

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

CHÂU NGỌC LÊ

PHÁT TRIỂN VÀ TỐI ƯU HÓA CƠ CẤU CÂN BẰNG TRỌNG LỰC  
SỬ DỤNG CƠ CẤU MỀM

Chuyên ngành: Kỹ Thuật Cơ Khí

Mã số chuyên ngành: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH, NĂM 2023

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp. HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: TS. Đào Thanh Phong

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. Lê Hiếu Giang

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở/Trường  
học tại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày      tháng      năm

# DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

## Tạp chí ISI:

1. **Ngoc Le Chau**, Van Anh Dang, Hieu Giang Le, Thanh-Phong Dao (2017). Robust parameter design and analysis of a leaf compliant joint for micropositioning systems. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(11), 4811-4823. (SCIE – Q2)
2. **Ngoc Le Chau**, Hieu Giang Le, Thanh-Phong Dao, Minh Phung Dang, Dang, V. A. (2019). 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. (SCIE – Q2)
3. **Ngoc Le Chau**, Hieu Giang Le, Thanh-Phong Dao, Van Anh Dang (2019). Design and optimization for a new compliant planar spring of upper limb assistive device using hybrid approach of RSM–FEM and MOGA. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(9), 7441-7456. (SCIE – Q2)
4. **Ngoc Le Chau**, Hieu Giang Le, Van Anh Dang, Thanh-Phong Dao (2021). Development and Optimization for a New Planar Spring Using Finite Element Method, Deep Feedforward Neural Networks, and Water Cycle Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. (SCIE – Q2)
5. **Ngoc Le Chau**, Minh Phung Dang, Chander Prakash, Dharam Buddhi, Thanh-Phong Dao, (2022). Structural optimization of a rotary joint by hybrid method of FEM, neural-fuzzy and water cycle–moth flame algorithm for robotics and automation manufacturing. *Robotics and Autonomous Systems*, 156, 104199. (SCIE – Q1)

## Hội nghị khoa học:

1. **Ngoc Le Chau**, Shyh-Chour Huang, **Dao, Thanh-Phong Dao**, **Hieu Giang Le** (2017, October). 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)* (pp. 40-45). IEEE
2. **Ngoc Le Chau**, **Thanh-Phong Dao**, **Hieu Giang Le**, Tan Thang Nguyen, and Manh Tuan Bui. (2018). Optimal Design for a New Compliant Torsion Spring of an Assistive Device for Upper Limb Using Hybrid Approach of Taguchi Method, Response Surface Method, and Cuckoo Search Algorithm. *The First International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development. (MMMS), 2018* (ISBN: 978-604-95-0502-7), pp. 275-282.
3. **Ngoc Le Chau**, Ho, Nhat Linh Ho, Minh Phung Dang, Dao, Thanh-Phong Dao, **Hieu Giang Le**. (2017) Optimal design of a new compliant planar

spring for the upper limb movement support device with free energy adjustment. Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ X. (pp. 859-867)

4. **Ngoc Le Chau, Hieu Giang Le, Thanh-Phong** (2020, November). A Gravity Balance Mechanism Using Compliant Mechanism. In International Conference on Green Technology and Sustainable Development (pp. 431-439). Springer, Cham. (Scopus).

# MỞ ĐẦU

## 1. Lý do chọn đề tài

Cân bằng trọng lực được dùng trong nhiều thiết bị, máy móc. Nó có công dụng loại bỏ hoặc giảm ảnh hưởng của trọng lực. Nó giúp thiết bị, máy móc tiêu tốn ít năng lượng hơn trong quá trình vận hành. Hiện nay, cơ cấu cân bằng trọng lực đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như cần cẩu, đế đèn bàn, Robot công nghiệp, Robot phục vụ, thiết bị phục hồi chức năng, thiết hỗ trợ vận động cho người bị yếu cơ, v.v. Đặc biệt, đối với thiết bị hỗ trợ vận động cho người bị yếu cơ, để thuận lợi cho việc sử dụng đòi hỏi thiết bị phải nhỏ gọn, nhẹ. Ngoài ra, trong sinh hoạt hàng ngày, người sử dụng thiết bị thường thực hiện các thao tác khác nhau như rửa mặt, ăn uống. Khi đó, cánh tay của họ phải nâng hạ các vật với khối lượng khác nhau. Do đó, yêu cầu cơ cấu cân bằng trọng lực phải cho phép điều chỉnh tải trọng.

Để cơ cấu cân bằng có kích thước nhỏ gọn, một số nhà khoa học đã sử dụng cơ cấu mềm để thiết kế cơ cấu cân bằng trọng lực. Trong việc phát triển cơ cấu cân bằng có thể thay đổi tải trọng trọng mà không cần sử dụng lực lớn, một số nhà nghiên cứu sử dụng cách thay đổi độ cứng của lò xo bằng cách thay đổi số vòng xoắn làm việc hoặc thay đổi vị trí kết nối của lò xo. Với những cách này có thể điều chỉnh độ cứng lò xo với một lực tác dụng nhỏ. Tuy nhiên, kích thước của cơ cấu cân bằng trọng lực lớn, kết cấu phức tạp.

Từ phân tích trên, nghiên cứu sinh chọn đề tài *“Phát triển và tối ưu hóa cơ cấu cân bằng trọng lực sử dụng cơ cấu mềm”*. Cơ cấu cân bằng sử dụng cơ cấu mềm có kết cấu nhỏ gọn. Ngoài ra, cơ cấu này cho phép điều chỉnh tải trọng bằng cách thay đổi độ cứng của lò xo một cách dễ dàng.

## 2. Mục đích nghiên cứu

Phát triển cơ cấu cân bằng trọng lực có khả năng điều chỉnh tải trọng dễ dàng bằng cách sử dụng cơ cấu mềm, kích thước nhỏ gọn.

## 3. Nhiệm vụ nghiên cứu

Thiết kế, phân tích cơ cấu cân bằng trọng lực có khả năng điều chỉnh tải trọng với kích thước nhỏ gọn, thiết kế, phân tích tối ưu hóa các chi tiết quan trọng trong cơ cấu cân bằng trọng lực (Lò xo phẳng và khớp xoay mềm), xây dựng quy trình

cho việc thiết kế, phân tích và tối ưu hóa cho các chi tiết đàn hồi (Lò xo phẳng và khớp xoay mềm).

#### **4. Phạm vi nghiên cứu**

Thiết kế cơ cấu cân bằng trọng lực bị động bằng cách kết hợp một khớp xoay mềm và một lò xo phẳng, cơ cấu hoạt động trong phạm vi từ 0 đến  $30^0$ , tải trọng trong thay đổi từ 0,25 đến 1 kg, xây dựng quy trình cho việc thiết kế, phân tích và tối ưu hóa khớp xoay mềm và lò xo phẳng.

#### **5. Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu**

##### **Hướng tiếp cận:**

Để hoàn thành luận án này, nghiên cứu sinh thực hiện thiết kế cơ dựa trên nguyên lý cân bằng mô men. Tổng mô men bằng không. Sau đó tính toán độ cứng của khớp xoay mềm và lò xo phẳng. Tiếp theo, thiết kế, phân tích và tối ưu hóa cho khớp xoay mềm và lò xo phẳng. Cuối cùng chế tạo, thực nghiệm để đánh giá kết quả phân tích tính toán.

##### **Phương pháp nghiên cứu:**

Nghiên cứu sinh sử dụng các phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn, phân tích tĩnh học, thống kê kinh nghiệm, thử sai, Taguchi, đáp ứng bề mặt, Topology, tối ưu hóa di truyền đa mục tiêu, tối ưu hóa bầy đàn, tối ưu hóa chu kỳ nước, tối ưu hóa chu kỳ nước kết hợp con thiêu thân, mô hình hóa bằng thuật toán thông minh.

#### **6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của nghiên cứu**

**Về ý nghĩa khoa học:** Nghiên cứu sinh (NCS) đã phát triển các phương pháp tính toán thiết kế cơ cấu cân bằng trọng lực. NCS đã phát triển các phương pháp tính toán tối ưu cấu trúc và topo lai mới cho lò xo phẳng và xoay.

**Về ý nghĩa thực tiễn:** NCS đã phát triển mới một nguyên lý kết cấu cho cơ cấu cân bằng trọng lực, xây dựng quy trình cho việc thiết kế, phân tích và tối ưu hóa cho khớp xoay mềm và lò xo phẳng. Kết quả của đề tài là nguồn tài liệu tham

khảo hữu ích cho sinh viên, học viên cao học trong việc thiết kế, phân tích và tối ưu hóa các chi tiết tương tự.

## **7. Cấu trúc của luận án**

Cấu trúc của luận án gồm các chương như sau: Mở đầu, chương 1 tổng quan, chương 2 cơ sở lý thuyết, chương 3 thiết kế cơ cấu cân bằng trọng lực, chương 4 phát triển khớp xoay mềm, chương 5 phát triển lò xo phẳng, chương 6 thực nghiệm, chương 7 kết luận và hướng phát triển.

## **CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN**

### **1.1 Giới thiệu**

#### **1.1.1 Cơ cấu cân bằng trọng lực**

Cơ cấu cân bằng trọng lực là cơ cấu có thể loại bỏ ảnh hưởng của lực hấp dẫn do trọng lực của vật tạo ra. Khi một vật di chuyển với cơ cấu cân bằng trọng lực. Nó có thể chuyển động gần giống với chuyển động trong trạng thái chân không. Lúc này, năng lượng cần thiết để thực hiện các chuyển động là rất nhỏ. Nhờ những đặc tính nổi bật này mà cơ cấu cân bằng trọng lực được ứng dụng trong rất nhiều lĩnh vực khác. Hiện nay, có nhiều cách khác nhau để thực hiện cân bằng trọng lực cho thiết bị, máy móc. Các phương pháp này có thể được chia thành các loại như sau.

##### **1.1.1.1 Cân bằng trọng lực chủ động**

Cân bằng trọng lực chủ động được thực hiện theo nguyên lý phản hồi [1]. Phương pháp cân bằng chủ động có những ưu điểm nổi trội là khả năng đáp ứng cao. Tuy nhiên phương pháp này đòi hỏi kết cấu và điều khiển phức tạp.

##### **1.1.1.2 Cân bằng trọng lực bị động**

Cân bằng trọng lực bị động thường sử dụng các cơ cấu cân bằng trọng lực. Cơ cấu cân bằng trọng lực được chia làm ba loại [2] i) cơ cấu cân bằng trọng lực bị động sử dụng đối trọng, ii) cơ cấu cân bằng trọng lực sử dụng các chi tiết biến dạng đàn hồi, iii) Cơ cấu cân bằng trọng lực sử dụng kết hợp giữa lò xo và đối

trọng. Ngoài cách phân loại ở trên, cơ cấu cân bằng trọng lực còn được chia làm hai loại dựa trên tải trọng tác dụng lên cơ cấu: 1) Cơ cấu cân bằng trọng lực có tải trọng không thể điều chỉnh; 2) Cơ cấu cân bằng trọng lực có thể điều chỉnh tải trọng. Loại này chia làm hai nhóm dựa trên năng lượng dùng để điều chỉnh độ cứng lò xo: i) cơ cấu cân bằng trọng lực có khả năng thay đổi tải trọng nhưng khi điều chỉnh cần phải sử dụng năng lượng; ii) Cơ cấu cân bằng trọng lực có khả năng điều chỉnh tải trọng không cần năng lượng (energy free adjustment).

## **1.1.2 Cơ cấu mềm**

### **1.1.2.1 Khái niệm**

Cơ cấu mềm là cơ cấu mà cấu tạo của nó gồm các khâu động được liên kết với nhau bằng các khớp mềm hoặc các thanh mềm [3, 4].

### **1.1.2.2 Ưu điểm của cơ cấu mềm**

Cơ cấu mềm có những ưu điểm nổi bật [5, 6] như: Dễ chế tạo, số lượng chi tiết trong cơ cấu ít, thời gian lắp ráp của cơ cấu nhỏ, không cần bôi trơn, ít bị mòn, giảm khe hở trong các mối lắp, giúp tăng độ chính xác vị trí và chuyển động của cơ cấu, có khả năng tích lũy năng lượng để sinh công, giá thành chế tạo thấp, có kích thước nhỏ gọn, v.v.

### **1.1.2.3 Nhược điểm**

Bên cạnh những ưu điểm thì cơ cấu mềm cũng có những nhược điểm như khó thiết kế và phân tích, hiệu suất của cơ cấu thấp, dễ gây ra sai lệch tâm quay và độ cứng của cơ cấu mềm thường lớn.

### **1.1.2.4 Ứng dụng của cơ cấu mềm**

Hiện nay cơ cấu cân bằng trọng lực được sử dụng để: phát triển các cơ cấu tạo ra lực không đổi. [7], thiết kế các cơ cấu nhiều điểm ổn định [8], thiết kế các hệ thống vi cơ điện tử [9], phát triển các bộ định vị chính xác [10], thiết kế các tay gấp chính xác [11], trong các thiết bị y sinh [12], các cơ cấu chạy dao chính xác [13], phát triển các thiết bị phẫu thuật [14, 15], v.v.

## **1.2 Các công trình nghiên cứu liên quan**



## **1.2.1 Những nghiên cứu trong nước**

### **1.2.1.1 Nghiên cứu về cơ cấu cân bằng trọng lực**

Trong những năm gần đây, có một số nhóm tác giả đã nghiên cứu và phát triển cơ cấu cân bằng trọng lực chẳng hạn như: Hong-Nguyen Nguyen (2018) đã tính toán, thiết kế cơ cấu cân bằng trọng lực sử dụng cơ nguyên lý của cơ cấu Scotch Yoke [16, 17] và sử dụng cơ cấu này cho một cánh tay ba bậc tự do. Huỳnh Quốc Bảo (2018) đã nghiên cứu thực nghiệm khả năng hoạt động của cơ cấu cân bằng trọng lực một bậc tự do dựa trên nguyên lý hoạt động của cơ cấu Scotch Yoke [18]. Tác giả và các cộng sự (2020) [19] đã phát triển cơ cấu cân bằng trọng lực có khả năng điều chỉnh tải trọng và có kết cấu nhỏ gọn.

### **1.2.1.2 Nghiên cứu về cơ cấu mềm**

Trong nước, hiện nay một số nhóm nghiên cứu tiêu biểu đã và đang phát triển các loại cơ cấu mềm. Nhóm Huy-Tuan Pham [13, 20-22]. Ngọc Dang Khoa Tran và cộng sự [23]. Nhóm nghiên cứu của Thanh-Phong Dao và nghiên cứu sinh [24, 25].

## **1.2.2 Những nghiên cứu ngoài nước**

### **1.2.2.1 Trong lĩnh vực cơ cấu cân bằng**

Trong những năm gần đây cơ cấu cân bằng trọng lực nhận được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trên thế giới. Chu và Kou (2017) [26] đã nghiên cứu cơ cấu cân bằng trọng lực 1 bậc tự do có khả năng tự cân bằng tải trọng. Hung và Kou (2017) [27] đã phát triển cơ cấu cân bằng trọng lực 1 bậc tự do. Chew và các cộng sự (2019) [28] đã nghiên cứu cơ cấu cân bằng trọng lực bị động một bậc tự do có khả năng tự cân bằng. H. Kino và cộng sự (2018) [29] đã phát triển cơ cấu cân bằng chủ động 3 bậc tự do phẳng. Zhou và đồng sự (2020) [30] đã phát triển cơ cấu bù trọng lực cho bộ xương ngoài chi dưới. Franchetti và cộng sự (2021) [31] đã phát triển cơ cấu cân bằng bị động một bậc tự do có khả năng thay đổi tải trọng. Yang và Lan (2015) [32] đã sử dụng cơ cấu mềm để phát triển cơ cấu cân bằng trọng lực có thể thay đổi tải trọng.

### 1.2.2.2 Trong lĩnh vực cơ cấu mềm

Cơ cấu mềm có những ưu điểm nổi trội và có tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khoa học, công nghệ và đời sống. Do đó, cơ cấu mềm đã nhận được rất nhiều nhà khoa học nghiên cứu. Howell và cộng sự (2019) [33] đã nghiên cứu phương pháp thiết kế cho các cơ cấu đa vị trí ổn định sử dụng cơ cấu mềm. Ling và đồng sự (2017) đã phát triển một phương pháp mô hình hóa bán phân tích để phân tích động học và tĩnh học cho các cơ cấu mềm có cấu trúc phức tạp [34]. Zhang và Xu (2017) đã sử dụng cơ cấu mềm để thiết kế bàn định vị 3 bậc tự do sử dụng cơ cấu song song [35]. Chang và cộng sự (2022) đã tối ưu thiết kế cho bàn định vị hai bậc tự do sử dụng các thanh biến dạng đàn hồi [36]. Wang và Le (2021) đã tối ưu hóa thông số của tay gấp micro [37]. Zolfagharian và các cộng sự (2021) đã phát triển một tay gấp mềm bằng cách sử dụng lò xo xoắn ốc [38].

## 1.3 Tính cấp thiết của đề tài và ý nghĩa khoa học thực tiễn của đề tài

### 1.3.1 Tính cấp thiết

Như trình bày ở phần mở đầu, cơ cấu cân bằng trọng lực có nhiều ứng dụng trong khoa học, kỹ thuật và đời sống. Bên cạnh đó, cơ cấu mềm có ưu điểm kết cấu nhỏ gọn và có thể ứng dụng để chế tạo cơ cấu cân bằng trọng lực. Do đó, nghiên cứu sinh chọn đề tài “***Phát triển và tối ưu hóa cơ cấu cân bằng trọng lực sử dụng cơ cấu mềm***”. Cơ cấu cân bằng trọng lực được phát triển hướng tới các ứng dụng trong thiết bị hỗ trợ vận động. Vì vậy, cơ cấu có kết cấu nhỏ gọn, dễ điều chỉnh tải trọng.

### 1.3.2 Ý nghĩa khoa học thực tiễn của đề tài

Về cơ bản, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài này bao gồm: Phát triển mới một nguyên lý kết cấu cho cơ cấu cân bằng trọng lực, cơ cấu này dựa trên sự kết hợp giữa một lò xo phẳng và một khớp xoay mềm, đây là kết cấu chưa được nghiên cứu trước đây. Xây dựng quy trình cho việc thiết kế, phân tích và tối ưu hóa cho khớp xoay mềm và lò xo phẳng. Đề tài là tài liệu tham khảo hữu ích cho sinh viên, học viên cao học trong việc thiết kế, phân tích và tối ưu hóa các chi tiết tương tự.

## **1.4 Mục đích nghiên cứu, đối tượng nghiên cứu**

### **1.4.1 Mục đích nghiên cứu**

Phát triển một cơ cấu cân bằng trọng lực có khả năng điều chỉnh tải trọng dễ dàng bằng cách sử dụng cơ cấu mềm. Phát triển qui trình để thiết kế, phân tích, tổng hợp và tối ưu hóa cho cơ cấu mềm.

### **1.4.2 Đối tượng nghiên cứu**

Đối tượng nghiên cứu là lò xo phẳng, khớp xoay mềm và cơ cấu cân bằng trọng lực.

## **1.5 Nhiệm vụ và phạm vi nghiên cứu**

### **1.5.1 Nhiệm vụ nghiên cứu**

Thiết kế, phân tích cơ cấu cân bằng trọng lực có khả năng điều chỉnh tải trọng với kích thước nhỏ gọn, thiết kế, phân tích tối ưu hóa các chi tiết quan trọng trong cơ cấu cân bằng trọng lực (Lò xo phẳng và khớp xoay mềm), xây dựng quy trình cho việc thiết kế, phân tích và tối ưu hóa cho các chi tiết đàn hồi (Lò xo phẳng và khớp xoay mềm).

### **1.5.2 Phạm vi nghiên cứu**

Thiết kế cơ cấu cân bằng trọng lực bị động bằng cách kết hợp một khớp xoay mềm và một lò xo phẳng, cơ cấu hoạt động trong phạm vi từ 0 đến 30<sup>0</sup>, tải trọng trong thay đổi từ 0,25 đến 1 kg, xây dựng quy trình cho việc thiết kế, phân tích và tối ưu hóa khớp xoay mềm và lò xo phẳng.

## **1.6 Phương pháp nghiên cứu**

Nghiên cứu sinh sử dụng các phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn, phân tích tĩnh học, thống kê kinh nghiệm, thử sai, Taguchi, đáp ứng bề mặt, Topology, tối ưu hóa di truyền đa mục tiêu, tối ưu hóa bầy đàn, tối ưu hóa chu kỳ nước, tối ưu hóa chu kỳ nước kết hợp con thiêu thân, mô hình hóa bằng thuật toán thông minh.

## CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1 Nguyên lý cân bằng trọng lực

Hiện nay có một số mô tả toán học cơ cơ cấu cân bằng trọng lực đó là: 1) trọng tâm của hệ thống luôn được cố định trong suốt quá trình hoạt động; 2) Thế năng của hệ thống không thay đổi trong suốt quá trình làm việc; 3) hệ thống có bộ điều khiển để bù sự cho tình trạng mất cân bằng của máy trong suốt quá trình làm việc.

#### 2.1.1 Nguyên lý cân bằng trọng lực bằng cách cố định khối tâm

#### 2.1.2 Nguyên lý cân bằng trọng lực bằng cách duy trì thế năng của hệ thống

#### 2.1.3 Nguyên lý điều chỉnh cho cơ cấu cân bằng trọng lực có thể điều chỉnh tải trọng

Để điều chỉnh cơ cấu cân bằng trọng lực khi tải trọng thay đổi chúng ta có thể điều chỉnh một trong ba yếu tố để duy trì điều kiện cân bằng đó cánh tay đòn, vị trí kết nối của lò xo hoặc độ cứng của lò xo. Có hai cách để điều chỉnh độ cứng của lò xo đó là điều chỉnh tiếp xúc của lò xo hoặc thay đổi số vòng xoắn làm việc.

##### 2.1.3.1 Điều chỉnh điểm kết nối của lò xo

##### 2.1.3.2 Điều chỉnh độ cứng của lò xo

### 2.2 Phương pháp mô hình hóa

Để mô hình hóa ứng xử của các chi tiết biến dạng đàn hồi, cơ cấu mềm, các nhà khoa học đã phát triển nhiều phương pháp khác nhau chẳng hạn như: Lý thuyết biến dạng đàn hồi của dầm [39]; phương pháp ma trận [40]; định lý thứ hai của Castigliano [41]; phương pháp của Ryu [42]; phương pháp giả cứng [43]; phương pháp phân tích phần tử hữu hạn [34]. Trong nghiên cứu này cơ cấu cân bằng trọng lực được thiết kế dựa trên cơ cấu mềm. Cụ thể, cơ cấu cân bằng trọng lực sử dụng kết hợp một lò xo phẳng và một khớp xoay mềm. Hai chi tiết biến dạng đàn hồi này có cấu trúc tương đối phức tạp, tính phi tuyến cao. Do đó phương pháp phân tích phần tử hữu hạn kết hợp với các phương pháp xấp xỉ được

sử dụng để mô hình hóa hành vi của các chi tiết đàn hồi.

## **2.2.1 Phương pháp phân tích phần tử hữu hạn**

### **2.2.1.1 Chia lưới**

### **2.2.1.2 Chất lượng lưới**

## **2.2.2 Phương pháp mạng nơ ron học sâu**

## **2.2.3 Phương pháp đáp ứng bề mặt**

## **2.2.4 Mạng nơ ron thích nghi mờ**

## **2.3 Phương pháp tối ưu hóa thiết kế**

Để nâng cao hiệu quả làm việc của các chi tiết, cơ cấu, các nhà khoa học thường thực hiện quá trình tối ưu hóa. Bản chất của quá tối ưu là tìm kiếm các giải pháp tối ưu trong không gian thiết kế bằng cách so sánh các giải pháp khác nhau để tìm được một giải pháp tối ưu hay có thể chấp nhận được. Phương pháp tìm ra các giả pháp tối ưu được gọi là thuật toán tối ưu.

### **2.3.1 Thuật toán tối ưu hóa di truyền đa mục tiêu**

### **2.3.2 Thuật toán chu kỳ nước**

### **2.3.3 Thuật toán tối ưu hóa bầy đàn**

### **2.3.4 Thuật toán tối ưu hóa chu kỳ nước kết hợp con thiêu thân**

#### **2.3.4.1 Thuật toán con thiêu thân**

#### **2.3.4.2 Kết hợp thuật toán chu kỳ nước với thuật toán con thiêu thân**

## **2.4 Kết luận**

## **CHƯƠNG 3 THIẾT KẾ CƠ CẤU CÂN BẰNG TRỌNG LỰC**

### **3.1 Mục tiêu thiết kế**

Mục tiêu của thiết kế cân bằng trọng lực là thiết kế cơ cấu cân bằng trọng lực một bậc tự do, có thể điều chỉnh tải trọng trong phạm vi từ 0,25 kg đến 1 kg, điều chỉnh tải trọng bằng cách điều chỉnh độ cứng lò xo, quá trình điều chỉnh không

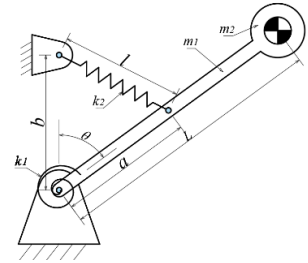
cần dễ dàng.

### 3.2 Thiết kế nguyên lý

Sơ đồ động của cơ cấu cân bằng trọng lực được thiết kế như hình 3.1.

$$(0,5m_1 + m_2).L.g = k_1 + k_2.a.b \quad (3.8)$$

Phương trình cân bằng của cơ cấu như công thức 3.8.



**Hình 3.1:** Sơ đồ nguyên lý của cơ cấu cân bằng trọng lực

### 3.3 Xác định độ cứng của lò xo

Các thông số của cơ cấu cân bằng trọng lực được lựa chọn như bảng 3.1.

**Bảng 3.1:** Thông số của cơ cấu cân bằng đề xuất

Yếu tố	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$L$ (mm)	$m_1$ (kg)	$m_2$ (kg)	$\theta_{max}$ (độ)
Giá trị	65	65	400	0,2	0,25 – 1,0	30

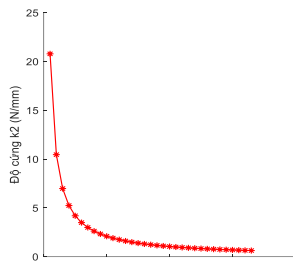
**Bảng 3.2:** Giá trị độ cứng  $k_1$  và  $k_2$

$k_1$ (N/mm)	$k_2$ (N/mm)					
	0,25 kg	0,4 kg	0,6 kg	0,8 kg	0,9 kg	1,0 kg
200	0,27	0,41	0,60	0,79	0,88	0,97

### 3.4 Nguyên lý điều chỉnh phi năng lượng

#### 3.4.1 Nguyên lý điều chỉnh

Độ cứng của lò xo được điều chỉnh bằng cách thay đổi số phân đoạn làm việc của lò xo. Mối quan hệ giữa độ cứng và số phân đoạn được thể hiện trong hình 3.6.



**Hình 3.6:** Mối quan hệ giữa độ cứng và số phân đoạn làm việc

#### 3.4.2 Điều chỉnh độ cứng không sử dụng năng lượng

Quá trình thay đổi số vòng xoắn làm việc bằng cách thay đổi vị trí của miếng

chêm.

### 3.5 Kết luận

## CHƯƠNG 4 PHÁT TRIỂN KHỚP XOAY MỀM

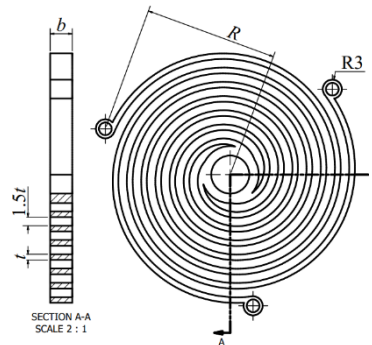
### 4.1 Yêu cầu của khớp xoay mềm

Khớp xoay mềm có độ cứng 200 N/mm, có thể quay được góc hơn 30°, ứng suất sinh ra nhỏ hơn ứng suất cho phép, kích thước không vượt quá 100 mm, càng nhẹ càng tốt.

### 4.2 Phát triển khớp xoay mềm dựa trên FEM kết hợp RSM và thuật toán tối ưu bầy đàn

#### 4.2.1 Giới thiệu

Khớp xoay mềm thiết kế là một chi tiết biến dạng đàn hồi. Việc phân tích, tổng hợp và mô hình hóa cho vẫn còn khó khăn. Vì vậy, trong nghiên cứu này đề xuất một giải pháp lai kết hợp giữa phương pháp phân tích phần tử hữu hạn, phương pháp đáp ứng bề mặt để phân tích, mô hình hóa cho khớp xoay. Ngoài ra, các đặc tính của khớp xoay này chịu ảnh hưởng rất lớn bởi các thông số hình học của nó. Vì vậy, việc tối ưu hóa kích thước cho khớp xoay là cần thiết. Trong nghiên cứu này, thuật toán bầy đàn (PSO) được sử dụng để tối ưu hóa thông số hình học của khớp xoay.



**Hình 4.1:** Kết cấu của khớp xoay mềm

#### 4.2.2 Thiết kế khớp xoay mềm

Khớp xoay mềm được thiết kế như hình 4.1.

#### 4.2.3 Đề xuất quy trình thiết kế khớp xoay mềm

Quy trình thiết kế và tối ưu hóa khớp xoay mềm được thực hiện theo sơ đồ trong hình 4.2.

### 4.2.3.1 Bài toán tối ưu

Bài toán tối ưu hóa được trình bày ngắn gọn như sau: Xác định:  $\mathbf{X} = [R, t]^T$ . Tối thiểu hóa khối lượng  $f_1(x)$ . Các ràng buộc và giới hạn biến thiết kế:  $f_2(\mathbf{X}) = 30^\circ, f_3(\mathbf{X}) \leq 295 \text{ MPa}$ ,  $0,8 \text{ mm} \leq t \leq 1,2 \text{ mm}$ ,  $40 \text{ mm} \leq R \leq 45 \text{ mm}$ .

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

### 4.2.3.2 Đánh giá độ nhạy của biến thiết kế

Sử dụng phương pháp

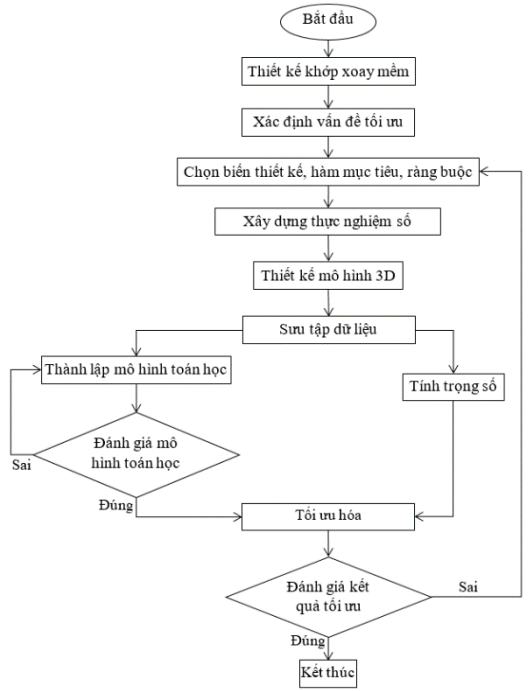
Taguchi với mảng trực giao  $L_9$ . Sau đó FEA được sử dụng để thu thập dữ liệu. kế tiếp, 3 mô hình toán cho khối lượng, biến dạng và ứng suất được xây dựng bằng phương pháp RSM. Mô hình toán học sau đó được kiểm tra với FEA. Kết quả sai số trung bình là 0,053% cho khối lượng, 2,64 % cho ứng suất và 1,5 % cho biến dạng.

### 4.2.3.3 Tối ưu hóa và phân tích thống kê

Kích thước của khớp xoay mềm được tối ưu bằng thuật toán PSO. Kết quả tối ưu đạt được với kích thước của khớp xoay mềm như sau,  $R= 40 \text{ mm}$  và  $t= 0,94 \text{ mm}$ .

### 4.2.4 Đánh giá kết quả tối ưu

Sai số giữa kết quả tối ưu và FEA lần lượt là 6,1 % và 1,68% cho khối lượng



Hình 4.2: Quy trình thiết kế và tối ưu hóa đề xuất



và biến dạng, sai số của ứng suất sinh ra là 5,6 %.

### 4.3 Phát triển khớp xoay mềm dựa trên phương pháp tối ưu hóa cấu trúc kết hợp FEM, phương pháp mạng trí tuệ nhân tạo mờ và thuật toán tối ưu hóa chu kỳ nước – con thiêu thân

#### 4.3.1 Giới thiệu

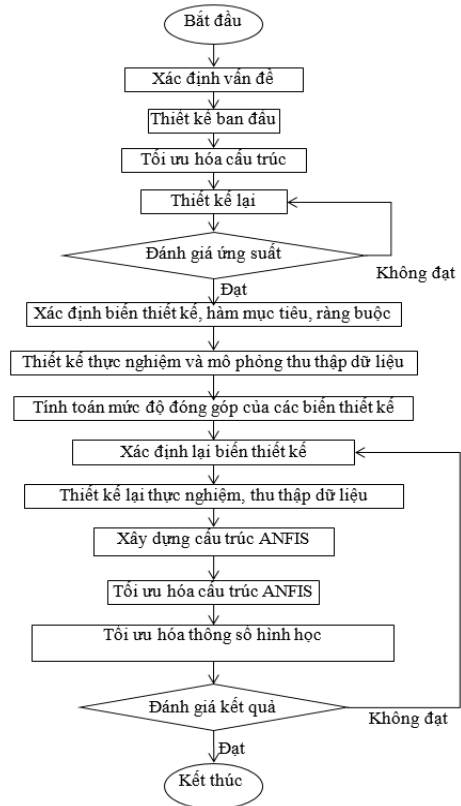
Khớp xoay mềm là chi tiết rất quan trọng trong cơ cấu cân bằng trọng lực do nghiên cứu sinh và các cộng sự thiết kế [19]. Chi tiết này phải nhỏ gọn, nhẹ, biến dạng đủ lớn và chịu được tải trọng càng lớn càng tốt. Các đặc tính này chịu ảnh hưởng lớn bởi các thông số hình học của khớp xoay. Mặt khác, mức độ ảnh hưởng của các thông số hình học đến các đặc tính cũng không đồng nhất. Vì vậy, thiết kế, tối ưu hóa thông số hình học cho khớp xoay là vô cùng cần thiết.

#### 4.3.2 Đề xuất phương pháp thiết kế, tối ưu

Tối ưu hóa việc sử dụng vật liệu là một yêu cầu cần thiết của khớp xoay. Vì vậy, Topology được sử dụng đầu tiên, kế tiếp thông số hình học của khớp xoay sẽ được tối ưu hóa. Quá trình thiết kế và tối ưu hóa khớp xoay được thực hiện theo sơ đồ trong hình 4.7.

#### 4.3.3 Bài toán tối ưu

Khớp xoay sử dụng cho cơ cấu cân bằng trọng lực được thiết kế



**Hình 4.7:** Quy trình thiết kế khớp xoay

cần phải nhỏ gọn, nhẹ, đảm bảo bền, đảm bảo độ cứng và năng lượng biến dạng lớn. Trong khi đó, các đặc tính trên chịu sự ảnh hưởng của thông số hình học của khớp xoay và mức độ ảnh hưởng không giống nhau. Vì vậy, giải pháp lai giữa Topology và tối ưu hóa thông số hình học của khớp xoay được đề xuất

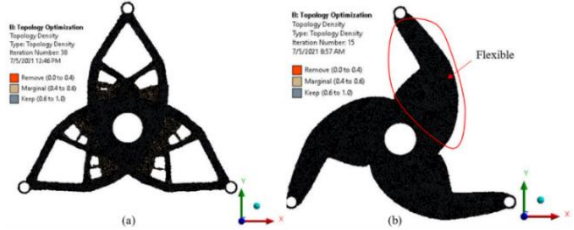
### 4.3.4 Kết quả

#### 4.3.4.1 Thiết kế ban đầu của khớp xoay

Để Tối ưu hóa cấu trúc Topo (Topology) của Khớp xoay, chúng ta cần phải tạo ra miền thiết kế ban đầu.

#### 4.3.4.2 Topology

Sau khi có miền thiết kế ban đầu, mô hình được chia lưới. Chất lượng lưới được đánh giá theo tiêu chuẩn Skewness. Tiếp theo quá trình Topology được thực hiện. Kết quả tối ưu cấu trúc Topo cho hai miền



**Hình 4.15:** Kết quả Topology a) mô hình 1, b) mô hình 2

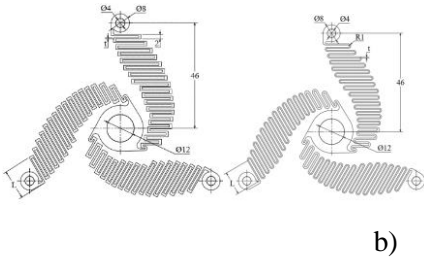
thiết kế ban đầu như hình 4.15.

#### 4.3.4.3 Tối ưu hóa kích thước

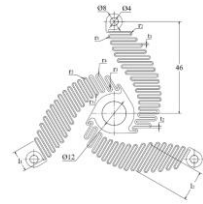
Cấu trúc của khớp xoay được đề xuất bởi Topology như hình được thiết kế lại dạng zic zắc như trong hình 4.16 a và 4.16 b. Sau khi kiểm tra ứng suất, cấu trúc của mô hình thiết kế 2 được lựa chọn cho công việc tiếp theo. Trong quá trình mô phỏng cũng cho thấy ứng suất sinh ra ở những đoạn zic zắc bên trong có ứng suất lớn hơn các đoạn zic zắc bên ngoài. Do đó, các đoạn zic zắc được chia làm 2 nhóm, Nhóm thứ nhất có chiều dày  $t_1$ , bán kính chuyển tiếp  $r_1$ . Nhóm thứ 2 có chiều dày  $t_2$  và bán kính chuyển tiếp  $r_2$  như được thể hiện trong hình 4.18.

Các biến thiết kế được chia làm 3 mức, phương pháp CCD được sử dụng để

thiết kế thực nghiệm. Sau đó chia lưới và mô phỏng. Phân tích ANOVA được sử dụng để loại bỏ những biến thiết kế có đóng góp thấp và giá trị  $P$  lớn hơn 0,05. Sau đó năm biến còn lại là  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $r_1$  tiếp tục được sử dụng để thu thập dữ liệu. Trước khi sử dụng ANFIS để xây dựng các mô hình xấp xỉ. Cấu trúc ANFIS được tối ưu hóa bằng phương pháp Taguchi. Sau khi xây dựng được mô hình xấp xỉ, thuật toán WCMFO được sử dụng để tối ưu hóa thông số của khớp xoay. Kết quả tối ưu tìm được  $r_1$  là 0,5 mm,  $t_1$  là 0,36 mm,  $t_2$  là 0,41 mm,  $l_1$  là 11,3 mm,  $l_2$  là 14,74 mm.



**Hình 4.16:** Cấu trúc thiết kế của khớp xoay a) thiết kế 1, b) thiết kế 2



**Hình 4.18:** Thiết kế của khớp xoay

#### 4.3.4.4 Xác nhận kết quả

Kết quả tối ưu sau đó được đánh so sánh với FEA. Kết quả cho thấy rằng sai số số dự đoán của mômen, ứng suất và năng lượng là 4,59% và 4,16% và 4,73%

#### 4.3.5 Kết luận

Trong đề mục này, nghiên cứu sinh đã phát triển và tối ưu hóa được một khớp xoay sử dụng cho cơ cấu cân bằng trọng lực có kết cấu nhỏ gọn, mô men làm việc lớn và ứng suất sinh ra nhỏ. Quy trình thiết kế tối ưu được thực hiện bằng cách kết hợp giữa FEM, Topology, ANFIS và thuật toán WCMFO.

#### 4.4 Kết luận

Trong chương này tác giả đã đề xuất hai phương pháp để thiết kế và tối ưu hóa cho Khớp xoay. Phương pháp thứ nhất kết hợp giữa FEM, phương pháp đáp ứng bề mặt và thuật toán tối ưu hóa di truyền đa mục tiêu. Phương pháp thứ hai

kết hợp giữa Topology với FEM, ANFIS và WCMFO. Cả hai phương pháp đề xuất đều có độ tin cậy cao.

## CHƯƠNG 5 PHÁT TRIỂN Lò XO PHẪNG

### 5.1 Yêu cầu của lò xo phẳng

Để thỏa mãn điều kiện làm việc của cơ cấu cân bằng trọng lực thì lò xo phẳng được phát triển phải thỏa mãn các điều kiện làm việc sau: cho phép điều chỉnh được độ cứng, độ cứng lớn nhất khi điều chỉnh có giá trị 0,97 N/mm, độ cứng nhỏ nhất 0,27 N/mm, ứng suất sinh ra phải nhỏ hơn ứng suất cho phép, năng lượng biến dạng lớn. Sử dụng vật liệu AL T73 - 7075.

### 5.2 Phát triển lò xo phẳng sử dụng FEM kết hợp RSM và thuật toán tối ưu hóa di truyền đa mục tiêu

#### 5.2.1 Giới thiệu

Trong đề mục này nghiên cứu sinh đề xuất cấu trúc lò xo phẳng thứ nhất cho cơ cấu cân bằng trọng lực. Cấu trúc này có dạng zích zắc nhằm tạo ra biến dạng đủ lớn và kết cấu nhỏ gọn.

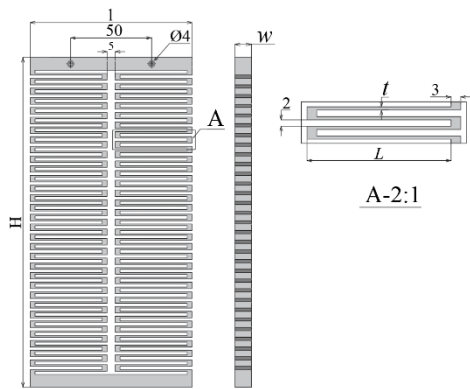
#### 5.2.2 Thiết kế cấu trúc cho lò xo phẳng

Cấu trúc của lò xo phẳng là sự kết hợp của các lò xo lá được sắp xếp theo hình zích zắc như hình 5.1.

#### 5.2.3 Xây dựng bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu

##### 5.2.3.1 Biến thiết kế

Biến thiết kế gồm chiều dài  $L$ , chiều rộng  $w$  và chiều dày  $t$  và có giới hạn kích thước như sau:  $39,5 \text{ mm} \leq L \leq 44,5 \text{ mm}$ ,  $0,9 \text{ mm} \leq t \leq 1,3 \text{ mm}$ ,  $9 \text{ mm} \leq w \leq 11 \text{ mm}$ ,



**Hình 5.1:** Cấu trúc của lò xo phẳng

### 5.2.3.2 Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu được lựa chọn để tối ưu hóa đa mục tiêu bao gồm: khối lượng của lò xo  $y_2(L, t, w)$ , Tóm lại, quá trình tối ưu có thể tuyên bố ngắn gọn như sau:

Tìm biến thiết kế:  $L, t, w$ , để cực tiểu khối lượng.

### 5.2.3.3 Ràng buộc

Để đảm bảo độ cứng của lò xo phẳng, biến dạng sinh ra phải bằng 33,565 mm. Đồng thời, ứng suất khi tải trọng lớn nhất phải nhỏ hơn ứng suất cho phép. Vì vậy biến dạng và ứng suất được ràng buộc.  $y_1(X) = 33,464$  mm,  $y_3(X) \leq 105$  MPa

### 5.2.4 Đề xuất qui trình thiết kế tối ưu

Qui trình thiết kế tối ưu cho lò xo phẳng được đề xuất như hình 5.2

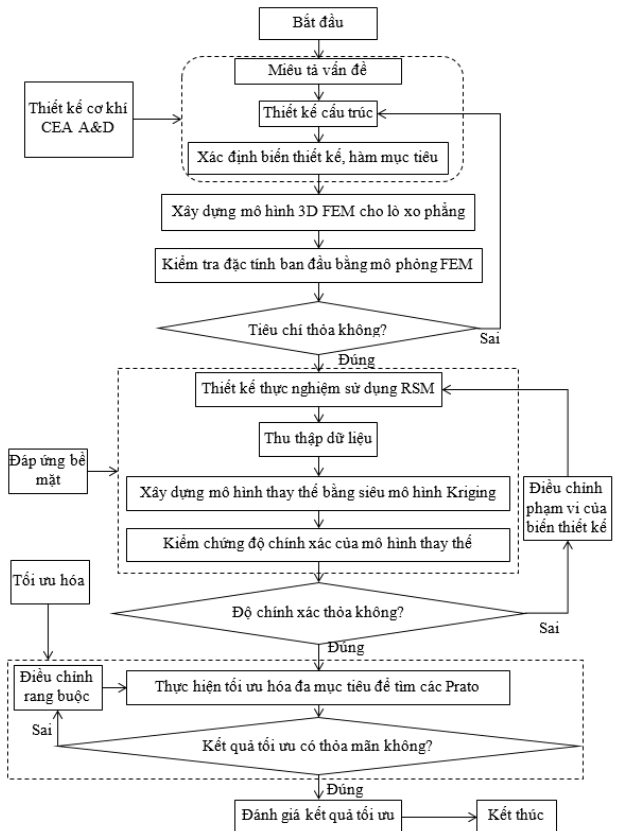
### 5.2.5 Kết quả và thảo luận

#### 5.2.5.1 Đánh giá thiết kế ban đầu

Đầu tiên mô hình 3D trong FEM được xây dựng. Kế tiếp lưới được chia theo phương pháp định kích thước bề mặt. Chất lượng lưới được đánh giá bằng tiêu chuẩn Skewness.

#### 5.2.5.2 Thiết kế thực nghiệm số

Ba biến thiết kế  $L, t, w$  được chia làm 3 mức.



**Hình 5.2:** Sơ đồ quá trình tối ưu hóa

Thực nghiệm được xây dựng bằng phương pháp CCD với mười lăm thực nghiệm. Dựa trên mô hình 3D – FEM, FEA được thực hiện để thu thập dữ liệu.

### 5.2.5.3 Mô hình Kriging

Sau khi có dữ liệu, mô hình Kriging được sử dụng để xây dựng mô hình xấp xỉ.

### 5.2.5.4 Đánh giá độ nhạy

Phương pháp phân tích đáp ứng bề mặt được lựa chọn để phân tích độ nhạy của các biến thiết kế đến các đáp ứng đầu ra.

### 5.2.5.5 Kết quả tối ưu

Sau khi mô hình Kriging được thành lập. Dựa vào các mô hình này, thuật toán di truyền đa mục tiêu được sử dụng để tìm các Pareto. Kết quả tìm được 3 ứng viên tốt nhất như bảng 5.7.

**Bảng 5.7:** Các ứng viên

Thông số	$L$ (mm)	$t$ (mm)	$w$ (mm)	$y_1$ (mm)	$y_2$ (kg)	$y_3$ (MPa)
Ứng viên 1	40,725	0,940	9,602	33,647	0,195	108,41
Ứng viên 2	40,725	0,940	9,602	33,647	0,195	108,41
Ứng viên 3	40,725	0,940	9,603	33,645	0,195	108,4

Với kết quả trong bảng 5.7 cho thấy cả 3 lò xo phẳng được đề xuất đều có độ cứng  $k_2$  là 0,649 N/mm.

### 5.2.5.6 Đánh giá kết quả tối ưu

Kết quả tối ưu hóa được giới thiệu bởi phương pháp đề xuất so với kết quả FEA có sai số 0% cho khối lượng, 5,78% với ứng suất và 1,65% cho biến dạng.

## 5.2.6 Kết luận

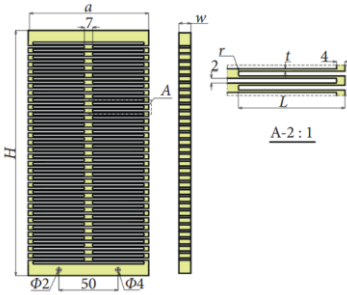
Trong phần này nghiên cứu sinh đã đề xuất một quy trình thiết kế, phân tích và tối ưu hóa cho lò xo phẳng sử dụng cho cơ cấu cân bằng trọng lực. Lò xo phẳng đạt được độ cứng như mong muốn ban đầu là 0,649 N/mm.

## 5.3 Phát triển và tối ưu hóa lò xo phẳng dựa trên phương pháp phân tích phần tử hữu hạn kết hợp mạng nơ ron học sâu và thuật toán tối ưu hóa chu kỳ nước

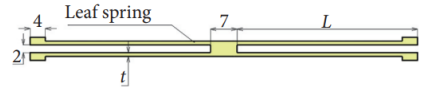
### 5.3.1 Giới thiệu

Cơ cấu cân bằng trọng lực có khả năng thay đổi tải trọng sử dụng lò xo phẳng và khớp xoay mềm đã được thiết kế bởi nghiên cứu sinh và cộng sự [19]. Trong đề mục này nghiên cứu sinh đề xuất một cấu trúc thứ hai cho lò xo phẳng sử dụng cho cơ cấu cân bằng trọng lực. Lò xo phẳng này có kết cấu nhỏ gọn, biến dạng lớn.

### 5.3.2 Thiết kế kết cấu



**Hình 5.13:** Kết cấu lò xo phẳng



**Hình 5.14:** Thông số của một phân đoạn

Lò xo phẳng được thiết kế gồm nhiều phân đoạn được kết nối với nhau như hình 5.13. Mỗi phân đoạn được kết nối từ 4 lò xo lá và được sắp xếp như hình 5.14. Thông số của lò xo phẳng bao gồm chiều dày của các lò xo lá  $t$ , chiều rộng  $w$ , chiều dài  $L$  và bán kính cong  $r$ , chiều cao  $H$  và chiều rộng  $a$ .

### 5.3.3 Bài toán tối ưu

#### 5.3.3.1 Biến thiết kế

Biến thiết kế  $L$ ,  $t$ ,  $W$  và  $r$ .

#### 5.3.3.2 Hàm mục tiêu

Hàm năng lượng biến dạng  $f(X)$  được chọn làm hàm mục tiêu cho quá trình tối ưu hóa.

#### 5.3.3.3 Hàm ràng buộc

Hàm biến dạng  $g_1(X)$  và hàm ứng suất  $g_2(X)$  được chọn là hai hàm ràng buộc.

### 5.3.4 Quy trình thiết kế, tối ưu

Quá trình thiết kế và tối ưu hóa được thực hiện qua 4 giai đoạn như được trình bày trong hình 5.15.

#### 5.3.4.1 Giai đoạn 1: Thiết kế cơ khí

#### 5.3.4.2 Giai đoạn 2: Tạo dữ liệu số

#### 5.3.4.3 Giai đoạn 3: Tối ưu hóa cấu trúc của DFNN

#### 5.3.4.4 Giai đoạn 4: Tối ưu hóa sử dụng thuật toán chu kỳ nước

### 5.3.5 Kết quả và thảo luận

#### 5.3.5.1 Thu thập dữ liệu

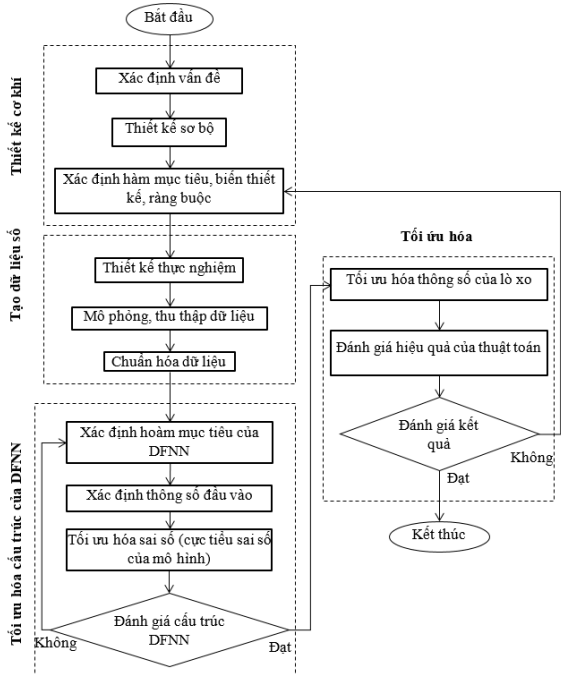
Bốn biến thiết kế gồm  $r$ ,  $L$ ,  $t$ , và  $w$  được chia thành ba cấp độ. Sau đó quá trình xây dựng thực nghiệm, chia lưới và FEA để thu thập dữ liệu. Bộ dữ liệu thu được sau đó được chuẩn hóa để loại bỏ sai khác đơn vị.

#### 5.3.5.2 Tối ưu hóa cấu trúc của DFNN

DFNN được sử dụng để xây dựng mô hình xấp xỉ. Độ chính xác của mô hình gần đúng phụ thuộc vào cấu trúc của DFNN. Vì vậy cấu trúc của DFNN cần được tối ưu để tìm được cấu trúc có thể xấp xỉ mô hình với sai số nhỏ nhất.

### 5.3.6 Kết quả tối ưu

Các mô hình thay thế cho biến dạng, ứng suất, năng lượng được thiết lập bằng cấu trúc DNFF đã được tối ưu. Sau đó, thuật toán chu kỳ nước tìm được kết quả tối ưu cho năng lượng biến dạng trung bình tối ưu là 0,01123 mJ. Các thông số tối ưu của lò xo phẳng  $t$ ,  $L$ ,  $w$  và  $r$  lần lượt là 1,029 mm, 45 mm, 9 mm, 0,3 mm.



**Hình 5.15:** Lưu đồ của phương pháp



### **5.3.7 Xác nhận kết quả tối ưu**

Kết quả dự đoán tối ưu được so sánh với kết quả FEA. sai số năng lượng là 1,87%, biến dạng là 1,69% và ứng suất là 3,06%. Bên cạnh đó, tuổi thọ của lò xo cũng được xác nhận với 299 triệu chu kỳ.

### **5.3.8 Kết luận**

Trong phần này nghiên cứu sinh đã đề xuất một phương pháp phát triển và tối ưu hóa lò xo phẳng được sử dụng cho cơ cấu cân bằng trọng lực. Phương pháp được đề xuất là sự kết hợp của FEM, DFNN và WCA. Kết quả tối ưu sau đó được so sánh với kết quả FEA. Kết quả so sánh cho thấy qui trình đề xuất có độ tin cậy cao.

## **5.4 Kết luận**

Trong chương này, hai lò xo phẳng sử dụng cho cơ cấu cân bằng trọng lực đã được phát triển. Lò xo phẳng thứ nhất được thiết kế và tối ưu hóa bằng cách sử dụng RSM tích hợp trong FEM và thuật toán MOGA. Lò xo thứ hai được phát triển bằng phương pháp tích hợp giữa FEM kết hợp với DFNN và WCA.

## **CHƯƠNG 6 THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG**

### **6.1 Mô hình cơ cấu cân bằng trọng lực**

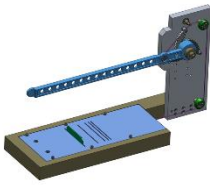
Mô hình cơ cấu cân bằng trọng lực được thiết kế như hình 6.1

### **6.2 Chế tạo mô hình**

Cơ cấu cân bằng trọng lực được chế tạo như hình 6.3.

### **6.3 Thiết lập thí nghiệm**

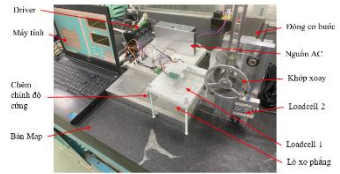
Thí nghiệm được thiết lập như hình 6.6.



**Hình 6.1:** Mô hình 3D cơ cấu cân bằng trọng lực



**Hình 6.3:** Cơ cấu cân bằng trọng lực



**Hình 6.6:** Mô hình thí nghiệm

## 6.4 Kết quả

Khi cơ cấu làm việc ở vị trí 30,6 độ sai số giữa giá trị  $T$  và  $T_m$  lần lượt là 4,5%, 2,86%, 3,27%, 0,25% và 3 % tương ứng với các mức tải 400, 600, 800, 900 và 1000 gram.

## 6.5 Kết luận

# CHƯƠNG 7 KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

## 7.1 Kết luận

Đầu tiên, nguyên lý cân bằng với tổng mô men tác dụng lên cơ cấu bằng không được sử dụng. Thiết kế nguyên lý của cơ cấu cân bằng được thực hiện với sự kết hợp giữa lò xo phẳng và khớp xoay mềm. Bằng cách sử dụng phương pháp giải tích, phương trình cân bằng tĩnh được xây dựng. Bên cạnh đó, độ cứng của khớp xoay mềm và độ cứng của lò xo phẳng được tính toán để đảm bảo cho quá trình cân bằng với trọng lực khi thay đổi tải trọng. Phương pháp điều chỉnh độ cứng của lò xo phẳng cũng được đề xuất dựa trên nguyên lý thay đổi số phân đoạn làm việc của lò xo.

Tiếp theo, hai cấu trúc của khớp xoay mềm được phát triển dựa trên hai giải thuật tối ưu mới được đề xuất bởi nghiên cứu sinh. Khớp xoay thứ nhất được phát triển và tối ưu hóa dựa trên giải thuật lai giữa phương pháp phân tích phần tử hữu hạn, phương pháp đáp ứng bề mặt và thuật toán tối ưu hóa bầy đàn. Kết quả, một khớp xoay được tạo ra với kích thước chiều dày  $t = 0,94$  mm và không gian  $R =$

40 mm. Kết quả dự đoán tối ưu được so sánh với kết quả FEA với sai số 6,1% cho khối lượng, 1,68% cho biến dạng và 5,6% cho ứng suất. Cấu trúc khớp xoay phẳng thứ hai được thiết kế và tối ưu dựa trên giải thuật lai kết hợp giữa phương pháp tối ưu hóa cấu trúc Topo, phương pháp phân tích phần tử hữu hạn, mạng trí tuệ thích nghi mờ và thuật toán tối ưu chu kỳ nước – con thiêu thân. Kết quả tối ưu đã tìm ra được thông số hình học phù hợp của khớp xoay bao gồm  $r_1$  là 0,5 mm,  $t_1$  là 0,36 mm,  $t_2$  là 0,41 mm,  $l_1$  là 11,3 mm,  $l_2$  là 14,74 mm. Kết quả dự đoán của quá trình tối ưu được so sánh với giá trị FEA với sai số 4,59% cho mô men, 4,16% cho ứng suất và 4,73 cho năng lượng biến dạng.

Kế tiếp, hai quy trình thiết kế, phân tích và tối ưu hóa mới cho việc phát triển và tối ưu hóa cho lò xo phẳng cũng được đề xuất. Quy trình đầu tiên là sự kết hợp giữa phương pháp phân tích phần tử hữu hạn, phương pháp đáp ứng bề mặt và thuật toán tối ưu hóa di truyền đa mục tiêu. Dựa trên quy trình đề xuất, một thiết kế của lò xo phẳng đã được thiết kế và tối ưu hóa. Kết quả đã tìm ra kết cấu và thông số hình học phù hợp của lò xo phẳng chiều dài 40,725 mm, chiều dày 0,940 mm và chiều rộng 9,602 mm. Sai số giữa kết quả dự đoán và FEA của của khối lượng nhỏ hơn 0,001%, sai số của ứng suất là 5,78% và sai số của biến dạng là 1,65%. Sai số độ cứng giữa dự đoán và thí nghiệm kiểm chứng là 3,584%. Quy trình thứ hai được kết hợp giữa phương pháp phân tích phần tử hữu hạn, mạng nơ ron học sâu và thuật toán chu kỳ nước. Dựa trên quy trình đề xuất, kết cấu của lò xo phẳng thứ hai được thiết kế và tối ưu. Kết quả đã tìm được kích thước phù hợp của lò xo phẳng  $t$ ,  $L$ ,  $w$  và  $r$  lần lượt là 1,029 mm, 45 mm, 9 mm, 0,3 mm. So sánh giữa kết quả dự đoán với kết quả FEA cho thấy sai số năng lượng là 1,87%, biến dạng là 1,69% và ứng suất là 3,06%.

Sau đó, dựa trên kết quả thiết kế, tối ưu đã được thực hiện ở trước, mô hình 3D của cơ cấu cân bằng trọng lực được xây dựng. Hai chi tiết quan trọng của cơ cấu là lò xo phẳng và khớp xoay mềm được chế tạo bằng phương pháp cắt dây. Các chi tiết còn lại được gia công trên máy CNC. Cơ cấu cân bằng trọng lực sau đó được lắp ráp và thiết lập thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm cho thấy cơ cấu cân bằng đề xuất đạt được cân bằng khi tải thay đổi trong phạm vi 250 gram đến 1000

gram. Khi cơ cấu làm việc ở vị trí 30,6 độ sai số giữa mô men do khối lượng và mô men do cơ cấu tạo ra khi tải trọng thay đổi 250 gram, 400 gram, 600 gram, 800 gram, 900 gram và 1000 gram lần lượt là 2,91%, 4,5%, 2,86%, 3,27%, 0,25% và 3 %. Cuối cùng, nghiên cứu sinh đưa ra các kết luận và đề xuất các hướng nghiên cứu tiếp theo.

## 7.2 Kiến nghị

Sau khi hoàn thành luận án này, nghiên cứu sinh tiếp tục thực hiện các công việc sau: Phát triển một cơ cấu cân bằng để lắp lên thiết bị hỗ trợ vận động cho người yếu cơ cánh tay. Phát triển các giải pháp mới để thiết kế, phân tích và tối ưu hóa cho cơ cấu mềm có độ tin cậy cao. Phân tích động học cho cơ cấu cân bằng trọng lực đề xuất trong điều kiện làm việc với tốc độ cao. Tìm kiếm các giải pháp mới để nâng cao độ chính xác gia công cho các cơ cấu mềm để nâng cao độ chính xác các đặc tính của cơ cấu mềm. Sử dụng đa dạng các loại vật liệu để phát triển các cơ cấu mềm.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. K. Agrawal, G. Gardner, and S. Pledgie, "Design and fabrication of an active gravity balanced planar mechanism using auxiliary parallelograms," *J. Mech. Des.*, vol. 123, pp. 525-528, 2001.
- [2] Y. R. Chheta, R. M. Joshi, K. K. Gotewal, and M. ManoharStephen, "A review on passive gravity compensation," in *2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 2017, pp. 184-189.
- [3] L. L. Howell, "Compliant mechanisms," in *21st century kinematics*, ed: Springer, 2013, pp. 189-216.
- [4] N. Lobontiu, *Compliant mechanisms: design of flexure hinges*: CRC press, 2002.
- [5] J. Hetrick and S. Kota, "An energy formulation for parametric size and shape optimization of compliant mechanisms," 1999.

- [6] L. L. Howell and A. Midha, "The development of force-deflection relationships for compliant mechanisms," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 1994, pp. 501-508.
- [7] P. Wang and Q. Xu, "Design and modeling of constant-force mechanisms: A survey," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 119, pp. 1-21, 2018.
- [8] Y. S. Oh and S. Kota, "Synthesis of multistable equilibrium compliant mechanisms using combinations of bistable mechanisms," *Journal of Mechanical Design*, vol. 131, 2009.
- [9] S. Kota, J. Joo, Z. Li, S. M. Rodgers, and J. Sniegowski, "Design of compliant mechanisms: applications to MEMS," *Analog integrated circuits and signal processing*, vol. 29, pp. 7-15, 2001.
- [10] M. P. Dang, T.-P. Dao, and H. G. Le, "Optimal Design of a New Compliant XY Micro Positioning Stage for Nanoindentation Tester Using Efficient Approach of Taguchi Method, Response Surface Method and NSGA-II," in *2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2018, pp. 1-6.
- [11] 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.
- [12] L. A. Pozzobon, R. da Silva Guerra, and G. R. Librelotto, "A low-cost, compliant, underactuated prosthetic hand with custom flex sensors for finger bending estimation," in *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2019, pp. 69-74.
- [13] V.-K. Nguyen, H.-T. Pham, H.-H. Pham, and Q.-K. Dang, "Optimization design of a compliant linear guide for high-precision feed drive mechanisms," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 165, p. 104442, 2021.
- [14] J. Jovanova, A. Nastevska, M. Frecker, and M. E. Aguirre, "Analysis of a functionally graded compliant mechanism surgical grasper," in *2018*

*International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR)*, 2018, pp. 1-8.

[15] M. Gaafar, M. Magdy, A. T. Elgammal, A. El-Betar, and A. M. Saeed, "Development of a new compliant remote center of motion (RCM) mechanism for vitreoretinal surgery," in *2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 2020, pp. 183-187.

[16] H.-N. Nguyen and W.-B. Shieh, "On the Design of the Gravity Balancer Using Scotch Yoke Derivative Mechanism," in *New Advances in Mechanism and Machine Science*, ed: Springer, 2018, pp. 13-25.

[17] H.-N. Nguyen and W.-B. Shieh, "Realization of Statically Balanced Articulated Mechanisms and Scotch Yoke Type Balancers," in *IFTOMM World Congress on Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 1345-1354.

[18] H. Q. Bảo, "Nghiên cứu thực nghiệm khả năng hoạt động của cơ cấu cân bằng trọng lực một bậc tự do dựa trên nguyên lý hoạt động của cơ cấu Scotch Yoke," *Luận Văn Thạc sĩ, trường Đại học Bách khoa Đà Nẵng*, 2018.

[19] N. Le Chau, H. G. Le, and T.-P. Dao, "A Gravity Balance Mechanism Using Compliant Mechanism," in *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development: Proceedings of the International Conference GTSD2020*, 2020, p. 431.

[20] H.-T. Nguyen, H.-T. Pham, and D.-A. Wang, "A Switching Scheme for a Compliant Bistable Mechanism Using Harmonic Forcing."

[21] 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.

[22] T.-V. Phan, H.-T. Pham, and C.-N. Truong, "Design and Analysis of a Compliant Constant-Torque Mechanism for Rehabilitation Devices," in *Advanced Materials*, ed: Springer, 2020, pp. 541-549.

[23] P.-L. Chang, I.-T. Chi, N. D. K. Tran, and D.-A. Wang, "Design and modeling of a compliant gripper with parallel movement of jaws," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 152, p. 103942, 2020.

- [24] N. Le Chau, N. L. Ho, N. T. Tran, and T.-P. Dao, "Analytical model and computing optimization of a compliant gripper for the assembly system of mini direct-current motor," *International Journal of Ambient Computing and Intelligence (IJACI)*, vol. 12, pp. 1-28, 2021.
- [25] M. P. Dang, H. G. Le, N. L. Chau, and T.-P. Dao, "Optimization for a flexure hinge using an effective hybrid approach of fuzzy logic and moth-flame optimization algorithm," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, 2021.
- [26] Y.-L. Chu and C.-H. Kuo, "A single-degree-of-freedom self-regulated gravity balancer for adjustable payload," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 9, 2017.
- [27] Y.-C. Hung and C.-H. Kuo, "A novel one-DoF gravity balancer based on Cardan gear mechanism," in *New Trends in Mechanism and Machine Science*, ed: Springer, 2017, pp. 261-268.
- [28] D. X. Chew, K. L. Wood, and U. Tan, "Design of a passive self-regulating gravity compensator for variable payloads," *Journal of Mechanical Design*, vol. 141, 2019.
- [29] H. Kino, T. Yoshitake, R. Wada, K. Tahara, and K. Tsuda, "3-DOF planar parallel-wire driven robot with an active balancer and its model-based adaptive control," *Advanced Robotics*, vol. 32, pp. 766-777, 2018.
- [30] A. M. Haidar and J. L. Palacios, "Modified ball-type automatic balancer for rotating shafts: Analysis and experiment," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 496, p. 115927, 2021.
- [31] D. Franchetti, G. Boschetti, and B. Lenzo, "Passive Gravity Balancing with a Self-Regulating Mechanism for Variable Payload," *Machines*, vol. 9, p. 145, 2021.
- [32] Z.-W. Yang and C.-C. Lan, "An adjustable gravity-balancing mechanism using planar extension and compression springs," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 92, pp. 314-329, 2015.
- [33] Y. Gou, G. Chen, and L. L. Howell, "A design approach to fully compliant multistable mechanisms employing a single bistable mechanism,"

*Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 49, pp. 986-1009, 2021.

[34] M. Ling, J. Cao, Z. Jiang, and J. Lin, "A semi-analytical modeling method for the static and dynamic analysis of complex compliant mechanism," *Precision Engineering*, vol. 52, pp. 64-72, 2018.

[35] X. Zhang and Q. Xu, "Design, fabrication and testing of a novel symmetrical 3-DOF large-stroke parallel micro/nano-positioning stage," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 54, pp. 162-172, 2018.

[36] Y.-S. Chang, V. N. Kieu, and S.-C. Huang, "Optimal Design of a Leaf Flexure Compliant Mechanism Based on 2-DOF Tuned Mass Damping Stage Analysis," *Micromachines*, vol. 13, p. 817, 2022.

[37] C. N. Wang and T. D.-M. Le, "Optimization Parameter for Micro-Gripper Based on Triple-Stair Compliant Mechanism Using GTs-TOPSIS," 2021.

[38] A. Zolfagharian, S. Gharaie, J. Gregory, M. Bodaghi, A. Kaynak, and S. Nahavandi, "A Bioinspired Compliant 3D-Printed Soft Gripper," *Soft Robotics*, 2021.

[39] M. Ling, J. Cao, M. Zeng, J. Lin, and D. J. Inman, "Enhanced mathematical modeling of the displacement amplification ratio for piezoelectric compliant mechanisms," *Smart Materials and Structures*, vol. 25, p. 075022, 2016.

[40] S. Noveanu, N. Lobontiu, J. Lazaro, and D. Mandru, "Substructure compliance matrix model of planar branched flexure-hinge mechanisms: Design, testing and characterization of a gripper," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 91, pp. 1-20, 2015.

[41] X. Zhu, X. Xu, Z. Wen, J. Ren, and P. Liu, "A novel flexure-based vertical nanopositioning stage with large travel range," *Review of Scientific Instruments*, vol. 86, p. 105112, 2015.

[42] H. Kim and D.-G. Gweon, "Development of a compact and long range XYθz nano-positioning stage," *Review of scientific instruments*, vol. 83, p. 085102, 2012.



[43] R. Xiao, S. Shao, M. Xu, and Z. Jing, "Design and analysis of a novel piezo-actuated  $XY\theta z$  micropositioning mechanism with large travel and kinematic decoupling," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, 2019.