

# 基于气体静压运动平台的自抗扰控制仿真分析与实验研究\*

周昊洋 卢志伟 李浩 赵康 刘锡尧 张君安

(西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 为了进一步提高气体静压运动平台的稳定性以及抗干扰性能, 针对气体静压运动平台自身存在的扰动对其控制算法进行研究。文章提出了一种 PD 控制与线性扩张状态观测器相结合的自抗扰控制算法, 在 Matlab/Simulink 中搭建了控制模型进行仿真分析, 并搭建平台进行实验验证。利用该算法解决了传统 PID 控制算法在气体静压运动平台存在的扰动问题。结果表明: 相比于传统 PID 控制算法, 自抗扰控制算法能够有效减小跟踪误差, 降低超调, 并且提高了气体静压运动平台的抗干扰性能。

**关键词:** 气体静压运动平台; 自抗扰控制; 直线电机; 扰动抑制

**中图分类号:** TM301.2 **文献标识码:** A

**DOI:** [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.05.027](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.05.027)

## Active disturbance rejection control based on aerostatic pressure moving platform simulation analysis and experimental research

ZHOU Haoyang, LU Zhiwei, LI Hao, ZHAO Kang, LIU Xiyao, ZHANG Jun'an

(School of Electrical and Mechanical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, CHN)

**Abstract:** In order to further improve the stability and anti-interference performance of the aerostatic platform, the control algorithm of the aerostatic platform is studied according to the disturbance existing in the platform itself. This paper proposes an auto-disturbance rejection control algorithm combining PD control and linear extended state observer. The control model is built in Matlab/Simulink for simulation analysis, and the platform is built for experimental verification. This algorithm solves the disturbance problem of the traditional PID control algorithm in the gas static pressure moving platform. The results show that compared with the traditional PID control algorithm, the active disturbance rejection control algorithm can effectively reduce the tracking error, reduce the overshoot, and improve the anti-interference performance of the aerostatic movement platform.

**Keywords:** aerostatic movement platform; active disturbance rejection control; linear motion; disturbance attenuation

近年来, 随着精密、超精密技术的发展与进步, 超精密加工技术及装备在某些重点领域以及一些高端产品制造中占据主导地位<sup>[1]</sup>。气体静压运动平台是精密加工装备的核心功能部件, 它的性能将直接影响最终的加工精度<sup>[2]</sup>。

目前传统的 PID 控制仍然是精密设备的主要控制策略, PID 控制策略主要用于被控对象参数不变化或变化小的情况<sup>[3]</sup>。而在系统实际运行中, 由于

被控对象复杂, 在受到外部扰动时, 参数会发生很大的变化, 无法保证 PID 控制效果, 导致系统可能无法平稳运行。PID 控制策略自身存在的缺陷: 快速性与超调之间的矛盾<sup>[4]</sup>等, 无法同时满足快速性与超调, 使系统的动态性能降低。这些缺陷也导致 PID 控制策略很少应用于高性能控制场合<sup>[5]</sup>。

自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 是由韩京清研究员提出的一种新型控制算

\* 国家自然科学基金项目 (52301101); 陕西省科技厅项目 (2024GX-YBXM-217); 陕西省教育厅项目 (23JC040); 西安市科技局项目 (21XJZZ0025); 西安市碑林区项目 (GX2220)

法<sup>[6]</sup>，其核心思想是将被控对象中的已知扰动和未知扰动都认为是系统扰动，通过扩张状态观测器对系统扰动进行估计并做出补偿，对非线性、强耦合的系统具有较好的控制效果<sup>[7]</sup>。但由于其控制参数多，参数调试比较繁琐，并且参数调整需要依靠经验，因此在实际使用中调试复杂，不便于实际应用<sup>[8]</sup>。针对这一问题，本文将设计一种线性扩张状态观测器（linear extended state observer, LESO）和PD控制器相结合的线性自抗扰控制（linear active disturbance rejection control, LADRC）方法，将其应用在自主搭建的气体静压运动平台中，针对气体静压运动平台存在的扰动因素进行仿真分析与实验验证。

## 1 气体静压运动平台的组成与建模

### 1.1 气体静压运动平台的组成

本文使用的气体静压运动平台由机械结构系统、驱动系统和气动系统组成<sup>[9]</sup>。机械结构部分主要由精密计量方箱、X轴气浮导轨、Y轴气浮导轨、辅助调平支撑及限位防撞装置组成。驱动系统主要由直线电机及伺服驱动系统两部分组成<sup>[10]</sup>。气动系统主要由节流器、三通管、减压阀及流量计组成。图1所示为气体静压运动平台示意图。

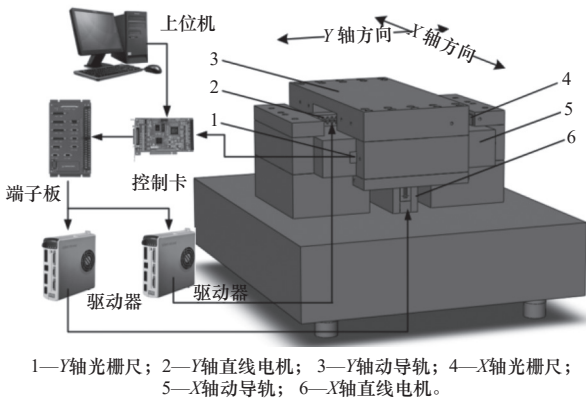


图1 气体静压运动平台示意图

### 1.2 气体静压运动平台直线电机的建模

本文以气体静压运动平台的X轴直线电机为例，推导出的电机的电压平衡方程与机械平衡方程。

直线电机的电压及磁链方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v \psi_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau} v \psi_d \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中： $u_d$ 、 $u_q$ 分别为d轴、q轴电压； $R_s$ 为初级电枢电阻； $\psi_q$ 、 $\psi_d$ 分别为d轴、q轴的磁链； $\psi_f$ 为永磁体磁链； $\tau$ 为永磁体极距； $v$ 为直线电机运行速度； $L_d$ 、 $L_q$ 分别为d轴、q轴的电感。

直线电机的电磁推力方程及机械运动方程为

$$F_e = \frac{3\pi n_p}{2\tau} [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

$$F_e = m \frac{dv}{dt} + Bv + F_{load} \quad (3)$$

式中： $n_p$ 为极对数； $F_e$ 为电磁推力； $m$ 为电机的质量； $v$ 为运行速度； $B$ 为电机的黏滞系数； $F_{load}$ 为负载阻力。

采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略，可将电磁推力方程简化为

$$F_e = \frac{3\pi n_p}{2\tau} \psi_f i_q \quad (4)$$

经过对搭建的气体静压运动平台进行实验研究发现，由于气浮导轨“零摩擦”等特点，使气体静压运动平台对气浮力、外界震动、传感器信号的干扰特别敏感，导致平台运动后特别容易受到扰动影响<sup>[11]</sup>。通过对平台扰动因素进行分析，主要有：电机推力波动、负载突变扰动、传感器噪声以及气膜与基座的振动扰动。图2所示为平台扰动示意图。

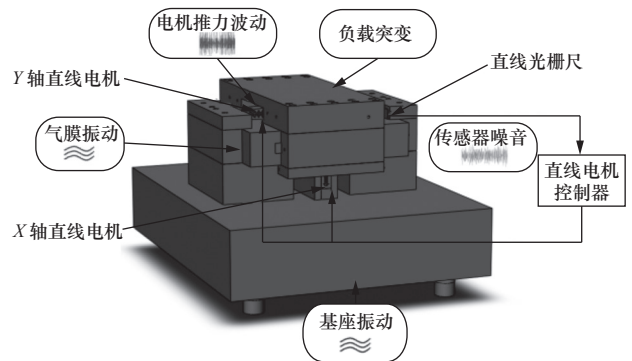


图2 精密二维气浮工作台的干扰示意图

故机械运动方程简化为

$$F_e = m \frac{dv}{dt} + Bv + F_d \quad (5)$$

式中： $F_d$ 为永磁同步直线电机（PMLSM）所受干扰力的集合。

$$F_d = F_{load} + F_r + F_{rpp} + w_s + w \quad (6)$$

式中： $F_r$ 为摩擦力； $F_{rpp}$ 为电机推力波动； $w_s$ 为传感器噪音； $w$ 为基座振动。

驱动器中的电流环采用PI控制，建立电流环PMLSM控制框图，如图3所示。

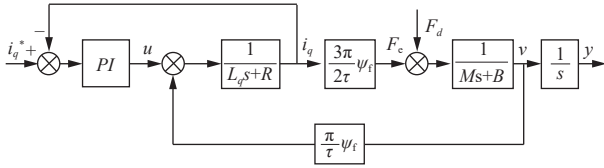


图3 电流环PMLSM控制框图

## 2 自抗扰控制器的设计

### 2.1 自抗扰控制器设计

根据上文对气浮平台驱动系统建立的模型以及扰动分析，现将总扰动扩张为一个新的状态量可得状态表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) + bu(t) \\ \dot{x}_3(t) = f(t, x, \dot{x}) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中： $y$ 为被控输出； $x_1$ 为位置状态； $x_2$ 为速度状态； $x_3=f$ 为扩张状态。

根据系统，LESO设计为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \beta_1(y - \hat{x}_1) + \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = \beta_2(y - \hat{x}_1) + \hat{x}_3 + bu \\ \dot{\hat{x}}_3 = \beta_2(y - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\hat{x}_1$ 、 $\hat{x}_2$ 、 $\hat{x}_3$ 为LESO的状态变量； $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 为观测器增益。

LSEF设计为

$$\begin{cases} e = v - \hat{x}_1 \\ u_0 = \beta_{01}e - \beta_{02}\hat{x}_2 \\ u = \frac{u_0 - \hat{x}_3}{b} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $u$ 为控制量； $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 为控制器增益； $v$ 为给定值； $e$ 为跟踪误差。

将控制量 $u$ 代入式(7)中可将系统化为积分串联型： $\ddot{y} \approx u_0$ ，基于带宽法对控制器参数进行整定可得：

$$\begin{cases} \beta_1 = 3\omega_0, \beta_2 = 3\omega_0^2, \beta_3 = \omega_0^3 \\ \beta_{01} = \omega_c^2, \beta_{02} = 2\omega_c \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\omega_0$ 为观测带宽； $\omega_c$ 为控制带宽。一般 $\omega_0 = (2 \sim 5)\omega_c$ 。

根据1.2节建立的直线电机数学模型以及本节设计的自抗扰控制器，在Smulink软件中完成模型搭建，如图4所示。

### 2.2 扩张状态观测器性能验证

仿真及实验用到的X轴PMLSM参数见表1。根据搭建的模型进行参数调试获得PID与ADRC最优参数见表2。

给定阶跃信号进行扩张观测器性能验证，位置与速度的仿真结果如图5所示。从仿真结果图中可以发现，所设计的扩张状态观测器在跟踪过程中能准确地观测出位置与速度，这表明设计的扩张状态观测器具有较高的观测精度。

## 3 仿真分析与实验验证

为验证所设计的控制方法的性能，将通过仿真与实验进行性能验证。首先将气体静压运动平台X轴的直线电机作为被控对象，针对所存在的负载突

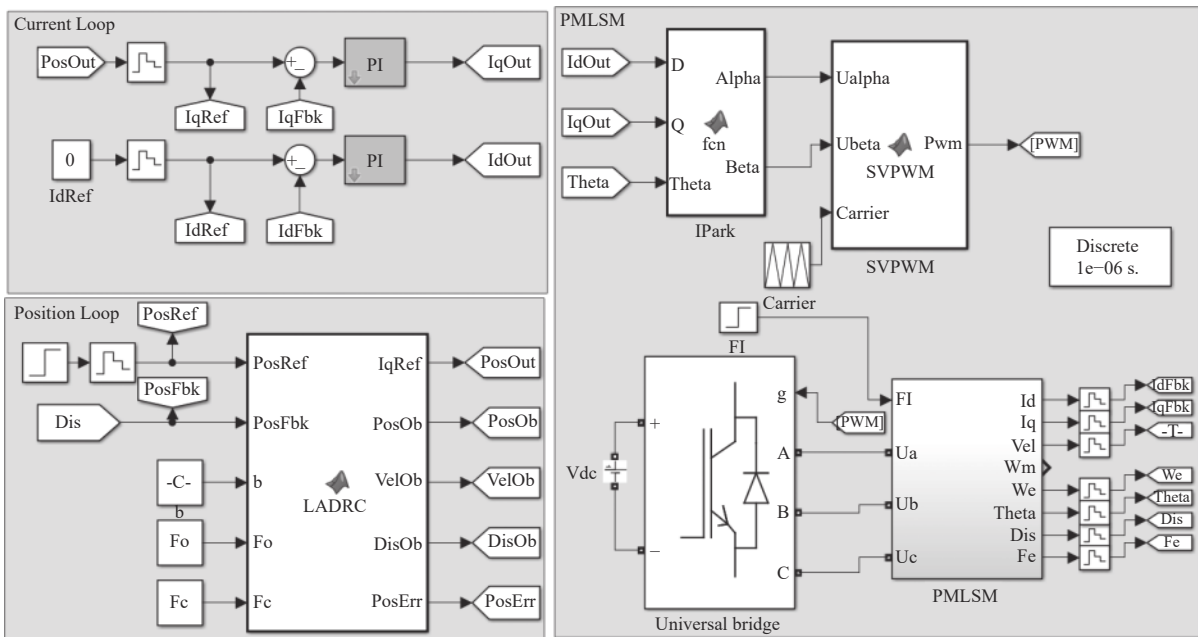


图4 基于自抗扰控制的仿真模型图

变、基座振动及传感器噪音扰动在 Simulink 软件下，将所设计的控制方法与传统 PID 控制方法进行仿真对比分析。最后搭建气体静压运动平台完成实验验证。

表 1 X轴直线电机参数

参数	参数值
电阻/ $\Omega$	0.33
d轴电感/mH	3.5
q轴电感/mH	3.5
磁链/Wb	0.203
动子质量/kg	0.38
极对数	4

表 2 PID 与 LADRC 最优控制参数

控制方法	$\omega_c(k_p)$	$\omega_o(k_d)$	$b_0(k_i)$
LADRC	30	120	4
PID	150	30	100

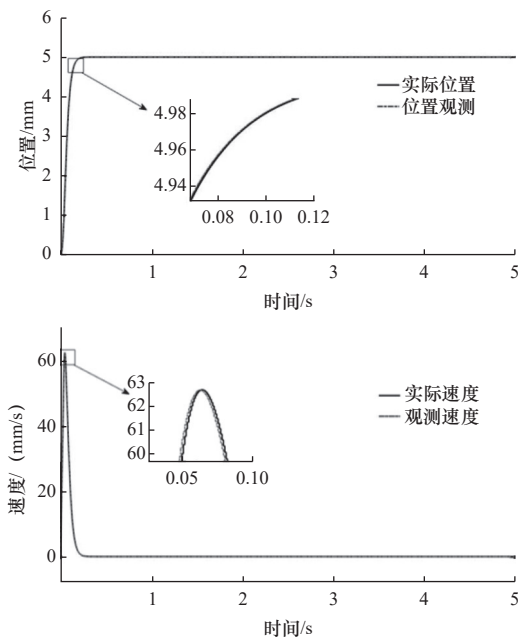


图 5 跟踪定位过程中位置与速度波形

### 3.1 正弦跟踪与负载突变的仿真分析

分别以频率  $2\pi$  rad/s、幅值为 1 mm 的正弦信号和目标值为 5 mm 的阶跃信号作为系统的目标指令。其中，对于阶跃响应，在 2.5 s 时加入 600 N 的负载扰动。两种控制方法的正弦跟踪响应和阶跃响应仿真结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知，在正弦跟踪响应中，LADRC 的整体跟踪误差小于 PID，表明 LADRC 的跟踪性能

明显优于 PID。由图 7 可知，对于阶跃响应，LADRC 的无超调，优于 PID 的 0.42 mm，LADRC 的调节时间为 0.16 s，优于 PID 的 0.28 s。在扰动抑制方面，PID 和 LADRC 的最大扰动偏差分别为 0.44 mm 和 0.11 mm。以上的仿真结果表明，LADRC 具有更好的跟踪性能和阶跃响应性能。

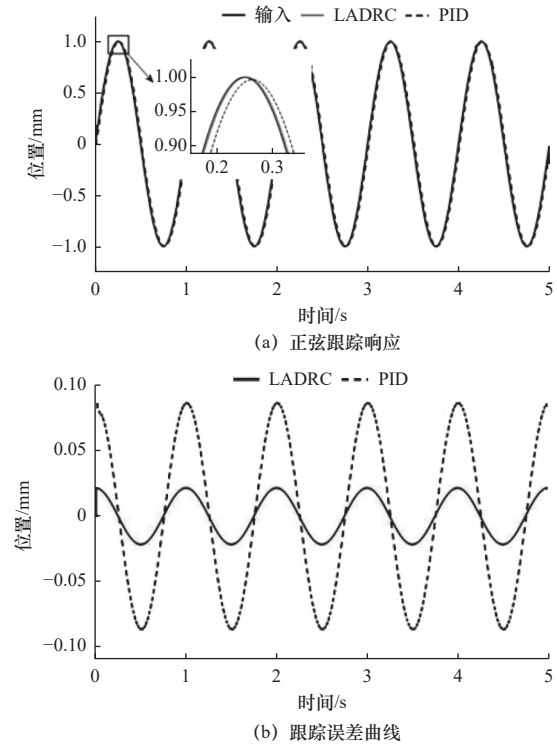


图 6 正弦跟踪响应与跟踪误差

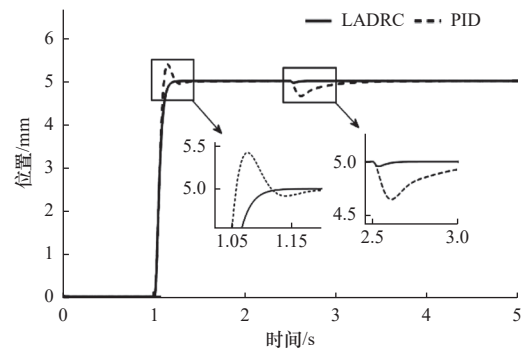
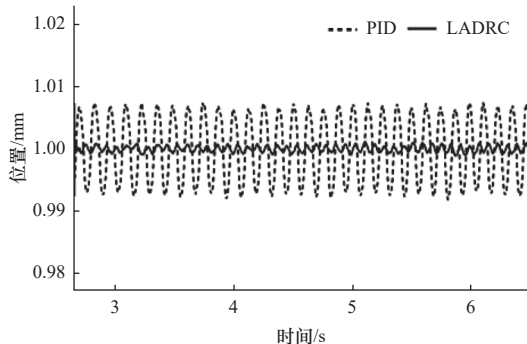


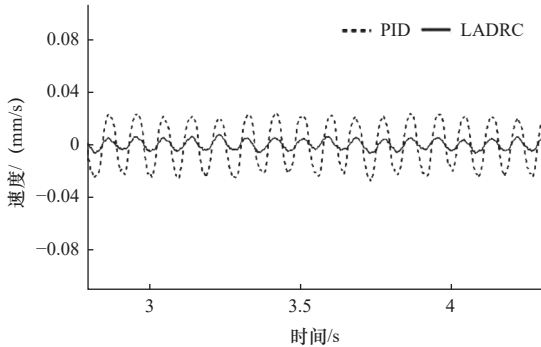
图 7 阶跃响应仿真图

### 3.2 基座振动与传感器噪音的仿真分析

为了验证所设计的自抗扰控制器的抗扰动性能，分别采用变频信号 (chirp signal)、白噪音信号 (band-limited white noise) 来模拟基座的振动和传感器噪音。图 8 所示为 PID 与 LADRC 控制方法对基座振动干扰的响应图，图 9 所示为 PID 与 LADRC 控制方法对噪音干扰的响应图。

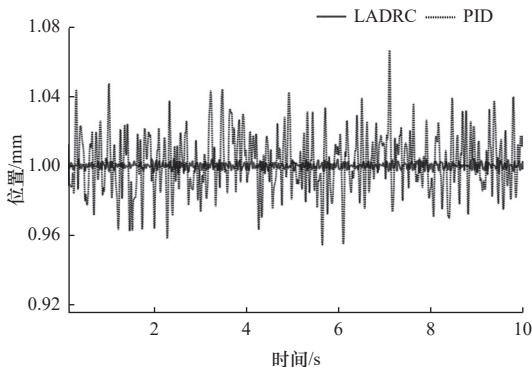


(a) 位置波动

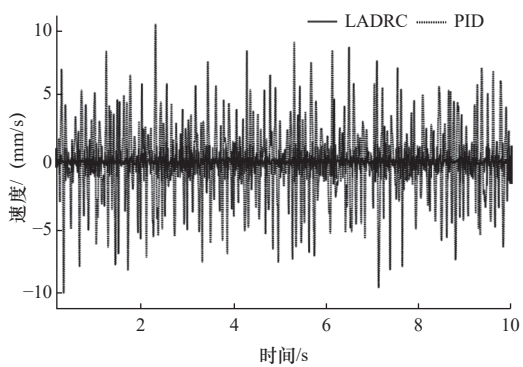


(b) 速度波动

图 8 基座振动干扰下的仿真图



(a) 位置波动



(b) 速度波动

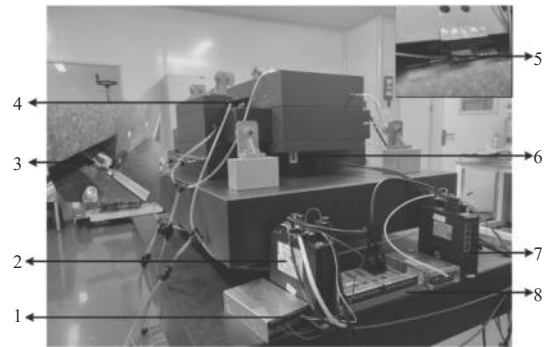
图 9 噪音干扰下的仿真图

仿真结果表明，对于基座振动和传感器噪音方面，LADRC 控制方法明显优于 PID 控制方法。其主要原因是 LADRC 控制方法中的扩张状态观测器

将外界的扰动观测出来，并迅速补偿到输入中，而 PID 控制方法是在反馈中叠加外界干扰，通过误差调节的方式把扰动作为输入来处理，故相比 LADRC 性能要差得多。

### 3.3 实验验证

为验证仿真中控制器性能的真实性，将采用与仿真中相同的控制器参数进行实验验证。搭建气体静压运动平台，如图 10 所示。分别采用 LADRC 和 PID 控制算法进行实验验证。



1—X轴光栅尺；2—Y轴驱动器；3—Y轴光栅尺；4—Y轴直线电机；5—X轴直线电机；6—X轴直线电机；7—24 V电源；8—控制卡端子板。

图 10 气体静压运动平台驱动控制系统

保持仿真分析中的控制参数不变，对 X 轴给定目标位置为 10 mm、速度 60 mm/s、加速度 1g 的点位规划信号作为系统的目标指令。其中，对于点位响应，在 3 s 时加入 100 N 的负载。PID 与 LADRC 的实验结果图分别如图 11 和图 12 所示。

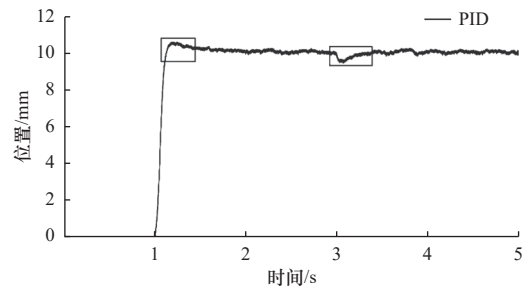


图 11 PID 点位响应实验图

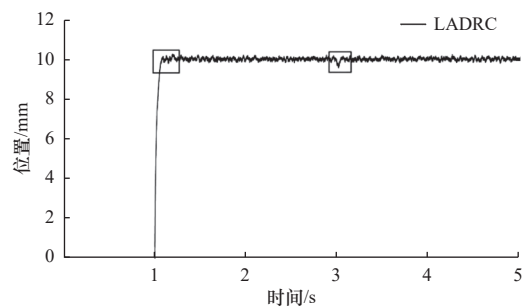


图 12 LADRC 点位响应实验图

由实验结果图可知：

(1) PID 的超调为 0.46 mm，调节时间为 0.58 s，并且存在静态误差。而 LADRC 的超调为 0.14 mm，调节时间为 0.12 s。

(2) 在扰动抑制响应方面，从 2.5 s 加入的负载中可以看出，LADRC 对于负载突变因素能够在 0.21 s 内快速抑制扰动，最大扰动偏差为 0.18 mm，小于 PID 的 0.41 mm。对于实际存在的基底振动、传感器噪音等扰动因素，从实验结果图中可以看出，LADRC 能够快速地对扰动进行补偿，使图线更加平滑，波动小，明显优于 PID。

综上可知，LADRC 对于气体静压运动平台的实际控制性能优于 PID。

#### 4 结语

本文通过对气体静压运动平台存在的扰动进行分析，针对传统 PID 控制方法在气体静压运动平台存在跟踪精度低、扰动抑制能力差等问题，提出并设计 PD 与 LESO 相结合一种 LADRC 方法对存在的扰动进行抑制。通过仿真分析和实验研究，得出以下结论：

(1) 在跟踪响应方面，相比传统 PID 控制算法，本文所设计的控制方法动态跟踪误差降低了 20%。不仅提升了系统的响应速度，而且有效地减少了跟踪误差。

(2) 在扰动抑制方面，相比传统 PID 控制算法，本文所设计的 LADRC 在扰动抑制时间、最大扰动量以及系统波动部分提升了 15%。不仅能有效抑制扰动，而且使气体静压运动平台具有更小的波动和更好的稳定性。

(3) 实验结果不仅反映了仿真分析的正确性，而且通过与 PID 对比，在响应速度、跟踪误差以及

抗扰动方面都有所提升。从而验证了所设计的控制方法的合理性。

#### 参 考 文 献

- [1] 朱思达, 卢志伟, 刘波, 等. 基于方箱的气浮工作台控制系统稳定性分析 [J]. 制造技术与机床, 2022(8): 178-184.
- [2] 鹿茵, 张君安, 冯凌华, 等. 整体封闭式与开式气浮导轨静态性能对比分析 [J]. 液压与气动, 2021, 45(6): 84-90.
- [3] 穆天驰, 张东民, 周伟民. 基于模糊 PID 算法的同步柔性冲压装置控制系统研究 [J]. 制造技术与机床, 2022(1): 94-97.
- [4] 何少佳, 闫奥博, 祝新军, 等. 液压振动台位移补偿的 PID 控制方式的研究 [J]. 制造技术与机床, 2019(5): 72-75.
- [5] 彭敬淇, 蓝益鹏. 运动平台磁悬浮直线同步电动机驱动系统 RBF-PID 自学习控制的研究 [J]. 制造技术与机床, 2022(6): 113-118.
- [6] 刘曹丰, 肖志豪, 吴干, 等. 基于自抗扰的宏微复合驱动器宏动控制策略研究 [J]. 制造技术与机床, 2023(7): 100-107.
- [7] 刘佳, 顾毅君, 李朋, 等. 基于自抗扰的永磁直驱伺服电机扰动抑制技术研究 [J]. 微特电机, 2023, 51(9): 39-44.
- [8] 沈威, 冉全, 赵世平. 自抗扰与改进 ESO 并联的永磁同步电机矢量控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(9): 77-81.
- [9] 卢志伟, 刘锡尧, 鹿茵, 等. 二维运动平台气浮静压导轨承载性能计算与研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(23): 240-250.
- [10] 鹿茵. 基于方箱的 X-Y 气浮工作台特性研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- [11] 陈东生. 气体静压支承下线性直驱平台的振动抑制技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

第一作者: 周昊洋, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 研究方向为精密二维气浮工作台驱动控制系统设计与分析。E-mail: 1968750504@qq.com

通信作者: 卢志伟, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为流体润滑及空气静压导轨技术研究, 精密与超精密制造技术研究。E-mail: luzhiwei@xatu.edu.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2023-11-01)

文章编号: 20240531

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。