

CHẨN ĐOÁN ĐỘ CỨNG KẾT CẤU HỆ THANH BẰNG PHƯƠNG PHÁP CẬP NHẬT MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN KẾT HỢP THUẬT GIẢI TIẾN HÓA VI PHÂN CẢI TIẾN

Nguyễn Bá Duẩn^{a,*}, Phạm Hoàng Anh^a

^a*Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
Số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 04/11/2019, Sửa xong 14/12/2019, Chấp nhận đăng 16/12/2019

Tóm tắt

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu về việc chẩn đoán độ cứng kết cấu hệ thanh sử dụng phương pháp cập nhật mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) và thuật toán tiến hóa vi phân cải tiến (ANDE). Độ cứng của các cấu kiện trong kết cấu hư hỏng được xác định thông qua tối ưu hóa sai khác giữa số liệu dao động thực nghiệm (mô phỏng trên mô hình giả định hư hại cho trước) và ứng xử của mô hình PTHH lý thuyết với các tham số độ cứng chưa biết. Kết quả kiểm chứng trên hai ví dụ số, một kết cấu dàn và một kết cấu khung phẳng, cho thấy phương pháp đề xuất là một phương pháp khả thi và hiệu quả cho việc chẩn đoán độ cứng kết cấu hệ thanh.

Từ khóa: chẩn đoán kết cấu; cập nhật mô hình PTHH; chẩn đoán độ cứng; ANDE.

STIFFNESS IDENTIFICATION OF BAR STRUCTURES BY FINITE ELEMENT MODEL UPDATING INTEGRATED WITH AN IMPROVED DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM

Abstract

This paper presents a study on the identification of stiffness of bar structures by using finite element (FE) model updating method and an improved differential evolution algorithm named ANDE. The stiffness of damage bars are estimated by optimizing the difference between the experimental vibration responses of the structure (through the simulation model of a given damage assumption) and that of the theoretical FE model with unknown stiffness parameters. The investigated results of two numerical examples, a planar truss and a planar frame, show that the proposed method is efficient and realizable for the stiffness identification of bar structures.

Keywords: structural identification; finite element model updating; stiffness identification; ANDE.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(1V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(1V)-03) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Trong thực tế, công trình xây dựng dù được thiết kế, thi công, giám sát, quản lý tốt thì vẫn tồn tại sai khác và khuyết tật. Điều này có nguy cơ làm giảm độ an toàn và tuổi thọ của kết cấu, hư hỏng một phần hoặc toàn bộ công trình. Do vậy, chúng ta cần phải đánh giá cụ thể về tình trạng của kết cấu trong quá trình sử dụng để có những biện pháp gia cố và sửa chữa kịp thời. Những hư hại trong kết cấu thông thường sẽ dẫn tới sự thay đổi không chỉ khả năng chịu lực mà còn cả độ cứng trong các cấu kiện so với thiết kế ban đầu. Hư hại trong kết cấu có thể do nhiều lý do, ví dụ: khuyết tật trong các cấu kiện, các vết nứt do mỏi và ăn mòn. Việc xác định lại độ cứng các cấu kiện của kết cấu do đó thường được thực hiện khi đánh giá tình trạng kết cấu và giám sát sức khỏe công trình.

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: duannb@nuce.edu.vn (Duẩn, N. B.)

Một trong những cách phổ biến và hiệu quả để phát hiện hư hại là sử dụng các dữ liệu đo phản ứng dao động của kết cấu [1–4]. Cùng với việc phát triển các công nghệ về thiết bị và dụng cụ đo đạc, các kỹ thuật và chương trình phần mềm tính toán trên máy tính cũng đã được nghiên cứu và áp dụng như các hệ thống logic mờ [5–7] và các mạng thần kinh nhân tạo [8–10]. Trong những năm gần đây, xu hướng sử dụng các thuật toán tối ưu mê-ta ơ-rít-tíc (MHs) để giải quyết bài toán ngược phát hiện hư hại trong kết cấu rất được quan tâm. Khi đó bài toán chẩn đoán được thiết lập dưới dạng một bài toán tối ưu. Một số bài toán được xây dựng và giải quyết bằng các thuật toán MHs như thuật toán di truyền [11], tối ưu hóa bầy đàn [12], thuật toán bầy ong [13, 14], thuật toán tiến vi phân [15–17], chiến lược tiến hóa [18], thuật toán miễn dịch nhân tạo [19], thuật toán tối ưu hóa bầy kiến [20].

Mặt khác, cách tiếp cận phổ biến nhất cho mô hình số trong thiết kế kỹ thuật là phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Đầu những năm 1990, phương pháp cập nhật mô hình PTHH đã được đẩy mạnh nghiên cứu trong các bài toán chuẩn đoán kỹ thuật, theo dõi, giám sát sức khỏe của công trình trong quá trình sử dụng [21]. Nội dung chính của bài báo này là sử dụng phương pháp cập nhật mô hình PTHH, thiết lập bài toán ngược với số liệu đầu vào là các đặc trưng dao động riêng của kết cấu hệ thanh (tần số và dạng dao động riêng) nhằm xác định lại độ cứng của các cấu kiện trong mô hình. Việc xác định độ cứng các cấu kiện thanh bị hư hại được thực hiện bằng cách tối ưu hóa sai khác giữa số liệu ứng xử đo thực nghiệm (thông qua mô phỏng trên mô hình giả định hư hại cho trước) và ứng xử của mô hình lý thuyết với các tham số độ cứng chưa biết của các cấu kiện. Thuật toán tiến hóa vi phân cải tiến ANDE [22] được đề xuất áp dụng để giải bài toán tối ưu, giúp giảm khối lượng tính toán trong quá trình xác định độ cứng các cấu kiện. Hai ví dụ mô phỏng số được trình bày, gồm một kết cấu dàn phẳng và một kết cấu khung phẳng, để minh họa cho phương pháp đề xuất.

2. Bài toán chẩn đoán độ cứng kết cấu

Bài toán chẩn đoán độ cứng kết cấu theo phương pháp cập nhật mô hình PTHH được mô tả trên Hình 1. Đầu tiên, mô hình PTHH của kết cấu được thiết lập dựa trên các giá trị giả định ban đầu về các tham số độ cứng của các cấu kiện trong hệ kết cấu. Các tham số này sẽ được cập nhật khi có các số liệu đo thực nghiệm về ứng xử của kết cấu thực sao cho sai số $\|\delta\|$ giữa ứng xử phân tích mô hình và ứng xử từ đo thực nghiệm nhỏ hơn một giá trị vô cùng bé ε . Tuy nhiên, việc xác định được các giá trị tham số phù hợp là không đơn giản. Trên thực tế, việc xác định lại các tham số độ cứng thường được thực hiện thông qua giải một bài toán tối ưu hóa với hàm mục tiêu là sai số δ , và biến tối ưu là các tham số độ cứng.

Gọi $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ là véc tơ chứa m giá trị tham số độ cứng của mô hình sẽ được xác định thông qua giải bài toán tối ưu. Sai số giữa ứng xử của mô hình và ứng xử đo đạc được xác định bởi

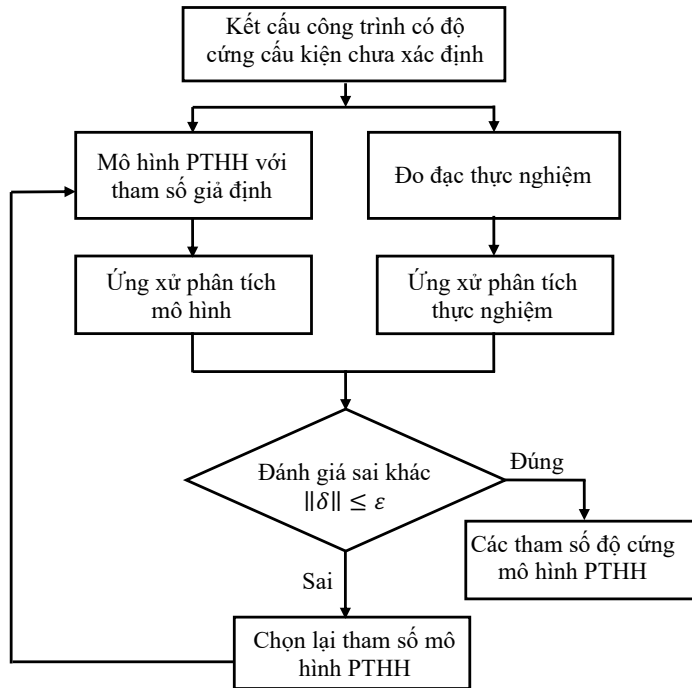
$$\|\delta(\mathbf{a})\| = \|\mathbf{u}_g(\mathbf{a}) - \mathbf{u}_m\| \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{u}_g(\mathbf{a})$ là ứng xử từ phân tích mô hình và \mathbf{u}_m là ứng xử từ số liệu đo đạc. Bài toán tối ưu tìm tham số độ cứng \mathbf{a} được thiết lập như sau:

$$\begin{aligned} \min \|\delta(\mathbf{a})\| &= \|\mathbf{u}_g(\mathbf{a}) - \mathbf{u}_m\| \\ a_{i\min} \leq a_i \leq a_{i\max}, \quad & i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (2)$$

trong đó $a_{i\min}$ và $a_{i\max}$ lần lượt là giá trị cận dưới và cận trên của tham số độ cứng a_i .

Hai khó khăn chính trong việc giải bài toán tối ưu (2) là: (i) hàm mục tiêu thường không trơn và có nhiều cực trị; (ii) việc phân tích mô hình PTHH thường đòi hỏi khối lượng tính toán lớn. Các phương pháp tối ưu dựa trên gradient có tốc độ hội tụ nhanh tuy nhiên dễ bị mắc vào cực trị địa



Hình 1. Sơ đồ phương pháp cập nhật mô hình PTHH

phương và do đó không thực sự hiệu quả khi áp dụng trong bài toán chẩn đoán. Các thuật giải dạng MHs có thể tránh được các cực trị địa phương và tìm được nghiệm tối ưu toàn miền. Tuy nhiên, các phương pháp MHs thường hội tụ chậm, dẫn đến khối lượng tính toán lớn.

Trong số các thuật toán MHs, thuật toán tiến hóa vi phân (DE) [23] được xem như một trong những thuật toán tối ưu kiểu ngẫu nhiên mạnh nhất hiện nay và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực [24, 25]. Ưu điểm của DE là có cấu trúc đơn giản, yêu cầu ít tham số điều khiển, tìm kiếm nghiệm tối ưu toàn miền rất hiệu quả và cho khả năng tính toán song song cao. Tuy nhiên, cũng như các thuật toán MHs khác, hạn chế khi áp dụng DE vào bài toán thực tế là yêu cầu khối lượng tính toán lớn. Thông thường, phải thực hiện hàng ngàn lần tính hàm mục tiêu để có thể thu được nghiệm tối ưu. Trong phần tiếp theo, bài báo giới thiệu một thuật giải DE cải tiến, cho phép giảm đáng kể khối lượng tính toán khi giải bài toán tối ưu so với DE truyền thống.

3. Thuật toán tiến hóa vi phân DE

Thuật toán tiến hóa vi phân thuộc lớp các thuật toán tối ưu theo quần thể (population-based optimization) do Storn và Price phát minh [23]. Giả sử cần tìm giá trị tối ưu của hàm mục tiêu:

$$u = f(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad \mathbf{x} = \{x_i\}, x_i \in [x_{i,\min}, x_{i,\max}], \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

trong đó n là số lượng biến, $x_{i,\min}$ và $x_{i,\max}$ lần lượt là giá trị cận dưới và cận trên của biến x_i .

Đầu tiên, quần thể ban đầu gồm NP cá thể là các véc tơ $\mathbf{x}_k(0), k = 1, \dots, NP$:

$$x_{k,i}(0) = x_{i,\min} + \text{rand}[0, 1](x_{i,\max} - x_{i,\min}), \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

trong đó $\text{rand}[0, 1]$ là số thực chọn ngẫu nhiên trong khoảng từ 0 đến 1.

Ở thế hệ thứ $(t + 1)$, ứng với ứng với mỗi véc tơ $\mathbf{x}_k(t)$ trong quần thể ở thế hệ trước, một véc tơ mới được tạo ra thông qua phép đột biến như sau:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}_{r_1}(t) + F \cdot [\mathbf{x}_{r_2}(t) - \mathbf{x}_{r_3}(t)] \quad (5)$$

trong đó, r_1, r_2, r_3 là ba số nguyên được chọn ngẫu nhiên thỏa mãn $1 \leq r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq k \leq NP$; F là hệ số khuếch đại (số thực dương, thường $F \in (0, 1)$).

Véc tơ \mathbf{y} sau đó được lai ghép với $\mathbf{x}_k(t)$ để tạo ra véc tơ thử \mathbf{z} có thành phần được xác định như sau:

$$z_i = \begin{cases} y_i & \text{khi } (\text{rand}[0, 1] \leq Cr) \\ x_{k,i}(t) & \text{khi } (\text{rand}[0, 1] > Cr) \end{cases} \quad (6)$$

trong đó Cr là tham số lai ghép (crossover) lấy trong khoảng từ 0 đến 1. Thực hiện so sánh véc tơ thử \mathbf{z} với $\mathbf{x}_k(t)$, nếu \mathbf{z} cho giá trị hàm mục tiêu tốt hơn so với $\mathbf{x}_k(t)$, \mathbf{z} sẽ được chọn làm cá thể cho thế hệ sau thay cho $\mathbf{x}_k(t)$, nghĩa là $\mathbf{x}_k(t + 1) = \mathbf{z}$, ngược lại $\mathbf{x}_k(t + 1) = \mathbf{x}_k(t)$.

Kỹ thuật đột biến đóng một vai trò quan trọng trong khả năng tìm kiếm và tốc độ hội tụ của thuật toán tiến hóa vi phân DE. Ví dụ, kỹ thuật DE/rand/1 như phương trình (5) có thể duy trì sự đa dạng quần thể và khả năng tìm kiếm toàn miền. Tuy nhiên, khả năng tìm kiếm địa phương của nó được coi là yếu và tốc độ hội tụ thường thấp. Trái lại, kỹ thuật DE/best/1 với cá thể tốt nhất tại thời điểm hiện tại được sử dụng làm vectơ cơ sở, có khả năng tìm kiếm địa phương tốt và tốc độ hội tụ nhanh, nhưng nó có thể mất sự đa dạng của quần thể và gặp phải vấn đề hội tụ cục bộ, cho nghiệm tối ưu địa phương trong các bài toán đa cực trị. Thông thường ta phải kết hợp các kỹ thuật đột biến khác nhau để cân bằng giữa tốc độ hội tụ và khả năng tìm kiếm toàn miền.

4. Thuật toán tiến hóa vi phân cải tiến ANDE

Nội dung mục này trình bày một thuật toán tiến hóa vi phân cải tiến (ANDE). ANDE do Phạm [22] đề xuất năm 2016 cho bài toán tối ưu trọng lượng kết cấu dàn với ràng buộc về tần số dao động riêng. Trong nghiên cứu này, ANDE được đề xuất áp dụng để xác định các tham số độ cứng trong bài toán chuẩn đoán kết cấu. ANDE khác biệt so với DE truyền thống bởi ba cải tiến: (i) đột biến thích nghi (Adaptive p-best mutation); (ii) đột biến định hướng (Directional mutation rule) và (iii) phép so sánh lân cận (Nearest neighbor comparison), giúp cải thiện kết quả tối ưu và giảm khối lượng tính toán. Nội dung chi tiết thuật toán ANDE được trình bày ở phần tiếp theo.

4.1. Đột biến thích nghi (Adaptive p-best mutation)

Ý tưởng cơ bản là sự chuyển đổi dần dần từ tìm kiếm toàn miền sang tìm kiếm địa phương lân cận với các cá thể tốt nhất tại thời điểm hiện tại trong quá trình tiến hóa. Ở bước đột biến, kỹ thuật đột biến DE/pbest/1 được áp dụng. Trong DE/pbest/1, một véc tơ đột biến \mathbf{y} được tạo ra như sau:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}_{pbest} + F \cdot [\mathbf{x}_{r_2} - \mathbf{x}_{r_3}] \quad (7)$$

trong đó \mathbf{x}_{pbest} là một cá thể ngẫu nhiên được chọn từ (pNP) cá thể tốt nhất ($0 < p \leq 1$). Khái niệm sử dụng một số cá thể tốt nhất trong đột biến thay vì chỉ sử dụng một cá thể tốt nhất như ‘DE/best/1’ đã được giới thiệu trong JADE bởi Zhang và Sanderson [26]. Giá trị p đóng một vai trò quan trọng trong việc cân bằng khả năng tìm kiếm toàn miền với khả năng tìm kiếm địa phương. Một giá trị p nhỏ có thể dẫn đến khả năng hội tụ nhanh nhưng thường cho nghiệm cục bộ. Trên thực tế, cần duy trì sự đa dạng quần thể ở giai đoạn đầu của quá trình tìm kiếm và nhanh chóng hội tụ ở giai đoạn cuối

của quá trình tiến hóa. Do đó, giá trị của p được thay đổi dần dần trong quá trình tìm kiếm theo quy tắc giảm tuyến tính như sau:

$$p(t) = 1 - \left(1 - \frac{1}{NP}\right) \cdot \frac{t - 1}{T_{\max} - 1} \quad (8)$$

trong đó t là thế hệ thứ t ; T_{\max} là số lượng tối đa các thế hệ; NP là kích thước dân số (số lượng cá thể). Do đó, trong các thế hệ ban đầu, giá trị lớn hơn của $p(t)$ được sử dụng để ưu tiên tìm kiếm miền chứa nghiệm tối ưu toàn miền. Trong các thế hệ sau, các giá trị $p(t)$ nhỏ hơn được sử dụng để tăng tốc độ hội tụ.

4.2. Đột biến định hướng (Directional mutation rule)

Kỹ thuật đột biến thích nghi sử dụng công thức (7) dựa trên sai khác của hai cá thể khác nhau được lựa chọn một cách ngẫu nhiên. Do đó nó không thiên về bất kỳ một hướng tìm kiếm đặc biệt nào. Để tận dụng thông tin của quần thể, sai khác giữa hai cá thể ngẫu nhiên được nhân với hệ số định hướng d :

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}_{pbest} + d \cdot F \cdot [\mathbf{x}_{r_2} - \mathbf{x}_{r_3}] \quad (9)$$

trong đó d lấy giá trị 1 hoặc -1 , phụ thuộc vào quan hệ giữa \mathbf{x}_{r_2} và \mathbf{x}_{r_3} . d được xác định như sau:

$$d = \begin{cases} 1 & \text{khi } f(\mathbf{x}_{r_2}) \leq f(\mathbf{x}_{r_3}) \\ -1 & \text{khi } f(\mathbf{x}_{r_2}) > f(\mathbf{x}_{r_3}) \end{cases} \quad (10)$$

Quy tắc này cho phép sai khác giữa hai cá thể ngẫu nhiên được dùng để định hướng tới cá thể tốt hơn và làm tăng khả năng tạo ra một cá thể mới tốt.

4.3. So sánh lân cận (NNC)

So sánh lân cận (NNC) là một kỹ thuật cho phép đánh giá sớm một cá thể mà không cần xác định hàm mục tiêu tương ứng. Kỹ thuật này lần đầu được Phạm [27] đề xuất và sau đó đã được dùng trong một số thuật toán DE cải tiến để giải các bài toán tối ưu trong kỹ thuật [28–31]. Các bước thực hiện của NNC như sau:

Trong quần thể thế hệ t , tìm véc tơ $\mathbf{x}_c(t)$ gần nhất với véc tơ thử z . Để thực hiện, ta sử dụng phép đo khoảng cách Euclidean như biểu thức (11):

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - y_i}{\max_k x_{k,i} - \min_k x_{k,i}} \right)^2} \quad (11)$$

trong đó $d(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ là khoảng cách giữa hai véc tơ n chiều \mathbf{x} và \mathbf{y} .

Sử dụng giá trị hàm mục tiêu của $\mathbf{x}_c(t)$ để so sánh với giá trị hàm mục tiêu của $\mathbf{x}_k(t)$. Nếu $f(\mathbf{x}_c(t))$ kém hơn $f(\mathbf{x}_k(t))$, véc tơ thử có nhiều khả năng cho giá trị hàm mục tiêu không tốt hơn $f(\mathbf{x}_k(t))$ và nó được coi là véc tơ thử kém tiềm năng (PUT). Véc tơ PUT sẽ được bỏ qua và việc xác định giá trị hàm mục tiêu sẽ không được thực hiện, do đó giảm được các tính toán không cần thiết.

4.4. Xử lý điều kiện biên

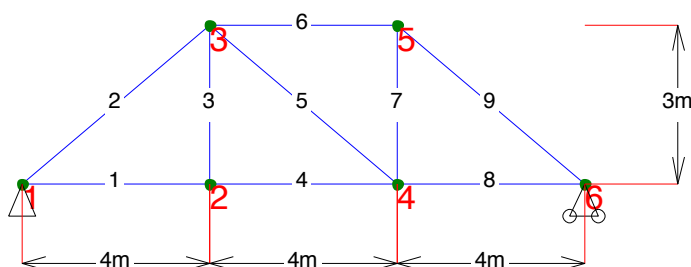
Trong quá trình tạo các cá thể mới, nếu giá trị của một biến số x_i vượt ra ngoài khoảng $[x_{i,\min}, x_{i,\max}]$, x_i sẽ được gán giá trị của cận mà nó vi phạm.

5. Ví dụ minh họa

Để khảo sát khả năng của phương pháp đề xuất trong việc chẩn đoán độ cứng kết cấu hệ thanh, hai kết cấu bao gồm một kết cấu dàn phẳng và một kết cấu khung phẳng sẽ được sử dụng trong nghiên cứu này. Để đơn giản, hư hỏng trong cấu kiện của hệ được giả định và ứng xử của kết cấu hư hại thu được từ phân tích mô phỏng trên mô hình PTHH thay vì thực hiện đo đạc và phân tích từ thí nghiệm thực. Toàn bộ các chương trình phân tích kết cấu và chương trình tối ưu được các tác giả lập trong môi trường MATLAB.

5.1. Hệ dàn phẳng

Sơ đồ kết cấu dàn phẳng chín thanh cho trên Hình 2. Các thanh có diện tích mặt cắt ngang là $0,0025 \text{ m}^2$. Khối lượng riêng và mô đun đàn hồi của vật liệu lần lượt là 7850 kg/m^3 và 200 GPa .



Hình 2. Mô hình hệ dàn phẳng

Trong ví dụ này, hai trường hợp hư hại được giả định để phân tích:

- Trường hợp 1: Thanh số 2 bị suy giảm 50% độ cứng dọc trục EA.
- Trường hợp 2: Thanh số 2 bị suy giảm 50% độ cứng dọc trục EA và thanh số 9 bị suy giảm 25% độ cứng dọc trục EA.

Giả thiết hệ là đàn hồi tuyến tính. Hư hại của kết cấu được xác định thông qua đánh giá sự thay đổi giá trị tần số dao động riêng của hệ. Tần số dao động riêng của kết cấu được tính từ bài toán trị riêng:

$$([\mathbf{K}] - \omega_j^2 [\mathbf{M}]) \{\phi_j\} = \{0\} \quad (12)$$

trong đó $[\mathbf{K}]$ và $[\mathbf{M}]$ lần lượt là ma trận độ cứng và ma trận khối lượng của kết cấu; ϕ_j, ω_j lần lượt là dạng dao động riêng và tần số dao động riêng thứ j .

Giả thiết ma trận khối lượng của kết cấu là không thay đổi so với trạng thái ban đầu (không hư hại). Sự hư hại trên các cấu kiện chỉ ảnh hưởng đến ma trận độ cứng của kết cấu. Ma trận độ cứng của kết cấu bị hư hại được ký hiệu là $[\mathbf{K}_d]$ và được thiết lập như sau:

$$[\mathbf{K}_d] = \sum_{i=1}^m a_i [\mathbf{K}_i] \quad (13)$$

trong đó a_i là tham số độ cứng của thanh thứ i ; $[\mathbf{K}_i]$ là ma trận độ cứng phần tử thanh thứ i nguyên vẹn. Như vậy, khi $a_i = 1$ sẽ tương ứng với trường hợp thanh không bị suy giảm độ cứng và khi $a_i = 0$ sẽ tương ứng với suy giảm hoàn toàn độ cứng. Dạng dao động và tần số dao động riêng của kết cấu hư hại được tính toán theo (12) sau khi thay thế $[\mathbf{K}]$ bằng $[\mathbf{K}_d]$. Kết quả phân tích 6 tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu dàn không bị hư hại và hư hại được thể hiện trong Bảng 1. Tần số dao động

riêng của dàn không bị hư hại rất sát với kết quả của Kwon and Bang [32], qua đó cho thấy chương trình tính có độ tin cậy.

Hàm mục tiêu cho bài toán tối ưu xác định các tham số độ cứng a_i được thiết lập như sau [33]:

$$\delta(\mathbf{a}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_{\text{mode}}} (\omega_j(\mathbf{a}) - \omega_{j,m})^2}{n_{\text{mode}}}} \quad (14)$$

trong đó $\omega_{j,m}$ và $\omega_j(\mathbf{a})$ lần lượt là tần số dao động riêng thứ j được đo từ kết cấu hư hại và tần số dao động riêng thứ j từ phân tích mô hình lý thuyết tương ứng với tham số \mathbf{a} ; n_{mode} là số dạng dao động được dùng để tính toán (được lấy bằng 6 trong ví dụ này).

Bảng 1. Tần số dao động riêng (Hz) của kết cấu dàn phẳng ban đầu và hư hại

Mode	Ban đầu [32]	Ban đầu (Bài báo)	Hư hại	
			Trường hợp 1	Trường hợp 2
1	38,3404	38,3606	36,0103	35,0257
2	74,4686	74,5226	66,3895	66,2781
3	117,7428	117,8257	104,8556	101,6319
4	197,8296	198,0133	194,2126	188,2125
5	259,9000	260,1367	256,4372	255,9724
6	-	334,7825	334,7771	334,7585

Áp dụng thuật toán DE và ANDE với các tham số điều khiển: quy mô quần thể $NP = 20$; hệ số đột biến $F = 0,7$; tham số lai ghép $Cr = 0,9$; dung sai của hàm mục tiêu $\varepsilon = 0,001$. Điều kiện dừng là khi giá trị hàm mục tiêu nhỏ hơn $\varepsilon = 0,001$ hoặc số lần tính toán hàm vượt quá $Max_NEs = 4000$. Mỗi trường hợp sẽ được thực hiện 50 lần với cả ANDE và DE.

a. Kết quả bài toán dàn có một thanh bị hư hại

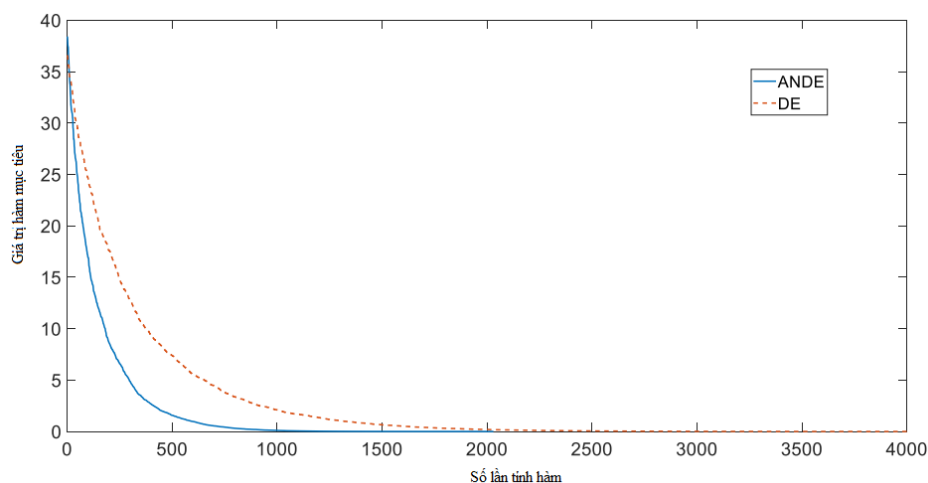
Các kết quả được trình bày trên Hình 3 và Bảng 2 đến 4.

Bảng 2. Kết quả tối ưu bài toán dàn một thanh bị hư hại

Hệ số	Thuật toán	Chính xác	Trung bình	Max	Min	STD
a_2	DE	0,5	0,5001	0,5002	0,5000	0,0000
	ANDE	0,5	0,5000	0,5001	0,5000	0,0000

Bảng 3. Kết quả tối ưu tốt nhất bài toán dàn một thanh bị hư hại

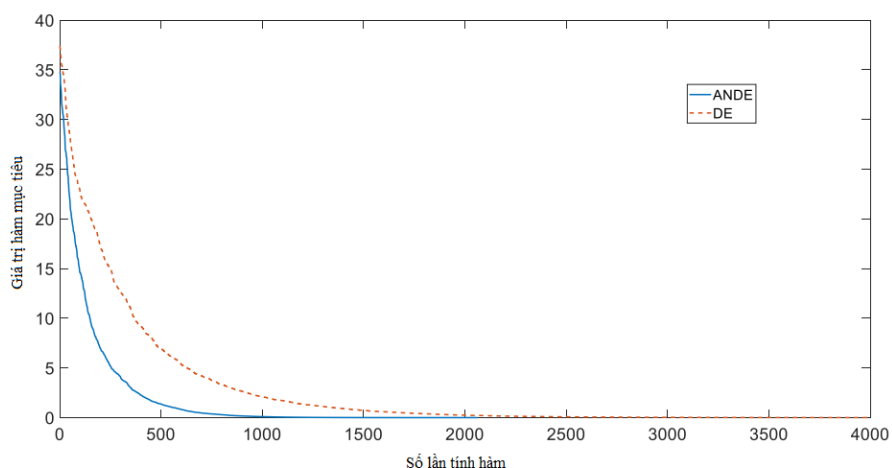
Hệ số	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
Chính xác	1,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
DE	1,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
ANDE	1,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000



Hình 3. Đường cong hội tụ hàm mục tiêu bài toán dàn có một thanh bị hư hại

Bảng 4. Giá trị hàm mục tiêu bài toán dàn một thanh bị hư hại

Thuật toán	Giá trị hàm mục tiêu			
	Max	Min	Trung bình	STD
DE	0,0052	0,0006	0,0014	0,0009
ANDE	0,0010	0,0006	0,0008	0,0001



Hình 4. Đường cong hội tụ hàm mục tiêu bài toán dàn có hai thanh bị hư hại

b. Kết quả bài toán dàn có hai thanh bị hư hại

Các kết quả được trình bày trên Hình 4 và Bảng 5 đến 7.

Ta nhận thấy phương pháp đề xuất có thể xác định các hệ số độ cứng của kết cấu dàn bị hư hại. Nghiệm tối ưu tìm được rất sát với kết quả chính xác. So sánh giữa ANDE và DE thông thường:

Bảng 5. Kết quả tối ưu bài toán đàn hai thanh bị hư hại

Hệ số	Thuật toán	Chính xác	Trung bình	Max	Min	STD
a_2	DE	0,5	0,5000	0,5003	0,4998	0,0001
	ANDE	0,5	0,5000	0,5001	0,5000	0,0000
a_9	DE	0,75	0,7501	0,7505	0,7499	0,0001
	ANDE	0,75	0,7500	0,7501	0,7500	0,0000

Bảng 6. Kết quả tối ưu tốt nhất bài toán đàn hai thanh bị hư hại

Hệ số	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
Chính xác	1,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,7500
DE	1,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,7500
ANDE	1,0000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,7500

Bảng 7. Giá trị hàm mục tiêu bài toán đàn hai thanh bị hư hại

Thuật toán	Giá trị hàm mục tiêu			
	Max	Min	Trung bình	STD
DE	0,0077	0,0007	0,0024	0,0018
ANDE	0,0010	0,0005	0,0008	0,0001

- ANDE hội tụ nhanh hơn so với DE thông thường.
- Xét trên 50 lần chạy, nghiệm tối ưu của thuật toán ANDE cho kết quả ổn định hơn.

5.2. Hệ khung phẳng

Kết cấu khung phẳng trên Hình 5 được sử dụng để phân tích [34]. Mô hình PTHH khung bao gồm mười nút, chín phần tử thanh và bậc tự do $n = 27$. Số liệu tính toán được cung cấp trong Bảng 8 và Bảng 9. Trong ví dụ này, hư hại được giả định xảy ra trong các phần tử và kết quả là làm giảm mô men quán tính tiết diện. Mô men quán tính thực của tiết diện phần tử thứ e được xác định bằng cách nhân mô men quán tính của tiết diện ban đầu I_e^0 với một tham số không thứ nguyên a_e thuộc khoảng $[0, 1]$.

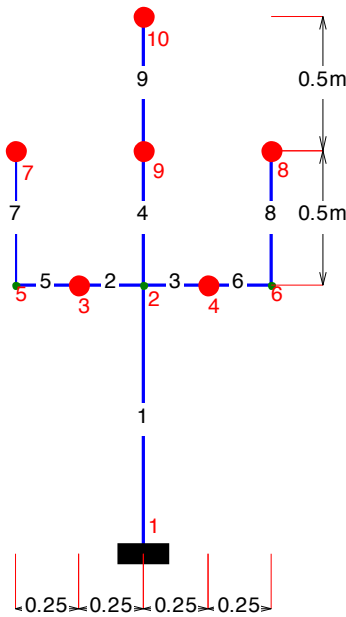
$$I_e = a_e I_e^0 \tag{15}$$

Các đặc trưng dao động riêng, bao gồm tần số và dạng dao động riêng sẽ được dùng trong bài toán chẩn đoán các tham số độ cứng a_e của các thanh. Các đặc trưng này được xác định theo (12). Bảng 10 liệt kê 12 tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu khung ban đầu và khung hư hại. Kết quả tính toán tần số của khung ban đầu được so sánh với kết quả cho trong [34] cho thấy hoàn toàn phù hợp.

Hàm mục tiêu cho ví dụ này được lấy theo [16] như sau:

$$J(a) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{\text{mode}}} \frac{1}{i} \left(\frac{\omega_{i,m} - \omega_i(\mathbf{a})}{\omega_{i,m}} \right)^2} + w \max_{1 \leq i \leq n_{\text{mode}}} \left[\frac{\sum_{j=1}^n (\phi_{ji,m} - \phi_{ji}(\mathbf{a}))^2}{\sum_{j=1}^n (\phi_{ji,m})^2} \right] \tag{16}$$

trong đó $\phi_{ji,m}$ là thành phần thứ j của dạng dao động chính xác thứ i ; $\phi_{ji}(a)$ là thành phần thứ j của dạng dao động thứ i của mô hình; w là trọng số.



Hình 5. Mô hình hệ khung phẳng

Bảng 8. Dữ liệu phần tử bài toán khung phẳng

Phần tử	Khối lượng riêng (10^5 kg/m^3)	Diện tích (10^{-4} m^2)	Mô men quán tính (10^{-6} m^4)		Tham số độ cứng
			Ban đầu	Hư hại	
1	0,5384	9,2854	369,5200	369,5200	1,00
2	1,0510	5,7103	5,2872	5,2872	1,00
3	1,4010	6,8425	7,1377	7,1377	1,00
4	1,0770	9,2854	527,8800	527,8800	1,00
5	1,0510	5,7103	5,2872	5,2872	1,00
6	1,4010	4,5682	6,6090	6,6090	1,00
7	5,0450	0,1487	2,5943	1,9457	0,75
8	10,0900	0,19827	3,7598	2,8198	0,75
9	0,0000	0,08566	0,7138	0,4640	0,65

Bài toán tối ưu hàm mục tiêu (16) được giải thông qua thuật toán DE và ANDE. Về mặt lý thuyết, miền tìm kiếm của các tham số a_e được xác định trong khoảng $[0, 1]$. Tuy nhiên, để tránh cực tiểu địa phương, dẫn đến các phần tử có thể “cứng” hoặc “mềm” hơn kết quả mong muốn, miền tính toán được thu hẹp trong khoảng $[0,5; 1]$. Trọng số w lấy bằng 1.

Các tham số điều khiển của thuật toán DE và ANDE như sau: quy mô quần thể $NP = 50$; hệ số đột biến $F = 0,7$; tham số lai ghép $Cr = 0,9$; dung sai của hàm mục tiêu $\varepsilon = 0,001$. Điều kiện chấm dứt thuật toán là khi giá trị hàm mục tiêu nhỏ hơn $\varepsilon = 0,001$ hoặc số lần tính toán hàm vượt quá

Bảng 9. Khối lượng tập trung tại nút khung phẳng

Nút	Khối lượng (kg)	Khối lượng xoay (kgm ²)
3	180,0	42,0
4	165,0	42,0
7	20,0	1,8
8	30,0	4,2
9	400,0	37,5
10	15,0	1,0

Bảng 10. 12 tần số dao động riêng (Hz) đầu tiên của kết cấu khung phẳng

Mode	Ban đầu [34]	Ban đầu (Bài báo)	Hư hại
1	21,40	21,4012	21,1330
2	24,33	24,3288	23,9118
3	32,06	32,0642	27,4416
4	37,31	37,3121	35,5506
5	38,23	38,2255	36,2426
6	42,70	42,7021	39,5243
7	43,82	43,8169	42,2638
8	47,57	47,5681	46,9826
9	50,77	50,7722	50,4861
10	52,34	52,3439	52,3427
11	118,26	118,2495	104,8497
12	122,30	122,2973	113,6200

$Max_NEs = 10000$. Bài toán được chạy 50 lần với cả ANDE và DE.

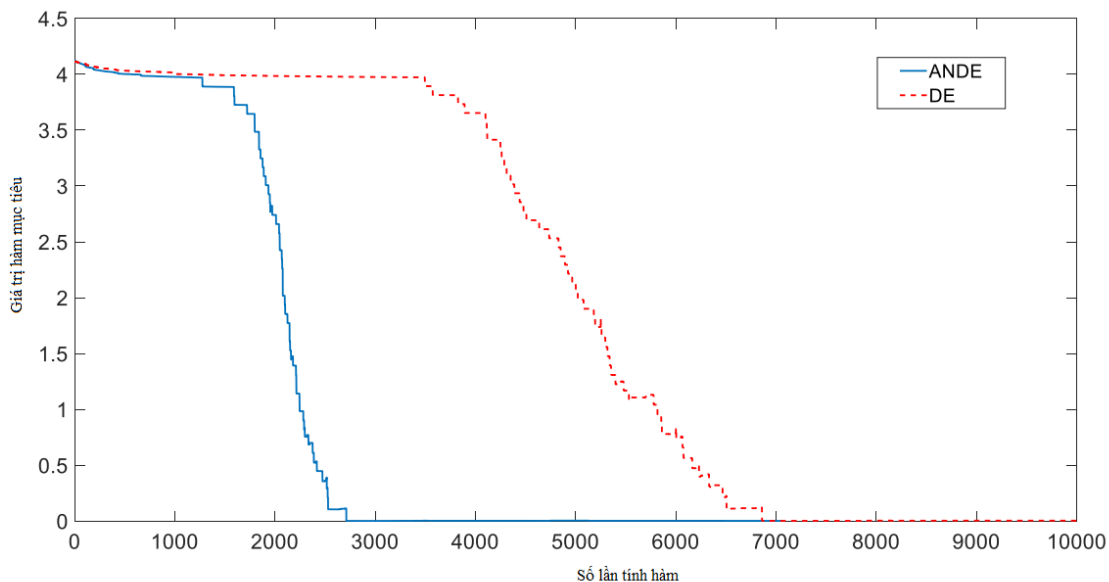
Các kết quả tính toán thể hiện trên Hình 6 và Bảng 11 đến Bảng 13.

Bảng 11. Kết quả tối ưu bài toán khung

Hệ số	Thuật toán	Chính xác	Trung bình	Max	Min	STD
a_7	DE	0,75	0,7497	0,7551	0,7465	0,0018
	ANDE	0,75	0,7490	0,7519	0,7453	0,0016
a_8	DE	0,75	0,7505	0,7559	0,7474	0,0019
	ANDE	0,75	0,7506	0,7541	0,7475	0,0017
a_9	DE	0,65	0,6504	0,6524	0,6480	0,0011
	ANDE	0,65	0,6500	0,6521	0,6478	0,0011

Ta nhận thấy, một lần nữa phương pháp đề xuất có thể xác định các hệ số độ cứng của kết cấu khung bị hư hại. Tuy nhiên, nghiệm tối ưu tốt nhất tìm được trong bài toán khung phẳng kém chính xác hơn so với bài toán dàn phẳng. So sánh giữa ANDE và DE:

- Tương tự với trường hợp dàn phẳng, thuật toán ANDE cho kết quả tối ưu nhanh hơn so với DE.
- Nghiệm tối ưu giải bằng thuật toán ANDE có nhiều phần tử sát hơn với kết quả chính xác.



Hình 6. Đường cong hội tụ giá trị hàm mục tiêu trong bài toán khung

Bảng 12. Kết quả tối ưu tốt nhất bài toán khung

Hệ số	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
Chính xác	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,7500	0,7500	0,6500
DE	0,9976	1,0000	0,9992	1,0009	1,0005	0,9997	0,7494	0,7485	0,6495
ANDE	0,9976	0,9992	0,9996	0,9999	0,9999	0,9988	0,7503	0,7508	0,6501

Bảng 13. Hàm mục tiêu bài toán khung

Thuật toán	Giá trị hàm mục tiêu			
	Max	Min	Trung bình	STD
DE	0,0021	0,0005	0,0008	0,0002
ANDE	0,0020	0,0005	0,0008	0,0002

6. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất một phương pháp chẩn đoán độ cứng của kết cấu hệ thanh sử dụng phương pháp cập nhật mô hình PTHH kết hợp với thuật toán tiến hóa vi phân cải tiến ANDE. Áp dụng phương pháp đề xuất trên các ví dụ mô phỏng số bao gồm một kết cấu dàn phẳng và một kết cấu khung phẳng cho thấy, độ cứng của các cấu kiện có thể được chẩn đoán khá chính xác. Ngoài ra, việc sử dụng thuật giải ANDE không những cho kết quả tốt hơn mà còn nhanh hơn so với thuật giải DE truyền thống. Từ đó cho thấy, phương pháp đề xuất là khả thi và hiệu quả, có thể áp dụng trong bài toán chẩn đoán kỹ thuật trong thực tế.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng cho đề tài mã số 110-2018/KHXD.

Tài liệu tham khảo

- [1] Lifshitz, J. M., Rotem, A. (1969). [Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique](#). *Journal of Composite Materials*, 3(3):412–423.
- [2] Hearn, G., Testa, R. B. (1991). [Modal analysis for damage detection in structures](#). *Journal of Structural Engineering*, 117(10):3042–3063.
- [3] Messina, A., Williams, E. J., Contursi, T. (1998). [Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method](#). *Journal of Sound and Vibration*, 216(5):791–808.
- [4] Koh, B. H., Dyke, S. J. (2007). [Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data](#). *Computers & Structures*, 85(3-4):117–130.
- [5] Buchholz, M., Pecheur, G., Niemeyer, J., Krebs, V. (2007). [Fault detection and isolation for PEM fuel cell stacks using fuzzy clusters](#). *2007 European Control Conference (ECC)*, IEEE, 971–977.
- [6] Agarwalla, D. K., Dash, A. K., Bhuyan, S. K., Nayak, P. S. K. (2014). [Damage detection of fixed-fixed beam: a fuzzy neuro hybrid system based approach](#). *International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*, Springer, 363–372.
- [7] Jiao, Y.-B., Liu, H.-B., Cheng, Y.-C., Gong, Y.-F. (2015). [Damage identification of bridge based on Chebyshev polynomial fitting and fuzzy logic without considering baseline model parameters](#). *Shock and Vibration*, 2015:187956.
- [8] Abdeljaber, O., Avci, O. (2016). [Nonparametric structural damage detection algorithm for ambient vibration response: utilizing artificial neural networks and self-organizing maps](#). *Journal of Architectural Engineering*, 22(2):04016004.
- [9] Alavi, A. H., Hasni, H., Lajnef, N., Chatti, K., Faridazar, F. (2016). [An intelligent structural damage detection approach based on self-powered wireless sensor data](#). *Automation in Construction*, 62:24–44.
- [10] Sidibé, Y., Druaux, F., Lefebvre, D., Maze, G., Leon, F. (2016). [Signal processing and Gaussian neural networks for the edge and damage detection in immersed metal plate-like structures](#). *Artificial Intelligence Review*, 46(3):289–305.
- [11] Chou, J.-H., Ghaboussi, J. (2001). [Genetic algorithm in structural damage detection](#). *Computers & structures*, 79(14):1335–1353.
- [12] Pal, J., Banerjee, S. (2015). [A combined modal strain energy and particle swarm optimization for health monitoring of structures](#). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(4):353–363.
- [13] Xu, H. J., Ding, Z. H., Lu, Z. R., Liu, J. K. (2015). [Structural damage detection based on Chaotic Artificial Bee Colony algorithm](#). *Struct. Eng. Mech.*, 55(6):1223–1239.
- [14] Ding, Z. H., Huang, M., Lu, Z. R. (2016). [Structural damage detection using artificial bee colony algorithm with hybrid search strategy](#). *Swarm and Evolutionary Computation*, 28:1–13.
- [15] Pham, H. A. (2007). *Dynamic system identification based on selective sensitivity*. Luận án Tiến sĩ, Bauhaus-University Weimar, Weimar.
- [16] Casciati, S. (2008). [Stiffness identification and damage localization via differential evolution algorithms](#). *Structural Control and Health Monitoring*, 15(3):436–449.
- [17] Fu, Y. M., Yu, L. (2014). [A DE-based algorithm for structural damage detection](#). *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 919:303–307.
- [18] Jafarkhani, R., Masri, S. F. (2011). [Finite element model updating using evolutionary strategy for damage detection](#). *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(3):207–224.
- [19] Chen, B., Zang, C. (2009). [Artificial immune pattern recognition for structure damage classification](#). *Computers & Structures*, 87(21-22):1394–1407.
- [20] Majumdar, A., Maiti, D. K., Maity, D. (2012). [Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization](#). *Applied Mathematics and Computation*, 218(19): 9759–9772.

- [21] Friswell, M., Mottershead, J. E. (2013). *Finite element model updating in structural dynamics*. Springer Science & Business Media.
- [22] Pham, H. A. (2016). [Truss optimization with frequency constraints using enhanced differential evolution based on adaptive directional mutation and nearest neighbor comparison](#). *Advances in Engineering Software*, 102:142–154.
- [23] Storn, R., Price, K. (1997). [Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces](#). *Journal of Global Optimization*, 11(4):341–359.
- [24] Das, S., Suganthan, P. N. (2010). [Differential evolution: A survey of the state-of-the-art](#). *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 15(1):4–31.
- [25] Truong, V.-H., Kim, S.-E. (2018). [Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm](#). *Advances in Engineering Software*, 121:59–74.
- [26] Zhang, J., Sanderson, A. C. (2009). [JADE: adaptive differential evolution with optional external archive](#). *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 13(5):945–958.
- [27] Pham, H. A. (2015). [Reduction of function evaluation in differential evolution using nearest neighbor comparison](#). *Vietnam Journal of Computer Science*, 2(2):121–131.
- [28] Anh, P. H. (2016). [Truss sizing optimization using enhanced differential evolution with opposition-based mutation and nearest neighbor comparison](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 10(5):3–10.
- [29] Anh, P. H. (2016). [Engineering optimization by constrained differential evolution with nearest neighbor comparison](#). *Vietnam Journal of Mechanics*, 38(2):89–101.
- [30] Pham, A. H., Vu, C. T., Nguyen, D. B., Tran, D. T. (2017). [Engineering Optimization Using an Improved Epsilon Differential Evolution with Directional Mutation and Nearest Neighbor Comparison](#). *International Conference on Advances in Computational Mechanics*, Springer, 201–216.
- [31] Anh, P. H., Duong, T. T. (2019). [Weight optimisation of functionally graded beams using modified differential evolution](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 13(2): 48–63.
- [32] Kwon, Y. W., Bang, H. (2018). *The finite element method using MATLAB*. CRC Press.
- [33] Pholdee, N., Bureerat, S. (2016). [Structural health monitoring through meta-heuristics-comparative performance study](#). *Advances in Computational Design*, 1(4):315–327.
- [34] Caesar, B., Eckert, L., Hoppe, A. (1991). Design parameter update of dynamic mathematical models in the presence of test noise and mode pairing problems. *Proceedings of the International Conference on Spacecraft Structures and Mechanical Testing, ESA SP*, 321:491–499.