

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA YẾU TỐ BIẾN DẠNG ĐẾN CÁC ĐẶC TÍNH KHÍ ĐỘNG CỦA CÁNH VÃY KIỂU CÔN TRÙNG Ở CHẾ ĐỘ BAY TREO

Lê Vũ Đan Thanh^{1,*}, Nguyễn Anh Tuấn¹, Đặng Ngọc Thanh²

¹Khoa Hàng không - Vũ trụ, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

²Phòng Sau đại học, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Các thiết bị bay (TBB) cánh vẫy siêu nhỏ phỏng côn trùng hiện đang được quan tâm nghiên cứu do có nhiều ứng dụng trong thực tiễn. Phần lớn các nghiên cứu về các đặc tính khí động lực học của TBB cánh vẫy dạng côn trùng tập trung vào đối tượng cánh cứng, bỏ qua ảnh hưởng của sự biến dạng cánh. Với giả thiết này, các mô hình nghiên cứu và tính toán trở nên đơn giản hơn nhiều. Tuy nhiên, cánh của các TBB loại này cũng như của các loài côn trùng trong tự nhiên là các kết cấu mềm và nhẹ, do đó yếu tố biến dạng của cánh là không thể tránh khỏi. Trong nghiên cứu này, các tác giả sẽ mô hình hóa kết cấu cánh vẫy kiểu côn trùng dưới dạng hệ vật - lò xo, kết hợp với chương trình tính toán khí động dựa trên phương pháp xoáy UVLM để nghiên cứu bài toán tương tác kết cấu - chất lưu. So sánh kết quả mô phỏng của cánh cứng và cánh mềm ở chế độ bay treo cho thấy, yếu tố biến dạng giúp tăng đáng kể lực nâng của cánh cũng như cải thiện hiệu suất năng lượng.

Từ khóa: Cánh vẫy phỏng côn trùng; khí động lực học; tương tác kết cấu - chất lưu.

1. Đặt vấn đề

Các thiết bị bay cánh vẫy siêu nhỏ phỏng côn trùng (Insect-mimicking flapping-wing micro air vehicles – FWMAVs) hiện đang được nghiên cứu phát triển với nhiều kích thước, hình dạng, nguyên lý hoạt động khác nhau [1]. Chúng có thể được dùng cho các mục đích do thám, quan trắc môi trường hay cứu hộ cứu nạn trong không gian hẹp. Để hoàn thiện thiết kế của các TBB phỏng côn trùng, các nhà nghiên cứu thường dựa trên các đặc tính khí động lực học, động lực học bay của các loài côn trùng ngoài tự nhiên.

Cánh côn trùng là kết cấu mềm gồm các gân và màng. Do sự phức tạp của kết cấu cánh cũng như tính không dừng lớn của các đặc tính khí động, phần lớn các nghiên cứu về đặc tính khí động lực học bay của TBB cánh vẫy dạng côn trùng tập trung vào đối tượng cánh cứng [2-5]. Với giả thiết cánh không biến dạng khi bay, các mô hình nghiên cứu và tính toán trở nên đơn giản hơn nhiều.

* Email: dthanhtkht@gmail.com

<https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v17.n04.402>

Tuy nhiên, cánh của các loài côn trùng trong tự nhiên thường bị biến dạng lớn khi vẫy trong không khí. Theo nghiên cứu của Combes và Daniel [6], góc uốn ở đỉnh cánh của côn trùng cánh vẫy do biến dạng có thể đạt 15 độ, tương đương khoảng 25% biên độ vẫy cánh và biến dạng góc xoắn xấp xỉ 30 độ theo Willmott và Ellington [7]. Tương tự, cánh của TBB cánh vẫy loại này phải làm bằng các vật liệu đủ nhẹ để đảm bảo về mật khối lượng cất cánh, cũng như giảm công suất hoạt động của động cơ. Do đó, việc nghiên cứu ảnh hưởng của yếu tố đàn hồi lên các đặc tính khí động của cánh là vấn đề hết sức quan trọng.

Trong nghiên cứu này, các tác giả đã mô hình hóa kết cấu cánh vẫy đàn hồi dưới dạng các vật cứng nối với nhau bằng các lò xo uốn và xoắn. Mô hình động lực học đa vật này được kết hợp với một mô hình khí động dựa trên phương pháp xoáy không dừng (Unsteady Vortex-Lattice Method - UVLM), tạo thành một chương trình tính toán tương tác kết cấu - chất lưu (Fluid - Structure Interaction FSI) hoàn chỉnh. Chương trình được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả mô phỏng với dữ liệu thực nghiệm đã được công bố. Kết quả mô phỏng của cánh cứng và cánh mềm ở chế độ bay treo được so sánh với nhau để đánh giá ảnh hưởng của yếu tố đàn hồi lên đặc tính khí động của cánh.

2. Mô hình tính toán

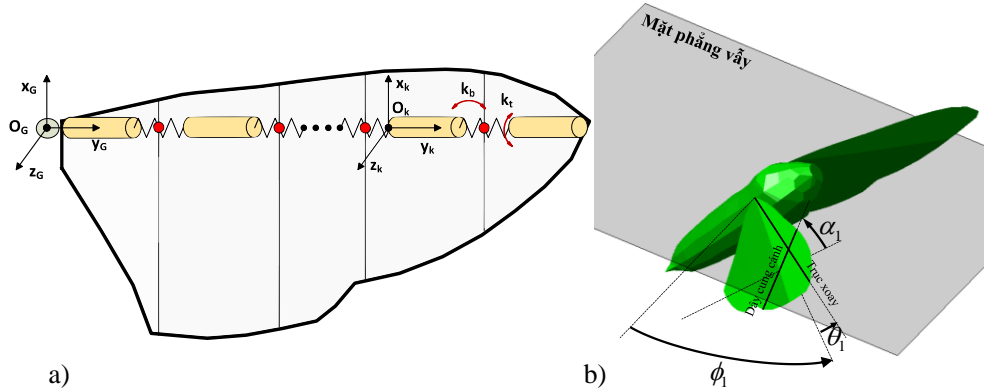
2.1. Mô hình động lực học

Kết cấu cánh 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 1a). Các thông số khối lượng và quán tính của hệ được xác định dựa trên một mô hình phân tử hữu hạn xây dựng từ dữ liệu thực nghiệm [8].

Trong bài báo sử dụng 2 hệ trục tọa độ: 1) Hệ tọa độ toàn cục (X_0, Y_0, Z_0) có gốc O_0 nằm ở gốc cánh; 2) Các hệ tọa độ cục bộ (X_k, Y_k, Z_k) ($k \geq 1$) gắn với mỗi vật thứ k (Hình 1a).

Hệ được phát động bởi chuyển động ở gốc cánh tương đương với vật thứ nhất, được xác định bởi 3 góc Euler $\phi_1, \theta_1, \alpha_1$ so với mặt phẳng vẫy cánh (Hình 1b). Mặt phẳng vẫy cánh được định nghĩa là mặt phẳng đi qua 3 điểm: gốc cánh và 2 điểm thấp nhất và cao nhất của mút cánh trong một chu kỳ vẫy. Góc ϕ_1 là góc quét, thể hiện chuyển động tiến - lùi của cánh; góc α_1 là góc xoay, thể hiện chuyển động xoay quanh trục dọc của cánh; góc θ_1 là góc nâng, thể hiện chuyển động nâng hạ so với mặt phẳng vẫy.

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 $k-1$. Vectơ tọa độ suy rộng dùng để xác định trạng thái của hệ là $\Phi = [\theta_2, \alpha_2, \theta_3, \alpha_3, \dots, \theta_N, \alpha_N]^T$.



Hình 1. a) Mô hình hệ vật - lò xo mô phỏng cánh vẫy; b) Mặt phẳng vẫy và các góc Euler.

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

$$T_k = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_k^{kT} \mathbf{I}_k^k \boldsymbol{\omega}_k^k + \frac{1}{2} m_k \mathbf{V}_k^{ckT} \mathbf{V}_k^{ck} \quad (1)$$

trong đó: $m_k, \mathbf{I}_k^k, \mathbf{V}_k^{ck}, \boldsymbol{\omega}_k^k$ 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 \mathbf{V}_k^{ck} và $\boldsymbol{\omega}_k^k$ 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:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\eta}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial \eta_j} = \sum_{k=1}^N (\mathbf{C}_j^k \ddot{\Phi}) + \sum_{k=1}^N (F_j^k - G_j^k) = Q_j \quad (2)$$

trong đó: $T = \sum_{k=1}^N T_k$ là tổng động năng của tất cả các vật, $\mathbf{C}_j^k, F_j^k, G_j^k$ là các hệ số khai triển, Q_j là lực suy rộng theo tọa độ suy rộng η_j .

Kết hợp phương trình Lagrange (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:

$$\mathbf{M}(\Phi, \dot{\Phi}, t) \ddot{\Phi} + \mathbf{H}(\Phi, \dot{\Phi}, t) = \mathbf{Q}(\Phi, \dot{\Phi}, t) \quad (3)$$

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 $\mathbf{M}_j = \sum_{k=1}^N \mathbf{C}_j^k$, $H_j = \sum_{k=1}^N (F_j^k - G_j^k)$.

Cụ thể hơn về quá trình đưa ra phương trình chuyển động (3) có thể tham khảo trong công bố [9].

2.2. Mô hình khí động lực học

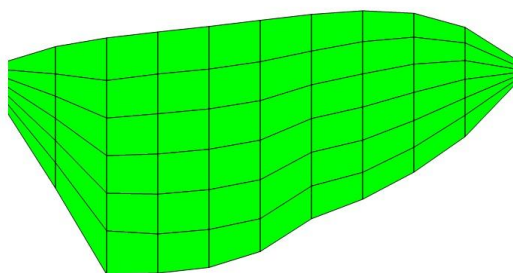
Để xác định các đặc tính khí động của cánh vẫy, bài báo này sử dụng phương pháp xoáy không dừng UVLM [4]. Theo đó, cánh được chia thành các tấm mà trên đó có các khung xoáy tứ giác với lưu tốc bằng nhau. Điều kiện biên chảy không thấm Neumann được áp dụng tại các điểm kiểm tra trên các tấm, từ đó thu 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 [4]:

$$\Delta p_i(t) = \rho \left[(\mathbf{V}_i(t) \times \boldsymbol{\gamma}_i(t)) \cdot \mathbf{n}_i + \frac{\partial \Gamma_i(t)}{\partial t} \right] \quad (4)$$

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 .

Phương pháp này đã được sử dụng trong một số nghiên cứu trước đây [4, 10, 11] để xác định các đặc tính khí động của cánh vẫy và đã cho các kết quả tương đối chính xác. Trong bài báo này sẽ nghiên cứu cánh loài nhện *Manduca sexta*, với mô hình lưới khí động được biểu diễn trên hình 2.



Hình 2. Mô hình lưới khí động của cánh *Manduca sexta*.

2.3. Kết hợp mô hình động lực học và khí động lực học

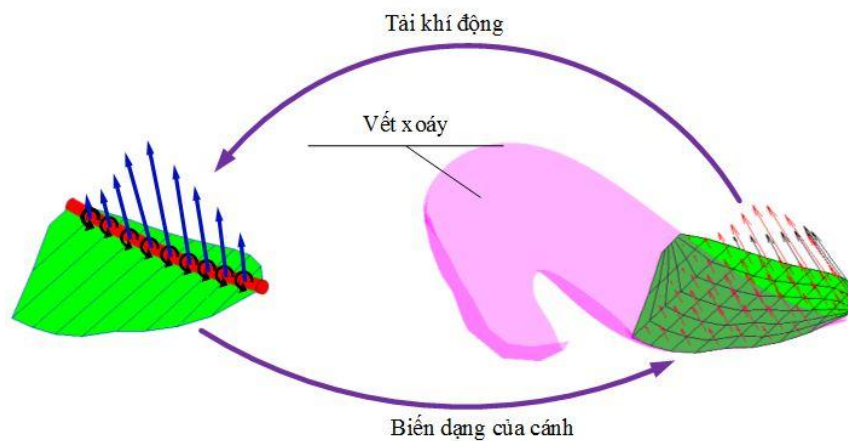
Có sự trao đổi thông tin 2 chiều giữa mô hình động lực học và khí động (Hình 3), theo đó tại thời điểm $t+dt$ thực hiện các bước sau:

- *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 Q . Giải hệ phương trình chuyển động (3) với lực suy rộng mới thu được trạng thái biến dạng mới của cánh.

- *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 $t+dt$.



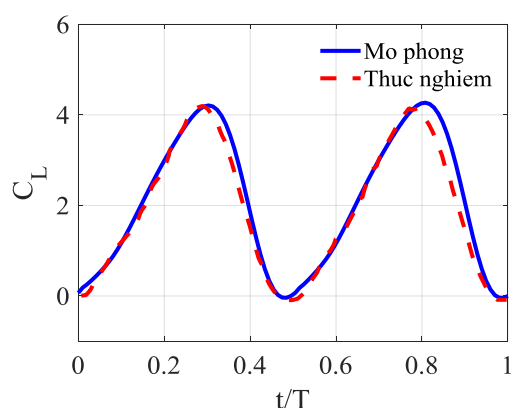
Hình 3. Sơ đồ kết hợp mô hình động lực học và mô hình khí động.

Trên cơ sở mô hình động lực học và khí động học đã trình bày ở trên, các tác giả đã viết một chương trình tính toán tương tác kết cấu - chất lưu FSI bằng ngôn ngữ lập trình Fortran.

2.4. Kiểm chứng mô hình

Chương trình tính toán được kiểm chứng bằng cách so sánh với kết quả thực nghiệm của Lua và cộng sự [12]. Trong thực nghiệm này, một mô hình cánh tương tự cánh của loài nhện được cho chuyển động với quy luật điều hòa và tiến hành đo lực nâng tác dụng lên cánh. So sánh biến thiên hệ số lực nâng trong một chu kỳ vẫy cánh được biểu diễn trên hình 4.

Các giá trị cực đại và cực tiểu của hệ số lực nâng thu được từ mô phỏng và thực nghiệm được thể hiện trong bảng 1. Sai số đều không vượt quá 2% giá trị hệ số lực nâng cực đại. Có thể thấy, kết quả mô phỏng và thực nghiệm là khá gần nhau, điều này chứng tỏ sự chính xác của mô hình tính toán.



Hình 4. So sánh hệ số lực nâng giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Bảng 1. So sánh giá trị cực đại và cực tiểu của hệ số lực nâng thu được từ mô phỏng và thực nghiệm

| | C_L^{\max} | C_L^{\min} |
|-------------|--------------|--------------|
| Mô phỏng | 4,268 | -0,04 |
| Thực nghiệm | 4,196 | -0,092 |
| Sai số | 1,7% | 1,23% |

3. Kết quả và thảo luận

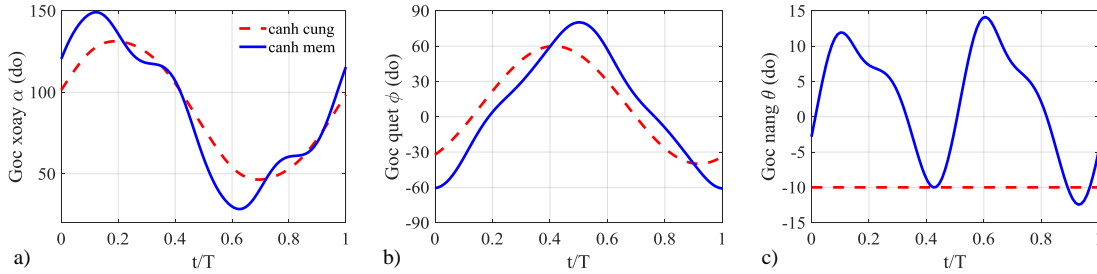
Sử dụng mô hình đã trình bày trong mục 2 để nghiên cứu hiện tượng FSI của cánh loài nhện *Manduca sexta*. Mô hình kết cấu cánh được xây dựng trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm của O'Hara và Palazotto [13]. Tiến hành mô phỏng lần lượt cho cánh cứng và cánh mềm trong chế độ bay treo. Quy luật chuyển động ở gốc cánh trong chế độ bay treo được xác định dựa trên thực nghiệm của Willmott và Ellington [7], theo đó:

$$\begin{aligned} \phi_1(t) &= 10^\circ + 50^\circ \cos(2\pi ft + \frac{\pi}{10}), \\ \theta_1(t) &= -10^\circ, \\ \alpha_1(t) &= 90^\circ - 45^\circ \sin(2\pi ft) \end{aligned} \tag{4}$$

với tần số vẫy $f = 26,1$ Hz.

Trên hình 5 biểu diễn sự biến thiên của các góc Euler ở khu vực mút cánh trong một chu kỳ vẫy. Có thể quan sát thấy sự sớm pha của góc α và chậm pha của góc ϕ do biến dạng cánh mềm so với cánh cứng. Hiện tượng này phù hợp với kết quả thu được từ mô phỏng của Nakata và Liu [14]. Góc nâng θ ở mút cánh dao động với biên độ khoảng 10 độ. Như vậy có thể thấy các chuyển động cánh phức tạp ở mút cánh một phần là do

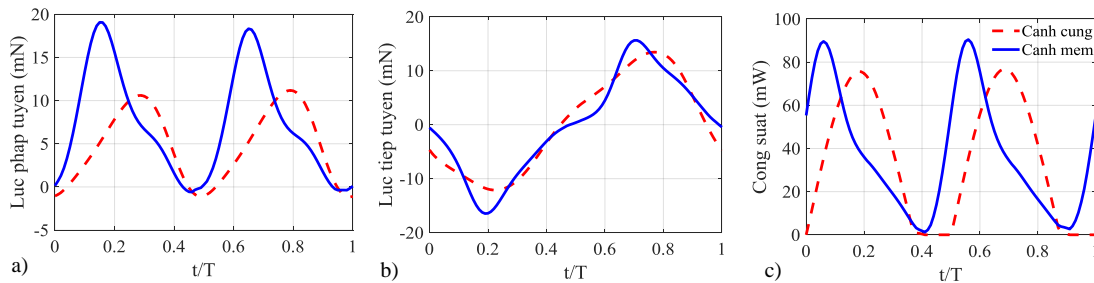
các dao động kết cấu một cách bị động gây ra thay vì có chủ đích. Một số công bố trước đây [11, 15, 16] đã chỉ ra rằng dao động của góc θ không có lợi về mặt năng lượng đối với cánh cứng, do đó các dao động này trong thực tế có thể đến một cách hoàn toàn bị động do biến dạng của cánh mềm và các cơ cấu đàn hồi ở vị trí khớp nối thân - cánh.



Hình 5. So sánh các góc Euler tại khu vực mút cánh: a) góc xoay; b) góc quét; c) góc nâng.

Trên hình 6 biểu diễn sự biến thiên của các lực khí động và công suất của cánh trong một chu kỳ vẫy. Cần chú ý rằng, các lực pháp tuyến và tiếp tuyến được xác định so với mặt phẳng vẫy cánh. Có thể thấy, lực và công suất của cánh mềm có sự sớm pha so với cánh cứng, tương ứng với sự sớm pha của góc xoay α ở gần mút cánh như đã nói ở trên.

Giá trị trung bình trong một chu kỳ của lực pháp tuyến mà cánh mềm sinh ra bằng 7,26 mN, gần bằng một nửa trọng lượng của côn trùng (15 mN), đủ để đảm bảo nâng đỡ côn trùng trong khi bay treo. Giá trị này lớn hơn nhiều giá trị tương ứng của cánh cứng là 4,48 mN, tương đương 62%. Lý do chính của sự chênh lệch này là do biên độ góc vẫy ϕ ở mút cánh của cánh mềm tăng từ 50 đến 67 độ do biến dạng uốn (Hình 5b). Cần nhớ rằng, lực pháp tuyến thường tỉ lệ thuận với bình phương của góc ϕ [17]. Không có sự khác biệt đáng kể về lực tiếp tuyến giữa cánh cứng và cánh mềm.



Hình 6. a) Lực pháp tuyến; b) Lực tiếp tuyến; c) Công suất.

Một trong những yếu tố quan trọng khi xét đến hiệu quả của TBB cánh vẫy đó là tỉ lệ công suất trên mỗi đơn vị lực \tilde{P} [18], được tính bằng công suất trung bình trong mỗi chu kỳ vẫy chia cho lực pháp tuyến trung bình. \tilde{P} càng nhỏ thì hiệu suất năng

lượng của cánh càng cao. Từ bảng 2 có thể thấy, sử dụng cánh mềm có thể làm giảm mức tiêu thụ năng lượng so với cánh cứng từ 4,86 xuống 3,45, tương đương 29%.

Bảng 2. So sánh lực và công suất giữa cánh cứng và cánh mềm

| | Lực pháp tuyến trung bình (mN) | Lực tiếp tuyến trung bình (mN) | Công suất trung bình (mW) | Công suất trên mỗi đơn vị lực (W.N ⁻¹) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--|
| Cánh cứng | 4,78 | 0,04 | 23,23 | 4,86 |
| Cánh mềm | 7,26 | -0,07 | 25,02 | 3,45 |

4. Kết luận

Trong bài báo này, các tác giả đã xây dựng chương trình tính toán FSI cho cánh vẫy kiểu côn trùng trên cơ sở kết hợp mô hình động lực học đa vật và phương pháp tính toán khí động bằng xoáy không dừng. Kết quả mô phỏng cho mô hình cánh loài nhậy *Manduca sexta* ở chế độ bay treo cho thấy, sử dụng cánh mềm không chỉ làm tăng đáng kể lực pháp tuyến so với cánh cứng mà còn làm tăng hiệu suất năng lượng của cánh. Kết quả của nghiên cứu có thể dùng làm cơ sở trong việc thiết kế chế tạo các TBB siêu nhỏ mô phỏng côn trùng.

Tài liệu tham khảo

- [1] H. V. Phan and H. C. Park, "Insect-inspired, tailless, hover-capable flapping-wing robots: Recent progress, challenges, and future directions," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 111, 2019, doi: 10.1016/j.paerosci.2019.100573.
- [2] R. Ramamurti and W. C. Sandberg, "A computational investigation of the three-dimensional unsteady aerodynamics of *Drosophila* hovering and maneuvering," *J Exp Biol*, vol. 210, no. Pt 5, pp. 881-96, Mar 2007, doi: 10.1242/jeb.02704.
- [3] Z. J. Wang, "Dissecting Insect Flight," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 37, no. 1, pp. 183-210, 2005, doi: 10.1146/annurev.fluid.36.050802.121940.
- [4] A. T. Nguyen, J.-K. Kim, J.-S. Han, and J.-H. Han, "Extended Unsteady Vortex-Lattice Method for Insect Flapping Wings," *Journal of Aircraft*, vol. 53, no. 6, pp. 1709-1718, 2016, doi: 10.2514/1.C033456.
- [5] A. T. Nguyen, D. Q. Nguyen, A. T. Nguyen, and V. B. Phung, "The effect of elastic storage on the optimal wing kinematics of an insect-like flapping-wing micro air vehicle " presented at the *Tuyển tập Công trình Hội nghị khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 22*, Hải Phòng, 25-27/7/2019, 2020.
- [6] S. A. Combes and T. L. Daniel, "Into thin air: Contributions of aerodynamic and inertial-elastic forces to wing bending in the hawkmoth *Manduca sexta*," *J Exp Biol*, vol. 206, no. 17, pp. 2999-3006, Sep 2003, doi: 10.1242/jeb.00502.

- [7] A. P. Willmott and C. P. Ellington, "The mechanics of flight in the hawkmoth *Manduca sexta*. I. Kinematics of hovering and forward flight," *Journal of Experimental Biology*, vol. 200, no. 21, pp. 2705-2722, 1997, doi: 10.1242/jeb.200.21.2705.
- [8] V. D. T. Le, A. T. Nguyen, V. B. Phung, T. D. Pham, and J.-H. Han, "The beam modelling of the hawkmoth wing structure," presented at the *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication X*, 2020.
- [9] V. D. T. Le, A. T. Nguyen, N. T. Dang, and B. V. Phung, "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.
- [10] A. T. Nguyen and J.-H. Han, "Wing flexibility effects on the flight performance of an insect-like flapping-wing micro-air vehicle," *Aerospace Science and Technology*, vol. 79, pp. 468-481, 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.06.007.
- [11] A. T. Nguyen, N. D. Tran, T. T. Vu, T. D. Pham, Q. T. Vu, and J.-H. Han, "A Neural-network-based Approach to Study the Energy-optimal Hovering Wing Kinematics of a Bionic Hawkmoth Model," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 16, no. 5, pp. 904-915, 2019, doi: 10.1007/s42235-019-0105-5.
- [12] K. B. Lua, T. T. Lim, and K. S. Yeo, "Scaling of Aerodynamic Forces of Three-Dimensional Flapping Wings," *AIAA Journal*, vol. 52, no. 5, pp. 1095-1101, 2014, doi: 10.2514/1.J052730.
- [13] R. P. O'Hara and A. N. Palazotto, "The morphological characterization of the forewing of the *Manduca sexta* species for the application of biomimetic flapping wing micro air vehicles," *Bioinspir Biomim*, vol. 7, no. 4, p. 046011, Dec 2012, doi: 10.1088/1748-3182/7/4/046011.
- [14] T. Nakata and H. Liu, "A fluid–structure interaction model of insect flight with flexible wings," *Journal of Computational Physics*, vol. 231, no. 4, pp. 1822-1847, 2012, doi: 10.1016/j.jcp.2011.11.005.
- [15] K. B. Lua, Y. J. Lee, T. T. Lim, and K. S. Yeo, "Aerodynamic Effects of Elevating Motion on Hovering Rigid Hawkmothlike Wings," *AIAA Journal*, vol. 54, no. 8, pp. 2247-2264, 2016, doi: 10.2514/1.J054326.
- [16] G. Luo, G. Du, and M. Sun, "Effects of Stroke Deviation on Aerodynamic Force Production of a Flapping Wing," *AIAA Journal*, vol. 56, no. 1, pp. 25-35, 2018, doi: 10.2514/1.J055739.
- [17] N. Phillips and K. Knowles, "Effect of flapping kinematics on the mean lift of an insect-like flapping wing," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 225, no. 7, pp. 723-736, 2011, doi: 10.1177/0954410011401705.
- [18] A. P. Willmott and C. P. Ellington, "The mechanics of flight in the hawkmoth *Manduca sexta*. II. Aerodynamic consequences of kinematic and morphological variation," *Journal of Experimental Biology*, vol. 200, no. 21, pp. 2723-2745, 1997, doi: 10.1242/jeb.200.21.2723.

EFFECT OF FLEXIBILITY ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN INSECT-LIKE FLAPPING-WING IN HOVERING

Abstract: *Insect-mimicking flapping-wing micro air vehicles (FWMAVs) are currently of great research interest due to their many practical applications. Most of the studies have focused on the rigid wing, which is much simpler. However, the wings of these FWMAVs, as well as those of insects in nature, are light and flexible structures, thus the deformation is unavoidable. In this study, a spring-body system is used to model the insect-like wing structure, combined with an aerodynamic program based on the UVLM model. The co-simulation framework is validated with published experimental data. Results show that using the flexible wing significantly increases the lift force as well as improves energy efficiency.*

Keywords: Insect flapping wing; aerodynamic; fluid - structure interaction.

Nhận bài: 04/05/2022; Hoàn thiện sau phản biện: 10/08/2022; Chấp nhận đăng: 16/09/2022

