

MÔ PHỎNG VÀ THIẾT KẾ TỐI ƯU HÓA KHÂU CHO CÁNH TAY ROBOT

SIMULATION AND OPTIMIZATION DESIGN OF SEWINGS FOR ROBOTIC ARMS

KS. Nguyễn Ngọc Thế

Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: nnthe@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Robot công nghiệp ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất hiện đại, nhưng chi phí cao vẫn là rào cản với các doanh nghiệp vừa và nhỏ. Nghiên cứu này tập trung thiết kế một robot sáu bậc tự do có tính kinh tế, trong đó khâu chính của cánh tay robot được tối ưu hóa. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên phần mềm Abaqus được sử dụng để phân tích ứng suất, chuyển vị và biến dạng dưới tải tĩnh, qua đó xác định các vùng nguy hiểm và đánh giá độ bền – độ cứng của kết cấu. Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu cho thấy khối lượng được giảm đáng kể trong khi vẫn đảm bảo yêu cầu cơ học, khẳng định hiệu quả của FEM và Abaqus trong thiết kế và cải tiến robot công nghiệp.

Từ khóa: *Tối ưu hoá; Độ bền; Độ cứng; Phương pháp phần tử hữu hạn; Cánh tay robot.*

ABSTRACT

Industrial robots are increasingly widely used in modern manufacturing, but high costs are still a barrier for small and medium-sized enterprises. This study focuses on designing an economical six-degree-of-freedom robot, in which the main link of the robot arm is optimized. The finite element method (FEM) on Abaqus software is used to analyze stress, displacement and deformation under static load, thereby identifying dangerous areas and evaluating the strength and stiffness of the structure. The multi-objective optimization results show that the mass is significantly reduced while still ensuring mechanical requirements, confirming the effectiveness of FEM and Abaqus in designing and improving industrial robots.

Keywords: *Optimization; Strength; Stiffness; Finite element method; Robotic arm.*

1. GIỚI THIỆU

Robot công nghiệp ngày càng đóng vai trò quan trọng trong sản xuất hiện đại, đặc biệt trong các lĩnh vực hàn, lắp ráp, bóc xếp và gia công chính xác. Do đó, việc thiết kế cánh tay robot có hiệu suất cao, độ cứng tốt và khối

lượng nhẹ trở nên cấp thiết nhằm đảm bảo vận hành linh hoạt và tiết kiệm chi phí.

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng mô phỏng và tối ưu hóa để cải tiến kết cấu robot. Pupaza và cộng sự [1] sử dụng công cụ CAE để đánh giá và cải tiến hình học robot. Li

et al. [2] áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong thiết kế tay robot phá dỡ, xác định vùng tập trung ứng suất và đề xuất gia cường. Chen [3] kết hợp FEM với thuật toán tối ưu để giảm khối lượng và nâng cao hiệu suất cho robot sáu bậc tự do.

Tại Việt Nam, Trần Thanh Hải Tuấn và cộng sự [4] tối ưu hóa hình học khâu cánh tay robot Delta bằng phương pháp topology, giúp giảm khối lượng mà vẫn đảm bảo độ bền. Nhóm sinh viên Trường Đại học Bách khoa Hà Nội [5] cũng thiết kế bàn tay robot hỗ trợ người khuyết tật, song chưa phân tích ứng suất – biến dạng hay tối ưu hóa cấu trúc bằng FEM.

Từ tổng quan trên, có thể thấy FEM mang lại hiệu quả cao trong phân tích và cải thiện thiết kế robot. Tuy nhiên, các nghiên cứu kết hợp đầy đủ giữa mô phỏng Abaqus, phân tích tĩnh học và tối ưu hóa đa mục tiêu cho từng khâu riêng lẻ vẫn còn hạn chế. Nghiên cứu này hướng đến việc xây dựng mô hình số cho một khâu chính của cánh tay robot sáu bậc tự do, tiến hành phân tích tĩnh học và tối ưu hóa đa mục tiêu để giảm khối lượng, đồng thời đảm bảo độ bền và độ cứng theo yêu cầu kỹ thuật.

2. PHÂN TÍCH TĨNH HỌC KHẤU CHÍNH

2.1. Lý thuyết cơ bản về phần tử hữu hạn

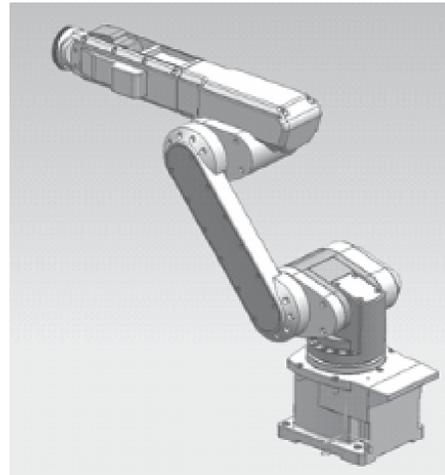
Phân tích phần tử hữu hạn (FEM) là công cụ quan trọng trong thiết kế và đánh giá cơ học kết cấu, đặc biệt hiệu quả với các hệ thống robot công nghiệp có hình dạng phức tạp và tải trọng thay đổi. Trong nghiên cứu này, FEM được sử dụng để phân tích ứng suất, chuyển vị và biến dạng dưới tải tĩnh của khâu chính trong cánh tay robot sáu bậc tự do.

Mô hình 3D của khâu cánh tay lớn được thiết kế trong NX, sau đó đơn giản hóa bằng

cách loại bỏ các chi tiết nhỏ không ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng và xuất sang Abaqus để gán vật liệu, điều kiện biên và tiến hành phân tích tĩnh học.

Hợp kim nhôm (Al) được chọn nhờ đặc tính nhẹ, bền và dễ gia công, thay thế cho thép truyền thống nhằm giảm khối lượng mà vẫn đảm bảo độ cứng. Ngoài ra, các vật liệu nhẹ khác như Mg, Ti và CFRP cũng được đề cập như xu hướng thiết kế robot hiện đại.

Trong quá trình chia lưới, phần tử tứ diện được sử dụng để phù hợp với hình học phức tạp. Lưới được thiết lập từ mức toàn cục đến tinh chỉnh cục bộ tại các vùng có khả năng tập trung ứng suất, đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy của kết quả phân tích.



Hình 1. Mô hình hóa robot sáu bậc tự do bằng phần mềm NX.

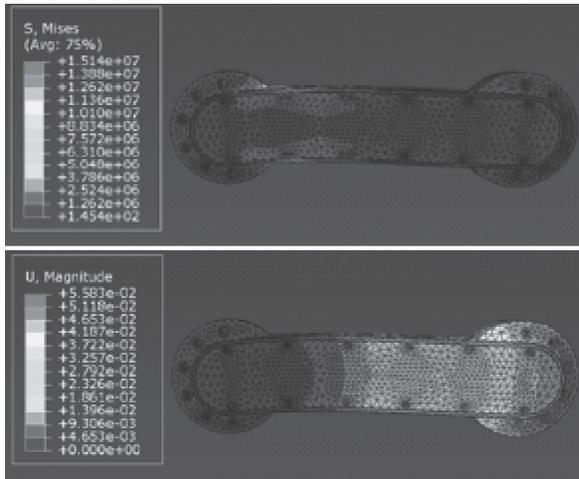
2.2. Phân tích ứng suất, chuyển vị của khâu chính

Hình 2 thể hiện kết quả phân tích phần tử hữu hạn của khâu cánh tay lớn dưới tải tĩnh. Ứng suất Von Mises cực đại đạt khoảng 15,14 MPa, tập trung tại các vùng đầu mút chịu tải và tiếp xúc liên kết, trong khi phần thân giữa

chỉ chịu ứng suất 2-8 MPa, cho thấy phân bố ứng suất đều và không có hiện tượng tập trung nghiêm trọng.

Kết quả biến dạng toàn phần cho thấy chuyển vị cực đại khoảng 0,055 mm tại đầu xa của chi tiết, còn vùng gốc hầu như cố định. Phân bố biến dạng liên tục, phản ánh tính đàn hồi tuyến tính ổn định của kết cấu.

Nhìn chung, khâu cánh tay lớn làm việc an toàn với ứng suất thấp hơn nhiều so với giới hạn chảy của hợp kim nhôm (~250 MPa). Tuy nhiên, độ biến dạng tương đối lớn có thể ảnh hưởng đến độ chính xác, do đó cần tối ưu hóa hình học tại các vùng biến dạng cao để tăng độ cứng mà không làm tăng khối lượng đáng kể.



Hình 2. Ứng suất và chuyển vị của khâu chính trước khi tối ưu hoá.

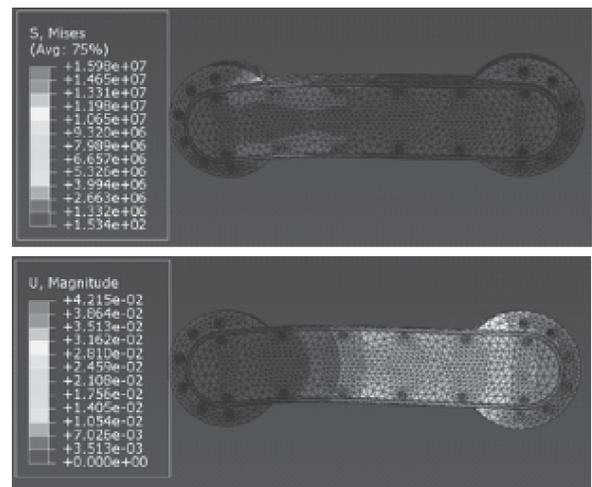
2.3. Thiết kế tối ưu hoá

Tối ưu hóa đa mục tiêu được thực hiện bằng cách xây dựng mô hình tham số hóa gồm các tham số kích thước, vật liệu và tải trọng, trong đó tiêu chí ưu tiên là chuyển vị tối đa của khâu chính không vượt quá 0,05 mm. Quá trình tối ưu được tiến hành trong mô-đun tối ưu hóa của Abaqus, cho kết quả ứng suất và chuyển vị

thể hiện ở hình 3. Kết quả cho thấy sau khi tối ưu hình học, khối lượng giảm nhưng cấu trúc vẫn đảm bảo khả năng chịu tải tốt.

Ứng suất Von Mises cực đại sau tối ưu đạt 15,98 MPa, chỉ tăng nhẹ so với 15,14 MPa ban đầu và vẫn thấp hơn nhiều so với giới hạn chảy của hợp kim nhôm (~250 MPa), chứng tỏ kết cấu làm việc an toàn trong vùng đàn hồi. Chuyển vị cực đại giảm từ 0,055 mm xuống còn 0,042 mm, cho thấy độ cứng tổng thể được cải thiện.

Đáng chú ý, sau tối ưu hóa, vùng chịu ứng suất và biến dạng cao được phân bố đều hơn, không còn tập trung cục bộ, giúp giảm nguy cơ mỏi và nâng cao tuổi thọ của khâu chính.

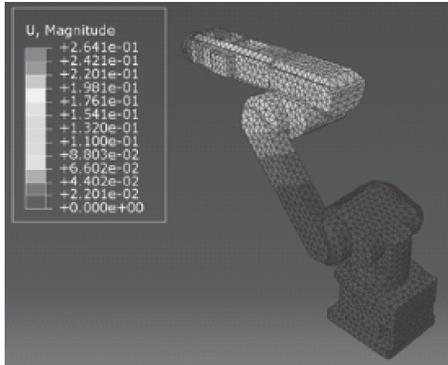


Hình 3. Ứng suất và chuyển vị của khâu chính sau khi tối ưu hoá.

2.4. Phân tích tĩnh học cánh tay robot hoàn chỉnh

Cánh tay robot được mô hình hoá bằng phần mềm NX, các cạnh vát, lỗ ren và các cấu trúc phức tạp khác được loại bỏ để tối ưu hóa thời gian mô phỏng mà không ảnh hưởng nhiều đến kết quả mô phỏng. Kết quả mô phỏng

chuyển vị tổng thể của cánh tay robot ở trạng thái tĩnh được thể hiện như hình 4 dưới đây.



Hình 4. Chuyển vị tổng thể của cánh tay robot.

Hình mô phỏng cho thấy kết quả phân tích chuyển vị toàn phần của cánh tay robot sáu bậc tự do dưới tải tĩnh. Chuyển vị lớn nhất đạt khoảng 0,264 mm tại đầu công tác – vị trí chịu tải trọng ngoài trực tiếp. Dải màu từ xanh đến đỏ thể hiện sự tăng dần của chuyển vị từ gốc đến đầu robot.

Phần đế và các khâu gốc gần như không dịch chuyển, chứng tỏ điều kiện liên kết được áp dụng chính xác. Các khâu trung gian có chuyển vị tăng dần, phản ánh cơ chế truyền lực hợp lý.

Giá trị chuyển vị cực đại dưới 0,3 mm cho thấy robot có độ cứng tốt, đáp ứng yêu cầu công nghiệp thông thường. Tuy nhiên, với các ứng dụng cần độ chính xác cao, biến dạng này cần được kiểm soát chặt chẽ hơn. Có thể nâng cao độ cứng bằng cách gia cường tiết diện, chọn vật liệu có mô đun đàn hồi cao hơn hoặc tối ưu hóa hình học.

3. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày quá trình thiết kế, mô hình hóa và tối ưu hóa một khâu chính của cánh tay robot sáu bậc tự do nhằm giảm khối lượng

nhưng vẫn đảm bảo khả năng chịu tải. Phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn trên Abaqus cho thấy mô hình ban đầu có ứng suất cực đại 15,14 MPa và chuyển vị 0,055 mm. Sau tối ưu hóa đa mục tiêu, khối lượng giảm, ứng suất tăng nhẹ lên 15,98 MPa, trong khi chuyển vị giảm còn 0,042 mm, thể hiện độ cứng được cải thiện rõ rệt.

Mô phỏng toàn bộ robot cho thấy chuyển vị cực đại tại đầu công tác chỉ 0,264 mm, chứng tỏ cấu trúc đạt độ cứng cao, phù hợp với ứng dụng công nghiệp. Kết quả khẳng định hiệu quả của phương pháp phần tử hữu hạn kết hợp tối ưu hóa hình học, đồng thời đề xuất hướng ứng dụng CAE hiện đại trong thiết kế cơ khí cho doanh nghiệp vừa và nhỏ. ❖

Ngày nhận bài: 06/11/2025

Ngày phản biện: 17/11/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Cristina Pupaza, George Constantin & Ștefan Nelgrila, “Computer Aided Engineering of Industrial Robots”. Proceedings in Manufacturing Systems, Vol. 9, Issue 2, 2014, pp. 87-92.
- [2]. Jiong Li, Yu Wang, Kai Zhang, Zhiqiao Wang & Jiaying Lu, “Design and Analysis of Demolition Robot Arm Based on Finite Element Method”. Advances in Mechanical Engineering, Vol. 11(6), 2019.
- [3]. Yiwen Chen, “Structural Optimization and Lightweight Analysis of Industrial Robot Arm”. Proceedings in Manufacturing Systems, 2022.
- [4]. Trần Thanh Hải Tuấn, Võ Như Thành, Lê Hoài Nam & Nguyễn Đình Sơn, “Redesigning Upper Arm of Delta Robot Using Topology Optimization Method”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Đà Nẵng, Vol. 18, No. 3, 2020.
- [5]. Nhóm sinh viên Đại học Bách Khoa Hà Nội, “Khảo sát, thiết kế và chế tạo mô hình bàn tay robot”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Đà Nẵng, Vol. 19, No. 1, 2021.

