

PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA KHUNG MÁY KÉO SỢI BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

DYNAMIC CHARACTERISTICS ANALYSIS OF A YARN DRAWING MACHINE FRAME USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Trần Nguyên Lâm

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Email: tnlan@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình xây dựng mô hình hình học ba chiều của khung máy kéo sợi dạng kết cấu hàn tổ hợp, được cấu tạo từ các dầm thép hộp và thép hình, nhằm phản ánh sát đặc điểm kết cấu thực tế của máy. Trên cơ sở mô hình hình học đã thiết lập, phân tích biến dạng và chuyển vị cũng như dao động riêng của khung máy được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong môi trường phần mềm ANSYS.

Thông qua mô hình số, các dạng dao động riêng đặc trưng, tần số dao động tương ứng cũng như sự phân bố biến dạng và chuyển vị của khung máy được xác định và phân tích. Các kết quả thu được cho phép đánh giá một cách định lượng đặc tính động lực học của kết cấu khung, đồng thời chỉ ra các vùng có xu hướng tập trung biến dạng và nhạy cảm với rung động trong quá trình làm việc. Trên cơ sở đó, nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc xem xét, đề xuất các giải pháp nâng cao độ cứng vững và cải thiện độ ổn định động lực học của khung máy kéo sợi, góp phần nâng cao độ tin cậy và hiệu quả vận hành của thiết bị.

Từ khóa: Khung máy; Phần tử hữu hạn; Bền mỏi; Dao động riêng; Máy kéo sợi.

ABSTRACT

This paper presents the process of constructing a three-dimensional geometric model of a welded frame for a spinning machine, composed of box girders and structural steel, to accurately reflect the actual structural characteristics of the machine. Based on the established geometric model, deformation, displacement, and natural vibration analysis of the frame were performed using the finite element method in the ANSYS software environment.

Through the numerical model, the characteristic natural vibration modes, corresponding vibration frequencies, and the distribution of deformation and displacement of the frame were determined and analyzed. The results obtained allow for a quantitative assessment of the dynamic characteristics of the frame structure, while also identifying regions with a tendency to concentrate deformation and sensitivity to vibration during operation. Based on this, the research provides a scientific basis for considering and proposing solutions to enhance the rigidity and improve the dynamic stability of the spinning machine frame, contributing to increased reliability and operational efficiency of the equipment.

Keywords: Machine frame; Finite element; Fatigue strength; Natural vibration; Spinning machine. 

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong các dây chuyền sản xuất dệt may hiện đại, máy kéo sợi là thiết bị làm việc liên tục với tốc độ cao và yêu cầu độ ổn định lớn. Quá trình vận hành của máy phát sinh tải trọng động và rung động chu kỳ do chuyển động quay của trục chính, động cơ và các cơ cấu truyền động. Các tác động này được truyền trực tiếp lên khung máy, làm xuất hiện ứng suất thay đổi theo thời gian và là nguyên nhân chính gây nứt mỏi tại các mối hàn, giảm tuổi thọ thiết bị và ảnh hưởng đến độ chính xác làm việc [1], [2].

Trong thực tế, thiết kế khung máy kéo sợi tại nhiều cơ sở sản xuất vẫn chủ yếu dựa trên kinh nghiệm và tính toán bền tĩnh. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng cách tiếp cận này không phản ánh đầy đủ trạng thái làm việc thực của kết cấu, đặc biệt trong điều kiện tải trọng chu kỳ và rung động [3]. Do đó, việc kết hợp phân tích tĩnh, phân tích dao động riêng và đánh giá bền mỏi ngay từ giai đoạn thiết kế là cần thiết.

Với sự phát triển của phương pháp phần tử hữu hạn (FEA), việc mô phỏng ứng suất, biến dạng và dao động của kết cấu máy trở nên khả thi và hiệu quả hơn. Phương pháp này cho phép đánh giá chính xác các vùng ứng suất tập trung, tần số dao động riêng cũng như khả năng làm việc lâu dài của khung máy dưới tác dụng tải trọng chu kỳ [4], [5].

Bài báo tập trung ứng dụng mô phỏng phần tử hữu hạn trong phân tích và cải tiến kết cấu khung máy kéo sợi, nhằm nâng cao độ bền mỏi và giảm rung động, phù hợp với yêu cầu thiết kế và cải tiến máy công nghiệp trong lĩnh vực cơ khí chế tạo.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT BỀN MỎI

2.1. Ứng suất chu kỳ trong kết cấu khung máy kéo sợi

Trong quá trình làm việc, khung máy kéo sợi chịu tác dụng của tải trọng thay đổi theo thời gian. Ứng suất tại một điểm bất kỳ trong kết cấu có thể được mô tả bằng chu kỳ ứng suất với giá trị lớn nhất σ_{\max} và nhỏ nhất σ_{\min} .

Các đại lượng đặc trưng của chu kỳ ứng suất được xác định như sau:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Trong đó: σ_m là ứng suất trung bình và σ_a là biên độ ứng suất.

Đối với khung máy công nghiệp và máy kéo sợi, ứng suất chu kỳ thường xuất hiện tại các vị trí mối hàn, liên kết dầm – cột và vùng đặt cụm truyền động, là những vị trí nhạy cảm đối với phá hủy mỏi [4].

2.2. Tiêu chuẩn Goodman trong đánh giá bền mỏi

Để đánh giá điều kiện làm việc an toàn của kết cấu chịu tải chu kỳ, tiêu chuẩn Goodman cải tiến thường được sử dụng cho vật liệu thép kết cấu [5], [6]. Điều kiện bền mỏi được biểu diễn dưới dạng:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \leq 1$$

Trong đó:

- σ_{-1} là giới hạn mỏi đối xứng của vật liệu;
- σ_b là giới hạn bền kéo.

Tiêu chuẩn này cho phép đánh giá ảnh hưởng đồng thời của ứng suất trung bình và biên độ ứng suất, phù hợp với điều kiện làm việc thực tế của khung máy kéo sợi chịu tải trọng động và rung động liên tục.

3. MÔ HÌNH VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

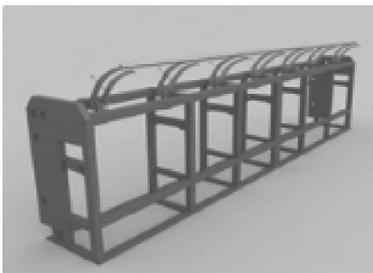
3.1. Mô hình hình học khung máy kéo sợi

Khung máy kéo sợi được thiết kế dạng kết cấu hàn tổ hợp từ các dầm thép hộp và thép hình, đảm bảo độ cứng vững và khả năng chịu tải. Từ khung máy kéo sợi thực tế, mô hình hình học ba chiều của khung máy được xây dựng trên phần mềm SolidWorks, thể hiện đầy đủ các dầm ngang, cột đứng và vị trí lắp đặt cụm trục – động cơ (Hình 1, 2).

Trong quá trình xây dựng mô hình, các chi tiết phụ không ảnh hưởng đáng kể đến độ cứng tổng thể được lược bỏ nhằm giảm thời gian tính toán, trong khi các vùng chịu tải và liên kết chính vẫn được giữ nguyên.



Hình 1. Khung máy kéo sợi thực tế



Hình 2. Mô hình hình học 3D trên SolidWorks

3.2. Vật liệu và điều kiện biên

Vật liệu khung máy được giả thiết là thép kết cấu cacbon thông dụng. Các thông số

vật liệu được lựa chọn phù hợp với tiêu chuẩn thiết kế máy công nghiệp [1].

Điều kiện biên được thiết lập bằng cách cố định chuyển vị tại các vị trí chân đế của khung máy. Tải trọng tác dụng bao gồm trọng lượng bản thân khung, trọng lượng các cụm truyền động và tải trọng động quy đổi từ quá trình làm việc [6].

Bảng 1. Thông số vật liệu khung máy

Thông số	Giá trị
Mô đun đàn hồi E	$2,1 \times 10^5$ MPa
Hệ số Poisson ν	0,3
Giới hạn chảy σ_c	235 MPa
Giới hạn bền σ_b	370 MPa
Giới hạn mỏi σ_m	$0,45\sigma_b$

3.3. Phương pháp phân tích

Mô hình sau khi xây dựng được nhập vào phần mềm ANSYS để tiến hành các dạng phân tích:

- Phân tích tĩnh nhằm xác định ứng suất và biến dạng;
- Phân tích dao động riêng nhằm xác định tần số và dạng dao động;
- Đánh giá bền mỏi dựa trên kết quả ứng suất chu kỳ theo tiêu chuẩn Goodman [7].

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

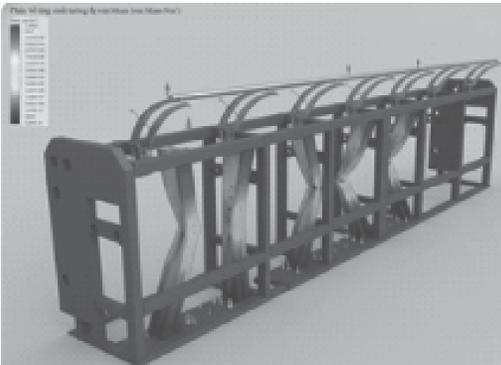
4.1. Phân tích ứng suất và biến dạng

Kết quả phân tích tĩnh cho thấy phân bố ứng suất tương đương von Mises của khung máy tập trung chủ yếu tại các mối hàn góc

và vùng liên kết giữa dầm ngang và cột đứng (Hình 3, 4). Giá trị ứng suất cực đại đạt khoảng 160-180 MPa, chiếm tỷ lệ lớn so với giới hạn chảy của vật liệu.



Hình 3. Mô hình chia lưới phần tử hữu hạn khung máy



Hình 4. Phân bố ứng suất tương đương von Mises của khung máy

Biến dạng tổng thể của khung máy nằm trong giới hạn cho phép, tuy nhiên xuất hiện hiện tượng võng cục bộ tại khu vực đặt động cơ và cụm trục kéo (Hình 3, 4). Đây là nguyên nhân làm gia tăng rung động và giảm độ bền mỏi của kết cấu.

4.2. Phân tích dao động riêng

Phân tích dao động riêng được thực hiện nhằm xác định các tần số dao động riêng và dạng dao động đặc trưng của khung máy

kéo sợi, qua đó đánh giá khả năng làm việc ổn định của kết cấu trong điều kiện chịu kích động động học. Về mặt lý thuyết, dao động riêng của hệ kết cấu đàn hồi tuyến tính được mô tả bởi phương trình chuyển động không cản:

$$M\ddot{u} + Ku = 0$$

Trong đó, M là ma trận khối lượng, K là ma trận độ cứng, và u là véc-tơ chuyển vị. Bài toán dao động riêng được quy về bài toán trị riêng:

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0$$

Với, ω là tần số góc dao động riêng và ϕ là dạng dao động tương ứng.

Kết quả phân tích cho thấy dạng dao động bậc thấp nhất (mode 1) của khung máy có đặc trưng uốn tổng thể theo phương ngang, phản ánh tính chất kết cấu dạng khung không gian với các dầm dài chịu uốn là chủ yếu. Dạng dao động này thường có ảnh hưởng lớn đến hành vi rung động của hệ trong quá trình làm việc do tần số riêng thấp dễ bị kích thích.

Theo lý thuyết dao động cưỡng bức, khi tần số kích thích f_k tiến gần hoặc trùng với tần số dao động riêng $f_n = \omega_n / (2\pi)$, hiện tượng cộng hưởng có thể xảy ra, làm biên độ dao động tăng mạnh. Điều này không chỉ gây rung động lớn mà còn làm gia tăng ứng suất dao động, từ đó đẩy nhanh quá trình phá hủy mỏi của kết cấu [8].

Từ mô hình phần tử hữu hạn của khung máy, kết quả cho thấy tần số dao động riêng bậc 1 nằm trong khoảng 22-25 Hz, xấp xỉ với dải tần số kích thích sinh ra trong quá trình vận hành của máy kéo sợi. Đây là dấu hiệu cho thấy nguy cơ xảy ra cộng hưởng động lực học trong một số chế độ làm việc nhất định.

Phân tích dạng dao động cho thấy biên độ dao động lớn tập trung chủ yếu tại các dầm có chiều dài lớn và khu vực lắp đặt cụm động cơ, là những vị trí có độ cứng tương đối thấp trong kết cấu tổng thể. Các kết quả này là cơ sở quan trọng để đánh giá đặc tính động lực học của khung máy và làm nền tảng cho việc đề xuất các giải pháp nâng cao độ cứng vững nhằm hạn chế rung động trong quá trình làm việc.

4.3. Đánh giá bền mỏi và đề xuất cải tiến

Dựa trên kết quả ứng suất chu kỳ và tiêu chuẩn Goodman, một số vị trí trong khung máy có hệ số an toàn mỏi thấp, đặc biệt tại các mối hàn chịu tải lớn. Trên cơ sở đó, phương án cải tiến kết cấu được đề xuất bằng cách bổ sung gân tăng cứng và tối ưu tiết diện dầm.

Dựa trên phát hiện tần số dao động riêng bậc 1 (22-25Hz) đang nằm quá gần dải tần số kích thích, bạn cần thực hiện các bước sau:

- Bổ sung gân tăng cứng: Tập trung vào các nút liên kết giữa dầm ngang và cột đứng – nơi có ứng suất von Mises tập trung cao nhất (160-180 MPa). Việc này giúp phân tán dòng ứng suất và tăng độ cứng xoắn cho khung.
- Thay đổi tiết diện dầm: Đối với các dầm có chiều dài lớn bị võng cục bộ, nên thay thế thép hộp có độ dày lớn hơn hoặc thêm các thanh giằng chéo để đưa tần số tự nhiên thoát khỏi vùng nguy hiểm (>30 Hz).
- Tối ưu hóa vị trí đặt động cơ: Đây là vùng nhạy cảm về rung động, nên bổ sung các tấm đệm giảm chấn hoặc thiết kế bộ máy riêng biệt để tách biệt nguồn rung động khỏi khung chính.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng mô hình hình học ba chiều của khung máy kéo sợi dạng kết cấu hàn tổ hợp và tiến hành phân tích dao động riêng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả phân tích cho thấy các dạng dao động bậc thấp của khung máy có xu hướng tập trung tại các dầm có chiều dài lớn và khu vực lắp đặt cụm động cơ – trục, là những vị trí có độ cứng tương đối thấp trong kết cấu tổng thể.

Các kết quả thu được phản ánh rõ đặc tính động lực học của khung máy và cho phép đánh giá mức độ ổn định làm việc của kết cấu trong điều kiện vận hành thực tế. Trên cơ sở đó, có thể xác định các vùng nhạy cảm về rung động làm cơ sở khoa học cho việc xem xét, đề xuất các giải pháp tăng cường độ cứng vững và hạn chế rung động, nhằm nâng cao độ ổn định và độ tin cậy của máy kéo sợi trong quá trình làm việc. ❖

Ngày nhận bài: 10/12/2025

Ngày phản biện: 22/12/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Shigley, J.E., Mischke, C.R., Budynas, R.G., “*Mechanical Engineering Design*”. McGraw-Hill, 2015.
- [2]. Norton, R.L., “*Machine Design – An Integrated Approach*”. Pearson, 2019.
- [3]. Rao, S.S., “*The Finite Element Method in Engineering*”. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [4]. Stephens, R.I. et al., “*Metal Fatigue in Engineering*”, Wiley, 2001.
- [5]. Dowling, N.E., “*Mechanical Behavior of Materials*”. Pearson, 2018.
- [6]. Harris, C.M., Piersol, A.G., “*Harris’ Shock and Vibration Handbook*”. McGraw-Hill, 2010.
- [7]. ANSYS Inc., “*ANSYS Mechanical User’s Guide*”, 2022.
- [8]. Ins, D.J., “*Modal Testing: Theory, Practice and Application*”. Research Studies Press, 2000.
- [9]. Babu, K., Kumar, R., “*Structural optimization of industrial machine frames using FEA*”. Journal of Mechanical Engineering, 2018.
- [10]. Zhang, L. et al., “*Fatigue life assessment of welded machine frames*”. Engineering Failure Analysis, 2020.417-430.