

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**



**CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU KHOA HỌC CẤP TRƯỜNG**

**PHÁT TRIỂN, THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU HÓA  
KHỚP XOAY CHO THIẾT BỊ HỖ TRỢ VẬN ĐỘNG  
CHI TRÊN SỬ DỤNG CƠ CẤU MỀM**

**MÃ SỐ: T2019 – 02NCS**



**Tp. Hồ Chí Minh, tháng 03/2020**

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT  
ĐỀ TÀI KH&CN CẤP TRƯỜNG TRỌNG ĐIỂM**

**PHÁT TRIỂN, THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU HÓA  
KHỚP XOAY CHO THIẾT BỊ HỖ TRỢ VẬN  
ĐỘNG CHI TRÊN SỬ DỤNG CƠ CẤU MỀM**

**Mã số: T2019 – 02NCS**

**Chủ nhiệm đề tài: NCS Châu Ngọc Lê**

**TP. HCM, 3/2020**

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT  
ĐỀ TÀI KH&CN CẤP TRƯỜNG TRỌNG ĐIỂM**

**PHÁT TRIỂN, THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU HÓA  
KHỚP XOAY CHO THIẾT BỊ HỖ TRỢ VẬN  
ĐỘNG CHI TRÊN SỬ DỤNG CƠ CẤU MỀM**

**Mã số: T2019 – 02NCS**

**Chủ nhiệm đề tài: NCS CHÂU NGỌC LÊ**

**Thành viên đề tài: PGS.TS LÊ HIẾU GIANG**

**TS. ĐÀO THANH PHONG**

**TP. HCM, 03/2020**

**DANH SÁCH NHỮNG THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU ĐỀ TÀI VÀ  
ĐƠN VỊ PHỐI HỢP CHÍNH**

| <b>STT</b> | <b>Họ và tên</b>        | <b>Đơn vị công tác và<br/>lĩnh vực chuyên môn</b>                                  | <b>Nội dung<br/>nghiên cứu cụ<br/>thể được giao</b> | <b>Chữ<br/>ký</b> |
|------------|-------------------------|--|---|-------------------|
| 1          | NCS Châu Ngọc<br>Lê     | NCS, Khoa Cơ Khí Chế Tạo Máy,<br>Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành<br>phố Hồ Chí Minh | Chủ nhiệm đề<br>tài                                 |                   |
| 2          | PGS.TS Lê Hiếu<br>Giang | Khoa Cơ Khí Chế Tạo Máy, Đại<br>học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố<br>Hồ Chí Minh      | Thành viên  |                   |
| 3          | TS. Đào Thanh<br>Phong  | Viện Khoa Học Tính Toán,<br>Trường Đại Học Tôn Đức Thắng                           | Thành viên  |                   |

## MỤC LỤC

|   |            |
|---|------------|
| <b>DANH SÁCH NHỮNG THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU ĐỀ TÀI VÀ ĐƠN VỊ PHỐI HỢP CHÍNH .....</b> | <b>i</b>   |
| <b>MỤC LỤC.....</b>   | <b>ii</b>  |
| <b>MỤC LỤC HÌNH ẢNH .....</b>   | <b>iii</b> |
| <b>MỤC LỤC BẢNG .....</b>   | <b>iv</b>  |
| <b>TÓM TẮT .....</b>  | <b>1</b>   |
| <b>Chương 1 TỔNG QUAN .....</b>   | <b>3</b>   |
| 1.1 Đặt vấn đề .....  | 3          |
| 1.2 Các nghiên cứu liên quan .....  | 5          |
| 1.3 Đối tượng và mục đích nghiên cứu .....  | 6          |
| <b>Chương 2 PHÁT TRIỂN KHỚP XOAY MỀM.....</b>   | <b>7</b>   |
| 2.1 Yêu cầu thiết kế .....  | 7          |
| 2.2 Thiết kế khớp xoay mềm .....  | 7          |
| 2.3 Bài toán tối ưu .....   | 8          |
| 2.4 Đề xuất giải thuật tối ưu .....   | 10         |
| 2.5 Đánh giá độ nhạy của biến thiết kế.....   | 16         |
| 2.6 Kết quả tối ưu và phân tích thống kê.....   | 22         |
| 2.7 Đánh giá kết quả tối ưu.....  | 27         |
| <b>Chương 3 KẾT LUẬN KIẾN NGHỊ.....</b>   | <b>28</b>  |
| 3.1 Kết luận.....   | 28         |
| 3.2 Kiến nghị .....   | 29         |
| <b>SẢN PHẨM CỦA ĐỀ TÀI .....</b>  | <b>30</b>  |
| <b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>   | <b>31</b>  |

## MỤC LỤC HÌNH ẢNH

| Hình .....     | Trang |
|----------------|-------|
| Hình 1.1 ..... | 4     |
| Hình 1.2.....  | 5     |
| Hình 1.3.....  | 5     |
| Hình 1.4.....  | 6     |
| Hình 1.5.....  | 6     |
| Hình 2.1.....  | 8     |
| Hình 2.2.....  | 15    |
| Hình 2.3.....  | 17    |
| Hình 2.4.....  | 17    |
| Hình 2.5.....  | 18    |
| Hình 2.6.....  | 27    |

## MỤC LỤC BẢNG

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Bảng .....      | Trang |
| Bảng 2.1 .....  | 7     |
| Bảng 2.2 .....  | 16    |
| Bảng 2.3 .....  | 17    |
| Bảng 2.4 .....  | 19    |
| Bảng 2.5 .....  | 19    |
| Bảng 2.6 .....  | 20    |
| Bảng 2.7 .....  | 21    |
| Bảng 2.8 .....  | 22    |
| Bảng 2.9 .....  | 22    |
| Bảng 2.10 ..... | 23    |
| Bảng 2.11 ..... | 24    |
| Bảng 2.12 ..... | 24    |
| Bảng 2.13 ..... | 25    |
| Bảng 2.14 ..... | 25    |
| Bảng 2.15 ..... | 26    |
| Bảng 2.16 ..... | 26    |
| Bảng 2.17 ..... | 27    |

## TÓM TẮT

Khớp xoay là thành phần không thể thiếu trong tất cả các thiết bị, đặc biệt trong thiết bị hỗ trợ vận động chi trên. Trước đây khớp xoay một bậc tự do thường sử dụng khớp bản lề. tuy nhiên loại khớp truyền thống này có một số nhược điểm như: ma sát, bị mài mòn, phải bôi trơn khi làm việc, chuyển động thiếu chính xác do tồn tại khe hở. Để khắc phục vấn đề này, ngày nay người ta sử dụng khớp xoay mềm. Tuy nhiên đây lại là một lĩnh vực cơ khí phi truyền thống, việc phân tích, tổng hợp loại khớp này vẫn còn nhiều khó khăn. Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp kết hợp giữa phương pháp Taguchi, phương pháp phân tích phần tử hữu hạn, phương pháp đáp ứng bề mặt và thuật toán tối ưu hóa bày đàn để phân tích, tối ưu hóa một cách hữu ích cho khớp xoay mềm sử dụng cho thiết bị hỗ trợ vận động. Đầu tiên, phương pháp Taguchi được sử dụng để xây dựng thực nghiệm số, mục đích của phương pháp là giảm thiểu số thực nghiệm cần thiết. Tiếp theo các mô hình 3D của khớp xoay được để phân tích phần tử hữu hạn. Sau đó, mô hình toán học biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số của khớp xoay với các đặc tính của khớp xoay được xây dựng dựa trên phương pháp đáp ứng bề mặt. Đồng thời, trọng số của các hàm đáp ứng của khớp xoay được tính toán dựa trên độ nhạy của các thông số đến các đặc tính của khớp xoay. Sau đó thuật toán bày đàn được sử dụng để tối ưu hóa các thông số của khớp xoay mềm. Hành vi của thuật toán tối ưu bày đàn được so sánh với các thuật toán Cuckoo và thuật toán tiến hóa vi phân bằng phương pháp thống kê phi tham số Willcoxon và Friedman. Kết quả trọng số của các đáp ứng được tính toán với kết quả như sau: Trọng số của khối lượng là 0.4983 và trọng số của góc xoay là 0.5017. Kết quả tối ưu đã xác định được thông số của khớp xoay mềm có đường kính  $D$  là 56 mm, chiều dày  $t$  là 0.841 mm. Các đặc tính của khớp xoay mềm là: khối lượng đạt 0.0368 gram và góc xoay làm việc là 59.193 độ và ứng suất sinh ra khi làm việc là 335 MPa. Với kết quả tối ưu đạt được, một mô hình 3D được xây dựng để kiểm tra độ chính xác của phương pháp đề xuất. Kết quả cho thấy



sai số của khối lượng, ứng suất và góc xoay lần lượt là 0.2725%, 0.6567% và 2.5625%.  
Với kết quả này cho thấy phương pháp kết hợp đề xuất đảm bảo độ tin cậy. Phương pháp này có thể được ứng dụng để phát triển các khớp xoay mềm sau này.

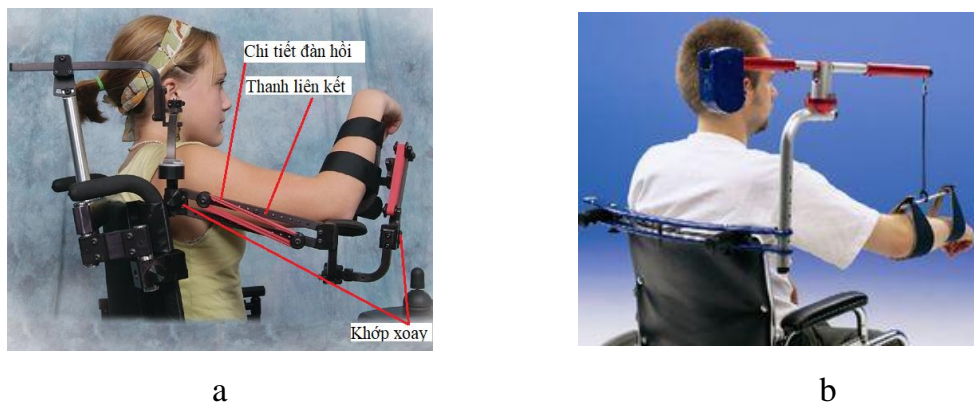
## Chương 1 TỔNG QUAN

### 1.1 Đặt vấn đề

Hàng năm trên thế giới có hàng triệu người bị đột quỵ với độ tuổi ngày càng trẻ và có khoảng 50% trong số đó bị chết, số sống sót còn lại thường bị hạn chế một số khả năng vận động. Trong đó, hạn chế khả năng vận động chi trên là một dạng khá phổ biến. Những người bị hạn chế khả năng vận động chi trên phải phụ thuộc rất nhiều vào người chăm sóc trong các sinh hoạt thường ngày. Sự phụ thuộc này tạo ra gánh nặng cho gia đình của họ và xã hội [1-3]. Để giảm thiểu sự phụ thuộc vào người chăm sóc, các bệnh nhân thường phải sử dụng các thiết bị hỗ trợ vận động chi trên [4, 5].

Hiện nay, thiết bị hỗ trợ chi trên được chia làm hai loại: 1) Thiết bị chủ động và 2) thiết bị bị động. Thiết bị hỗ trợ vận động chi trên chủ động có nhiều tiện lợi cho người sử dụng, tuy nhiên nó cũng tồn tại nhiều nhược điểm đó là: Cần nguồn năng lượng, mà nguồn năng lượng này cần phải ưu tiên cho các chức năng khác, tạo tiếng ồn, điều khiển phức tạp, giá thành cao. Thiết bị bị động dù có nhược điểm là khả năng đáp ứng với hoạt động của bệnh nhân thấp nhưng kết cấu đơn giản, giá thành rẻ vì vậy thiết bị hỗ trợ vận động chi trên bị động vẫn được sử dụng phổ biến. Hiện nay, thiết bị hỗ trợ vận động chi trên bị động có nhiều loại khác nhau nhưng nhìn chung đều có cấu tạo tương đối giống nhau. Các thiết bị này gồm các khâu được liên kết với nhau thông qua các khớp bản lề. Trong đó khớp bản lề có nhiệm vụ thực hiện chuyển động xoay, tạo ra không gian hoạt động cho chi trên. Bên cạnh đó, thiết bị còn sử dụng các chi tiết đàn hồi hoặc đối trọng để đảm bảo cân bằng với trọng lượng của chi trên như hình 1.1. Đối với những thiết bị sử dụng đối trọng để cân bằng trọng lực, trong quá trình chuyển động khối lượng của đối trọng sẽ phát sinh lực quán tính, lực quán tính này có thể gây nguy hiểm cho bệnh nhân. Bên cạnh đó, khi bệnh nhân cần di chuyển các vật có khối lượng khác nhau, để đảm bảo điều kiện cân bằng thì khối lượng của đối trọng hoặc chiều dài cánh tay đòn phải được thay đổi. Điều này gây khó khăn cho người bệnh vì bệnh nhân bị hạn chế khả

năng vận động thường có phạm vi hoạt động của chi trên không lớn, lực cơ bắp cũng không đủ để thay đổi khối lượng của đối trọng. Trong trường hợp thiết bị sử dụng chi tiết đàn hồi (sợi thun hay lò xo truyền thống). Lực quán tính sẽ được loại bỏ trong quá trình chuyển động nhưng khi khối lượng vật nâng thay đổi, để duy trì điều kiện cân bằng thì sợi thun hoặc độ cứng của lò xo phải được thay đổi. Đây cũng là một thách thức lớn cho bệnh nhân vì phạm vi hoạt động của chi trên và sức mạnh cơ bắp của bệnh nhân không đủ. Ngoài ra, những cơ cấu sử dụng nguyên lý cân bằng trọng lực ở trên thường có phạm vi cân bằng không lớn. Để khắc phục những khó khăn ở trên, nghiên cứu sinh chọn đề tài “Phát triển và tối ưu hóa cơ cấu cân bằng trọng lực sử dụng cơ cấu mềm cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên”. Cơ cấu cân bằng phát triển là sự kết hợp giữa một khớp xoay mềm và một lò xo phẳng mềm, sự kết hợp này cho phép tạo ra một phạm vi cân bằng lớn và điều chỉnh độ cứng của lò xo một cách dễ dàng.



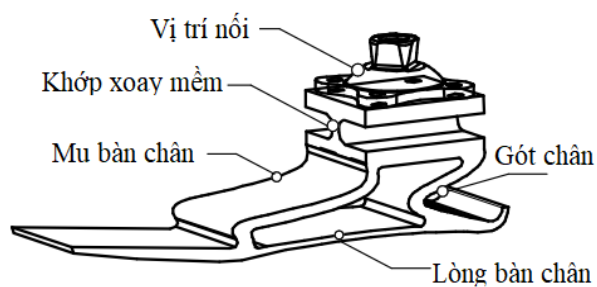
**Hình 1.1:** Thiết bị hỗ trợ chi trên a) JAECO Wrex Supports, b) Mobility Arm

Khớp xoay mềm trong cơ cấu cân bằng trọng lực được phát triển có các nhiệm vụ sau: 1) Thực hiện hiện chuyển động xoay, 2) tích trữ thế năng để cân bằng với thế năng của khối lượng, 3) hấp thu chấn động giúp an toàn cho bệnh nhân. Tuy nhiên, khớp xoay mềm làm việc theo nguyên lý biến dạng đàn hồi nên khi cần xoay một góc lớn thì biến dạng đàn hồi sinh ra sẽ lớn, khi đó ứng suất sinh ra lớn, điều này có thể dẫn đến khớp không đảm bảo độ bền [6]. Thêm vào đó, những thiết bị hỗ trợ vận động mà bệnh nhân có thể đeo, mặc trên cơ thể, ngoài yêu cầu phải có không gian làm việc lớn thì chúng

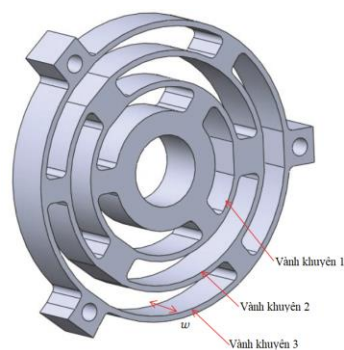
còn phải nhẹ và nhỏ gọn. Vì vậy, khớp xoay mềm sử dụng trong thiết bị này phải có: a) góc xoay lớn, b) nhẹ, nhỏ gọn và c) đảm bảo độ bền khi làm việc. Để đáp ứng được những yêu cầu trên thì việc phát triển và tối ưu hóa khớp xoay mềm là điều cần thiết.

## 1.2 Các nghiên cứu liên quan

Hiện nay, nghiên cứu ứng dụng cơ cấu mềm cho thiết bị hỗ trợ vận động cho con người đang nhận được sự quan tâm của rất nhiều nhà khoa học trong nước và quốc tế, ví dụ như nhóm nghiên cứu của H-T. Pham đã nghiên cứu ứng dụng khớp đàn hồi như hình 1.2 cho chân giả [7], nhóm của T-P. Dao đã ứng dụng khớp xoay mềm cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên như hình 1.3 [8], ứng dụng khớp biến dạng đàn hồi cho khớp mắt cá chân [9], Ezekiel G. Merriam và các cộng sự đã phát triển khớp xoay mềm như hình 1.4. Khớp xoay này có đặc tính góc xoay lớn, độ cứng thấp và sai lệch tâm quay nhỏ [10], C. Tatsch và các cộng sự đã phát triển khớp xoay mềm cho robot hình người như hình 1.5 [11]. Loại khớp này có giá thành chế tạo rẻ, đảm bảo an toàn cho tương tác giữa người và robot. Rahim Mutlu và các đồng sự đã thiết kế khớp xoay mềm cho ngón tay giả [12], Dongwoo Kanga và Daegab Gweon đã nghiên cứu khớp mềm cartwheel 6 bậc tự do [13]. B. T. Knox và J. P. Schmiedeler đã thiết kế khớp xoay mềm cho robot KURMET [14].v.v.



**Hình 1.2:** Khớp xoay mềm sử dụng cho chân giả



**Hình 1.3:** Khớp xoay mềm sử dụng cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên



**Hình 1.4:** Khớp xoay mềm của Ezekie    **Hình 1.5:** Khớp xoay cho robot hình người

### **1.3 Đối tượng và mục đích nghiên cứu**

#### **1.3.1. Đối tượng nghiên cứu**

Đối tượng nghiên cứu của đề tài là khớp xoay sử dụng các lò xo lá, đầu tiên khớp mềm được thiết kế, kế tiếp dựa trên ứng dụng của khớp xoay sử dụng cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên, tác giả sẽ phân tích các đặc tính của khớp xoay, hàm mục tiêu được xây dựng, kế đến giải thuật tối ưu được phát triển để tối ưu thông số hình học của khớp xoay, cuối cùng kết quả tối ưu được sử dụng để xây dựng mô hình 3D để thực FEA và kiểm chứng với kết quả tối ưu.

#### **1.3.2. Phạm vi nghiên cứu**

Thiết kế khớp xoay ứng dụng cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên, phân tích đặc tính của khớp xoay, tối ưu ưu hóa thông số hình học của khớp.

## Chương 2 PHÁT TRIỂN KHỚP XOAY MỀM

### 2.1 Yêu cầu thiết kế

Cơ cấu cân bằng trọng lực phát triển là sự kết hợp giữa khớp xoay mềm và lò xo phẳng mềm. Trong quá trình làm việc, tổng mô men biến dạng của khớp xoay mềm và lò xo phẳng mềm tạo ra phải bằng với tổng mô men do khối lượng của cẳng tay, khối lượng vật cần di chuyển và khối lượng của khâu liên kết sinh ra. Để thỏa mãn điều kiện làm việc của cơ cấu cân bằng trọng lực thì khớp xoay mềm được phát triển phải thỏa mãn các điều kiện làm việc sau:

Mô men tác dụng 1000 Nmm

Góc xoay làm việc từ 50° đến 60°

Hệ số an toàn > 1.5

Kích thước lớn nhất không vượt quá 100 mm

Khối lượng càng nhỏ càng tốt

Vật liệu AL7075 được lựa chọn cho khớp xoay mềm vì có khối lượng riêng nhỏ. Đặc tính của vật liệu được cho trong bảng 2.1.

**Bảng 2.1:** Đặc tính của vật liệu

| Khối lượng riêng       | Giới hạn bền | Mô đun đàn hồi | Hệ số Poisson |
|------------------------|--------------|----------------|---------------|
| 2770 kg/m <sup>3</sup> | 503 MPa      | 72000 MPa      | 0.33          |

### 2.2 Thiết kế khớp xoay mềm

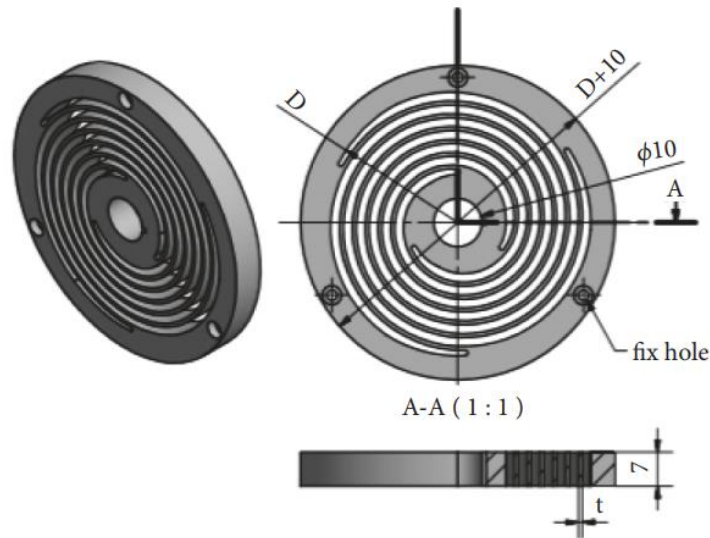
Theo A.A.D. Brown [15], lò xo xoắn phẳng được cố định ở cuối đầu bên ngoài và cuối đầu bên trong gắn với trục xoay thì góc xoay và ứng suất sinh ra được tính bằng công thức (2.1) và (2.2).

$$\varphi = \frac{ML}{60\pi Et^3b} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \frac{6M}{t^2b} \quad (2.2)$$

Trong đó:  $M$  là mô men tác dụng,  $E$  là mô đun đàn hồi của vật liệu,  $t$  là chiều dày,  $L$  là chiều dài và  $b$  chiều rộng của lò xo xoắn phẳng.

Khớp xoay mềm đề xuất là sự kết hợp của các lò xo xoắn phẳng. Các lò xo xoắn phẳng này làm việc theo nguyên lý biến dạng đàn hồi, do đó trong quá trình làm việc, tâm quay của khớp có thể bị dịch chuyển. Vì vậy, khớp xoay mềm được thiết kế sẽ kết hợp 3 lò xo xoắn phẳng để giảm độ lệch tâm quay [16]. Thêm vào đó, để tạo ra góc xoay lớn thì phải giảm chiều dày  $t$ . Tuy nhiên, chiều dày  $t$  nếu quá nhỏ sẽ khó khăn cho quá trình gia công, hơn nữa nếu  $t$  nhỏ sẽ gây ra ứng suất lớn vì vậy  $t$  chỉ có thể giảm đến một giá trị nhất định. Ngoài giải pháp giảm chiều dày  $t$  để tăng góc xoay thì có thể tăng chiều dài  $L$  để tăng góc xoay. Tuy nhiên chiều dài  $L$  lại phụ thuộc vào không gian thiết kế. Vì vậy, để tăng chiều dài  $L$  cho khớp xoay giải pháp được đề xuất là tạo ra các đường cong xoắn. Ngoài ra để tăng góc xoay thì có thể giảm bề rộng  $b$ . Từ những phân tích ở trên khớp xoay mềm được thiết kế như trình bày trong hình 2.1.



**Hình 2.1:** Mô hình thiết kế

### 2.3 Bài toán tối ưu

Thiết bị hỗ trợ vận động chi trên yêu cầu phải có các đặc tính sau: 1) không gian hoạt động lớn để giúp cho bệnh nhân có thể thực hiện các hoạt động trong cuộc sống hàng

ngày mà không phụ thuộc vào người chăm sóc, 2) kích thước nhỏ gọn, nhẹ để bệnh nhân có thể đeo, mặc trên cơ thể, 3) Đảm bảo an toàn giao tiếp giữa người và thiết bị, 4) đảm bảo hệ số an toàn. Vì vậy, khớp xoay mềm cần phải có: i) khối lượng nhỏ, ii) kích thước nhỏ, iii) góc xoay lớn và iv) ứng suất sinh ra trong quá trình làm việc phải nhỏ hơn ứng suất cho phép. Để đảm bảo kích thước nhỏ gọn thì kích thước không gian  $D$  của khớp xoay phải nhỏ. Để đảm bảo khối lượng nhỏ thì chiều dày  $t$ , kích thước không gian  $D$  và bề rộng  $b$  phải nhỏ. Để đảm bảo góc xoay lớn thì kích thước không gian  $D$  phải lớn, chiều dày  $t$  và bề rộng  $b$  phải nhỏ. Để đảm bảo ứng suất sinh ra nhỏ thì chiều dày  $t$  và chiều rộng  $b$  phải lớn. Từ những phân tích trên cho thấy những đặc tính của khớp xoay mềm chịu ảnh hưởng của các thông số  $D$ ,  $t$  và  $b$  và các đặc tính này lại có sự mâu thuẫn lẫn nhau do đó tối ưu hóa thông số hình học của khớp xoay mềm để cân bằng giữa các mục tiêu là cần thiết. Trước khi thực hiện tối ưu thông số hình học của khớp xoay mềm, cần phải xác định biến thiết kế. Như phân tích ở trên, hai thông số hình học ảnh hưởng nhiều đến khối lượng, góc xoay và ứng suất là chiều dày  $t$  và kích thước không gian  $D$ . Do đó hai thông số  $D$  và  $t$  này được chọn làm biến thiết kế. Ngoài ra chiều rộng  $b$  có ảnh hưởng nhưng phạm vi thay đổi của  $b$  không lớn và mức ảnh hưởng chỉ là bậc 1 vì vậy bề rộng  $b$  không được chọn làm biến thiết kế. Thêm vào đó, kích thước  $D$  ngoài ảnh hưởng đến các đặc tính của khớp xoay mềm thì còn chịu ràng buộc để đảm bảo kích thước nhỏ gọn. Do đó kích thước  $D$  được giới hạn trong phạm vi 52 mm đến 56 mm. Chiều dày  $t$  của khớp xoay mềm ngoài việc ảnh hưởng đến các đặc tính của khớp xoay thì nó còn chịu ràng buộc bởi công nghệ gia công. Do đó, chiều dày  $t$  được giới hạn trong phạm vi 0.8 mm đến 1.2 mm.

Tóm lại để đáp ứng được các yêu cầu làm việc của cơ cấu cân bằng trọng lực sử dụng cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên. Vấn đề tối ưu hóa hai mục tiêu có thể được trình bày ngắn gọn như sau:

Xác định kích thước không gian thiết kế và chiều dày của các lò xo xoắn phẳng:  $D$  và  $t$ :  $\mathbf{X} = [D, t]^T$ .



Khối lượng của khớp xoay mềm là nhỏ nhất:

$$\min f_1(\mathbf{X}) \quad (2.3)$$

Góc xoay của khớp phải lớn nhất để bệnh nhân có thể hoạt động chi trên trong một phạm vi lớn:

$$\max f_2(\mathbf{X}) \quad (2.4)$$

Các ràng buộc:

$$50^\circ \leq f_2(\mathbf{X}) \leq 60^\circ \quad (2.5)$$

$$0.8 \text{ mm} \leq t \leq 1.2 \text{ mm}, \quad (2.6)$$

$$52 \text{ mm} \leq D \leq 56 \text{ mm}, \quad (2.7)$$

$$f_3(\mathbf{X}) \leq 335 \text{ MPa}, \quad (2.8)$$

trong đó  $f_1$  là khối lượng,  $f_2$  là góc xoay và  $f_3$  là ứng suất của khớp xoay mềm

## 2.4 Đề xuất giải thuật tối ưu

Khớp xoay mềm sử dụng trong cơ cấu cân bằng trọng lực đòi hỏi phải có các đặc tính cần thiết như sau: 1) khối lượng nhỏ, 2) góc xoay lớn, đồng thời trong quá trình làm việc, ứng suất sinh ra phải nhỏ hơn ứng suất cho phép. Nhưng những đặc tính ở trên thường có sự mâu thuẫn lẫn nhau. Vì vậy, tối ưu hóa đa mục tiêu cho khớp xoay mềm cần được quan tâm để cân bằng giữa các mục tiêu.

Khớp xoay mềm là chi tiết được thiết kế theo nguyên lý của cơ cấu mềm, một lĩnh vực phi truyền thống do đó để tối ưu hóa cho khớp xoay mềm, phương pháp tối ưu dựa trên mô hình thay thế được sử dụng. Phương pháp tối ưu này được bắt đầu với việc xây dựng thực nghiệm. Trong nghiên cứu này phương pháp Taguchi được sử dụng để xây dựng thực nghiệm. Sau đó quá trình phân tích phần tử hữu hạn được thực hiện để thu thập dữ liệu. Từ dữ liệu thực nghiệm thu được, mức độ ảnh hưởng của các biến thiết kế đến đáp ứng đầu ra được xác định bằng cách sử dụng phương pháp Taguchi. Đồng thời mô hình toán học của các đáp ứng đầu ra cũng được xây dựng bằng phương pháp đáp ứng bề mặt.

Trước khi tiến hành tối ưu hóa, trọng số của các hàm mục tiêu được tính toán dựa vào tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu (S/N). Kế tiếp, thuật toán tối ưu bầy đàn và thuật toán tiến hóa vi phân ược áp dụng để tìm các ứng viên tiềm năng. Để đạt được kết quả tối ưu như mong đợi, phương pháp thống kê phi thống số Wilcoxon và Friedman được sử dụng để đánh giá ứng xử của các thuật toán. Cuối cùng kết quả tối ưu được kiểm định để đánh giá độ tin cậy của thuật toán tối ưu phát triển. Quá trình tối ưu hóa cho khớp xoay mềm được tiến hành như sơ đồ trong hình 2.2 [3].

#### Bước 1 Xác định vấn đề tối ưu

Dựa vào đặc tính và các yêu cầu làm việc của đối tượng cần phát triển, một bản thiết kế sơ bộ được đưa ra. Sau đó, các phân tích ban đầu được thực hiện để xác định các vấn đề cần tối ưu.

#### Bước 2: Xác định hàm mục tiêu, biến thiết kế và các ràng buộc.

Sau khi vấn đề cần tối ưu được xem xét, các hàm mục tiêu được lựa chọn cho quá trình tối ưu. Kế tiếp, một quá trình phân tích nhằm đánh giá những yếu tố nào có khả năng ảnh hưởng lớn đến đặc tính của khớp xoay mềm để lựa chọn biến thiết kế. Đồng thời dựa vào những yêu cầu làm việc của khớp xoay mềm, khả năng công nghệ hiện có để đưa ra các ràng buộc cần thiết cho hàm mục tiêu và biến thiết kế.

Bước 3: Thiết kế mô hình khớp xoay mềm, phân tích phần tử hữu hạn để thu thập dữ liệu:

Sau khi xác định được biến thiết kế và các ràng buộc cho biến thiết kế. Thực nghiệm số sẽ được xây dựng dựa trên bảng trực giao. Bảng trực giao cho phép giảm số lượng thực nghiệm phải thực hiện nhưng vẫn đảm bảo đánh giá được hết tác động của các biến thiết kế đến đặc tính đầu ra [17].

#### Bước 4: Tính toán trọng số

Các đặc tính mong muốn của khớp xoay mềm có sự mâu thuẫn lẫn nhau. Do đó người thiết kế phải cân bằng tất cả các mục tiêu nhằm đảm bảo cho khớp xoay mềm có thể đáp ứng được điều kiện làm việc. Trong thực tế, người thiết kế thường chọn trọng

số cho từng đặc tính bằng kinh nghiệm hoặc theo yêu cầu của khách hàng. Tuy nhiên kinh nghiệm không phải lúc nào cũng chính xác. Nếu trọng số của từng đặc tính được lựa chọn không chính xác thì kết quả tối ưu sẽ đề xuất những ứng viên không hoàn toàn chính xác. Để tính trọng số, ngày nay có nhiều phương pháp tính khác nhau như S-C Huang và T-P. Dao đã kết hợp mối quan hệ xấp xỉ với đo lường entropy để tính trọng số [18], G. Zheng và các đồng sự tính trọng số bằng cách sử dụng tổng số điểm của các hàm mục tiêu [19].

Không giống như các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu này đề xuất phương pháp tính trọng số bằng cách dựa trên độ nhạy của các đáp ứng và ảnh hưởng của các biến thiết kế đến các đáp ứng. Trong phương pháp tính trọng số này, một nhiệm vụ rất quan trọng đó là phải chuẩn hóa dữ liệu về giá trị trong phạm vi  $[0, 1]$  để có cùng đơn vị. Để chuẩn hóa dữ liệu đầu tiên tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu phải được tính toán. Việc tính tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu phụ thuộc yêu cầu của của hàm mục tiêu [20]. Trong nghiên cứu này các hàm mục tiêu của khớp xoay mềm có hai dạng yêu cầu đó là: lớn hơn sẽ tốt hơn và nhỏ hơn sẽ tốt hơn.

Khi hàm mục tiêu yêu cầu càng lớn càng tốt thì giá trị tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu được tính bằng công thức sau:

$$\eta_{ij} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_{ij}^2} \right) \quad (2.9)$$

Khi hàm mục tiêu yêu cầu càng nhỏ càng tốt thì tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu được tính theo công thức:

$$\eta_{ij} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ij}^2 \right) \quad (2.10)$$

trong đó,  $f_{ij}$  là giá trị của hàm mục tiêu  $j$  ở thực nghiệm thứ  $i$ ,  $n$  là số lần lặp lại của thực nghiệm thứ  $i$ ,  $\eta_{ij}$  là giá trị của tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu.

Việc chuẩn hóa tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu của các hàm tiêu nhằm khắc phục ảnh hưởng do sự khác nhau trong đơn vị của các hàm mục tiêu và được tính bằng công thức:

$$z_{ij} = \frac{\eta_{ij} - \min \eta_{ij}}{\max \eta_{ij} - \min \eta_{ij}} \quad (2.11)$$

trong đó,  $z_{ij}$  là giá trị chuẩn hóa của thực nghiệm thứ  $i$  của hàm mục tiêu  $j$

Giá trị trung bình chuẩn hóa của tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu được tính theo công thức:

$$a_{Lkj} = \frac{1}{m_{Lkj}} \sum_{L=1}^m z_{Lkj} \quad (2.12)$$

trong đó,  $a_{Lkj}$  là giá trị trung bình chuẩn hóa của tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu ở mức thứ  $L$  của biến thiết kế thứ  $k$  của hàm mục tiêu thứ  $j$ .  $m_{Lkj}$  là số thực nghiệm của biến thiết kế thứ  $k$  của hàm mục tiêu thứ  $j$ ,  $z_{Lkj}$  là giá trị chuẩn hóa của tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu của biến thứ  $k$  ở mức thứ  $L$  của hàm mục tiêu thứ  $j$ .

Giá trị để xếp hạng của mỗi biến thiết kế của từng hàm mục tiêu được tính theo công thức:

$$r_{kj} = \max a_{Lkj} - \min a_{Lkj} \quad (2.13)$$

trong đó  $r_{kj}$  là giá trị của thứ hạng đã chuẩn hóa của tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu của biến thiết kế  $k$  của hàm mục tiêu  $j$ .

Trọng số của mỗi hàm mục tiêu được tính bằng công thức:

$$w_j = \frac{\sum_{k=1}^p r_{kj}}{\sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^p r_{kj}} \quad (2.14)$$

trong đó  $p$  là số biến,  $q$  là số hàm mục tiêu.

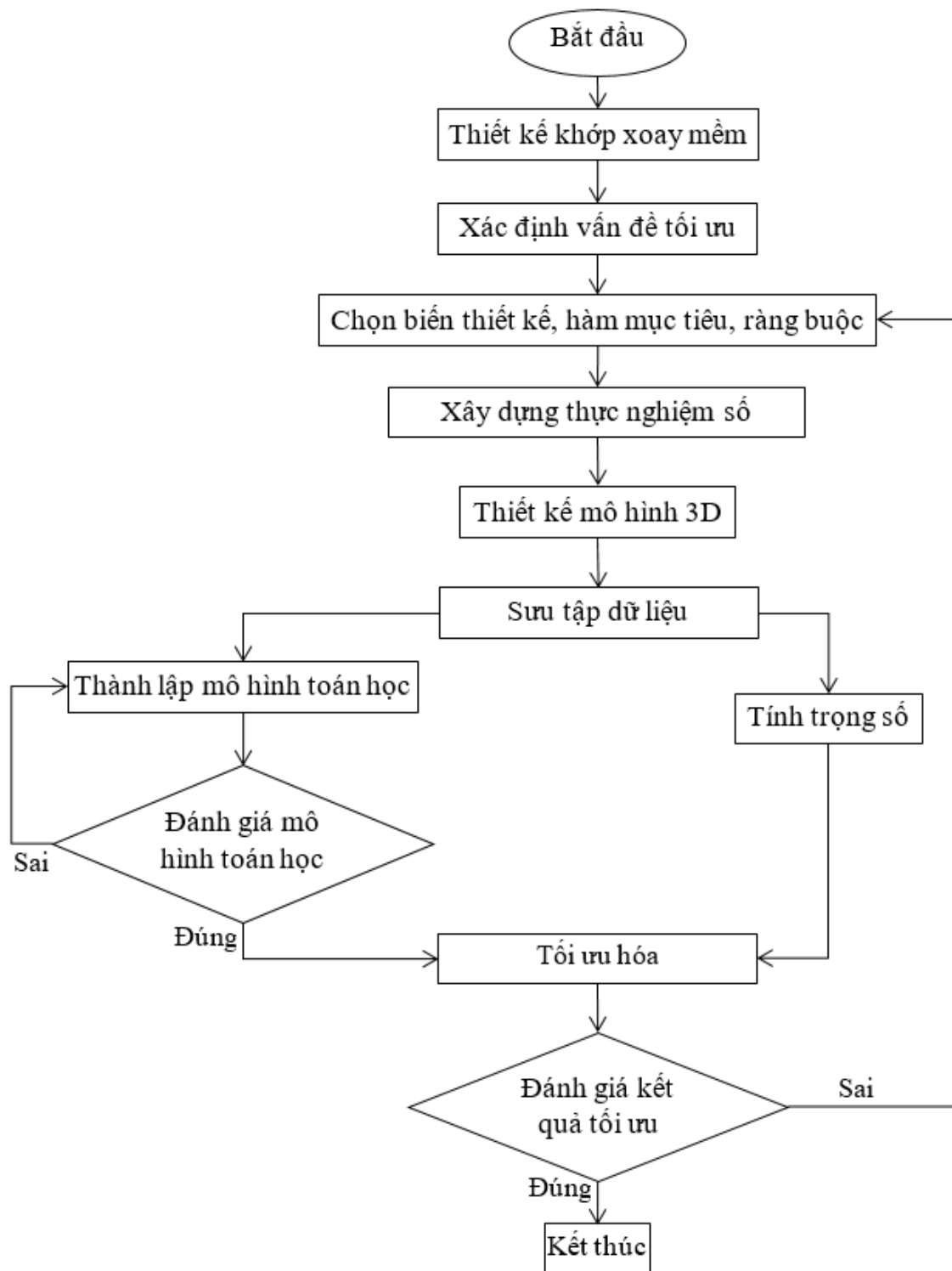
Song song với tính trọng số, mô hình toán học của khớp xoay được xây dựng dựa trên phương pháp đáp ứng bề mặt. Do mối quan hệ giữa biến thiết kế với các hàm mục

tiêu gần như không tuyến tính, do đó dạng phương trình bậc hai đầy đủ được lựa chọn để xây dựng mô hình toán học. Phương trình này có dạng như sau:

$$f_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.15)$$

trong đó  $\beta_0$  hằng số hồi qui,  $\beta_i$  hệ số bậc 1,  $\beta_{ii}$  hệ số bậc 2,  $x$  là các biến thiết kế,  $\varepsilon$  sai số.

Thông thường, các mô hình toán học xây dựng dựa trên mô hình thay thế luôn tồn tại một lượng sai số  $\varepsilon$ , nếu sai số này lớn thì mô hình toán học sẽ không chính xác, điều này dẫn đến quá trình tối ưu sẽ cho kết quả không như mong đợi. Vì vậy, sau khi xây dựng được mô hình toán học, cần phải kiểm tra lại độ chính xác của mô hình. Trong nghiên cứu này, các kích thước của khớp xoay mềm được lựa chọn một cách ngẫu nhiên để xây dựng mô hình 3D, sau đó các mô hình này được phân tích bằng phần tử hữu hạn để kiểm chứng kết quả với mô hình toán học. Nếu sai số lớn hơn 5% thì phải chọn lại dạng phương trình để xây dựng lại mô hình toán học. Nếu sai số nhỏ, mô hình toán học được xem là chính xác và sẽ được sử dụng để tối ưu thông số hình học của khớp xoay mềm. Cuối cùng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn được áp dụng để tối ưu hóa thông số hình học của khớp xoay mềm.



**Hình 2.2:** Lưu đồ tối ưu hóa đề xuất

## 2.5 Đánh giá độ nhạy của biến thiết kế

Để cân bằng các đặc tính của khớp xoay mềm nhằm thỏa mãn điều kiện làm việc cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên, đầu tiên phương pháp Taguchi được sử dụng để xây dựng thực nghiệm. Hai biến thiết kế  $D$  và  $t$  được chia làm 3 mức như trình bày trong bảng 2.2. Ma trận thực nghiệm được xây dựng bằng cách sử dụng bảng trực giao  $L_9$ . Kế tiếp 9 mô hình 3D của khớp xoay mềm được thiết kế trong phần mềm Inventor. Quá trình thực nghiệm số để sưu tập dữ liệu được thực hiện bằng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn trong phần mềm ANSYS.

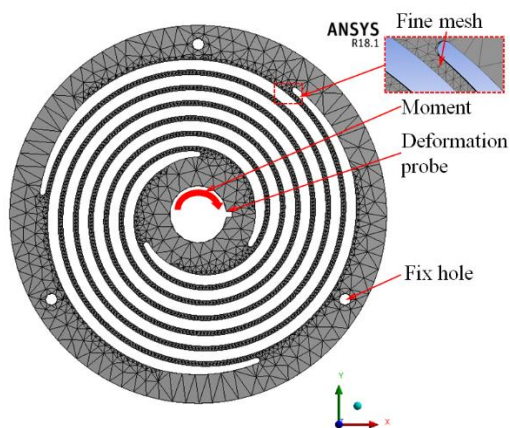
**Bảng 2.2:** Giá trị của biến thiết kế

| Biến thiết kế | Mức 1 | Mức 2 | Mức 3 |
|---------------|-------|-------|-------|
| $D$ (mm)      | 52    | 54    | 56    |
| $t$ (mm)      | 0.8   | 1.0   | 1.2   |

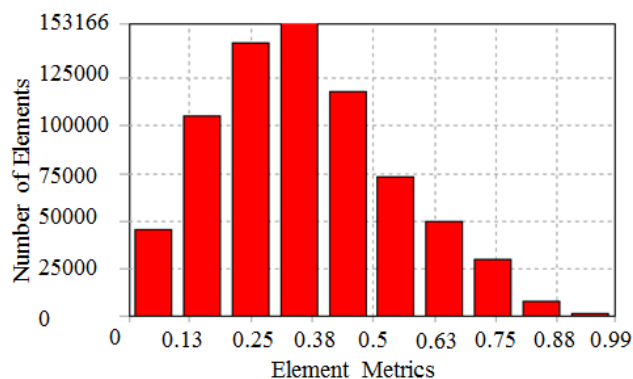
Mô hình được chia lưới và gắn điều kiện biên như mô tả trong hình 2.3. Phương pháp chia lưới sizing được lựa chọn với kích thước phần tử lưới 0.3 mm, thống kê mô hình chia lưới có kết quả như sau: tổng số phần tử là 720074, tổng số node là 1243588. Do chất lượng của lưới ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả phân tích phần tử hữu hạn. Vì vậy, tiêu chuẩn Skewness được sử dụng để đánh giá chất lượng của lưới. Thống kê lưới theo tiêu chuẩn Skewness thể hiện trong hình 2.4. Theo kết quả thống kê, giá trị trung bình theo tiêu chuẩn Skewness là 0.35. Điều này cho thấy, mô hình chia lưới có độ chính xác và hội tụ tốt [21, 22].

Kết quả phân tích phần tử hữu hạn cho khớp xoay mềm được cung cấp trong bảng 2.3. Dựa trên kết quả trong bảng 2.3, phương pháp đáp ứng bề mặt được sử dụng để xây dựng mô hình toán học nhằm mô tả mối quan hệ của biến thiết kế với khối lượng, góc xoay và ứng suất. Mức độ đóng góp của các biến thiết kế đến khối lượng, góc xoay và ứng suất cũng được xác định thông qua phân tích phương sai như trình bày trong bảng 2.4, 2.5 và 2.6. Độ nhạy của các biến thiết kế với khối lượng, góc xoay và ứng suất cũng được phân tích. Kết quả phân tích độ nhạy được thể hiện trong hình 2.5. Hình 2.5 cho

thấy rằng thông số không gian thiết kế  $D$  ảnh hưởng tỷ lệ thuận với khối lượng và góc xoay nhưng ảnh hưởng tỷ lệ nghịch với ứng suất. Trong khi đó, chiều dày  $t$  tăng 0.8 mm đến 1.2 mm thì khối lượng tăng gần như tuyến tính. Trong phạm vi 0.8 mm đến 1.0 mm thì chiều dày  $t$  giảm thì góc xoay và ứng suất giảm mạnh, nhưng trong phạm vi 1.0 mm đến 1.2 mm thì góc xoay và ứng suất giảm chậm.



**Hình 2.3:** mô hình chia lưới

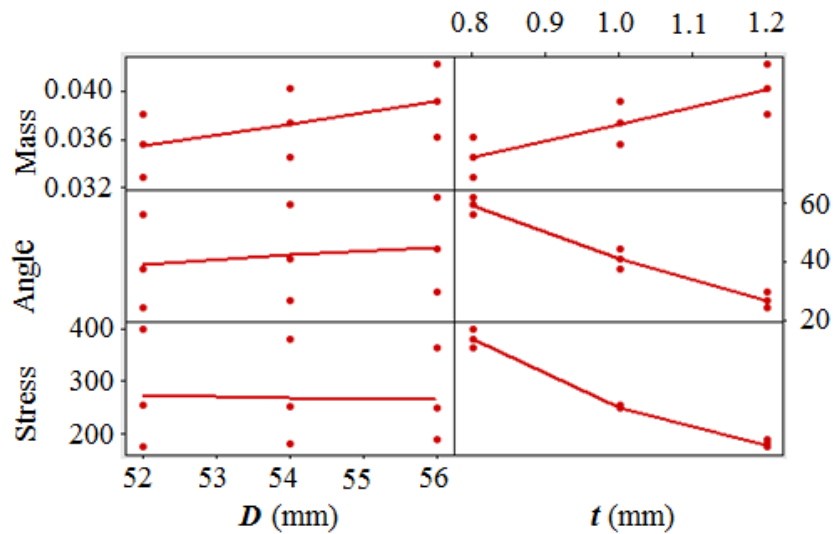


**Hình 2.4:** Giá trị Skewness

**Bảng 2.3:** Kết quả thực nghiệm số

| Số TT | $R$ (mm) | $t$ (mm) | Khối lượng (gr) | Góc xoay (độ) | Ứng suất (MPa) |
|-------|----------|----------|-----------------|---------------|----------------|
| 1     | 52       | 0.8      | 0.0328          | 56.55         | 398.00         |
| 2     | 52       | 1        | 0.0355          | 37.42         | 251.57         |
| 3     | 52       | 1.2      | 0.0381          | 23.57         | 172.08         |
| 4     | 54       | 0.8      | 0.0345          | 59.79         | 379.28         |
| 5     | 54       | 1        | 0.0373          | 40.99         | 248.74         |
| 6     | 54       | 1.2      | 0.0402          | 26.37         | 177.14         |
| 7     | 56       | 0.8      | 0.0361          | 62.51         | 362.21         |
| 8     | 56       | 1        | 0.0392          | 44.28         | 247.33         |
| 9     | 56       | 1.2      | 0.0423          | 29.16         | 185.38         |





**Hình 2.5:** Phân tích độ nhạy của biến thiết kế

Dựa trên dữ liệu trong bảng 2.3, phương pháp đáp ứng bề mặt được sử dụng để xác định mô hình toán học cho khối lượng. Kết quả cho thấy hằng số xác định hầu như đạt 100%, nó cho thấy mô hình toán học có độ chính xác tốt. Theo lý thuyết thống kê, khi giá trị P của biến thiết kế lớn hơn 0.05 thì biến thiết kế đó không có giá trị thống kê. Tuy nhiên biến thiết kế này vẫn có đóng góp nhất định cho khối lượng vì vậy mà tất cả các thông số đều được biểu diễn trong mô hình toán học. Mô hình toán học của khối lượng có dạng:

$$f_1 = 0.01746 - 0.000112D - 0.018911t - 0.000004D^2 + 0.000008t^2 + 0.000616Dt \quad (2.16)$$

Kết quả phân tích phương sai của các mô hình toán cho thấy rằng mức đóng góp của từng biến thiết kế đến khối lượng được trình bày trong bảng 2.4. Kết quả phân tích chỉ ra rằng mức độ đóng góp của biến thiết kế lần lượt là:  $D$  sắp xỉ 29.46%,  $t$  sắp xỉ 70.20% và  $D*t$  sắp xỉ 0.34%. Kết quả này cho thấy để giảm khối lượng của khớp xoay thì nên giảm giá trị  $t$ , bởi mức đóng góp của  $t$  lớn hơn  $D$

**Bảng 2.4:** Kết quả phân tích phương sai cho khối lượng

| Tham số | Số bậc tự do | Đóng góp (%) | Giá trị F  | Giá trị P |
|---------|--------------|--------------|------------|-----------|
| $D$     | 1            | 29.46%       | 2914851.94 | 0         |
| $t$     | 1            | 70.20%       | 6946032.12 | 0         |
| $D^2$   | 1            | 0.00%        | 70.14      | 0.004     |
| $t^2$   | 1            | 0.00%        | 0.03       | 0.871     |
| $D*t$   | 1            | 0.34%        | 34001.67   | 0         |
| Sai số  | 3            | 0.00%        |            |           |
| Tổng    | 8            | 100.00%      |            |           |

Tương tự, mô hình toán học của góc xoay cũng được xây dựng bằng phương pháp đáp ứng bề mặt. Kết quả cho thấy hệ số xác định  $R^2$  xấp xỉ 99.98%. Điều này cho thấy rằng mô hình toán học cho góc xoay có độ chính xác cao. Mô hình toán học cho góc xoay có dạng:

$$f_2 = -16 + 5.38D - 175.2t - 0.0334D^2 + 52.41t^2 - 0.236Dt. \quad (2.17)$$

**Bảng 2.5:** Kết quả phân tích phương sai cho góc xoay

| Tham số | Số bậc tự do | Đóng góp (%) | Giá trị F | Giá trị P |
|---------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| $D$     | 1            | 3.27%        | 412.15    | 0         |
| $t$     | 1            | 96.19%       | 12118.95  | 0         |
| $D^2$   | 1            | 0.00%        | 0.26      | 0.645     |
| $t^2$   | 1            | 0.51%        | 64.24     | 0.004     |
| $D*t$   | 1            | 0.00%        | 0.26      | 0.644     |
| Sai số  | 3            | 0.02%        |           |           |
| Tổng    | 8            | 100.00%      |           |           |

Tiếp theo, mức đóng góp của biến thiết kế đến góc xoay cũng được xác định bằng phương pháp phân tích phương sai. Bảng 2.5 cho thấy rằng mức đóng góp của  $D$ ,  $t$ ,  $t^2$

lần lượt là 3.27%, 96.19% và 0.51%. Điều này cho thấy mức độ ảnh hưởng của  $t$  đến góc xoay là lớn nhất. Vậy để tăng góc xoay thì cần giảm chiều dày  $t$ .

Cuối cùng, phương pháp đáp ứng bề mặt cũng được sử dụng để xây dựng mô hình toán học cho ứng suất. kết quả cho thấy hệ số chính xác  $R^2$  xấp xỉ 99.97%, nó cho biết mô hình toán học được xây dựng đảm bảo độ chính xác. Mô hình toán học của ứng suất có dạng:

$$f_3 = 4034 - 61D - 3651t - 0.26D^2 + 745t^2 + 30.68Dt. \quad (2.18)$$

Phân tích phương sai cho ứng suất. Kết quả của bảng 2.6 cho thấy đóng góp của  $D$ ,  $t$ ,  $D^2$ ,  $t^2$  và  $D*t$  lần lượt là: 0.19%, 96.04%, 0.00%, 2.80%, và 0.95%. Điều này cho thấy mức đóng góp của chiều dày  $t$  là lớn nhất. Như vậy để giảm ứng suất thì cần tăng chiều dày  $t$ .

**Bảng 2.6:** Kết quả phân tích phương sai cho ứng suất

| Tham số | Số bậc tự do | Đóng góp (%) | Giá trị F | Giá trị P |
|---------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| $D$     | 1            | 0.19%        | 21.44     | 0.019     |
| $t$     | 1            | 96.04%       | 10979.99  | 0         |
| $D^2$   | 1            | 0.00%        | 0.39      | 0.576     |
| $t^2$   | 1            | 2.80%        | 319.82    | 0         |
| $D*t$   | 1            | 0.95%        | 108.47    | 0.002     |
| Sai số  | 3            | 0.03%        |           |           |
| Tổng    | 8            | 100.00%      |           |           |

Sau khi xây dựng mô hình toán học, mặc dù hệ xác định  $R^2$  của ba mô hình toán học cho kết quả tốt tuy nhiên để đảm bảo độ tin cậy cho độ chính xác của mô hình toán học nên ba mô hình của khớp xoay được xây dựng dựa trên ba cặp biến thiết kế được chọn một cách ngẫu nhiên. Sau đó ba mô hình này được sử dụng để phân tích phân tử hữu hạn trong phần mềm ANSYS. Kết quả phân tích phân tử hữu hạn và kết quả dự đoán của mô hình toán học được trình bày trong bảng 2.7. Kết quả cho thấy sai số trung bình mô hình khối lượng, góc xoay và ứng suất lần lượt là: 0.28%, 1.36% và 1.33%. Với kết

qua sai số như trên chứng minh rằng mô hình toán học được xây dựng đảm bảo độ chính xác cho quá trình tối ưu hóa.

**Bảng 2.7:** Đánh giá tính chính xác của mô hình toán học

| Biến thiết kế<br>(mm)        | Mô hình toán học |        |       | Phân tích phần tử hữu hạn |        |       | Sai số |       |       |
|------------------------------|------------------|--------|-------|---------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
|                              | $f_1$            | $f_2$  | $f_3$ | $f_1$                     | $f_2$  | $f_3$ | $f_1$  | $f_2$ | $f_3$ |
|                              | (gr)             | (độ)   | (MPa) | (gr)                      | (độ)   | (MPa) | (%)    | (%)   | (%)   |
| $D = 53$ mm;<br>$t = 8.8$ mm | 0.0337           | 388.17 | 58.69 | 0.0337                    | 387.77 | 58.22 | 0.28   | 0.1   | 0.81  |
| $D = 54$ mm<br>$t = 0.9$ mm  | 0.036            | 306.76 | 50.43 | 0.0359                    | 312.94 | 50.15 | 0.3    | 2.02  | 0.55  |
| $D = 55$ mm<br>$t = 1.2$ mm  | 0.0414           | 181.98 | 28.52 | 0.0413                    | 187.17 | 27.79 | 0.27   | 2.85  | 2.57  |
| Trung bình                   |                  |        |       |                           |        |       | 0.28   | 1.66  | 1.33  |

Để tối ưu hóa thông số hình học của khớp xoay mềm thì giá trị trọng số của các hàm mục tiêu cần được xác định. Thông thường các nhà thiết kế lựa chọn trọng số của các hàm mục tiêu dựa trên kinh nghiệm hoặc yêu cầu của khách hàng. Tuy nhiên cách chọn này thường không chính xác, điều này có thể ảnh hưởng đến kết quả tối ưu và mức độ đáp ứng cho quá trình làm việc. Vì vậy để kết quả tối ưu đáp ứng tốt nhất cho điều kiện làm việc của khớp xoay mềm thì trọng số của các hàm mục tiêu phải được tính toán.

Dựa trên kết quả thực nghiệm số, trọng số của hàm mục tiêu khối lượng và góc xoay được tính toán bằng cách dựa vào tỷ số giữa tín hiệu và tín hiệu nhiễu (S/N) bằng các công thức (2.1) đến (2.6). Kết quả tính toán trọng số của hai hàm mục tiêu được thể hiện trong các bảng 2.8 và 2.9.

**Bảng 2.8:** Giá trị tỷ số tín hiệu trên độ nhiễu (S/N) và giá trị chuẩn hóa

| TT | $R$ (mm) | $t$ (mm) | S/N của $f_1$ | Chuẩn hóa<br>S/N của $f_1$ | S/N của $f_2$ | Chuẩn hóa<br>S/N của $f_2$ |
|----|----------|----------|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|
| 1  | 52       | 0.8      | -29.68        | 35.0487                    | 0             | 0.897266                   |
| 2  | 52       | 1.0      | -29.00        | 31.4621                    | 0.310995      | 0.473912                   |
| 3  | 52       | 1.2      | -28.38        | 27.4472                    | 0.588876      | 0                          |
| 4  | 54       | 0.8      | -29.24        | 35.5326                    | 0.19866       | 0.954388                   |
| 5  | 54       | 1.0      | -28.57        | 32.2536                    | 0.505447      | 0.567337                   |
| 6  | 54       | 1.2      | -27.92        | 28.4222                    | 0.79981       | 0.115089                   |
| 7  | 56       | 0.8      | -28.85        | 35.919                     | 0.376887      | 1                          |
| 8  | 56       | 1.0      | -28.13        | 32.9242                    | 0.700775      | 0.646493                   |
| 9  | 56       | 1.2      | -27.47        | 29.2958                    | 1             | 0.218201                   |

**Bảng 2.9:** Kết quả tính trọng số

| Biến<br>thiết kế | Giá trị S/N của $f_1$ |        |        | Giá trị S/N của $f_2$ |        |        | Xếp hạng |        |
|------------------|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|----------|--------|
|                  | Mức 1                 | Mức 2  | Mức 3  | Mức 1                 | Mức 2  | Mức 3  | $f_1$    | $f_2$  |
| $D$              | 0.3000                | 0.5013 | 0.6926 | 0.4571                | 0.5456 | 0.6216 | 0.3926   | 0.1645 |
| $t$              | 0.1918                | 0.5057 | 0.7962 | 0.9506                | 0.5626 | 0.1111 | 0.6044   | 0.8395 |
| Trọng số         |                       |        |        |                       |        |        | 0.4983   | 0.5017 |

## 2.6 Kết quả tối ưu và phân tích thống kê

Để tìm kiếm kết quả tối ưu, phương pháp phân tích thống kê được thực hiện nhằm so sánh và đánh giá các ứng xử của thuật toán tối ưu bầy đàn, thuật toán tiến hóa vi phân và thuật toán Cuckoo. Để thực hiện so sánh ứng xử. Mỗi thuật toán tối ưu được chạy 30 lần trong phần mềm MATLAB để sưu tập dữ liệu. Các thông số chính cho hai thuật toán được cài đặt như sau: kích thước dân số là 25, sai số cho phép là  $10^{-6}$ , số vòng lặp lớn nhất là 5000. Kết quả tối ưu của hàm đa mục tiêu được trình bày trong bảng 2.10.

**Bảng 3.10: Kết quả tối ưu**

| TT | Kết quả tối ưu của thuật toán tiến hóa vi phân |            | Kết quả tối ưu của thuật toán bầy đàn |            | Kết quả tối ưu của thuật toán CucKoo |            |
|----|--|------------|---------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|
|    | f1 (gram)                                      | f2 (độ)    | f1 (gram)                             | f2 (độ)    | f1 (gram)                            | f2 (độ)    |
|    | 1  | 0.03684694 | 59.1926                               | 0.03684698 | 59.1928                              | 0.03640000 |
| 2  | 0.03684698                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03680000                           | 57.6736    |
| 3  | 0.03684699                                     | 59.1926    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03560000                           | 54.7656    |
| 4  | 0.03684701                                     | 59.1926    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03650000                           | 54.2459    |
| 5  | 0.03684701                                     | 59.1926    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03690000                           | 54.6147    |
| 6  | 0.03684698                                     | 59.1926    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03640000                           | 53.6284    |
| 7  | 0.03684698                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03620000                           | 55.6318    |
| 8  | 0.03684698                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03730000                           | 56.4305    |
| 9  | 0.03684697                                     | 59.1928    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03500000                           | 49.8407    |
| 10 | 0.03684697                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03540000                           | 53.9830    |
| 11 | 0.03684698                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03740000                           | 52.1104    |
| 12 | 0.03684696                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03650000                           | 55.2316    |
| 13 | 0.03684698                                     | 59.1926    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03700000                           | 54.0561    |
| 14 | 0.03684698                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03550000                           | 51.5698    |
| 15 | 0.03684697                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03660000                           | 57.9326    |
| 16 | 0.03684698                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03720000                           | 50.7281    |
| 17 | 0.03684699                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03600000                           | 56.0966    |
| 18 | 0.03684696                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03580000                           | 53.2667    |
| 19 | 0.03684699                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03720000                           | 56.3933    |
| 20 | 0.03684699                                     | 59.1926    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03610000                           | 55.3665    |
| 21 | 0.03684698                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03760000                           | 54.3757    |
| 22 | 0.03684697                                     | 59.1927    | 0.03684698                            | 59.1928    | 0.03460000                           | 49.3076    |

|    |            |         |            |         |            |         |
|----|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| 23 | 0.03684698 | 59.1927 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03500000 | 51.9317 |
| 24 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03580000 | 50.4642 |
| 25 | 0.03684697 | 59.1927 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03640000 | 52.0670 |
| 26 | 0.03684699 | 59.1927 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03590000 | 55.9478 |
| 27 | 0.03684700 | 59.1926 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03560000 | 51.7925 |
| 28 | 0.03684697 | 59.1927 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03540000 | 49.4596 |
| 29 | 0.03684698 | 59.1927 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03430000 | 48.3116 |
| 30 | 0.03684697 | 59.1928 | 0.03684698 | 59.1928 | 0.03730000 | 47.2540 |

Kết quả phân tích thống kê bằng tiêu chuẩn Willcoxon trong bảng 2.11 cho thấy rằng giá trị p bằng  $0.821 > 0.05$ . Điều này khẳng định giả thuyết  $H_0$  đúng, nghĩa là kết quả tối ưu cho khối lượng giữa hai thuật toán là giống nhau. Tuy nhiên giả thuyết  $H_0$  cho góc xoay thì không được chấp nhận như trong bảng 2.12. Điều này cho thấy kết quả tối ưu cho góc xoay của hai thuật toán là không giống nhau. Thuật toán bầy đàn cho kết quả dự đoán lớn hơn kết quả dự đoán tối ưu của thuật toán tiến hóa vi phân.

Bảng 2.11 So sánh Willcoxon giữa PSO và AEDE cho khối lượng

| Số mẫu | Trung bình sai khác | Giá trị P | Thống kê Willcoxon |
|--------|---------------------|-----------|--------------------|
| 30     | 0.000               | 0.821     | 244                |

Giả thuyết không:  $H_0$  Tất cả kết quả giống nhau  
Giả thuyết thay thế:  $H_1$  Tất cả kết quả không giống nhau

Bảng 2.12 So sánh Willcoxon giữa PSO và AEDE cho góc xoay

| Số mẫu | Trung bình sai khác | Giá trị P | Thống kê Willcoxon |
|--------|---------------------|-----------|--------------------|
| 30     | -0.0000799          | 0.000     | 7                  |

Giả thuyết không:  $H_0$  Tất cả kết quả giống nhau  
Giả thuyết thay thế:  $H_1$  Tất cả kết quả không giống nhau

Tương tự phân tích thống kê theo tiêu chuẩn Willcoxon để so sánh kết quả dự đoán tối ưu giữa hai thuật toán tối ưu bầy đàn và Cuckoo cũng được thực hiện. Kết quả phân tích được biểu diễn trong bảng 2.13 và 2.14. Kết quả cho thấy kết quả dự đoán cho khối lượng và góc xoay của hai thuật toán là không giống nhau, kết quả dự đoán khối lượng và góc xoay của thuật toán tối ưu bầy đàn nhỏ hơn kết quả dự đoán của thuật toán tối ưu Cuckoo. Tuy nhiên mức độ ảnh hưởng của góc xoay lớn hơn ảnh hưởng của khối lượng.

Bảng 2.13 So sánh Willcoxon giữa PSO và CUCKOO cho khối lượng

| Số mẫu | Trung bình sai khác | Giá trị P | Thống kê Willcoxon |
|--------|---------------------|-----------|--------------------|
| 30     | 0.000647            | 0.001     | 389                |

Giả thuyết không:  $H_0$  Tất cả kết quả giống nhau

Giả thuyết thay thế :  $H_1$  Tất cả kết quả không giống nhau

Bảng 2.14 So sánh Willcoxon giữa PSO và CUCKOO cho góc xoay

| Số mẫu | Trung bình sai khác | Giá trị P | Thống kê Willcoxon |
|--------|---------------------|-----------|--------------------|
| 30     | 5.7454300           | 0.000     | 465                |

Giả thuyết không:  $H_0$  Tất cả kết quả giống nhau

Giả thuyết thay thế:  $H_1$  Tất cả kết quả không giống nhau

Một cách khác, thống kê phi tham số theo tiêu chuẩn Fridman của được thực hiện để so sánh ứng xử của các thuật toán tối ưu. Bảng 2.15 cho thấy giá trị P nhỏ hơn 0.05, vì vậy giả thuyết  $H_0$  không được chấp nhận, có nghĩa là kết quả tối ưu dự đoán khối lượng của các thuật toán là không giống nhau. Tổng xếp hạng thuật toán tối ưu Cuckoo là nhỏ nhất. Như vậy thuật toán Cuckoo hiệu quả nhất. Tương tự bảng 2.16 là kết quả thống kê theo tiêu chuẩn Friedman cho góc xoay. Bảng 2.16 cho thấy kết quả dự đoán tối ưu cho góc xoay của thuật toán bầy đàn hiệu quả nhất.



Bảng 2.15 Kiểm tra Friedman cho khối lượng

| Đáp ứng              | Number of tests | Median of difference | Sum of Ranks |
|----------------------|-----------------|----------------------|--------------|
| Khối lượng do AEDE   | 30              | 0.036847             | 66           |
| Khối lượng do PSO    | 30              | 0.036847             | 68           |
| Khối lượng do Cuckoo | 30              | 0.036544             | 46           |
| Tổng                 | 90              | 0.036746             |              |
| Bậc tự do            | $R^2$           | Giá trị P            |              |
| 2                    | 9.87            | 0.007                |              |

Giả thuyết không:  $H_0$  Tất cả kết quả giống nhau  
 Giả thuyết thay thế:  $H_1$  Tất cả kết quả không giống nhau

Bảng 2.16 Kiểm tra Friedman cho góc xoay

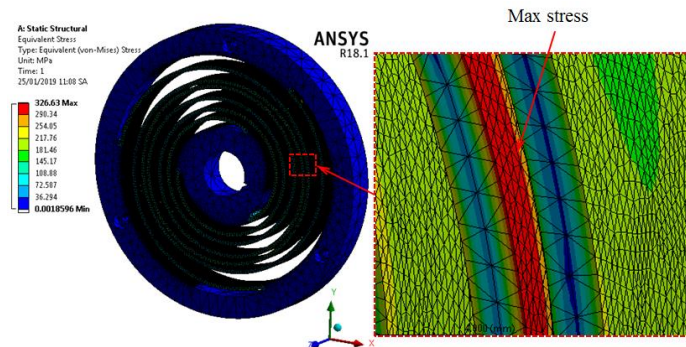
| Đáp ứng              | Number of tests | Median of difference | Sum of Ranks |
|----------------------|-----------------|----------------------|--------------|
| Khối lượng do AEDE   | 30              | 59.1927              | 62           |
| Khối lượng do PSO    | 30              | 59.1928              | 88           |
| Khối lượng do Cuckoo | 30              | 54.0196              | 30           |
| Tổng                 | 90              | 57.4683              |              |
| Bậc tự do            | $R^2$           | Giá trị P            |              |
| 2                    | 56.27           | 0                    |              |

Giả thuyết không:  $H_0$  Tất cả kết quả giống nhau  
 Giả thuyết thay thế:  $H_1$  Tất cả kết quả không giống nhau

Dựa trên kết quả phân tích thống kê bằng hai tiêu chuẩn Wilcoxon và Friedman, thuật toán tối ưu hóa bầy đàn được lựa chọn cho nghiên cứu này vì có hiệu quả cao thuật toán tối ưu tiến hóa vi phân và thuật toán tối ưu Cuckoo. Kết quả tối ưu đạt được  $D = 56$  mm và  $t = 0.841$  mm. Khối lượng, góc xoay của khớp xoay mềm lần lượt là 0.036 gr và 58.8067 độ, ứng suất sinh ra là 326.63 MPa. Ứng suất này đảm bảo hệ số an toàn thiết kế lớn hơn 1.5.

## 2.7 Đánh giá kết quả tối ưu

Dựa trên kết quả tối ưu đề xuất, mô hình 3D của khớp xoay mềm được thiết kế và phân tích phần tử hữu hạn để đánh giá độ chính xác của kết quả tối ưu. Kết quả phân tích đánh giá cho thấy rằng sai số giữa kết quả tối ưu với phân tích phần tử hữu hạn cho khối lượng và góc xoay của khớp xoay mềm là 0.2725% và 0.6567% sai số của ứng suất sinh ra là 2.5625% như được trình bày trong bảng 2.17. Thực chất có sai số như trên bởi hai lý do chính. 1) khi xây dựng mô hình toán học, mô hình luôn tồn tại một lượng sai số nhất định, 2) quá trình xây dựng mô hình 3D, phân tích phần tử hữu hạn phải chấp nhận một lượng sai số kích thước do làm tròn số, trong khi đó trong môi trường tìm kiếm của thuật toán, các phần tử được tìm kiếm trong một không gian liên tục. Giữa hai môi trường khác nhau như vậy chắc chắn tồn tại sự sai khác. Tuy nhiên với kết quả sai số nhỏ cho thấy kết quả tối ưu bằng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn cho khớp xoay mềm đảm bảo độ tin cậy.



**Hình 2.6:** Kết quả phân tích ứng suất

**Bảng 2.17:** Đánh giá kết quả tối ưu

| Đáp ứng      | Kết quả dự đoán | Kết quả tối ưu | Error (%) |
|--------------|-----------------|----------------|-----------|
| $f_1$ (gram) | 0.0368          | 0.0367         | 0.2725    |
| $f_2$ (độ)   | 59.1928         | 58.8067        | 0.6567    |
| $f_3$ (MPa)  | 335             | 326.63         | 2.5625    |

## Chương 3 KẾT LUẬN KIẾN NGHỊ

### 3.1 Kết luận

Trong nghiên cứu này, tác giả đã phát triển và tối ưu thông số hình học của khớp xoay mềm. Khớp xoay mềm được phát triển có các đặc tính cần thiết để sử dụng trong cơ cấu cân bằng trọng lực cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên như: khối lượng nhỏ, góc xoay lớn, ứng suất sinh ra nhỏ hơn ứng suất cho phép.

Do các đặc tính của khớp xoay mềm có sự phụ thuộc vào thông số hình học của khớp xoay và chúng có sự mâu thuẫn lẫn nhau. Để cân bằng giữa các mục tiêu, tác giả đã đề xuất một giải thuật tối ưu mới. Giải thuật là sự kết hợp giữa phương pháp Taguchi, phương pháp phân tích phần tử hữu hạn, phương pháp đáp ứng bề mặt và thuật toán tối ưu bầy đàn.

Đầu tiên phương pháp Taguchi được sử dụng để xây dựng thực nghiệm bằng cách sử dụng mảng trực giao. Kế tiếp, dữ liệu của các đáp ứng đầu ra được sưu tập bằng cách sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn. Sau đó, phương pháp đáp ứng bề mặt được sử dụng để thành lập mô hình toán học cho các đặc tính của khớp xoay mềm. Đồng thời, trọng số của các hàm mục tiêu được tính toán dựa trên độ nhạy của các hàm mục tiêu và ảnh hưởng của các biến thiết kế đến các hàm mục tiêu. Kết quả trọng số cho hàm mục tiêu khối lượng là 0.4983 và trọng số cho hàm mục tiêu góc xoay là 0.5017. Cuối cùng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn được áp dụng để tối ưu hóa thông số hình học của khớp xoay.

Kết quả tối ưu được tìm thấy với giá trị không gian  $D$  là 56 mm và chiều dày  $t = 0.841$  mm. Khối lượng, góc xoay và ứng suất sinh ra lần lượt là 0.036 gr, 58.8067 độ và 326.63 MPa. Sai số giữa kết quả tối ưu và phân tích phần tử hữu hạn lần lượt 0.2725%, 0.6567% và 2.5625% tương ứng với khối lượng, góc xoay và ứng suất. Với sai số nhỏ như vậy chứng tỏ phương pháp tối ưu lai đề xuất đảm bảo độ tin cậy.

### 3.2 Kiến nghị

Quá trình nghiên cứu và phát triển khớp xoay mềm cho thiết bị hỗ trợ vận động chi trên. Mặc dù đã đạt được những kết quả ban đầu tuy nhiên nghiên cứu này vẫn chưa xét đến độ bền mỏi, ảnh hưởng của thông số chiều rộng  $b$ . trong tương lai tác giả sẽ tiếp tục:

- Nghiên cứu thêm ảnh hưởng của tất cả các thông số của khớp xoay đến các đáp ứng.
- Nghiên cứu độ bền mỏi của khớp xoay.

## SẢN PHẨM CỦA ĐỀ TÀI

1. **Ngoc Le Chau**, Hieu Giang Le, Thanh-Phong Dao, Minh Phung Dang, and Van Anh Dang. "Efficient Hybrid Method of FEA-Based RSM and PSO Algorithm for Multi-Objective Optimization Design for a Compliant Rotary Joint for Upper Limb Assistive Device." *Mathematical Problems in Engineering* 2019 (2019) (SCIE)

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. S. Hossain, S. Hardy, A. Alamri, A. Alelaiwi, V. Hardy, and C. Wilhelm, "Ar-based serious game framework for post-stroke rehabilitation," *Multimedia Systems*, vol. 22, pp. 659-674, 2016.
- [2] M. Dąbrowska-Bender, M. Milewska, A. Gołąbek, A. Duda-Zalewska, and A. Staniszevska, "The impact of ischemic cerebral stroke on the quality of life of patients based on clinical, social, and psychoemotional factors," *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, vol. 26, pp. 101-107, 2017.
- [3] N. L. Chau, H. G. Le, T.-P. Dao, M. P. Dang, and V. A. Dang, "Efficient Hybrid Method of FEA-Based RSM and PSO Algorithm for Multi-Objective Optimization Design for a Compliant Rotary Joint for Upper Limb Assistive Device," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [4] M. Pazzaglia and M. Molinari, "The embodiment of assistive devices—from wheelchair to exoskeleton," *Physics of life reviews*, vol. 16, pp. 163-175, 2016.
- [5] M. J. Matarić, "Socially assistive robotics: Human augmentation versus automation," *Science Robotics*, vol. 2, p. eaam5410, 2017.
- [6] L. L. Howell, *Compliant mechanisms*: John Wiley & Sons, 2001.
- [7] H.-T. Pham, M.-N. Le, and V.-T. Mai, "A Novel Multi-Axis Compliant Prosthetic Ankle Foot to Support the Rehabilitation of Amputees," in *2016 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2016, pp. 238-243.
- [8] D. N. Nguyen, T.-P. Dao, N. L. Chau, and V. A. Dang, "Hybrid Approach of Finite Element Method, Kriging Metamodel, and Multiobjective Genetic Algorithm for Computational Optimization of a Flexure Elbow Joint for Upper-Limb Assistive Device," *Complexity*, vol. 2019, 2019.
- [9] T. T. Nguyen, T.-P. Dao, and S.-C. Huang, "Biomechanical design of a novel six dof compliant prosthetic ankle-foot 2.0 for rehabilitation of amputee," in *ASME*

*2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2017.

- [10] E. G. Merriam, J. M. Lund, and L. L. Howell, "Compound joints: Behavior and benefits of flexure arrays," *Precision Engineering*, vol. 45, pp. 79-89, 2016.
- [11] C. Tatsch, A. Ahmadi, F. Bottega, J. Tani, and R. da Silva Guerra, "Dimitri: an Open-Source Humanoid Robot with Compliant Joint," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 91, pp. 291-300, 2018.
- [12] R. Mutlu, G. Alici, M. in het Panhuis, and G. M. Spinks, "3D printed flexure hinges for soft monolithic prosthetic fingers," *Soft Robotics*, vol. 3, pp. 120-133, 2016.
- [13] D. Kang and D. Gweon, "Analysis and design of a cartwheel-type flexure hinge," *Precision Engineering*, vol. 37, pp. 33-43, 2013.
- [14] B. T. Knox and J. P. Schmiedeler, "A unidirectional series-elastic actuator design using a spiral torsion spring," *Journal of Mechanical Design*, vol. 131, p. 125001, 2009.
- [15] A. A. D. Brown, "Engineering design guides mechanical springs," *Oxford University Press*, vol. 42, 1981.
- [16] N. Le Chau, S.-C. Huang, T.-P. Dao, and H. G. Le, "Design and analysis of a new gear-driven compliant torsional spring for upper-limb biomedical rehabilitation device," in *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2017, pp. 40-45.
- [17] W. G. Lan, M. K. Wong, N. Chen, and Y. M. Sin, "Orthogonal array design as a chemometric method for the optimization of analytical procedures. Part 1. Two-level design and its application in microwave dissolution of biological samples," *The Analyst*, vol. 119, pp. 1659-1667, 1994.
- [18] S.-C. Huang and T.-P. Dao, "Multi-objective optimal design of a 2-DOF flexure-based mechanism using hybrid approach of grey-Taguchi coupled response

- surface methodology and entropy measurement," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, pp. 5215-5231, 2016.
- [19] G. Zheng, S. Wu, G. Sun, G. Li, and Q. Li, "Crushing analysis of foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 87, pp. 226-240, 2014.
- [20] N. L. Ho, T.-P. Dao, N. Le Chau, and S.-C. Huang, "Multi-objective optimization design of a compliant microgripper based on hybrid teaching learning-based optimization algorithm," *Microsystem Technologies*, vol. 25, pp. 2067-2083, 2019.
- [21] T.-P. Dao and S.-C. Huang, "Design, fabrication, and predictive model of a 1-DOF translational flexible bearing for high precision mechanism," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 39, pp. 419-429, 2015.
- [22] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization (PSO)," in *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*, 1995, pp. 1942-1948.



