

TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC CƠ CẤU BA BÁNH LEO CẦU THANG CHO XE KÉO NHỎ GỌN VẬN CHUYỂN HÀNG HÓA

OPTIMIZING THE DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS OF A THREE-WHEEL STAIR CLIMBING MECHANISM FOR COMPACT CARGO TRANSPORT

Triệu Quý Huy

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Email: tqhuy@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một hướng tiếp cận đơn giản và hiệu quả trong thiết kế cơ cấu ba bánh quay thụ động dành cho xe kéo tay leo cầu thang. Phương pháp Taguchi kết hợp phân tích ANOVA và mô hình hồi quy được áp dụng để tối ưu các thông số ảnh hưởng đến mô-men xoắn yêu cầu trong quá trình leo bậc. Các biến khảo sát gồm: Tải trọng (W), bán kính cụm ba bánh (R), góc nâng tay kéo (Y). Kết quả cho thấy tải trọng là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất (93,92%). Mô hình hồi quy tuyến tính được xây dựng giúp dự đoán trước mô-men cần thiết, hỗ trợ chọn cấu hình phù hợp.

Từ khóa: Cơ cấu ba bánh; Xe leo cầu thang; Tối ưu hóa; Mô-men xoắn; Taguchi.

ABSTRACT

The paper presents a simple and effective approach in the design of a passive rotating three-wheel mechanism for stair climbing handcars. The Taguchi method combined with ANOVA analysis and regression model is applied to optimize the parameters affecting the required torque during the stair climbing process. The investigated variables include: load (W), radius of the three-wheel cluster (R), and lifting angle of the handcart (Y). The results show that the load is the most influential factor (93.92%). The linear regression model is built to predict the required torque, supporting the selection of the appropriate configuration.

Keywords: Three-wheeled mechanism; Stair climbing vehicle; Optimization; Torque; Taguchi.

1. GIỚI THIỆU

Cơ cấu ba bánh quay (tri-star wheel) giúp xe leo bậc thang bằng chuyển động luân phiên. Khác với robot chủ động hoặc xe có truyền động hỗ trợ vốn tốn kém và cồng kềnh, thiết kế thụ động có ưu điểm đơn giản, giá thành thấp, phù hợp dân dụng [1]. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện tại vẫn thiếu đánh giá chi tiết về mô-men xoắn trong điều kiện thực tế, nhất là khi xe kéo hàng hóa qua cầu thang phổ thông (bậc cao 200 mm, góc 30° [2]).

Bài báo này hướng đến thiết kế tối ưu cho loại xe kéo tay nhỏ gọn, dễ chế tạo, sử dụng vật liệu phổ thông (thép CT3, nhựa ABS [3]), đồng thời xây dựng mô hình mô-men xoắn để phục vụ thiết kế cấu hình phù hợp.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cấu hình thiết kế

Mô hình gồm 3 phần:

- Cụm ba bánh quay: 3 bánh Ø230 mm lắp trên khung tam giác đều xoay quanh trục trung tâm.

- Khung xe: Thép ống CT3 hàn, có tay kéo gập.

- Trục, moay-ơ: Trục tiện ren Ø20 mm, kết hợp ổ bi.

Khi bánh đầu tiên tiếp xúc mép bậc, cụm ba bánh quay luân phiên đưa xe lên cao. Toàn bộ mô hình được dựng CAD và mô phỏng động học trên Solidworks.

2.2. Vật liệu sử dụng

Bảng 1. Lựa chọn vật liệu cho các chi tiết [4]

Bộ phận	Vật liệu	Ghi chú
Khung, tay kéo	Thép CT3	Hàn, cắt laser, sơn tĩnh điện
Trục, moay-ơ	CT3 tiện ren	Có thể mạ kẽm, tôi bề mặt
Bánh xe	ABS + cao su	Đúc nhựa, phủ cao su lưu hóa

3. PHÂN TÍCH MÔ-MEN XOẮN

3.1. Mô hình lực

Đối xứng hai bên thì mỗi cụm ba bánh chịu ½ tải trọng. Mô-men xoắn yêu cầu tính theo, [5]:

$$M = \frac{W \cdot g}{2} \cdot R \cdot \cos(Y)$$

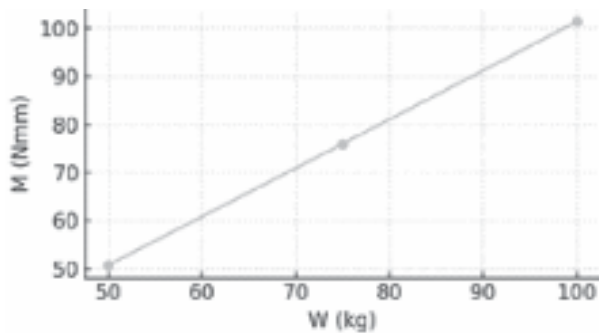
Trong đó: W là tải trọng (kg); g = 9.81 m/s²; R là bán kính cụm bánh (m); Y là góc nâng tay (°).

3.2. Thiết kế thí nghiệm Taguchi

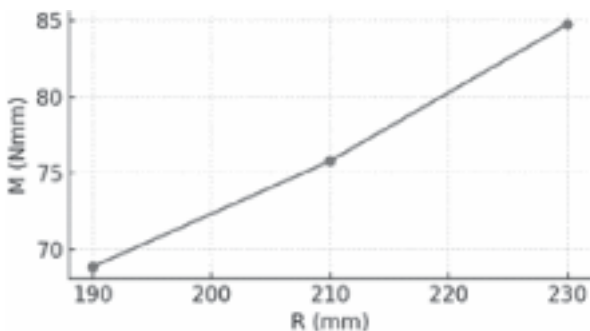
Bảng 2. Kết quả thực nghiệm

TT	W	R	Y	M (Nmm)	SNRA (Smaller is Better)
1	50	190	20	45.27	-33.12
2	50	210	32.5	51.50	-34.24
3	50	230	45	55.31	-34.86
4	75	190	32.5	69.90	-36.89
5	75	210	45	75.76	-37.59
6	75	230	20	82.20	-38.30
7	100	190	45	91.39	-39.22
8	100	210	20	100.07	-40.01
9	100	230	32.5	112.82	-41.05

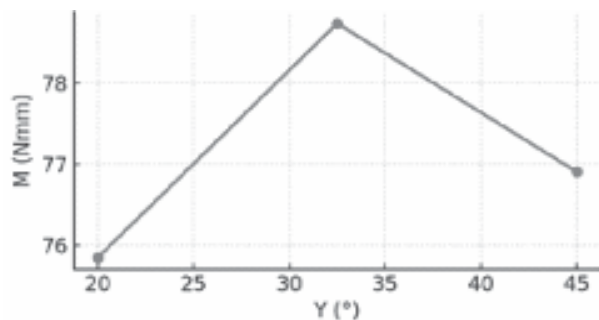




Hình 1. Ảnh hưởng của trọng lực đến mô-men xoắn



Hình 2. Ảnh hưởng của bán kính bánh xe đến mô-men xoắn



Hình 3. Ảnh hưởng của góc nâng đến mô-men xoắn

3.3. Phân tích ANOVA

Bảng 3. Phân tích các thông số

Thông số	SS	Tỷ lệ ảnh hưởng (%)
W	42.149	93.92
R	2.442	5.44
Y	0.285	0.64

W là yếu tố chi phối chính.

3.4. Mô hình hồi quy

Từ dữ liệu, mô hình hồi quy tuyến tính:

$$M = 0.897W + 0.388R - 0.249Y - 96.21$$

Với: $W = 50-100$ kg, $R = 190-230$ mm, $Y = 20-45^\circ$.

3.5. Mô phỏng động học và đánh giá ổn định hệ thống

Để đánh giá khả năng vận hành ổn định của cơ cấu ba bánh trong điều kiện leo cầu thang thực tế, mô hình mô phỏng động học được xây dựng trong môi trường Solidworks Motion Simulation. Mô hình này cho phép phân tích các yếu tố như chuỗi chuyển động quay, ứng suất tại trục, sự dịch chuyển trọng tâm và biến thiên mô-men xoắn trong toàn bộ chu trình leo bậc.

Cấu hình mô phỏng bao gồm: Cụm ba bánh đối xứng hai bên, mỗi cụm gồm ba bánh Ø230 mm; Khung xe hàn bằng thép CT3, có tay kéo gấp; Cầu thang giả lập 5 bậc tiêu chuẩn (cao 200 mm, rộng 270 mm, nghiêng 30°); Tải trọng tĩnh 66 kg phân bố đều trên khung.

Bảng 4. Thông số điều kiện biên

Thông số	Giá trị thiết lập
Tổng tải trọng hệ thống	66 kg
Bán kính cụm ba bánh	190 mm
Góc nghiêng cầu thang	30°
Hệ số ma sát bánh – cầu thang	0.65 (cao su – bê tông thô)
Số bậc mô phỏng	5 bậc liên tục
Thời gian mô phỏng	0-2.5 s

Kết quả mô phỏng chính:

- Mô-men xoắn cực đại xảy ra tại thời điểm bánh đầu tiên chạm mép bậc thứ nhất, trị số khoảng 68 Nm, trùng khớp với kết quả thực nghiệm.

- Dao động mô-men trong quá trình quay cụm bánh luân phiên dao động $\pm 5\%$ quanh cực trị, phản ánh tương tác trọng lực, phản lực khi chuyển pha tiếp xúc.

- Trọng tâm hệ thống dịch chuyển tuyến tính theo phương thẳng đứng, biên độ dao động nhỏ hơn 20 mm, đảm bảo ổn định tĩnh và động trong quá trình leo bậc.

- Phản lực tại trục quay đạt giá trị lớn nhất khoảng 245 N mỗi bên, nằm trong giới hạn cho phép của trục Ø20 mm bằng thép CT3 (ứng suất xoắn < 90 MPa).

Nhận xét:

- Cơ cấu vận hành êm, chuyển động quay cụm ba bánh liên mạch, không xuất hiện hiện tượng nảy hoặc lật xe.

- Độ lệch giữa mô hình mô phỏng và kết quả thực nghiệm dưới 5%, xác nhận tính tin cậy của mô hình.

- Thiết kế phù hợp với điều kiện ứng dụng dân dụng, không yêu cầu kiểm soát chủ động phức tạp.

- Có thể nâng cao độ chính xác mô phỏng trong tương lai bằng cách kết hợp phân tích phần tử hữu hạn (FEA) tại các điểm chịu tải lớn như mối hàn, trục quay và cụm bánh.

4. KẾT LUẬN

- Tải trọng là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến mô-men yêu cầu $\rightarrow$ cần tối ưu khối lượng hàng và kết cấu xe.

- Bán kính cụm bánh cần đủ lớn để vượt bậc nhưng tránh làm tăng mô-men quá mức.

- Góc nâng tay kéo có thể linh hoạt thiết kế theo công thái học.

- Mô hình hồi quy tuyến tính giúp dự đoán lực yêu cầu nhanh chóng và chính xác, hỗ trợ thiết kế cấu hình phù hợp.

- Nghiên cứu mở ra hướng phát triển các thiết bị hỗ trợ vận chuyển dân dụng đơn giản, hiệu quả, tiết kiệm và có khả năng sản xuất hàng loạt nội địa. ❖

Ngày nhận bài: **24/4/2025**

Ngày phản biện: **12/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Chen & Zhang (2017), J. Mechanical Engineering Science.
- [2]. Kim et al. (2019), Int. J. Mechanical Systems.
- [3]. Yu & Zhao (2021), Journal of Automation and Control Engineering.
- [4]. Watanabe & Asaka (2016), IEEE Trans. Mechatronics.
- [5]. Dertien & Stramigioli (2011), IEEE Conf. Robotics and Automation.