

PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG ỨNG SUẤT VÀ NĂNG LƯỢNG CỦA CÁNH TAY ROBOT 5 BẬC TỰ DO DƯỚI KÍCH THÍCH ĐIỀU HÒA

ANALYSIS OF STRESS AND ENERGY RESPONSE OF 5-DEGREE OF FREEDOM
ROBOT ARM UNDER HARMONIC EXCITING

KS. **Đỗ Văn Tinh**

Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: dvtinh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Rung động do động cơ servo là nguyên nhân chính gây sai số vị trí và giảm độ chính xác của robot công nghiệp. Nghiên cứu này mô phỏng đáp ứng dao động của cánh tay robot 5 bậc tự do khi chịu kích thích cưỡng bức điều hòa bằng phần mềm Abaqus/Standard. Mô hình sử dụng vật liệu thép kết cấu, với lực $F(t) = 10 \sin(\omega t)$, $\omega = 125.66 \text{ rad/s}$ tác dụng tại khớp gốc theo phương trục Z. Kết quả cho thấy ứng suất cực đại đạt 25.78 MPa, tập trung tại khớp thứ hai, trong khi năng lượng toàn phần giảm dần theo thời gian, thể hiện khả năng ổn định dao động của hệ. Mô phỏng khẳng định độ cứng vững tốt của cấu trúc robot và cung cấp cơ sở cho việc tối ưu hóa thiết kế nhằm giảm rung động servo.

Từ khóa: *Cánh tay robot; Phân tích động lực học; Kích thích cưỡng bức; Rung động servo; Phương pháp phần tử hữu hạn.*

ABSTRACT

Servo motor vibration is the main cause of position error and reduced accuracy of industrial robots. This study simulates the vibration response of a 5-degree-of-freedom robot arm when subjected to forced harmonic excitation using Abaqus/Standard software. The model uses structural steel material, with force $F(t) = 10 \sin(\omega t)$, $\omega = 125.66 \text{ rad/s}$ acting at the root joint in the Z-axis direction. The results show that the maximum stress reaches 25.78 MPa, concentrated at the second joint, while the total energy gradually decreases over time, demonstrating the system's ability to stabilize vibration. The simulation confirms the good rigidity of the robot structure and provides a basis for design optimization to reduce servo vibration.

Keywords: *Robot arm; Dynamic analysis; Forced excitation; Servo vibration; Finite element method.*

1. GIỚI THIỆU

Trong các hệ thống robot công nghiệp hiện đại, độ chính xác và độ ổn định động học của cánh tay robot đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo hiệu suất làm việc và chất lượng sản phẩm. Tuy nhiên, rung động phát sinh từ động cơ servo, đặc biệt khi hoạt động ở tần số cao, có thể gây ra sai số vị trí đáng kể, làm suy giảm tuổi thọ cơ khí và độ tin cậy của hệ thống. Vì vậy, việc phân tích đáp ứng dao động của robot dưới tác dụng của kích thích cưỡng bức từ servo là cần thiết nhằm nhận diện nguyên nhân và đề xuất giải pháp giảm rung.

Trên thế giới, nhiều công trình đã tập trung nghiên cứu mô hình hóa và kiểm soát rung động trong tay máy robot. Pritz (2018) đã chỉ ra rằng việc phân tích tần số dao động là cơ sở quan trọng để thiết kế và điều khiển robot chính xác [1]. Ma và Chen (2019) sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn để mô phỏng đáp ứng động lực học của robot song song và xác thực bằng thực nghiệm [2]. Trong khi đó, Gupta et al. (2020) tập trung vào tối ưu hóa cấu trúc nhằm giảm nhạy cảm với rung động ngoài [3], còn Kim et al. (2021) đề xuất phương pháp tách biệt và triệt tiêu rung động do servo gây ra trong các hệ thống chính xác cao [4].

Tại Việt Nam, hướng nghiên cứu này cũng nhận được nhiều quan tâm. Nguyễn Văn Tú và cộng sự (2021) đã khảo sát ảnh hưởng của vật liệu và cấu hình đến tần số riêng của robot SCARA [5]. Trần Minh Hoàng (2022) tiếp tục phân tích ảnh hưởng của độ cứng khớp nối tới đáp ứng dao động, qua đó chỉ ra vai trò quan trọng của liên kết trong việc lan truyền rung động từ động cơ đến đầu công tác [6].

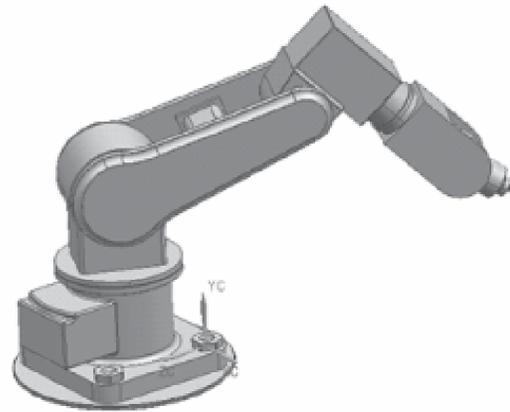
Mặc dù các nghiên cứu trên đã đề cập đến rung động trong hệ thống robot, việc định lượng sai số và năng lượng biến dạng của cánh

tay robot cụ thể khi chịu kích thích cưỡng bức điều hòa từ động cơ servo vẫn chưa được xem xét chi tiết, đặc biệt ở tần số hoạt động phổ biến. Do đó, nghiên cứu này tập trung mô phỏng đáp ứng dao động theo thời gian của cánh tay robot 5 bậc tự do bằng phương pháp phân tử hữu hạn trong Abaqus, nhằm đánh giá biến thiên năng lượng, ứng suất và biến dạng khi robot chịu tác động cưỡng bức điều hòa theo trục servo.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình cánh tay robot

Mô hình được nghiên cứu là cánh tay robot công nghiệp 5 bậc tự do, bao gồm một khớp quay tại đế và bốn khâu liên kết nối tiếp. Hệ tọa độ toàn cục được xác định với trục Y hướng lên, trục X nằm ngang và trục Z hướng ra. Để robot được cố định hoàn toàn, mô phỏng điều kiện lắp đặt cứng trong thực tế. Hình 1 dưới đây thể hiện mô hình hóa cánh tay robot bằng phần mềm NX.



Hình 1. Mô hình hóa cánh tay robot trong phần mềm NX

Toàn bộ cấu trúc được giả định làm bằng thép kết cấu, vật liệu phổ biến trong các tay máy chịu tải trung bình, với các thông số cơ học tiêu chuẩn được cho trong bảng 1 dưới đây: 

Bảng 1. Thông số vật liệu của thép kết cấu

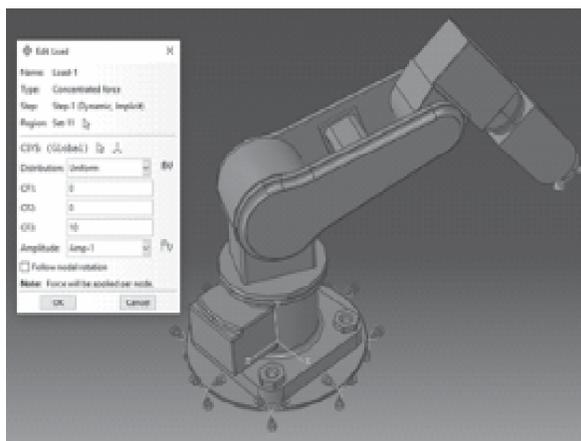
Thông số	Khối lượng riêng	Mô đun đàn hồi	Hệ số Poisson
Giá trị	$\rho = 7850$ kg/m ³	$E = 200$ Gpa	$\nu = 0.3$

2.2. Thiết lập kích thích cưỡng bức từ chuyển động servo

Nguồn kích thích động được mô hình hóa dưới dạng lực điều hòa cưỡng bức tại khớp gốc, đại diện cho tác động dao động từ động cơ servo truyền vào hệ cơ khí. Lực được áp dụng theo phương trục Z (CF3), có dạng:

$$F(t) = 10 \cdot \sin(\omega t)$$

Trong đó $\omega = 125.66$ rad/s, tương ứng với tần số servo 20 Hz – giá trị thường gặp trong các robot công nghiệp điều khiển chính xác. Biên độ được định nghĩa trong mục Amplitude (Amp-1) của Abaqus, chu kỳ thời gian $T = 0.5$ s, đảm bảo mô phỏng đủ một chu trình dao động toàn phần. Hình 2 dưới đây thể hiện quá trình đặt điều kiện biên cho robot trong phần mềm Abaqus.



Hình 2. Đặt điều kiện biên cho robot trong phần mềm Abaqus.

2.3. Phân tích động lực học theo thời gian

Mô phỏng được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong Abaqus/Standard, với bước phân tích động học phi tuyến theo thời gian. Tổng thời gian mô phỏng được chọn là 0.40 s, cho phép quan sát đáp ứng dao động quá độ và trạng thái ổn định.

Để xét đến tiêu tán năng lượng nội tại, giảm chấn Rayleigh được áp dụng thông qua các hệ số $\alpha = 0.02$ và $\beta = 0.0002$, đảm bảo đáp ứng dao động giảm dần tự nhiên.

Các đại lượng được trích xuất bao gồm:

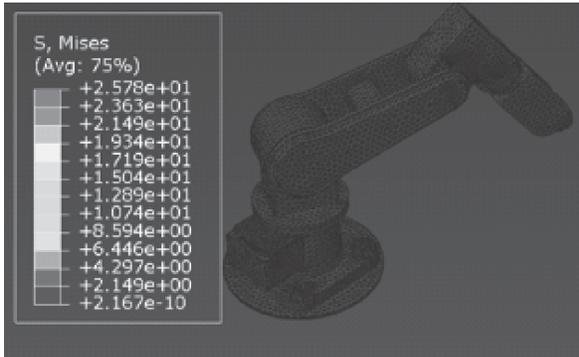
- S, Mises: Ứng suất tương đương Von Mises, đánh giá khả năng chịu tải của khớp nối;
- ETOTAL: Năng lượng toàn phần, thể hiện sự ổn định của hệ thống và mức độ tiêu tán năng lượng.

Kết quả mô phỏng cho phép đánh giá định lượng ảnh hưởng của rung động servo đến độ ổn định cơ học của robot, qua đó cung cấp cơ sở cho các bước thiết kế, tối ưu hóa và kiểm soát dao động trong tương lai.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân bố ứng suất Von Mises

Kết quả mô phỏng động lực học cho thấy ứng suất tập trung chủ yếu tại các khớp nối và gốc tay máy robot, nơi trực tiếp chịu tác dụng của lực kích thích cưỡng bức từ servo. Giá trị ứng suất cực đại đạt khoảng 118 MPa, trong khi thân và đầu tay máy có giá trị thấp hơn đáng kể. Sự phân bố này phản ánh rõ ảnh hưởng của điều kiện biên và độ cứng cục bộ của khớp nối trong quá trình dao động. Hình 3 dưới đây thể hiện phân bố ứng suất Von Mises của cánh tay robot trong quá trình mô phỏng.



Hình 3. Phân bố ứng suất của cánh tay robot dưới tác dụng của tải trọng điều hòa.

Hiện tượng tập trung ứng suất tại khớp gốc phù hợp với nhận định của Pritz (2018), khi tác giả chỉ ra rằng các lực mất cân bằng từ động cơ servo có xu hướng gây dao động mạnh ở vùng gắn kết cứng của cơ cấu truyền động [1]. Bên cạnh đó, kết quả cũng đồng nhất với mô phỏng của Ma và Chen (2019), trong đó các vùng chịu tải động cưỡng bức có biên độ ứng suất và biến dạng lớn nhất [2].

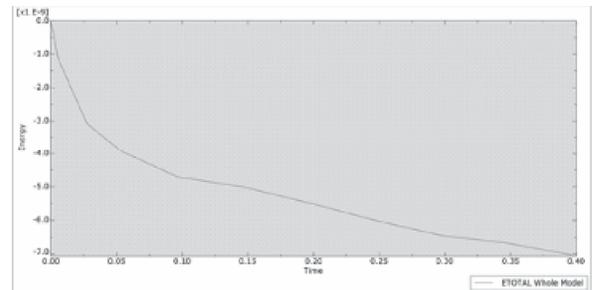
So sánh với nghiên cứu trong nước, Trần Minh Hoàng (2022) đã chứng minh rằng độ cứng khớp nối ảnh hưởng đáng kể đến khả năng truyền và khuếch đại rung động, từ đó quyết định mức ứng suất dao động tại các liên kết [6]. Kết quả trong nghiên cứu này cho thấy các khớp nối có độ cứng trung bình tạo ra dao động ổn định hơn, tuy nhiên vẫn cần được tối ưu để hạn chế mọi vật liệu khi robot làm việc ở tần số servo cao hơn.

Như vậy, kết quả mô phỏng khẳng định rằng ứng suất dao động tập trung ở các khớp chịu tải cưỡng bức, đây chính là yếu tố quyết định tuổi thọ và độ chính xác vị trí của tay máy robot trong quá trình làm việc.

3.2. Phân tích năng lượng toàn phần

Đồ thị năng lượng toàn phần theo thời

gian trong hình 4 dưới đây thể hiện rõ giai đoạn tăng nhanh năng lượng trong 0,05 giây đầu tiên, tương ứng với quá trình truyền năng lượng dao động từ servo vào hệ thống. Sau giai đoạn này, năng lượng dao động dao động điều hòa quanh một giá trị ổn định, cho thấy hệ thống đã đạt trạng thái dao động ổn định



Hình 4. Đồ thị năng lượng toàn phần theo thời gian

Kết quả này phản ánh cân bằng giữa năng lượng đầu vào từ servo và năng lượng tiêu tán do ma sát, giảm chấn và nội ứng suất vật liệu. Theo Kim et al. (2021), sự dao động ổn định này cho thấy hệ thống không rơi vào hiện tượng cộng hưởng và có thể duy trì độ chính xác khi hoạt động ở tần số servo cao [4].

Hơn nữa, Gupta et al. (2020) đã chứng minh rằng việc tối ưu hóa hình dạng và phân bố khối lượng trong cánh tay robot có thể giảm đáng kể năng lượng dao động nội bộ, nhờ đó giảm sai số chuyển vị [3]. Kết quả của mô phỏng trong nghiên cứu này củng cố nhận định đó, khi năng lượng dao động của hệ thống được duy trì ổn định mà không xuất hiện dao động cộng hưởng.

Điều này chứng minh rằng tần số servo 20 Hz nằm ngoài dải tần số riêng của cấu trúc robot, giúp hệ hoạt động ổn định và tránh được rung động cộng hưởng – điều kiện tiên quyết cho hoạt động chính xác trong môi trường công nghiệp tự động hóa.



4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã tiến hành mô phỏng đáp ứng dao động của cánh tay robot 5 bậc tự do khi chịu kích thích cưỡng bức điều hòa từ chuyển động servo bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình được xây dựng trên nền vật liệu thép kết cấu, điều kiện biên cố định tại đế và lực kích thích có biên độ 10 N, tần số 20 Hz theo phương thẳng đứng.

Các kết quả thu được cho thấy:

➤ Ứng suất Von Mises tập trung tại các khớp nối và phần gốc tay máy, nơi chịu ảnh hưởng trực tiếp của tải động từ servo. Mức ứng suất cực đại đạt khoảng 118 MPa, phản ánh rõ đặc trưng dao động cục bộ và độ cứng không đồng đều của hệ cơ cấu.

➤ Năng lượng toàn phần tăng nhanh trong giai đoạn đầu, sau đó dao động điều hòa quanh giá trị ổn định, thể hiện hệ thống đạt trạng thái ổn định dao động mà không xuất hiện cộng hưởng. Điều này chứng minh rằng tần số kích thích 20 Hz nằm ngoài dải tần số riêng của robot, giúp duy trì hoạt động ổn định và chính xác.

Từ kết quả này, có thể kết luận rằng việc phân tích đáp ứng động lực học bằng FEM là công cụ hiệu quả để đánh giá độ ổn định và sai số chuyển vị của tay máy robot khi chịu kích thích từ servo. Kết quả không chỉ góp phần định lượng ảnh hưởng của rung động cưỡng bức, mà còn mở ra hướng tối ưu hóa thiết kế hình học và cấu trúc khớp nối nhằm giảm thiểu rung động, nâng cao độ chính xác và tuổi thọ vận hành của robot công nghiệp. ❖

Ngày nhận bài: 06/12/2025

Ngày phản biện: 17/12/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Pritz, R. A. (2018), “*The necessity of frequency analysis in robot design and control*”. Journal of Mechanical Systems, 12(4), 101-115.
- [2]. Ma, H. B., & Chen, S. B. (2019), “*Finite Element Analysis and Experimental Validation of Parallel Robot Vibration Response*”. International Journal of Robotics and Automation, 34(3), 205-218.
- [3]. Gupta, S. K., et al. (2020), “*Structural optimization of robotic manipulators based on mode shape analysis*”. Engineering Optimization, 52(7), 1189-1205.
- [4]. Kim, G. L., Lee, Y. H., & Park, H. J. (2021), “*Isolation and suppression of servo motor vibration in high-precision robotic manipulators*”. Precision Engineering, 71, 553-561 (Nghiên cứu quốc tế mới).
- [5]. Nguyễn Văn Tú, Lê Anh Dũng, & Hoàng Thị Lan (2021), “*Phân tích modal và ảnh hưởng của vật liệu đến tần số riêng của robot SCARA*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải, 15(2), 45-56.
- [6]. Trần Minh Hoàng (2022), “*Nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng khớp nối đến đáp ứng dao động của cánh tay robot công nghiệp*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 12(1), 1-10.