TẠP CHÍ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ Tập 45, số 4, 2007 Tr. 111-118

THIẾT KẾ TỐI ƯU KẾT CẤU THÉP BẰNG THUẬT TOÁN TIẾN HOÁ

VŨ ANH TUẤN, NGUYỄN QUỐC CƯỜNG

I. MỞ ĐẦU

Do ưu điểm nổi trội của nó, trong những năm gần đây việc sử dụng thuật toán tiến hoá trong tính toán tối ưu kết cấu thép đã được nhiều người quan tâm nghiên cứu. Bài toán tối ưu kết cấu xuất hiện khi trong nhiều phương án khả thi, kết cấu phải thỏa mãn thêm một số điều kiện như (tối thiểu) trọng lượng, đảm bảo độ cứng, hiệu quả kinh tế... Căn cứ vào biến thiết kế và hàm mục tiêu, tối ưu hoá kết cấu được chia thành: tối ưu tiết diện (liên tục và rời rạc), tối ưu hình dáng và tối ưu cấu trúc. Trong bài báo này đề cập chủ yếu đến bài toán tối ưu tiết diện với hàm mục tiêu là cực tiểu hoá trọng lượng của kết cấu, theo thuật toán tiến hoá vi phân (Differential Evolution-DE).

Trong rất nhiều bài toán thiết kế tối ưu tiết diện của kết cấu, các biến của bài toán tối ưu không có giá trị tùy ý mà thay vào đó các biến thường được chọn trong một loạt các giá trị cho trước (diện tích thép hình, đường kính bulông...). Theo quan niệm, lời giải cho bài toán với các phần tử có tiết diện được chọn từ bảng diện tích tiết diện ngang rất đơn giản. Tuy nhiên trong thực tế, bài toán này không đơn giản như chúng ta thường nghĩ vì khối lượng tính toán rất lớn. Với một kết cấu đơn giản có 10 phần tử, mỗi phần tử được chọn trong 10 tiết diện cho trước, nếu mỗi một lần phân tích kết cấu mất 0.1 giây thì tổng thời gian tối ưu sẽ kéo dài hơn 10 năm.

Một số phương pháp tối ưu đã được nhiều tác giả đề cập và sử dụng từ những năm 1960 để giải quyết bài toán trên. Những phương pháp này được giới thiệu bởi Fleury-L.A. Schmit, Jr (1980), M.W. Huang (1995), M.W. Huang-J.S. Arora (1995, 1997) and R.S.S. Yavada-C.S. Gurujee (1997).

Bài báo này nhằm giới thiệu chung về một số thuật toán tối ưu kết cấu sử dụng thuật toán tiến hoá, trình bày một số vấn đề khi thiết kế tối ưu kết cấu, các ví dụ tối ưu kết cấu chi tiết để kiểm tra sự chính xác cũng như tính ưu việt của thuật toán tiến hoá vi phân và so sánh với các thuật toán khác. Cuối cùng, là một số kết luận về tối ưu kết cấu sử dụng thuật toán tiến hoá vi phân.

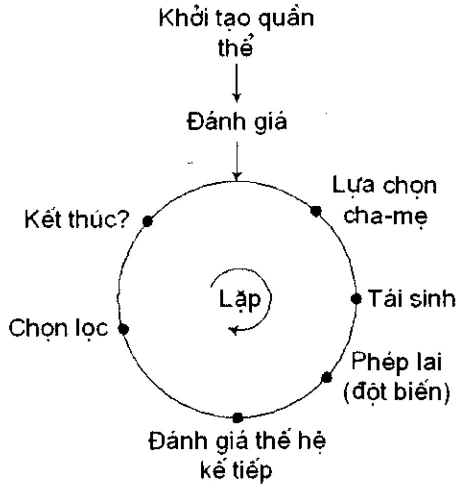
II. THUẬT TOÁN TIẾN HOÁ

Thuật toán tiến hoá là khái niệm dùng để chỉ các chương trình máy tính có sử dụng thuật toán tìm kiếm và tối ưu dựa trên nguyên lý tiến hoá tự nhiên. Có nhiều thuật toán đã và đang được nghiên cứu song tiêu biểu là các thuật toán:

- Quy hoạch tiến hoá (EP, Fogel, 1995).
- Chiến lược tiến hoá (ES, Rechenberg, 1994; Schwefel, 1995).
- Thuật toán di truyền (GA, Holland, 1992; Goldberg, 1989).
- Chiến lược di truyền (GP, Koza, 1992; Banzhaf, 1998).
- Tiến hoá vi phân (DE, K. Price-R. Storn, 1996).
- ...

Thuật toán tiến hoá nói chung dựa trên quan niệm cho rằng, quá trình tiến hoá tự nhiên là quá trình hoàn hảo nhất, hợp lý nhất, và tự nó đã mang tính tối ưu. Quan niệm này có thể được xem như một tiên đề đúng, không chứng minh được nhưng phù hợp với thực tế khách quan. Quá trình tiến hoá thể hiện tính tối ưu ở chỗ, thế hệ sau bao giờ cũng tốt hơn (phát triển hơn, hoàn thiện hơn) thế hệ trước. Tiến hoá tự nhiên được duy trì nhờ hai quá trình cơ bản: sinh sản và chọn lọc tự nhiên. Xuyên suốt quá trình tiến hoá tự nhiên, các thế hệ mới luôn được sinh ra để bổ sung thay thế thế hệ cũ. Cá thể nào phát triển hơn, thích ứng hơn với môi trường sẽ tồn tại. Cá thể nào không thích ứng được với môi trường sẽ bị đào thải.

Các cá thể mới sinh ra trong quá trình tiến hoá nhờ sự lai ghép ở thế hệ cha-mẹ. Một cá thể mới có thể mang những tính thuộc tính của cha-mẹ (di truyền), cũng có thể mang thuộc tính hoàn toàn mới (đột biến). Các thuật toán tiến hoá, tuy có những điểm khác biệt, nhưng đều mô phỏng bốn quá trình cơ bản: lai ghép, đột biến, sinh sản và chọn lọc tự nhiên (hình 1).



Hình 1. Vòng lặp của thuật toán tiến hoá

- Phép lai ghép là quá trình hình thành nhiễm sắc thể mới trên cơ sở nhiễm sắc thể cha-mẹ, bằng cách ghép một hay nhiều đoạn gen của hai (hay nhiều) nhiễm sắc thể cha-mẹ với nhau.

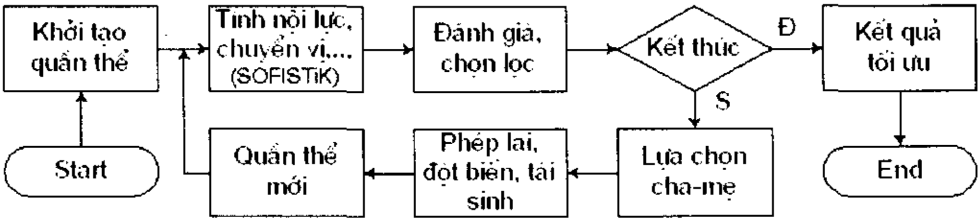
- Đột biến là hiện tượng cá thể con mang một (số) thuộc tính không có trong mã di truyền của cha-mẹ.Phép đột biến xảy ra với xác xuất nhỏ hơn rất nhiều so với xác xuất lai ghép.

- Phép tái sinh là quá trình trong đó các cá thể được sao chép trên cơ sở độ thích nghi của cá thể đó.

- Phép chọn là quá trình loại bỏ các cá thể xấu trong quần thể để chỉ giữ lại trong quần thể các cá thể tốt.

III. THIẾT KẾ TỐI ƯU TRỌNG LƯỢNG KẾT CẤU

Đối với bài toán tối ưu tiết diện rời rạc, tiết diện ngang của mỗi cấu kiện sẽ được chọn trong một danh sách tiết diện cho trước. Như vậy biến thiết kế là diện tích tiết diện ngang của cấu kiện, hàm mục tiêu được xác định dựa trên cực tiểu hoá trọng lượng của kết cấu và phải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc. Thuật toán tối ưu chi tiết được trình bày ở hình 2, với mỗi cá thể trong quần thể mới, kết cấu đều được phân tích lại nội lực, chuyển vị, ứng suất... (việc phân tích kết cấu sử dụng phần mềm tính toán kết cấu của hãng SOFISTiK, phần mềm tối ưu dựa trên thuật toán tiến hoá vi phân do tác giả tự lập trình).



Hình 2. Thuật toán tiến hoá vi phân

1. Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu chính là cực tiểu trọng lượng của cấu kiện. Nó được biểu diễn như sau

$$W = \sum_{i=1}^{nm} A_i \rho_i L_i \tag{1}$$

với i là chỉ số của nhóm cấu kiện, nm là số cấu kiện, W là trọng lượng của kết cấu, A_i là diện tích tiết diện ngang của cấu kiện, ρ_i và L_i là trọng lượng riêng và chiều dài của cấu kiện.

2. Các ràng buộc

Tại mỗi vòng lặp, kết cấu cần phải phân tích để kiểm tra các ràng buộc, ví dụ như ràng buộc về ứng suất, chuyển vị, ổn định tổng thể cũng như ổn định cục bộ và diện tích tiết diện phải được chọn từ danh sách các tiết diện cho trước.

2.1 Ràng buộc về ứng suất

Ràng buộc về ứng suất phải thỏa mãn

$$\sigma_{il} \le [\sigma],\ i = 1,\ 2,\ ...,\ nm \tag{2}$$

với σ_{il} là ứng suất của cấu kiện thứ i ứng với từng trường hợp tải trọng l, $[\sigma]$ là ứng suất cho phép của cấu kiện.

2.2 Ràng buộc về chuyển vị

Ràng buộc về chuyển vị phải thỏa mãn

$$|\Delta_{jl}| \le |\Delta^{P}{}_{jl}|,\ l = 1,\ 2,\ 3,\ ...,\ nlc;\ j = 1,\ 2,\ ...,\ p \tag{3}$$

với Δ_{jl} là chuyển vị của nút j ứng với trường hợp tải trọng l, $\Delta^{P}{}_{jl}$ là chuyển vị cho phép dưới tác dụng của trường hợp tải trọng l, p là số các chuyển vị ràng buộc và nlc là số trường hợp tải trọng.

2.3 Ràng buộc về biến thiết kế

Các biến thiết kế tối ưu A_k phải thỏa mãn điều kiện sau

$$A_k^L \le A_k \le A_k^U,\ k = 1,\ 2,\ ...,ng \tag{4a}$$

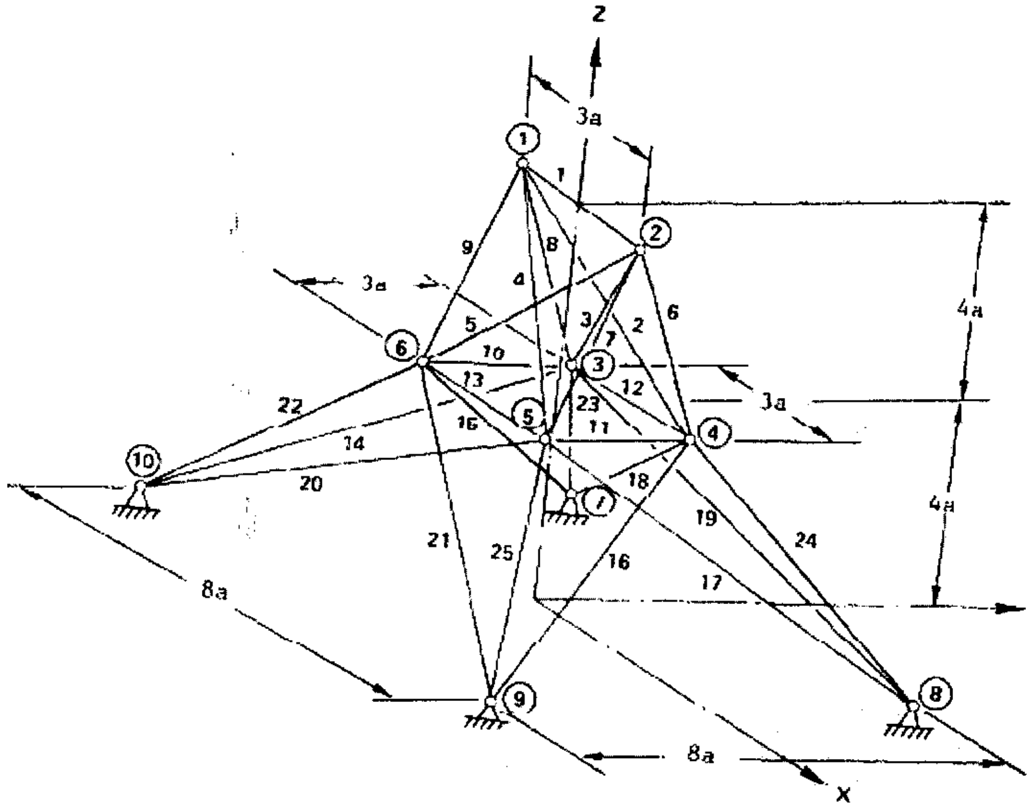
$$A_k \in S = (S_d \,|d = 1,\ 2,\ ...,\ ns) \tag{4b}$$

với A_k^L và A_k^U là cận trên và cận dưới của S, S là số tiết diện cho trước, và ns là số tiết diện cho trước trong S.

IV. VÍ DỤ

Các ví dụ dưới đây được sử dụng thuật toán tiến hoá vi phân để tối ưu trọng lượng của kết cấu. Để đảm bảo tính khoa học và khách quan, các số liệu đầu vào được lấy theo các ví dụ mang tính điển hình của các tác giả đã đề cập ở trên.

1. Hệ dàn không gian 25 phần tử



Hình 3. Hệ dàn không gian 25 thanh

Sơ đồ hình học hệ dàn không gian được trình bày ở hình 3 với khoảng cách a = 63,5 cm. Các thanh dàn có diện tích tiết diện ngang A/A_r (cm^2) được lấy như sau (0,01, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9... 5,4, 5,5, và 5,6) với A_r = 6,452cm^2. Các thông số đặc trưng vật liệu: môđun đàn hồi $E = 6,9 \times 10^4$ MPa, trọng lượng riêng ρ = 2768 kg/m^3, và chuyển vị cho phép tại nút 1 và 2 theo các phương là $\Delta \leq \pm 8,89$ mm.

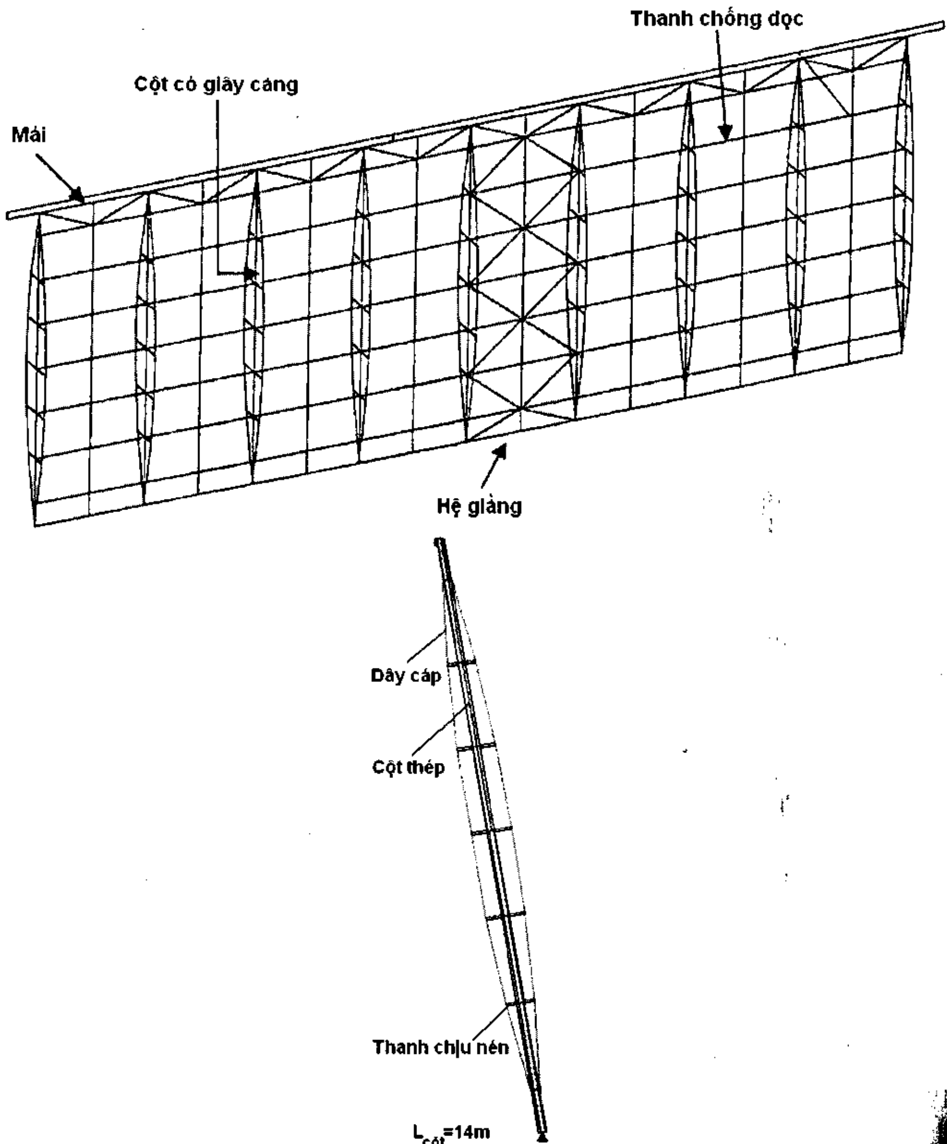
Bảng 1. So sánh kết quả tối ưu: Hệ dàn không gian 25 phần tử

Phương pháp tối ưu	Trọng lượng (kg)	Phần trăm
Tiến hoá vi phân (DE với N_{gen} = 20)	238,30	100,0%
C.Fleury - L.A.Schmit, Jr	250,84	105,3%
R. Yadava - C. Gurujee	249,47	104,7%

Để tiện so sánh các thông số về tải trọng, nhóm các phần tử thiết kế và ứng suất cho phép được lấy từ ví dụ của C.Fleury và L.A.Schmit, Jr (1980). Kết quả tối ưu được so sánh trong bảng 1. Kết quả cho thấy trọng lượng tối ưu đạt được nhỏ hơn so với các kết quả tối ưu đã có.

2. Cột có dây căng

Cột có dây căng là kết cấu không gian sử dụng dây cáp ứng suất trước có tác dụng để tăng sự ổn định (trong) ngoài mặt phẳng của cột khi cột chịu lực. Sơ đồ của dây căng và thanh chịu nén có thể bố trí theo sơ đồ tam giác, chữ nhật, hoặc hình cánh cung. Qua chứng minh cho thấy rằng cột có dây căng hình cánh cung có khả năng chịu lực tốt hơn so với hai sơ đồ còn lại. Trong ví dụ này hàm mục tiêu là tối thiểu trọng lượng của cột có dây căng hình cánh cung, các biến tối ưu là tiết diện của cột, tiết diện của thanh chịu nén, và lực căng trước của dây cáp. Số liệu của ví dụ này được lấy bài báo của J.Y. Richard Liew và Jin-Lun Li (2006). Sơ đồ hình học xem hình 4.



Hình 4. Hệ kết cấu Façade với cột có dây căng

Các thông số đặc trưng vật liệu:

- Dây cáp: môđun đàn hồi $E = 150000 N/mm^2$; $f_y = 460 N/mm^2$.
- Cột thép: sử dụng vật liệu S355, thanh chịu nén: sử dụng vật liệu S460.

Tải trọng:

- Tải trọng tập trung tác dụng trên đỉnh cột $N_C = 300$ kN.
- Tải trọng bản thân của kết cấu bao che $q_{facade} = 1,75$ kN/m.
- Tải trọng gió đẩy và gio hút tác dụng lên kết cấu $q_{Wdruck} = 2,0$ kN/m, $q_{Wsog} = 1,4$ kN/m.

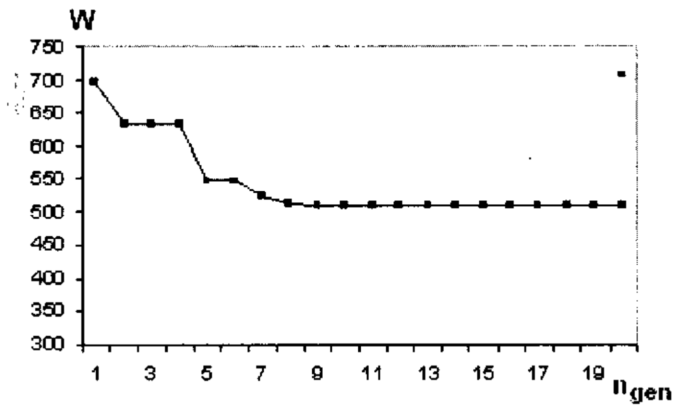
Các biến tối ưu:

- Diện tích tiết diện cột thép (tiết diện hình ống được lấy theo tiêu chuẩn EN 10210).
- Diện tích tiết diện thanh chịu nén (tiết diện hình ống được lấy theo tiêu chuẩn EN 10210).
- Lực căng trước của dây cáp ($P_{preT} \approx 30\%$ - 60% khả năng chịu lực của dây cáp).

Hàm mục tiêu:

- Trọng lượng kết cấu nhỏ nhất.

Ứng suất và ổn định cục bộ của các cấu kiện được kiểm tra theo tiêu chuẩn Eurocode (EC 3). Chuyển vị cho phép theo các phương của kết cấu là $\Delta \leq \pm 70,0$ mm.



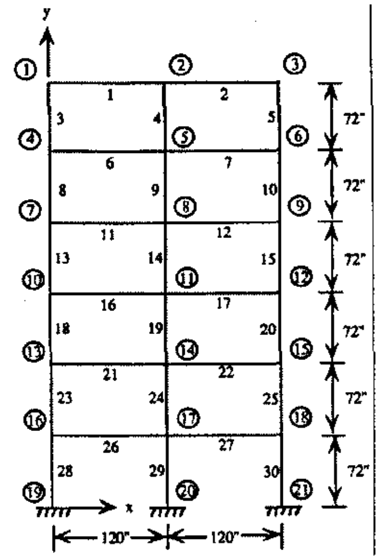
Hình 5. Kết quả tối ưu cột có dây căng

Kết quả tối ưu theo thuật toán tiến hoá vi phân thể hiện ở hình 5. Sau 20 vòng lặp, với lực căng trước của dây cáp $P_{preT} = 42,1$ kN, trọng lượng tối ưu của kết cấu ***W* = 511,5 kg** so với trọng lượng ban đầu của kết cấu là $W = 706,9$ kg.

3. Khung phẳng 2 nhịp 6 tầng

Số liệu của ví dụ này dựa trên bài báo của M. Huang và J.S. Arora (1997). Sơ đồ hình học khung 2 tầng 6 nhịp được trình bày ở hình 6. Tiết diện được lấy từ các tiết diện AISC tiêu chuẩn (W shape). Các thông số đặc trưng vật liệu: môđun đàn hồi $E = 2,1 \times 10^6$ daN/cm^2; $f_y = 2750$ daN/cm^2; $\rho = 7850$ kg/m^3.

Khung phẳng có 30 phần tử và được chia thành 18 nhóm (18 biến tối ưu): {1 2}, {6 7}, {11 12}, {16 17}, {21 22}, {26 27}, {3 5}, {8 10}, {13 15}, {18 20}, {23 25}, {28 30}, {4}, {9}, {14}, {19}, {24}, và {29}.

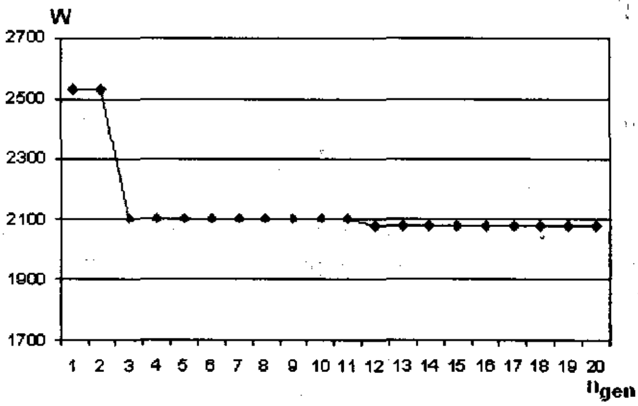


Hình 6. Khung phẳng 2 nhịp 6 tầng

Khung chịu 2 trường hợp tải trọng: (1) tải trọng phân bố q_y = 58,37 kN/m tại các phần tử 1, 7, 11, 17, 21, và 27. Tải trọng phân bố q_y = 14,59 kN/m tại các phần tử 2, 6, 12, 16, 22, và 26. (2) tải trọng phân bố q_y = 14,59 kN/m tại các phần tử 1, 2, 6, 7, 11, 12, 16, 17, 21, 22, 26, và 27. Tải trọng tập trung P_x = 5 kN tại các nút 1, 4, 7, 10, 13, và 16.

Ứng suất và ổn định cục bộ của các cấu kiện được kiểm tra theo tiêu chuẩn Eurocode (EC 3). Chuyển vị cho phép theo các phương của kết cấu là $\Delta \leq \pm 50,8$ mm.

Kết quả tối ưu được thể hiện ở hình 7. Sau 20 vòng lặp trọng lượng tối ưu của kết cấu ***W* = 2079,4 kg.**



Hình 7. Kết quả tối ưu khung phẳng 2 nhịp 6 tầng

V. KẾT LUẬN

Bài báo giới thiệu việc áp dụng thuật toán tiến hoá khi thiết kế tối ưu trọng lượng kết cấu thép. Những bài toán thiết kế tối ưu trọng lượng có biến tối ưu rời rạc rất hay gặp khi tối ưu kết cấu thép có sử dụng tiết diện tiêu chuẩn. Qua các ví dụ cho thấy việc tối ưu kết cấu sử dụng thuật toán tiến hoá vi phân đều cho kết quả tốt hơn các thuật toán tiến hoá khác. Tuy nhiên cũng như các thuật toán tiến hoá khác, thuật toán tiến hoá vi phân có thời gian tính toán còn lớn. Nhưng đối với sự phát triển của máy tính, kết hợp với khả năng tính toán song song thì đó không phải là vấn đề đáng lo ngại. Với thuật toán tối ưu đơn giản, có thể áp dụng cho bài toán tối ưu tiết diện liên tục hoặc rời rạc, việc áp dụng thuật toán tiến hoá để phân tích lựa chọn, tiến tới tìm được phương án tối ưu giúp cho kĩ sư xây dựng có thêm phương án lựa chọn khi thiết kế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. C. Fleury and L. A. Schmit - Jr. Dual methods and approximation concepts in structure synthesis, NASA Rep. No. CR-3226, Scientific and Tech. Information Branch, NASA Washington; D.C. 1980.
2. G. Guerlement, R. Targowski, W. Gutkowski, J. Zawidzka, and J. Zawidzki - Discrete minimum weight design of steel structures using EC3 code, Structural and Multidisciplinary Optimization **22** (2001) p. 322-327.
3. J. Y. Richard Liew, Jin-Jun Li - Advanced Analysis of Pre-Tensioned Bowstring Structures, International Journal of Steel Structures **6** (2) (2006).
4. K. Price, R. Storn, and J. Lampinen - Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization, Springer, 2005.
5. M.-W. Huang and J.S. Arora - Optimal design of steel structures using standard sections, Journal of Structural Optimization **14** (1997) 24-35.
6. R. S. S. Yavada and C. S. Gurujee - Optimal design of trusses using available sections, Journal of Structural Engineering **23** (5) (1997) 539-692.
7. S. Rajeev and C. S. Krishnamoorthy - Discreet optimization of structures using genetic algorithms, Journal of Structural Engineering ASCE **118** (5) (1992) 1233-1250.
8. Z. Michalewicz - Genetic Algorithms + Data structures = Evolution Programs, Springer, 1999.

SUMMARY

OPTIMAL DESIGN OF STEEL STRUCTURES USING DIFFERENTIAL EVOLUTION

The paper presents a practical method of the (discrete) minimum weight design of steel structures. For such applications, (some) values for variables must be selected from available standard sections. Differential Evolution (DE) algorithm is one of Evolution Algorithms, that was used and implemented into a computer program for their numerical optimization. Three numerical examples are presented: the classical benchmark problem of a 25-bar space truss, a bowstring column, and a 2-bay 6-storey plane frame. The proposed method gives, after a reasonable calculation time, a very good approach to the exact optimum solution. In the example of a 25 bar space truss, the proposed method gave the lowest weight (ca. 5% better than others) compared with corresponding existing results and in the two last examples, the results (weights) obtained were better than the initially designed weights.

Địa chỉ:

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

Nhận bài ngày 22 tháng 9 năm 2006