

基于定位误差补偿的亚微米级宏微驱动系统设计与试验

杨满芝¹ 刘嘉豪¹ 张传伟^{1,2} 桂皓晨¹ 李林岳¹ 冯斌¹

(1. 西安科技大学机械工程学院, 西安 710054; 2. 陕西交通职业技术学院, 西安 710018)

摘要: 为解决传统机械系统在大范围运动中高精度定位问题,本文设计了一种精密宏微驱动系统,通过微驱动系统补偿宏驱动系统定位误差,实现亚微米级精密定位。基于柔性铰链杠杆原理和平衡附加力原理,设计了一种微动放大机构,可将输入位移按设计放大比1.5精密放大且无附加位移。在宏微驱动系统中,伺服电机和滚珠丝杠结合作为宏驱动系统,采用压电陶瓷制动器驱动微动放大机构作为微驱动系统,并用以补偿宏驱动系统的定位误差,实现大行程高精度运动。在完成宏微驱动系统工作原理设计的基础上,分析系统定位误差并提出误差补偿方案,开展宏微驱动系统定位误差补偿试验。试验结果显示:在运动行程2 mm范围内,经过定位误差补偿后,宏微驱动系统的平均定位误差由14.49 μm 降低至0.34 μm ,平均定位误差降低97.65%。定位误差补偿试验验证了宏微驱动系统设计及误差补偿方案的有效性与精确性。

关键词: 宏微驱动系统; 定位误差补偿; 微动机构; 柔性铰链

中图分类号: TH112

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)01-0404-09

OSID:



Design and Experiment of Sub-micron Macro-micro Drive System Based on Positioning Error Compensation

YANG Manzhi¹ LIU Jiahao¹ ZHANG Chuanwei^{1,2} GUI Haochen¹ LI Linyue¹ FENG Bin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2. Shaanxi College of Communications Technology, Xi'an 710018, China)

Abstract: In order to solve the problem of high-precision positioning of traditional mechanical systems in a wide range of motion, a precision macro-micro drive system was designed, which compensated for the positioning error of the macro-drive system through the micro-drive system to realize sub-micron precision positioning. Based on the principle of flexible hinge lever and the principle of balanced additional force, a micro-amplification mechanism was designed, which can precisely amplify the input displacement according to the design amplification ratio of 1.5 without additional displacement. In the macro-micro drive system, the servo motor and ball screw was combined as the macro-drive system, and the piezoelectric ceramic actuator was used to drive the micro-amplification mechanism as the micro-drive system, which was used to compensate for the positioning error of the macro-drive system to realize the large-stroke and high-precision motion. On the basis of completing the working principle design of macro-micro drive system, the positioning error of the system was analyzed and the error compensation scheme was put forward, and the macro-micro drive system positioning error compensation experiment was completed. The experimental results showed that the average positioning error of the macro-micro drive system was reduced from 14.49 μm to 0.34 μm after the positioning error compensation within the range of 2 mm stroke, and the average positioning error was reduced by 97.65%, which verified the validity and accuracy of the design of the macro-micro drive system and the error compensation scheme.

Key words: macro-micro drive system; positioning error compensation; micro-drive mechanism; flexible hinge

收稿日期: 2025-02-02 修回日期: 2025-03-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52475537)、西安市科技计划项目-科学家+工程师队伍建设项目(24KGDW0029)、陕西省教育厅服务地方专项项目(23JC050)和陕西省创新能力支撑计划项目(2021TD-27)

作者简介: 杨满芝(1986—),男,副教授,博士,主要从事精密进给系统设计与控制研究,E-mail: xkdymz@xust.edu.cn

通信作者: 张传伟(1974—),男,教授,博士,主要从事智能装备设计与应用研究,E-mail: zhangcw@xust.edu.cn

0 引言

宏微驱动技术是指将宏驱动与微驱动结合使用的一种技术,可满足大行程高精度定位的需求,广泛应用于航天、医疗、光学、电子和智能农机装备等高精密加工领域^[1-4]。在宏微驱动系统中,宏驱动部分为系统提供大行程位移,使系统以较快的速度到达目标位置;微驱动部分为宏驱动部分提供高精密度定位误差补偿,使传统精密机械系统能够兼顾高精度与大行程的要求^[5-9]。

为了实现大行程和高精密定位,国内外学者针对宏微驱动系统设计及其定位误差补偿进行了广泛研究。吴彤等^[10]基于压电粘滑效应设计了二自由度大行程定位平台,该平台的定位精度为 $0.47 \mu\text{m}$,但由于其结构限制,最大输出位移仅为 $47.31 \mu\text{m}$;程维明等^[11]设计了提高宏微驱动系统定位精度的误差补偿方案,利用微驱动平台补偿宏驱动平台,使系统定位误差从 $17 \mu\text{m}$ 降低至 $1.3 \mu\text{m}$,仅达到微米级定位要求;HO 等^[12]设计了一种宏微驱动定位系统,该系统的宏驱动定位误差为 $50 \mu\text{m}$,采用多种控制器对宏微驱动系统进行控制,最终将系统精度控制在 $5 \mu\text{m}$ 内。尽管目前在宏微驱动系统研究中取得一定的成果,但在实现大行程范围内亚微米级定位精度的研究较少,且相关研究未考虑微驱动器在非运动方向力产生的位移及影响,而非运动方向力对整个系统的稳定性、安全性及运动精确性产生巨大影响。

针对上述问题,本文提出一种考虑无附加力的亚微米级精度宏微驱动系统的设计及定位误差补偿研究。基于柔性铰链杠杆原理和平衡附加力原理,设计高精度微动放大机构。采用伺服电机和滚珠丝杠驱动作为宏驱动系统,完成宏微驱动直线系统及系统定位误差补偿方案的设计,使系统的定位误差补偿精度达亚微米级。通过系统误差补偿试验验证系统设计及误差补偿方案的有效性及其精确性。以期为实现大行程和高精度的宏微驱动设计及定位误差补偿提供参考。

1 微动放大机构理论研究与结构设计

随着芯片加工、航空技术等领域的快速发展,PAROS 等^[13]于 1965 年首次提出柔性铰链结构,因其结构简单和运动精度高等特点,柔性铰链被广泛应用于各种精密加工技术中。随着对精密机械系统中柔性铰链工作性能要求不断提高,柔性铰链衍生出多种缺口形状的结构,包括直圆型、圆弧型、抛物线型和直梁型等^[14-17]。

在众多柔性铰链结构中,直圆型柔性铰链的运动性能介于直梁型和圆弧型之间,具有精度高、性能稳定、结构简单、加工相对容易等优点,因此得到了广泛应用^[18-19]。故本文微动放大机构采用直圆型柔性铰链结构。

1.1 柔性铰链等效模型

柔性铰链等效模型示意图如图 1a 所示。在简化图中点 b 为柔性铰链的中心点,将点 a 、点 c 分别作为静止状态下的起点和终点,如图 1b 所示。当柔性铰链运动后,以点 b 作为柔性铰链的中心点,可将其视为由杆件 ab 与 bc 组成的运动副,并绕点 b 为中心做回转运动,如图 1c 所示,此时点 a' 、点 c' 为运动后的终点。杆件 ab 和 bc 在受力下产生变形,在这个过程中杆件的长度也会随着端点的变化而改变。在图 1b、1c 中, $l_{a'b'} = l_{b'c'} > l_{ab} = l_{bc}$ 。因此柔性铰链结构可等效为:一个回转副和两个变长杆。

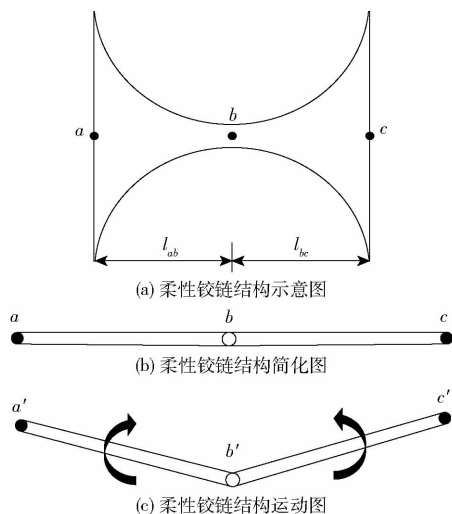


图 1 柔性铰链等效模型图

Fig. 1 Flexible hinge equivalent model diagram

1.2 杠杆原理及平衡附加力原理

1.2.1 杠杆原理

本文设计微动放大机构基于杠杆原理实现,如图 2 所示,表达式为

$$F_1 L_1 = F_2 L_2 \quad (1)$$

式中 F_1 ——输入端动力

F_2 ——输出端阻力

L_1 ——输入端动力到转动中心 O 的距离

L_2 ——输出端阻力到转动中心 O 的距离

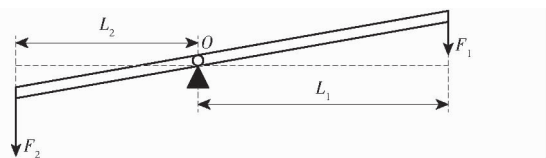


图 2 杠杆原理图

Fig. 2 Leverage principle schematic

根据杠杆原理,可以判断不同类型的杠杆:①如果 $L_1 > L_2$,那么杠杆类型为缩小型杠杆。②如果 $L_1 < L_2$,那么杠杆类型为放大型杠杆。

本文所设计的微动机构为放大机构,微动放大机构放大原理如图3所示。

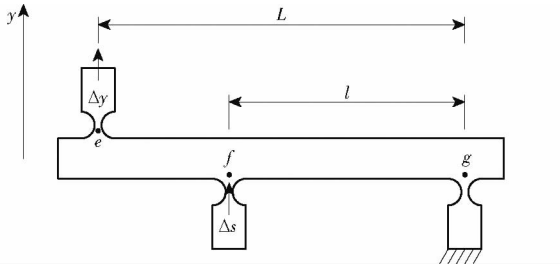


图3 微动放大机构放大原理图

Fig.3 Schematic of micro-amplification mechanism

在初始状态下,右端点 g 为固定端,点 f 为位移的输入端,端点 e 为位移输出端。输出端 e 沿 y 轴方向运动,此时整个柔性铰链等效杆以端点 g 为杠杆支点,在端点 f 处的输出力下,使点 e 沿 y 轴方向进行位移放大输出。假设点 f 沿 y 轴运动位移为 Δs ,根据杠杆原理比例公式

$$\Delta y = \frac{L\Delta s}{l} \quad (2)$$

式中 L ——微动放大机构一端等效杆长

l ——输入端到固定端距离

即可得到输出端位移 Δy 。

1.2.2 平衡附加力原理

平衡附加力作用是当柔性铰链受到非运动方向的力时,所设计的柔性铰链机构能够抵消这些非运动方向上的力,实现机构无附加力运动。

平衡附加力原理图如图4a所示,当等效杆1受到力 F 时,等效杆会沿固定端5产生一个转动角度 $\Delta\theta$,并在非运动方向产生附加力 F_x ,在附加力的作用下会使等效杆顶端产生非运动方向位移 Δr 。随着输入力的不断增加,非运动方向的位移也随之增大。如图4b所示,2、3为等效杆件,4为移动单元,5为固定端,II、III为运动后的等效杆件。将机构两侧同时对称分布柔性铰链,在力 F_y 的作用下柔性铰链等效杆件沿 y 轴方向运动,在这个过程中,会产生两个大小相等、方向相反的力 F_{x2} 、 F_{x3} ,相互抵消在非运动方向产生的力和位移,从而实现无附加力运动。

1.3 微动放大机构设计

本研究中采用的微驱动器为压电陶瓷制动器,运动范围为 $0 \sim 15 \mu\text{m}$ (详见2.2节),而宏驱动系统定位误差的最大值为 $17.1 \mu\text{m}$ (详见4.1节),由试验测得。由于微驱动器无法完全补偿宏驱动系统的定位误差,因此需要对其输出位移进行放大处理,放

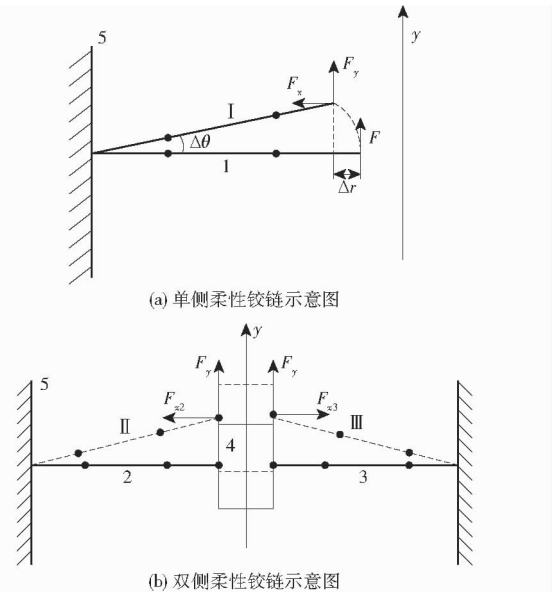


图4 平衡附加力原理图

Fig.4 Schematics of balancing additional forces

大比 λ 取值范围为 $1 \sim 2$ 。基于柔性铰链杠杆原理和平衡附加力原理,本文设计的微动放大机构如图5所示。

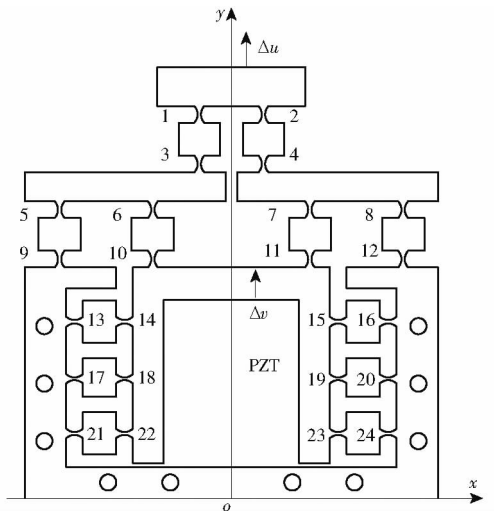


图5 微动放大机构结构示意图

Fig.5 Schematic of micro motion amplification mechanism

微动放大机构的放大比模型简化示意图如图6所示。当微驱动机构运动时,由于柔性铰链的弯曲、拉伸和压缩,其放大比会发生变化。假设柔性铰链 i ($i=1,2,\dots,24$) 的轴向力为 F_i ,转矩为 M_i ,弯曲铰链 i 产生的轴向变形为 Δ_i ,旋转角为 α_i 。由于微动放大机构为对称结构,只需分析一侧的微动放大机构。以柔性铰链4、7和8为例。铰链8受到固定约束,铰链7为输入端,位移为 x_7 ,铰链4为输出端,位移为 x_4 。假设微动机构中杠杆角为 θ ,柔性铰链与杠杆之间转过的角度为 α ,则三者关系为

$$\alpha_4 = \alpha_7 = \alpha_8 = \theta \quad (3)$$

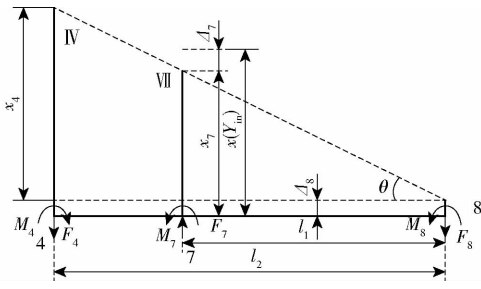


图6 微动机构放大比简化图

Fig. 6 Magnification ratio of micro-actuator mechanism simplified diagram

式中 α_4 ——铰链4和水平线之间的夹角
 α_7 ——铰链7和水平线之间的夹角
 α_8 ——铰链8和水平线之间的夹角
 变形量与力和力矩之间的关系可以表示为

$$F_i = K_F \Delta_i \quad (i=4,7,8) \quad (4)$$

$$M_i = K_M \alpha_i \quad (i=4,7,8) \quad (5)$$

其中 $K_F = Eb \left[\frac{2(2s+1)}{\sqrt{4s+1}} \arctan \sqrt{4s+1} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (6)$

$$K_M = \frac{EbR}{12} \left[\frac{2s^3(6s^2+4s+1)}{(2s+1)(4s+1)^2} + \frac{12s^4(2s+1)}{(4s+1)^{\frac{5}{2}}} \arctan \sqrt{4s+1} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$s = R/t \quad (8)$$

式中 K_F ——柔性铰链轴向拉伸-压缩刚度
 K_M ——柔性铰链角刚度
 E ——机构材料弹性模量
 R ——柔性铰链切割半径
 t ——柔性铰链最小厚度
 s ——柔性铰链切割半径 R 与最小厚度 t 之比

b ——柔性铰链 z 轴方向宽度

根据力的平衡关系

$$F_7 = F_4 + F_8 \quad (9)$$

$$F_4 l_2 + M_7 + M_8 = F_7 l_1 + M_4 \quad (10)$$

式中 l_1 ——输入端到固定端长度

l_2 ——输出端到固定端长度

杠杆以铰链8为旋转中心,铰链8受到拉力 F_8 ,轴向伸长为 Δ_8 。在压电陶瓷驱动力的作用下,铰链7被轴向压缩,压缩量为 Δ_7 。 x_4 为杠杆输出端的输出位移,设 x 为负载条件下压电陶瓷的驱动位移 Y_{in} ,则杠杆输入端的输入位移 x_7 为

$$x_7 = x - \Delta_7 \quad (11)$$

则杠杆的旋转角 θ 为

$$\tan \theta = \frac{x_7 - \Delta_8}{l_1} = \frac{x_4 - \Delta_8}{l_2} \approx \theta \quad (12)$$

则放大比 λ 为

$$\lambda = \frac{x_4}{x_7} = \frac{\theta l_2 + \Delta_8}{\theta l_1 + \Delta_8} \quad (13)$$

将 $l_1 = 20 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 30 \text{ mm}$ 、 $t = 1 \text{ mm}$ 、 $R = 3.6 \text{ mm}$ 、 $b = 10 \text{ mm}$ 和 $E = 2.06 \times 10^8 \text{ Pa}$ 分别代入公式(3)~(13)中,得放大比 $\lambda = 1.5$ (满足放大比 λ 取值范围介于1和2之间的要求)。

2 宏微驱动系统设计

2.1 宏驱动系统设计

在宏微驱动系统中,常需要在较大空间范围内移动工作台,因此,需要宏驱动系统提供较大的位移输出。常见的宏驱动装置主要有音圈电机、直线电机、步进电机、伺服电机等,通常搭配滚珠丝杠实现直线运动^[20-21]。

音圈电机在实际应用中存在行程较短且成本较高;直线电机的发热严重并且成本高;步进电机在高速运行中容易出现失步且效率较低等问题,因此上述宏驱动装置难以适用于各种实际复杂精密加工任务。而伺服电机搭配滚珠丝杠的驱动形式具有推力大、行程远、效率高、寿命长、控制精度高和经济性好等优点,成为宏驱动系统设计的优先选择。因此,本文的宏驱动部分选择伺服电机和滚珠丝杠传动作为宏驱动系统的驱动装置,并且由宏驱动工作台、底座和滑动轨道共同组成宏驱动系统,如图7所示。

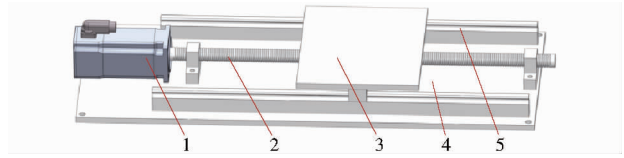


图7 宏驱动系统图

Fig. 7 Macro-drive system diagram

1. 伺服电机 2. 滚珠丝杠 3. 宏驱动工作台 4. 底座 5. 滑动轨道

2.2 微驱动系统设计

微驱动器是微机械系统中常用的执行机构。微驱动器主要输出力、直线位移和角位移等,由于输出范围有限,所以常被用在微型机电系统中。目前常用的微驱动器包括磁致伸缩制动器和压电陶瓷制动器^[22-23]。

压电陶瓷制动器具有以下优点:①输出位移大。②位移控制精度高,位移分辨率可达到微米级甚至更小。③对环境没有高要求,对磁场不敏感,无振动。④能量转换效率高,驱动力矩大且摩擦小。

本文根据所设计微动放大机构预留的驱动器尺寸、输出位移的要求及力的大小等特点,选择德国普爱纳微米位移技术(PI)公司P-235.1s型压电陶瓷制动器,如图8所示,该压电陶瓷的闭环位移为0~

15 μm ,分辨率为 0.3 nm,工作电压范围为 0 ~ 1 000 V。



图 8 压电陶瓷制动器

Fig. 8 Piezoelectric ceramic actuator

将微动放大机构与压电陶瓷制动器通过配套的固定套和垫片连接,确保压电陶瓷制动器紧贴微动放大机构位移输入端内壁,从而保证对压电陶瓷制动器直线位移的精密放大输出,以此建立整个微驱动系统,微驱动系统的结构图如图 9 所示。

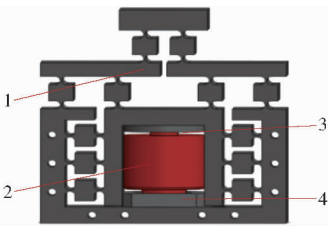


图 9 微驱动系统结构图

Fig. 9 Micro-drive system diagram

1. 微动放大机构 2. 压电陶瓷制动器 3. 垫片 4. 固定套

2.3 宏微驱动系统设计

本文设计的精密宏微驱动系统旨在实现亚微米级精确直线运动,通过微驱动系统补偿定位误差,以实现精确定位的目的。

宏微驱动控制系统主要由上位机、Clipper 控制器、伺服电机、滚珠丝杠、滑动导轨、宏驱动工作台、微驱动系统、旁式电感式传感器、直式电感式传感器和底座组成,宏微驱动系统结构如图 10 所示。

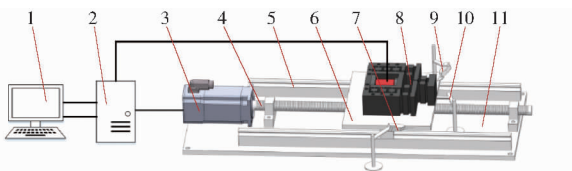


图 10 宏微驱动系统结构图

Fig. 10 Macro-micro drive system structure diagram

1. 上位机 2. Clipper 控制器 3. 伺服电机 4. 滚珠丝杠 5. 滑动导轨 6. 宏驱动工作台 7,9. 旁式电感式传感器 8. 微驱动系统 10. 直式电感式传感器 11. 底座

伺服电机驱动滚珠丝杠作为动力源和传动机构,带动宏驱动工作台在滑动导轨上进行直线运动,

固定在宏驱动工作台上的微驱动系统,通过压电陶瓷制动器的驱动,补偿伺服电机与滚珠丝杠所提供大范围直线运动的定位误差,从而实现大行程、高精度的直线运动。微驱动系统的螺栓孔与连接件相连,从顶部输出微位移,整个宏微驱动系统固定在底座上,由旁式电感式传感器、直式电感式传感器测量宏驱动系统的输出位移,旁式电感式传感器测量微驱动系统的输出位移,将数据传递给 Clipper 控制器,再由上位机对 Clipper 控制器进行指令设置,由 Clipper 控制器完成对微驱动系统和伺服电机的控制驱动,实现系统的高精度定位要求。

宏微驱动系统由宏驱动系统和微动驱动系统两部分组成,按照运动方式将宏微定位方式分为点位控制和连续定位控制。本文宏微驱动系统主要应用于对工件或刀具的快速定位,主要采用点位控制。宏驱动控制时,利用 Clipper 控制器自带的 PAMC 运动卡完成宏驱动系统的 PID 控制,其中宏驱动电机通过自带编码器实现局部闭环控制;当宏驱动系统运动结束后,通过电感式传感器测量宏驱动误差,换算成需要补偿的位移及压电陶瓷的驱动电压,并采用压电陶瓷制动器驱动微驱动机构进行位移补偿,最终实现高精度定位,整体运动精度由电感式传感器检测。

3 定位误差补偿方案

3.1 定位误差分析与补偿

系统的定位误差主要包括滚珠丝杠运动误差、压电陶瓷制动器的误差以及微动放大机构的运动定位误差,这些定位误差是影响机械定位精度最直接的因素,对其进行研究和误差补偿尤为重要^[24-25]。

在本文设计的精密宏微驱动直线系统中,宏驱动系统在进行大行程运动时产生的定位误差是宏微驱动系统的主要误差。本文选择的 P-235.1s 型压电陶瓷制动器配备闭环控制系统,能够降低自身误差。由于微动放大机构结构复杂,采用线切割的加工方式可降低自身误差。同时,采用平衡附加力原理可以降低微动放大结构的定位误差。

本文设计的定位误差补偿是微驱动系统对宏驱动系统定位误差的补偿,微驱动系统由微动放大机构和压电陶瓷制动器组成,微驱动系统的输出位移与压电陶瓷制动器输入电压存在线性关系,为

$$Y = aU + w \quad (14)$$

式中 Y ——微驱动系统输出位移

U ——压电陶瓷制动器输入电压

a ——电压-位移增益系数

w ——偏移量

对宏驱动系统的运动位置进行检测,测量出运动点位与理想点位之间的距离,以得到定位误差值。根据定位误差值计算所需的微驱动系统输出值,进而计算压电陶瓷制动器的输入电压,由此可得出电压关系为

$$U = \frac{Y - w}{a} \quad (15)$$

由式(15)得出微驱动器所需的电压,输入相应电压完成对系统的定位误差补偿。

3.2 定位误差补偿方案设计

针对宏微驱动系统定位误差的分析,本文主要对宏驱动系统在大行程位移后产生的较大定位误差进行补偿。系统补偿方案的原理如图 11 所示。

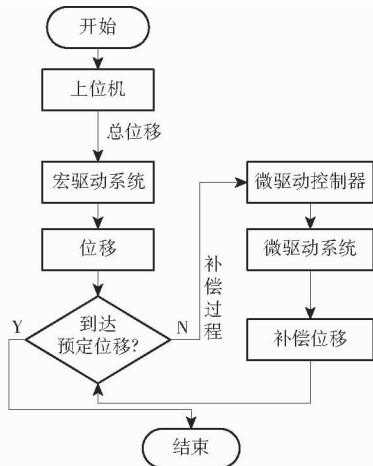


图 11 宏微驱动系统定位误差补偿原理图

Fig. 11 Positioning error compensation for macro-micro drive system schematic

宏驱动系统接到上位机指令运动后运动到预定位置,然后判断宏驱动系统的定位误差是否满足实际定位要求,如果未达到定位要求,微驱动控制器将控制微驱动系统进行定位误差补偿。对于宏驱动系统误差,通过查阅伺服电机和滚珠丝杠相关资料得知,滚珠丝杠的误差范围在 $5 \sim 30 \mu\text{m}$ ^[26],微驱动系统的误差范围在 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ ^[27]。因此,本文采用宏微系统误差补偿,可以有效提高系统定位精度。

4 宏微驱动系统定位误差补偿试验

4.1 宏驱动定位误差检测试验

宏驱动定位误差检测试验如图 12 所示。试验装置由旁式电感式传感器、直式电感式传感器、数据采集仪、宏驱动系统和上位机组成。宏驱动系统由伺服电机、滚珠丝杠及宏驱动工作台组成。

试验中使用的电感式传感器有两种类型,分别为直式电感式传感器和旁式电感式传感器,直式电感式传感器的型号为 DGC-8ZG/C,其测量范围为 $\pm 0.6 \text{ mm}$,总行程为 3 mm ,前行程为 $0.65 \sim$

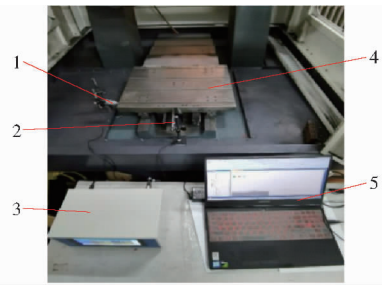


图 12 宏驱动定位误差检测试验

Fig. 12 Macro-drive position error detection experiment

1. 旁式电感式传感器 2. 直式电感式传感器 3. 数据采集仪 4. 宏驱动系统 5. 上位机

0.75 mm ,线性误差 $\pm 0.5\%$,重复性误差为 $0.03 \mu\text{m}$ 。旁式电感式传感器的型号为 DGC-6PG/A,其测量范围为 $\pm 0.3 \text{ mm}$,总行程为 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$,前行程为 $0.35 \sim 0.55 \text{ mm}$,线性误差 $\pm 0.5\%$,重复性误差为 $0.05 \mu\text{m}$ 。旁式电感式传感器与直式电感式传感器用来测量宏驱动系统在运动过程中所产生定位误差,误差最终由数据采集仪采集,上位机记录宏驱动系统的输出。

考虑到试验设备的检测精度等问题,本试验中宏驱动系统每次的位移量为 0.2 mm ,共进行 10 次测量,总测量范围为 2 mm ,对每个位置点分别进行 5 次定位误差测量,取旁式传感器和直式传感器测量结果的平均值,宏驱动系统定位误差结果如表 1 所示。

表 1 宏驱动系统定位误差

Tab. 1 Macro-drive system position error μm

位置	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	平均值
1	12.50	12.70	12.70	12.30	12.60	12.56
2	13.10	13.20	13.30	13.00	13.10	13.14
3	13.50	13.60	13.70	13.40	13.70	13.58
4	13.80	13.80	14.10	13.60	13.90	13.84
5	14.10	14.10	14.70	14.00	14.20	14.22
6	14.60	14.60	15.10	14.30	14.70	14.66
7	15.10	14.90	15.60	14.60	15.20	15.08
8	15.50	15.20	16.10	15.10	15.50	15.48
9	15.80	15.70	16.70	15.60	15.90	15.94
10	16.30	16.20	17.10	16.00	16.40	16.40

根据测量结果,计算得出平均定位误差为 $14.49 \mu\text{m}$ 。平均误差仍有补偿空间,并且设计的微动放大机构的补偿范围在宏驱动系统误差范围内。因此,采用微驱动系统进行补偿可以进一步降低宏驱动系统的定位误差。

4.2 微驱动定位误差补偿性能试验

微驱动系统定位误差补偿性能试验如图 13 所示。试验装置主要由压电陶瓷制动器、微动放大机构、旁式电感式传感器和底座组成。通过旁式电感

式传感器测量并记录微驱动系统的定位误差。

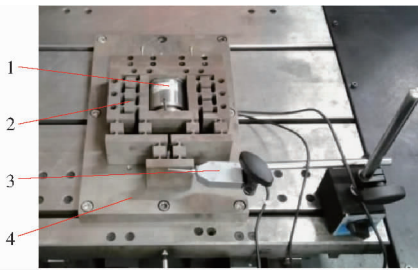


图 13 微驱动定位误差补偿性能试验

Fig. 13 Micro-drive positioning error compensation performance experiment

1. 压电陶瓷制动器 2. 微动放大机构 3. 旁式电感式传感器
4. 底座

将微动放大机构安装固定在试验底座后,在输出端连接位移传感器。试验开始后,压电陶瓷制动器输入 $0 \sim 7 \mu\text{m}$ 的位移,每隔 $0.50 \mu\text{m}$ 设置一个位移测量点,由旁式电感式传感器进行测量,试验结果如表 2 所示。

表 2 微驱动系统位移定位误差

Tab. 2 Micro-drive system displacement position error

输入位移/ μm	理论位移/ μm	试验位移/ μm	绝对误差/ μm	相对误差/ %
0.50	0.75	0.70	0.05	6.67
1.00	1.50	1.40	0.10	6.67
1.50	2.25	2.05	0.20	8.89
2.00	3.00	2.70	0.30	10.00
2.50	3.75	3.50	0.25	6.67
3.00	4.50	4.20	0.30	6.67
3.50	5.25	4.85	0.40	7.62
4.00	6.00	5.70	0.30	5.00
4.50	6.75	6.40	0.35	5.19
5.00	7.50	7.15	0.35	4.67
5.50	8.25	7.95	0.30	3.64
6.00	9.00	8.60	0.40	4.44
6.50	9.75	9.30	0.45	4.62
7.00	10.50	10.10	0.40	3.81

分析结果显示,试验平均误差为 $0.30 \mu\text{m}$,相对误差波动在 10% 以内,说明微动放大机构具有良好的运动性能。

4.3 宏微驱动系统定位误差补偿试验

宏微驱动系统定位误差补偿试验如图 14 所示。试验装置包含微驱动系统、旁式电感式传感器、直式电感式传感器、稳压电源、数据采集仪、宏驱动系统、压电陶瓷制动器和上位机。系统的驱动方式为点位驱动,首先由宏驱动系统进行位移,然后由微驱动系统进行位移补偿,以修正宏驱动系统的定位误差。

宏微驱动系统定位误差补偿试验中,每次的位移量为 0.2 mm ,共进行 10 次测量,总测量范围为

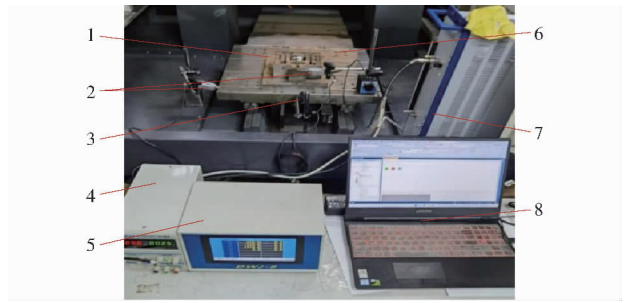


图 14 宏微驱动系统定位误差补偿试验

Fig. 14 Positioning error compensation of macro-micro drive system experiment

1. 微驱动系统 2. 旁式电感式传感器 3. 直式电感式传感器
4. 稳压电源 5. 数据采集仪 6. 宏驱动系统 7. 压电陶瓷制动器
8. 上位机

2 mm ,对每个位置点分别进行 5 次定位误差测量,记录微驱动系统旁式传感器的测量数值,结果如表 3 所示。

表 3 宏微驱动系统定位误差补偿结果

Tab. 3 Macro-micro drive system positioning error compensation results

位置	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	平均值/ μm
1	0.20	0.35	0.35	0.10	0.40	0.28
2	0.40	0.50	0.60	0.30	0.25	0.41
3	0.55	0.60	0.70	0.45	0.55	0.57
4	0.25	0.55	0.50	0.20	0.30	0.36
5	0.30	0.30	0.60	0.20	0.40	0.36
6	0.15	0.20	0.40	0.30	0.15	0.24
7	0.20	0.30	0.20	0.30	0.45	0.29
8	0.30	0.20	0.50	0.30	0.35	0.33
9	0.40	0.40	0.30	0.20	0.40	0.34
10	0.25	0.20	0.30	0.20	0.20	0.23

宏微驱动系统定位误差补偿前后误差平均值对比如表 4 所示。

表 4 系统定位误差补偿前后误差平均值对比结果

Tab. 4 Comparison of average positioning errors before and after system error compensation

位置	宏驱动定位误差 均值/ μm	宏微驱动定位 误差均值/ μm	误差降低百 分比/%
1	12.56	0.28	97.77
2	13.14	0.41	96.88
3	13.58	0.57	95.80
4	13.84	0.36	97.40
5	14.22	0.36	97.47
6	14.66	0.24	98.36
7	15.08	0.29	98.08
8	15.48	0.33	97.87
9	15.94	0.34	97.87
10	16.40	0.23	98.60
平均值	14.49	0.34	97.65

通过对测量结果的统计分析可知,经误差补偿后宏微驱动系统的平均定位误差为 $0.34 \mu\text{m}$ 。此次试验结果的误差值相比于宏驱动系统单独运动的误差值大幅降低,系统的平均定位误差降低了 97.65%。试验证明了本文提出的宏微驱动系统定位误差补偿方法的有效性及精确性,表明该宏微驱动系统的设计过程合理,定位性能良好,能够满足亚微米级高精度定位的要求。

5 结论

(1) 本文利用柔性铰链杠杆原理及平衡附加力原理设计了一种无附加力的微动放大机构。该机构可将压电陶瓷制动器的直线位移放大 1.5 倍,并有效消除微驱动系统在非运动方向上产生的附加力

影响。

(2) 完成了宏微驱动系统设计,其中宏驱动系统采用伺服电机配合滚珠丝杠的驱动方式,微驱动系统采用压电陶瓷制动器驱动微动放大机构的驱动方式,并完成了定位误差分析及误差补偿方案设计。

(3) 进行了宏驱动系统误差检测试验、微驱动系统定位误差补偿性能试验和宏微驱动系统定位误差补偿试验。试验结果表明,设计的宏微驱动系统能够将宏驱动系统平均定位误差由 $14.49 \mu\text{m}$ 降低至 $0.34 \mu\text{m}$,平均定位误差降低 97.65%。宏微驱动系统能够实现亚微米级定位精度。试验验证了宏微驱动系统设计及定位误差补偿方案的有效性及精确性。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Lufan, ZHANG Pengqi, JIANG Boshi, et al. Research trends in methods for controlling macro-micro motion platforms [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2023, 6(3): 035001.
- [2] MA Zhuochen, FAN Jiahao, WANG Hesheng, et al. Microfluidic approaches for micro actuators: from fabrication, actuation, to functionalization [J]. *Small*, 2023, 19(22): 2300469.
- [3] AHMAD F, HASAN M, AHMAD A, et al. Micro actuators technologies for biomedical applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2023, 29: 953 - 984.
- [4] QIU Jianmin, YANG Ying, JIN Jiamei, et al. A novel three-phase excitation piezoelectric motor for macro-micro actuation: integration design, systematic modeling, and experimental evaluation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(8): 1 - 36.
- [5] 宋康, 赵玉龙, 蒋庄德. 基于 PSD 的微轮廓测量仪及其控制系统研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2002(增刊 1): 217 - 219, 224. SONG Kang, ZHAO Yulong, JIANG Zhuangde. The research of 3D micro-profilometer based on PSD and control system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002(Supp. 1): 217 - 219, 224. (in Chinese)
- [6] 白有盾, 陈新, 杨志军. 刚柔分级并联驱动宏微复合运动平台设计 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(6): 669 - 680. BAI Youduan, CHEN Xin, YANG Zhijun. Design of rigid motion and elastic deformation parallel driven based macro-micro compounded positioning stage [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, 49(6): 669 - 680. (in Chinese)
- [7] 喻曹丰, 王玉, 陈卓, 等. 同轴集成式宏微复合驱动器的磁路建模分析与实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(16): 6083 - 6093, 6182. YU Caofeng, WANG Yu, CHEN Zhuo, et al. Experimental study and magnetic circuit modeling analysis of coaxial integrated macro-micro composite actuator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(16): 6083 - 6093, 6182. (in Chinese)
- [8] 杨满芝, 景钢, 郭卫, 等. 精密对称驱动二级微动放大系统设计及性能 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(6): 1456 - 1465. YANG Manzhi, JING Gang, GUO Wei, et al. Design and performance of precision symmetric two-stage micro-drive amplification system [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(6): 1456 - 1465. (in Chinese)
- [9] LIU Xuhui, GAO Lei, WU Yan, et al. Micro-displacement amplifier of giant magnetostrictive actuator using flexure hinges [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 556(15): 169415.
- [10] 吴彤, 杨依领, 吴高华, 等. 二自由度大行程无耦合压电粘滑定位平台 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(1): 62 - 72. WU Tong, YANG Yiling, WU Gaohua, et al. Two-DOF piezoelectric stick-slip positioning platform with large strokes and no coupling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(1): 62 - 72. (in Chinese)
- [11] 程维明, 孙麟治, 章海涛. 利用补偿提高精密定位平台的定位精度 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 884 - 888. CHENG Weiming, SUN Linzhi, ZHANG Haitao, et al. Improvement of positioning precision for precise stage with compensation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(5): 884 - 888. (in Chinese)
- [12] HO E, GORBET R. A low cost macro-micro positioning system with sma-actuated micro stage [J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2007, 31(1): 75 - 95.
- [13] PAROS J M, WEISBORD L. How to design flexure hinges [J]. *Machine Design*, 1965, 27: 151 - 156.
- [14] 于阳, 王学问, 徐振邦, 等. 基于柔性铰链的大口径望远镜并联调整机构 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(3): 352 - 362. YU Yang, WANG Xuewen, XU Zhenbang, et al. Parallel adjustment mechanism for large aperture telescope based on flexible hinges [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(3): 352 - 362. (in Chinese)
- [15] 王晓迪, 曹玉岩, 王富国, 等. 大口径透镜混合柔性支撑结构优化设计 [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 280 - 290.

- WANG Xiaodi, CAO Yuyan, WANG Fuguo, et al. Optimization design of large-aperture lens mixed flexible support structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 280–290. (in Chinese)
- [16] VALENTINI P P, CIRELLI M, PENNESTRÌ E. Second-order approximation pseudo-rigid model of flexure hinge with parabolic variable thickness [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 136: 178–189.
- [17] HARFENSTELLER F, HENNING S, ZENTNER L, et al. Modeling of corner-filletted flexure hinges under various loads [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 175: 104937.
- [18] 闫鹏, 李金银. 压电陶瓷驱动的行程快刀伺服机构设计 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 390–397.
YAN Peng, LI Jinyin. Design of piezo actuated long stroke fast tool servo mechanism [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 390–397. (in Chinese)
- [19] 钟相强, 黄卫清, 张轩, 等. 二级杠杆柔性铰链复合结构的双足压电直线电机 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 86–94.
ZHONG Xiangqiang, HUANG Weiqing, ZHANG Xuan, et al. Double-foot piezoelectric linear motor with secondary lever and flexure hinge composite structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 86–94. (in Chinese)
- [20] YU Caofeng, YANG Kun, PENG Jingjing, et al. Large-stroke and high-precision coaxial integrated macro-micro composite actuator based on VCM and GMA [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2024, 175(4): 373–392.
- [21] 翁寅祥, 杨依领, 吴高华, 等. 柔顺宏微操作系统动力学建模及振动抑制研究 [J]. *振动与冲击*, 2024, 43(9): 69–76, 120.
WENG Yinxiang, YANG Yiling, WU Gaohua, et al. Dynamic modeling and vibration suppression of flexible macro-micro manipulator system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(9): 69–76, 120. (in Chinese)
- [22] CHENG Chunan, CHENG Huangliang, CHANG Chien, et al. An input-current shaping and soft-switching drive circuit applied to a piezoelectric ceramic actuator [J]. *Micromachines*, 2023, 14(10): 1906.
- [23] 肖献强, 朱家诚, 李欣欣. 压电型宏/微双驱动精密定位机构的建模与控制 [J]. *农业机械学报*, 2007, 38(11): 140–143.
XIAO Xianqiang, ZHU Jiacheng, LI Xinxin. Modeling and control of a serial type macro-micro dual drive ultra precision positioning mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(11): 140–143. (in Chinese)
- [24] 程强, 王畅, 齐宝宝, 等. 虑及结构参数误差的滚珠丝杠接触载荷建模与分析 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(2): 353–360.
CHENG Qiang, WANG Chang, QI Baobao, et al. Modeling and analysis of contact load of ball screw with error of structural parameters [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(2): 353–360. (in Chinese)
- [25] YANG Manzhi, JING Gang, LV Zhenyang, et al. Design and error compensation performance of a precision micro-drive rotary system [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021(1): 199915.
- [26] 祖莉, 林炜国, 张鲁超, 等. 双螺母滚珠丝杠副导程误差与摩擦力矩关系研究 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 397–406.
ZU Li, LIN Weiguo, ZHANG Luchao, et al. Relationship between lead error and friction torque of double nut ball screw [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 397–406. (in Chinese)
- [27] 杨满芝, 李林岳, 张传伟, 等. 基于平衡附加力原理的微动放大机构设计与实验 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(12): 452–458.
YANG Manzhi, LI Linyue, ZHANG Chuanwei, et al. Design and experiment of precision micro-drive amplifying mechanism based on principle of balanced additional force [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(12): 452–458. (in Chinese)