

ỨNG DỤNG TỐI ƯU HÓA CẤU TRÚC LIÊN KẾT TRÊN ANSYS WORKBENCH TRONG THIẾT KẾ GIẢM THIỂU KHỐI LƯỢNG KHÂU DỤNG CỤ CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP

THE APPLICATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN LIGHTWEIGHT DESIGN FOR END EFFECTORS IN INDUSTRIAL ROBOTS

PGS,TS. Lê Giang Nam, Nguyễn Thanh Xuân
Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Giảm thiểu khối lượng khâu dụng cụ có ý nghĩa quan trọng với robot công nghiệp, đặc biệt là các robot vận chuyển. Bài báo này trình bày một trường hợp thiết kế giảm thiểu khối lượng bộ kẹp cho robot phụ trợ trong dây chuyền gia công lazang ô tô tự động, ứng dụng phương pháp SIMP trong Ansys Workbench. Bộ kẹp sau khi tối ưu giảm 29,3% so với thiết kế ban đầu. Hình dạng phức tạp sau khi tối ưu có thể làm tăng thời gian và chi phí chế tạo, nhưng đã giải quyết hiệu quả các vấn đề về tải trọng của robot công nghiệp. Khả năng chế tạo bằng các phương pháp sản xuất thông thường cũng được xem xét để phù hợp với các ứng dụng trong môi trường công nghiệp.

Từ khóa: *Ansys Workbench; Khâu dụng cụ robot công nghiệp; Thiết kế giảm khối lượng; Tối ưu hóa cấu trúc liên kết.*

ABSTRACT

Minimizing the weight of end effectors has significant for industrial robots, especially for transportation robots. This paper presents a case study of lightweight design for gripper of auxiliary robots in automatic car rim machining cells, applying the SIMP method in Ansys Workbench. The optimized gripper is reduced by 29.3% compared to the original design. Complex shapes after optimization can increase manufacturing time and cost but effectively solves load problems of industrial robots. The possibility of fabrication using conventional manufacturing methods is also considered for applications in industrial environments.

Keywords: *Ansys Workbench; Industrial robotic end effectors; Lightweight design; Topology optimization.*



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Robot hiện là một phần quan trọng trong nhiều lĩnh vực sản xuất [1]. Tuy nhiên, nhìn chung một số nhược điểm của robot công nghiệp thường được sử dụng bao gồm tiêu thụ điện lớn, tỉ lệ tải trọng so với trọng lượng bản thân thấp, cấu trúc công kênh và hệ thống phụ trợ phức tạp [2]. Việc thay thế các phần cứng bằng những cấu trúc nhẹ hơn là một trong những giải pháp hiệu quả được nêu ra trong [3] nhằm giảm trọng lượng và quán tính mà robot phải chịu trong quá trình làm việc. Mô-men điều khiển động cơ có thể được giảm xuống, robot cần sử dụng ít năng lượng hơn cũng như điều khiển dễ dàng hơn [3], nhờ đó cải thiện độ chính xác và tuổi thọ của chúng. Giải pháp này đặc biệt quan trọng đối với các robot có vai trò vận chuyển do ảnh hưởng trực tiếp của các kết cấu khâu thao tác đến không gian thao tác và tải trọng của chúng. Vấn đề tương tự cũng dễ thấy với robot phụ trợ trong các hệ thống gia công lazang tự động, nơi chúng đóng vai trò trung chuyển phôi liệu giữa các trạm gia công cũng như đầu vào, ra của hệ thống. Do vậy cần thiết để nghiên cứu, thiết kế nhằm giảm thiểu khối lượng cho các bộ kẹp, đồng thời vẫn đảm bảo tính năng và hiệu suất làm việc của hệ thống.

Tối ưu hóa cấu trúc liên kết (Topology Optimization) là hình thức thông dụng nhất trong tối ưu hóa cấu trúc, trong đó Vật liệu rắn đẳng hướng với hệ số hình phạt (SIMP – Solid Isotropic Material with Penalization) là một trong những phương pháp toán học phổ biến nhất [4]. Do vậy, bài báo này sẽ trình bày một trường hợp ứng dụng phương pháp SIMP, được tích hợp trên Ansys Workbench trong thiết kế giảm thiểu khối lượng cho bộ

kẹp robot phục vụ trong dây chuyền gia công lazang tự động.

2. PHƯƠNG PHÁP THỰC HIỆN

2.1. Tổng quan về phương pháp SIMP

SIMP thường được sử dụng trong giai đoạn đầu của quá trình thiết kế, nhằm tìm ra sự phân bố vật liệu tối ưu dựa trên các điều kiện và ràng buộc đặt trước, được tính toán dựa trên mô hình phần tử hữu hạn và các phép phân tích độ nhạy. Bài toán có thể được biểu diễn dưới dạng toán học như sau [2]:

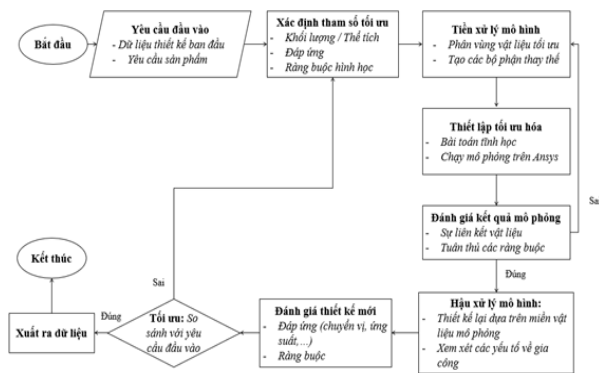
$$\left\{ \begin{array}{l} x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ \text{Min } C(x) = F^T U = U^T K U \\ \text{Điều kiện } \left\{ \begin{array}{l} V \leq V^* \\ F = K U \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1 (x = 1, 2, \dots, n) \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

Trong đó: x là biến thiết kế, đặc trưng cho mật độ tương đối của phần tử, nằm trong khoảng giá trị $[x_{\min}, 1]$; n là số lượng biến thiết kế; $C(x)$ là hàm mục tiêu, đặc trưng cho đáp ứng của chi tiết dưới điều kiện tải trọng; K là ma trận độ cứng; F là vector lực tác dụng; U là vector chuyển vị; V và V^* là thể tích chi tiết sau và trước khi tối ưu hóa.

Ngoài ra, các biến thiết kế phải đáp ứng một số điều kiện ràng buộc khác: Ứng suất cục bộ, chuyển vị tối đa, hình dáng hình học,...

2.2. Quy trình thực hiện

Trong nghiên cứu này, các phân tích và mô phỏng tối ưu hóa được thực hiện trên Ansys Workbench 2021R1. Bộ giải SIMP được cung cấp trên mô đun Topology Optimization. Quy trình thực hiện được đề xuất như sau:



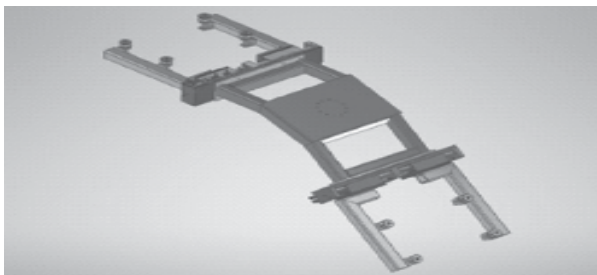
Hình 1. Quy trình tối ưu hóa

Các quy trình tương đương được nêu ra trong [2], [5], [6] đều chứng minh được hiệu quả của tối ưu hóa cấu trúc liên kết trong các trường hợp khác nhau. Tuy nhiên, đối tượng trong nghiên cứu là bộ kẹp lazang, do đó mục tiêu nhóm tác giả hướng tới là một quy trình phù hợp với những sản phẩm được sản xuất đơn chiếc (hoặc loạt nhỏ), nhằm giảm thời gian và chi phí trong chế tạo thực tế. Các công việc cụ thể được triển khai như sau:

• Yêu cầu đầu vào:

- *Dữ liệu thiết kế ban đầu:*

- + Khối lượng: 51,46kg;
- + Bao gồm kết cấu khung thép hình, bộ kẹp khí nén tiêu chuẩn (Zimmer GPH82100N-00-A) và các chi tiết gia công nhỏ khác;
- + Bộ kẹp mang tối đa 2 lazang cùng lúc;
- + Gia tốc di chuyển tối đa là 0,5g.



Hình 2. Thiết kế bộ kẹp ban đầu

- Yêu cầu sản phẩm:

- + Đảm bảo tính có thể chế tạo bằng các hình thức sản xuất thông thường;
- + Đáp ứng được độ chính xác tại vị trí đặt phôi và độ bền kết cấu tại trạng thái làm việc bất lợi nhất (trường hợp robot di chuyển với gia tốc tối đa), ở đây lấy giới hạn chảy đối với thép kết cấu thông thường là 235 MPa.

• Xác định tham số tối ưu:

- *Khối lượng:* Tối thiểu hóa khối lượng, ở đây lấy 35% so với ban đầu.

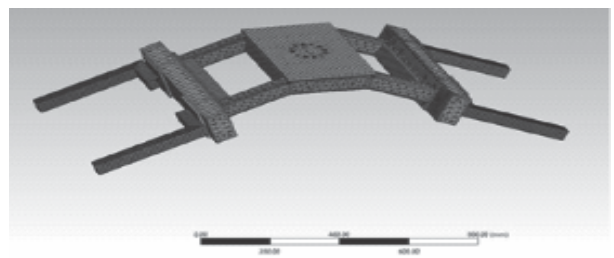
- *Sai lệch vị trí:* Xét tại vị trí làm việc của bộ kẹp là vị trí đặt phôi vào máy, sai số khuyến nghị là $\leq 0,2\text{mm}$.

• Tiền xử lý mô hình:

- *Phân vùng vật liệu tối ưu:* Loại bỏ các chi tiết nhỏ, chiếm trọng lượng không đáng kể trong bộ kẹp; Xác định miền vật liệu tối ưu.

- *Tạo bộ phận thay thế:* Bộ kẹp khí nén tiêu chuẩn được thay thế bằng một khối đơn giản, với thông số vật liệu được điều chỉnh nhằm không thay đổi cơ tính và khối lượng của bộ kẹp. Thiết bị này cũng bị loại bỏ khỏi vùng vật liệu tối ưu nên sự thay thế này không ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng.

- *Chia lưới:* Kích thước lưới là 10mm. Mô hình bao gồm 75973 phần tử và 171409 nút (Hình 3).

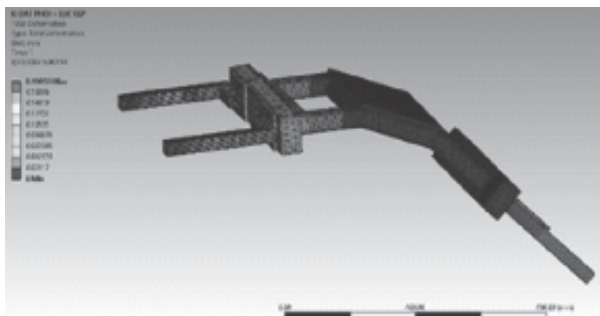


Hình 3. Mô hình bộ kẹp sau khi chia lưới

• Thiết lập tối ưu hóa:

- Bài toán tĩnh học:

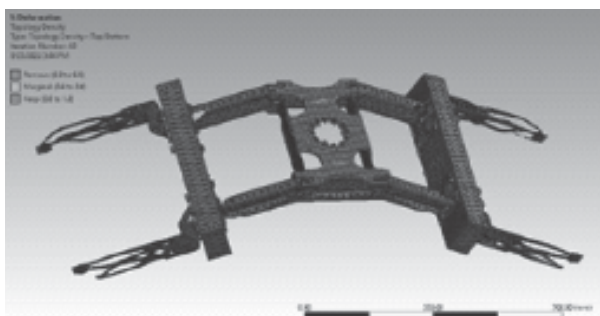
Các lực tác động xét ở vị trí đặt phôi: Trọng lượng bản thân; Trọng lượng lazang (7kg cho mỗi lazang); Lực kẹp tác động lên mỗi ngón tay kẹp (147N). Sai lệch tại vị trí đặt phôi là 0,190mm (Hình 4).



Hình 4. Chuyển vị tối đa tại vị trí đặt phôi (0,190mm)

• Đánh giá kết quả mô phỏng:

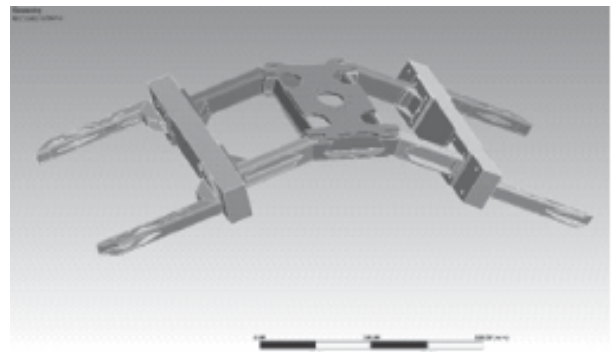
- Miền phân bố vật liệu: Không có các điểm gián đoạn đáng kể (Hình 5);
- Các hàm mục tiêu và ràng buộc: Hội tụ qua một số vòng lặp xác định (40 vòng lặp);
- Thời gian mô phỏng: 37 phút 3 giây;
- Bộ nhớ đệm sử dụng: $\approx 5,1$ GB;
- Mô phỏng được thực hiện trên máy tính với bộ xử lý Intel core i5-10500U, 32GB Ram.



Hình 5. Kết quả mô phỏng phân bố vật liệu

• Hậu xử lý mô hình:

Mô hình được thiết kế lại dựa trên kết quả mô phỏng (Hình 6). Một số vị trí được hiệu chỉnh lại theo kinh nghiệm nhằm phù hợp với các hình thức gia công thực tế. Khối lượng bộ kẹp mới là 36,38 kg, giảm 29,3% so với thiết kế ban đầu.



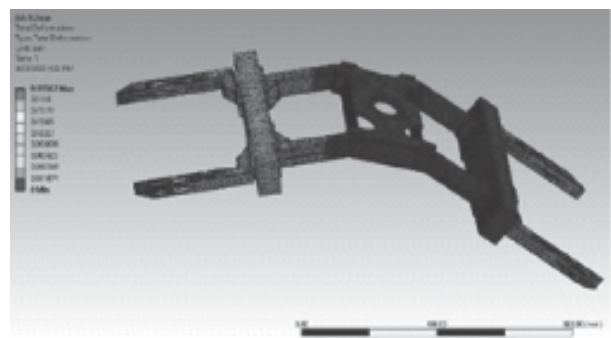
Hình 6. Mô hình sau khi thiết kế lại

- **Đánh giá lại yêu cầu đầu vào:** Hai thử nghiệm mô phỏng đánh giá ứng xử tại các trường hợp tải.

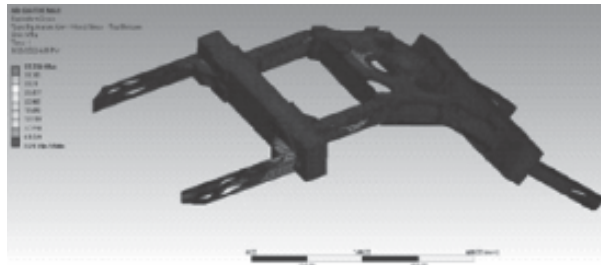
- Sai lệch tại vị trí đặt phôi: 0,195mm (Hình 7);

- Ứng suất với trạng thái gia tốc tối đa: 37,56 MPa (Hình 8).

⇒ Kết cấu bộ kẹp mới đáp ứng đủ yêu cầu thiết kế đã đưa ra, có thể đưa vào sản xuất thực tế.



Hình 7. Sai lệch tại vị trí thả sau tối ưu (0,195mm)



Hình 8. Ứng suất tối đa khi tăng tốc (37,56 MPa)

So sánh với các trường hợp áp dụng phương pháp tương tự:

Bảng 1. Bảng so sánh với các trường hợp áp dụng phương pháp tương tự

Tiêu chí	[2]	[5]	[6]	
Đối tượng áp dụng	[2]: Một khâu trên robot công nghiệp [5]: Ngón tay kẹp trên robot công nghiệp [6]: Chi tiết gá bộ hút chân không trên robot công nghiệp => Chi tiết đơn lẻ			Bộ kẹp trên robot, bao gồm cả chi tiết tiêu chuẩn và phi tiêu chuẩn lắp ráp với nhau => Cụm chi tiết
Phương pháp phân tích tải trọng	Phân tích tải tĩnh thông qua mô phỏng động	Phân tích tải tĩnh tại các vị trí yêu cầu độ chính xác hoặc vị trí yêu cầu độ bền cao nhất		
Phương pháp sản xuất	Thông thường, vật liệu nhôm	In 3D, vật liệu nhựa	In 3D, vật liệu nhựa	Thông thường, vật liệu thép
Mức tải trọng	Lớn	Nhỏ	Nhỏ	Lớn
Thời gian mô phỏng	Chưa xác định	Chưa xác định	2 giờ	37 phút 3 giây
Công cụ	Abaqus	Solidworks	Altair Inspire	Ansys Workbench



3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng thành công phương pháp SIMP trên Ansys Workbench trong việc tối ưu hóa kết cấu bộ kẹp cho robot công nghiệp phục vụ trong dây chuyền gia công lazang tự động. Bộ kẹp đã giảm 29,3% khối lượng nhưng vẫn đạt độ chính xác tại vị trí làm việc tương đương so với ban đầu. Mô hình sau khi thiết kế lại sẵn sàng được trích xuất và đưa vào sản xuất thực tế. Mặc dù hình dạng phức tạp có thể làm tăng thêm thời gian và chi phí chế tạo, tuy nhiên nó đã giải quyết được vấn đề tải trọng cho bộ kẹp, giúp nâng cao hiệu quả vận hành và độ bền cho robot công nghiệp.

Về mặt đóng góp, qua việc so sánh với các trường hợp ứng dụng khác, được thể hiện trong bảng 1, nhóm tác giả có thể chỉ ra một vài đóng góp sau đây:

- Cung cấp thêm minh chứng khẳng định hiệu quả của quy trình áp dụng phương pháp SIMP nhằm giảm thiểu khối lượng trong thiết kế cơ khí.
- Mở rộng thêm trường hợp ứng dụng của phương pháp đã nêu không chỉ với các chi tiết đơn lẻ mà cả các cụm chi tiết có lắp ghép.
- Cung cấp một trường hợp tham chiếu cho các sản phẩm được sản xuất theo hình thức đơn chiếc (loạt nhỏ), yêu cầu phương pháp sản xuất đơn giản, thời gian tính toán ngắn nhằm giảm các chi phí về thiết kế, chế tạo. Điều này có ý nghĩa thực tế trong nhiều ngành công nghiệp hiện nay.❖

Ngày nhận bài: **01/10/2022**

Ngày phản biện: **11/10/2022**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. M. Wilson; *In Implementation of Robot Systems*. Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 75-102.
- [2]. Ping Yao, Kang Zhao, Yuan Lin, Yong Tang; "Light-Weight Topological Optimization for Upper Arm of an Industrial Welding Robot". Vol. 9, no. 9, 2019.
- [3]. Giovanni Carabin, Erich Wehrle, Renato Vidoni; "A Review on Energy-Saving Optimization Methods for Robotic and Automatic Systems." Vol. 6, no. 4, 2017.
- [4]. D. Systemes; "SIMP Method for Topology Optimization", [Online]. Available: https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm [Accessed 20 August 2022].
- [5]. M. Sugavaneswaran, N. Rajesh, N. Sathishkumar; "Design of Robot Gripper with Topology Optimization and Its Fabrication Using Additive Manufacturing." In Proceedings of All India Manufacturing Technology, Design and Research (AIMTDR) 2018 Conference. Guwahati, India, 2018.
- [6]. N. Lappalainen; "Additive Manufacturing and Simulation in Design and Manufacturing of a Robotic Gripper". Aalto University School of Engineering, Espoo, 2020.