

分类号：公开
密 级：TH122

学校代码：10363
学 号：2210120109



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于压电驱动的航空相机稳像
机构及控制算法研究

论 文 作 者 陶文博
校 内 导 师 钟相强（教授）
校 外 导 师 吴亮发（工程师）
专业学位类别 机械
研究方向（领域） 现代机械设计理论及方法

论文提交日期： 2024 年 5 月 18 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：陶文博

日期：2024 年 5 月 29 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：陶文博 指导教师签名：钟相强

日期：2024 年 5 月 29 日

日期：2024 年 5 月 29 日

基于压电驱动的航空相机稳像机构及控制算法研究

摘要

随着航空相机稳像技术以及控制算法的高速发展，传统航空相机拍摄精度低、响应慢和体积大及影像产生偏差的问题已经不能满足航拍要求，需要在小型化微型化目标上不断探索。为实现航空相机稳像对精度和控制要求，以压电陶瓷作为驱动单元，提出一种结合二级杠杆和三角放大的新型复合式稳像机构，实现航拍位移补偿的同时且满足高精度、快响应以及输出对称的要求，具体工作内容如下：

首先，根据光学稳像需求，基于二级杠杆、三角放大及直圆型柔性铰链机构设计了一种航空相机稳像机构，对其进行位移放大倍数、刚度以及模态仿真分析，并对机构参数进行优化。机构具备双向对称输出性能，仿真放大倍数达 36.72 与理论误差小于 2%，仿真刚度 $53.3 \text{ N}/\mu\text{m}$ 与理论误差小于 8%，并获得机构一阶固有频率。

其次，根据机构模型制作实验样机并搭建实验平台，对压电陶瓷迟滞特性、机构输出位移、重复性精度、放大倍数和共振频率等进行实验检测与分析，稳像机构迟滞回线最大宽度为 12.74%，最大输出位移 $347.2 \mu\text{m}$ ，最大重复性标准差为 $0.614 \mu\text{m}$ ，共振频率为 150 Hz，满足稳像机构输出性能条件。

再次，基于航空相机稳像机构，建立航空相机稳像系统控制模型，构建由压电陶瓷驱动的迟滞数学模型。为提高系统控制精度，提出一种补偿压电陶瓷输出位移方案，利用输入电压分段补偿方法，对输出位移进行阶段补偿，以精确修正由压电陶瓷迟滞特性所造成

的输出位移偏差，提升控制系统输出位移的精确性和稳定性。

最后，基于改进 Bouc-Wen 模型和 ITAE 性能评价指标搭建了增量式 PID 控制系统，采用灰狼控制算法和粒子群控制算法分别优化 PID 控制参数，得到输出位移值与预测值之间的相对误差范围分别为 $[-0.15, 0.14] \mu\text{m}$ 和 $[-0.12, 0.26] \mu\text{m}$ ，实现了稳像机构的精确控制。

航空相机稳像机构具有输出位移大、控制精度高和响应速度快等优势，解决了航空相机拍照模糊问题，为微位移输出补偿及控制系统搭建提供思路。

关键词：稳像机构，压电陶瓷，柔性铰链，二级杠杆，灰狼算法

RESEARCH ON IMAGE STABILIZATION MECHANISM AND CONTROL ALGORITHM OF AERIAL CAMERA BASED ON PIEZOELECTRIC DRIVE

ABSTRACT

With the rapid development of aerial camera image stabilization technology and control algorithm, the problems of low shooting accuracy, slow response, large volume and image deviation of traditional aerial camera can no longer meet the requirements of aerial photography, and it is necessary to continuously explore the goal of miniaturization and miniaturization. In order to realize the accuracy and control requirements of aerial camera image stabilization, a new composite image stabilization mechanism combining two-stage lever bar and triangular amplification is proposed with piezoelectric ceramics as the driving unit, which realizes aerial displacement compensation and meets the requirements of high precision, fast response and symmetrical output. The specific work contents are as follows.

Firstly, according to the requirements of optical image stabilization, an aerial camera image stabilization mechanism was designed based on a two-stage lever, triangular amplification, and a straight-circular flexible hinge mechanism. The displacement magnification, stiffness, and modal simulation analysis were carried out, and the mechanism parameters were optimized. The mechanism had bidirectional symmetrical output performance. The simulation magnification was 36.72, and the theoretical error was less than 2%. The simulation stiffness was 53.3 N/ μm , and the

theoretical error was less than 8%. The first-order natural frequency of the mechanism was obtained.

Secondly, according to the mechanism model, the experimental prototype was made, and the experimental platform was built. The hysteresis characteristics of piezoelectric ceramics, the output displacement of the mechanism, the repeatability accuracy, the magnification, and the resonance frequency were tested and analyzed. The maximum width of the hysteresis loop of the image stabilization mechanism was 12.74%, the maximum output displacement was 347.2 μm , the maximum repeatability standard deviation was 0.614 μm , and the resonance frequency was 150 Hz, which met the output performance conditions of the image stabilization mechanism.

Thirdly, based on the aerial camera image stabilization mechanism, the control model of the aerial camera image stabilization system was established, and the hysteresis mathematical model driven by piezoelectric ceramics was constructed. In order to improve the control accuracy of the system, a compensation scheme for the output displacement of piezoelectric ceramics was proposed. The input voltage piecewise compensation method was used to compensate the output displacement stage by stage, so as to accurately correct the output displacement deviation caused by the hysteresis characteristics of piezoelectric ceramics and improve the accuracy and stability of the output displacement of the control system.

Finally, an incremental PID control system was built based on the improved Bouc-Wen model and ITAE performance evaluation index. The grey wolf control algorithm and particle swarm control algorithm were used to optimize the PID control parameters respectively. The relative error ranges between the output displacement value and the predicted value were $[-0.15, 0.14] \mu\text{m}$ and $[-0.12, 0.26] \mu\text{m}$, respectively, which realized the

precise control of the image stabilization mechanism.

The image stabilization mechanism of aerial camera has the advantages of large output displacement, high control precision and fast response speed, which solves the problem of aerial camera photography blur and provides ideas for the construction of micro-displacement output compensation and control system.

KEY WORDS: image stabilization mechanism, piezoelectric ceramics, flexure hinge, two-stage lever, grey wolf algorithm

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外发展及研究现状.....	2
1.2.1 压电驱动器研究现状.....	2
1.2.2 稳像平台研究现状.....	4
1.2.3 航空相机稳像控制研究现状.....	6
1.3 主要研究内容及章节安排.....	8
第 2 章 航空相机稳像机构设计及仿真.....	10
2.1 相移产生及影响.....	11
2.2 航空相机稳像机构设计.....	11
2.2.1 二级杠杆位移放大结构.....	11
2.2.2 三角位移放大结构.....	13
2.2.3 机构放大倍数计算.....	15
2.2.4 柔性铰链.....	16
2.2.5 稳像机构结构设计.....	19
2.3 航空相机稳像机构仿真分析.....	20
2.3.1 稳像机构放大倍数仿真.....	20
2.3.2 稳像机构刚度仿真.....	22
2.3.3 稳像机构模态分析.....	23
2.4 本章小结.....	24
第 3 章 航空相机稳像机构实验研究.....	26
3.1 航空相机稳像机构平台搭建.....	26
3.2 航空相机稳像机构实验.....	28
3.2.1 压电陶瓷迟滞效应.....	28
3.2.2 单边位移检测.....	29
3.2.3 双边位移检测.....	30

3.2.4 重复精度检测.....	31
3.2.5 共振频率检测.....	32
3.3 实验结果与分析.....	33
3.4 本章小结.....	34
第 4 章 航空相机微位移控制算法研究.....	35
4.1 传统 PID 控制	35
4.2 灰狼与粒子群算法优化 PID 控制策略	38
4.2.1 灰狼算法 (GWO) 基本原理	38
4.2.2 粒子群算法 (PSO) 基本原理	40
4.3 稳像控制系统模型搭建.....	42
4.3.1 算法与控制系统.....	42
4.3.2 控制模型原理与搭建.....	43
4.4 仿真结果对比与分析.....	47
4.5 本章小结.....	49
第 5 章 总结与展望.....	51
5.1 全文总结.....	51
5.2 工作展望.....	52
参考文献.....	53
攻读硕士学位期间发表的学术论文及成果.....	59
致 谢.....	61

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

在航空相机拍摄过程中，由于在曝光时间内相机与目标会发生相对运动，导致图像产生位移，与目标图像重叠，导致图像清晰度显著降低，机械稳像平台和控制算法用于精确控制稳像机构获得清晰的图像。在微装配、生物工程、光纤对接和航空航天工程等对定位精度要求较高的领域，微位移稳像得到广泛应用^[1]。航空相机稳像平台的研究还面临三项挑战和问题：平台输出精度和稳定性、平台重量和尺寸（目前研究的重点之一）和平台的集成与应用。

近年来，随着科学技术的不断发展与创新，传统机械已经不能满足微电子精密、医疗和航空等领域的需求，实现机构高精度、快响应和大行程等要求，其已经成为国内外研究的热点问题^[2,3]。其中，由于压电陶瓷驱动的机构拥有优越的控制性能，甚至能够实现纳米级精度的输出位移，被广泛应用于稳像平台领域，但当前市场上绝大多数压电陶瓷的输出位移很难满足机构的需求^[4,5]。

尽管压电陶瓷驱动具备高精度、快响应等条件，但由于本身材料和结构特性，会使其在输出时，输入电压与输出位移之间产生严重的非线性现象，即压电陶瓷迟滞特性^[6-8]，严重时误差甚至可达总位移行程的 20%，同时伴随输出延迟、蠕变和振动等情况^[9-12]，对机构的精度和平台系统稳定性有重大影响。因此可搭建系统控制平台，利用控制算法补偿输出位移，对实现平台精确定位和控制的实际应用具有重要意义^[13,14]。

综上所述，设计一种由压电陶瓷驱动的航空相机微位移稳像机构，满足稳像机构行程、刚度和尺寸等设计要求，对其结构进行仿真及实验验证，搭建稳像控制平台及系统，利用算法对系统进行控制，对压电陶瓷自身迟滞特性的输出位移补偿及控制，达到控制系统对精度、响应速度和误差等要求，其对航空相机稳像机构平台及控制系统应用具有一定理论研究价值和意义^[15]。

1.2 国内外发展及研究现状

1.2.1 压电驱动器研究现状

共振式压电驱动器按不同的工作原理分为驻波、行波和模态复合式等。其中，行波工作效率在其中效率最低，应用机会很少，驻波和模态应用范围广，上述两种主要是采用两种或多种相同或不同模态进行驱动，从而带动负载。

图 1-1 为 20 世纪的 Piotr Vasiljev 提出的“Shaking beam”的样机^[16]。

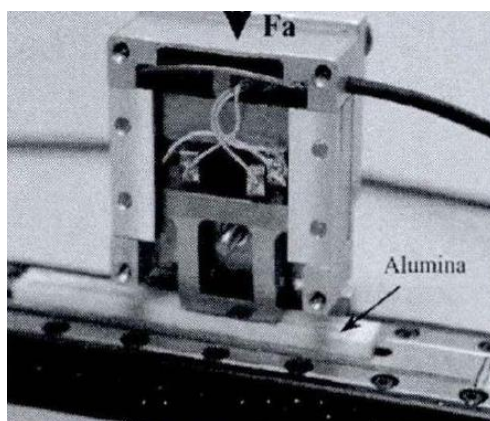


图 1-1 Shaking beam 样机

图 1-2 是德国 PI 公司的精密滑台。此精密滑台对比同类型产品具有体积小
的优势，且移动速率达到 600 mm/s，机构只能对单方向位移进行补偿。



图 1-2 PI 公司精密滑台

图 1-3 为山东理工大学的裴童对微定位平台设计所使用的结构图，其利用 ANSYS 软件分析金属弹性体结构尺寸对固有频率的影响，总体性能比对单目标优化有了较大提升，避开了共振对其影响^[17]。

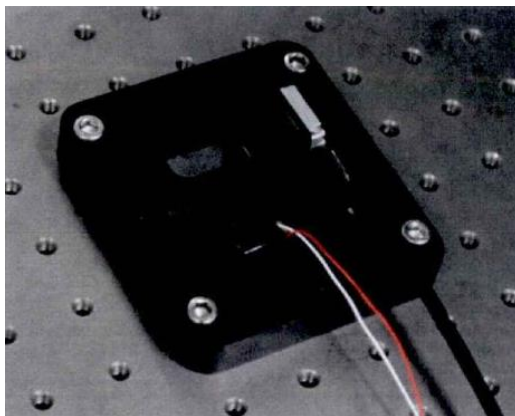


图 1-3 微定位平台

图 1-4 是 Thorlabs 生产的一种大型压电驱动器，放大倍数可达 9 倍，行程为 $220\text{ }\mu\text{m}$ ，其放大倍数得到很大提升^[18]。



图 1-4 压电驱动器

图 1-5 是 PI 公司的三维 P-518 微动机构产品，运动控制为 $200\text{ }\mu\text{m/rad}$ ，移动开环控制为 $240\text{ }\mu\text{m/rad}$ ，分辨率为 1 nm ，重复定位精度 $\pm 5\text{ nm}$ ，精密滑台可实现双向运动需求，其 Z 方向输出位移行程可达到 $800\text{ }\mu\text{m}$ ，其对微动机构定位精度奠定基础。



图 1-5 P-518 微动机构及精密滑台

图 1-6 是芯明天公司的纳米级别的定位台，采用 SGS 传感器控制，实现高速精确定位，采用分离结构设计，减少两个自由度之间的耦合，确保更高的动

态定位性能和定位系统。



图 1-6 P18.XY150S 定位台

图 1-7 是哈尔滨工业大学设计的二维闭环定位台，其由压电陶瓷作为输入端，平台输出位移行程达 $10 \times 10 \mu\text{m}$ ，在稳像精度上表现更为出色^[19]。

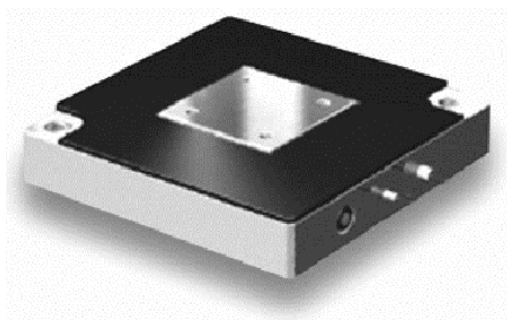


图 1-7 MPT-2JR 工作定位台

综上所述，结合上述压电驱动器结构的各项优势，需要设计一种具备双向行程能力、输出位移大、重复性精度高和耦合小的压电驱动器，将其应用于航空相机稳像装置。

1.2.2 稳像平台研究现状

航空相机稳像平台是指在飞行器上安装的一种用于抵消飞行器晃动和振动的设备，以保证航拍图像的稳定性和清晰度。随着航空摄影和无人机技术的迅速发展，航空相机稳像平台成为了现代航拍的重要组成部分，对于航拍业务的持续发展具有重要意义。

首先，航空相机稳像平台的研究主要集中在三种平台：机械稳定平台、电子稳定平台和惯性导航稳定平台，三种平台具有较高的精度和反应速度，但也存在成本较高的问题。电子稳定平台与机械稳定平台相比，具有结构简单、重

量轻和响应速度快等优点。目前，电子稳定平台已经成为航拍业务中主流的选择^[20]。

其次，由不同驱动方式的稳像平台可分为四种：伺服电机平台、悬架平台、摩擦驱动平台和压电平台。其中压电式稳像平台采用柔性结构实现力的传输或放大，具有以下优点：高精度、快速响应速度、轻量化设计、能耗低、效率高和可靠性强等优势，这些优势使得压电式稳像平台的研究成为航空相机控制领域的重要发展对象，其能够实现更稳定、高质量航拍图像和视频输出^[21]。

目前，随着压电微平台的迅猛发展，许多企业不断推出适合各种场合的精密定位机构，形成了一系列以不同驱动作为输入端的机构。2010 年，日本的 Mikio Muraoka 提出了一种利用压电陶瓷且结合柔性铰链的机构，以此提高机构输出位移的二维精密定位平台。其闭环行程可达 $400\ \mu\text{m}$ ，定位精度可达 $10\ \text{nm}$ ，如图 1-8 所示^[22]。

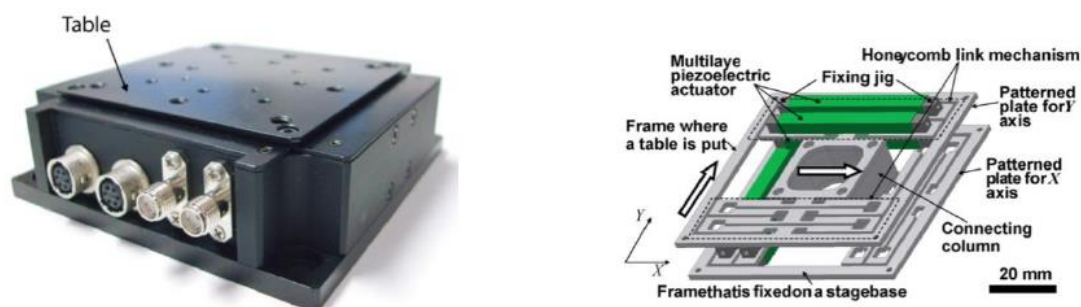


图 1-8 Mikio Muraoka 提出的二维微动台实物图和原理图

2009 年，澳门大学的李阳民，提出了一个如图 1-9 所示的二维微动平台，利用位移放大机构实现了 $117\ \mu\text{m}$ 行程，定位精度大于 $2\ \text{nm}$ ，提升了平台的定位精度^[23]。

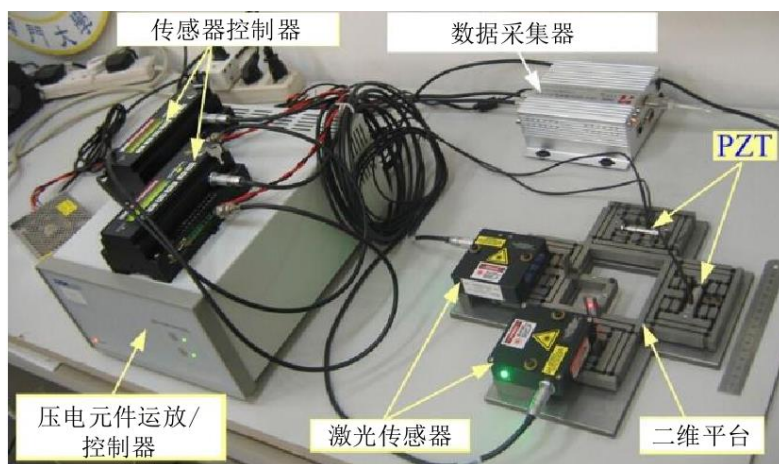


图 1-9 李阳民的二维微动平台

总而言之，航空相机稳像平台作为现代航拍业务中不可或缺的部分，在技术研究和应用方面都有着广阔的发展前景^[24-26]。与此同时，在上述微位移稳像平台只关注了位移行程、精度以及分辨率等特性，并没有将稳像机构双向作动（位移的对称输出特性）优势发挥，同时稳像平台还应该兼具很强快速响应特性、动态特性强等性质^[27]，后续将会对这几方面进行结构优化。

1.2.3 航空相机稳像控制研究现状

由于输入位移机构精度是非线性的，当航空相机稳像机构的当前输出位移与理想输出位移不一致时，将无法呈现优质图像^[28]。压电陶瓷因其自身的迟滞特性，不仅降低了稳像机构的微位移输出精度，还影响了稳像系统输出的稳定性。目前主要有两种主流的滞后控制解决方案：

1.补偿预期输出的非迟滞特性，利用系统模型对位移进行补偿，使压电陶瓷输入电压与输出位移之间呈线性关系，核心是整个控制模型；

2.直接控制由压电陶瓷驱动的执行器，利用压电陶瓷控制器模型来补偿系统的位移误差^[29-30]。

朱炜采用前馈控制和 PI 反馈控制的方法，对压电陶瓷进行精准控制，以此补偿位移误差^[31]。如图 1-10 所示，Bonc-Wen 逆迟滞模型充当反馈调节器，将 Bonc-wen 逆迟滞模型补偿预期输出后的非线性迟滞，以此来补偿误差，然后通过控制获得输出电压，给压电陶瓷供电。

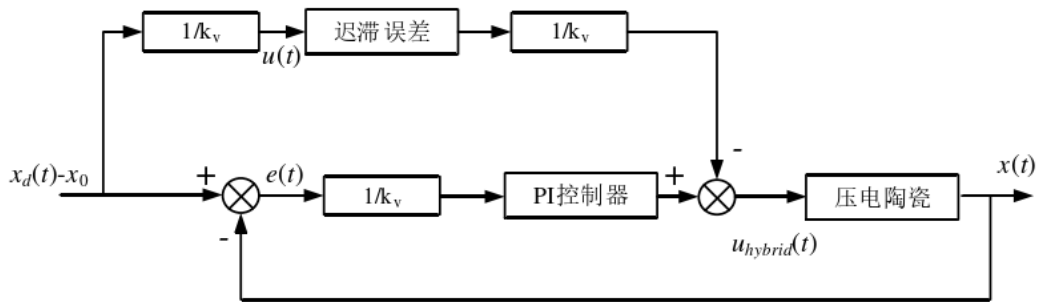


图 1-10 Bonc-Wen 控制模型

把不确定因素作为外部干扰带入系统中，采用对输出线性度进行补偿的方法，求解补偿压电陶瓷迟滞模型的逆^[32]，如图 1-11 所示。依据自适应算法强大学习能力，对输出进行反馈调节，弥补输出非线性参数，降低压电陶瓷迟滞对机构输出位移影响。

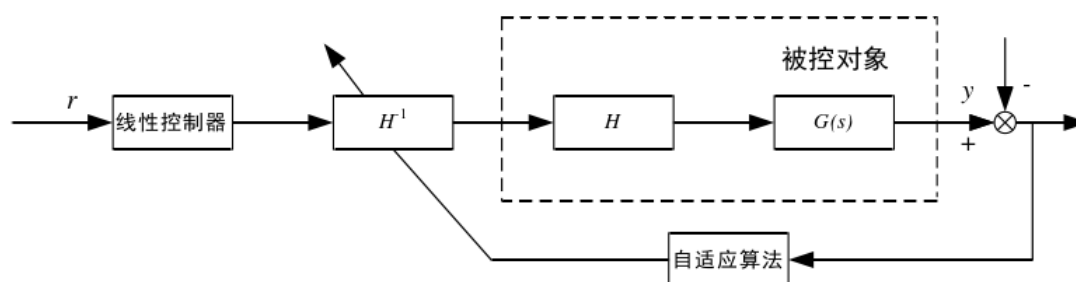


图 1-11 自适应算法模型优化

自适应算法也可对因迟滞现象呈现的非线性特性进行补偿，其将迟滞作为系统外的干扰项进行输出，对压电陶瓷具体迟滞特性进行跟踪和补偿控制，有效降低系统响应时间和抖动频率，提升了系统控制精度^[33]。

苏春翌利用对机械手的控制补偿，弥补了输出位移呈非线性情况对系统精度造成的误差，并在系统中添加观测模型，以保证系统的稳定输出和优异的控制性能^[34]。

目前，压电陶瓷主要通过控制驱动器来控制迟滞特性，补偿输出位移缺失对机构输出性能的影响。但在实际应用时，压电陶瓷会因其自身参数特性导致输出位移呈非线性现象，甚至难以确定其迟滞参数，由于数学模型不能很好表现出结果，所以常用恒定输出以补偿输出位移^[35]。

近年来，启发式算法在解决各种优化问题中得到了广泛的应用。其中，灰狼算法和粒子群算法作为两种典型的启发式算法，在解决优化问题时展现出了良好的性能和效果。灰狼算法在解决问题时表现出色，包括优化函数、特征选择和训练神经网络等，在全局搜索和局部搜索之间的优化函数问题中，灰狼算法取得了较好平衡，能够有效避免参数优化陷入局部最优解情况发生^[36-38]。

其中 Kaveh A 等^[39]利用灰狼算法，模拟整个灰狼群体社会行为，其中包括领导者、跟随者和目标等，通过模仿灰狼的狩猎行为来实现优化并求解问题。

Gandomi A 等^[40]利用对灰狼算法改进优化，可以对多目标参数进行优化，实现参数收敛速度加快目的。

如图 1-12 所示，董剑等^[41]通过改变动态权重因子提高寻优率和精度，能有效降低优化周期，避免陷入局部最优解情况。

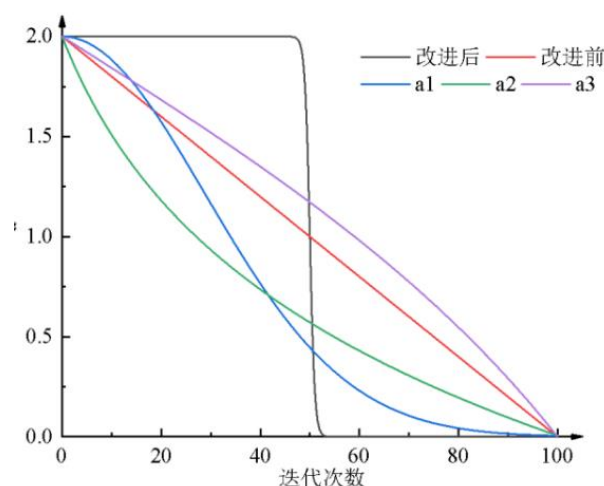


图 1-12 收敛因子变化趋势

灰狼算法可以满足航空相机稳像机构控制的快响应和高精度要求，并且在优化参数时可以避免陷入局部最优情况，其在优化控制参数时具备独特优势，因此可利用灰狼算法优化航空相机稳像机构模型控制参数。

综上所述，提高航空相机稳像机构可以采用补偿压电陶瓷迟滞特性的方法，提升机构的控制精度，再利用灰狼算法优化参数的优势，对稳像机构进行参数优化，以达到稳像机构控制要求。

1.3 主要研究内容及章节安排

在国内外现有压电精密驱动技术的基础上，针对航空航天光学稳像机构及系统领域，设计了一种由压电陶瓷驱动的微位移稳像机构，搭建一种新型航空相机稳定平台及其控制系统，使其满足大输出行程、高定位精度、高分辨率和快速响应等要求。

全文一共分为 5 章，具体研究内容如下：

第 1 章 绪论。阐述柔性铰链、压电驱动器、稳像技术和压电陶瓷迟滞特性的研究现状及应用，分析各种设计案例，概述国内外压电精密传动的研究发展，从压电驱动器、稳像平台和航空相机稳像系统控制三个方面分别叙述其研究现状，引出稳像机构及控制系统所需提升改进的内容。

第 2 章 航空相机稳像机构设计及仿真。介绍了目前常用的三角式放大、桥式放大、杠杆式放大和压曲放大结构，并分析各结构的优缺点；针对课题选用其中的二级杠杆放大机构、三角放大机构及柔性铰链结构作为设计的基本结构，

分析其工作原理，结合三者重要参数，计算稳像机构双向位移行程、位移放大比和机构刚度等数值；基于选用的压电陶瓷作为位移输入端，采用有限元法对微位移放大机构的输出位移行程、放大倍数、刚度及共振模态进行分析，与后续样机实验的迟滞特性、动静态特性和位移重复性精度等参数进行对比。

第 3 章 航空相机稳像机构实验研究。通过实验的方式对前述理论模型和有限元仿真做进一步验证，并且针对压电陶瓷具有的迟滞特性进行分析，建立了稳像机构的输出位移与输入电压之间的线性关系；验证了机构单向及双向输出行程和放大倍数，了解机构动态性能；机构在满足双向对称输出的同时，对输出位移重复性精度进行实验验证。实验结果表明了该平台具有较好的作动性能。

第 4 章 航空相机微位移控制算法研究。首先选用增量式 PID 的控制，其次介绍 GWO 和 PSO 算法优缺点以及如何实现 PID 参数优化的问题。基于 Bouc-Wen 模型和 ITAE 性能评价指标，搭建航空相机稳像机构控制系统，利用对输入电压分段控制的方法，补偿压电陶瓷迟滞特性的输出位移，并对控制系统进行 Simulink 仿真分析，验证系统的控制精度和可靠性。仿真结果证明航空相机稳像平台控制系统设计基本满足精度控制要求。

第 5 章 总结与展望。总结了全文主要工作内容及创新点，提出了在航空相机稳像机构研究期间出现的问题以及解决精度控制的方法和方向，并对未来进一步研究方向进行展望。

第2章 航空相机稳像机构设计及仿真

压电陶瓷作为航空相机稳像的驱动端，可以满足使用时对精度的要求，为了实现不同实际场景下的行程需求，则需要选择符合要求的压电陶瓷作为驱动。又因叠层压电陶瓷直接输出位移较小的限制，需要利用放大原理设计一种可以将微位移放大的机构，以满足航空相机光学稳像所需行程及精度要求^[42-43]。

目前，随着压电陶瓷材料的不断发展，工艺的不断成熟与进步，压电陶瓷输出位移逐渐增大，但压电陶瓷的变形量一般不超过 $50\text{ }\mu\text{m}$ ，其输出位移在大多数环境下，远不能满足运动行程的要求，因此研究人员设计了不同类型的放大机构^[44]。为了满足不同类型位移放大机构的要求，同时保证机构本身精度和刚度的需求，选择一种符合条件的位移放大机构来放大压电陶瓷的微小输出位移极为重要。目前在实际使用场合的微位移放大结构有：杠杆放大、压曲放大、三角放大和桥式放大等^[45-47]，如图 2-1 所示。

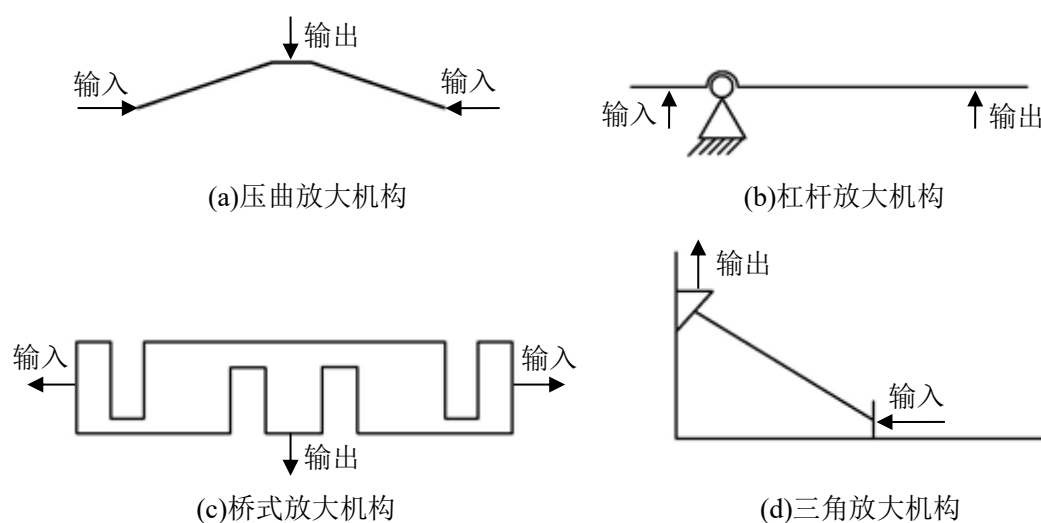


图 2-1 位移放大机构原理图

其中杠杆放大机构与其余放大机构相比有几点优势：结构简单、不易变形和易实现航空相机稳像机构的输出端位移放大目标^[48]，杠杆放大机构可以保证杠杆的输入位移与杠杆输出的输出位移在方向上保持一致。三角放大、桥式放大和压曲放大的放大结构原理类似：机构整体输出位移只与三角结构的斜角角度大小相关，如若在运动中斜角角度变化很小，可认定其角度恒定，即机构输

出位移不变。

2.1 相移产生及影响

在航空摄影拍照瞬间，影像在成像介质上位置不断发生变化，而每个位置上的影像都被记录在成像介质上，如图2-2所示，拍照时成像介质上的方形物体影像位置会发生拖移，影像位置变化使得在成像时，方形物体影像被记录成长方形影像，且产生像移的同时，介质上两个成像的颜色及曝光度也会发生变化，导致成像模糊和看不清。

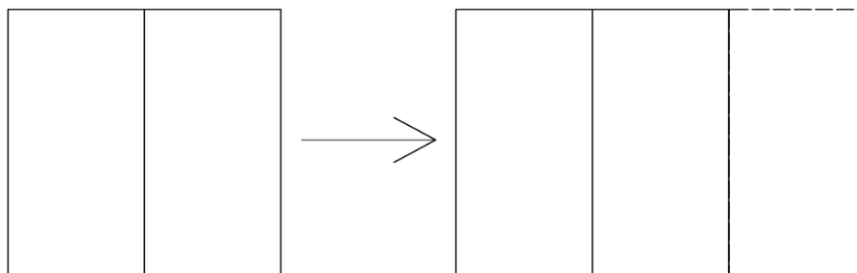


图 2-2 影像位移对影像的影响

在航空相机拍摄瞬间，影像在成像介质上产生了相移变化，使原来成像拉长变得模糊，导致成像效果差。为使成像没有残差，一般利用稳像结构来补偿影像位移，达到稳定成像目的。

2.2 航空相机稳像机构设计

为满足光学稳像中微位移的需求，在满足机构放大倍数的同时保证机构位移的输出精度，基于二级杠杆、三角放大和柔性铰链结构，设计航空相机稳像机构，从而实现压电陶瓷输出位移放大的目的。

2.2.1 二级杠杆位移放大结构

常见的杠杆分为省力、费力以及等臂杠杆三种，利用杆和支点，通过力臂平衡原理即可实现杠杆平衡，支点固定后，将支点两侧力臂与力相乘，为达杠杆平衡条件，杠杆上两个力矩（力和力臂的乘积）须保持一致，即动力臂 $\times$ 动力=阻力臂 $\times$ 阻力，其数学表达式为 $F' \times L' = F'' \times L''$ ， F' 为动力臂， L' 为动力， F'' 为阻力， L'' 为阻力臂。

要使杠杆放大倍数达到最佳状态，就要在保证机构行程和刚度合理的情况

下，使得动力臂与阻力臂的比值尽可能小。

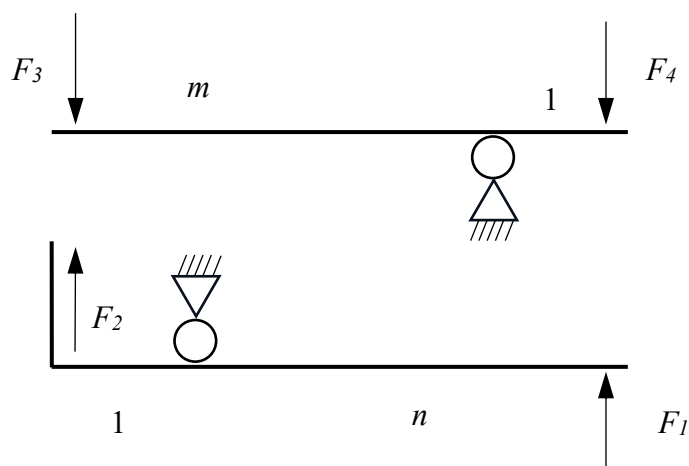


图 2-3 二级杠杆原理

由二级杠杆原理可知，当对下方杠杆右侧施加一个方向竖直向上的力 F_1 ，则根据杠杆原理，对应的下方杠杆左侧会产生一个方向竖直向上的力 F_2 ，其大小为 nF_1 ，上方杠杆中的力 F_3 与 F_2 是一对大小相同方向相反的力，在上方杠杆右侧会产生一个方向竖直向下，大小为 mF_3 的力 F_4 ，即可推出 $F_4=mnF_1$ 。实际应用中，其结构简单易于加工，可在有限的空间里满足位移放大或缩小的需求 [49]。

航空相机稳像机构二级杠杆放大结构，如图 2-4 所示。

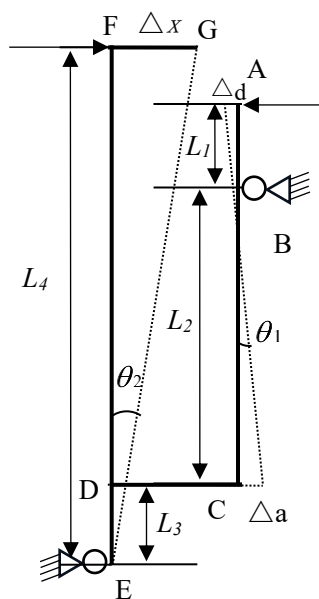


图 2-4 二级杠杆放大结构

放大机构模型中二级杠杆放大倍数为：

$$\lambda_1 = \frac{L_2}{L_1} \quad (2-1)$$

$$\lambda_2 = \frac{L_4}{L_3} \quad (2-2)$$

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 = \frac{L_2 L_4}{L_1 L_3} \quad (2-3)$$

航空相机稳像机构中，二级杠杆参数分别为 $L_1=7$ mm, $L_2=14$ mm, $L_3=9$ mm, $L_4=54$ mm, 则二级杠杆放大倍数由式 (2-3) 可得, 放大倍数 λ 为:

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 = \frac{14}{7} \times \frac{54}{9} = 12 \quad (2-4)$$

2.2.2 三角位移放大结构

三角位移放大机构的放大倍数, 主要是由三角形短边对应角度决定, 夹角越小, 机构整体放大倍数越大, 变形量越明显, 其机构尺寸较小, 动态特性也会较好, 在微位移放大时, 角度变化值比较小, 放大倍数可以近似于不变^[50], 放大倍数与夹角关系如图 2-5 所示。

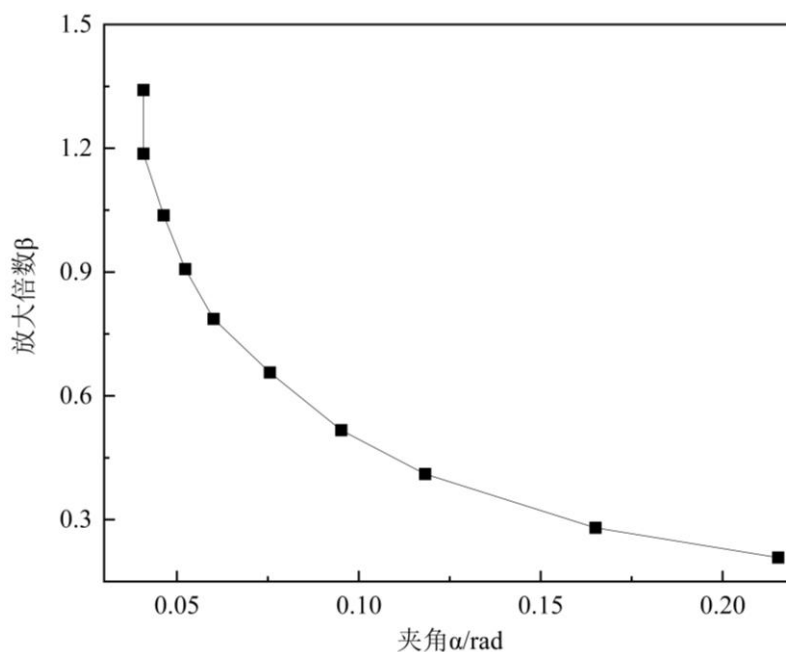


图 2-5 放大倍数与夹角关系

通过分析可知, 三角放大机构也能够很好满足稳像机构的设计要求, 三角机构放大原理如图 2-6 所示。

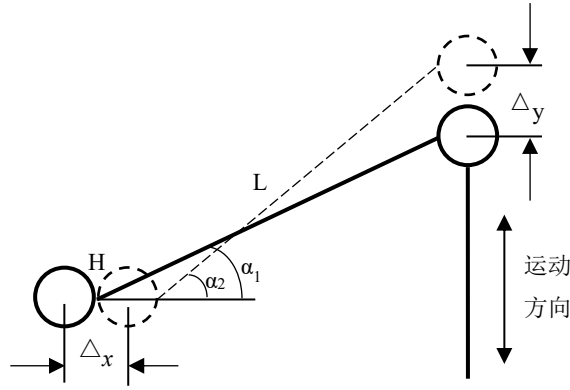


图 2-6 三角位移放大结构

在水平方向输入一个位移 Δx ，由三角放大结构可知，在垂直方向会有一个输出位移 Δy ^[51]，则放大倍数 β 为：

$$\beta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2-5)$$

当水平方向位移变化 Δx 后，三角机构的角度从 α_1 变为 α_2 ，定义变量 $\theta = \alpha_1 - \alpha_2$ ，可得：

$$\Delta x = L \cos \alpha_1 - L \cos \alpha_2 \quad (2-6)$$

$$\Delta y = L \sin \alpha_2 - L \sin \alpha_1 \quad (2-7)$$

由式 (2-5)、(2-6) 和 (2-7) 可得：

$$\beta = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\sin \alpha_1 \cos \theta - \cos \alpha_1 \sin \theta - \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_1 \cos \theta - \sin \alpha_1 \sin \theta} \quad (2-8)$$

此时由于 Δx 变化量较小，所以在运动时角度变化值也非常小，可利用等价无穷小 $1 - \cos \theta = \frac{\theta^2}{2}$ ， $\sin \theta = \theta$ 关系，斜角角度 θ 可忽略不计，因此式 (2-8)

可简化为：

$$\beta = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1}{\tan \alpha} = \cot \alpha \quad (2-9)$$

因此，三角放大机构的放大倍数只与角度 α 有关，与其它参数没有任何关联。当三角放大机构的角度 α 无限接近 90° 时，三角放大机构整体放大倍数越小，三角放大机构的变化率也越接近于 0；相反，当三角放大机构角度 α 接近

0° 时，三角放大机构的放大倍数理论上变得无限大，此时角度的微小变化可以使放大倍数发生巨大变化。

因此在设计机构时，在保证放大倍数的同时，还要注意角度变化速率对放大倍数的影响，使三角放大机构满足机构整体设计要求。

航空相机稳像机构中，三角放大机构倾斜角 α 为 17.7°，其角度从 17.7° 变化为 17.9°，取其平均值 17.8° 计算三角机构放大倍数^[52]，由式（2-9）可计算出其理论放大倍数 β 为：

$$\beta = \frac{1}{\tan \frac{(17.7^\circ + 17.9^\circ)}{2}} = \cot 17.8^\circ \approx 3.1 \quad (2-10)$$

2.2.3 机构放大倍数计算

1. 理论计算法

根据二级杠杆与三角放大的理论计算公式（2-4）和（2-10），可计算出机构理论放大倍数 φ 为：

$$\varphi = \lambda \times \beta = 12 \times 3.1 = 37.2 \quad (2-11)$$

2. 作图法

作图法求解稳像机构二级杠杆放大倍数，如图 2-7 所示。

在稳像机构中，使用作图法添加 0.01 mm 的输入位移，模拟压电陶瓷输入，在图中二级杠杆位置添加长度分别为 7 和 14 mm 两段杠杆，可得位移变换为 0.12 mm，作图法得到二级杠杆机构放大倍数为 12 倍，与理论值相同；在图中三角放大机构添加角度 $\alpha = 17.7^\circ$ ，杆长为 55.5 mm，对称作图，在保持杆相同距离情况下，偏转角度变为 17.9°，可得到稳像机构整体输出位移为 0.37 mm。由作图法可得机构整体放大倍数为 37 倍，该值与理论值十分接近。

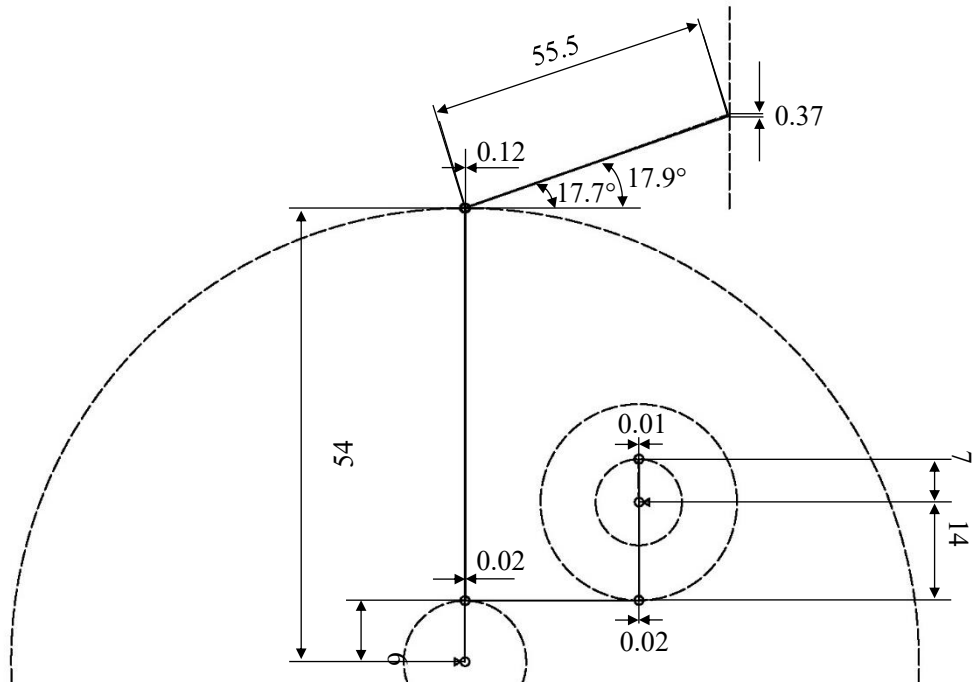


图 2-7 作图法求解放大倍数

2.2.4 柔性铰链

柔性铰链是决定机构刚度的重要因素，其可以在转动时有效降低应力集中的情况，其具备高精度、低磨损和寿命长等利于机构整体性能等优势，通过自身结构传递变形量，在稳像机构中使用柔性铰链，所计算出的机构整体输出位移和实际输出位移接近，可有效提高稳像机构的各项性能。

稳像机构采用直圆型柔性铰链设计，如图 2-8 所示。其利用柔性铰链将二级杠杆放大结构和三角放大结构进行铰接^[53]。

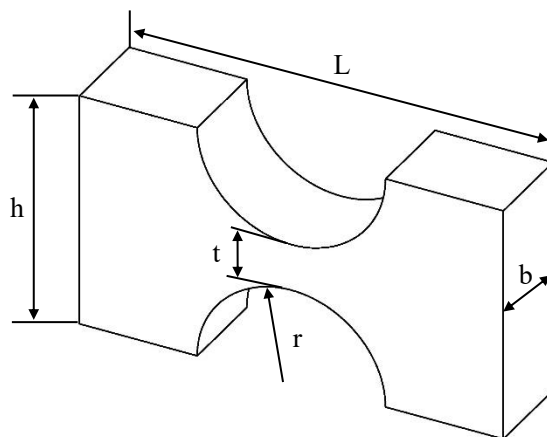


图 2-8 直圆型柔性铰链

在上图中， t 为凹口厚度， h 为铰链高度， b 为铰链宽度， L 为铰链长度， r 为铰链结构半径。直圆型柔性铰链刚度公式表示为^[54]：

$$k_1 = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi r^{1/2}} \quad (2-12)$$

因机构整体结构对称，则可以先对机构一侧进行分析。当整个机构受到压电陶瓷的力驱动而运动时，会得到相应的动能与势能，分别表示为：

$$E_k = \frac{1}{2}m_1\dot{\Delta a}^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{\Delta x}^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 \quad (2-13)$$

$$E_p = \frac{1}{2}k_1\theta_1^2 \times 2 + \frac{1}{2}k_1\theta_2^2 \times 4 \quad (2-14)$$

式中： m_1 ， m_2 为杆 AC、EF 质心处的质量；

J_1 ， J_2 为杆 AC、EF 绕铰链 D 和 H 转动的转动惯量；

E_k ， E_p 为机构整体动能与势能。

同时可知：

$$\tan \theta_1 = \frac{\Delta d}{L_1} \quad (2-15)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{\Delta a}{L_3} = \frac{\lambda_1 \Delta d}{L_3} = \frac{L_2 \Delta d}{L_1 L_3} \quad (2-16)$$

由于整体机构的实际变化很小，所以可知：

$$\theta_1 = \frac{\Delta d}{L_1} \quad (2-17)$$

$$\theta_2 = \frac{L_2 \Delta d}{L_1 L_3} \quad (2-18)$$

同时根据式（2-1）、式（2-2）可知：

$$\Delta a = \lambda_1 \Delta d = \frac{L_2 \Delta d}{L_1} \quad (2-19)$$

$$\Delta x = \lambda \Delta d = \frac{L_2 L_4 \Delta d}{L_1 L_3} \quad (2-20)$$

所以，式（2-13）、式（2-14）可进一步推导为：

$$E_k = \frac{1}{2} M \Delta d^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{m_1 L_2^2 L_3^2 + m_2 L_2^2 L_4^2 + J_1 L_3^2 + J_2 L_2^2}{L_1^2 L_3^2} \right) \Delta d^2 \quad (2-21)$$

$$E_p = \frac{1}{2} K \Delta d^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2k_1 L_3^2 + 4k_1 L_2^2}{L_1^2 L_3^2} \right) \Delta d^2 \quad (2-22)$$

最终机构刚度 K 为：

$$K = \frac{8k_1 L_3^2 + 16k_1 L_2^2}{L_1^2 L_3^2} \quad (2-23)$$

优化模型参数流程，如图 2-9 所示。

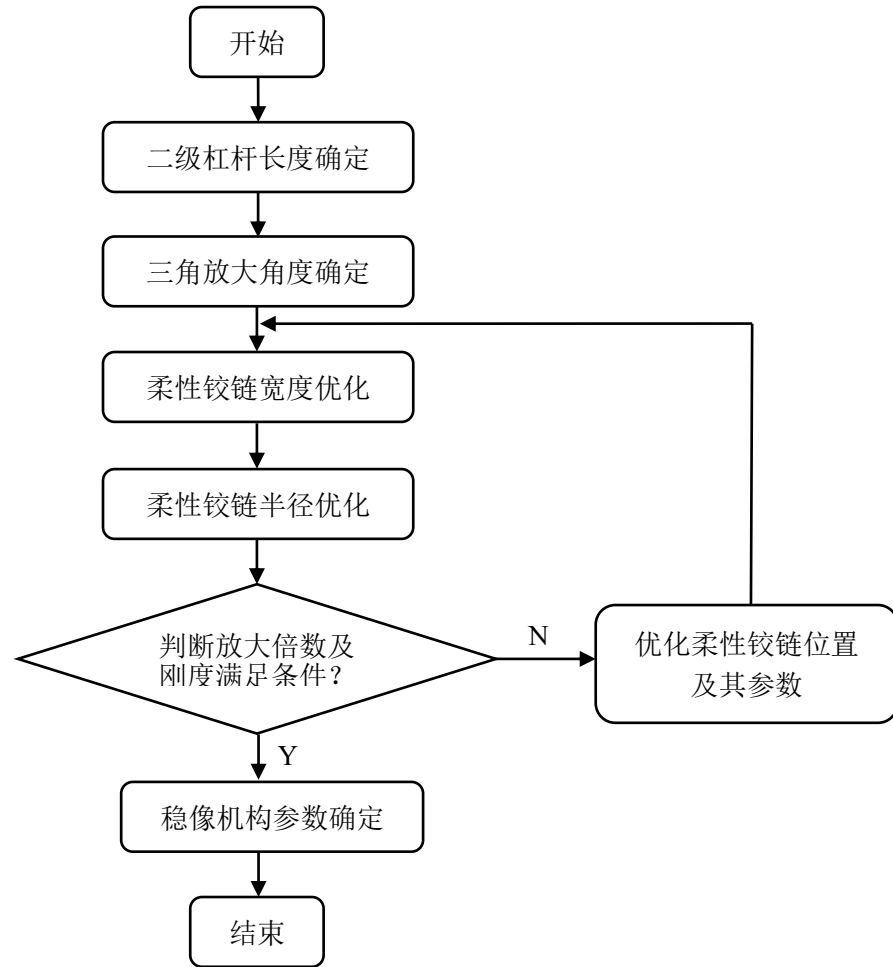


图 2-9 优化模型参数流程图

Step1: 因稳像机构整体尺寸和需采用双向作动的限制，对放大机构尺寸也有一定要求，由此确定二级杠杆长度。

Step2: 因机构刚度需求，三角放大机构角度不宜过大，且同时满足放大倍数要求，由此确定角度值。

Step3: 满足稳像机构放大倍数同时, 提升柔性铰链的宽度和半径参数。

Step4: 判断机构是否满足条件, 最终确定机构参数。

柔性铰链主要参数见表 2-1。

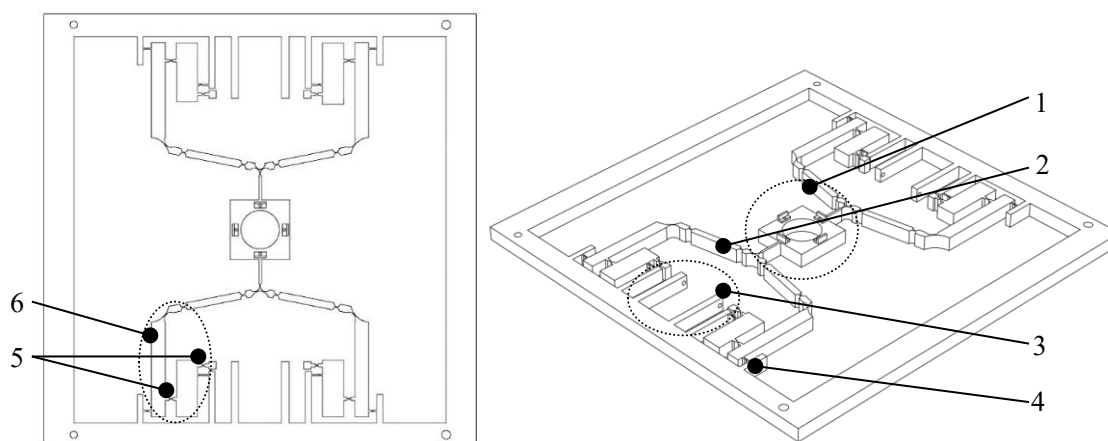
表 2-1 柔性铰链主要参数

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	b	t	r	h
数值	7	14	9	54	10	0.5	2	5

根据表 2-1、式 (2-12) 和式 (2-23), 可计算出机构的理论刚度值为 $58.1 \text{ N}/\mu\text{m}$, 稳像机构刚度值在 $1\text{-}100 \text{ N}/\mu\text{m}$ 均满足刚度所需条件^[55]。

2.2.5 稳像机构结构设计

结合二级杠杆放大倍数大、三角放大机构结构稳定和直圆型柔性铰链利于机构微动变形的优势, 提出航空相机稳像机构的设计方案, 其结构如图 2-10 所示, 结构三维模型如图 2-11 所示。



1-运动平台; 2-三角放大机构; 3-预紧机构;
4-杠杠固定端; 5-柔性铰链; 6-二级杠杠放大机构

图 2-10 稳像机构模型

稳像机构作用于航空相机的运动平台, 包括对称设置的两个放大单元, 放大单元包括两个对称设置的放大模块, 放大单元的对称轴和放大模块的对称轴呈十字。

放大单元包括驱动机构、第一放大机构和第二放大机构; 驱动机构采用 4 个压电陶瓷($5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)作为动力源以提供输入位移, 压电陶瓷放置在二级杠杠放大机构的输入端; 一级杠杠输出端与二级杠杠输入端之间通过柔性铰链进行铰接, 充分发挥其柔性特点, 增大机构放大倍数; 同侧放大单元中

两个第二放大机构的输出端，通过输出杆作用在运动平台上^[56]。

当预紧机构给压电陶瓷提供预紧，对压电陶瓷施加驱动电压，此时压电陶瓷受电压驱动导致变形，在水平方向会产生一个力传至放大机构，其作为输入位移，经放大机构单元将微小位移进行放大后，在与输入位移垂直的方向产生一个输出位移，作用在运动平台上^[57]。

2.3 航空相机稳像机构仿真分析

为了验证稳像平台中放大机构的位移输出特性，在 Solidworks 软件中构建航空相机稳像机构模型，利用 ANSYS 软件对机构整体进行仿真分析。稳像机构选用刚度与柔性较为合适的 65Mn 作为材料，其参数见表 2-2。

表 2-2 65Mn 主要参数

材料	密度(kg/m ³)	泊松比	体积模量(Pa)	剪切模量(Pa)	拉伸屈服强度(Pa)
65Mn	7850	0.3	1.67×10^{11}	7.69×10^{10}	7.36×10^8

基于本实验选用 NAC2013-H10 型号的压电陶瓷，在 ANSYS 软件中设置结构尺寸及相关技术参数，参数设置完毕，对稳像机构模型生成网格，并对其加载一定边界条件。

2.3.1 稳像机构放大倍数仿真

航空相机稳像机构的上下放大单元结构完全相同，因此，只需对其中一个放大单元进行仿真即可模拟整个稳像机构的作用效果。将稳像机构的预紧机构、杠杆固定端和打孔位置设置为固定面，在压电陶瓷两侧和二级杠杆两个输入端的接触面上，分别加载方向相反、数值相等的两个位移矢量。

在 120 V 的电压驱动下，压电陶瓷输出位移通常在 10 μm 左右，在与压电陶瓷接触的两个面上加载 10 μm 输入位移，模拟代替压电陶瓷受到电压驱动时的伸长量，此时，模型在竖直方向上会产生相应输出位移，模型位移应变如图 2-11 所示。

在放置压电陶瓷的位置，水平输入 0.01 mm 位移得到竖直方向的输出位移为 0.3672 mm，即机构整体放大倍数为 36.72，计算得出机构理论放大倍数为 37.2，由此可知，机构整体输出位移仿真结果与理论计算的误差小于 2%。因为在进行理论计算时简化了柔性铰链结构，未考虑机构刚度对整体放大倍数的影响，使得稳像机构仿真结果略低于理论计算结果^[58]。

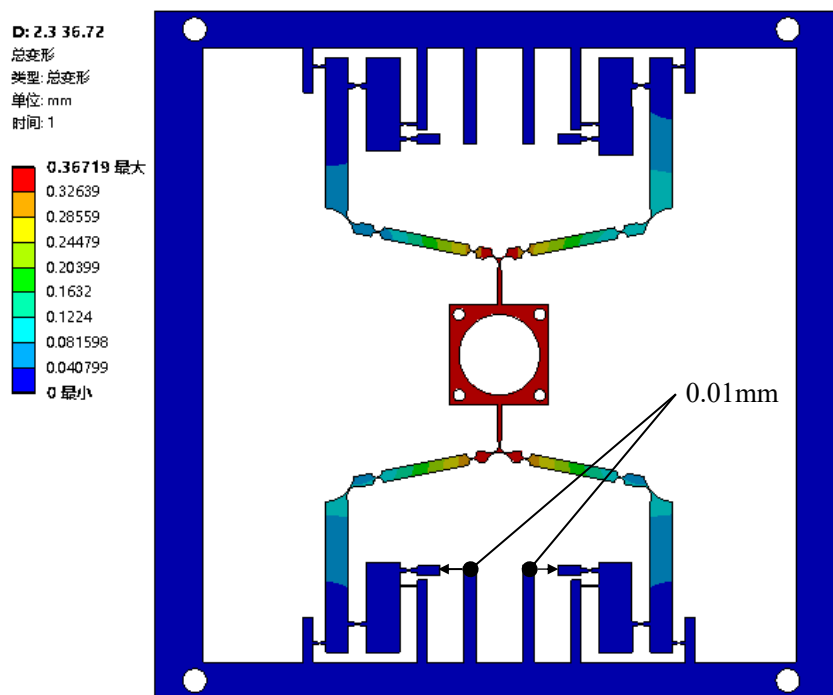


图 2-11 机构位移应变示意图

对航空相机稳像机构进行理论计算、作图法和仿真分析三种方法对比，如图 2-12 所示。

航空相机稳像机构通过作图法与仿真和理论计算的相对误差分别小于 1% 和 2%，其出现一定偏差的原因：在于机构在实际工作中会产生一定的弹性变形，使得稳像机构整体放大倍数发生一定误差；因输入端受力的影响，稳像机构的柔性铰链也会发生一定拉伸，从而与理论分析数值产生偏差。

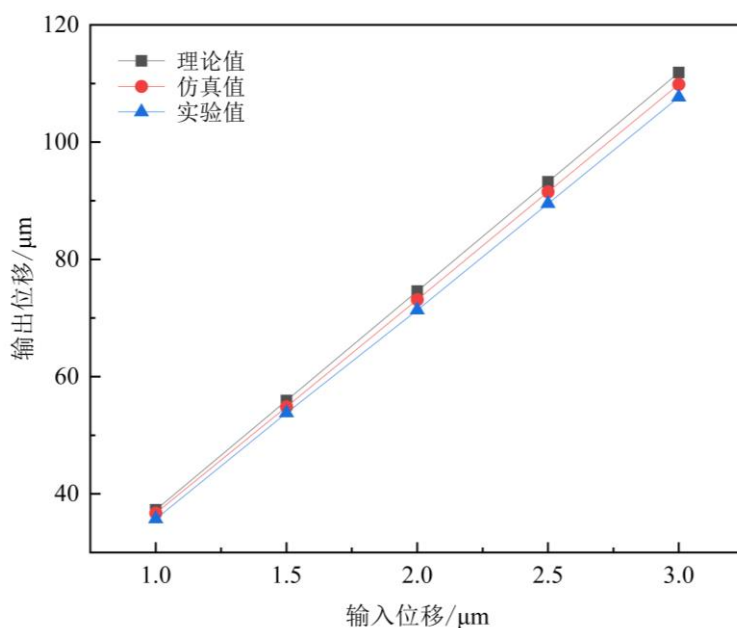


图 2-12 稳像机构放大倍数对比图

2.3.2 稳像机构刚度仿真

对航空相机稳像机构进行刚度分析，将机构模型导入至 ANSYS 软件，同时建立其有限元模型。网格单元最小尺寸设置为 2 mm，在孔的位置和杠杆固定端添加固定约束，再对二级杠杆的两个输入端，分别施加方向水平、大小为 1 N 的力，得到模型的整体总变形，如图 2-13 所示。

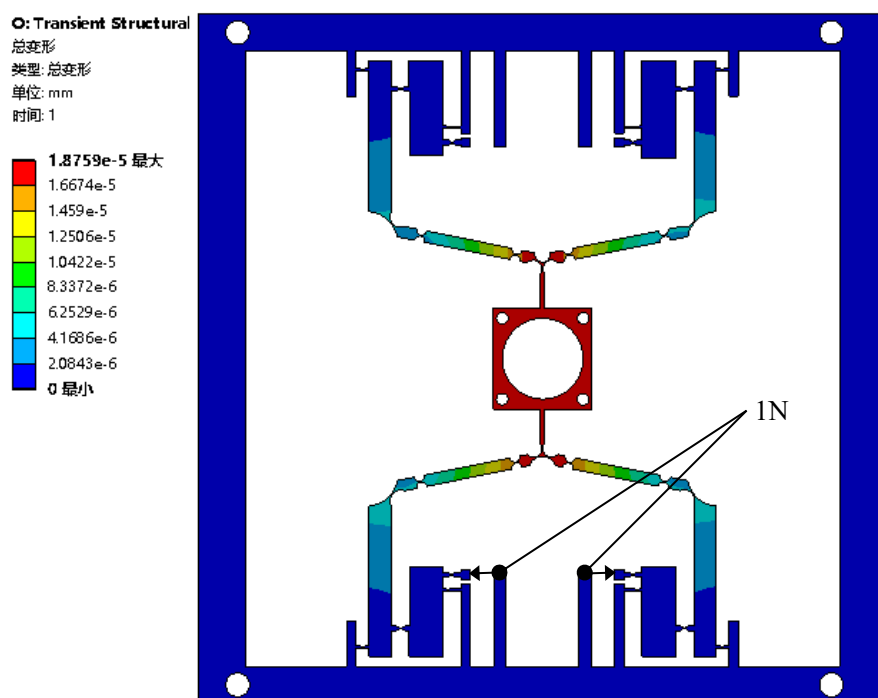


图 2-13 机构受力变形

在上图中压电陶瓷的位置输入 1 N 力，机构整体变形量约为 1.876×10^{-5} mm，得出机构仿真刚度约为 53.3 N/ μm 。机构刚度仿真值与理论值 58.1 N/ μm 十分接近，相对误差小于 8%。

机构理论刚度与仿真刚度数值对比，如图 2-14 所示。

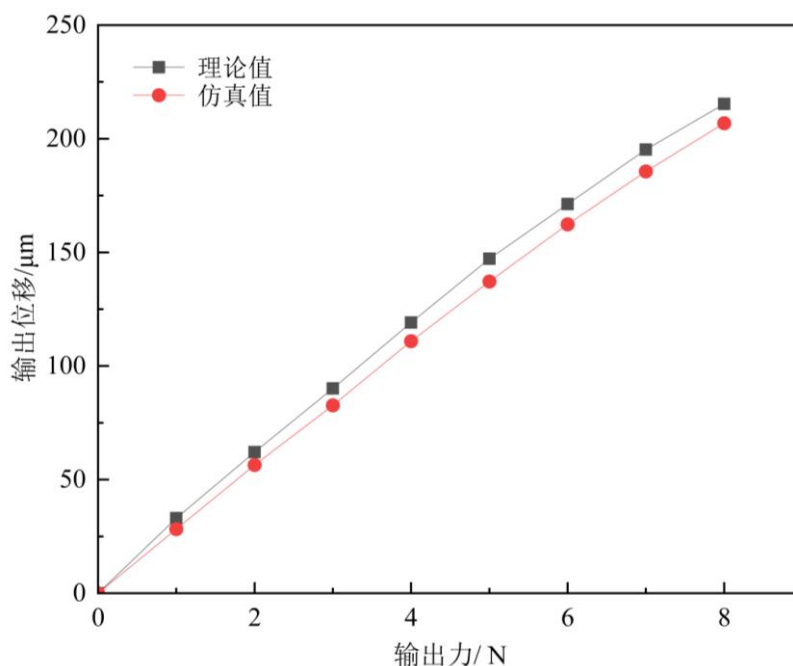


图 2-14 机构理论刚度与仿真刚度对比

由上图可知，航空相机稳像机构的刚度仿真值与理论计算值十分接近，因此，机构整体刚度理论计算的可靠性很高。

2.3.3 稳像机构模态分析

该机构应用于航空拍摄的高频操作，因此必须分析共振频率对机构的影响。利用 ANSYS 软件对稳像机构进行模态分析，可得出其 6 阶固有频率，为机构后续参数优化和实际应用提供数据支持。机构前 6 阶模态以及对应的固有频率如图 2-15 和表 2-3 所示，机构的 1 阶固有频率为 153.69 Hz，可以满足 100 Hz 工作频率要求，在下一阶段会进一步验证机构性能。

对稳像机构前六阶的模态分析可知：在第 1 阶、第 2 阶与第 3 阶频率的作用下，中间镜头分别在二级杠杆机构和三角机构的带动下，沿 x、z 方向分别发生了位移运动；第 4 阶与第 6 阶频率的作用下，中间镜头分别在二级杠杆和三角机构的带动下，沿 y 方向发生位移运动；第 5 阶频率的作用下，中间镜头沿 z 轴方向发生旋转运动。

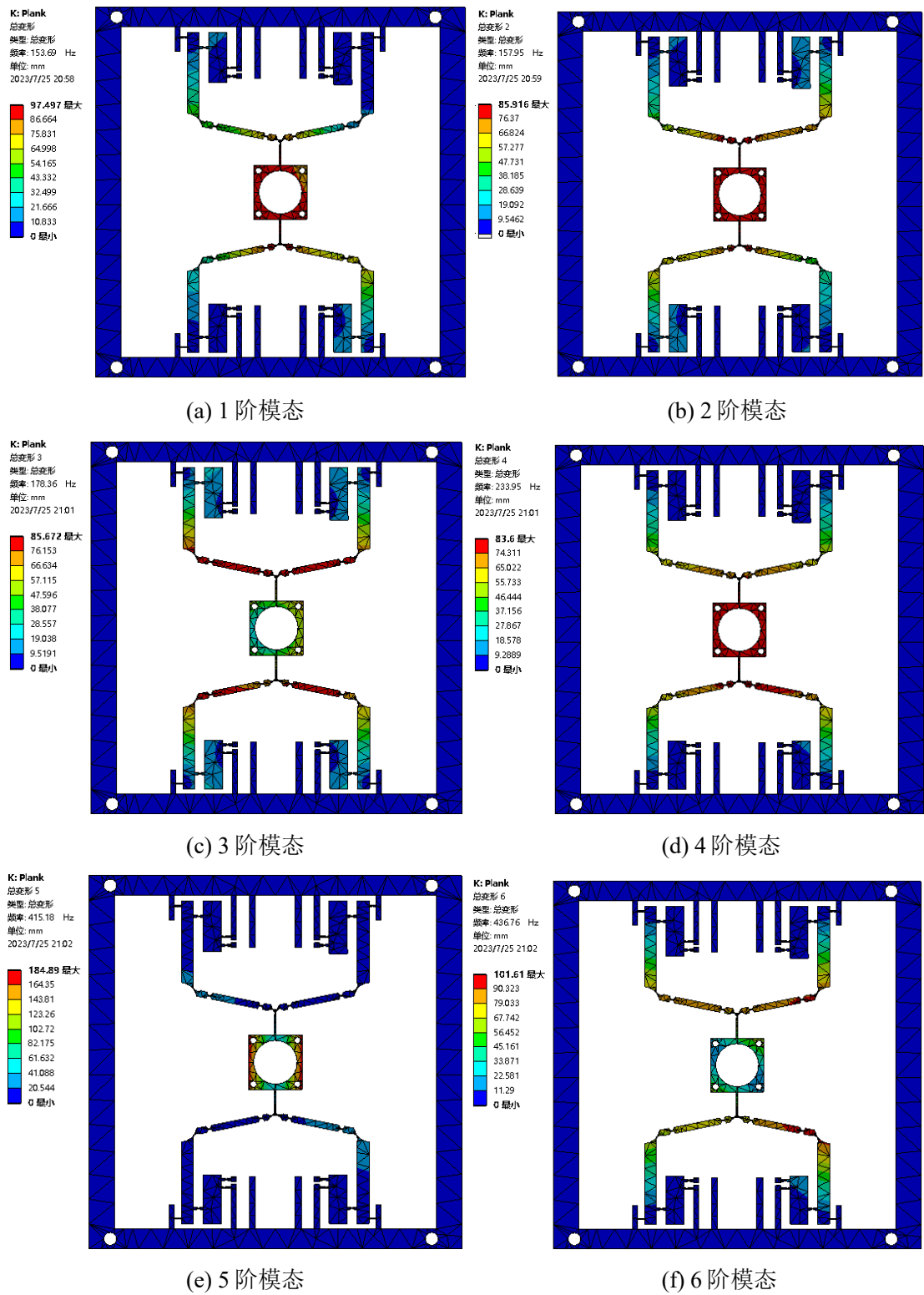


图 2-15 前六阶模态仿真图

表 2-3 稳像机构固有频率

模态	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
固有频率/Hz	153.69	157.95	178.36	233.95	415.18	436.76

2.4 本章小结

1. 提出了一种将二级杠杆、三角放大机构以及柔性铰链结合的航空相机稳像机构设计方案，建立了理论和数学模型，基于杠杆、三角放大和刚度原理，推导出稳像机构整体放大倍数和机构整体刚度。

2. 对稳像机构模型进行放大倍数、刚度和模态有限元分析，得出稳像机构放大倍数约为 36.72，由作图法得出机构放大倍数为 37 与理论计算倍数 37.2 误差小于 2%；仿真刚度 $53.3 \text{ N}/\mu\text{m}$ 与理论计算刚度 $58.1 \text{ N}/\mu\text{m}$ 误差小于 8%；对机构进行模态仿真，得到机构一阶共振频率为 153.69 Hz，在实际操作环境下应避免达到此共振频率。

第3章 航空相机稳像机构实验研究

通过结合二级杠杆和三角放大机构所设计出的稳像机构方案，在保证结构紧凑的同时，又极大提高了机构整体放大倍数，同时加入直圆型柔性铰链结构，提升了航空相机稳像机构的整体刚度^[59]。对航空相机稳像机构整体设计方案进行仿真验证，初步验证了机构的理论计算推导和位移输出特性等相关数据的准确性。

本章将会对第二章设计的放大机构方案，先加工出实物样机，对样机进行实验验证与分析，主要是对输出位移特性、位移拟合效果和压电陶瓷驱动的放大机构位移放大倍数（单边及双边）和检测机构位移精度等，验证稳像机构输出位移行程、重复性精度及共振频率是否与理论计算一致，并且对其补偿压电陶瓷迟滞特性方向提供实验数据参考，为后续搭建控制系统提供理论依据。

3.1 航空相机稳像机构平台搭建

由于作用在放大机构上的输入位移很小，同时机构结构又非常紧凑，为减少加工后装配造成的误差，一般选择一体化加工方式，图 3-1 为稳像机构实物图。

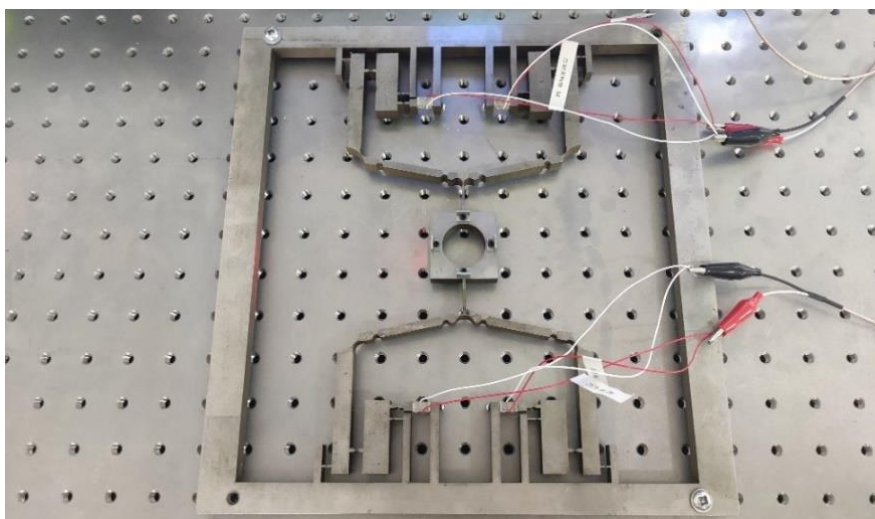
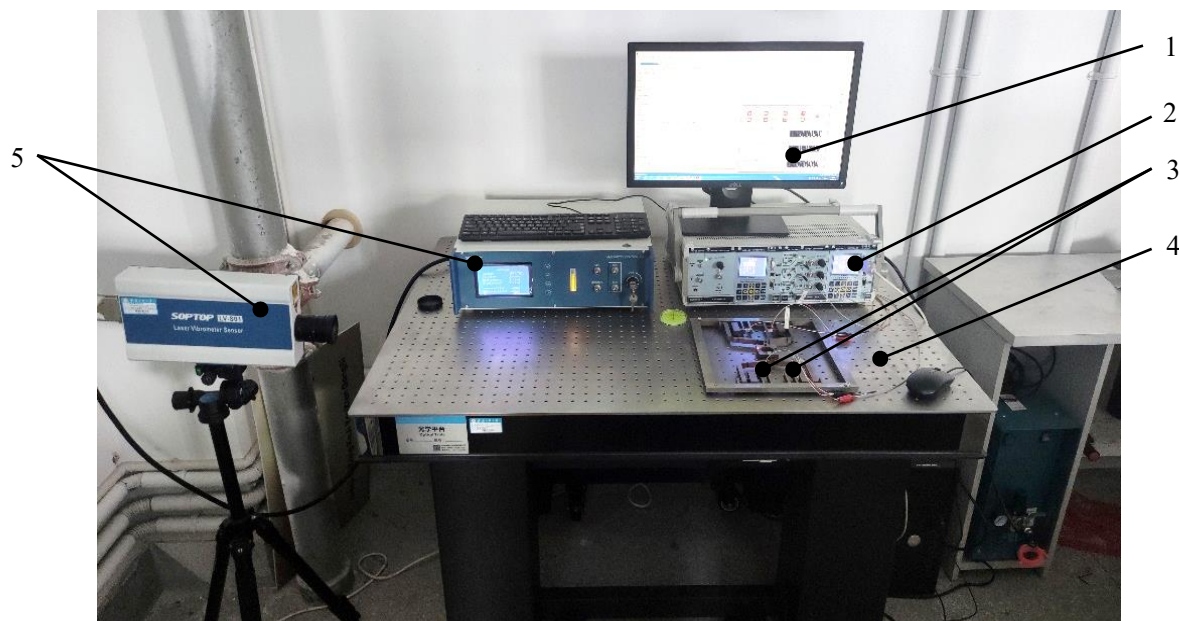


图 3-1 稳像机构实物图

根据上述提出的设计方案，加工时采用慢走丝线切割方式，以微米级加工

精度加工出该稳像机构，基本可以满足正常使用要求。该航空相机稳像机构具有输出位移行程大、结构设计紧凑和刚度大等特点，可以应用于光学稳像系统中。

根据机构三维图，加工稳像机构，实验平台主要由四个压电陶瓷（NAC2013-H10）、压电控制器（E00.D4）、激光测振仪（LV-S01）、气浮平台（QF-12-09-08）和计算机组成，整个实验台布置如图 3-2 所示。



1-计算机；2-压电控制器；3-压电陶瓷；4-气浮平台；5-激光测振仪

图 3-2 航空相机稳像平台实验装置

稳像机构整体由两组对称的放大单元组成，放大单元的对称轴和放大模块的对称轴呈十字，每个放大单元包括两组放大模块，利用四个螺栓将稳像机构固定在气浮平台上，激光测振仪将红外光线聚焦在机构的标靶元件上，以此来测量位移变化量，数据传递至电脑端。压电陶瓷在预紧机构作用下分别从两个方向对四个输入位移进行放大，通过相互抵消的方式消除横向位移误差，机构可以单边、双边分别输出位移，实验过程如图 3-3 所示。

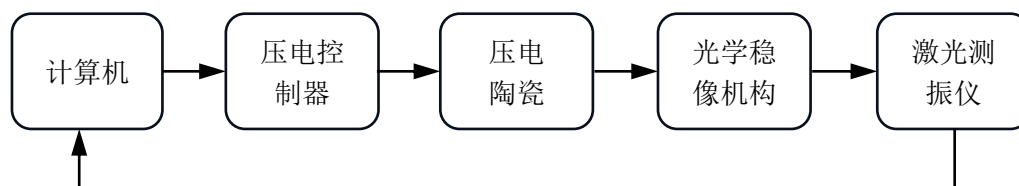


图 3-3 实验过程框图

Step1: 在计算机端设置电压参数，控制压电控制器输入电压。

Step2: 压电控制器可以同时产生两路输出信号（因机构两两对称，因此两路信号可同时加载 4 个压电陶瓷），输出电压直接驱动于压电陶瓷使其伸长。

Step3: 压电陶瓷伸长后，经过放大机构放大，作用于稳像机构的运动平台。

Step4: 激光测振仪的红外检测探头，检测到光学元件在轴线方向上的位移，位移数据传送到计算机软件中。

3.2 航空相机稳像机构实验

3.2.1 压电陶瓷迟滞效应

压电陶瓷输入驱动电压后的输出位移与实际位移之间存在误差，即会产生非线性数据也称作迟滞效应，该现象会影响驱动器的输出精度等性能，所以对压电陶瓷迟滞进行实验，会帮助稳像机构提高精度、响应时间等参数。对迟滞实验数据进行处理，在输入电压 0-120 V 范围内，间隔为 20 V 的不同电压下进行多次测试稳像机构的单方向迟滞回线，并把实验结果绘制成输出电压与测量位移曲线图，如图 3-4 所示。

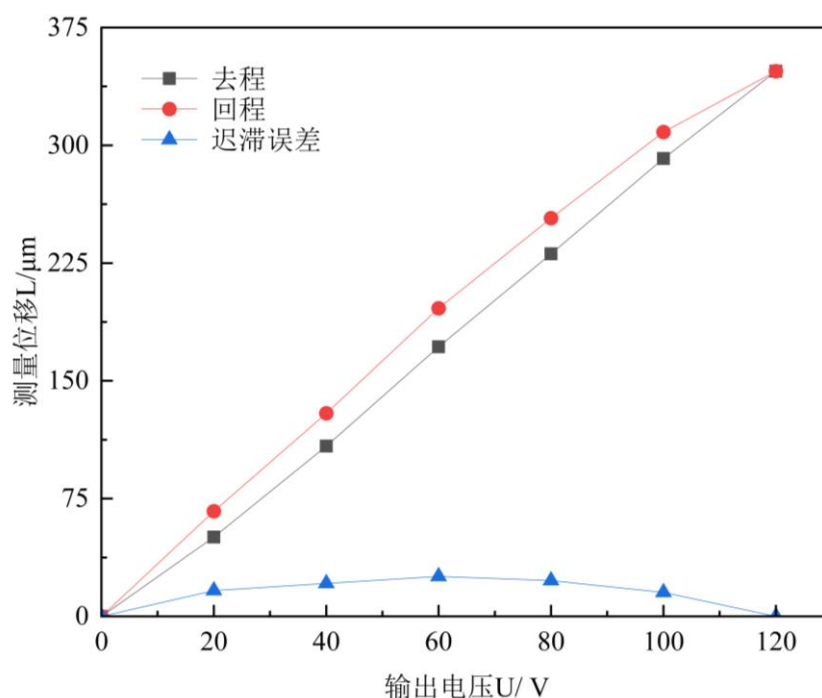


图 3-4 压电陶瓷重复性实验

由压电陶瓷输出位移的迟滞回线可以看出，其具有非线性和不对称性，而在不同输出电压 U 下，机构输出位移对应的误差曲线也并不同。稳像机构的迟滞回线最大宽度为 12.74%，迟滞效应较小，线性度较好，但也会影响机构整

体输出精度。

3.2.2 单边位移检测

位移检测实验平台搭建完成后，进行输出位移测量实验。测试时，先将气浮平台调至水平，把航空相机稳像机构固定在气浮平台上，将 4 个压电陶瓷固定在输入端，并利用预紧机构对压电陶瓷进行预紧，调节好激光测振仪光点位置，使标靶上的测量点出现在视野内。

改变压电控制器输入电压从而改变压电陶瓷输出位移，通过激光测振仪测量实际输出位移。驱动电压在 0-120 V 范围内，以 20 V 为间隔，在不同驱动输入电压下记录机构输出位移值，稳像机构单边输出位移，如图 3-5 所示。

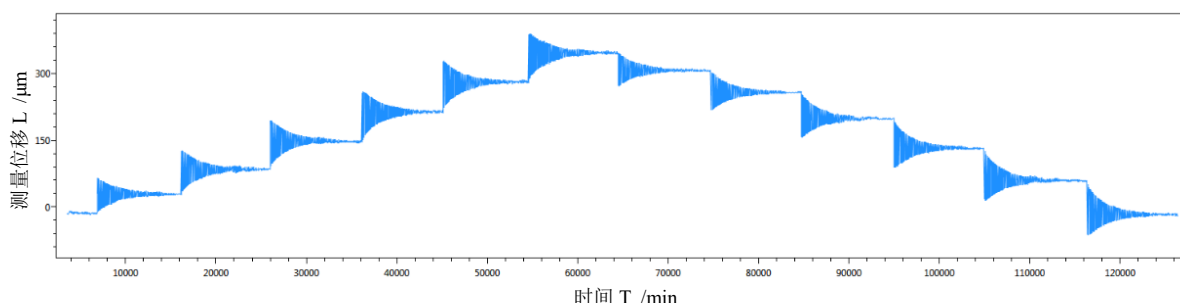


图 3-5 稳像机构单边位移

将输入电压与输出位移进行线性拟合，位移检测拟合曲线如图 3-6 所示。

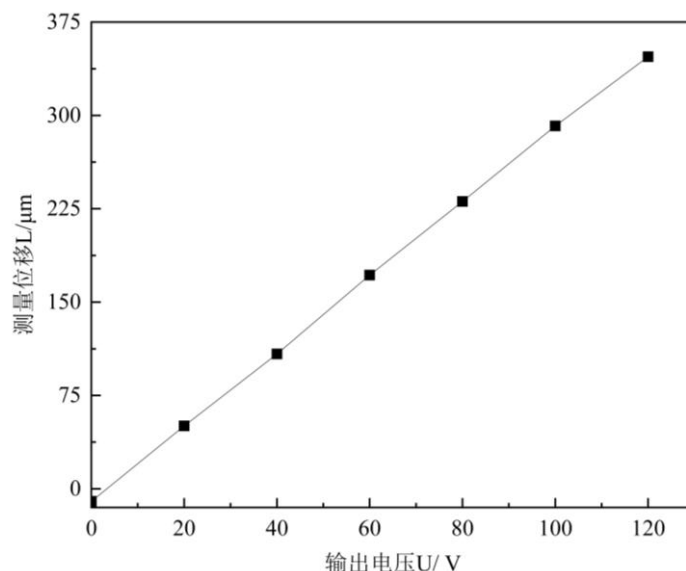


图 3-6 位移检测拟合曲线

压电陶瓷输出位移 L 可以表示为：

$$L = 3U - 10 \quad (3-1)$$

3.2.3 双边位移检测

将压电陶瓷固定并预紧后，改变驱动输入电压，从而改变压电陶瓷的输出位移。驱动输入电压在 0-120 V 范围，以 20 V 为间隔，从 0 V 逐步升高至 120 V，再逐步降压至 0 V，利用激光测振仪检测输出位移，稳像机构双边输出位移，如图 3-7 所示。

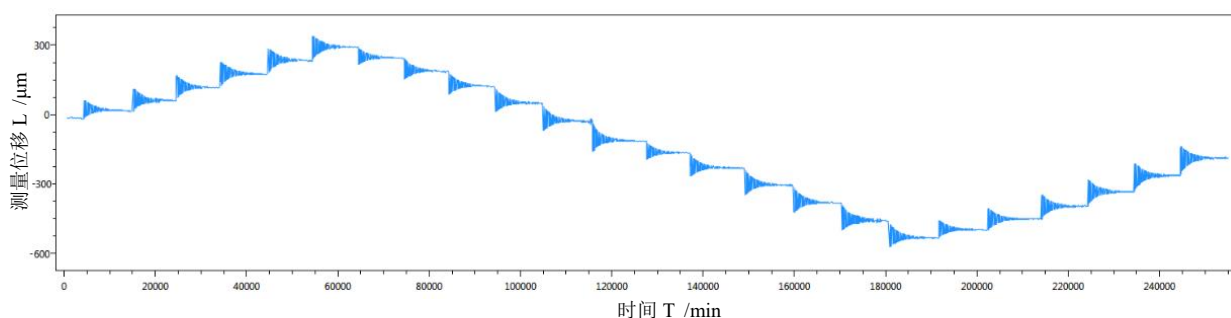


图 3-7 稳像机构双边位移

稳像机构在 120 V 输入电压下的输出位移最大为 347.2 μm ，实验所用的压电陶瓷在 120 V 输入电压下的输出位移为 10 μm ，因此设计的航空相机稳像机构实际输出位移放大比为 34.72。

对稳像机构的理论值、仿真值以及实验值，由三种计算方式得出的放大倍数进行比较，其结果如图 3-8 所示。

微位移放大仿真值、实验值与理论值误差分别小于 2%和 6.9%。其中理论分析的放大倍数最高，理论、仿真与实验测试数据出现一定偏差的原因：理论分析把放大机构的模型绝对理想化，忽略了实际加工、机械性能等条件；稳像机构在实际运行过程中会产生一定的弹性变形，使机构发生一定变形从而造成误差；在输入端受压电驱动产生力的情况下，机构的柔性铰链也会产生拉伸，影响机构整体放大倍数，从而改变实际数值；同时在有限元分析过程中，划分单元格网络时，受计算机性能影响，单元格尺寸不够精细，会与理论数据产生一定偏差，其数值在合理的范围内，符合逻辑规律^[60]。

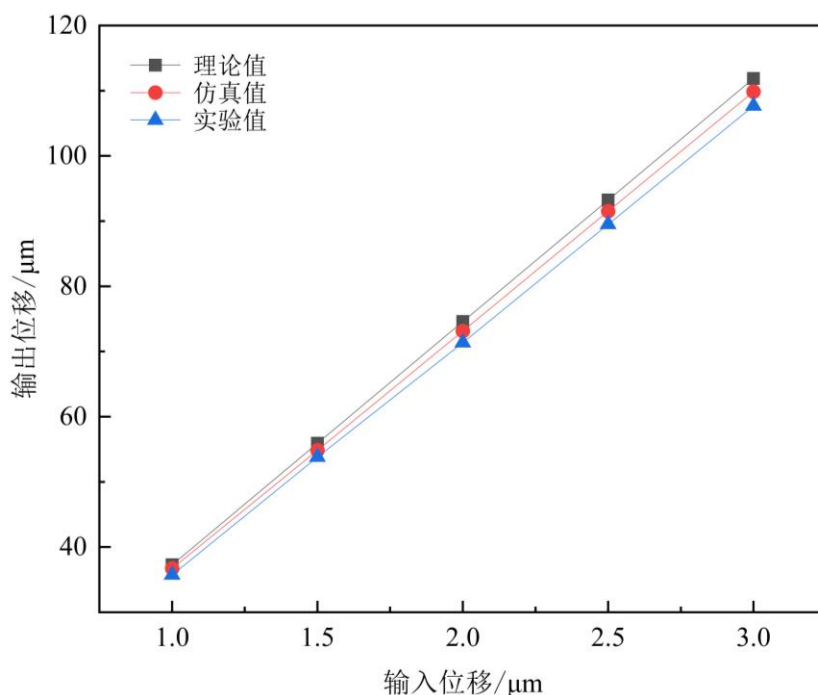


图 3-8 稳像机构放大对比图

3.2.4 重复精度检测

重复精度用于检测双向作动稳像机构输出位移稳定性，也可用来检测压电陶瓷迟滞性产生的非线性位移，这对于提升稳像机构的定位精度、重复精度和位移补偿控制有着重要意义。

对稳像机构在不同驱动电压下各取 5 组数据，分别对每组数据中 20 V、40 V、60 V、80 V、100 V、120 V 六个电压进行重复性实验，测出实际输出位移，以此检验稳像机构的稳定和精度，数据见表 3-1。

表 3-1 部分实验数据及其标准差

序号	测量位移(μm)					
	20 V	40 V	60 V	80 V	100 V	120 V
1	49.43	107.59	170.74	229.84	290.56	346.28
2	49.75	107.84	171.01	230.03	290.87	346.69
3	50.01	108.21	171.36	230.56	291.19	347.02
4	50.39	108.56	171.69	230.92	291.42	347.54
5	50.73	109.02	172.51	231.13	291.83	347.96
标准差	0.459	0.509	0.614	0.497	0.438	0.597

经过六次电压测量，相同实验条件下，稳像机构的输出位移稳定后只在很小的范围内波动，机构稳定性很高。

对输出位移进行重复实验检测，在输入电压相同的条件下，进行 5 组重复实验，利用式 (3-1) 将输入电压信号转变为输出位移信号，实验结果如图 3-9

所示。

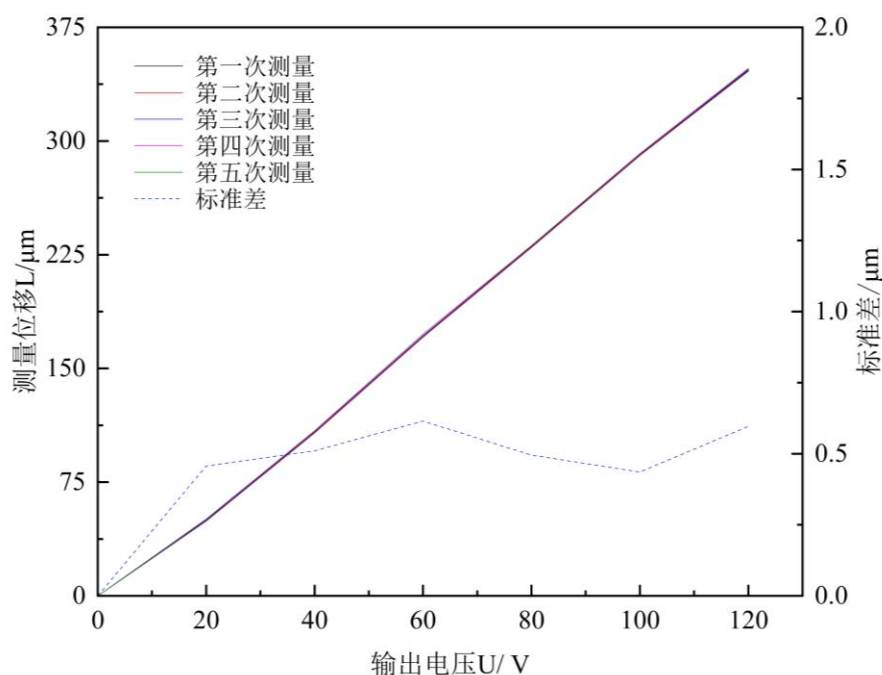


图 3-9 稳像机构重复性精度实验

在相同条件下对静态特性的输出位移进行 5 次重复性实验，位移检测实验重复性良好，5 次实验测量数据基本重合，最大重复性标准差为 $0.614 \mu\text{m}$ ，系统稳定。

3.2.5 共振频率检测

为研究输入信号频率与航空相机稳像机构输出位移之间的内在关系，且与上一章中的模态分析进行对比，进行对共振频率的检测实验。实验将压电控制器的输入信号从直流电替换成具有正弦波信号的交流电。

因前面实验中使用的压电控制器电压信号输出范围为 0-120 V，所以设置正弦波信号峰值电压 U 为 120 V，偏置电压为 60 V，正弦波输入信号可以表示为：

$$U = 60 \sin \omega t + 60 \quad (3-2)$$

其中： t 表示时间， $\omega = 2\pi f$ 表示角速度， f 表示正弦波信号频率。

正弦波输入信号初始频率 f 为 20 Hz，以 20 Hz 为梯度逐级递增，利用激光测振仪测出在不同输入信号频率下的稳像机构输出位移，根据实际值得出输出位移与输入频率之间关系，如图 3-10 所示。

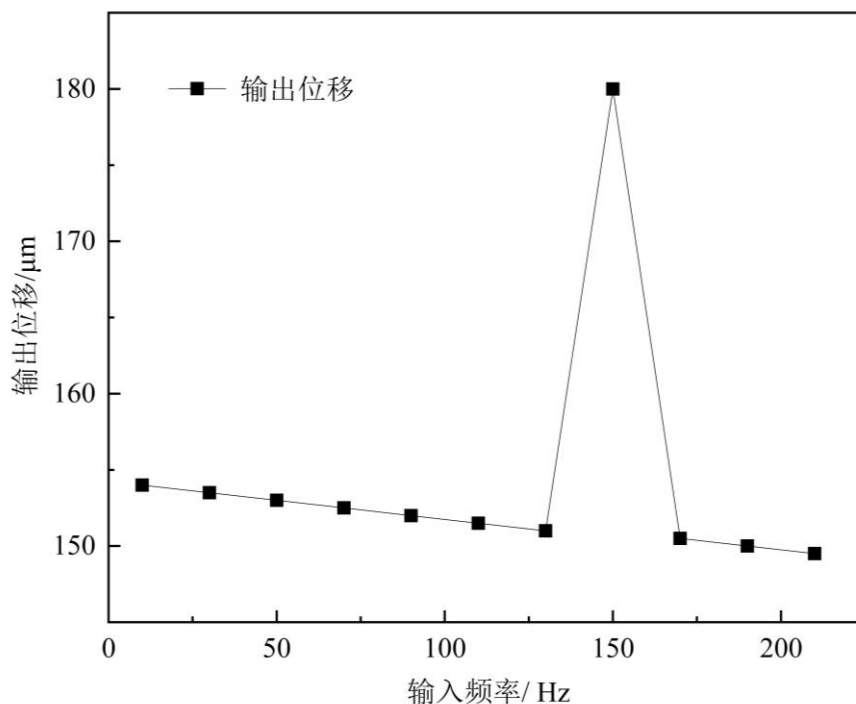


图 3-10 输出位移与输入频率关系

稳像机构整体输出位移随输入频率的升高而降低，当输入频率为 150 Hz 时，实验中引发稳像机构产生共振现象，导致输出位移发生剧烈变化。结合上一章对稳像机构的模态分析可知，压电叠堆在输入信号为 150 Hz 频率工作下，会导致机构发生共振，从而影响稳像机构输出精度。为最大程度保证稳像机构输出位移精度，应尽量减小机构的输入频率信号。

3.3 实验结果与分析

基于航空相机稳像机构搭建实验平台，对稳像机构的各项性能进行检测与实验研究。输入端电压 U 为 120 V 时，稳像机构的双边输出位移分别为 347.2 μm 和 328.4 μm ，机构整体最大放大倍数为 34.72 倍，且稳像机构的输出位移随输入电压的增大而线性增大，最大重复性标准差仅为 0.614 μm ，稳像机构在输入 150 Hz 频率时，会导致机构产生共振现象，应避免机构接近一阶固有频率，即可达到理想效果。通过以上对稳像机构五项测试实验，证明该设计方案是合理且可行，同时也验证了航空相机稳像机构及平台的性能参数。

3.4 本章小结

1. 对稳像机构进行实验，得出当输入电压范围在 0-120 V 内，间隔为 20 V 时，稳像机构迟滞回线最大宽度达到了 12.74%；在相同输入电压条件下，检测出机构输入电压与输出位移之间呈线性关系；当输入端电压 U 为 120 V 时，稳像机构最大输出位移为 $347.2\ \mu\text{m}$ ，即机构放大倍数 34.72，与理论误差小于 6.9%。

2. 在相同电压条件下，基于 6 组静态特性输出位移的 5 次重复性实验数据，揭示机构最大重复性标准差达到了 $0.614\ \mu\text{m}$ ，进一步证明该机构输出稳定性和输出精度满足稳像条件；检测得出稳像机构的共振频率为 150 Hz，验证了其仿真结果的一致性，工作环境下应避免出现此频率。

第 4 章 航空相机微位移控制算法研究

为了最大程度挖掘 PID 控制下光学稳像系统的性能，提高输出位移的稳定性和精度。基于 PID 控制，引入灰狼算法和粒子群算法对 PID 参数进行整定优化，利用灰狼算法收敛性强、参数少等特点，粒子群算法收敛快、搜索能力强等特点，建立补偿压电陶瓷迟滞现象的数学模型和控制系统，经过多次迭代后找到相对最优的一组 PID 控制参数，对系统进行控制，即可实现平台的微位移补偿，控制系统具有自适应性和鲁棒性^[61-63]。

首先采用 PID 控制获取平台位移偏差量与输入电压之间的关系，分析两者间关系，完成稳像系统搭建；通过灰狼算法和粒子群算法分别对控制参数进行优化，反馈给系统输入，数据证明算法控制优化输出位移的精准性；对灰狼算法和粒子群算法优化后的位移数据进行对比分析，选取更适合稳像机构的算法作为其控制算法，在一定程度上保证了光学稳像机构的要求^[64]。

4.1 传统 PID 控制

在大多数情况下，人们更倾向于选择操纵简单、维修次数少且经济的控制器，恰好传统 PID 控制具有控制简单、不易出错且效率较高等优势。针对航空相机稳像机构的控制方法，一般采用闭环控制较为合适，将期望输出位移 $r(t)$ 作为系统输入，经系统运行后得出驱动电压 $u(t)$ 、误差 $e(t)$ 以及输出位移 $y(t)$ 等参数，将期望位移 $r(t)$ 与输出位移 $y(t)$ 相比较，误差 $e(t)$ 作为判断参数是否合适的标准，实现对航空相机稳像控制，进而实现对机构位移补偿的目的。

航空相机稳像 PID 控制系统，如图 4-1 所示，其中通过改变系统中的比例(P)、积分(I)和微分(D)三项参数，使三者通过相互组合，达到最优效果，完成对输出位移的调节。

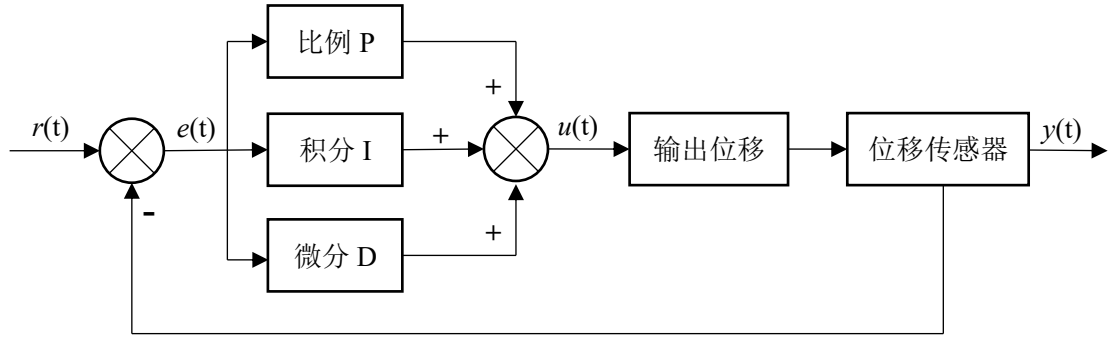


图 4-1 稳像系统 PID 控制图

稳像系统中： $r(t)$ 代表系统输入值， $y(t)$ 代表系统输出值， $u(t)$ 代表 PID 整合出的电压输出值， $e(t)$ 代表系统误差值，表达式如下：

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4-1)$$

PID 的控制规律为：

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (4-2)$$

式中： K_p 代表比例， T_I 代表时间积分， T_D 代表微分时间。

将式（4-2）改写为传递函数的形式：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s] \quad (4-3)$$

因此，系统优化的重点是根据输入端的不同输入对象发生对应变化，优化控制参数，使系统误差 $e(t)$ 尽可能降低，提高控制精度和效果。

通过对 PID 控制器参数值的连续整定和比较，利用 PID 控制的优势，降低系统波动幅度和响应时间，提升系统性能，使控制系统达到最优状态。寻求最佳的系统参数组合，提高控制系统的整体性能和输出位移的稳定性^[65]。

传统 PID 控制方法有两种，分别是增量式和位置式，区别在于增量式是将每次系统输出误差进行累加，选取误差之和最小的一组数据进行输出，而位置式则是将当前位置的误差作为下一时刻的输入，将多次误差进行累加。位置式推导公式如下：

$$\begin{cases} t = kT (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \\ \int_0^t e(t) \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{i=0}^k e(i) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{cases} \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} u(k) &= K_P \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{T} (e(k) - e(k-1)) \right\} \\ &= K_P e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D (e(k) - e(k-1)) \end{aligned} \quad (4-5)$$

式中： T 代表整个控制系统时间周期； k 代表系统运行次数； kT 代表系统离散采样时间； 初始时间设为 0； $K_P \frac{T}{T_I} = K_I$ ； $K_P \frac{T_D}{T} = K_D$ 。

位置式控制需要将每次的系统误差 $e(t)$ 作为下一时刻输入，并将误差进行累加，不仅会导致计算变得复杂且占用系统运行内存，而且一旦一次计算结果发生误差，将会使最终结果发生巨大变化，不利于稳像系统的输出与参数优化。所以更多使用场合选用较为稳定的增量式作为控制，其推导公式如下：

$$u(k-1) = K_P e(k-1) + K_I \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + K_D (e(k-1) - e(k-2)) \quad (4-6)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= (K_P + K_I + K_D) e(k) - (K_P + 2K_D) e(k-1) + K_D e(k-2) \end{aligned} \quad (4-7)$$

若令 $A = K_P + K_I + K_D$ ； $B = K_P + 2K_D$ ； $C = K_D$ 。则有：

$$\Delta u(k) = A e(k) + B e(k-1) + C e(k-2) \quad (4-8)$$

若整个控制系统的时间周期 T 持续稳定， K_P 、 K_I 和 K_D 也保持稳定，在第三次测量后即可获得输出增量结果，极大缩短了输出时间提高控制效率。增量式的计算结果是对每次计算都增加一个数值，即使发生计算错误，对整个系统的影响也微乎其微，增量式 PID 控制相较位置式 PID 控制更为可靠。

4.2 灰狼与粒子群算法优化 PID 控制策略

4.2.1 灰狼算法（GWO）基本原理

灰狼算法灵感来源于狼群的行为。在优化 GWO 的过程中，包括社会层面、跟踪猎物和围攻猎物等步骤，GWO 用于解决控制优化问题。首先需构建灰狼整体社会层级模型，以此基准计算灰狼种群中每个个体的适应度函数值，进而标注出种群中排名最高的三只灰狼。优化 GWO 的过程主要是通过优化每个种群的三个最佳解，需要先预测猎物大致位置，设定初始范围后，其他狼在当前三只最佳参数的引领下，随机更新猎物附近的位置，逐渐靠近最优解^[66]。

灰狼算法的数学模型如下：

$$\vec{X}(t+1) = \vec{A}_p(t+1) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4-9)$$

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (4-10)$$

式中： t 代表算法迭代次数， $\vec{X}(t)$ 代表第 t 次迭代狼的位置， $\vec{X}(t+1)$ 代表第 $t+1$ 次狼迭代时位置， $\vec{D}$ 代表当前最优与目标之间距离， $\vec{A}$ 和 $\vec{C}$ 代表系数，由公式给出：

$$\vec{A} = 2\vec{a}r_1 - \vec{a} \quad (4-11)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (4-12)$$

式中： $\vec{r}_1$ 和 $\vec{r}_2$ 均为随机向量， $\vec{r}_1, \vec{r}_2 \in [0, 2]$ ， $\vec{a}$ 与算法性能有关。

算法的原理是在反复优化 α 、 β 和 δ 的最佳解，即整体最优位置，也可以被认为是群狼在追捕猎物，随着时间的推移，灰狼之间的距离也在变化^[67]，由公式给出：

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \end{cases} \quad (4-13)$$

$$\begin{cases} \overrightarrow{D}_\alpha = |\overrightarrow{C}_1 \overrightarrow{X}_\alpha - \overrightarrow{X}| \\ \overrightarrow{D}_\beta = |\overrightarrow{C}_2 \overrightarrow{X}_\beta - \overrightarrow{X}| \\ \overrightarrow{D}_\delta = |\overrightarrow{C}_3 \overrightarrow{X}_\delta - \overrightarrow{X}| \end{cases} \quad (4-14)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1(t) + X_2(t) + X_3(t)}{3} \quad (4-15)$$

式中： $\overrightarrow{X}_1, \overrightarrow{X}_2, \overrightarrow{X}_3$ 为灰狼目前的位置， $\overrightarrow{D}_\alpha, \overrightarrow{D}_\beta, \overrightarrow{D}_\delta$ 为 α 、 β 和 δ 狼与其他狼的位置距离， $\overrightarrow{X}_\alpha, \overrightarrow{X}_\beta, \overrightarrow{X}_\delta$ 为 α 、 β 和 δ 狼的当前位置， $\overrightarrow{A}_1, \overrightarrow{A}_2, \overrightarrow{A}_3$ 为三头狼的向量系数， $\overrightarrow{C}_1, \overrightarrow{C}_2, \overrightarrow{C}_3$ 为其余狼的向量系数。

若满足标准，则狼群发起围猎，若不满足标准，则寻找更远目标。根据式 (4-16) 确定。

$$a_i = 2 \left(1 - \frac{t}{T} \right) \quad (4-16)$$

式中： T 为最大迭代次数， t 是已经迭代次数， a_i 由 2 线性递减为 0，由式 (4-11) 可知 $A_i \in [-a_i, a_i]$ ；若 $|A_i| \leq 1$ ，进行围猎，若 $|A_i| \geq 1$ ，则距离超过标准，继续寻找下一个目标，进行全局搜索。

利用灰狼算法优化稳像系统控制模型流程图，如图 4-2 所示，其具体运行流程如下：

Step1: 对狼群的种群数量、迭代次数和初始位置等参数进行设置，同时随机初始化狼群位置和速度。

Step2: 根据自适应函数计算每只狼的适应值，根据适应度顺序更新每只狼位置，选择最佳位置。

Step3: 跟随最优解进行移动，选择当前位置，对最优位置进行更新。

Step4: 把当前最优位置返回作为控制系统内 PID 的输入量，判断其与目标曲线的误差，如若满足则终止条件，否则就迭代出足够好的解。

Step5: 输出最优解以及对应的函数值。

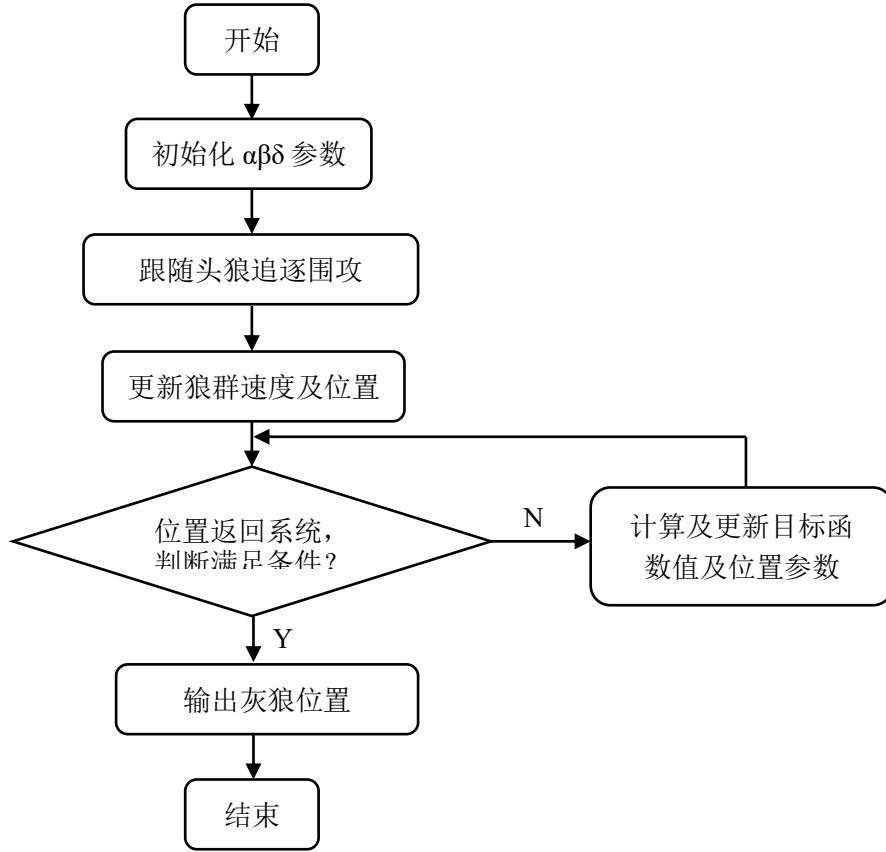


图 4-2 灰狼算法与系统关系流程图

4.2.2 粒子群算法 (PSO) 基本原理

粒子群算法从鸟群觅食的行为中受到启发，粒子每一次的位置变化成为 PSO 的迭代，在每一次迭代过程中，会记下当前位置以及最优位置，比较两位置选取较优位置作为此时粒子的值，粒子通过判定得出粒子群中的最优位置，并在开始设定的搜索范围内输出最优参数，即为当前最优解。

搜索最优解的速度及位置数学模型如下：

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 r_1 (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (p_g(t) - x_i(t)) \quad (4-17)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4-18)$$

上式中： t 为迭代次数， c_1 、 c_2 为加速因子， r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 范围的随机数，当算法迭代次数满足要求或达到算法的适应度函数值满足要求时即停止运行。

为了适应不同的应用场合，避免陷入当前位置局部最优情况，提高算法适应力，Eberhart 等^[68]采用引入惯性权重 ω 优化 PSO 算法，优化后的 PSO 数学模型如下：

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (p_g(t) - x_i(t)) \quad (4-19)$$

ω 代表 $t+1$ 时刻受到 t 时刻粒子速度的影响程度； ω 值的大小与全局搜索能力成正比，与局部搜索能力呈反比。

粒子群优化算法与本系统控制模型整体关系流程图，如图 4-3 所示。

其具体运行流程如下：

Step1：为粒子群设置种群数量、迭代次数和初始速度及范围等参数，以随机初始化粒子的位置和速度。

Step2：根据选用的适应函数，计算设置每个粒子的适应值，根据适应度大小顺序更新粒子位置，并选择位置最佳粒子作为输出。

Step3：跟随移动，每个粒子会根据自己的速度和历史最优位置，向该位置移动一定距离。

Step4：把粒子群的当前最优位置返回作为控制系统内 PID 输入量，判断其与目标曲线的误差，如若满足则终止条件，否则就迭代出足够好的解。

Step5：输出最优解以及对应的函数值。

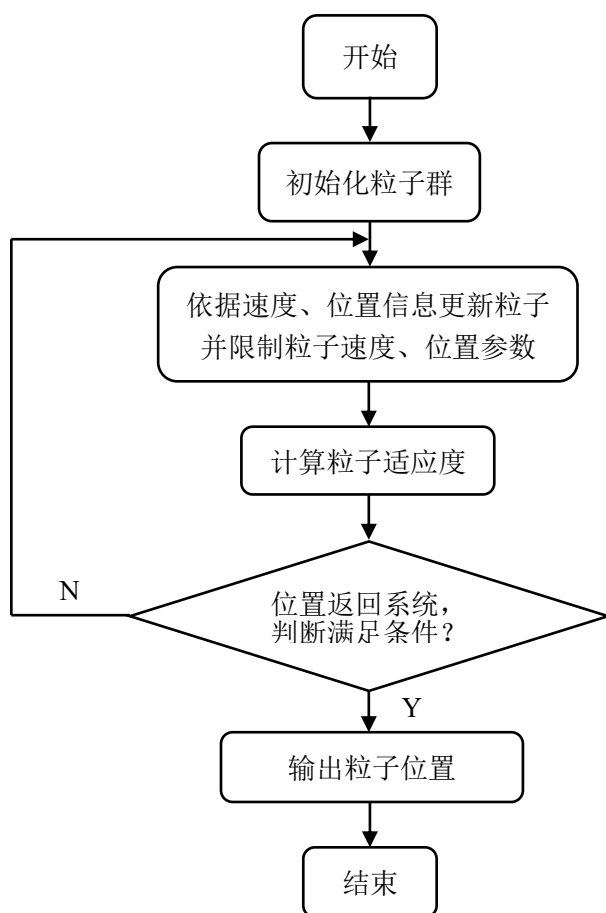


图 4-3 粒子群算法与系统关系流程图

4.3 稳像控制系统模型搭建

4.3.1 算法与控制系统

GWO/PSO-PID 控制器的控制流程如图 4-4 所示。

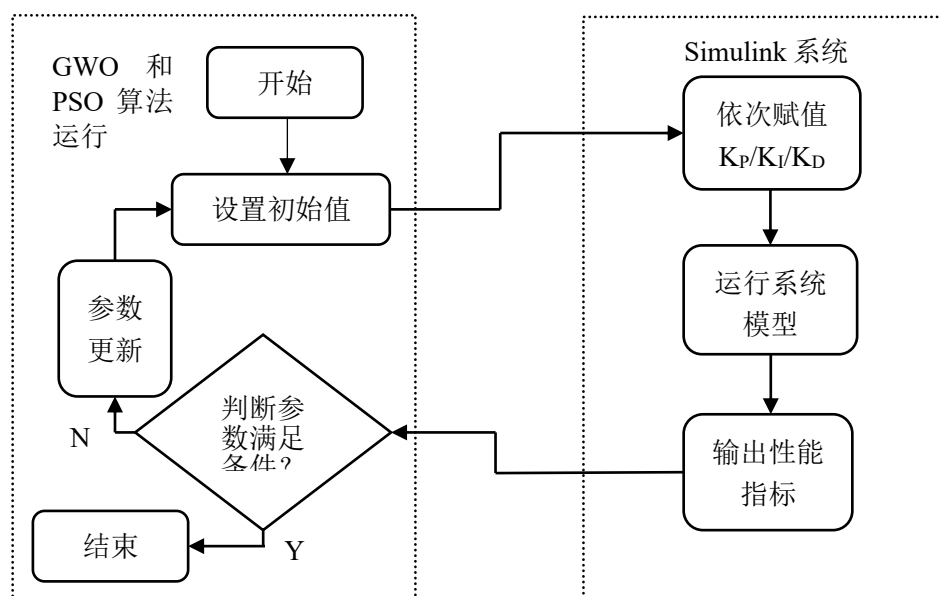


图 4-4 优化 PID 控制流程图

GWO 和 PSO 优化 PID 参数具体流程如下：

Step1: 设置参数初始值。定义 PID 三个参数构成的矢量，GWO 设定空间维度为 3，种群规模为 N ，迭代次数为 M ，初始化三匹头狼的位置和群狼的位置；PSO 设定空间维度为 3，种群规模 N ，惯性权重 ω ， K_P 、 K_I 和 K_D 参数取值范围 $[X_{\min}, X_{\max}]$ ，速度范围 $[V_{\min}, V_{\max}]$ ，加速因子 c_1 、 c_2 。

Step2: 运行系统模型。依据式 (4-21)、式 (4-22) 和式 (4-25) 通过两种算法程序和计算性能评价函数运行系统，将累计得出的适应度最小值位置设置为全局最优位置，并将其参数输出。

Step3: 将算出的最优位置信息赋给 K_P 、 K_I 和 K_D ，运行 Simulink 模块中航空相机稳像系统，得到当前时刻适应度函数值及系统误差的一组参数。

Step4: 将上一组参数再次作为系统 K_P 、 K_I 和 K_D 的输入端，得到下一时刻适应度函数值和误差，结果与上一时刻相比较，选取较好一组参数带入下一时刻。

Step5: 判断若满足适应度函数值或迭代次数满足开始设置的条件，则循环结束，否则将返回第三步继续运行系统。

Step6: 输出最优控制参数。

4.3.2 控制模型原理与搭建

当给压电陶瓷表面施加电压时，使压电陶瓷内部电荷引发移动，造成位移形变，这种特殊现象被广泛应用于精密仪器等领域，但因为压电陶瓷的输出位移量较小，往往只有几微米，要想获得较大输出位移，需要以叠层形式把压电陶瓷叠加在一起，其称为压电叠堆^[69-72]。

描述压电叠堆的数学模型有很多，对压电陶瓷模型优化效果较好、具有代表性的模型是 Bouc-Wen 型^[71]，其数学模型如下：

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) = k[du(t) - h(t)] + \eta(t) \\ h(t) = \alpha d\dot{u}(t) - \beta \left| \dot{u}(t) \right| h(t) - \gamma \dot{u}(t) \left| h(t) \right| \end{cases} \quad (4-20)$$

式中： $u(t)$ 代表压电陶瓷输入电压； $x(t)$ 代表压电陶瓷输出位移； $h(t)$ 代表压电陶瓷迟滞位移； m 代表压电陶瓷质量，单位(kg)； α 、 β 、 γ 代表迟滞特性环形形状； $\eta(t) \in L_2[0, T]$ 代表外界干扰； b 代表阻尼系数，单位($N \cdot s / m$)； k 代表刚度，单位(N / m)； d 代表压电系数，单位(m / v)。

式 (4-20) 重新改写为：

$$\dot{\bar{x}}(t) = (\bar{A} + \Delta A)\bar{x}(t) + \bar{B}_1 v(t) + \bar{B}_2 \eta(t) \quad (4-21)$$

$$v(t) = H[u(t)] = du(t) - h(t) \quad (4-22)$$

$$\text{式中：} \bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{pmatrix}; \quad \bar{B}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k}{m} \end{pmatrix}; \quad \bar{B}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix}; \quad \bar{x}(t) = (x_1(t) \ x_2(t))^T,$$

$x_1(t)$ 代替 $x(t)$ 当前时刻的压电陶瓷输出位移， $x_2(t) = \dot{x}_1(t)$ ； $H[u(t)]$ 代表压电陶瓷当前输入电压下所得到的迟滞特性； ΔA 代表由外界环境带来的不确定因素干扰。简化 Bouc-Wen 模型可得到系统输入、输出之间关系的控制图，如图 4-5 所示，图中定义压电陶瓷的输出位移为 $y(t) = x_1(t)$ 。

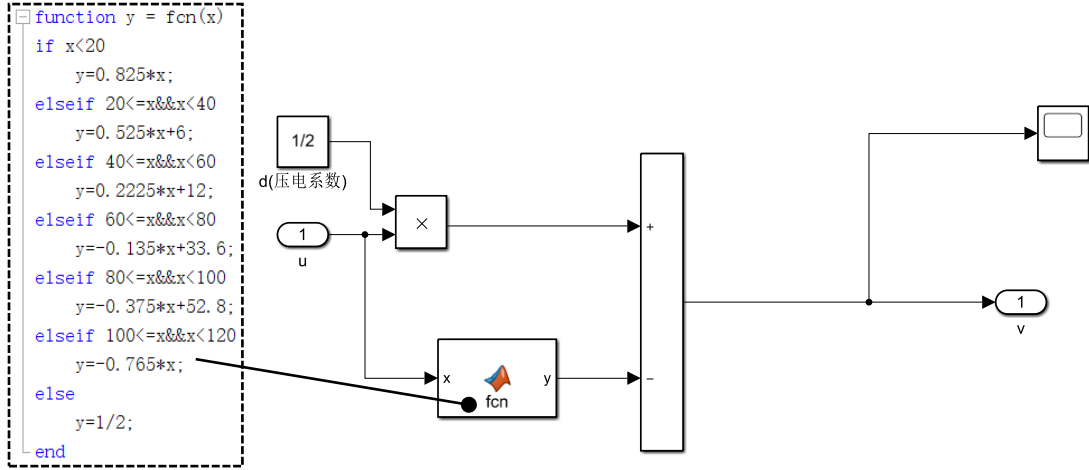


图 4-7 H[u(t)]压电陶瓷系统模型

将输入电压和电压系数相加，减去压电陶瓷本身迟滞特性带来的误差，得到相应 t 时刻的速度 $v(t)$ ，将 $v(t)$ 作为 $M(s)$ 系统一个输入端带入。其中，因压电陶瓷迟滞特性，将第三章对压电陶瓷实验得出具体迟滞参数改写为如图 4-7 中的程序段：把 0-120 V 输入电压划分为六个阶段，对不同输入电压进行分段补偿输出位移调整，以此达到精确补偿压电陶瓷迟滞特性目的。

由图 4-1 可知，压电陶瓷可以作为线性二阶串联系统。为了补偿压电陶瓷的迟滞现象，设计迟滞补偿系统^[74-76]，如图 4-8 所示。

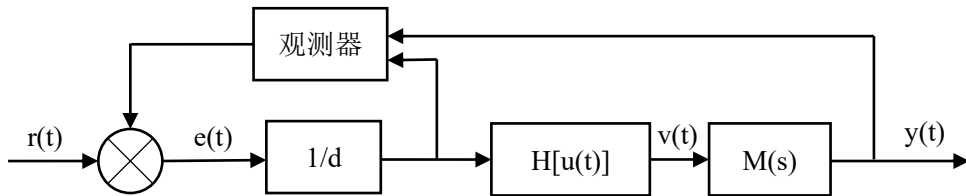


图 4-8 迟滞补偿系统模型

为了方便分析压电陶瓷的迟滞性补偿，压电陶瓷模型式 (4-21) 和式 (4-22) 数学模型如下：

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + B\bar{u}(t) + |u_2(t)|MX(t) + \\ u_2(t)Q|X(t)| + D\eta(t) + e_c(t) \\ y = CX(t) \end{cases} \quad (4-23)$$

其中： $X(t) = (x_1^T(t) \ x_2^T(t) \ h^T(t))^T$ 代表增广系统状态变量； $\bar{u}(t) = (u_1^T(t) \ u_2^T(t))^T$ 代表增广系统控制输入量， $u_1(t) = u(t)$ ， $u_2(t) = \dot{u}_1(t)$ ，

$e_c(t) = \left((\Delta A \bar{x})^T \ 0 \right)^T$ 代表模型外界不确定因素干扰误差，可设为 $e_c(t) \leq \Delta H X(t)$ ， $\|\Delta H\| \leq 1$ ；且有：

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} & -\frac{k}{m} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{kd}{m} & 0 \\ 0 & \alpha d \end{pmatrix}; \quad M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma \end{pmatrix}; \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad C = (1 \ 0 \ 0)。$$

本节所设计的迟滞补偿系统模型表达式为：

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}}(t) = T A \hat{X}(t) + T B \bar{u}(t) + |u_2(t)| T M \hat{X}(t) + \\ u_2(t) T Q \left| \hat{X}(t) \right| + L(y(t) - C \hat{X}(t)) \\ \hat{X}(t) = \hat{\xi}(t) + N y(t) \end{cases} \quad (4-24)$$

其中： $\hat{\xi}(t)$ 代表观测器的状态向量； $\hat{X}(t)$ 代表对式（4-23）中状态向量 $X(t)$ 的预期值； T 、 N 和 L 代表迟滞补偿模型中待确定的参数矩阵。

根据式（4-21）搭建 $M(s)$ 系统框图，如图 4-9 所示。

当把位移 $x(t)$ 、速度 $v(t)$ 作为输入带入至 $M(s)$ 中，得到当前时刻 t 的输出位移一阶位移导数 x' 、二阶位移导数 x'' ，对一阶位移导数 x' 进行还导，得到当前时刻输出位移 x 。此位移将会在 $t+1$ 时刻，当作输入端位移输入至 $M(s)$ 系统中，以此重复循环，直至找到最优位置。

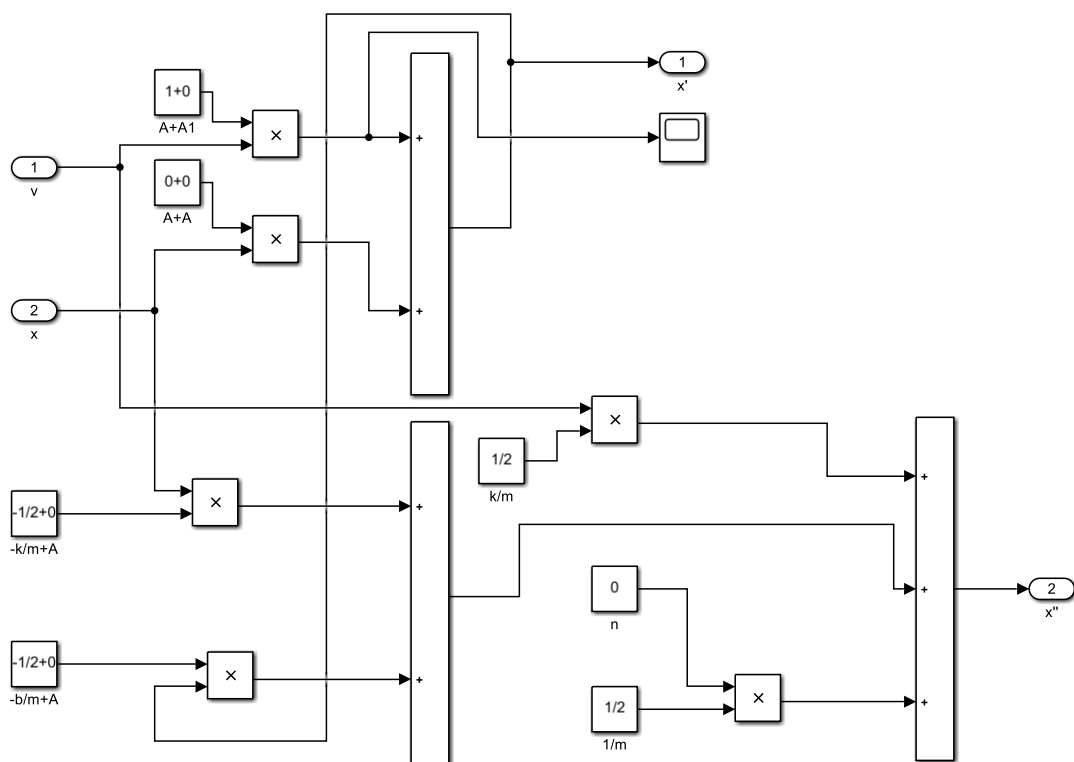


图 4-9 M(s)输出位移模型框图

4.4 仿真结果对比与分析

系统选取 *ITAE*（时间×误差绝对值的积分）作为系统的性能评价指标函数，其可以很好体现误差随时间的变化^[77-79]，表达式如下：

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4-25)$$

当采用的灰狼算法和粒子群算法优化运行次数越多，得出的结果越接近全局最优解时，航空相机稳像系统的性能评价函数 *ITAE* 值也就越小。有很多实验证明，*ITAE* 具备良好的稳定性和容错率，可以被作为系统输出参数的评价指标，进而得到广泛应用^[80,81]。

为了验证所提出的 GWO、PSO 控制算法优化 PID 控制参数的优越性，对微位移稳像操作平台的动态特性进行对比分析。首先，分析稳像平台的阶跃响应效果，根据上述灰狼控制算法优化控制参数所得， K_P 、 K_I 和 K_D 的实验数据分别为 15.69，-4.42 与 -95.11，粒子群控制算法优化控制参数所得 K_P 、 K_I 和 K_D 的实验数据分别为 -32.35，-34.16，-86.67。

稳像平台控制模型分别在灰狼控制算法和粒子群算法的作用下，得到系统

的阶跃响应,如图 4-10 所示;两种控制算法跟踪两种输入信号,即正弦信号和阶跃信号,输出位移曲线如图 4-11 和图 4-12 所示;在两种控制算法控制下的平台性能指标,如表 4-1 所示;正弦信号和阶跃信号的输入位移信号误差范围,如表 4-2 所示。

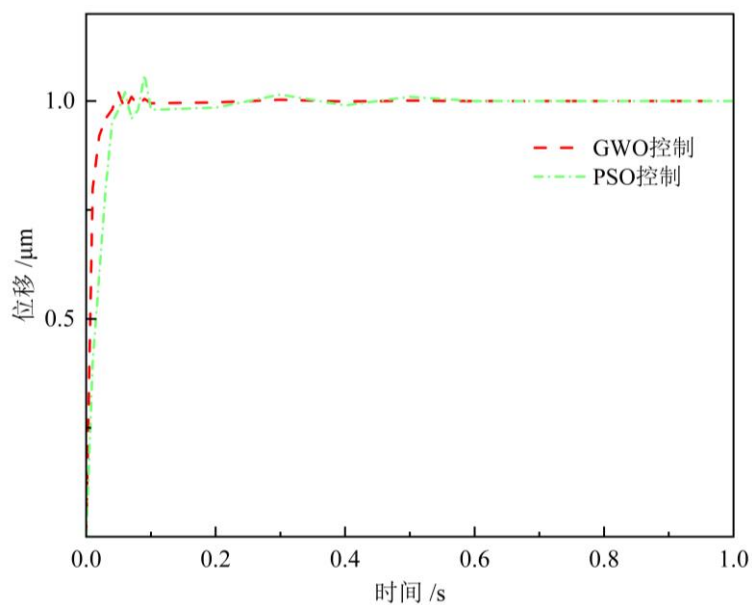


图 4-10 平台阶跃响应对比

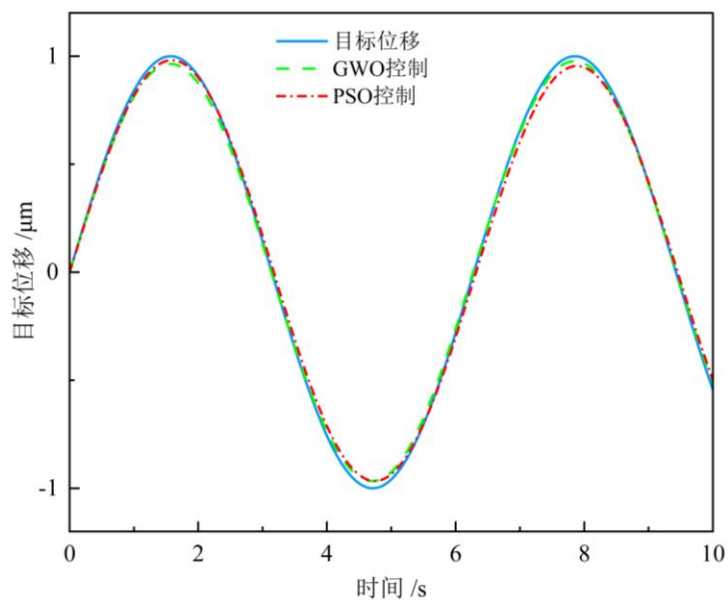


图 4-11 正弦信号输出位移曲线

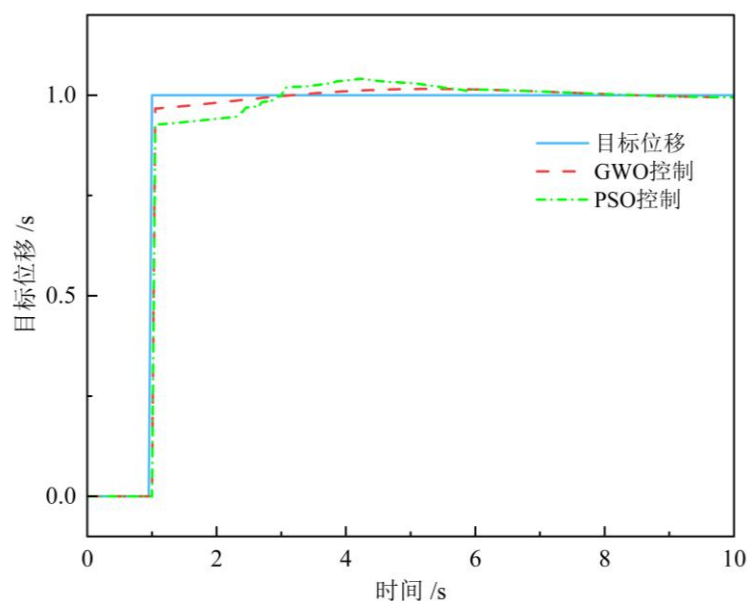


图 4-12 阶跃信号输出位移曲线

表 4-1 性能比较

控制算法	调节时间(s)	超调量 $\sigma(\%)$	稳态误差(μm)
灰狼控制	0.15	1.5	0.06
粒子群控制	0.25	3.5	0.15

表 4-2 跟踪不同输入位移信号的误差范围

位移信号	误差范围(μm)	
	灰狼控制	粒子群控制
正弦信号	$[-0.15, 0.14]$	$[-0.12, 0.26]$
阶跃信号	$[-0.09, 0.09]$	$[-0.18, 0.20]$

可得出如下结论：①从响应速度看，灰狼控制算法与粒子群控制算法调节时间相近；②从振荡情况看，灰狼控制算法几乎无振荡，粒子群控制算法超调量较大；③从稳态精度看，灰狼控制算法稳态误差比粒子群控制效果表现更优。由上述分析可知，所提出的灰狼控制算法具有较好的综合动态性能，配合上述提出的输出位移阶段性补偿，能够消除压电陶瓷迟滞现象的影响。

4.5 本章小结

1. 基于 Bouc-Wen 模型和 ITAE 性能评价指标在 MATLAB 的 Simulink 中搭建增量式 PID 控制系统，利用压电陶瓷迟滞实验数据，采用 6 段式分段补偿输出位移的策略，解决了压电陶瓷迟滞特性问题。

2. 基于 GWO、PSO 算法优化了 PID 系统模型的控制参数，参数优化后的输出位移值与预测值之间相对误差范围分别为 $[-0.15, 0.14] \mu\text{m}$ 和 $[-0.12, 0.26] \mu\text{m}$,

调节时间分别为 0.15 s 和 0.25 s，超调量分别为 0.5%和 3.5%，证明了稳像系统在算法优化后满足高控制精度要求。

3. 分析得出 GWO 较于 PSO 具有更好的动态综合性能，算法优化了系统响应速度和收敛速度，优化了输出平滑度及降低系统输出波动，避免压电陶瓷造成输出误差大的问题，消除迟滞特性对系统精度控制的影响，实现了机构精确输出位移的目的。

第 5 章 总结与展望

5.1 全文总结

针对航空航天领域对体积小、快响应、高精度和大行程的光学稳像驱动装置的需求，基于二级杠杆、三角放大和柔性铰链结构，设计出复合式航空相机稳像机构。对压电陶瓷驱动的稳像机构工作原理、仿真分析、实验验证和控制系统搭建等多方面进行研究，提升了机构输出性能和控制精度，为稳像机构设计及控制系统研究提供思路。研究工作主要表现为以下几个方面：

（1）提出二级杠杆+三角的复合式航空相机稳像机构。建立了稳像机构理论模型，推导计算出稳像机构理论放大倍数、输出位移和机构整体刚度，利用作图法对模型进行验证；运用 ANSYS 软件验证机构仿真放大倍数约为 36.72，与理论计算倍数 37.2 误差小于 2%；机构仿真刚度为 53.3 N/ μm ，与理论计算刚度 58.1 N/ μm 误差约为 8%；机构一阶共振频率为 150 Hz，证明机构能达到双向对称运动且具备良好的静、动态特性。

（2）完成了稳像机构相关实验。检测压电陶瓷输入电压与输出位移之间关系，最大输出位移达到 347.2 μm ，阶跃响应为毫秒级，机构位移行程满足稳像机构要求；机构双向放大倍数接近于理论计算值，正方向和负方向的放大倍数分别为 34.72 和 32.84；基于控制变量原理对机构进行重复性实验，得出机构输出位移最大重复性标准差仅为 0.614 μm ，进一步验证机构满足高精度要求；检测出机构共振频率为 150 Hz，其频率变化对输出精度影响较小，证明机构工作时避免达到该频率。

（3）搭建航空相机稳像控制系统。针对压电陶瓷作为输入端从而导致输出位移误差大、精度低的问题，采用灰狼算法和粒子群算法分别对航空相机稳像控制系统优化，并基于控制系统性能评价函数对系统控制参数进行寻优，降低了输出位移误差及波动对控制系统的影响，优化了系统响应速度且加速系统收敛，提升输出平滑度从而降低输出波动，进而验证稳像机构可利用稳像系统提升输出精度的可行性。得出控制系统采用灰狼算法和粒子群算法优化后调节时

间分别为 0.15s 和 0.25 s，超调量分别为 0.5%和 3.5%，证明了灰狼控制优化算法满足控制系统需求。

5.2 工作展望

设计的航空相机稳像机构，具有大行程、快响应和高精度等特点，在一定的电压和频率范围内能够实现稳定驱动，但也存在一些不足之处需要进行优化：

（1）进一步优化机构结构，使其具备足够放大能力的同时满足大负载驱动。包括：柔性铰链优化、稳像机构整体尺寸优化，尽可能消除装配和加工误差对光学稳像机构的影响。

（2）利用更合适的控制算法，对稳像进行控制，优化控制参数，尽可能选取最优参数，减小压电陶瓷本身迟滞对稳像机构带来的影响。

（3）展开应用于医疗、监测等领域的研究及对应的稳像补偿措施。

参考文献

- [1] 郑山.大行程多自由度微定位平台静动力学分析[D].重庆:重庆大学,2021.
- [2] 王嘉璐.柔性铰链机构最大应力计算方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [3] 杜志元.桥式柔顺微定位平台的设计、优化与实验研究[D].济南:山东大学,2016.
- [4] 伍威,赵纪宇,丁冰晓,等.新型空间大行程微夹持器的设计与分析[J].机械科学与技术,2021,40(07):1079-1084.
- [5] 曾勇涛.基于二级杠杆放大机构的模块化设计[J].机电工程技术,2018,47(07):42-44.
- [6] 丁冰晓,肖霄,李杨民.大行程并联三自由度柔性微操作平台的设计[J].天津理工大学学报,2015,31(04):28-32.
- [7] 金花雪.一种大行程复合材料的叠层式柔性铰链位移放大机构[D].泉州:华侨大学,2021.
- [8] 刘彩霞.基于压电驱动的二维稳像机构研究[D].芜湖:安徽工程大学,2019.
- [9] 黄卫清,史小庆,王寅.菱形压电微位移放大机构的设计[J].光学精密工程,2015,23(03):803-809.
- [10] 倪远.基于柔性铰链的位移放大机构及三自由度调姿平台研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [11] 丰飞,傅雨晨,范伟,等.三角混合两级杠杆微位移放大机构的设计及性能分析[J].工程设计学报,2022,29(02):161-167.
- [12] 黄卫清,党冰楠,王寅,等.双向作动大行程二自由度稳像机构[J].光学精密工程,2017,25(06):1494-1501.
- [13] 廉钧凯.二维压电稳像平台及其控制研究[D].广州:广州大学,2023.
- [14] 高福天.桥式杠杆放大机构的设计、优化及控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [15] 张轩.基于压电叠堆的作动器研究[D].芜湖:安徽工程大学,2017.
- [16] 马亚坤.基于拉弯柔性铰链的二级微位移放大机构[D].西安:西安电子科技大学,2014.

- [17] 裴童.新型大行程并联微定位平台性能综合优化设计方法研究[D].淄博:山东理工大学,2014.
- [18] 崔志勇,黄卫清,孙梦馨,等.串联式二维微定位平台的设计[J].机械设计与制造,2018,11(01):88-91.
- [19] 郭文峰.基于三角放大箱位的压电蠕动直线驱动器研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [20] 万嘉辉,仲梁维.桥式微位移放大机构放大比特性的研究与分析[J].中国水运(下半月),2018,18(10):117-119.
- [21] 谢永,刘重飞,贾建军,等.基于位移放大机构的压电快速反射镜设计[J].上海交通大学学报,2021,55(09):1142-1150.
- [22] 郑丽云,沈剑英,王鹏飞,等.用于压电驱动器位移放大的柔性铰链放大机构研究[J].科技创新与应用,2018(07):21-22+24.
- [23] 李静.基于柔性机构的大位移压电驱动非对称微夹钳设计[J].传感器与微系统,2021,40(09):101-103+107.
- [24] 李玄,丁冰晓,周双武,等.大行程微点胶机构的设计与分析[J].重庆大学学报,2021,44(04):37-51.
- [25] 卢可.基于压电叠堆惯性作动器的随机振动控制[D].杭州:浙江大学,2019.
- [26] 史小庆.直动式压电作动器及其在稳像系统中的应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
- [27] 刘雪瑞.二维压电微动平台的研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [28] 赵大明,高兴军,王月,等.基于两种柔性铰链压电陶瓷柔顺微夹钳性能分析[J].辽宁石油化工大学学报,2022,42(01):64-69.
- [29] 郑星,凌明祥,刘谦,等.压电陶瓷驱动器菱形位移放大机构的动态应变测量[J].中国测试,2019,45(01):56-59.
- [30] 方楚,郭劲,徐新行,等.适用于 FSM 系统的菱形微位移放大机构设计[J].红外与激光工程,2016,45(10):170-176.
- [31] 张春林,张希农,陈杰,等.菱形微位移压电作动器的输入输出线性建模[J].西安交通大学学报,2014,48(05):102-106.
- [32] Di M, Peng C N, Sun K B, et al. Grey wolf optimization algorithm-based PID controller for frequency stabilization of interconnected power generating system

- [J]. *Soft Computing*,2023,23(06):1432-1457.
- [33] 明敏.压电微动平台迟滞补偿与运动控制研究[D].武汉:武汉大学,2021.
- [34] 苏春翌,周其节.一种受限机械手的自适应力/位置控制方法[J].*控制理论与应用*,2012(04):367-373.
- [35] 崔志勇.二维压电微动机构的设计及其在光学稳像中的应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- [36] 王琴琴,周孟德,孙晨晋,等.压电叠堆作动器率相关迟滞非线性建模研究[J].*压电与声光*,2022,44(06):907-912.
- [37] Sun X, Chen W, Fatikow S, et al. A novel piezo-driven microgripper with a large jaw displacement [J]. *Microsystem Technologies*,2015,21(04):931-942.
- [38] 袁志敏.基于粒子群优化的大时滞过程 PID 控制算法研究[D].西安:陕西科技大学,2018.
- [39] Kaveh A, Talatahari S. A novel meta heuristic optimization algorithm cuckoo search [J]. *Solitons and Fractals*,2015,44:710-726.
- [40] Gandomi A, Yang X. A metaheuristic approach to solve structural optimization problems [J]. *Cuckoo Search Algorithm Engineering with Computers*, 2013,29:17-35.
- [41] 董剑.基于改进灰狼算法的导叶式离心泵性能优化研究[D].西安:西安理工大学,2023.
- [42] 路士州,周凤岐,任晨亮,等.压电驱动菱形放大式胶体微喷系统的建模与实验 [J].*北京理工大学学报*,2017,37(09):926-932.
- [43] 方小东.基于新型菱形放大机构的微位移工作台结构研究[D].大连:大连理工大学,2011.
- [44] 郝云锋,王占英,马宏,等.多级嵌套菱形位移放大机构的设计与分析[J].*河北建筑工程学院学报*,2022,40(02):186-189.
- [45] 杜志元,闫鹏.基于桥式放大机构的柔顺微定位平台的研究[J].*机器人*,2016,38(02):185-192.
- [46] 党冰楠.基于压电直线作动器的二自由度稳像机构的研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.

- [47] 柴长忠.压电驱动二维微动平台结构优化设计与试验研究[D].大连:大连交通大学,2019.
- [48] 刘敏,张宪民.基于类 V 型柔性铰链的微位移放大机构[J].光学精密工程,2017,25(04):467-476.
- [49] 张世玉.基于曲臂菱形放大机构的压电微位移驱动系统研究[D].天津:天津大学,2021.
- [50] 沈剑英,张海军.新型桥式机构放大率的计算、分析和实验验证[J].仪器仪表学报,2015,36(08):1877-1883.
- [51] 于志远,姚晓先,宋晓东.基于柔性铰链的微位移放大机构设计[J].仪器仪表学报,2009,30(09):1818-1822.
- [52] 黄志威,梅杰,明廷鑫,等.基于柔性铰链的微位移机构的设计与分析[J].起重运输机械,2017(03):15-19.
- [53] 李静.基于柔性机构的大位移压电驱动非对称微夹钳设计[J].传感器与微系统,2021,40(09):101-103+107.
- [54] 李玄,周双武,丁冰晓,等.基于新型二级杠杆机构微定位平台的设计与分析[J].机械设计,2021,38(02):102-107.
- [55] 张腾,张士军,孟繁勋.三自由度运动平台的设计与仿真[J].机械设计与制造工程,2022,51(03):33-37.
- [56] 徐方超,魏恒志,孙凤,等.压电驱动串级菱形位移放大微定位平台的设计[J].仪器仪表学报,2019,40(01):52-61.
- [57] 韩凌坤,李少琦,张世玉,等.曲臂菱形放大机构的压电位移驱动器[J].自动化与仪器仪表,2022(05):179-184.
- [58] 蒋州,曹军义,凌明祥,等.新型双臂菱形压电柔性机构理论设计与建模[J].中国机械工程,2017,28(21):2557-2561+2566.
- [59] 马金玉,余胜东,康升征,等.基于压电作动器驱动的微操作机构设计与运动控制[J].农业机械学报,2021,52(09):417-426.
- [60] 伍威,赵纪宇,丁冰晓,等.桥式放大机构放大率的计算与分析[J].天津理工大学学报,2020,36(02):11-15.
- [61] 叶海平.基于改进模糊 PID 的农用四旋翼飞行器姿态角控制[J].湖北师范大学

- 学报(自然科学版),2023,43(01):26-32.
- [62] 刘积昊,闫维新,李培兴,等.基于桥式放大机构的薄膜致动器设计[J].上海交通大学学报,2018,52(04):429-436.
- [63] 冯健,张春辉,睢刚.一种性能可调的 PID 参数优化整定方法[J].机电信息,2020(29):129-130.
- [64] Wu H T, Lai L J, Zhang L Q, et al. A novel compliant XY micro-positioning stage using bridge-type displacement amplifier embedded with Scott-Russell mechanism [J]. Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology,2022,73(04):284-295.
- [65] Zhao H B, Wang C G. A novel adjustable parameters PID control of dual-motor driving servo system [J]. IETE Journal of Research,2022,68(02):1213-1224.
- [66] Jain A, Nagar S, Singh P, et al. A hybrid learning-based genetic and grey-wolf optimizer for global optimization [J]. Soft Computing,2023,27(08):4713-4759.
- [67] Zhan H X, Zhou W, Ran L Q, et al. A high-resolution optical displacement detection method for piezoelectric micro vibratory stage [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,67(12):10897-10904.
- [68] Eberhart B, Lee J, Kim G, et al. Design and analysis of a flexure-based parallel XY stage driven by differential piezo forces [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,2020,21(08):1547-1561.
- [69] Marchesi A, Umeda K, Komeka W T, et al. An ultra-wide scanner for large-area high-speed atomic force microscopy with megapixel resolution [J]. Scientific Reports,2021,11(13):1303-1310.
- [70] Zhong X Q, Liu C X, Di Z M, et al. Optimization and experiment of two-dimensional parallel decoupling image stabilization mechanism [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020,21(10):1965-1974.
- [71] Taquia G, Jose A, Paul, et al. Design and implementation of an automatic control system using motors and control sensors to stabilize a horizontal platform with a lidar sensor [J]. Computation System,2022,26(01):389-397.
- [72] Callow D, Lee J, Blumenstein M, et al. Development of hybrid optimization method for artificial intelligence based on bridge deterioration model-feasibility

- study [J]. Automation in Construction, 2013, 31: 83-91.
- [73] Tian Y L, Ma Y, Wang F J, et al. A novel XYZ micro/nano positioner with an amplifier based on L-shape levers and half-bridge structure [J]. Sensors and Actuators Physical, 2020, 302(15): 111777-111783.
- [74] 姚俊飞, 陈超, 陈海鹏. 基于三角位移放大机构的压电制动器研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(06): 813-816.
- [75] 刘宁, 柴天佑. PID 控制器参数的优化整定方法[J]. 自动化学报, 2023, 49(11): 2272-2285.
- [76] 曾亿山, 郝云锋, 陈建, 等. 菱形压电驱动器对称驱动形式的研究[J]. 液压气动与密封, 2020, 40(05): 1-4.
- [77] 刘雪瑞, 黄卫清, 王寅, 等. 双向驱动压电作动器结构设计[J]. 振动. 测试与诊断, 2017, 37(06): 1175-1180+1280.
- [78] 王卓. 航空遥感稳定平台控制算法研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
- [79] 陈方鑫, 高福天, 杜志江, 等. 基于混合铰链的三维桥式放大机构的建模、分析与试验[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 110-116.
- [80] 凌明祥, 刘谦, 曹军义, 等. 压电位移放大机构的力学解析模型及有限元分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(04): 812-818.
- [81] 唐刚, 邹鹏君, 谢高杨, 等. 基于三角形和杠杆原理的柔性铰链放大机构[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(03): 46-49.

攻读硕士学位期间发表的学术论文及成果

学术论文：

- [1] Zhong X Q, **Tao W B**, Zou L L, et al. Servo system control of turntable lipstick filling machine based on particle swarm optimization [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022,2022:8968510. (SCI)

专利：

- [1] 钟相强,**陶文博**,范敬松,等.一种自动码垛装置及其数字孪生系统[P].中国专利:CN115629578A,2023-01-20.(发明在审)
- [2] **陶文博**,范敬松,杨怀安,等.一种具有防惯力倾倒平衡的脚踝康复机器人[P].中国专利:CN116831872A,2023-10-03.(发明在审)
- [3] 杨怀安,**钟相强**,陶文博,等.一种轴承表面检测装置[P].中国专利:CN117147447A,2023-12-01.(发明在审)
- [4] **陶文博**,范敬松,杨怀安,等.一种自动码垛装置[P].中国专利:CN218260805U,2023-01-10.(实用新型)
- [5] **陶文博**,邹令令,杨怀安,等.一种双向压电驱动的复合式微位移放大装置[P].中国专利:CN223202671U,2023-08-31.(实用新型)
- [6] **陶文博**,范敬松,杨怀安,等.一种脚踝康复机器人的运动平台机构[P].中国专利:CN220443159U,2024-02-06.(实用新型)

项目：

- [1] 主持省级研究生质量工程项目一项；
- [2] 参与安徽工程大学校级项目两项(已结题)。

获奖情况：

- [1] 第二十四届中国机器人及人工智能大赛 国赛三等奖（第一负责人）；
- [2] 第二十四届中国机器人及人工智能大赛 省赛一等奖（第一负责人）；
- [3] 第八届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛 铜奖（第一负责人）；
- [4] 第九届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛 铜奖（第一负责人）；
- [5] 第二届“智汇中江”芜湖市大学生科技创新创业大赛 铜奖（第一负责人）；
- [6] 第十三届“挑战杯”大学生创业计划竞赛 国赛铜奖；
- [7] 第十届“挑战杯”大学生创业计划竞赛 省赛金奖；
- [8] 获 2023 年度省级质量工程项目“研究生创新创业之星”荣誉称号；
- [9] 获安徽工程大学第十届“十佳大学生提名”荣誉称号；
- [10] 获安徽工程大学第九届鑫龙奖学金；
- [11] 获 2024 届安徽省及安徽工程大学“研究生优秀毕业生”荣誉称号。

致 谢

鲜衣怒马少年时，不负韶华行且知。行文至此，思绪万千，求学十九载，可以写下去的梦很长。我与安工程的故事始于 21 金秋，终于 24 盛夏，研究生三年时光转瞬即逝，回首三年光阴，满眼繁华，目光所及，皆是回忆，纵有万般不舍，皆是感恩，今借此文聊表谢忱。

生逢于盛世，当不负韶华。青春有几年，疫情占三年，感谢国家、安徽工程大学和机械工程学院在新冠肺炎疫情当下给我提供了一个安全、舒适的学习环境。研究生三年以来，幸得国家和学校各种资助政策的帮助，让我可以安心完成学业。感谢国家，何其有幸，生于华夏，不经乱战，不缺衣食，见证其一步步走向强大。如若有幸，必将身怀赤诚之心，以报国家学校栽培之恩。

饮水思其源，学成念吾师。在三年的研究生时光里，感谢我的导师钟相强教授给予我的帮助，无论是在学时上还是见识上都给予我极大的帮护，从选题到开题再到初稿的多次修改，每一部分都离不开导师的耐心指导。在学位论文完成过程之中，导师也倾入了大量心血，对我一路教导，谆谆教诲，学路漫漫，砥砺前行。同时也要感谢课题组的邹令令、杨怀安等同门师兄弟在 A716 的陪伴，一起并肩作战的日子弥足珍贵。还要感谢其他帮助过我的老师、同学、舍友杨凯、卞仕磊、邹阿威，朋友冯磊、鲁叶平、朱学顺、赵雨明、齐强、李少波、朱大震、刘凯旋、邹晓杰等，山水一程，祝各位今后工作顺利，身体健康。

初时乍惊欢，久处亦砰然。感谢我的女朋友，未来的终生伴侣马钰女士。感谢你这几年的陪伴理解和包容，由于疫情等原因，从相识到相恋，我与马钰女士总是聚少离多，但无论多久未见，两颗心总是永远贴在一起。愿我们在未来的日子里，永葆对生活的热爱，携手前行，不负彼此。

爱子心无尽，三生报答轻。感谢我的父母始终对我学业上的支持和理解，二十余载，父母把最好的留给了我，饱食暖衣，让我无后顾之忧，如今也算学业有成，父母养育之恩无以为报，唯有好好努力成为你们的骄傲，也希望时间能够在你们身上走的慢一些再慢一些，希望你们永远平安、健康、快乐、幸福。

最后感谢自己这么多年的努力以及不放弃，并且一直努力而笨拙的热爱生活。

谨以此文，献给陶文博 26 岁的青春岁月。再见了，我的学生时代！

尚德敏学 唯实惟新

