

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

ĐẶNG DUY KHANH

PHÁT TRIỂN CÁC PHƯƠNG PHÁP SỐ NÂNG CAO CHO BÀI TOÁN
TỐI ƯU VÀ CHẨN ĐOÁN SỨC KHỎE KẾT CẤU

Ngành: **Kỹ Thuật Xây Dựng**

Mã số ngành: **9580201**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2025

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn 1: **PGS. TS. Liêu Xuân Quý**

Người hướng dẫn 2: **PGS. TS. Lương Văn Hải**

Phản biện độc lập:

Phản biện độc lập:

Phản biện:

Phản biện:

Phản biện:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại

.....
.....

vào lúc giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

CHƯƠNG 1 GIỚI THIỆU

Chương 1 giới thiệu tổng quan về tình hình nghiên cứu, tính cấp thiết của đề tài, mục tiêu và hướng nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu, ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn, đối tượng và phạm vi nghiên cứu cũng như những đóng góp của đề tài. Cuối chương trình bày cấu trúc của luận án để người đọc dễ theo dõi.

1.1 Tổng quan tính hình nghiên cứu

Luận án "Phát triển các phương pháp số nâng cao cho bài toán tối ưu và chẩn đoán sức khỏe kết cấu" nghiên cứu và cải thiện các phương pháp số cho chẩn đoán sức khỏe kết cấu và tối ưu hóa kết cấu. Luận án này đóng góp vào việc cải tiến các phương pháp số và mở rộng khả năng ứng dụng trong lĩnh vực kỹ thuật kết cấu.

1.1.1 Tối ưu hóa kết cấu

Tối ưu hóa kết cấu là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng trong kỹ thuật, tập trung vào việc cải thiện hiệu suất và độ bền của các kết cấu. Các phương pháp tối ưu hóa khác nhau đã được đề xuất, bao gồm phương pháp một bước và phương pháp hai bước. Tuy nhiên, các phương pháp này thường yêu cầu khối lượng tính toán lớn và có thể bị vướng vào các nghiệm cục bộ. Để khắc phục vấn đề này, các thuật toán tối ưu hóa không dựa trên đạo hàm đã được nghiên cứu kỹ lưỡng. Một trong những thuật toán như vậy là HDS (thuật toán lai thuyết tiến hóa khác biệt và tìm kiếm sinh vật cộng sinh), đã chứng minh hiệu quả và độ ổn định trong việc tối ưu hóa kích thước và hình dạng của giàn.a.

1.1.2 Chẩn đoán sức khỏe kết cấu

Chẩn đoán sức khỏe kết cấu (SHM) là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng để phát hiện hư hỏng của các kết cấu. Các phương pháp hiện có thường yêu cầu dữ liệu đầy đủ từ các cảm biến, nhưng điều này có thể tốn kém và khó khăn.

Để giải quyết vấn đề này, các kỹ thuật giảm bậc mô hình (MOR) đã được phát triển. Tuy nhiên, các phương pháp này vẫn còn hạn chế và chưa được áp dụng rộng rãi. Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp hai giai đoạn dựa trên tối ưu hóa nghịch đảo với các cảm biến hạn chế để phát hiện hư hỏng của giàn dựa trên chuỗi gia tốc theo thời gian.

1.1.3 Tầm phân lớp chức năng

Nghiên cứu này giới thiệu phương pháp lặp dựa trên tối ưu hóa mô hình giảm bậc (IIRS) sử dụng phân tích đẳng hình học (IGA) và lý thuyết tựa 3D bốn biến số để phân tích động lực học của tấm vật liệu phân lớp chức năng (FGM). Phương pháp này tối ưu hóa việc lựa chọn các bậc tự do (DOF) chính trong mô hình giảm bậc (ROM) bằng thuật toán DE, từ đó giảm số lượng tính toán và cải thiện độ chính xác của kết quả. IIRS bảo toàn các tính chất của ma trận khối lượng, cho phép xác định chính xác các trị riêng và vectơ riêng bậc cao. Bài toán tối ưu hóa ROM được đề xuất, ứng xử theo thời gian của các DOF chính được xử lý bằng phương pháp Newmark, và các DOF phụ được suy ra từ đó, có ứng dụng trong chẩn đoán sức khỏe kết cấu (SHM).

1.2 Tính cấp thiết của luận án

Luận án này trình bày các phương pháp số mới để tối ưu hóa và chẩn đoán sức khỏe kết cấu. Các thuật toán lai tối ưu hóa hiện đại và lý thuyết tựa 3D bốn biến được áp dụng để cải thiện độ chính xác và hiệu quả. Nghiên cứu này đóng góp quan trọng vào việc phát triển các phương pháp số nâng cao cho bài toán tối ưu và chẩn đoán sức khỏe kết cấu..

1.3 Mục tiêu và hướng nghiên cứu

1.3.1 Mục tiêu của luận án

Mục tiêu của luận án là nghiên cứu và phát triển các phương pháp tính toán tiên tiến để giải quyết hiệu quả các bài toán tối ưu và chẩn đoán sức khỏe kết cấu trong kỹ thuật.

1.3.2 Hướng nghiên cứu của luận án

Nghiên cứu này đề xuất các hướng nghiên cứu quan trọng để nâng cao hiệu quả và độ chính xác của các phương pháp tối ưu hóa kết cấu và chẩn đoán sức khỏe kết cấu. Các hướng nghiên cứu bao gồm phát triển thuật toán tối ưu hóa đồng thời, phương pháp hai giai đoạn để phát hiện hư hỏng và tối ưu hóa phương pháp giảm bậc mô hình cho các tấm phân lớp chức năng. Những hướng nghiên cứu này sẽ giúp cải thiện chất lượng giải pháp, nâng cao tốc độ hội tụ và giảm thiểu chi phí tính toán.

1.4 Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu của luận án kết hợp giữa lý thuyết và so sánh kiểm tra với các nghiên cứu khác để đảm bảo tính chính xác và khả thi của các kết quả đạt được.

1.5 Ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn

Luận án này mang tính ý nghĩa khoa học và thực tiễn lớn trong việc tối ưu hóa và chẩn đoán sức khỏe của các cấu trúc. Nó đề cập đến việc áp dụng các thuật toán tối ưu hóa không đạo hàm và phương pháp giảm bậc mô hình trong việc tối ưu hóa kết cấu và phát hiện hư hỏng. Các phương pháp được đề xuất có thể được sử dụng để cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của các cấu trúc trong nhiều lĩnh vực công nghiệp.

1.6 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Luận án này tập trung vào việc nghiên cứu và phát triển các phương pháp số nâng cao cho các bài toán tối ưu hóa và chẩn đoán sức khỏe kết cấu, đặc biệt với các đối tượng giàn, khung và tấm phân lớp chức năng.

1.7 Những đóng góp của nghiên cứu

Những đóng góp của nghiên cứu này bao gồm phát triển phương pháp chẩn đoán sức khỏe kết cấu dựa trên mô hình giảm bậc mới, đề xuất chỉ số năng lượng biến dạng dựa trên gia tốc, phát triển các phương pháp tối ưu hóa để cải thiện hiệu suất và độ bền của các kết cấu, áp dụng lý thuyết tựa 3D và phân tích đẳng hình học để mô hình hóa trường chuyển vị qua bề dày của tấm, và kết hợp các phương pháp tối ưu hóa tiên tiến với các công cụ phân tích số hiện đại để nâng cao chất lượng và hiệu quả của các giải pháp kỹ thuật.

1.8 Cấu trúc của luận án

Luận án có 7 chương

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Các phương pháp tối ưu

2.1.1 Thuật toán thuyết tiến hóa lai khác biệt (Differential Evolution)

2.1.2 Thuật toán tìm kiếm sinh vật cộng sinh (SOS)

2.1.3 Thuật toán đom đóm – Firefly Algorithm (FA)

2.2 Các phương pháp giảm bậc

2.2.1 Phương pháp Guyan

2.2.2 Xấp xỉ bậc nhất

2.2.3 Xấp xỉ bậc hai

2.2.4 Phương pháp Newmark beta

2.3 Kết luận chương 2

CHƯƠNG 3 PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU HÓA MỘT BƯỚC CHO CẤU TRÚC LIÊN KẾT, KÍCH THƯỚC VÀ HÌNH DẠNG CỦA GIÀN SỬ DỤNG THUYẾT TIẾN HÓA LAI KHÁC BIỆT VÀ TÌM KIẾM SINH VẬT CỘNG SINH

3.1 Đặt vấn đề

Biểu thức toán học [32, 39]

$$\text{Cực tiểu : Trọng lượng}(\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{X}) = \sum_{e=1}^N b_e(I_e) \rho_e A_e L_e(\mathbf{X}) + \sum_{j=1}^M m_j$$

$$\text{Ràng buộc : } \begin{cases} C_1 : \text{Khả thi của giàn} \\ C_2 : \text{Độ ổn định động học : } \begin{cases} C_{21} : R + S - T \geq 0 \\ C_{22} : \det(\mathbf{K}) > 0 \end{cases} \\ C_3 : |\sigma_e(\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{X})| / [\sigma]_e - 1 \leq 0; e = 1, 2, \dots, N \\ C_4 : |\sigma_e^{\text{comp}}(\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{X})| / \sigma_e^{\text{cr}} - 1 \leq 0, \text{ với : } \sigma_e^{\text{cr}} = (k_e A_e E) / L_e^2; e = 1, 2, \dots, N \\ C_5 : |\delta_j(\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{X})| / |\delta|_j - 1 \leq 0; j = 1, 2, \dots, J \\ C_6 : [f]_l / f_l(\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{X}) - 1 \leq 0; l = 1, 2, \dots, L \\ C_7 : f_u(\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{X}) / [f]_u - 1 \leq 0; u = 1, 2, \dots, U \\ A_e^{\min} \leq A_e \leq A_e^{\max}, x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max} \end{cases} \quad (3.1)$$

Cần lưu ý rằng tất cả các ràng buộc được trình bày trong phương trình (3.1) được xử lý bằng kỹ thuật hàm phạt [151]. Theo đó, bài toán tối ưu hóa bị ràng buộc ở trên có thể được viết lại bởi một bài toán không ràng buộc tương ứng như sau:

$$\text{Cực tiểu: } f_{\text{phait}} = \begin{cases} \lambda_1, & \text{nếu } C_1 \text{ bị vi phạm,} \\ \lambda_{21}, & \text{nếu } C_{21} < 0, \\ \lambda_{22}, & \text{nếu } C_{22} \leq 0, \\ (1 + \varepsilon_1 \nu)^{\varepsilon_2} \text{weight}(\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{X}), & \text{các trường hợp còn lại,} \end{cases} \quad (3.2)$$

với

$$\nu = \sum_{r=1}^{r,s} \max\{0, C_{r,s}(\mathbf{I}, \mathbf{A}, \mathbf{X})\}, \quad r = 3 \div 7, \quad (3.3)$$

Theo đó, độ cứng và ma trận khối lượng của phần tử giàn thứ e lần lượt được đưa ra dưới đây:

$$\mathbf{K}_e = (\mathbf{I}_e)^p \mathbf{K}_e^0, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{M}_e = (\mathbf{I}_e)^{p+1} \mathbf{M}_e^0, \quad (3.5)$$

Với kỹ thuật nêu trên, phương pháp hiện tại có thể giải quyết ba nhược điểm tồn tại trong các bài toán tối ưu hóa cấu trúc liên kết như sau: (i) Không cần tái cấu trúc mô hình PTHH vì cấu trúc của nó được cố định trong quá trình tối ưu hóa; (ii) Độ ổn định số được đảm bảo do tính xác định dương của ma trận độ cứng và ma trận khối lượng; và (iii) Độ chính xác của phân tích phần tử hữu hạn (FEA) vẫn được đạt được do đóng góp rất nhỏ của các phần tử và nút đã bị xóa.

3.2 Thuyết tiến hóa lai khác biệt và tìm kiếm sinh vật cộng sinh [43]

3.3 Kết luận chương 3

CHƯƠNG 4 MÔ HÌNH MỚI PHÁT HIỆN HƯ HỎNG HAI GIAI ĐOẠN DỰA TRÊN MÔ HÌNH GIẢM BẠC CHO GIÀN SỬ DỤNG GIA TỐC LỊCH SỬ THEO THỜI GIAN

4.1 Mô hình giảm bậc phân tích tuyến tính kết cấu theo lịch sử thời gian

Hệ phương trình cân bằng động có thể được biểu diễn dưới dạng sau [155]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{sm} & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}}_m \\ \ddot{\mathbf{U}}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{mm} & \mathbf{C}_{ms} \\ \mathbf{C}_{sm} & \mathbf{C}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_m \\ \dot{\mathbf{U}}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_m \\ \mathbf{U}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_m(t) \\ \mathbf{F}_s(t) \end{Bmatrix}, \quad (4.1)$$

Phương trình (4.1) cũng có thể được biểu diễn bằng các kỹ thuật MOR [155] như sau:

$$\mathbf{M}_R \ddot{\mathbf{U}}_R + \mathbf{C}_R \dot{\mathbf{U}}_R + \mathbf{K}_R \mathbf{U}_R = \mathbf{F}_R(t), \quad (4.2)$$

phương trình (4.2) có thể dễ dàng tìm thấy bằng phương pháp Newmark- β [157]. Sau đó, các kết quả tương ứng của các DOF không cảm biến được suy ra bằng cách.

$$(\cdot)_s = - \left[\mathbf{B}_1 + \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{M}_{ss} (\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_4 + \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_5) \right]^{-1} \left[\mathbf{B}_2 + \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{M}_{ss} (\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_3) \right] (\cdot)_m, \quad (4.3)$$

4.2 Chỉ số năng lượng biến dạng dựa trên gia tốc - Acceleration-based strain energy indicator (ASEI)

Việc xảy ra hư hại của một phần tử cụ thể có thể được cảnh báo bằng chỉ số ASEI sau đây:

$$\begin{aligned} ASEI^e &= \frac{\bar{A}^{e,d} - \bar{A}^{e,h}}{\bar{A}^{e,d}} > 0, & \text{phần tử hư hỏng} \\ ASEI^e &= \frac{\bar{A}^{e,d} - \bar{A}^{e,h}}{\bar{A}^{e,d}} \leq 0, & \text{phần tử khỏe mạnh} \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.3 Chẩn đoán hư hỏng dựa trên tối ưu hóa nghịch đảo sử dụng chuỗi gia tốc theo thời gian.

Trong bước còn lại của phương pháp hai giai đoạn, mức độ hư hỏng của các phần tử nghi ngờ được xác định trong bước đầu tiên bằng cách giải một bài toán tối ưu hóa nghịch đảo. Vấn đề này có thể được biểu diễn toán học như sau:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad &: f(\mathbf{X}) = - \left\{ \frac{[\bar{\mathbf{u}}_d^T \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{X})]^2}{(\bar{\mathbf{u}}_d^T \bar{\mathbf{u}}) [\bar{\mathbf{u}}^T(\mathbf{X}) \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{X})]} \right\}^p, \\ \text{St} \quad &: \begin{cases} \mathbf{M}_R \ddot{\mathbf{U}}_R + \mathbf{C}_R \dot{\mathbf{U}}_R + \mathbf{K}_R \mathbf{U}_R = \mathbf{F}_R(t), \\ 0 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, d, \end{cases} \end{aligned} \quad (4.5)$$

trong đó, $f(\mathbf{X})$ là hàm mục tiêu động được định nghĩa từ tài liệu [72], và $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_d\}$ là vector chứa d biến thiết kế với

$$x_i = \frac{E - E_i}{E}, \quad (4.6)$$

Để giải quyết bài toán tối ưu trên, AHEFA được phát triển trước đây trong một công trình của Lieu và cộng sự [159] được sử dụng như một trình tối ưu hóa.

4.3 Kết luận chương 4

CHƯƠNG 5 TỐI ƯU MÔ HÌNH GIẢM BẠC CHO PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TẤM PHÂN LỚP CHỨC NĂNG BẰNG PHÂN TÍCH ĐẲNG HÌNH HỌC DỰA TRÊN LÝ THUYẾT TỰA 3D BỐN BIÊN

5.1 Phân tích động lực học của tấm phân lớp chức năng

5.1.1 Vật liệu phân lớp chức năng

5.1.2 Dạng yếu

Theo lý thuyết tựa 3D bốn biên [113], các số hạng chuyển vị tại một vị trí nhất định trên chiều dày tấm có thể được biểu thị như sau

$$\begin{aligned}u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) - zw_{0,x}^b(x, y, t) + f(z)w_{0,x}^s(x, y, t) \\v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) - zw_{0,y}^b(x, y, t) + f(z)w_{0,y}^s(x, y, t), \quad -h/2 \leq z \leq h/2, \\w(x, y, z, t) &= w_0^b(x, y, t) + g(z)w_0^s(x, y, t)\end{aligned}\quad (5.1)$$

$f(z)$ và $g(z)$ mô tả sự phân bố của lực cắt ngang và ứng suất trên chiều dày tấm, và chúng được cho như sau:

$$f(z) = \frac{\pi}{h}z - \frac{9\pi}{5h^3}z^3 + \frac{28\pi}{25h^5}z^5, \quad g(z) = \frac{1}{8}f_{,z}(z), \quad (5.2)$$

Đơn giản, bằng cách đặt $g(z) = 0$ trong phương trình trên, thì $\varepsilon(z) = 0$.

Dạng yếu của tấm FG được cho bởi nguyên lý Hamilton [168] như sau

$$0 = \int_0^T (\delta U + \delta W - \delta K) dt, \quad (5.3)$$

Dạng yếu của nó có dạng sau

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} \delta \mathbf{u}^T \ddot{\mathbf{m}} \mathbf{u} dxdy + \int_{\Omega} \left\{ \delta \boldsymbol{\varepsilon}_0 \quad \delta \boldsymbol{\kappa}_1 \quad \delta \boldsymbol{\kappa}_2 \quad \delta \boldsymbol{\varepsilon}_z \right\} \mathbf{D}^{mb} \begin{Bmatrix} \delta \boldsymbol{\varepsilon}_0 \\ \delta \boldsymbol{\kappa}_1 \\ \delta \boldsymbol{\kappa}_2 \\ \delta \boldsymbol{\varepsilon}_z \end{Bmatrix} + \delta \boldsymbol{\kappa}_3^T \mathbf{D}^s \boldsymbol{\kappa}_3 \right\} dxdy \dots \\
& = \int_{\Omega} q(x, y, z, t) \left[\delta w_o^b + g(z) \delta w_o^s \right] dxdy.
\end{aligned}
\tag{5.4}$$

5.1.3 Hàm cơ sở NURBS

5.1.4 Phân tích đẳng hình học

Trong IGA này, trường chuyển vị $\mathbf{u}$ của phần tử thứ e NURBS tại mặt phẳng bề mặt của tấm được xấp xỉ bởi

$$\mathbf{u}(\xi, \eta) = \sum_{I=1}^{m \times n} N_I(\xi, \eta) \mathbf{q}_I, \tag{5.5}$$

Mô hình FE để phân tích động lực học mà không làm suy giảm phần tử tấm FG điển hình sử dụng IGA dựa trên Galerkin được biểu thị bằng

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}(t), \tag{5.6}$$

trong đó $\mathbf{K}$ và $\mathbf{M}$ lần lượt là ma trận thứ e về độ cứng và khối lượng nhất quán. Chúng có dạng sau

$$\mathbf{K} = \int_{\Omega} \sum_{I=1}^{m \times n} \left\{ \mathbf{B}_I^m \quad \mathbf{B}_I^{b1} \quad \mathbf{B}_I^{b2} \quad \mathbf{B}_I^{b3} \right\} \mathbf{D}^{mb} \begin{Bmatrix} \mathbf{B}_I^m \\ \mathbf{B}_I^{b1} \\ \mathbf{B}_I^{b2} \\ \mathbf{B}_I^{b3} \end{Bmatrix} + \left(\mathbf{B}_I^s \right)^T \mathbf{D}^s \mathbf{B}_I^s \right\} dxdy, \tag{5.7}$$

$$\mathbf{M} = \int_{\Omega} \sum_{I=1}^{m \times n} \mathbf{N}^T \mathbf{m} \mathbf{N} dxdy, \tag{5.8}$$

và vector lực theo thời gian được tính bằng

$$\mathbf{F}(t) = \int_{\Omega} \sum_{I=1}^{m \times n} \left\{ 0 \quad 0 \quad N_I \quad g(z) N_I \right\}^T q(x, y, z, t) dxdy, \tag{5.9}$$

Với điều kiện là dao động điều hòa duy nhất được xem xét, $\ddot{\mathbf{u}} = -\omega^2 \mathbf{u}$. Như là dao động tự do của phần tử tấm FG điển hình có thể được suy ra từ phương trình $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}(t)$, (5.6) như sau

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad (5.10)$$

trong đó ω (rad/s) là tần số tự nhiên.

Lưu ý rằng phương trình (5.10) có thể được mở rộng cho các tấm FG có hệ số cản tỷ lệ chịu một tải phụ thuộc vào thời gian như sau

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}(t), \quad (5.11)$$

trong đó ma trận cản $\mathbf{C}$ phần tử thứ e được tính theo cản Rayleigh [79] như

$$\mathbf{C} = \alpha_{\mathbf{M}}\mathbf{M} + \alpha_{\mathbf{K}}\mathbf{K}, \quad (5.12)$$

với

$$\alpha_{\mathbf{M}} = \xi \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}; \alpha_{\mathbf{K}} = \xi \frac{2}{\omega_1 + \omega_2}, \quad (5.13)$$

trong đó ξ là hệ số giảm chấn và được giả định là 5% trong nghiên cứu này; ω_1 (rad/s) và ω_2 (rad/s) là hai tần số tự nhiên tròn đầu tiên cùng hướng với tải trọng tác dụng.

5.2 Hệ thống giảm bậc cải tiến lặp lại (IIRS)

Ở đây, cách tiếp cận hệ thống giảm thiểu cải tiến (IRS) được tóm tắt ngắn gọn. Sau khi ma trận độ cứng và khối lượng của từng phần tử NURBS được lắp ráp trong hệ, phương trình (5.14) có thể được sắp xếp như sau

$$\left(\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{sm} & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_m \\ \mathbf{u}_s \end{Bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (5.14)$$

trong đó chỉ số dưới “m” tượng trưng cho DOF chính, trong khi chỉ số “s” mô tả DOF phụ

ta được viết lại như sau

$$\mathbf{u}_s = \left[-\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} + \mathbf{K}_{ss}^{-1} (\mathbf{M}_{sm} + \mathbf{M}_{ss} \mathbf{t}_{IRS}^k) (\mathbf{M}_{IRS}^k)^{-1} \mathbf{K}_{IRS}^k \right] \mathbf{u}_m, \quad (5.15)$$

phương trình (5.19) ngụ ý rằng $\mathbf{u}_s = \mathbf{t}_{IRS}^{k+1} \mathbf{u}_m$ với

$$\mathbf{t}_{IRS}^{k+1} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} + \mathbf{K}_{ss}^{-1} (\mathbf{M}_{sm} + \mathbf{M}_{ss} \mathbf{t}_{IRS}^k) (\mathbf{M}_{IRS}^k)^{-1} \mathbf{K}_{IRS}^k, \quad (5.16)$$

Lưu ý rằng khi $k = 0$, cách tiếp cận trên trở thành phương pháp Guyan [171], tức là $\mathbf{t}_{Guyan} = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm}$. Với $k = 1$, IRS tiêu chuẩn [172] được áp dụng. Tuy nhiên, độ chính xác của những trường hợp này vẫn chưa cao như Pastor và cộng sự đã chỉ ra [173]. Kết quả là cái gọi là IRS lặp (IIRS) đã được đề xuất bởi Friswell và cộng sự [174, 175] để nâng cao độ chính xác của nó. Trong kỹ thuật cải tiến này, quy trình trình bày ở trên được thực hiện với $k \geq 2$. Sau khi kiểm tra rất kỹ lưỡng, quá trình lặp lại của IIRS kết thúc khi k đạt 50 hoặc $\|\mathbf{t}_{IRS}^{k+1} - \mathbf{t}_{IRS}^k\| < 1$.

Theo đó, hệ cân bằng động của các tấm FG có hệ số cản giảm theo IIRS được cho như sau

$$\mathbf{M}_{IIRS} \ddot{\mathbf{u}}_m + \mathbf{C}_{IIRS} \dot{\mathbf{u}}_m + \mathbf{K}_{IIRS} \mathbf{u}_m = \mathbf{F}_{IIRS}(t), \quad (5.17)$$

trong đó $\mathbf{M}_{IIRS}$ và $\mathbf{K}_{IIRS}$ được tính là phương trình (5.40). Ngoài ra, ma trận cản và lực vectơ được tính tương ứng là

$$\mathbf{C}_{IIRS} = \alpha_M \mathbf{M}_{IIRS} + \alpha_K \mathbf{K}_{IIRS} \text{ and } \mathbf{F}_{IIRS} = \mathbf{\Theta}_{IIRS}^T \mathbf{F}(t), \quad (5.18)$$

Lưu ý rằng phương pháp Newmark- β [170] được sử dụng để giải hệ rút gọn trên.

5.3 Tối ưu dựa trên ROM

5.3.1 Đặt vấn đề

Như được chỉ ra bởi Pastor và cộng sự [173], một tuyên bố toán học chi tiết hơn được đưa ra dưới đây

$$\begin{aligned} \arg \max_{\mathbf{X}} f(\mathbf{X}) &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} MAC_{i,i} + \frac{(\mathbf{w}_{\text{FM}}^T \mathbf{w}_{\text{IIRS}}(\mathbf{X}))^2}{(\mathbf{w}_{\text{FM}}^T \mathbf{w}_{\text{FM}})(\mathbf{w}_{\text{IIRS}}^T(\mathbf{X}) \mathbf{w}_{\text{IIRS}}(\mathbf{X}))} \right], \\ \text{St.} : &\begin{cases} (\mathbf{K}_{\text{IIRS}} - \omega^2 \mathbf{M}_{\text{IIRS}}) \Phi_{\text{IIRS}} = \mathbf{0}, \\ c(\mathbf{X}) = r, \\ x_i \in \mathbb{Z}^+, \end{cases} \end{aligned} \quad (5.19)$$

với

$$MAC_{i,j} = \frac{(\Phi_{\text{FM},i}^T \Phi_{\text{IIRS},j}(\mathbf{X}))^2}{(\Phi_{\text{FM},i}^T \Phi_{\text{FM},i})(\Phi_{\text{IIRS},j}^T(\mathbf{X}) \Phi_{\text{IIRS},j}(\mathbf{X}))}, \quad i, j = 1, \dots, nm, \quad (5.20)$$

5.3.2 Thuyết tiến hóa lai khác biệt

5.4 Kết luận chương

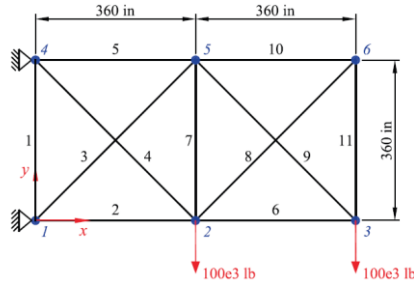
CHƯƠNG 6 VÍ DỤ SỐ

Trong phần đầu của Chương này, các ví dụ được trình bày

6.1 Tối ưu hóa cấu trúc liên kết và kích thước

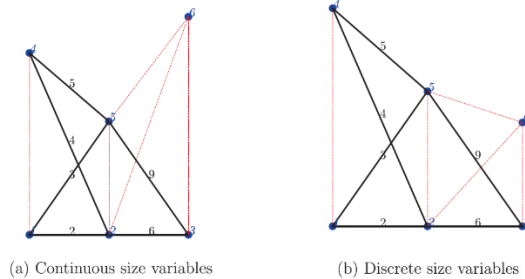
6.2 Tối ưu hóa cấu trúc liên kết, kích thước và hình dạng

Giàn phẳng 11 thanh



Hình 6.1 Cấu trúc của giàn phẳng 11 thanh.

Hình 6.1 mô tả một cấu trúc cơ bản của một giàn phẳng 11 thanh. Các nút 2 và 3 được gắn bởi hai tải dọc. Diện tích tiết diện được xem xét là các biến liên tục và rời rạc trong ví dụ này. Cụ thể, chúng có phạm vi liên tục từ 1 in^2 đến 30 in^2 với một bước nhảy là 1 in^2 . Mô đun đàn hồi E và trọng lượng riêng ρ và ứng suất cho phép $[\sigma]$ là 104 ksi, 0.1 lb/in^3 và 25 ksi, tương ứng. Tất cả các nút được cho phép di chuyển theo hướng dọc với biên độ là $\pm 2 \text{ in}$.

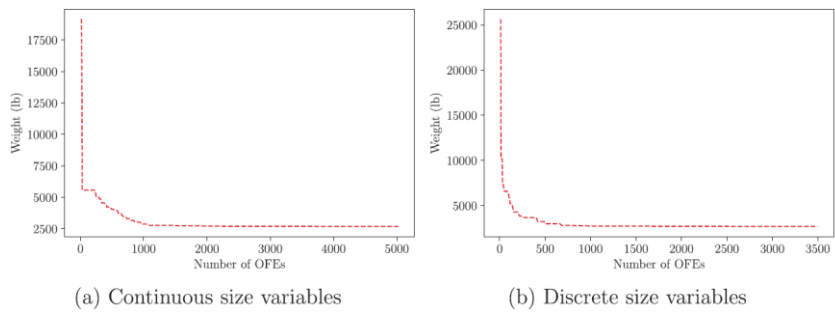


(a) Continuous size variables

(b) Discrete size variables

Hình 6.2 Tối ưu cấu trúc liên kết của giàn phẳng 11 thanh đạt được bởi HDS.

Hình 6.14a và 6.14b mô tả các tối ưu cấu trúc liên kết cho biến liên tục và biến rời rạc.



Hình 6.3 Lịch sử hội tụ của trọng lượng và số lần lặp của giàn phẳng 11 thanh thu được bởi HDS.

Bảng 6.1 Kết quả tối ưu của giàn phẳng 11 thanh đạt được bằng các phương pháp khác nhau.

Biến thiết kế $A_i(\text{in}^2)/Y_j(\text{in})$	FA [33] a	HDS	
		a	b
A_2	11.50	9.8674	8
A_3	2.88	3.1001	2
A_4	5.74	5.8908	5
A_5	11.50	11.7928	11
A_6	7.22	7.2161	6
A_9	13.50	12.5338	12
Y_4	—	465.2596	469.2831
Y_5	—	154.7547	153.6954
Y_6	—	629.3696	34.9287
Trọng lượng nhỏ nhất (lb)	2705.16	2688.0806	2696.5754
Số lần đánh giá hàm mục tiêu	50000	5023	3501
Trọng lượng lớn nhất (kg)	—	2939.5010	2957.9133
Trọng lượng trung bình (lb)	—	2775.3930	2792.3198
Độ lệch chuẩn (SD)	—	83.9938	78.0303

Biến thiết kế $A_i(\text{in}^2)/Y_j(\text{in})$	FA [33] a	HDS	
		a	b
Cấu trúc liên kết khả thi	62	24	23
$\delta_{\max}(\text{in})$	—	-2.0000	-2.0000
$\sigma_2(\text{ksi})$	10.3	-11.5084	-12.6102
$\sigma_3(\text{ksi})$	10.0	-9.7421	-9.7238
$\sigma_4(\text{ksi})$	19.1	18.5205	18.1694
$\sigma_5(\text{ksi})$	10.4	9.7699	9.6216
$\sigma_6(\text{ksi})$	10.2	-9.6917	-10.0115
$\sigma_9(\text{ksi})$	9.2	9.7360	9.3932

a: cho các biến kích thước liên tục

b: cho các biến kích thước rời rạc

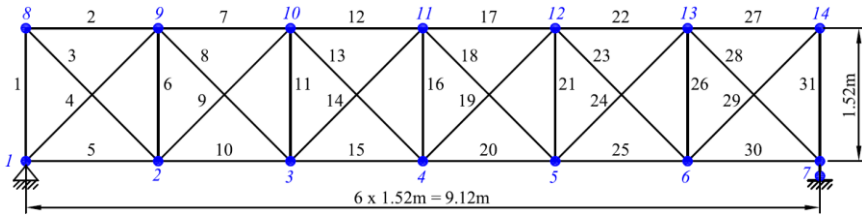
6.3 Mô hình chẩn đoán hư hỏng hai giai đoạn dựa trên giảm bậc mô hình cho các giàn, vì kèo bằng cách sử dụng lịch sử gia tốc theo thời gian

Bảng 6.2 Kích bản hư hỏng của các ví dụ khảo sát

Vấn đề	Kích bản	Thanh (Tỷ số hư hỏng)
31-bar	1	1(0.25) - 7(0.3) - 21(0.4)
	2	1(0.30) - 2(0.20) - 11(0.25) - 24(0.30) - 25(0.15)
	3	4(0.25) - 5(0.35) - 8(0.30) - 11(0.20) - 12(0.25) - 25(0.15) - 26(0.30)
25-bar	1	3(0.20) - 11(0.40) - 13(0.30)
	2	1(0.30) - 3(0.20) - 9(0.35) - 11(0.20) - 24(0.25)
120-bar	1	11(0.50) - 15(0.35)
	2	15(0.25) - 21(0.40) - 49(0.25) - 59(0.30) - 114(0.30)
200-bar	1	195(0.50) - 197(0.25) - 200(0.35)
	2	1(0.30) - 51(0.20) - 101(0.35) - 151(0.20) - 176(0.50) - 200(0.20)

Tỷ lệ hư hỏng của phần tử tương ứng được đưa ra trong ngoặc đơn.

Giàn phẳng 31 thanh



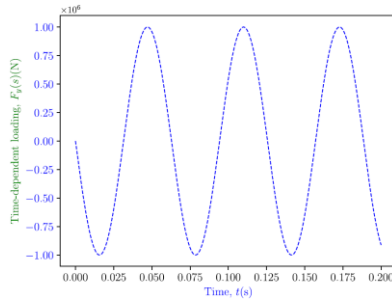
Hình 6.4 Mô hình giàn phẳng 31 thanh.

Một kết cấu giàn phẳng 31 thanh như được miêu tả trong Hình 6.4. Tất cả các thanh giàn đều có cùng mô đun đàn hồi $E = 70 \text{ GPa}$, trọng lượng riêng vật liệu $\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$ và diện tích tiết diện $A_i = 0.01 \text{ m}^2$.

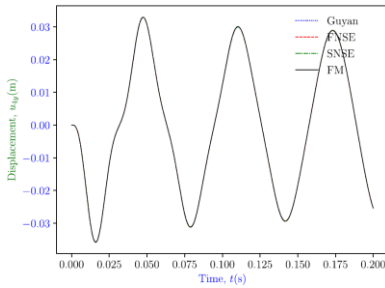
Các tần số tự nhiên được thu được bằng phương pháp Guyan, phương trình chuỗi Neumann bậc một (FNSE), chuỗi Neumann bậc hai (SNSE) và mô hình đầy đủ (FM) được tóm tắt trong Bảng 6.3.

Bảng 6.3 So sánh tần số tự nhiên của giàn 31 thanh thu được từ các mô hình khác nhau.

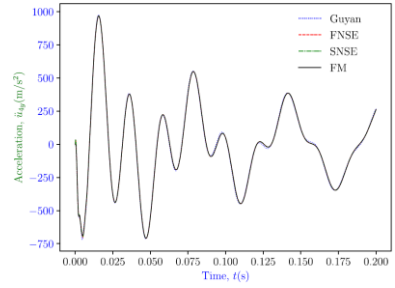
ω_i (rad/s)	Kết quả tham khảo [65]			Nghiên cứu này			
	Guyan	NSEMR-II	FM	Guyan	FNSE	SNSE	FM
1	300.90	299.99	299.99	300.9015	299.9923	299.9922	299.9922
2	642.90	634.05	634.05	642.9009	634.0629	634.0452	634.0452
3	1015.46	973.19	973.18	1015.4632	973.6239	973.1887	973.1841
4	1365.62	1294.18	1294.07	1365.6234	1297.0067	1294.1842	1294.0688
5	1784.89	1606.18	1605.54	1784.8945	1615.4742	1606.1769	1605.5354
6	-	-	-	2002.4294	1830.2459	1809.1765	1806.4696
7	-	-	-	2298.6932	2091.9786	2056.2993	2049.1052
8	-	-	-	2329.6096	2195.5995	2161.8625	2151.7704
9	-	-	-	2857.0875	2627.5773	2525.0322	2449.4601
10	-	-	-	2901.2917	2640.8951	2574.4337	2556.7079
11	-	-	-	3162.0331	2964.0342	2867.2977	2759.3428
12	-	-	-	3625.0861	3300.5870	3060.4412	2768.8856
α_M	-	-	-	20.4969	20.3643	20.3641	20.3641
α_K	-	-	-	1.0595e-4	1.0706e-4	1.0706e-4	1.0706e-4



Hình 6.5 Tải trọng theo phương đứng tác dụng các nút 3 và 5 của giàn 31 thanh.

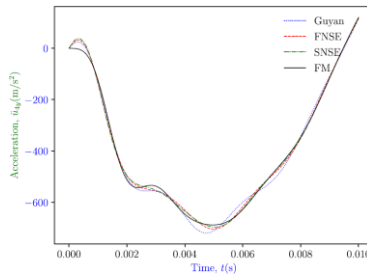


(a) Chuyển vị, u_{4y} (m)



(b) Gia tốc, $\ddot{u}_{4y}$ (m / s²)

Hình 6.6 Các ứng xử hồi phụ thuộc vào thời gian theo phương đứng tại nút 4 của giàn 31 thanh.

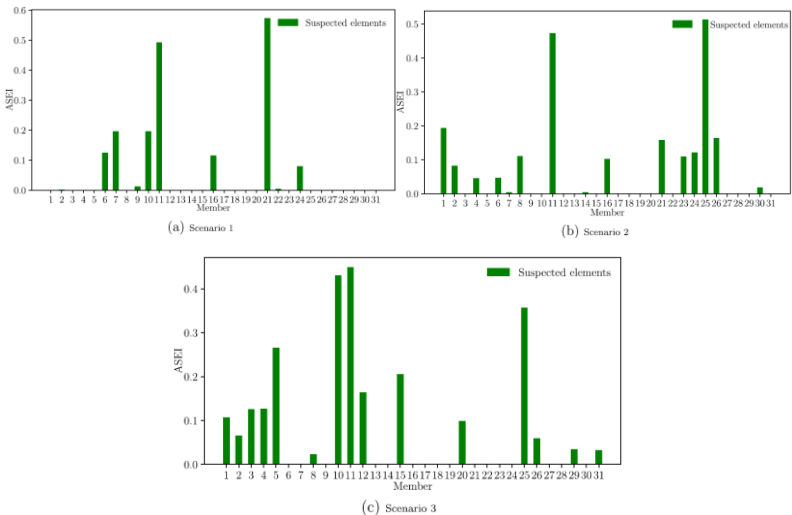


Hình 6.7 Gia tốc theo phương đứng tại nút 4 của giàn 31 thanh với $t = 0 \div 0.01$ s.

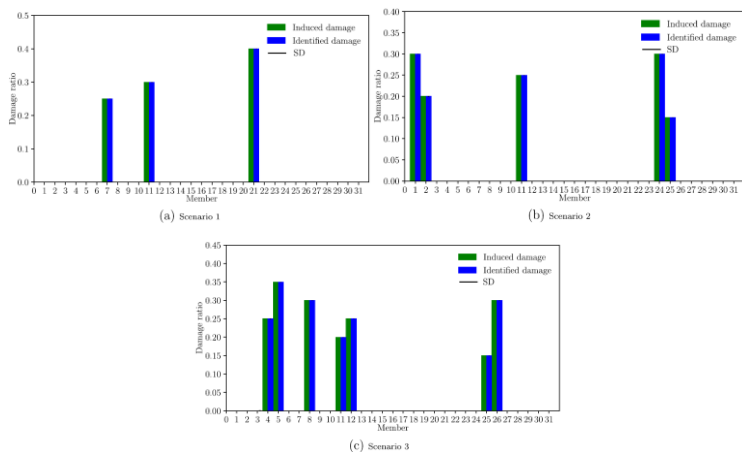
Biểu đồ lịch sử thời gian được hiển thị trong Hình 6.5. Hình 6.6(a) và Hình 6.6(b) vẽ biểu đồ chuyển vị và gia tốc tại nút 4 trên trục y, tương ứng. Tuy nhiên, gia tốc được đạt được bởi ba mô hình giảm bậc trên trong $[0, 0.01]$ s khác một chút so với được đưa ra bởi FM như được hiển thị trong Hình 6.7. Như có thể thấy từ Bảng 6.4, SNSE đưa ra giá trị nhỏ nhất so với các phương pháp khác, trong khi phương pháp Guyan cho kết quả lớn nhất. Điều này chứng tỏ rằng SNSE đưa ra các kết quả chính xác hơn.

Bảng 6.4 So sánh hai chỉ số chuẩn được tính bằng các DOF và MOR khác nhau cho giàn 31 thanh

Chỉ số chuẩn	DOFs	Guyan	FNSE	SNSE	FM
$\ \ddot{\mathbf{u}}\ $	8DOFs	2.2711	1.9842	2.0336	0
	12DOFs	2.0028	2.2301	1.8816	
	16DOFs	2.1060	1.6476	1.6657	
$\ \ddot{\mathbf{u}}\ $	8DOFs	2.1240	2.0220	2.0389	0
	12DOFs	2.1235	2.1233	1.9950	
	16DOFs	1.9887	1.8929	1.8857	



Hình 6.8 Các phần tử của giàn 31 thanh bị hư hỏng đáng ngờ thu được trong giai đoạn đầu bằng ASEI được đề xuất.

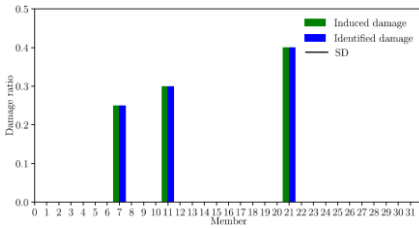


Hình 6.9 Kết quả hư hỏng của giàn 31 thanh thu được trong giai đoạn thứ hai bằng phương pháp AHEFA.

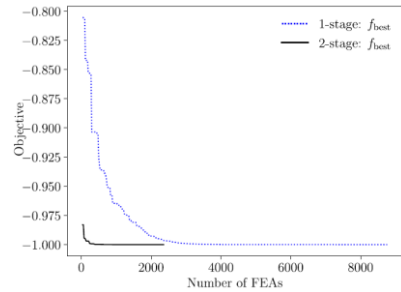
Tiếp theo, để cho thấy tính hiệu quả của phương pháp hai giai đoạn dựa trên SNSE so với phương pháp một giai đoạn dựa trên mô hình đầy đủ, trường hợp hư hỏng 1 được trình bày trong Bảng 6.2 được sử dụng. Hình 6.8(a) cho thấy các phần tử bị hư hỏng được xác định trong giai đoạn đầu tiên bằng ASEI được đề xuất. Có thể thấy rằng sau khi giai đoạn đầu tiên hoàn tất, chỉ các phần tử 2, 6, 7, 9, 10, 11, 16, 21, 22 và 24 được chẩn đoán. Hình 6.9(a) đại diện cho các kết quả hư hỏng đạt được trong bước thứ hai. Thuật toán đề xuất chỉ yêu cầu 2360 FEA để đánh giá chính xác mức độ nghiêm trọng của các phần tử hư hỏng, trong khi phương pháp kia cần 8760 FEA để đạt được chẩn đoán tương tự như được thể hiện trong Bảng 6.5 và Hình 6.10. Nên lưu ý rằng số lượng biến thiết kế của phương pháp một giai đoạn là 31, gấp 3,1 lần số lượng của phương pháp hai giai đoạn. Để hiển thị rõ hơn, lịch sử hội tụ được thu thập từ các trường hợp trên được biểu đồ hóa trong Hình 6.11.

Bảng 6.5 Kết quả chẩn đoán hư hỏng của giàn 31 thanh đối với trường hợp 1 theo phương pháp một giai đoạn và hai giai đoạn

Case	Member	Phương pháp 1 giai đoạn, $p = 1 \rightarrow 0.5$			Phương pháp 2 giai đoạn, $p = 1 \rightarrow 0.5$			Phương pháp 2 giai đoạn, $p = 1$		
		Best	SD	NoF EA	Best	SD	NoF EA	Best	SD	NoF EA
1	7	0.25	1.6347	8760	0.25	3.3676	2360	0.25	3.5477	2700
	11	00	e-5		00	e-6		00	e-6	
	21	0.30	7.8915		0.30	5.8886		0.30	7.1203	
		00	e-5		00	e-6		00	e-6	
		0.40	1.0406		0.40	3.8572		0.40	4.6791	
		00	e-6		00	e-6		00	e-6	



Hình 6.10 Kết quả hư hỏng của giàn 31 thanh cho trường hợp 1 thu được bằng phương pháp một giai đoạn sử dụng AHEFA.

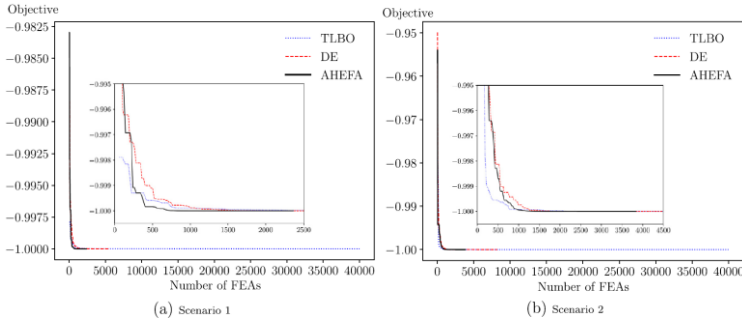


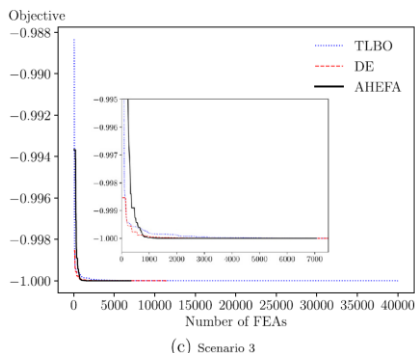
Hình 6.11 Lịch sử hội tụ của giàn 31 thanh cho trường hợp 1 được thu được bằng hai phương pháp khác nhau sử dụng AHEFA.

Bảng 6.6 So sánh kết quả chẩn đoán hư hỏng của giàn 31 thanh thu được bằng các trình tối ưu hóa khác nhau mà không xét nhiễu.

Case	Member	TLBO			DE			AHEFA		
		Best	SD	NoFEA	Best	SD	NoFEA	Best	SD	NoFEA
1	7	0.2500	1.2520e-7	40 020	0.2500	3.2608e-6	5580	0.2500	3.3676e-6	2360
	11	0.3000	2.2291e-7		0.3000	2.4614e-6		0.3000	5.8886e-6	
	21	0.4000	1.6020e-7		0.4000	2.7237e-6		0.4000	3.8572e-6	
2	1	0.3000	5.1012e-5	40 020	0.3000	1.1475e-5	8240	0.3000	1.8667e-5	3840
	2	0.2000	1.5417e-6		0.2000	2.0084e-5		0.1999	4.6694e-5	
	11	0.2500	3.2152e-6		0.2500	5.3338e-6		0.2500	8.2023e-6	
	24	0.3000	2.7414e-6		0.3000	5.0142e-6		0.3000	9.6868e-6	
	25	0.1500	1.4264e-5		0.1500	2.5625e-5		0.1499	6.1439e-5	
3	4	0.2500	6.3774e-5	40 020	0.2500	2.9924e-5	11 420	0.2500	2.6717e-4	7060
	5	0.3500	5.5229e-5		0.3500	2.2500e-5		0.3500	1.8107e-4	
	8	0.3000	3.3653e-5		0.3000	6.1388e-6		0.3000	1.4017e-5	
	11	0.2000	3.1824e-5		0.2000	3.3590e-6		0.2000	1.3363e-5	
	12	0.2500	1.7022e-5		0.2500	5.6072e-5		0.2500	1.2580e-5	
	25	0.1501	3.0590e-4		0.1500	5.6072e-5		0.1501	9.9175e-5	
	26	0.3000	2.5481e-4		0.3000	3.5835e-5		0.3000	5.5774e-6	

Bảng 6.6 tóm tắt kết quả đa sự cố cho lần chạy tốt nhất và kết quả thống kê. Như đã tìm thấy, tất cả các thuật toán đều có thể chẩn đoán chính xác vị trí và mức độ hư hỏng cho tất cả các trường hợp. Tuy nhiên, AHEFA đưa ra giải pháp tốt nhất với số lượng FEAs thấp nhất trong tất cả các kịch bản được nghiên cứu. Hình 6.8(b) và Hình 6.8(c) cho thấy các phần tử bị hư hỏng nghi ngờ được xác định trong giai đoạn đầu bằng ASEI được đề xuất cho trường hợp 2 và 3, tương ứng. Sau khi hoàn thành giai đoạn đầu, chỉ có các phần tử 1, 2, 4, 6, 7, 8, 11, 14, 16, 21, 23, 24, 25, 26 và 30 được chẩn đoán trong trường hợp 2. Đối với trường hợp 3, chỉ có các phần tử 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 15, 20, 25, 26, 29 và 31 được nhận diện và phục vụ làm biến thiết kế cho giai đoạn thứ hai. Hình 6.9(b) và Hình 6.9(c) đại diện cho các kết quả hư hỏng đạt được trong giai đoạn thứ hai cho trường hợp 2 và 3, tương ứng. Như dự đoán, vị trí và mức độ hư hỏng của các phần tử được đánh giá chính xác. Hình 6.12 cho thấy lịch sử hội tụ của ba kịch bản trên được thu được bằng các bộ tối ưu hóa khác nhau.



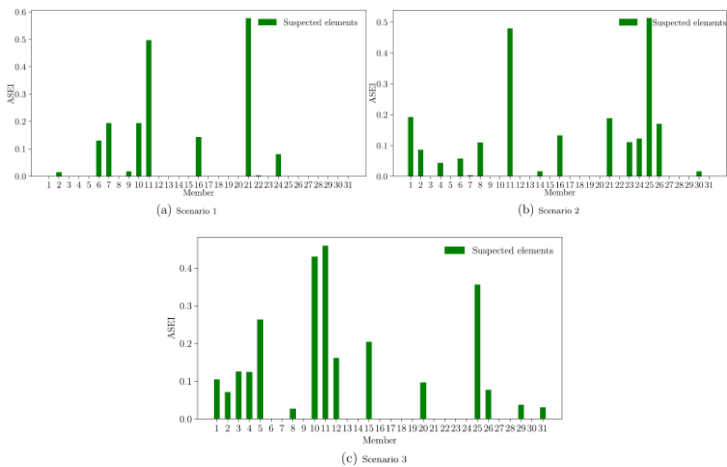


Hình 6.12 Lịch sử hội tụ của giàn 31 thanh thu được bằng các thuật toán tối ưu hóa khác nhau.

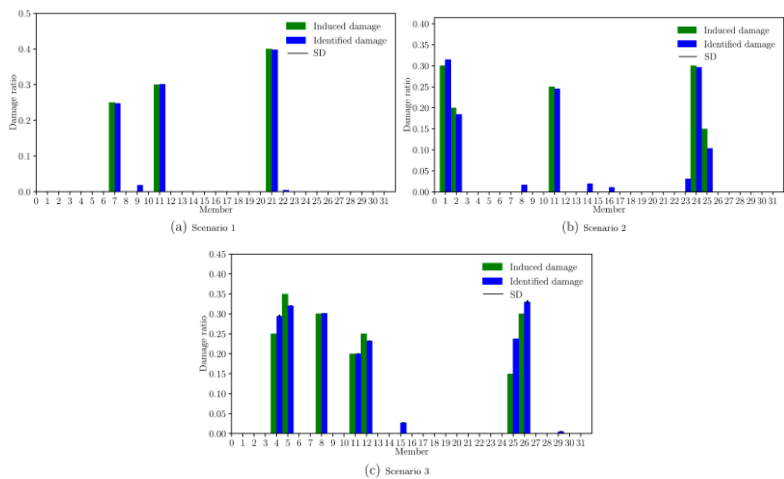
Bây giờ, hiệu quả của hàm mục tiêu mới được thêm vào với tham số phạt động trong việc đưa ra các giải pháp chất lượng cao hơn và tốc độ hội tụ tốt hơn so với hàm mục tiêu gốc trong trường hợp $p = 1$ [49] được chứng minh. Như được chỉ ra trong Bảng 6.5, các kết quả tương tự được đạt được. Tuy nhiên, hàm mục tiêu đề xuất chỉ cần 2360 FEAs, ít hơn 2700 FEAs so với hàm mục tiêu gốc. Điều này có nghĩa là chi phí tính toán cũng được tiết kiệm.

Tuy nhiên, trong trường hợp sử dụng một số điểm đo rất nhỏ để tính toán hàm mục tiêu, độ chính xác của việc xác định phạm vi hư hỏng thông qua bài toán tối ưu nghịch đảo có thể bị giảm. Do đó, chúng cần được kiểm tra rất kỹ. Hình 6.13 và Hình 6.14 cho thấy các kết quả được đạt được bởi phương pháp hiện tại cho giai đoạn 1 và giai đoạn 2, tương ứng. Nhờ vào dữ liệu nhiều, các phần tử bị nghi ngờ được xác định trong giai đoạn đầu tiên bị thay đổi một chút. Hơn nữa, phương pháp hiện tại yêu cầu số lượng FEA nhiều hơn để đạt được một giải pháp tối ưu tốt như các giải pháp được tóm tắt trong Bảng 3.35.7. Như được hiển thị trong các hình trên, phương pháp hiện tại vẫn xác định được vị trí và phạm vi hư hỏng của các phần tử với chỉ một số điểm đo ít hơn. Chú ý rằng số

lượng điểm đo bằng cảm biến và vị trí của chúng cũng ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của mô hình giảm bậc, thông tin này nên được lựa chọn cẩn thận.



Hình 6.13 Các phần tử của giàn 31 thanh bị hư hỏng đáng ngờ thu được trong giai đoạn đầu bằng ASEI được đề xuất với nhiều.



Hình 6.14 Kết quả hư hỏng của khung 31 thanh thu được trong giai đoạn thứ hai bằng phương pháp AHEFA với nhiều.

Bảng 3.35.7 Kết quả chẩn đoán hư hỏng của giàn 31 thanh do AHEFA thu được có nhiều.

Case	Member	Best	SD	NoFEAs
1	7	0.2471	1.6133e-5	3880
	9	0.0183	1.6133e-5	
	11	0.3006	4.1285e-6	
	21	0.3981	2.7871e-6	
	22	0.0045	4.4092e-8	
2	1	0.3145	1.9568e-5	5120
	2	0.1844	1.0935e-4	
	8	0.0167	2.1441e-5	
	11	0.2456	7.0763e-6	
	14	0.0197	1.7922e-5	
	16	0.0105	2.5081e-5	
	23	0.0310	2.9321e-5	
	24	0.2964	1.2544e-5	
	25	0.1034	5.2689e-5	
	29	0.0046	1.6498e-3	
3	4	0.2944	2.4535e-3	15720
	5	0.3204	4.6730e-4	
	8	0.3012	5.0495e-4	
	11	0.2001	9.4958e-4	
	12	0.2326	9.6300e-4	
	15	0.0267	1.1280e-3	
	25	0.2375	2.7242e-4	
	26	0.3297	4.4028e-3	
	29	0.0046	1.6498e-3	

6.4 Tối ưu mô hình giảm bậc cho phân tích động lực học của tấm phân lớp chức năng bằng phân tích đẳng hình học dựa trên lý thuyết tựa 3D bốn biến

6.4.1 Kiểm tra

6.4.1.1 Dao động tự do

Đặc tính vật liệu được trình bày trong Bảng 6.8. Để so sánh, Bảng 6.9 báo cáo tần số đầu tiên được chuẩn hóa $\bar{\omega}_1 = \omega_1 h \sqrt{\rho_{\text{metal}} / E_{\text{metal}}}$ thu được bằng các lý thuyết khác nhau và công việc hiện tại với $a/h=5$ với chỉ số công suất khác nhau là k_z . Có thể thấy rằng một lưới đồng nhất gồm 7x7 phần tử NURBS là đủ để đạt được độ chính xác cao.

Bảng 6.8 Thuộc tính của tấm FGM

Tham số	Al (kim loại)	ZrO ₂ -1 (gốm)
E (GPa)	70	200
ν	0.3	0.3
ρ (kg/m ³)	2702	5700

Bảng 6.9 Tần số đầu tiên được chuẩn hóa $\bar{\omega}_1 = \omega_1 h \sqrt{\rho_{\text{metal}} / E_{\text{metal}}}$ của SSSS Al/ZrO₂ -1 của tấm với $a/h = 5$

Phương pháp	ε_z	Mesh	$k_z=0$	$k_z=0.5$	$k_z=1$	$k_z=2$	$k_z=3$	$k_z=5$	$k_z=10$
Exact [180]	-		-	-	0.2192	0.2197	0.2211	0.2225	-
HOSNDPT [181]	-		-	-	0.2152	0.2153	0.2172	0.2194	-
SSDT [83]	= 0		-	-	0.2184	0.2189	0.2202	0.2215	-
SSDT [83]	$\neq 0$		-	-	0.2193	0.2198	0.2212	0.2225	-
HSDT [84]	= 0		0.2459	0.2219	0.2184	0.2191	0.2206	0.2220	0.2219
HSDT [84]	$\neq 0$		0.2469	0.2228	0.2193	0.2200	0.2215	0.2230	0.2229
Quasi-3D [114]	$\neq 0$		0.2472	0.2241	0.2208	0.2215	0.2228	0.2238	0.2227
Nghiên cứu này	= 0	5x5	0.2460	0.2222	0.2185	0.2189	0.2203	0.2216	0.2212
		7x7	0.2460	0.2221	0.2185	0.2189	0.2203	0.2216	0.2212
		9x9	0.2459	0.2221	0.2184	0.2189	0.2203	0.2216	0.2212
		11x11	0.2459	0.2221	0.2184	0.2189	0.2203	0.2216	0.2212
		13x13	0.2459	0.2221	0.2184	0.2189	0.2203	0.2216	0.2212
	$\neq 0$	5x5	0.2498	0.2263	0.2228	0.2231	0.2241	0.2250	0.2243
		7x7	0.2498	0.2263	0.2228	0.2231	0.2241	0.2250	0.2243
		9x9	0.2497	0.2263	0.2228	0.2231	0.2241	0.2250	0.2243
		11x11	0.2497	0.2263	0.2228	0.2231	0.2241	0.2250	0.2243
		13x13	0.2497	0.2263	0.2228	0.2231	0.2241	0.2250	0.2243

Bảng 6.10 Mười tần số đầu tiên được chuẩn hóa $\bar{\omega}_i = \omega_i h \sqrt{\rho_{\text{metal}}} / E_{\text{metal}}$ của SSSS Al/ZrO₂ -1 của tấm với $k_z = 1$ và các giá trị khác nhau $a/h = 5$

a/h	Phương pháp	ε_z	Mode								
			1	2,3	4	5	6	7	8	9	10
5	Exact [180]	-	0.2192	-	-	-	-	-	-	-	-
	HOSNDPT [181]	-	0.2152	0.4114	0.4761	0.4761	0.5820	0.6914	0.8192	0.8217	0.8242
	Quasi-3D [114]	$\neq 0$	0.2208	0.4119	0.4856	0.4856	0.5825	0.7049	0.8238	0.8238	0.8346
	Nghiên cứu này	$= 0$	0.2185	0.4116	0.4796	0.4796	0.5821	0.6953	0.8233	0.8233	0.8241
		$\neq 0$	0.2228	0.4116	0.4918	0.4918	0.5821	0.7151	0.8233	0.8233	0.8489
10	Exact [180]	-	0.0596	-	-	-	-	-	-	-	-
	HOSNDPT [181]	-	0.0584	0.1410	0.2058	0.2058	0.2164	0.2646	0.2677	0.2913	0.3264
	SSDT [83]	$= 0$	0.0596	0.1426	0.2058	0.2058	0.2193	0.2676	0.2676	0.2910	0.3363
	HSDT [84]	$\neq 0$	0.0596	0.1426	0.2059	0.2059	0.2193	0.2676	0.2676	0.2912	0.3364
	Quasi-3D [114]	$\neq 0$	0.0601	0.1436	0.2059	0.2059	0.2208	0.2694	0.2694	0.2913	0.3384
	Nghiên cứu này	$= 0$	0.0595	0.1422	0.2058	0.2058	0.2185	0.2670	0.2670	0.2911	0.3350
		$\neq 0$	0.0605	0.1455	0.2058	0.2058	0.2244	0.2749	0.2749	0.2911	0.3459
20	Exact [180]	-	0.0153	-	-	-	-	-	-	-	-
	HOSNDPT [181]	-	0.0149	0.0377	0.0593	0.0747	0.0747	0.0769	0.0912	0.0913	0.1029
	SSDT [83]	$= 0$	0.0153	0.0377	0.0596	0.0739	0.0739	0.0950	0.0950	0.1029	0.1029

Phương a/h pháp	ε_z	Mode									
		1	2,3	4	5	6	7	8	9	10	
HSDT [84]	$\neq 0$	0.0153	0.0377	0.0596	0.0739	0.0739	0.0950	0.0950	0.1030	0.1030	
Quasi-3D [114]	$\neq 0$	0.0154	0.0380	0.0601	0.0745	0.0745	0.0957	0.0957	0.1030	0.1030	
Nghiên cứu này	$= 0$	0.0153	0.0377	0.0595	0.0740	0.0740	0.0950	0.0950	0.1029	0.1029	
	$\neq 0$	0.0155	0.0383	0.0606	0.0755	0.0755	0.0970	0.0970	0.1029	0.1029	

Bảng 6.11 So sánh mười tần số đầu tiên được chuẩn hóa $\bar{\omega}_i$ mà FM và IIRS thu được mà không tối ưu hóa.

Phương pháp	Case	ϵ_z	$\bar{\omega}_i$									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Full IGA	400 DOF	$= 0$	1.7864	3.9258	3.9681	4.7746	5.5133	5.5133	5.7437	6.7736	6.9186	7.5495
		$\neq 0$	1.8116	4.0398	4.0398	4.7746	5.8477	5.8477	5.9151	7.0451	7.0451	7.5495
IIRS- căn cứ IGA	32 DOF	$= 0$	1.7793	3.9194	3.9194	5.7037	6.7484	6.7563	8.1939	8.1939	9.9916	9.9916
		$\neq 0$	1.8119	4.0445	4.0445	5.9345	7.0543	7.0607	8.6047	8.6047	10.5458	10.5458
	64 DOF	$= 0$	1.7793	3.9194	3.9194	4.7870	5.5463	5.5463	5.7037	6.7484	6.7563	7.6765
		$\neq 0$	1.8119	4.0445	4.0445	4.7867	5.8852	5.8852	5.9345	7.0543	7.0607	7.6385

Bảng 6.12 So sánh mười tần số đầu tiên được chuẩn hóa

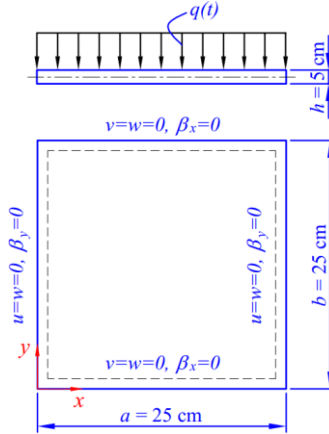
$\bar{\omega}_i = \omega_i h \sqrt{\rho_{\text{metal}} / E_{\text{metal}}}$ của SSSS Al/ZrO₂ – 1 tấm có $k_z = 1$ và $a/h = 5$ thu được bằng phương pháp FM và IIRS có và không có tối ưu

Phương pháp	Mode									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Đầy đủ IGA	0.2228	0.4116	0.4116	0.4918	0.4918	0.5821	0.7151	0.8233	0.8233	0.8489
IIRS-căn cứ IGA không tối ưu	0.2228	0.4116	0.4116	0.4918	0.4918	0.5823	0.7155	0.8233	0.824	0.8502
Sai số (%)	0.0000	0.001	0.001	0.0061	0.0061	0.0352	0.0489	0.0055	0.0922	0.148
IIRS-căn cứ IGA tối ưu	0.2228	0.4117	0.4118	0.492	0.4925	0.5827	0.7161	0.8237	0.825	0.8497
Sai số (%)	0.0021	0.013	0.0336	0.0391	0.1442	0.0967	0.1326	0.0505	0.2129	0.0951

Bảng 6.13 DOF chính tương ứng với các điểm kiểm soát của tấm FG được
DE tối ưu.

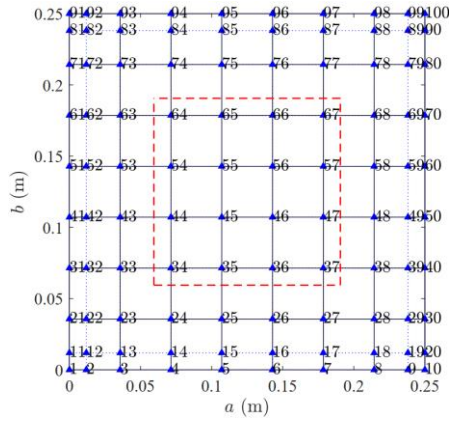
DOFs	Số điểm điều khiển
u_0	21, 22, 24, 27, 28, 34, 45, 50, 52, 61, 66, 73, 76, 85
v_0	5, 12, 19, 26, 27, 35, 36, 37, 49, 72, 75, 77, 89, 94, 96
w_0^b	14, 15, 24, 25, 27, 33, 43, 55, 59, 63, 77, 82, 85, 87, 89
w_0^s	12, 25, 28, 32, 36, 39, 42, 48, 49, 55, 56, 57, 62, 73, 74, 78, 82, 87, 88, 89

6.4.1.2 Phân tích động lực học

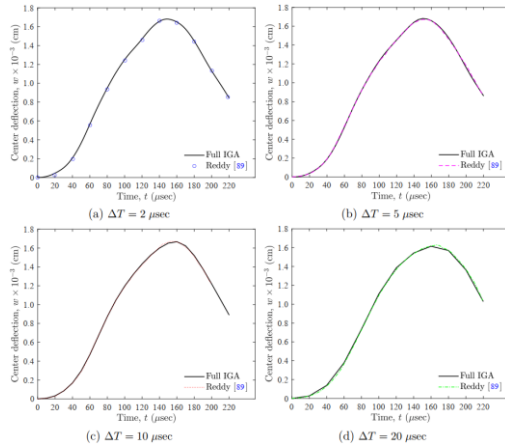


Hình 6.15 Điều kiện biên, hình học và tải trọng tác dụng tức thời của tấm vuông [182]

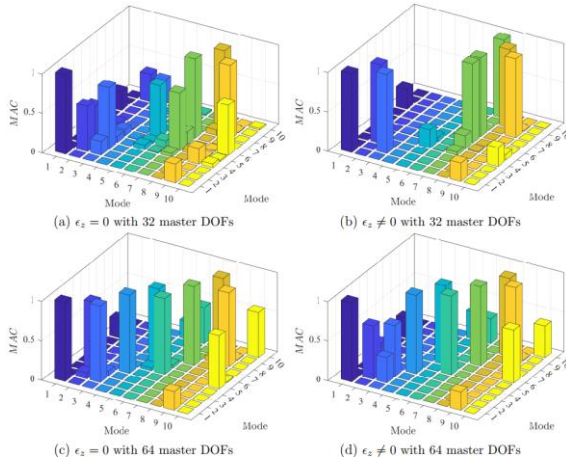
Một tấm vuông với điều kiện biên, hình dạng và tải trọng $q(t) = 10\text{ N} / \text{cm}^2$ được gán tải tức thời lên bề mặt trên của tấm ($z = h/2$) như được hiển thị trong Hình 6.15 đã được xem xét để xác nhận độ tin cậy của phương pháp phân tích IGA đầy đủ dựa trên lý thuyết tấm 4 biến số để phân tích ứng xử động lực học của tấm mà không có sự giảm chấn. Kết cấu tấm này đã được nghiên cứu trước đó bởi Reddy [182] sử dụng các phần tử chín nút hình chữ nhật đẳng tham số trong phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) tiêu chuẩn dựa trên lý thuyết tấm dày. Lưới phần tử và các điểm điều khiển của mô hình tấm được hiển thị trong Hình 6.16. Để so sánh, các độ võng ở trung tâm thu được bởi nghiên cứu hiện tại và Reddy [182] với các bước thời gian khác nhau của $\Delta T = 2, 5, 10$ và $20\text{ }\mu\text{sec}$ được vẽ trong các Hình 6.17 và 6.18 với $\epsilon_z = 0$ và $\epsilon_z \neq 0$, tương ứng. Rõ ràng, kết quả đạt được với $\epsilon_z = 0$ rất giống với các giải pháp tham khảo, trong khi kết quả thu được trong trường hợp của $\epsilon_z \neq 0$ do hiệu ứng kéo dãn thường nhỏ hơn so với trường hợp của $\epsilon_z = 0$ cho tất cả các bước thời gian khác nhau.



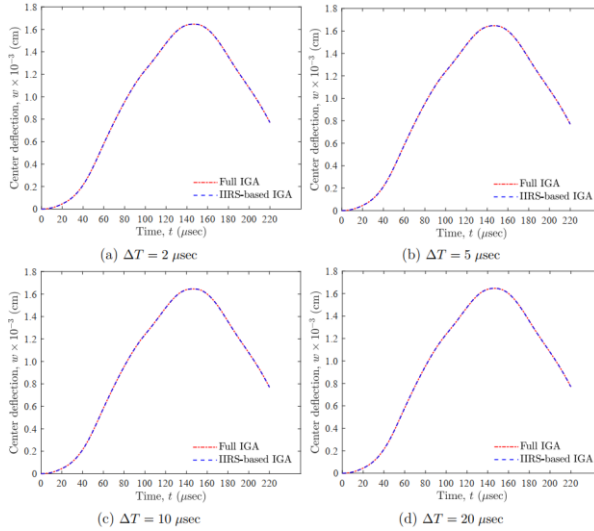
Hình 6.16 Lưới phần tử và các điểm điều khiển của tấm vuông



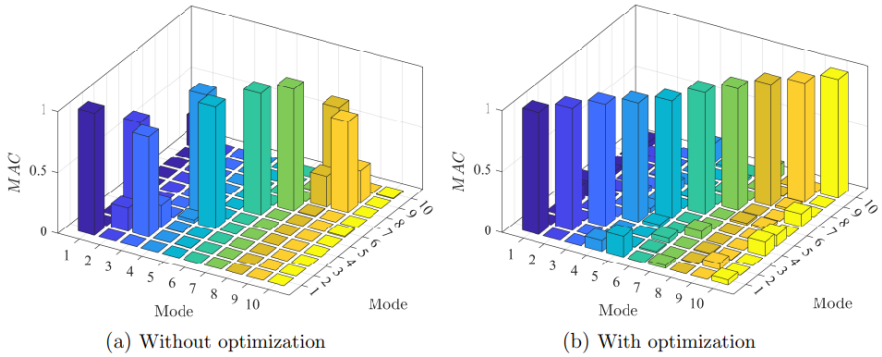
Hình 6.17 So sánh chuyển vị tại tâm của tấm vuông thu được bởi IGA đầy đủ với $\epsilon_z = 0$ cho các bước thời gian khác nhau



Hình 6.18 Ma trận MAC của tấm vuông thu được bằng IGA dựa trên IIRS mà không cần tối ưu hóa.



Hình 6.19 So sánh chuyển vị tại tâm của tấm vuông thu được từ IGA dựa trên IIRS trên 64 DOF chính mà không tối ưu hóa với $\epsilon_z \neq 0$ cho các bước thời gian khác nhau

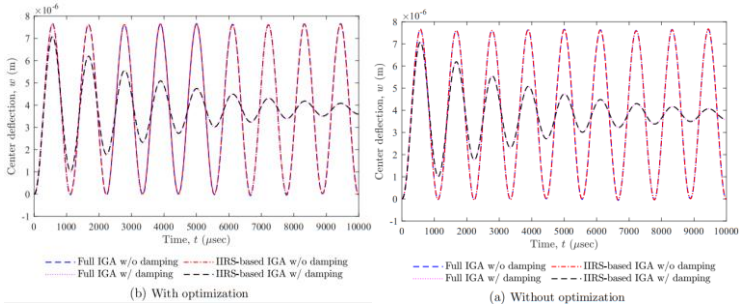


Hình 6.20 Ma trận MAC của tám FG thu được từ IGA dựa trên IIRS có và không có tối ưu.

6.4.2 Tối ưu mô hình giảm bậc cho phân tích động lực học của tấm phân lớp chức năng bằng phân tích đẳng hình học dựa trên lý thuyết tựa 3d bốn biến

Bảng 6.12 báo cáo mười tần số đầu tiên được chuẩn hóa $\bar{\omega}_i$ thu được bằng phương pháp IGA đầy đủ và phương pháp IGA dựa trên IIRS không qua tối ưu cho $k_z=1$ được coi là một kiểm tra điển hình mà không mất đi tính tổng quát của phương pháp đề xuất. Trong đó, các bậc tự do chính được sử dụng để xây dựng ROM bao gồm tất cả các biến số chưa biết của u_0, v_0, w_0^b và w_0^s được định nghĩa tại các điểm điều khiển như đã chọn trong ví dụ trước, tức là $\{34,35,36,37,44,45,46,47,54,55,56,57,64,65,67,68\}$. Tương ứng, tổng số bậc tự do là 64. Có thể thấy từ bảng trên, kết quả thu được bằng ROM phù hợp tốt với những kết quả của FM. Hệ số của ma trận MAC thu được cho trường hợp trên được vẽ trong Hình 6.20. Có thể thấy rằng đối với các bậc tự do chính được chọn mà không qua tối ưu hóa, sự tương quan của các dạng dao động rất kém. Thực sự, chỉ có giá trị đầu tiên trên đường chéo bằng 1, trong khi những giá trị còn lại hầu như khác 1. Hơn nữa, các số hạng nằm ngoài đường chéo của ma trận MAC không tiến về không. Độ võng tại tâm tấm thu được không có hiệu ứng giảm chấn được vẽ trong Hình 6.21a. Có thể thấy rằng kết quả cung cấp bởi IGA dựa trên

IIRS không qua tối ưu phù hợp tốt với những mô hình IGA đầy đủ. Cần lưu ý rằng, các lịch sử độ võng theo thời gian xem xét xu hướng giảm biên độ dao động của hệ một cách dần dần và đơn điệu.



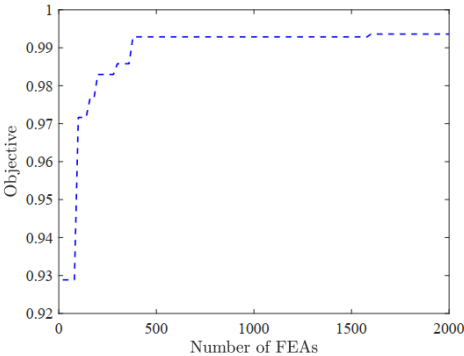
Hình 6.21 Chuyển vị tại tâm của tấm FG thu được từ FM và IGA dựa trên IIRS cho 64 DOF chính và $\Delta T = 20 \mu\text{sec}$ có và không có tối ưu.

Bảng 6.12 báo cáo các bậc tự do chính liên quan đến các điểm điều khiển được tìm thấy trong quá trình tối ưu. Tương ứng, hệ số của ma trận MAC được hiển thị trong Hình 6.20b. Có thể quan sát rằng trường hợp này dẫn đến sự tương quan tốt hơn so với trường hợp trước, ngay cả đối với các dạng dao động bậc cao. Mười tần số đầu tiên được chuẩn hóa $\bar{\omega}_i$ đạt được với các bậc tự do chính tối ưu được cung cấp trong

Bảng 6.12. Hơn nữa, như đã tìm thấy, các kết quả thu được cũng phù hợp tốt với những kết quả của mô hình IGA đầy đủ. Mặc dù chúng có độ chính xác hơi thấp hơn so với những kết quả cung cấp bởi IGA dựa trên IIRS không qua tối ưu hóa, sự tương quan trong ma trận MAC thu được dựa trên tối ưu hóa IIRS lại cao hơn nhiều. Điều này là do việc thiết lập một sự cân bằng tốt hơn giữa vector riêng và trị riêng được thiết lập cho hàm mục tiêu như được định nghĩa trong phương trình (5.23). Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng trong nhiều vấn đề liên quan đến phát hiện hư hỏng dựa trên các đặc trưng dao động tự do, vector

riêng thường nhạy cảm hơn nhiều so với trị riêng. Độ võng tại tâm tấm thu được trong các trường hợp này được hiển thị trong Hình 6.21b. Rõ ràng là kết quả phù hợp tốt với những kết quả của FM như mong đợi. Cuối cùng, lịch sử hội tụ của quá trình tối ưu hóa cho tấm FG đạt được bởi DE được cung cấp trong

Hình 6.22. Có thể thấy rằng hàm mục tiêu hội tụ và giá trị của nó đạt đến 1. Những kết quả này có thể phục vụ như những vấn đề chuẩn mực để so sánh với các công trình nghiên cứu khác trong tương lai, đặc biệt là trong việc sử dụng các ROM dựa trên tối ưu hóa cho phân tích chuyển tiếp của tấm FG.



Hình 6.22 Lịch sử hội tụ của quá trình tối ưu tấm FG với 64 DOF chính thu được bởi DE

CHƯƠNG 7 KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

7.1 Kết luận

7.1.1 Phương pháp tối ưu hóa một bước cho cấu trúc liên kết, kích thước và hình dạng của giàn sử dụng thuyết tiến hóa lai khác biệt và tìm kiếm sinh vật cộng sinh

Nghiên cứu này trình bày một phương pháp tối ưu hóa đồng thời cấu trúc liên kết, kích thước và hình dạng của giàn sử dụng thuật toán HDS. Các ràng buộc về tính ổn định động học, ứng suất, biến dạng, tần số tự nhiên và tải trọng mất ổn định Euler được gán để tìm ra trọng lượng giàn tối thiểu. Các biến kích

thước liên tục và/hoặc rời rạc được thiết lập cho diện tích mặt cắt ngang của các thanh giàn, trong khi các tọa độ nút được xử lý như các biến hình dạng liên tục. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp đề xuất có thể cho ra trọng lượng tối ưu cạnh tranh với cấu trúc liên kết và hình dạng thích hợp so với nhiều thuật toán tiên tiến khác.

7.1.2 Mô hình mới phát hiện hư hỏng hai giai đoạn dựa trên mô hình giảm bậc cho giàn sử dụng gia tốc lịch sử theo thời gian

Một phương pháp chẩn đoán hư hỏng hai giai đoạn dựa trên sử dụng gia tốc thời gian đã được phát triển thành công cho giàn. Phương pháp này sử dụng một chỉ số năng lượng biến dạng dựa trên gia tốc (ASEI) để xác định sơ bộ các phần tử bị hư hỏng tiềm năng nhất, sau đó sử dụng thuật toán AHEFA để xác định vị trí và mức độ hư hỏng của các phần tử bằng cách cực tiểu một hàm mục tiêu mới. Kết quả đạt được cho thấy phương pháp đề xuất có thể chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng đa dạng trên các cấu trúc giàn một cách chính xác và đáng tin cậy bằng cách sử dụng gia tốc chuỗi thời gian được thu thập không đầy đủ tại một số cảm biến..

7.1.3 Tối ưu mô hình giảm bậc cho phân tích động lực học của tấm phân lớp chức năng bằng phân tích đẳng hình học dựa trên lý thuyết tựa 3D bốn biến

Phương pháp tối ưu MOR sử dụng IGA và lý thuyết tấm tựa 3D bốn biến số đã được phát triển thành công. Phương pháp này định nghĩa các bậc tự do chính tại các điểm điều khiển trong khuôn khổ IGA và tối ưu chúng bằng DE. Lý thuyết tấm tựa 3D bốn biến số giúp giảm số lượng bậc tự do chính và biến thiết kế. Phương pháp này cho thấy độ tin cậy và độ chính xác so với kết quả của FM. Phương pháp này có khả năng ứng dụng trong lĩnh vực giám sát sức khỏe kết cấu (SHM).

7.2 Kiến nghị

Nghiên cứu này đã đạt được những kết quả đáng kể, nhưng vẫn còn một số hạn chế và hướng nghiên cứu tiềm năng trong tương lai. Các hướng nghiên cứu tiếp theo bao gồm mở rộng phương pháp HDS để tối ưu đa mục tiêu cấu trúc liên kết, kích thước và hình dạng đồng thời của các giàn và giàn cấu trúc lớn phức tạp, mở rộng tối ưu hóa đa mục tiêu cho các bài toán tối ưu đồng thời cấu trúc liên kết, kích thước và hình dạng cho các kết cấu. Ngoài ra, phương pháp MOR đề xuất có thể được mở rộng để chẩn đoán hư hỏng của các cấu trúc khác. Tuy nhiên, vẫn còn một số hạn chế như kết quả chẩn đoán hư hỏng không chính xác khi xem xét các mức độ nhiễu cao, số lượng và vị trí của các cảm biến đo đặc không được tối ưu hóa, và chưa có nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện để so sánh.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

A. Tạp chí quốc tế

- [1] **Khanh Duy Dang**, Sy Nguyen-Van, Son Thai, Seunghye Lee, Luong Van Hai, Qui Xuan Lieu*, A single step optimization method for topology, size and shape of trusses using hybrid differential evolution and symbiotic organisms search, *Computers & Structures*, 270, 2022, 106846, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2022.106846>, ISI (IF=4.578, Q1).
- [2] **Khanh Duy Dang**, Nghia Huu Nguyen, Seunghye Lee, Van Hai Luong, Tuan Anh Le, Qui Xuan Lieu*, A novel model order reduction-based two-stage damage detection paradigm for trusses using time-history acceleration, *Advances in Engineering Software*, 176, 2023, 103374, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103374>, ISI (IF=4.255, Q1).
- [3] Van Hai Luong, **Khanh Duy Dang***, Seunghye Lee, Qui Xuan Lieu, Optimization of model order reduction for transient analysis of functionally graded plates using isogeometric analysis based on four-

variable quasi-3D theory, *Composite Structures*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118844>, ISI (IF=6.3, Q1).

B. Tạp chí trong nước

- [1] Qui Xuan Lieu*, **Khanh Duy Dang**, Van Hai Luong, Son Thai, Topology and size optimization for X-bracing system of nonlinear inelastic space steel frames, *Journal of Science and Technology in Civil Engineering, HUCE (NUCE)*, 2022, 16 (3): 71–83, [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(3\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(3)-06).
- [2] Đỗ Đình Thi, Hồ Đức Duy, **Đặng Duy Khanh**, Liêu Xuân Quý*, Chấn đoán hư hỏng kết cấu dàn chịu nhiệt độ và tải trọng động dùng tối ưu hóa ngược và học sâu, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) – ĐHXDHN*, 2023, 17 (1V):11-23, [https://doi.org/10.31814/10.31814/stce.huce\(nuce\)2023-17\(1V\)-02](https://doi.org/10.31814/10.31814/stce.huce(nuce)2023-17(1V)-02).
- [3] Trương Hòa Hiệp, **Đặng Duy Khanh***, Lương Văn Hải, Liêu Xuân Quý, Tối ưu hệ giằng của khung thép phi tuyến xét liên kết nửa cứng dùng thuật toán tìm kiếm cộng sinh tiến hóa, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) – ĐHXDHN*, 2024, 18 (1V):41-53, [https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(1V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(1V)-04).

C. Kỷ yếu hội nghị quốc tế

- [1] **Khanh Duy Dang**, Hoa Hiep Truong, Van Hai Luong, Tuan Anh Le, and Qui Xuan Lieu*, Structural damage detection using reduced free vibration data and deep learning, *The International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture (ICSCEA 2023). Lecture Notes in Civil Engineering*, 2023, 442, 1565-1571 https://doi.org/10.1007/978-981-99-7434-4_168, Scopus, (IF:0.46, Q4).
- [2] Hoa Hiep Truong, **Khanh Duy Dang**, Van Hai Luong, An Hong Nguyen, Tuan Anh Le, and Qui Xuan Lieu*, Topology, size and shape optimization

- of trusses under dynamic behavior using evolutionary symbiotic organisms search, *The International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture (ICSCEA 2023). Lecture Notes in Civil Engineering*, 2023, 442, 1572-1578, https://doi.org/10.1007/978-981-99-7434-4_169, Scopus, (IF:0.46, Q4).
- [3] **Khanh Duy Dang**, Nguyet Minh Ly, Hoa Hiep Truong, Van Hai Luong, and Qui Xuan Lieu*, Detection of plastic hinges in inelastic nonlinear steel frames using deep learning, *The International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture (ICSCEA 2023). Lecture Notes in Civil Engineering*, 2023, 442, 1340-1348 https://doi.org/10.1007/978-981-99-7434-4_143, Scopus, (IF:0.46, Q4).
- [4] Duy D. Nguyen, **Khanh Duy Dang**, An Hong Nguyen, Van Hai Luong, and Qui Xuan Lieu*, Damage detection of frame structures based on acceleration using deep learning, *The International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture (ICSCEA 2023). Lecture Notes in Civil Engineering*, 2023, 442, 1333-1339 https://doi.org/10.1007/978-981-99-7434-4_142, Scopus, (IF:0.46, Q4).
- [5] **Khanh Duy Dang**, Tuan Anh Le, Qui Xuan Lieu, and Van Hai Luong*, Damage identification of steel frames with semi-rigid connections using machine learning, *The 18th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-18). "Construction Engineering for a Responsible Growth and Sustainable Future" November 13–15, 2024, Chiang Mai, Thailand, Lecture Notes in Civil Engineering (Accepted, 9/8/2024)*, Scopus, (IF:0.46, Q4).
- [6] **Khanh Duy Dang**, Tuan Anh Le, Qui Xuan Lieu, and Van Hai Luong*, Inverse problem for health monitoring of functionally graded plates using deep learning, *The 18th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-18). "Construction Engineering for*

a Responsible Growth and Sustainable Future” November 13–15, 2024, Chiang Mai, Thailand, Lecture Notes in Civil Engineering (Accepted, 9/8/2024). Scopus, (IF:0.46, Q4).

- [7] Van Hai Luong*, **Khanh Duy Dang**, Tuan Anh Le, and Qui Xuan Lieu, Free vibration analysis of plates using reduced isogeometric analysis, *The 18th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-18). “Construction Engineering for a Responsible Growth and Sustainable Future” November 13–15, 2024, Chiang Mai, Thailand, Lecture Notes in Civil Engineering (Accepted, 9/8/2024).* Scopus, (IF:0.46, Q4).
- [8] Van Hai Luong*, **Khanh Duy Dang**, Tuan Anh Le, and Qui Xuan Lieu, Multi-objective optimization of trusses under constraints using modified firefly algorithm, *The 18th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-18). “Construction Engineering for a Responsible Growth and Sustainable Future” November 13–15, 2024, Chiang Mai, Thailand, Lecture Notes in Civil Engineering (Accepted, 9/8/2024).* Scopus, (IF:0.46, Q4).

D. Kỹ yếu hội nghị trong nước

- [1] **Đặng Duy Khanh**, Trương Hiệp Hòa, Lý Minh Nguyệt, Lương Văn Hải, Nguyễn Công Huân và Liêu Xuân Quý*, Chẩn đoán sức khỏe kết cấu sử dụng chuỗi gia tốc và học sâu, *Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI Hà Nội, 02-03/12/2022*, Tập 2, 493-501.
- [2] Bùi Trung Phú, **Đặng Duy Khanh**, Trương Hiệp Hòa, Lương Văn Hải, Nguyễn Công Huân và Liêu Xuân Quý*, Tối ưu hệ giằng của khung thép phi tuyến sử dụng phương pháp thiết kế nâng cao và thuật toán tiến hóa, *Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI Hà Nội, 02-03/12/2022*, Tập 2, 485-492.