

# ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN TIẾN HÓA VI PHÂN TRONG THIẾT KẾ TỐI ƯU DẦM CHÍNH CẦU TRỤC

## APPLICATION OF DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM FOR OPTIMAL DESIGNING MAIN GIRDER OF GANTRY CRANE

NGUYỄN VIỆT TÂN

Khoa Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email liên hệ: viet-tan.nguyen@mta.edu.vn

### Tóm tắt

Dầm chính của cầu trục là một trong các bộ phận quan trọng của cầu trục. Bài báo trình bày phương pháp thiết kế tối ưu dầm chính theo chỉ tiêu trọng lượng tối thiểu của dầm bằng phương pháp tiến hóa vi phân. Kết quả nhận được là cơ sở khoa học cho việc thiết kế tối ưu chi tiết dầm nói chung và cầu trục nói riêng, cũng như quá trình tự động hóa thiết kế máy.

**Từ khóa:** Dầm chính, cầu trục, thiết kế tối ưu, tiến hóa vi phân.

### Abstract

The main girder is one of the important parts of the gantry crane. The present article proposes a method to optimize the structure of the gantry crane girder according to its minimum weight by a differential evolutionary algorithm. The obtained results serve as a scientific basis for either the optimal design of girders (i.e., gantry crane girders) or the automatic designing of the whole machine.

**Keywords:** Main girder, gantry crane, optimal design, differential evolutionary algorithm.

## 1. Đặt vấn đề

Cầu trục là máy nâng vận chuyển dạng cầu, sử dụng rất phổ biến trong các phân xưởng cơ khí, nhà máy luyện thép, nhà kho,... Cấu tạo của cầu trục bao gồm các cơ cấu, hệ thống và chi tiết, trong đó có dầm chính. Dầm chính là nơi nhận trực tiếp tải trọng nâng vật, truyền tải trọng này đến các dầm biên, ray, dầm dọc, gối đỡ dầm dọc và xuống nền. Dầm chính của cầu trục một dầm hay nhiều dầm thường có các hình dạng phổ biến là chữ I, hộp chữ nhật và chữ C được đặc trưng bằng các thông số hình học (chiều dài, chiều rộng, chiều cao, độ dày,...) và loại vật liệu chế tạo (thép SS400/Q235 hoặc cao hơn là Q345B).

Phương pháp chế tạo dầm chính phụ thuộc vào tải trọng nâng vật, đối với cầu trục có tải trọng nâng vật trung bình trở lên, dầm chính thường được chế tạo bằng

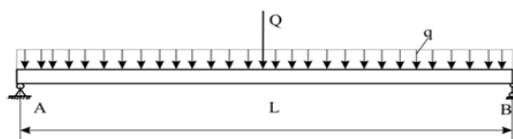
phương pháp hàn. Dầm chính được chế tạo theo nguyên mẫu đã có sẵn hoặc cần phải tính toán thiết kế để đảm bảo điều kiện bền và ổn định của dầm cầu trong quá trình làm việc. Việc tính toán này được thực hiện theo các phương pháp khá phổ biến như lý thuyết sức bền vật liệu hoặc các phần mềm có sẵn (Sap, AnSys,...) hoặc được lập trình trên các phần mềm Matlab, C++,... theo các thuật toán khác nhau để giải bài toán tối ưu, trong đó có thuật toán tiến hóa vi phân (DE). Thuật toán này có nhiều ưu điểm nổi trội, cho phép giải các bài toán có hàm mục tiêu tuyến tính hoặc phi tuyến với việc tìm kiếm trên toàn miền khảo sát, giá trị các biến được phát ngẫu nhiên, thỏa mãn nhiều điều kiện ràng buộc. Do vậy, bài báo trình bày ứng dụng thuật toán DE để thiết kế tối ưu dầm chính cầu trục nhằm đa dạng hóa phương án thiết kế tối ưu kết cấu.

## 2. Xây dựng phương pháp thiết kế tối ưu dầm chính cầu trục

### 2.1. Mô hình tính toán của dầm chính

Theo [2], đối với cầu trục kiểu tựa, dầm chính của cầu trục một dầm hay nhiều dầm đều được liên kết với dầm biên, dầm biên liên kết với ray của dầm dọc nhờ các bánh xe di chuyển cầu trục. Cơ cấu nâng vật được treo (loại cầu trục một dầm) hoặc được tựa (loại cầu trục hai dầm) với dầm chính nhờ bánh xe di chuyển xe tời (xe con) và có thể thay đổi ở bất kỳ vị trí nào trong khoảng làm việc theo chiều dài dầm chính. Mặt khác, do thiết bị treo vật được bố trí coi như trùng với mặt cắt trung tâm của dầm chính nên nếu không xét đến dao động của dầm thì trạng thái chịu lực của dầm chính là chịu uốn thuần túy. Như vậy, mô hình tính toán dầm chính theo điều kiện bền được đặc trưng bằng một dầm đặt trên hai gối tựa, với tải trọng nâng danh nghĩa đặt ở vị trí nguy hiểm nhất ở giữa dầm chính, được mô tả như Hình 1.

Từ Hình 1, theo [3] điều kiện bền của dầm là:



Hình 1. Mô hình tính toán dầm chính

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma] \quad (1)$$

Trong đó:

-  $M_{\max}$ : Mô men uốn lớn nhất trên dầm, (N.m);

$$M_{\max} = \frac{QL}{4} + \frac{qL^2}{8} \quad (2)$$

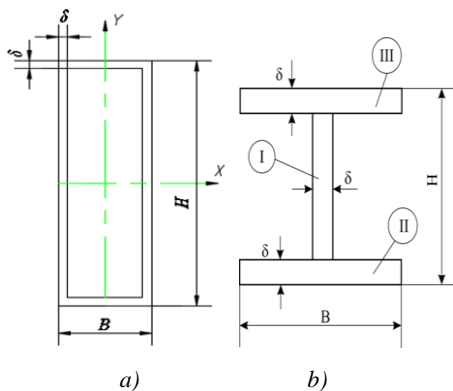
Với: Q, q và L là tải trọng nâng danh nghĩa (N), trọng lượng phân bố trên 1 mét dài (N/1m) và chiều dài dầm (m);

-  $W_x$ : Mô men chống uốn, ( $m^3$ );

-  $[\sigma]$ : Ứng suất uốn cho phép của vật liệu chế tạo dầm, ( $N/m^2$ ).

Mô men chống uốn được xác định theo một số dạng tiết diện ngang điển hình của dầm (Hình 2).

Đối với dạng hộp chữ nhật:



Hình 2. Tiết diện ngang của dầm chính

a. Dạng hộp chữ nhật; b. Dạng chữ I

$$W_x = \frac{2HB\delta - 2B\delta^2 + \delta H^2 - 4\delta^2 H + 4\delta^3}{3} \quad (3)$$

Đối với dạng chữ I:

$$W_x = BH\delta - 2B\delta^2 + \frac{4B\delta^3}{3H} + \frac{H^2\delta}{6} - H\delta^2 + 2\delta^3 - \frac{4\delta^3}{3} \quad (4)$$

## 2.2. Xây dựng bài toán thiết kế tối ưu dầm chính

Như đã trình bày ở Mục 1, mục tiêu của bài toán thiết kế tối ưu dầm chính được xây dựng phải thỏa mãn đồng thời điều kiện bền uốn như được mô tả bằng công thức (1) và điều kiện trọng lượng tối thiểu. Trọng lượng của dầm được xác định như sau:

$$G = \rho.V \quad (5)$$

Trong đó:

-  $\rho$ : Trọng lượng riêng của vật liệu làm dầm, ( $N/m^3$ );

- V: Thể tích khối vật liệu chế tạo dầm chính, ( $m^3$ ).

Thể tích V xác định theo dạng dầm, cụ thể:

Đối dạng hộp chữ nhật:

$$V = (2B\delta + 2\delta H - 4\delta^2)L \quad (6)$$

Đối với dạng chữ I:

$$V = (2B\delta + \delta H - 2\delta^2)L \quad (7)$$

Như vậy, đối với một dạng dầm chính nào đó, khi cho trước tải trọng nâng danh nghĩa, điều kiện bền uốn và trọng lượng của dầm chính phụ thuộc vào các thông số hình học của dầm chính, vật liệu chế tạo, chế độ làm việc của cơ cấu nâng và cơ cấu di chuyển xe tời (được đặc trưng bằng hệ số tải trọng động  $k_d$ ). Khi đó, để thỏa mãn các yêu cầu nêu trên, hàm mục tiêu của bài toán tối ưu thiết kế dầm chính được lựa chọn là trọng lượng tối thiểu của dầm chính và theo [1] và [4], bài toán được phát biểu như sau: *Xác định các thông số hình học của dầm chính (chiều rộng và chiều cao dầm, độ dày tấm thép) để trọng lượng dầm là nhỏ nhất, thỏa mãn điều kiện bền uốn, hệ số tải trọng động và khi cho trước tải trọng nâng danh nghĩa, số lượng và dạng tiết diện dầm, chiều dài và vật liệu chế tạo dầm chính.*

Trên cơ sở quan hệ được biểu diễn bằng các công thức từ (1) đến (7), bài toán tối ưu theo trọng lượng tối thiểu được phân tích như sau:

- Hàm mục tiêu:

$$G = \rho.V \rightarrow \min \quad (8)$$

- Các tham biến của hàm mục tiêu: B, H và  $\delta$

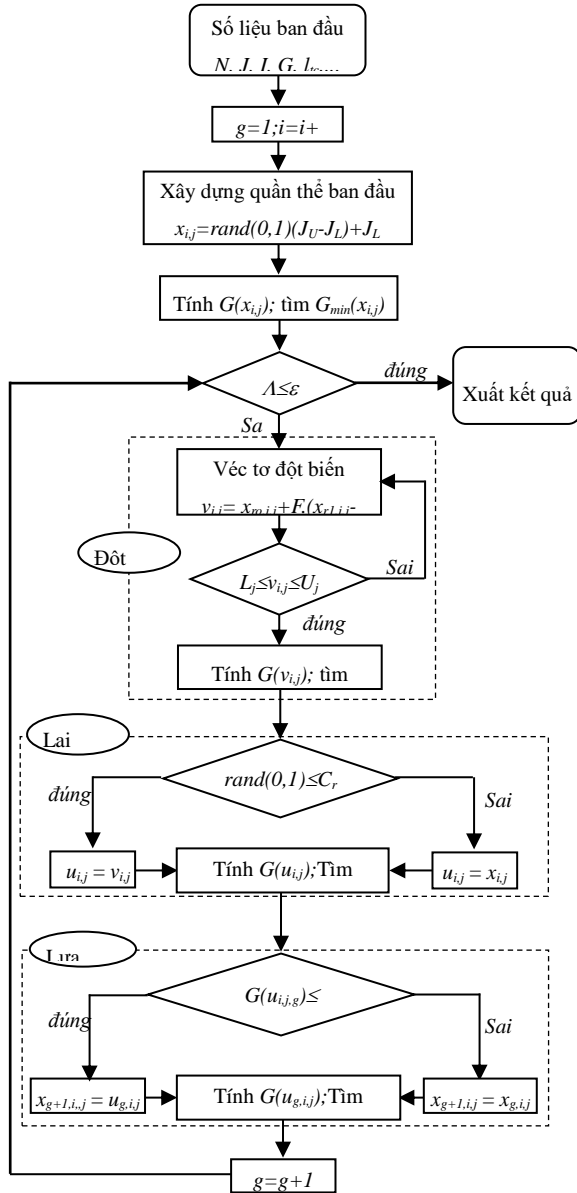
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma] \\ k_d = [k_d] \\ B_U \leq B \leq B_L \\ H_U \leq H \leq H_L \\ \delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k) \end{array} \right. \quad (9)$$

Với:  $[k_d]$  là hệ số động mô men cho phép nhỏ nhất;  $J_U$  và  $J_L$  ( $J=B, H$ ) là chỉ số cận trên và cận dưới của tham biến liên tục;

- Các điều kiện cho trước: Q, L,  $\rho$ , số lượng và dạng tiết diện ngang của dầm chính.

**2.3. Giải bài toán thiết kế tối ưu đảm bảo chính bằng thuật toán tiến hóa vi phân**

Theo [4], trình tự giải bài toán tối ưu theo trọng lượng tối thiểu bằng thuật toán tiến hóa vi phân được biểu diễn bằng sơ đồ hóa (Hình 3) như sau:



**Hình 3. Sơ đồ hóa thuật toán giải bài toán trọng lượng tối thiểu bằng phương pháp tiến hóa vi phân (DE)**

a. **Nhập bộ số liệu ban đầu:** là Q, L, ρ, hệ số tải động cho phép [k<sub>d</sub>], cận trên và dưới của các biến liên tục, giá trị biên rời rạc, số thế hệ M, số cá thể trong một thế hệ N,...

b. **Xác định số tham biến độc lập D của hàm mục tiêu G:** Theo công thức (5) đến (7) nên là D=3 gồm hai tham biến độc lập liên tục B, H, một tham biến độc lập rời rạc δ (vì đảm bảo chế tạo bằng phương pháp

hàn, độ dày của tấm thép được chế theo tiêu chuẩn). Khi đó, giá trị của δ là: δ=δ<sub>1</sub>, δ<sub>2</sub>,..., δ<sub>k</sub>, sẽ được lấy theo bảng tiêu chuẩn thép tấm sử dụng tại Việt Nam nên tham biến này không cần xác định véc tơ tính toán, được đưa vào theo hàm rời rạc.

c. **Xây dựng véc tơ quần thể ban đầu:** Giá trị của các biến trong quần thể ban đầu của hàm mục tiêu G được lấy theo hàm ngẫu nhiên rand(0,1) và viết tổng quát như sau:

$$x_{g,i,j} = rand(0,1)(J_U - J_L) + J_L \quad (10)$$

Với: g là số thế hệ, g=1,2,...M; i là số cá thể trong một thế hệ, i=1,2,...N; J là tham biến liên tục, J=1,2

Khi đó, véc tơ quần thể ban đầu (ở thế hệ 1) là:

$$x_{1,i,B} = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{1N} \end{bmatrix}; \quad x_{1,i,H} = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ H_{1N} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Kiểm tra theo điều kiện ràng buộc ở công thức (9) để loại bỏ các phần tử trong các véc tơ ở công thức (11) không thỏa mãn. Sau đó tính giá trị hàm mục tiêu G=f(x<sub>1,i,j</sub>) bằng công thức (5) và (6) hoặc (5) và (7) theo các véc tơ quần thể ban đầu thỏa mãn điều kiện ràng buộc. Tìm giá trị nhỏ nhất của hàm mục tiêu G=G<sub>min</sub>(x<sub>1,i,j</sub>) ở thế hệ như nhất (g=1). Kiểm tra điều kiện dừng như sau:

$$\Lambda = \left| G_{\min}(x_{1,i,j}) - \frac{\sum_{i=1}^n G(x_{1,i,j})}{n} \right| \leq \epsilon \quad (12)$$

Nếu thỏa mãn điều kiện dừng của công thức (12) thì ghi lại giá trị G=G<sub>min</sub>(x<sub>1,i,j</sub>) tương ứng với bộ tham biến và xuất kết quả tính toán. Nếu không thỏa mãn thì tiếp tục tính toán véc tơ đột biến.

d. **Xác định véc tơ đột biến:** Véc tơ đột được xác định tổng quát như sau:

$$v_{i,j} = x_{ro,i,j} + F \cdot (x_{r1,i,j} - x_{r2,i,j}) \quad (13)$$

Trong đó:

x<sub>ro,i,j</sub>; x<sub>r1,i,j</sub>; x<sub>r2,i,j</sub> là 3 điểm tính và được chọn ngẫu nhiên như sau:

$$x_{ro,i,j} = rand(0,1).i; \quad x_{r1,i,j} = rand(0,1).i;$$

$$x_{r3,i,j} = rand(0,1).i$$

với điều kiện của các chỉ số: r<sub>0</sub> ≠ r<sub>1</sub> ≠ r<sub>2</sub>;

F là hằng số biến đột biến, theo [4] F=0.4±0.6

Từ (13), véc tơ đột biến được xác định như sau:

$$v_{l,i,B} = \begin{bmatrix} B_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{1N} \end{bmatrix}; \quad v_{l,i,H} = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{12} \\ \cdot \\ H_{1N} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Kiểm tra điều kiện biên của các véc tơ đột biến:

- Nếu thỏa mãn điều kiện biên:  $J_L \leq v_{l,i,j} \leq J_U$  thì tính giá trị hàm mục tiêu  $G=f(v_{l,i,j})$  theo các véc tơ đột biến  $v_{l,i,j}$  được xác định từ công thức (14), tìm giá trị nhỏ nhất  $G=G_{min}(v_{l,i,j})$  và tiếp tục công việc lai ghép.

- Nếu không thỏa mãn điều kiện biên thì phải tính lại các véc tơ đột biến  $v_{l,i,j}$  theo công thức (14)

e. *Xác định véc tơ lai ghép*

Sắc xuất lai ghép được xác định như sau:

$$C_r=0,05.D \quad (15)$$

Điều kiện lai ghép:

- Khi  $rand(0,1) \leq C_r$ : thì véc tơ lai ghép  $u_{l,i,j}$  được lấy theo giá trị của các véc tơ đột biến:

$$u_{l,i,j} = v_{l,i,j} \quad (16)$$

- Khi  $rand(0,1) > C_r$ : thì véc tơ lai ghép  $u_{l,i,j}$  được lấy theo giá trị của các véc tơ quần thể ban đầu, cụ thể:

$$u_{l,i,j} = x_{l,i,j} \quad (17)$$

Khi đó, véc tơ lai ghép các biến của hàm mục tiêu được viết như sau:

$$u_{l,i,B} = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{1N} \end{bmatrix}; \quad u_{l,i,H} = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ H_{1N} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Tính hàm mục tiêu  $G=f(u_{l,i,j})$  theo các véc tơ lai ghép  $u_{l,i,j}$  được xác định ở công thức (18). Xác định giá trị  $G=G_{min}(u_{l,i,j})$ . Tiếp tục bước xác định véc tơ lựa chọn.

f. *Xác định véc tơ lựa chọn*

Véc tơ lựa chọn để xác định véc tơ quần thể ban đầu của thế hệ tiếp theo cho hàm mục tiêu và được xác định theo điều kiện sau:

- Khi  $G(u_{l,i,j}) \leq G(x_{l,i,j})$ : thì véc tơ lựa chọn lấy bằng giá trị phần tử véc tơ lai ghép của thế hệ trước:

$$x_{g+1,i,j} = u_{g,i,j} \quad (19)$$

- Khi  $G(u_{l,i,j}) > G(x_{l,i,j})$ : thì véc tơ lựa chọn lấy bằng giá trị phần tử véc tơ quần thể ban đầu của thế hệ trước (thứ nhất):

$$x_{g+1,i,j} = x_{g,i,j} \quad (20)$$

Từ thế hệ thứ hai trở đi, trình tự tính toán sẽ lặp lại từ bước tính giá trị hàm mục tiêu như đã tính của thế hệ thứ nhất, với các véc tơ quần thể ban đầu mới được tạo ra bằng cách lựa chọn theo công thức (19) hoặc

(20) và kiểm tra điều kiện ràng buộc, điều kiện dừng trở đi như đã trình bày ở trên.

### 3. Kết quả thiết kế tối ưu dầm chính cầu trục bằng thuật toán tiến hóa vi phân

#### 3.1. Bộ số liệu ban đầu

$Q=10.10^4$  N;  $L=12$  m;  $\rho=7,85.10^4$  N/m<sup>3</sup>;  $\delta=(0,010; 0,015; 0,020)$  m;  $B_U=0,5$  m;  $B_L=0,1$  m;  $H_U=0,6$  m;  $H_L=0,2$  m;  $[k_d]=1,4$ ;  $[\sigma]=188.10^6$  N/m<sup>2</sup>; Số thể hệ:  $M=30$ ; Số cá thể trong một thế hệ:  $N=400$ ; Sai số tính:  $\varepsilon=0,0001$ ; số lượng dầm là 1; dạng tiết diện dầm: hộp chữ nhật và chữ I.

Lập trình giải bài toán tối ưu với hàm mục tiêu trọng lượng tối thiểu được biểu diễn theo thuật toán cho ở Hình 3 bằng ngôn ngữ C++ của phần mềm Python.

#### 3.2. Kết quả tính toán

Ngoài việc lựa chọn các thông số ảnh hưởng đến hàm mục tiêu trọng lượng tối thiểu, cần lựa chọn dạng tiết diện nào cho phù hợp khi cho trước bộ số liệu ban đầu, kết quả tính toán được thực hiện với hai dạng tiết diện điển hình của dầm chính, cụ thể: đối với tiết diện

Bảng 1. Kết quả đối với tiết diện dạng hộp chữ nhật

$\delta$ (m)	Số lần tính	B (m)	H (m)	$G_{min}$ (N)
0,010	Lần 1	0,3384	0,5972	17250
	Lần 2	0,3364	0,5977	17224
	Lần 3	0,3419	0,5979	17226
0,015	Lần 1	0,1768	0,5731	20345
	Lần 2	0,1572	0,5889	20232
	Lần 3	0,1507	0,5945	20213
0,020	Lần 1	0,1169	0,5422	23328
	Lần 2	0,1025	0,5560	23258
	Lần 3	0,1002	0,5567	23243

Bảng 2. Kết quả đối với tiết diện dạng chữ I

$\delta$ (m)	Số lần tính	B (m)	H (m)	$G_{min}$ (N)
0,01	Lần 1	0,3195	0,5943	11428
	Lần 2	0,3210	0,5941	11456
	Lần 3	0,3158	0,5995	11410
0,015	Lần 1	0,1920	0,5977	13447
	Lần 2	0,1946	0,5926	13449
	Lần 3	0,2064	0,5756	13544
0,02	Lần 1	0,1294	0,5998	15423
	Lần 2	0,1345	0,5923	15511
	Lần 3	0,1334	0,5940	15467

dạng hộp chữ nhật cho theo Bảng 1, dạng chữ I cho theo Bảng 2.

Từ kết quả Bảng 1 và 2, có một số nhận xét như sau:

- Ứng với một bộ số liệu ban đầu và một dạng tiết diện, khi cho trước một giá trị độ dày  $\delta$ , giá trị  $G_{min}$  sau các lần tính (chọn 3 lần) là hội tụ, điều này khẳng định sự đúng đắn bài toán thiết kế tối ưu trọng lượng dầm chính theo phương pháp DE, làm cơ sở để lựa chọn bộ giá trị hình học phù hợp theo dạng tiết diện dầm chính khi thiết kế chế tạo.

- Ứng với các độ dày  $\delta$  (0,01m; 0,015m; 0,02m), sẽ nhận được bộ số liệu tương ứng về chiều rộng, chiều cao tương và trọng lượng của dầm. Khi đó, tiết diện dầm chữ I sẽ cho trọng lượng dầm ( $\approx 1,14$  tấn;  $\approx 1,34$  tấn;  $\approx 1,54$  tấn) nhỏ hơn tiết diện dầm hình hộp chữ nhật ( $\approx 1,72$  tấn;  $\approx 2,03$  tấn;  $\approx 2,32$  tấn) mà vẫn đảm bảo điều kiện bền khi làm việc, làm cơ sở để lựa chọn thiết kế kết cấu dầm cho phù hợp về giá thành sản phẩm.

- Đối với một dạng tiết diện cụ thể, tùy theo độ dày  $\delta$  mà chọn kích thước B và H cho phù hợp để đảm bảo trọng lượng của dầm là nhỏ nhất. Đây là cơ sở để chọn phương án sao cho kích thước B vừa thoải mái điều kiện bền, vừa thỏa mãn việc bố trí ray di chuyển của cơ cấu nâng vật hoặc các bộ phận khác liên kết với dầm chính.

- Nội dung bài toán thiết kế tối ưu trọng lượng tối thiểu của dầm chính đã thiết lập được chương trình tính toán trên máy tính nên có thể dễ dàng thay đổi bộ số liệu đầu vào theo yêu cầu thiết kế và sử dụng vật liệu thiết kế hiện có, bước đầu đáp ứng yêu cầu tự động hóa thiết kế cầu trục.

#### 4. Kết luận

Hiện nay, với sự trợ giúp của máy tính, việc tính toán thiết kế máy nói chung và chi tiết dạng dầm nói riêng đòi hỏi cần phải được tối ưu hóa trong quá trình thiết kế nhằm tạo ra các sản phẩm đáp ứng được yêu cầu của bài toán thiết kế tối ưu. Với việc ứng dụng phương pháp tiến hóa vi phân (DE) để thiết kế tối ưu dầm chính cầu trục là tổ hợp của bài toán tính bền (theo điều kiện ràng buộc) và bài toán tối ưu theo các hàm mục tiêu nào đó (lựa chọn là trọng lượng tối thiểu của dầm chính) đã cho ra kết quả là bộ thông số tối ưu cần tìm (chiều rộng, chiều cao và độ dày của dầm chính), làm cơ sở để lựa chọn bộ thông số phục vụ cho việc thiết kế chế tạo hoặc thực hiện tiếp theo các bài toán tính toán dầm chính cầu trục.

Kết quả nhận được tạo ra cơ sở cho việc xây dựng phương pháp thiết kế tối ưu các chi tiết nói chung và chi tiết dạng dầm nói riêng theo yêu cầu thiết kế đặt ra. Kết quả nghiên cứu cho phép xây dựng hệ thống

tự động hóa thiết kế thỏa mãn một tiêu chí hay nhiều tiêu chí, một mục tiêu hay đa mục tiêu, một biến hay đa biến, với hàm mục tiêu tuyến tính hay phi tuyến mà một số phương pháp tính toán thiết kế trước đây và hiện hành rất khó thực hiện.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Võ Như Cầu, *Tính kết cấu theo phương pháp tối ưu*, NXB Xây dựng, 2003.
- [2] Bùi Khắc Gày, *Máy nâng vận chuyển, tập II*, NXB Quân đội Nhân dân, Hà Nội, 2001.
- [3] Hoàng Xuân Lương, *Sức bền vật liệu*, NXB Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội, 2003.
- [4] Nguyễn Quán Thắng, *Tập bài giảng thiết kế tối ưu kết cấu theo phương pháp tiến hóa vi phân (DE)*.

Ngày nhận bài:	28/6/2021
Ngày nhận bản sửa:	06/8/2021
Ngày duyệt đăng:	20/8/2021