là không xét quá trình chuyển tiếp giữa các chế độ làm việc, hoặc có thể nói cách khác là bỏ qua tác động của luật kiểm soát động cơ thể hiện trên hình 1 đối với đặc tính tiết lưu.

Từ các tham số động lực học của KCB và điều kiện hoạt động của động cơ TBPL, cần xác định:

- Suất tiêu hao nhiên liệu riêng Cud (kg/N.s) và có thể viết là (s/m);
- Lực đẩy của động cơ P (N).

Mối quan hệ giữa các tham số ĐLHCD và các tham số làm việc của động cơ TBPL trên thể hiện qua hình 1. Nói chung, các tham số này biến đổi liên tục và ràng buộc với nhau khá phức tạp. Mỗi thời điểm trong chuyển động của KCB xác lập một trạng thái riêng, khi mô tả bằng công cụ toán học, những trạng thái được thể hiện bởi các tham số, đặc tính.



Hình 1. Mối quan hệ giữa các tham số.

2.2. Phương pháp xác định các tham số

2.2.1. Khối lượng KCB m

KCB trang bị động cơ TBPL do có sự đốt cháy tiêu hao nhiên liệu thì khối lượng m của KCB biến đổi theo thời gian và được mô tả bởi phương trình vi phân:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{P}{J_e} \quad (1)$$

Trong đó:

+ P (N): Lực đẩy động cơ;

+ J_e (N.s/kg): Đặc trưng cho hiệu quả sử dụng nhiên liệu của động cơ. Đối với động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hoặc lỏng có thể xem J_e là hằng số, nhưng riêng với động cơ TBPL thì J_e là hàm phụ thuộc rất nhiều vào số M (tốc độ chuyển động) và độ cao y của KCB [1].

$$J_e = J_e(M, y) = J_e(V, y) \quad (2)$$

Về ý nghĩa, J_e được sử dụng để đánh giá hiệu quả kinh tế cho loại KCB và thường được xác định bởi một giá trị trung bình cho một loại KCB cụ thể [1], đặc biệt cho các loại máy bay vận tải. Trong lý thuyết tính toán động cơ TBPL [3] thì nghịch đảo của J_e chính là đặc tính tiêu hao nhiên liệu hay còn gọi là suất tiêu hao nhiên liệu riêng C_{ud} (kg/N.s).

$$C_{ud} = \frac{g_t}{P_{ud}} \quad (3)$$

$$J_e = \frac{1}{C_{ud}} = \frac{P_{ud}}{g_t} \quad (4)$$

Trong đó:

+ g_t : Suất tiêu hao nhiên liệu tương đối [3];

+ P_{ud} (N.s/kg): Lực đẩy riêng của động cơ.

Mặt khác:

$$P = P_{ud} \cdot G_v \quad (5)$$

Trong đó, G_v (kg/s) là lưu lượng khí đi vào động cơ.

$$G_v = m_v \cdot F_{vvent} \cdot p_{zv} \cdot \frac{q_{\lambda 1a}}{\sqrt{T_{zv}}} \quad (6)$$

Trong đó:

+ m_v : Hệ số lưu lượng, phụ thuộc vào chỉ số đoạn nhiệt và hằng số khí;

+ F_{vvent} (m²): Diện tích tiết diện cửa hút động cơ;

+ p_{zv} (N/m²): Áp suất toàn phần tại cửa hút động cơ (tổng giá trị của động áp và tĩnh áp), tham số này phụ thuộc vào tốc độ bay và độ cao của KCB [2, 4];

+ $q_{\lambda 1a}$: Hàm mật độ dòng tương đối của dòng khí, giá trị của hàm này phụ thuộc vào tốc độ chuyển động của KCB [3];

+ T_{zv} (K): Nhiệt độ của dòng khí.

Từ đó:

$$\frac{dm}{dt} = -g_t \cdot G_v \quad (7)$$

Hoặc:

$$\frac{dm}{dt} = -g_t \cdot m_v \cdot F_{vvent} \cdot p_{zv} \cdot \frac{q_{\lambda 1a}}{\sqrt{T_{zv}}} \quad (8)$$

Một phương pháp khác có thể xác định khối lượng KCB tại từng thời điểm:

$$m = m_0 - m_B \quad (9)$$

Trong đó:

+ m_0 (kg): Khối lượng của KCB tại thời điểm $t = 0$;

+ m_B (kg): Lượng nhiên liệu đã đốt cháy cho đến thời điểm đang khảo sát.

Hoặc:

$$m = m_0 - \int_0^t G_t(t).dt \quad (10)$$

Trong đó, G_t (kg/s) là lưu lượng nhiên liệu. Giá trị lưu lượng này thay đổi và phụ thuộc vào tín hiệu từ bộ điều khiển của động cơ.

2.2.2. Lực đẩy động cơ P

Phương trình (5) đã nêu ra công thức xác định lực đẩy của động cơ.

$$P_{ud} = [1 + g_t \cdot (1 - \delta_{otb})] \cdot C_c - V_b \quad (11)$$

Trong đó:

- + δ_{otb} : Hệ số làm mát của buồng đốt;
- + C_c (m/s): Vận tốc dòng khí ra khỏi miệng phun;
- + V_b (m/s): Tốc độ chuyển động vào của dòng khí tại cửa động cơ. Trong hệ phương trình

ĐLHCD của KCB, đây là độ lớn V của vector không tốc $\vec{V}$.

Viết lại công thức tính lực đẩy:

$$P = \{[1 + g_t \cdot (1 - \delta_{otb})] \cdot C_c - V_b\} \cdot G_v \quad (12)$$

Trong chuyển động của KCB có xảy ra chuyển động sinh ra do góc tấn và góc trượt cạnh, vì thế không phải mặt phẳng cửa vào của động cơ cũng luôn luôn vuông góc với hướng chuyển động. Do đó, tốc độ chuyển động vào của dòng khí tại cửa động cơ và tốc độ chuyển động của KCB so với dòng khí là khác nhau. Với những góc tấn và góc trượt cạnh lớn, cần phải xét đến:

$$V_b = V \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \quad (13)$$

Trong đó: α là góc tấn; β là góc trượt cạnh của KCB.

2.3. Bài toán tổng quát

Từ việc khảo sát các tham số hoạt động của bài toán nhiệt động lực học của động cơ turbine, chúng ta đã mở rộng được bài toán ĐLHCD của KCB có sử dụng động cơ TBPL cỡ nhỏ. Cụ thể là mở rộng thêm 2 phương trình khối lượng (m) và lực đẩy động cơ (P). Có thể gọi đây là bài toán tổng quát.

Bài toán tổng quát sử dụng phương trình vi phân (7), như vậy, lúc này khối lượng m của KCB không được xem là hằng số hoặc biến thiên giả định mà là một hàm vi phân, được giải đồng thời với bài toán tổng quát. Nếu trường hợp KCB có sự thay đổi khối lượng do yếu tố khác ngoài việc tiêu thụ nhiên liệu (thả vũ khí, phóng thiết bị,...) làm cho đạo hàm khối lượng biến thiên không liên tục thì có thể sử dụng phương trình (10) để thay cho phương trình (7).

Do đã loại bỏ giả thiết để làm đơn giản hoá các tham số lực đẩy và khối lượng KCB, giải bài toán tổng quát, chúng ta xác định được các tham số động lực học, các tham số chuyển động của KCB một cách đầy đủ, chính xác hơn.

3. BÀI TOÁN THỰC TẾ

3.1. Số liệu đầu vào

Chuẩn bị số liệu và giải bài toán ĐLHCD của KCB được nhiều công trình nghiên cứu, bài báo đề cập khá rõ ràng. Riêng đối với KCB trang bị động cơ TBPL thì có thêm các thông tin về kiểu loại động cơ và các tham số của nhà sản xuất. Bài báo lấy ví dụ tính toán các tham số hoạt động cho một loại động cơ TBPL máy nén li tâm, một tầng turbine có các tham số sau đây:

- Lực đẩy: $P = 600$ (N);

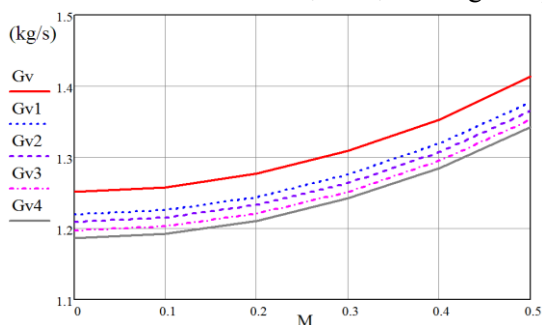
- Lưu lượng nhiên liệu: $G_t = 1.56 \text{ (kg/phút)} = 0.026 \text{ (kg/s)}$;
- Lưu lượng không khí: $G_v = 1.2 \text{ (kg/s)}$;
- Tỷ số nén: $\pi_{mn} = 3.9$;
- Đường kính lớn nhất của máy nén: $D = 205 \text{ (mm)}$;
- Nhiệt độ lớn nhất trước tuabin: $T_3 = 1200 \text{ (K)}$;
- Tốc độ vòng quay lớn nhất: $n = 65000 \text{ (vòng/phút)}$;

3.2. Phương pháp giải bài toán

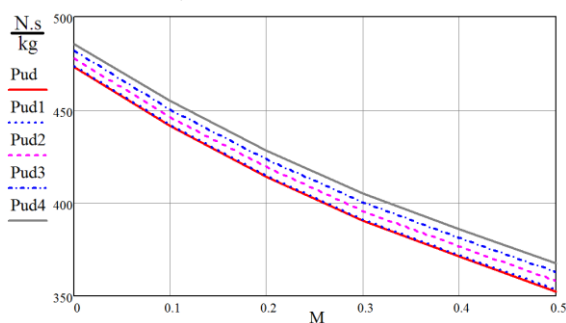
Từ các số liệu của động cơ, chúng ta có thể áp dụng các công thức tính toán các tham số hoạt động của động cơ trong từng chế độ, từ đó, xác định được khối lượng KCB và lực đẩy động cơ để giải bài toán ĐLHCD. Nói chung việc giải bài toán này không khó khăn, tuy nhiên, kết hợp giải bài toán ĐLHCD đồng thời với bài toán xác định các tham số hoạt động của động cơ khá phức tạp, phù hợp với những người có trình độ lập trình máy tính cao.

Bài toán ĐLHCD là bài toán trung tâm, bên cạnh nó còn có các bài toán điều khiển, khảo sát ổn định, quỹ đạo, khí động,... Vì vậy, để tránh nhầm lẫn, người ta tách riêng thành nhiều bài toán độc lập, kể cả bài toán xác định các tham số hoạt động của động cơ.

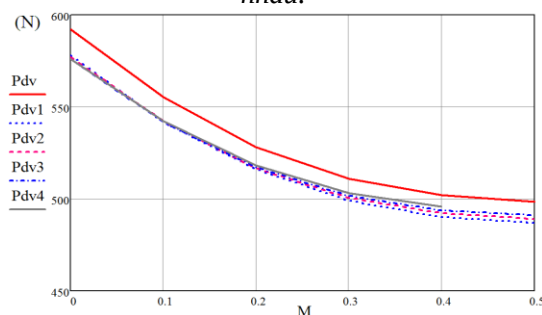
Sử dụng lý thuyết tính toán động cơ tuabin phản lực và lý thuyết máy nén ly tâm cùng phần mềm tính toán BCX ta nhận được những kết quả như các đồ thị sau:



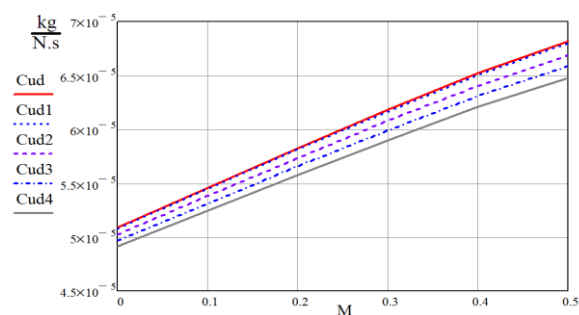
Hình 2a. Đồ thị phụ thuộc của lưu lượng không khí vào tốc độ bay ở các độ cao khác nhau.



Hình 2b. Đồ thị phụ thuộc của lực đẩy riêng vào tốc độ bay ở các độ cao khác nhau.



Hình 2c. Đồ thị phụ thuộc lực đẩy động cơ vào tốc độ bay ở các độ cao khác nhau.



Hình 2d. Đồ thị phụ thuộc suất tiêu hao nhiên liệu riêng vào tốc độ bay ở các độ cao khác nhau.

Vì lý do các tham số hoạt động của động cơ có tính chất biến thiên liên tục và không có những đặc điểm kỳ dị nên kết quả thường biểu diễn ở dạng bảng số hoặc đồ thị. Ngoài ra, các đặc tính của động cơ ở mỗi chế độ bay thể hiện theo từng điều kiện bay khác nhau (tốc độ, độ

cao) nên rất khó biểu diễn dưới dạng một tham số hoặc phương trình cụ thể. Do vậy, tác giả đã biểu diễn các đặc tính này trong hình 2.

Trên các đồ thị này: G_v , P_{ud} , C_{ud} , P_{dv} là giá trị ở độ cao $y = 0$ m; G_{vi} , P_{udi} , C_{udi} , P_{dvi} là giá trị các tham số mà động cơ hoạt động ở các độ cao tương ứng 1000 m, 2000 m, 3000 m và 4000 m.

Từ các kết quả trên, dễ dàng kết hợp với việc giải hệ phương trình ĐLHCD của KCB, từ đó, nhận được kết quả sau khi giải chính xác hơn, gần thực tế hơn, phương pháp giải tường minh và việc tính toán cùng với tham số làm việc không làm bài toán phức tạp thêm.

4. KẾT LUẬN

Dựa trên lý thuyết tính toán động cơ TBPL và lý thuyết tính toán máy nén ly tâm, bài báo đã tính toán được các tham số hoạt động chính của động cơ TBPL ở các chế độ bay khác nhau. Và đề cập rõ đến việc kết hợp kết quả này để giải bài toán ĐLHCD của KCB – một bài toán quan trọng bắt buộc phải giải quyết nhiều lần trong quá trình thiết kế hệ thống KCB. Những kết quả này đóng vai trò quan trọng trong việc nghiên cứu thiết kế chế tạo KCB sử dụng động cơ TBPL cỡ nhỏ trong giai đoạn tính toán thiết kế sơ bộ (trước khi chế thử mẫu), đã mô tả được những sự biến đổi các đại lượng trong bài toán ĐLHCD một cách thực tế nhất. Đây chính là việc loại bỏ các giả thiết làm đơn giản hoá khi giải bài toán ĐLHCD. Từ đó, kết quả bài toán ĐLHCD của KCB đạt được kết quả tin cậy và gần sát thực tế hơn. Khi bài toán ĐLHCD của KCB được nghiên cứu ở mức độ sâu hơn, tổng quát hơn có xét đến các tham số làm việc của động cơ TBPL trang bị cho chính nó thì kết quả có độ chính xác cao hơn, giúp rút ngắn quá trình thử nghiệm trong lĩnh vực thiết kế hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Đức Cường, "Mô hình hóa và mô phỏng chuyển động của khí cụ bay tự động", NXB. Quân đội nhân dân, 2002.
- [2]. Бакулева В.И., "Термогазодинамические расчеты и расчет характеристик авиационных ГТД", М: Издательство МАИ. 2002.
- [3]. Ладозин А.М. Яковлев В.М., "Расчет и проектирование центробежного компрессора ГТД", МГТУ им Баумана, 2008.
- [4]. Холщевников К.В., "Теория и расчет авиационных лопаточных машин". "Машиностроение", 1970.

ABSTRACT

DYNAMICS EQUATIONS OF FLYING OBJECTS EQUIPPED WITH A SMALL TURBINE ENGINE

The paper presents a method of resolving dynamics equations of flying objects by combining them with some basic operating parameters of a small turbine engine working in different flight modes. The result of this paper is one of the steps to complete the dynamics equations, approach the actual results more accurately and effectively. That supports the system design period and reduces the number of experiments for a project of designing and manufacturing flying object using small turbine engines.

Keywords: Motion dynamics; Small turbine engines; Flying object.