

TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ HỘP GIẢM TỐC HAI CẤP ỨNG DỤNG MATLAB OPTIMIZATION TOOLBOX

THE OPTIMIZATION DESIGN OF A TWO STAGE HELICAL GEAR REDUCER USING MATLAB OPTIMIZATION TOOLBOX

Nguyễn Văn Tài

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi

TÓM TẮT

Để đảm bảo tính kinh tế và kỹ thuật của hộp giảm tốc, cần phải điều chỉnh phù hợp các thông số sao cho tối ưu nhất. Trong phạm vi bài báo, các thông số của hộp giảm tốc ban đầu được tính toán theo yêu cầu kỹ thuật cho trước. Sau đó, bằng việc thiết lập một mô hình toán học bao gồm một phương trình tổng quát là khoảng cách giữa các trục với các điều kiện biên và sử dụng công cụ MatLab optimization toolbox để phân tích xác định kết quả tối ưu của các thông số bánh răng và tổng khoảng cách trục là nhỏ nhất. Kết quả cho thấy, việc tối ưu hóa thiết kế cho phép chế tạo hộp giảm tốc tối ưu hơn cả về mặt kinh tế và kỹ thuật.

Từ khóa: Bánh răng; Hộp giảm tốc; MatLab optimization toolbox; Tối ưu hóa; Điều kiện biên.

ABSTRACT

To ensure the economic and technical parameters of gearboxes, We need to use the parameters that are the most optimal. In this article, the initial parameters of a gearbox are calculated according to the given requirements. Then by establishing a mathematical model including a general equation - the distance between the axes with the boundary conditions and using MatLab optimization toolbox, we receive the optimal results of the parameters and the minimum center distance. The results show that the optimization gives us a more optimal gearbox in terms of both economic and technical concerns.

Keywords: Gears, Gearboxes, MatLab optimization toolbox, Optimization, Constraint Conditions.

1. GIÓI THIỆU

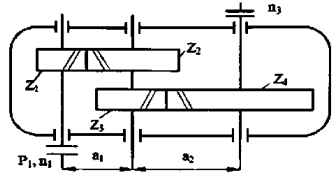
Hộp giảm tốc đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp hiện đại. Với lợi thế truyền tải lớn, hiệu suất cao, kết cấu đơn giản hộp giảm tốc được sử dụng rất rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp như: Chế tạo máy bay, ô tô, máy công cụ vv...

Với phương pháp tính toán, thiết kế thông thường cho ra kết quả có nhiều hạn chế cả về mặt kinh tế lẫn kỹ thuật như thể tích, khối lượng lớn, lãng phí vật liệu, chi phí chế tạo cao vv... Chính vì vậy, việc tối ưu hóa thiết kế để tìm ra các thông số tối ưu nhất nhằm giảm chi phí sản xuất, tăng tính kỹ thuật càng trở nên quan trọng.

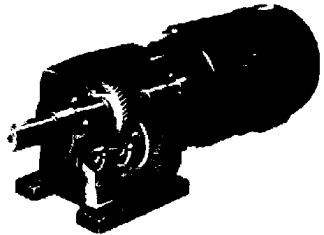
Trong bài báo này, dựa vào phương pháp tối ưu hóa trong đó sử dụng mô hình toán học và các điều kiện biên được trình bày trong [3]. Đầu tiên theo dữ liệu đầu vào tính toán các thông số của các cặp bánh răng theo [1] và [2] đồng thời xây dựng mô hình toán học, bao gồm phương trình tổng khoảng cách trục với các điều kiện biên. Sau đó sử dụng Optimization toolbox [4] nhập phương trình toán học và các điều kiện. Kết quả cuối cùng được so sánh với kết quả ban đầu.

2. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hộp giảm tốc hai cấp (hình 1) với các thông số làm việc của bộ giảm tốc này được cho như sau: Công suất đầu vào $P_1 = 10\text{K.W}$, tốc độ quay trục I (đầu vào) $n_1 = 2250$ vòng/phút, tốc độ quay trục III (đầu ra) $n_3 = 187.5$ vòng/phút và tổng tỷ số truyền $u_\Sigma = 12$. Vật liệu cặp bánh răng 1-2 là 40X, cặp bánh răng 3-4 là C45. Mục đích thiết kế - hộp số có thể tích nhỏ nhất mà vẫn đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật.



Hình 1. Sơ đồ động học hộp giảm tốc hai cấp



Hình 2 Hộp giảm tốc hai cấp

Hình 1, cho thấy các vị trí làm việc của các bánh răng 1, 2, 3, 4 và các khoảng cách trục a_1, a_2 .

Thiết kế ban đầu:

- Từ các thông số đầu vào ta tính toán được các thông số hình học và được thể hiện trong bảng 1. [1-2].

Bảng 1: Các thông số hình học của bánh răng

Bánh răng 1	z_1	z_2	m_1	$\beta_1(^{\circ})$	b_{w1}	a_1 (mm)
Giá trị	26	130	3	12.8385	80	240
Bánh răng 2	z_3	z_4	m_2	$\beta_2(^{\circ})$	b_{w2}	a_2 (mm)
Giá trị	32	78	4.5	13.93	120	255

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC

3.1. Xây dựng hàm mục tiêu

Mục tiêu tối ưu hóa có thể là thể tích, tổng khối lượng hoặc tổng khoảng cách các trục là nhỏ nhất [5].

Việc tính toán, xây dựng hàm mục tiêu theo khoảng cách các trục bánh răng trong hộp giảm tốc thì:

Các hệ số chiều rộng vành răng được coi là hằng số theo nhu cầu thiết kế, các số răng là các biến số nguyên trong khi mô-đun là các biến rời rạc... Để giải quyết vấn đề tối ưu theo phương pháp lập trình phi tuyến tổng quát, cả số răng và các mô-đun được coi là biến liên tục.

- Vì vậy, dựa trên các vấn đề trên, thiết kế biến được định nghĩa như sau: z_1 - Số răng bánh răng 1 ở cấp tốc độ cao, mô-đun m_1 , β_1 góc xoắn, tỷ số truyền u ; z_3 - Số răng bánh răng 3 cấp tốc độ thấp, mô-đun m_2 và góc xoắn β_2 . Bảy biến thiết kế được hiển thị trong (1).

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T = [z_1, m_1, \beta_1, u, z_3, m_2, \beta_2]^T \quad (1)$$

Hàm mục tiêu được thành lập như sau:

$$f(x) = a_1 + a_2 = x_1 x_2 \frac{x_4 + 1}{2 \cos(x_3)} + x_5 x_6 \frac{x_4}{2 \cos(x_7)} \quad (2)$$

Trong đó: u_2 là tổng tỷ số truyền.

3.2. Các điều kiện biên

Các điều kiện biên bao gồm [1-5]: Điều kiện về giới hạn bền tiếp xúc ($3, 3'$), giới hạn bền uốn ($4, 4'$), điều kiện về kích thước (5), điều kiện bôi trơn (6-8), các hạn chế số răng của bánh răng (9-12), mô-đun của các bánh răng (13-16), điều kiện về góc nghiêng (17-20).

$$\sigma_{H_1} = 162663,22 \frac{\cos x_3}{x_1 x_3} \sqrt{1 + \frac{1}{x_4}} - 1200 \leq 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{H_2} = 31903,43 \frac{\cos x_7}{x_5 x_6} \sqrt{1 + \frac{x_4}{12}} - 1200 \leq 0 \quad (3')$$

$$\sigma_F = 4621,10 \left(\frac{\cos x_3}{x_1 x_2^2} \right) - 600 \leq 0 \quad (4)$$

$$\sigma_{F_2} = 7920,52 \left(\frac{\cos x_7}{x_5 x_6^2} \right) - 600 \leq 0 \quad (4')$$

$$g_3(X) = \frac{x_2(x_1 x_4 + 2ha^*)}{2 \cos(x_3)} - x_5 x_6 \frac{x_4}{2 \cos(x_7)} + S_1 \leq 0 \quad (5)$$

-Trong đó:
 + S_1 là khoảng cách giữa vành ngoài bánh răng 2 và đường kính trục đầu ra III.
 + ha^* là hệ số chiều cao đầu răng.

$$u_1 = (1.2 \sim 1.4) u_2 \quad (6)$$

$$g_4(X) = 1.2 u_{\Sigma} - x_4^2 \leq 0 \quad (7)$$

$$g_5(X) = x_4^2 - 1.4u_{\Sigma} \leq 0 \quad (8)$$

$$g_6(X) = x_1 - 40 \leq 0 \quad (9)$$

$$g_7(X) = 24 - x_1 \leq 0 \quad (10)$$

$$g_8(X) = x_5 - 40 \leq 0 \quad (11)$$

$$g_9(X) = 30 - x_5 \leq 0 \quad (12)$$

$$g_{10}(X) = 2,5 - x_2 \leq 0 \quad (13)$$

$$g_{11}(X) = x_2 - 3 \leq 0 \quad (14)$$

$$g_{12}(X) = 2,5 - x_6 \leq 0 \quad (15)$$

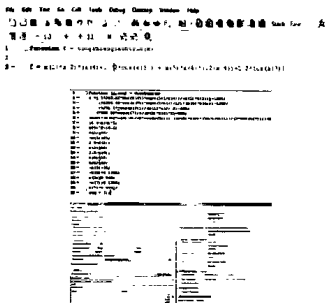
$$g_{13}(X) = x_6 - 3 \leq 0 \quad (16)$$

$$g_{14}(X) = \frac{8\pi}{180} - x_3 \leq 0 \quad (17)$$

4. ỨNG DỤNG MATLAB OPTIMIZATION TOOLBOX

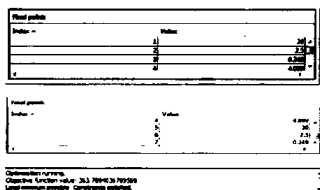
Optimization Toolbox là thanh công cụ tính toán tìm tối ưu trong MatLab.

- Nhập hàm số và các điều kiện biên (hình 3):



Hình 3. Nhập hàm số và các điều kiện biên

- Kết quả nhận được sau khi tính toán bằng Optimization Toolbox (hình 4):



Hình 4. Kết quả nhận được sau khi tính toán bằng Optimization Toolbox

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Từ các kết quả trên ta thấy các thông số đã được tối ưu và được thể hiện trong bảng 2:

Bảng 2: Kết quả trước và sau tối ưu

Tên biến	x_1 (z_1)	x_2 (m_1)	x_3 (β_1) rad	x_4 (u_1)	x_5 (z_2)	x_6 (m_2)	x_7 (β_2) rad	f(X) (Σa) (mm)
Trước tối ưu	26	3	0,224	5	32	4,5	0,243	495
Sau tối ưu	24	2,5	0,349	4	30	2,5	0,349	363,789

Bảng 1: Các thông số hình học của bánh răng

Bánh răng 1	z_1	z_2	m_1	$\beta_1(^{\circ})$	b_{w1}	a_1 (mm)
Giá trị	26	130	3	12.8385	80	240
Bánh răng 2	z_3	z_4	m_2	$\beta_2(^{\circ})$	b_{w2}	a_2 (mm)
Giá trị	32	78	4.5	13.93	120	255

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC

3.1. Xây dựng hàm mục tiêu

Mục tiêu tối ưu hóa có thể là thể tích, tổng khối lượng hoặc tổng khoảng cách các trục là nhỏ nhất [5].

Việc tính toán, xây dựng hàm mục tiêu theo khoảng cách các trục bánh răng trong hộp giảm tốc thì:

Các hệ số chiều rộng vành răng được coi là hằng số theo nhu cầu thiết kế, các số răng là các biến số nguyên trong khi đó mô-đun là các biến rời rạc... Để giải quyết vấn đề tối ưu theo phương pháp lập trình phi tuyến tổng quát, cả số răng và các mô-đun được coi là biến liên tục.

- Vì vậy, dựa trên các vấn đề trên, thiết kế biến được định nghĩa như sau: z_1 - Số răng bánh răng 1 ở cấp tốc độ cao, mô-đun m_1 , β_1 góc xoắn, tỷ số truyền u_1 ; z_3 - Số răng bánh răng 3 cấp tốc độ thấp, mô-đun m_2 và góc xoắn β_2 . Bày biến thiết kế được hiển thị trong (1).

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T = [z_1, m_1, \beta_1, u_1, z_3, m_2, \beta_2]^T \quad (1)$$

Hàm mục tiêu được thành lập như sau:

$$f(x) = a_1 + a_2 = x_1 x_2 \frac{x_4 + 1}{2 \cos(x_3)} + x_3 x_6 \frac{x_4}{2 \cos(x_7)} \quad (2)$$

Trong đó: u_2 là tổng tỷ số truyền.

3.2. Các điều kiện biên

Các điều kiện biên bao gồm [1-5]: Điều kiện về giới hạn bên tiếp xúc (3, 3'), giới hạn bên uốn (4, 4'), điều kiện về kích thước (5), điều kiện bôi trơn (6-8), các hạn chế số răng của bánh răng (9-12), mô-đun của các bánh răng (13-16), điều kiện về góc nghiêng (17-20).

$$\sigma_{H_1} = 162663,22 \frac{\cos x_3}{x_1 x_3} \sqrt{1 + \frac{1}{x_4}} - 1200 \leq 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{H_2} = 31903,43 \frac{\cos x_7}{x_5 x_6} \sqrt{1 + \frac{x_4}{12}} - 1200 \leq 0 \quad (3')$$

$$\sigma_{F_1} = 4621,10 \left(\frac{\cos x_3}{x_1 x_2^2} \right) - 600 \leq 0 \quad (4)$$

$$\sigma_{F_2} = 7920,52 \left(\frac{\cos x_7}{x_5 x_6^2} \right) - 600 \leq 0 \quad (4')$$

$$g_3(X) = \frac{x_2 (x_1 x_4 + 2ha^*)}{2 \cos(x_3)} - x_3 x_6 \frac{x_4}{2 \cos(x_7)} + S_1 \leq 0 \quad (5)$$

-Trong đó:
 + S_1 là khoảng cách giữa vành ngoài bánh răng 2 và đường kính trục đầu ra III.
 + ha^* là hệ số chiều cao đầu răng.

$$u_1 = (1.2 \sim 1.4) u_2 \quad (6)$$

$$g_4(X) = 1.2 u_{\Sigma} - x_4^2 \leq 0 \quad (7)$$

$$g_5(X) = x_2^2 - 1.4x_2 \leq 0 \quad (8)$$

$$g_6(X) = x_1 - 40 \leq 0 \quad (9)$$

$$g_7(X) = 24 - x_1 \leq 0 \quad (10)$$

$$g_8(X) = x_5 - 40 \leq 0 \quad (11)$$

$$g_9(X) = 30 - x_5 \leq 0 \quad (12)$$

$$g_{10}(X) = 2,5 - x_2 \leq 0 \quad (13)$$

$$g_{11}(X) = x_2 - 3 \leq 0 \quad (14)$$

$$g_{12}(X) = 2,5 - x_6 \leq 0 \quad (15)$$

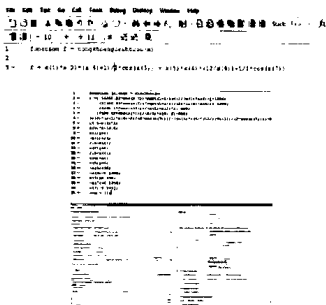
$$g_{13}(X) = x_6 - 3 \leq 0 \quad (16)$$

$$g_{14}(X) = \frac{8\pi}{180} - x_3 \leq 0 \quad (17)$$

4. ỨNG DỤNG MATLAB OPTIMIZATION TOOLBOX

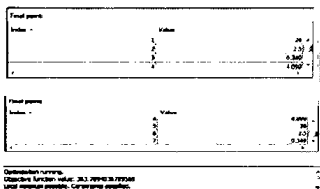
Optimization Toolbox là thành công cụ tính toán tìm tối ưu trong MatLab.

- Nhập hàm số và các điều kiện biên (hình 3):



Hình 3. Nhập hàm số và các điều kiện biên

- Kết quả nhận được sau khi tính toán bằng Optimization Toolbox (hình 4):



Hình 4. Kết quả nhận được sau khi tính toán bằng Optimization Toolbox

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Từ các kết quả trên ta thấy các thông số đã được tối ưu và được thể hiện trong bảng 2:

Bảng 2: Kết quả trước và sau tối ưu

Tên biến	x_1 (z_1)	x_2 (m_1)	x_3 (β_1) rad	x_4 (u_1)	x_5 (z_1)	x_6 (m_2)	x_7 (β_1) rad	f(X) ($\sum a$) (mm)
Trước tối ưu	26	3	0,224	5	32	4,5	0,243	495
Sau tối ưu	24	2,5	0,349	4	30	2,5	0,349	363,789

- Khoảng cách trục ban đầu tính theo thiết kế.
cách thông thường:

$$\sum a = a_1 + a_2 = 240 + 255 = 495(mm)$$

- Khoảng cách trục sau khi dùng MatLab tối ưu:

$$\sum a_n = f(X) = 363,789(mm)$$

• Phần trăm khoảng cách trục giảm được:

$$\%a_{\text{giảm}} = \frac{\sum a - \sum a_n}{\sum a} = \frac{495 - 363,789}{495} = 26,5\%$$

- Từ kết quả tối ưu cho ta thấy, khoảng cách trục giảm đi một lượng khá lớn 26,5% mà vẫn đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật trong quá trình

thiết kế.

- Khoảng cách trục giảm cho thấy kích thước của hộp giảm tốc gọn nhẹ hơn do đó tối ưu được các kích thước của hộp giảm tốc, hiệu quả kinh tế cao.

6. KẾT LUẬN

Kết quả cho thấy, việc tối ưu hóa rất hiệu quả và cần áp dụng vào thực tế trong quá trình thiết kế để giảm chi phí gia công chế tạo, nâng cao hiệu quả kinh tế, tiết kiệm được diện tích bố trí hộp giảm tốc.

Phương pháp trên có thể được áp dụng vào tối ưu hóa thiết kế cho hộp giảm tốc 1 cấp, 2 cấp, 3 cấp vv... ❖

Ngày nhận bài: 12/01/2016

Ngày phản biện: 12/02/2016

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Trọng Hiệp; *Chi tiết máy*, tập 1+2, NXB. Giáo dục, 05/2006.
- [2]. PGS, TS. Trịnh Chất, TS. Lê Văn Uyển; *Tính toán hệ dẫn động cơ khí*, tập 1+2, tái bản lần thứ 6, số xuất bản: 248-2056, mã số: 7B020T6-TSS, 2006.
- [3]. Singiresu S. Rao "Engineering Optimization Theory and Practice" 4th Edition, published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey - 2009.
- [4]. Optimization toolbox User's Guide by MathWorks, Inc.
- [5]. Xuanyi Li, Shoubo Jiang and Qingliang Zeng, "Optimization of two-stage cylindrical gear reducer with adaptive boundary constraints", Journal of software, vol.8, No.8, August 2013.