

文章编号 1004-924X(2026)07-1097-14

## 激光跟踪测量系统线性自抗扰控制

陈宗亮<sup>1</sup>, 吴腾飞<sup>1\*</sup>, 杨忻瑞<sup>1</sup>, 陈奕霖<sup>1</sup>, 陈新倬<sup>2</sup>

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072;

2. 二重(德阳)重型装备有限公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:**针对非线性摩擦、轴间耦合等复杂扰动环境下,激光跟踪测量系统易出现动态响应滞后和控制精度下降的问题,提出了一种基于径向基函数神经网络优化的线性自抗扰控制(RBF-LADRC)方法。该方法通过线性自抗扰控制(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)将外部扰动和模型不确定性视为总扰动进行实时估计和补偿,进而利用径向基函数神经网络在线辨识被控对象的 Jacobian 信息,建立基于梯度下降的控制器增益在线自适应更新。基于离散 Lyapunov 理论,证明了闭环系统的稳定性与参数收敛性。在激光跟踪测量系统上的实验结果表明,与传统 LADRC 相比,RBF-LADRC 控制系统参数可随工况动态调整,带宽提升约 12%,调节时间缩短约 32%,激光轨迹跟踪均方根误差减小约 16%。RBF-LADRC 方法无需精确系统模型,有效提升了激光跟踪测量系统的动态性能与控制精度,具有良好的工程实用性。

**关键词:**激光跟踪测量;扰动抑制;线性自抗扰控制;径向基函数神经网络

**中图分类号:**TP273;TN29 **文献标识码:**A

**doi:**10.37188/OPE.20263407.1097

**CSTR:**32169.14.OPE.20263407.1097

## Linear active disturbance rejection control for laser tracking measurement system

CHEN Zongliang<sup>1</sup>, WU Tengfei<sup>1\*</sup>, YANG Xinrui<sup>1</sup>, CHEN Yilin<sup>1</sup>, CHEN Xinzhuo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,

Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Erzhong (Deyang) Heavy Equipment Co., Ltd., Deyang 618000, China)

\* Corresponding author, E-mail: wtf@tju.edu.cn

**Abstract:** Laser tracking measurement systems frequently operate under complex disturbances, including nonlinear friction and inter-axis coupling, which induce response delays and degrade control accuracy. To address these issues, a radial basis function neural network-optimized linear active disturbance rejection control (RBF-LADRC) method is proposed. In this approach, external disturbances and model uncertainties are aggregated as a total disturbance within the LADRC framework. A linear extended state observer is employed to estimate this total disturbance in real time and compensate for it online. Furthermore, a radial basis function neural network is introduced to identify the Jacobian of the controlled plant online. Based on the identified Jacobian, a gradient descent algorithm is constructed to enable adaptive updating of

收稿日期:2025-12-29;修订日期:2026-02-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52127810, No. 52275539)

controller gains. The stability and parameter convergence of the closed-loop system are established using discrete Lyapunov theory. Experimental validation on a laser tracking measurement system demonstrates that, compared with conventional LADRC, the proposed method enables dynamic adaptation of controller parameters to varying operating conditions. The system bandwidth is increased by approximately 12%, the settling time is reduced by about 32%, and the root mean square tracking error of the laser trajectory is decreased by approximately 16%. The proposed RBF-LADRC method does not rely on an accurate system model and effectively enhances both dynamic performance and control precision, indicating strong potential for engineering applications.

**Key words:** laser tracking measurement; disturbance rejection; linear active disturbance rejection control; radial basis function neural network

## 1 引言

激光跟踪测量系统作为一种面向大尺寸、高精度测量的空间坐标测量系统,已广泛应用于航空航天、汽车研发及船舶制造等大尺寸高端制造场景<sup>[1-6]</sup>。二维激光跟踪转台作为核心执行机构,其伺服控制的动态与稳态性能直接决定系统的动态跟踪性能和空间坐标测量精度<sup>[7]</sup>。以国际主流激光跟踪仪为例,Leica AT960的最大跟踪速度可达 6 m/s,加速度达 180 m/s<sup>2</sup>,角精度为 15 μm+6 μm/m;Faro Vantage 系列最大角速度达到 180 (°)/s,角加速度达 860 (°)/s<sup>2</sup>,角精度为 20 μm+5 μm/m。不同于一般精密定位伺服系统,激光跟踪系统的动态性能直接受限于光学系统的通光口径。当动态跟踪误差超过光学接收范围时,反射光斑将脱离探测器视场,导致闭环反馈信号丢失,系统脱靶。因此,控制系统必须在高加速度运动阶段具备足够高的闭环带宽与扰动抑制能力,以保证动态误差始终受限于光学容差范围内。与此同时,在稳态测量阶段,系统需降低带宽以抑制编码器量化噪声与结构微振动,实现亚角秒级稳定误差。然而,实际运行过程中二维转台不可避免地面临轴间动力学耦合<sup>[8]</sup>、传动链非线性摩擦<sup>[9]</sup>、结构弹性形变以及电气设备非理想动态特性<sup>[10]</sup>等复杂扰动。这些扰动具有明显的非线性与时变特征,难以通过精确的数学模型完整描述,给高精度控制带来了巨大挑战。

针对激光跟踪测量系统的控制问题,研究人员提出了多种控制策略,典型方法包括 PID 控制、模糊控制<sup>[11]</sup>以及自抗扰控制<sup>[12]</sup>(Active Dis-

turbance Rejection Control, ADRC)等。PID 控制因其结构简单、工程实现成熟,广泛应用于工业控制领域<sup>[13]</sup>,但其控制性能对系统参数变化敏感,抗扰性能有限<sup>[14]</sup>。模糊控制通过引入基于经验规则的非线性控制策略,在不依赖精确数学模型的情况下具有一定的稳定性,但其规则库设计依赖专家经验,调试工作量大且理论分析复杂<sup>[15]</sup>。ADRC 方法通过引入扩张状态观测器实现系统内部不确定性和外部扰动的实时估计与补偿<sup>[16-17]</sup>,显著提升了系统的抗扰能力<sup>[18]</sup>,但其结构复杂,参数整定困难。为降低 ADRC 的工程实现难度,线性自抗扰控制(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)通过线性化设计和带宽参数简化了参数整定过程<sup>[19]</sup>。

固定参数的 LADRC 难以根据运行状态变化实时调整控制带宽,在高速轨迹跟踪与高精度稳态定位之间仍存在性能折衷。因此,实现控制器参数的在线自适应调节,是进一步提升系统综合性能的关键。近年来,径向基函数神经网络(Radial Basis Function Neural Network, RBF-NN)因具有良好的非线性逼近能力,广泛用于 ADRC 或 LADRC 参数自适应优化。目前,已有研究从不同层面探索了神经网络辅助参数整定的方法,包括对 ADRC 全部参数进行自适应优化以提升控制灵活性<sup>[20]</sup>,对 ADRC 部分关键控制参数开展自适应优化以降低算法复杂度<sup>[21-22]</sup>,以及结合 RBF-NN 与 LADRC,在简化结构的同时引入一定的参数自适应能力<sup>[23-25]</sup>。上述研究方法侧重于稳态定位或单一工况优化,对于连续高速轨迹跟踪场景下“防脱靶”与“稳态高精度”的协同优化问题仍研究不足。

本文提出了一种基于RBF-NN优化的线性自抗扰控制(RBF-LADRC)方法。通过RBF-NN在线辨识并提取模型 Jacobian 信息,以此构建基于梯度下降的LADRC带宽自适应调节机制。该机制能够根据系统实时运行状态动态寻优控制参数,一定程度上缓解了高带宽引入噪声与低带宽导致滞后之间的矛盾。为验证算法的工程实用价值,本文在自主研制的二维激光跟踪系统实验平台上完成了算法的嵌入式部署,并通过一系列响应测试与连续动态轨迹跟踪实验,从时域响应、频域带宽及抗扰性能等多个维度全面评估了控制系统性能。实验结果表明,所提方法在不降低稳态精度的前提下降低了动态峰值误差,提高了高速跟踪阶段的安全裕度。

## 2 激光跟踪系统控制模型

### 2.1 激光跟踪系统工作原理

激光跟踪测量系统由激光测距模块、二维跟踪转台及伺服控制器等关键部件组成。其中,二维跟踪转台通过方位轴与俯仰轴的协调运动实现对目标的动态跟踪与角度调节,是系统的核心执行机构<sup>[26]</sup>。

激光跟踪测量系统属于随动系统,其二维

跟踪转台作为光束引导机构构成随动部分,目标反射镜作为主动部分,其工作原理如图 1 所示。激光经分光棱镜分光后由平面反射镜反射至目标反射镜,目标反射镜将光束平行回射,经由分光棱镜反射后进入位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)。系统整体采用双闭环控制结构,控制框图如图 2 所示。内环通过角度编码器负反馈实现对二维转台角度的精确控制,外环基于 PSD 探测的光斑位置进行闭环负反馈,通过调节二维转台的角度,使得平面镜改变光束出射方向,从而使激光始终保持在目标反射镜中心,以实现激光对目标反射镜的动态跟踪。

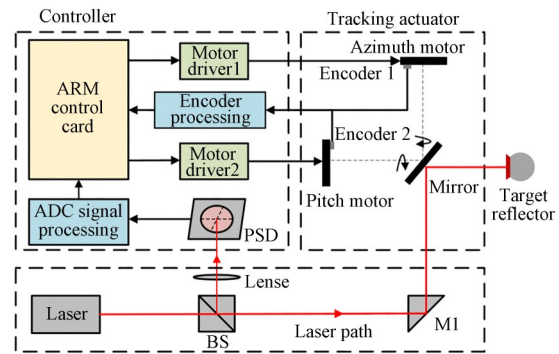


图 1 激光跟踪测量系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of laser tracking measuring system

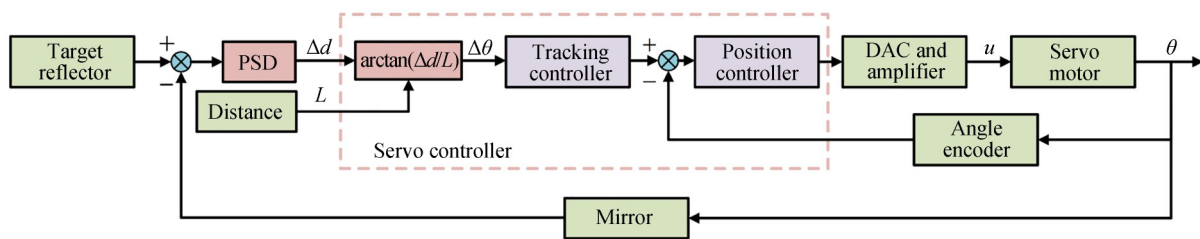


图 2 激光跟踪控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of laser tracking control system

### 2.2 二维转台系统建模

激光跟踪测量系统的二维转台采用两轴正交结构,由音圈电机直接驱动,如图 3 所示。相较于传统齿轮减速传动结构,直驱方案消除了回差与传动间隙,提高了系统的响应带宽与定位精度。然而,由于缺乏机械减速机构所提供的增扭与结构阻尼作用,负载侧的微小力矩扰动会直接作用于电机轴,使系统对外部扰动和参数摄动更

加敏感,这对控制系统的动态性能与抗扰能力提出更高要求。

基于电枢回路电压平衡方程与机械力矩平衡方程,单轴(以方位轴为例)的机电耦合动态数学模型可描述为:

$$\begin{cases} u = iR + L \frac{di}{dt} + k_e \dot{\theta} \\ J\ddot{\theta} = k_t i - k\dot{\theta} - c\theta + d \end{cases}, \quad (1)$$

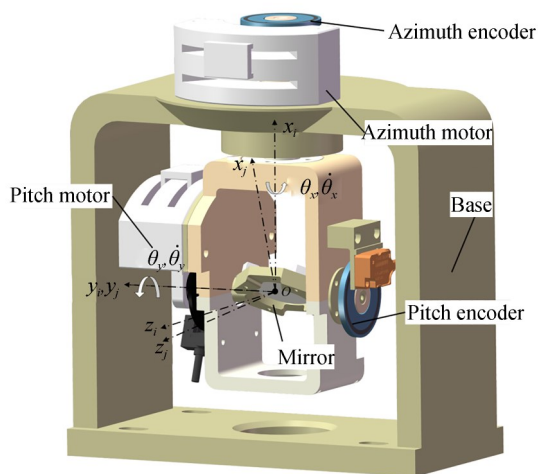


图 3 二维转台结构

Fig. 3 Structure of two-dimensional turntable

其中:  $u$  为电枢电压,  $i$  为电枢电流,  $\theta$  为电机角度,  $R, L$  分别为等效电阻与电感,  $k_e, k_t$  分别为反电动势常数与力矩常数,  $J$  为等效转动惯量(含负载),  $k$  为摩擦系数,  $c$  为线缆及结构的等效弹性系数,  $d$  为系统所受的其他未建模动态, 包括 Stribeck 效应、轴间耦合力矩等扰动项。

定义  $y = \theta$ ,  $u = u$  分别为单轴系统的输出和输入, 系统状态变量  $x = [\theta, \dot{\theta}, i]^T$ , 系统的状态空间方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = (k_t x_3 - k x_2 - c x_1 + d)/J \\ \dot{x}_3 = (u - k_e x_2 - R x_3)/L \end{cases} \quad (2)$$

单轴状态空间描述整理如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ed \\ y = Cx \end{cases}, \quad (3)$$

其中:

$$A = \frac{1}{JL} \begin{bmatrix} 0 & JL & 0 \\ -cL & -kL & k_t L \\ 0 & -Jk_e & -JR \end{bmatrix},$$

$$B = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, E = [0, 1, 0]^T, C = [1, 0, 0].$$

在高精度轨迹控制任务中, 激光跟踪测量系统面临以下复杂的工程影响因素: 低速阶段, 直驱结构更易受到非线性摩擦影响, Stribeck 效应导致摩擦力矩随速度呈强非线性变化, 易引发爬行现象并降低微小位移跟踪精度。二维转台运动过程中, 线缆弯曲产生的弹性恢复力矩及轴间

耦合力矩均呈现明显时变特性, 其动态行为难以通过精确模型完全描述。此外, 电机线圈温升引起的电阻与力矩常数变化进一步增强系统参数的不确定性。

在上述扰动与参数摄动的共同作用下, 系统动态响应速度与稳态精度之间呈现显著权衡关系。高速轨迹跟踪阶段需要提高控制带宽以减小相位滞后与跟踪误差, 而稳态阶段过高控制增益又可能放大测量噪声并引发超调或振荡。传统 LADRC 控制器增益固定, 难以根据实时运行工况实现动态匹配。因此, 在保持扰动估计能力的前提下, 实现控制增益的在线调节, 使系统在不同运行阶段获得最优动态与稳态性能匹配。基于此, 本文引入径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络对控制增益进行自适应优化, 以提升系统对复杂工况的适应能力。

### 3 RBF-LADRC 控制器设计

为提升激光跟踪测量系统在强扰动与模型不确定性环境下的控制性能, 本文在传统 LADRC 的基础上, 引入 RBF-NN 对关键控制参数进行在线优化, 构建了一种具有自适应能力的稳定控制器结构。该方法在无需精确建模的前提下, 有效提高了系统的抗扰能力与动态响应性能。

#### 3.1 控制方法

LADRC 基于线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observer, LESO)实现总扰动估计, 通过线性状态误差反馈控制律(Linear State Error Feedback, LSEF)进行动态补偿控制。其核心思想是将模型中未知部分统一视为“集总扰动”, 先通过 LESO 在线估计扰动, 再采用 LSEF 对扰动进行动态补偿。

在实际应用中, 传统 LADRC 虽然具有良好的稳定性, 但其性能高度依赖 ESO 带宽  $\omega_o$  和控制增益参数  $b_0$ , 不同运行工况下难以同时兼顾稳定性与响应速度, 往往存在响应滞后或超调量增加等问题。为解决这一问题, 基于 RBF-NN 的在线非线性映射能力, 对 LADRC 的关键参数进行自适应调整, 以实现动态环境下的自适应性能匹配, 其控制结构框图如图 4 所示。

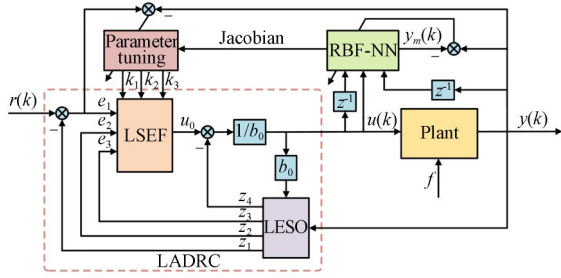


图 4 RBF-LADRC 结构框图

Fig. 4 Structural block diagram of RBF-LADRC

### 3.2 LADRC 控制器设计

从式(1)可以看出,系统的原始状态方程并不具备直接构建 LESO 所需的标准形式,需要设计一个适当的线性变换进行重构。定义新的线性变换如下:  $\tilde{x}_1 = x_1 = y, \tilde{x}_2 = \dot{x}_1, \tilde{x}_3 = (k_1 x_3 - k_2 \dot{x}_1 - c x_1 + d)/J$ , 将新的状态变量定义为  $\tilde{x} = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, f]^T$ , 系统状态空间方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_3 \\ \dot{\tilde{x}}_3 = f + b_0 u \\ y = \tilde{x}_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $b_0 = k/JL$  为系统的等效增益,  $f$  为作用于系统的等效总扰动,即:

$$f = -\left[\frac{R}{L} + \frac{k}{J}\right] \tilde{x}_3 - \left[\frac{k_1 k_e}{JL} + \frac{kR}{JL} + \frac{c}{J}\right] \tilde{x}_2 - \frac{cR}{JL} \tilde{x}_1 + \frac{R}{JL} d + \frac{\dot{d}}{J} \quad (5)$$

构建 LESO 如下:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 (y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2 (y - z_1) \\ \dot{z}_3 = z_4 + \beta_3 (y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_4 = \beta_4 (y - z_1) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $z = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]^T$  为观测器的状态向量,  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, f$  分别由  $z_1, z_2, z_3, z_4$  进行估计,  $L = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \beta_4]^T$  为观测器增益矩阵, 选取  $L = [4\omega_0 \ 6\omega_0^2 \ 4\omega_0^3 \ \omega_0^4]^T$ , 使得观测器极点位于同一位置, 从而实现统一带宽控制, LESO 的设计简洁且参数整定明确。

定义  $K = [k_1, k_2, k_3]^T$  为控制器增益矩阵,  $k_1 = \omega_c^3, k_2 = 3\omega_c^2, k_3 = 3\omega_c$ , 则 LSEF 可以表

示为:

$$\begin{cases} u = \frac{1}{b_0} (u_0 - z_4), u_0 = k_1 e_1 + k_2 e_3 + k_3 e_3 \\ e_1 = r - z_1, e_2 = -z_2, e_3 = -z_3 \end{cases} \quad (7)$$

### 3.3 RBF 网络设计

RBF 是一类用于描述输入与中心距离关系的局部基函数, 将它作为神经网络隐藏层的激活函数即可构成 RBF-NN。RBF-NN 由输入层、隐藏层和输出层构成, 如图 5 所示。

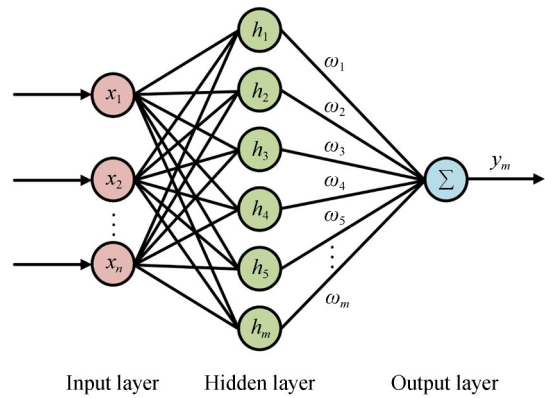


图 5 RBF 神经网络结构

Fig. 5 Structure of RBF-NN

隐含层采用标准高斯函数, 其定义如下:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|X - C_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

其中:  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  表示输入向量,  $C_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jm}]$  表示第  $j$  个节点的中心向量,  $b_j$  表示第  $j$  个节点的基宽向量。

从隐藏层到输出层的映射如下:

$$y_m = W^T H = \omega_1 h_1 + \omega_2 h_2 + \dots + \omega_m h_m, \quad (9)$$

其中:  $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]^T$  表示权重向量,  $H = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T$  表示基函数向量。

利用 RBF-NN 对 LADRC 的控制增益  $k_1, k_2, k_3$  进行在线自适应调整, RBF-NN 通过在线辨识不断修改自身网络参数, 提供自身 Jacobian 信息以修正 LSEF 控制增益, 实现自适应调整。RBF 网络的输入向量为  $X = [u(k), u(k-1), y(k-1)]$ 。

RBF 网络评价函数定义如下:

$$E_1(k) = \frac{1}{2} (y(k) - y_m(k))^2, \quad (10)$$

其中:  $y(k)$  是真实系统输出,  $y_m(k)$  是 RBF-NN 的输出。

为提高 RBF 节点分布的均匀性, 采用 K-Means 聚类算法对输入样本进行聚类, 并将每个簇的中心作为中心向量  $C_j$ 。根据聚类结果, 将每个簇的样本到中心的距离作为对应节点的基宽向量  $b_j$ 。权重参数  $W$  采用梯度下降法进行修正, 其迭代算法如下:

$$\begin{cases} \Delta\omega_j(k) = \frac{\partial E_1(k)}{\partial\omega_j(k)} \\ \omega_j(k+1) = \omega_j(k) - \eta_1 \Delta\omega_j(k) \end{cases}, \quad (11)$$

其中  $\eta_1$  是权重学习率。

RBF-NN 输出的 Jacobian 信息如下:

$$J_u(k) = \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}. \quad (12)$$

为了修正 LADRC 中 LSEF 中的控制增益, 选取评价函数如下:

$$E_2(k) = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2, \quad (13)$$

其中:  $r(k)$  为系统输入,  $y(k)$  为系统输出。

基于梯度下降法, 控制增益的自适应更新率为:

$$\begin{cases} \Delta k_i(k) = \frac{\partial E_2(k)}{\partial k_i(k)} \\ k_i(k+1) = k_i(k) - \eta_2 \Delta k_i(k) \end{cases}, \quad (14)$$

其中:  $i = 1, 2, 3$ ,  $\eta_2$  是自适应增益学习率。

### 3.4 RBF-LADRC 系统闭环稳定性分析

为了分析引入 RBF 自适应增益调节机制后闭环系统的稳定性, 基于离散时间 Lyapunov 理论对 RBF 在线辨识回路与控制器增益自适应回路分别进行了有界性与收敛性分析。在分析过程中, 假设被控对象及外部扰动在工程可实现范围内有界, 且采样周期固定。

针对上节设计的 RBF 神经网络, 定义辨识误差为  $e_m(k) = y(k) - y_m(k)$ , 构造辨识误差 Lyapunov 函数:

$$V_1(k) = \frac{1}{2} e_m^2(k). \quad (15)$$

权值更新律向量为:

$$W(k+1) = W(k) - \eta_1 \frac{\partial V_1}{\partial W}. \quad (16)$$

利用链式法则展开梯度项, 可得:

$$\frac{\partial V_1}{\partial W} = \frac{\partial V_1}{\partial e_m} \cdot \frac{\partial e_m}{\partial W} = e_m(k) \frac{\partial e_m}{\partial W}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial e_m}{\partial W} = \frac{\partial e_m}{\partial y_m} \cdot \frac{\partial y_m}{\partial W} = -H(k). \quad (18)$$

式(16)代入式(17)和式(18), 可得:

$$\Delta W(k) = \eta_1 e_m(k) H(k). \quad (19)$$

为分析误差收敛性, 将下一时刻辨识误差在当前权值处进行一阶泰勒展开:

$$e_m(k+1) \approx e_m(k) + \left[ \frac{\partial e_m(k)}{\partial W} \right]^T \Delta W(k). \quad (20)$$

代入式(18)和式(19), 整理可得:

$$e_m(k+1) \approx e_m [1 - \eta_1 \|H(k)\|^2]. \quad (21)$$

因此, 只要学习率满足:

$$0 < \eta_1 < 1 / \|H(k)\|^2. \quad (22)$$

则误差序列在局部邻域内具有压缩特性, 即:

$$|e_m(k+1)| < |e_m(k)|. \quad (23)$$

在此条件下, 辨识误差序列一致有界, 并趋于稳定邻域; 同时, RBF 网络权值向量  $W(k)$  保持有界, 从而保证网络输出及其导出的 Jacobian 估计信息  $J_u(k)$  的有界性。

在辨识回路有界的前提下, 进一步分析控制器增益更新机制对闭环系统稳定性的影响。

定义系统跟踪误差为  $e(k) = r(k) - y(k)$ , 构造 Lyapunov 函数:

$$V_2(k) = \frac{1}{2} e^2(k). \quad (24)$$

根据链式法则, 有下式:

$$\frac{\partial V_2}{\partial K} = \frac{\partial V_2}{\partial e} \cdot \frac{\partial e}{\partial K} = e(k) \frac{\partial e}{\partial K}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial e}{\partial K} = \frac{\partial e}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial K} = -J_u(k) \frac{\partial u}{\partial K}. \quad (26)$$

令  $G(k) = J_u(k) \frac{\partial u}{\partial K}$  表示系统广义梯度向量, 控制器增益向量  $K$  更新律如下:

$$\Delta K(k) = \eta_2 e(k) G(k). \quad (27)$$

同样对下一时刻误差在当前增益处进行一阶泰勒展开:

$$e(k+1) \approx e(k) + \left[ \frac{\partial e}{\partial K} \right]^T \Delta K. \quad (28)$$

代入式(26)和式(27),可得:

$$e(k+1) \approx e(k)[1 - \eta_2 \|G(k)\|^2]. \quad (29)$$

因此,当学习率满足:

$$0 < \eta_2 < 2/\|G(k)\|^2. \quad (30)$$

则误差序列在小邻域内具有压缩特性,即 Lyapunov 函数满足:

$$V_2(k+1) < V_2(k). \quad (31)$$

在上述条件下,系统跟踪误差保持一致有界。

实际工程应用中,被控对象不可避免地存在未建模动态、参数摄动以及量化噪声等不确定因素,因此,仅从理想模型角度分析误差收敛性仍不足以说明整体闭环系统的稳定性。为提高算法的工程稳定性,在控制器实现过程中引入了增益饱和约束机制,将自适应更新的控制器参数限制在名义设计值附近的有限区间内(实验中设定为  $\pm 30\%$ )。该约束机制从结构上保证了参数向量在整个运行过程中始终保持有界,从而避免了由于学习率选取不当或瞬时误差放大所引起的参数漂移现象。

由于在学习率满足收敛边界条件时,RBF 网络辨识误差序列保持一致有界,网络权值向量亦保持有界,因此由网络输出获得的系统 Jacobian 信息为有界信号。在此基础上,控制器增益更新

律在梯度方向上进行有界调节,其参数演化过程受限于饱和约束,同样保持一致有界。

进一步结合 LADRC 结构本身对总扰动的在线估计与补偿能力,可以得到如下结论:在外部扰动及参考输入信号均为有界的条件下,闭环系统的内部状态变量、控制输入以及输出信号均保持有界,从而满足有界输入、有界输出的稳定性要求。

上述分析说明,在合理选取学习率及参数约束范围的条件下,RBF-LADRC 控制结构在工程可实现范围内具有良好的稳定性,为后续参数整定提供了理论依据。

## 4 仿真与实验验证

### 4.1 实验平台与测试

为验证所提出 RBF-LADRC 控制算法在激光跟踪测量系统中的动态性能、稳态精度及扰动抑制能力,在完成 Simulink 仿真验证的基础上,搭建实际激光跟踪测量系统实验平台进行对比实验研究。通过频域带宽测试、扰动抑制测试、阶跃响应测试以及动态轨迹跟踪测试,从时域与频域多个维度对控制系统性能进行综合评估,并分别与传统 PID 控制与固定参数 LADRC 控制方法进行对比分析。Simulink 搭建的 3 种算法的仿真模型如图 6 所示,模型包含 3 种控制器通道与相同的被

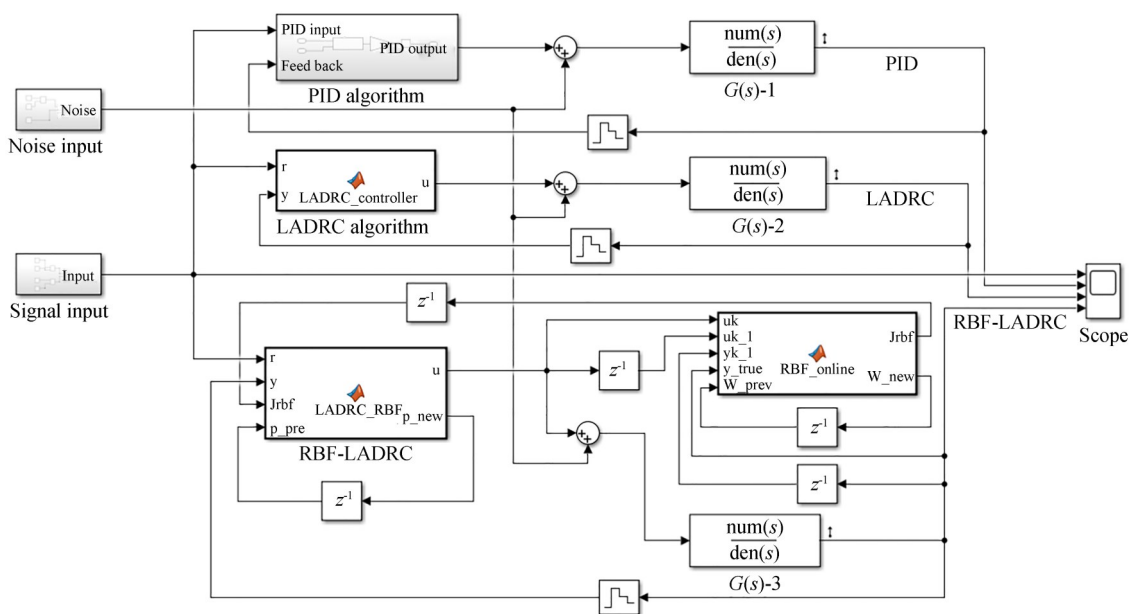


图 6 Simulink 仿真模型

Fig. 6 Simulation model based on Simulink

控对象传递函数。实验平台如图 7 所示,实验中  
将二维转台的方位轴定义为 X 轴,俯仰轴定义为  
Y 轴,所有控制算法均部署于同一硬件平台运行,  
实验数据由控制系统实时采集并记录。

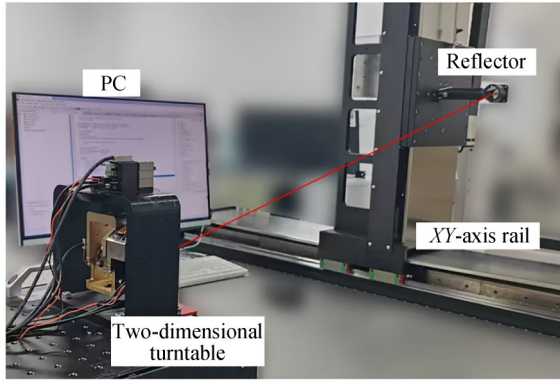


图 7 激光跟踪系统实验平台

Fig. 7 Experimental platform of laser tracking system

实验对象为双轴正交结构二维转台系统,执行机构采用 TMER0028-045-00A 型旋转音圈电机,由线性功率放大器驱动。方位轴与俯仰轴的等效转动惯量分别为  $8.0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  与  $2.7 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。角位置检测采用 Renishaw ATOM 系列圆光栅编码器,码盘刻线数为 4 096 线,配合 400 倍细分接口盒后系统角分辨率约为  $0.8''$ 。实验平台关键机电参数汇总如表 1 所示。核心控制器基于 Xilinx ZYNQ-7035 SoC 平台,ARM Cortex-A9 主频 666 MHz。为满足高动态伺服控制需

表 1 实验平台关键参数

Tab. 1 Key parameters of experimental platform

参 数	数值	单位
直流电阻( $R$ )	11.7	$\Omega$
电枢电感( $L$ )	2.0	mH
力矩常数( $k_t$ )	0.17	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$
反电动势常数( $k_e$ )	0.17	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$
工作行程	$\pm 22.5$	( $^\circ$ )
X 轴等效转动惯量( $J_x$ )	$8.0 \times 10^{-4}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Y 轴等效转动惯量( $J_y$ )	$2.7 \times 10^{-5}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
编码器分辨率	0.8	( $''$ )

求,系统采样周期设定为  $100 \mu\text{s}$ ,对应采样频率 10 kHz。基础 LADRC 参数采用带宽参数化方法整定。考虑两轴负载惯量差异,设定 X 轴控制器带

宽为  $\omega_{cx}=100 \text{ rad/s}$ ,观测器带宽为  $\omega_{ox}=300 \text{ rad/s}$ ; Y 轴控制器带宽为  $\omega_{cy}=300 \text{ rad/s}$ ,观测器带宽为  $\omega_{oy}=1\ 000 \text{ rad/s}$ 。上述参数保证系统在无自适应补偿条件下具备良好的基础闭环稳定性与动态响应能力,作为 RBF 自适应优化的名义基准。

在 RBF 网络结构设计方面,对隐含层节点数  $M$  分别取 9, 12, 15 进行对比实验。在相同采样周期条件下,统计单周期计算时间分别为 47.1, 57.4 和 69.6  $\mu\text{s}$ 。当节点数过少时,网络非线性逼近能力受限,而节点数过多则显著增加单周期计算负担并压缩系统调度裕量。综合考虑计算资源约束与映射能力,最终选取 12 个节点结构。

网络初始中心向量通过对离线采集样本进行 K-means 聚类获得,聚类中心作为径向基函数中心  $C_j$ 。基宽参数  $b_j$  根据聚类中心之间的平均欧氏距离统一设定,以保证输入空间覆盖的均匀性与适度重叠性。

自适应律采用梯度更新机制。RBF 权值学习率  $\eta_1$  通过 0.001 至 0.05 范围内扫描确定,最终选取  $\eta_1=0.01$ ;控制增益学习率  $\eta_2$  在 0.000 1 至 0.01 范围内测试后选取  $\eta_2=0.001$ 。为避免在线调整过程中出现增益漂移导致闭环振荡,对控制器的关键增益参数  $k_1, k_2, k_3$  设置基于名义值  $\pm 30\%$  的饱和约束,以增强闭环稳定性。

为量化实时实现代价,采用 ARM 全局高精度计时器对控制更新函数进行多次测量并取平均值,测试结果如表 2 所示。基础 I/O 读写耗时约  $10.2 \mu\text{s}$ ,PID 算法单周期总耗时为  $10.8 \mu\text{s}$ ,LADRC 为  $11.8 \mu\text{s}$ ;RBF-LADRC 为  $57.4 \mu\text{s}$ ,占采样周期的 57.4%,在  $100 \mu\text{s}$  控制周期内仍保留约 42.6% 的算力裕量,满足硬实时控制要求。

实验平台测试过程中,频域带宽测试通过在指令输入端施加幅值为 10 000 编码器脉冲 ( $8\ 000''$ ) 的正弦扫频信号获得闭环频率响应。扰

表 2 控制算法单周期的计算耗时

Tab. 2 Computation time of control algorithms per cycle

测试项目	基础 I/O 读写/ $\mu\text{s}$	算法运 算增量/ $\mu\text{s}$	单周期 总耗时/ $\mu\text{s}$	CPU 占 用率/ %
PID	10.2	0.6	10.8	10.8
LADRC	10.2	1.6	11.8	11.8
RBF-LADRC	10.2	47.4	57.4	57.4

动抑制性能测试通过在控制器电压输出端注入 1 V 的正弦扫频电压信号实现作为扰动信号,并测量系统输出响应。阶跃响应测试以 10 000 编码器脉冲(8 000")为阶跃幅值。以调节时间、超调量和稳态误差作为动态性能评价指标,调节时间以 ±0.5% 误差带为标准,稳态误差采用系统进入稳态后最后  $N$  个采样点误差的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)进行评价,即:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=T_{end}-N+1}^{T_{end}} (r(k) - y(k))^2}, \quad (32)$$

其中: $r(k)$ 为参考输入, $y(k)$ 为系统实际输出, $T_{end}$ 为采样结束时刻。

动态轨迹跟踪测试通过直线导轨生成连续变化参考轨迹,并采用 RMSE 作为性能评价指标,其公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (x(k) - y(k))^2}, \quad (33)$$

其中: $x(k)$ 为导轨参考轨迹, $y(k)$ 为系统实际输出, $M$ 为测试采样点数。

仿真数据从 Simulink 平台导出,模型内部变量采用弧度表示。相关实验数据均按照编码器分辨率换算为角秒单位进行统计与绘图。

### 4.2 带宽测试

仿真测试中输入信号设置为幅值 1 rad、频率为 0.1~100 Hz 的正弦扫频信号,通过测量系统的输入与输出得到频率特性曲线,如图 8 所示。

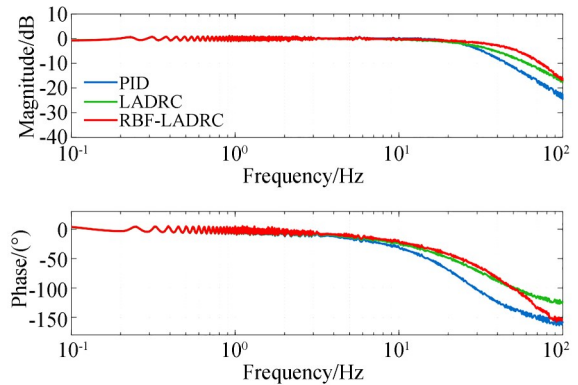


图 8 仿真频率特性曲线

Fig. 8 Frequency characteristic curves of simulation

仿真结果表明,RBF-LADRC 的带宽约 43.5 Hz,相比于 LADRC (30.5 Hz) 提升约 42.6%,相比于 PID(27.0 Hz)提升约 61.1%。

在实验平台带宽测试中输入信号为幅值 10 000 编码器脉冲(8 000")、频率为 0.1~100 Hz 的正弦扫频信号,得到的频率特性曲线如图 9 所示。

从图 9 (a) 与图 9 (b) 可以看出,RBF-LADRC,LADRC,PID 的 X 轴带宽分别为 14.5, 13 和 4.5 Hz,RBF-LADRC 相比于 LADRC 带宽提升了约 12%,相比于 PID 带宽提升约 222%;Y 轴带宽分别为 36,32 和 15 Hz,RBF-LADRC 相比于 LADRC 带宽提升了约 13%,相比于 PID 带宽提升约 140%。总体上看,RBF-LADRC 在实验中表现出更高的闭环带宽。

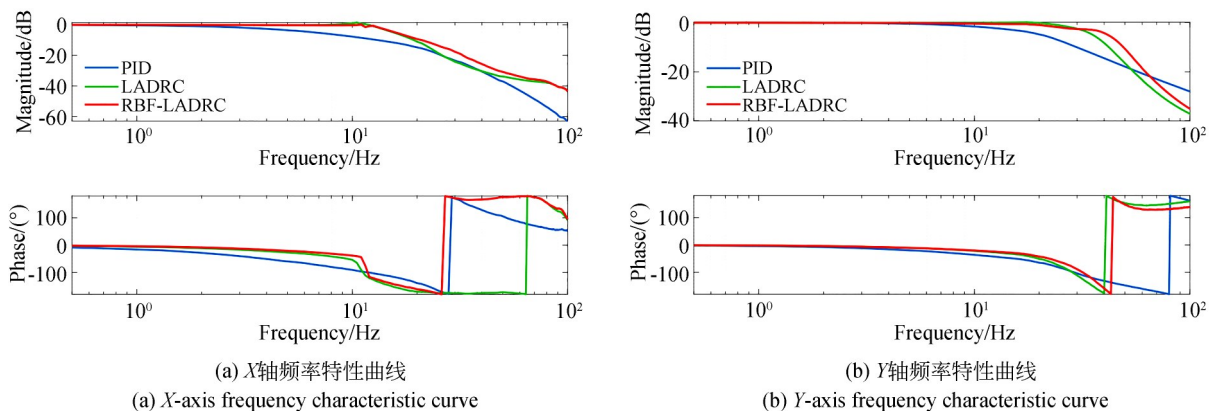


图 9 频率特性曲线

Fig. 9 Frequency characteristic curves

### 4.3 抗扰性能测试

在仿真测试中,向模型输出端注入幅值 1 V

的正弦扫频信号、频率为 0.1~100 Hz,得到系统的抗扰频率特性如图 10 所示。在全频段下 RBF-

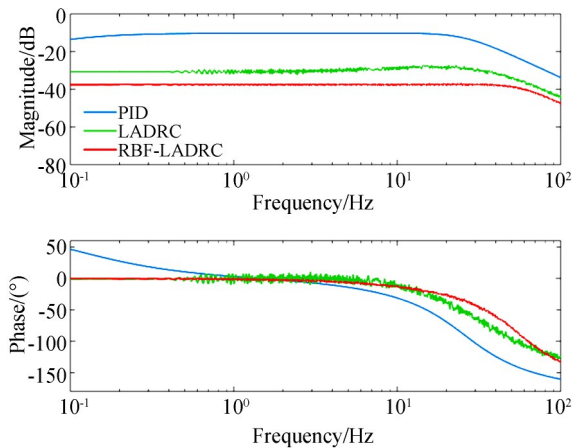


图 10 仿真抗扰频率特性

Fig. 10 Anti-disturbance frequency characteristic of simulation

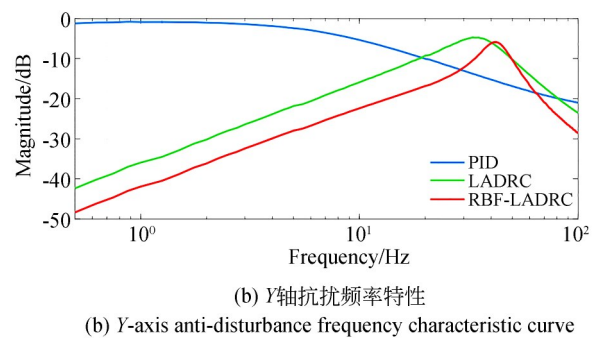
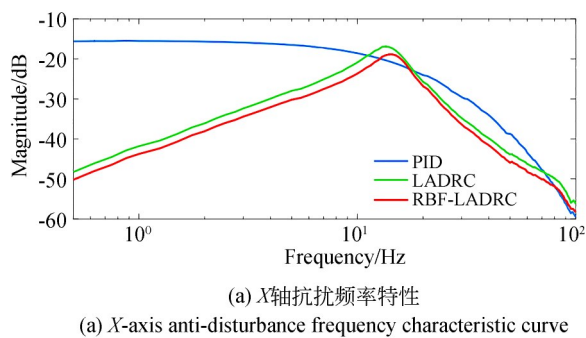


图 11 抗扰频率特性曲线

Fig. 11 Anti-disturbance frequency characteristic curves

#### 4.4 阶跃响应测试

仿真测试中阶跃信号幅值为 1 rad,阶跃响应结果如图 12 所示。仿真结果表明,RBF-LADRC

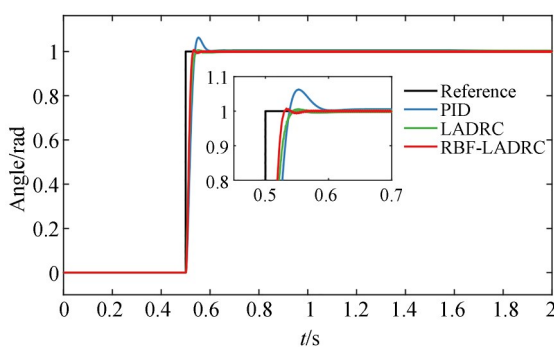


图 12 仿真阶跃响应曲线

Fig. 12 Step response curves of simulation

LADRC 均表现出优异的扰动抑制性能;在 10 Hz 处,相较于 LADRC 的衰减提升约 6 dB,相较于 PID 提升约 27 dB。

在实验测试中,向控制器输出端注入幅值 1 V、频率为 0.1~100 Hz 的正弦扰动信号,得到系统的抗扰频率特性如图 11 所示。X 轴测试结果显示,RBF-LADRC 在 1 Hz 处与 LADRC 相比,扰动抑制能力提升约 2 dB,与 PID 相比,扰动抑制能力提升约 25 dB。Y 轴测试结果显示,RBF-LADRC 在 1 Hz 处与 LADRC 相比扰动抑制能力提升约 6 dB,与 PID 相比扰动抑制能力提升约 35 dB。从图中可以看出,在中低频段 RBF-LADRC 具有更强的抗扰能力,输出幅值显著低于其他方法,PID 在低频段对噪声输入基本没有抑制效果。

在相同系统条件下表现出更优的动态性能:与 PID 控制相比,其超调量显著减小;与 LADRC 相比,其调节时间进一步缩短,系统响应更为迅速和平稳。

实验平台阶跃响应幅值为 10 000 编码器脉冲(8 000"),测试结果如图 13 所示,各算法的时域性能指标如表 3 所示。X 轴测试结果显示,RBF-LADRC 相比于 LADRC 调节时间减小约 32%,超调量减小约 99%,稳态误差减小约 11%,稳态 RMSE 减小约 13%;相比于 PID 调节时间减小约 78%,超调量减小约 98%,稳态误差减小约 74%,稳态 RMSE 减小约 71%。实验表明,RBF-LADRC 算法的调节时间更短,超调量更小,稳态误差更小。

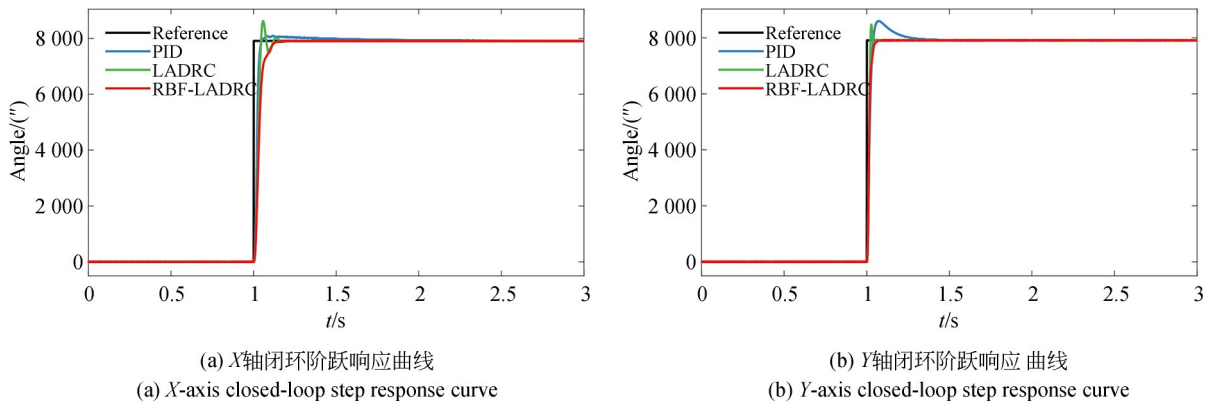


图 13 闭环阶跃响应曲线

Fig. 13 Closed-loop step response curves

表 3 伺服控制系统时域性能

Tab. 3 Time-domain performance of servo control system

控制算法	调节时间/ms		超调量/(%)		稳态误差/(")		稳态误差 RMSE/(")	
	X轴	Y轴	X轴	Y轴	X轴	Y轴	X轴	Y轴
PID	884	339	2.38	8.70	1.88	0.12	2.18	0.30
LADRC	281	93	12.37	12.25	0.54	0.12	0.72	0.31
RBF-LADRC	192	63	0.05	0.02	0.48	0.11	0.63	0.29

#### 4.5 跟踪性能测试

在电机位置控制的基础上加入 PSD 反馈环路,建立双闭环激光跟踪测量系统,进行跟踪性能测试。参考信号选择斜坡信号,仿真结果如图 14 所示。仿真结果表明,RBF-LADRC 与 LADRC,PID 相比,其超调量有一定程度减小,调节时间进一步缩短,系统响应更为迅速和平稳。

在实验平台跟踪实验中,将目标角锥固定在二维导轨平台,使其跟随导轨进行二维直线运动,系统跟踪测试结果如图 15 所示,具体跟踪性能如表 4 所示。实验结果表明,RBF-LADRC 在激光轨迹跟踪测试中表现出更优的动态响应能力与稳态性能,跟踪过程中 X 轴的最大误差相比

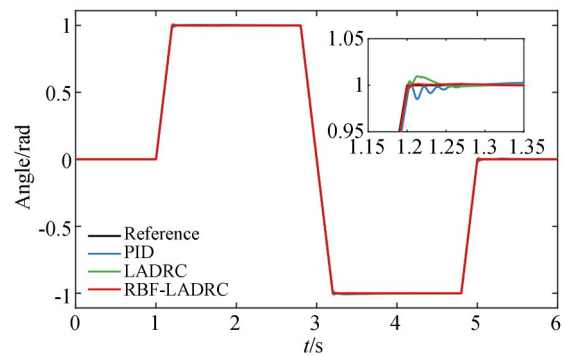


图 14 仿真轨迹跟踪结果

Fig. 14 Trajectory tracking results of simulation

于 LADRC 减小约 20%,相比于 PID 减小约 25%;X 轴的误差 RMSE 相比于 LADRC 减小约

表 4 激光跟踪系统跟踪性能

Tab. 4 Tracking performance of laser tracking system

控制算法	最大误差/(")		误差 RMSE/(")		稳态误差 RMSE/(")	
	X轴	Y轴	X轴	Y轴	X轴	Y轴
PID	50.85	67.04	17.28	21.25	2.65	1.60
LADRC	46.82	54.73	17.17	20.55	1.02	1.75
RBF-LADRC	37.57	44.49	14.42	17.28	0.94	1.44

16%，相比于PID减小约16%；X轴的稳态误差RMSE相比于LADRC减小约8%，相比于PID减小约64%。跟踪过程中Y轴的最大误差相比于LADRC减小约34%，相比于PID减小约

19%；Y轴的误差RMSE相比于LADRC减小约19%，相比于PID减小约16%；Y轴的稳态误差RMSE相比于LADRC减小约17%，相比于PID减小约10%。

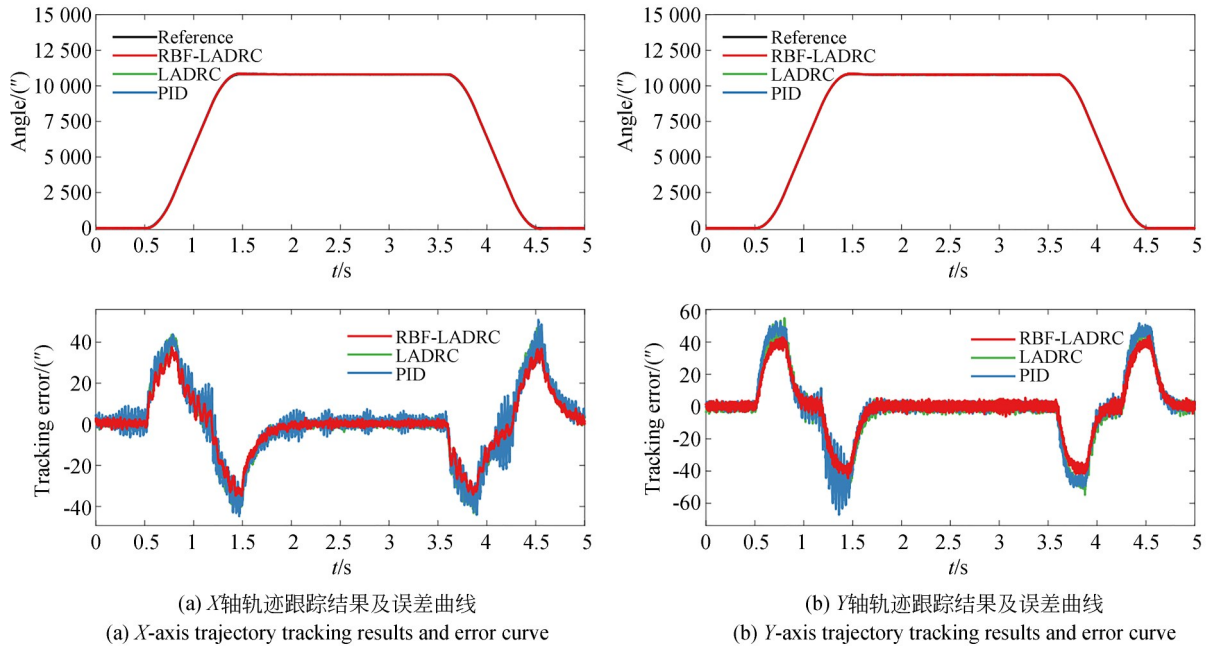


图 15 轨迹跟踪结果及误差曲线

Fig. 15 Trajectory tracking results and error curves

整体而言,RBF-LADRC在跟踪过程中误差更小、响应更快,能够提高激光跟踪测量系统的性能。

## 5 结 论

针对激光跟踪测量系统在复杂扰动环境下存在动态响应滞后与稳态精度难以兼顾的问题,本文提出了RBF-LADRC方法。该方法利用RBF神经网络在线逼近系统非线性特性,并提取模型Jacobian信息构建带宽自适应调节律,实现控制带宽与扰动抑制能力的动态协调。基于离散时间Lyapunov方法对RBF辨识回路及增益自适应回路进行了收敛性分析,给出了学习率选取的稳定性条件,并通过饱和约束保证闭环系统满足有界输入、有界输出稳定性,为算法的工程实现提供了稳定性依据。对算法单周期计算时间进行了量化测试。在 $100\ \mu\text{s}$ 采样周期条件下,RBF-LADRC单周期平均计算时间为 $57.4\ \mu\text{s}$ ,

能够满足 $10\ \text{kHz}$ 实时控制需求,验证了方法在嵌入式平台上的可实现性。实验结果进一步验证了所提方法的性能优势。在阶跃响应实验中,相比传统LADRC控制,X轴调节时间由 $281\ \text{ms}$ 缩短至 $192\ \text{ms}$ ,超调量由 $12.37\%$ 降低至 $0.05\%$ ,稳态误差RMSE由 $0.72''$ 降低至 $0.63''$ ;Y轴调节时间由 $93\ \text{ms}$ 缩短至 $63\ \text{ms}$ ,超调量由 $12.25\%$ 降低至 $0.02\%$ ,稳态误差RMSE由 $0.31''$ 降低至 $0.29''$ 。由此表明,所提方法在保证快速响应的同时有效抑制了超调。在连续轨迹跟踪实验中,X轴稳态误差RMSE由传统LADRC的 $1.02''$ 降低至 $0.94''$ ,最大误差由 $46.82''$ 降低至 $37.57''$ ;Y轴稳态误差RMSE由 $1.75''$ 降低至 $1.44''$ ,最大误差由 $54.73''$ 降低至 $44.49''$ 。上述结果表明,RBF-LADRC方法在复杂运动工况下能够有效提升动态跟踪性能,并改善稳态精度。

综上所述,RBF-LADRC方法在理论分析、实时实现与实验验证3个层面均获得系统性验证,为高精度激光跟踪测量系统伺服控制中的

带宽自适应优化提供了极具工程价值的解决方案。

#### 作者贡献声明:

陈宗亮:控制方法提出,实验设计与数据分

析,论文撰写;

吴腾飞:样机设计与论文修改;

杨忻瑞:实验数据分析;

陈奕霖:实验方案设计;

陈新倬:实验方案论证。

#### 参考文献:

- [1] 陈本永,赵梓辰,裘天峰,等. 远距离目标激光精密跟踪控制系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(21): 335-342.  
CHEN B Y, ZHAO Z CH, QIU T F, *et al.* Design of laser precision tracking control system for long distance target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(21): 335-342. (in Chinese)
- [2] 邱启帆,程智,高豆豆,等. 基于准直激光的跟踪合作目标小范围二维姿态测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 188-196.  
QIU Q F, CHENG ZH, GAO D D, *et al.* Research on the small-range two-dimensional attitude measurement method of tracked cooperative target based on collimating laser [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 188-196. (in Chinese)
- [3] 王宇轩. 基于激光跟踪的大型回转体几何量测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2023.  
WANG Y X. *Research on Measurement Technology of Large-Scale Gyration Based on Laser Tracking* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [4] YAN K, XIONG Z, LAO D B, *et al.* Attitude measurement method based on 2DPSD and monocular vision [C]. *AOPC 2019: Optical Sensing and Imaging Technology*. July 7-9, 2019. Beijing, China. SPIE, 2019: 116.
- [5] 吴斌,许友,杨峰亭,等. 激光跟踪绝对测长多边法三维坐标测量系统[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 130-135.  
WU B, XU Y, YANG F T, *et al.* 3D coordinate measuring system based on laser tracking absolute length measurement multilateral method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 130-135. (in Chinese)
- [6] 程智,董登峰,李洋,等. 激光跟踪仪主动对准式复合传感高精度姿态测量[J]. 光学精密工程, 2025, 33(7): 1007-1018.  
CHENG ZH, DONG D F, LI Y, *et al.* High-precision attitude measurement with active aiming composite sensing for laser tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(7): 1007-1018. (in Chinese)
- [7] 崔宁豪. 双轴跟踪转台伺服控制系统的建模及控制方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.  
CUI N H. *Research on Modeling and Control Method of Servo Control System for Dual-Axis Tracking Turntable* [D]. Hefei: Anhui University, 2020. (in Chinese)
- [8] 崔凯. 二维跟踪转台与卫星平台的动力学耦合技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.  
CUI K. *Study of the Dynamics Coupling Between the Two-Axis Gimbal and the Satellite Bus* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [9] LU M, WANG S Y, ZHENG W, *et al.* Ultra-low speed control strategy for SGCMG gimbal servo system [C]. *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*. May 31-June 2, 2014, Changsha, China. IEEE, 2014: 61-66.
- [10] LI H T, YANG S, REN H L. Dynamic decoupling control of DGCMG gimbal system via state feedback linearization [J]. *Mechatronics*, 2016, 36: 127-135.
- [11] 何瑞彬. 基于复合模糊和模糊PI控制的激光跟踪控制方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2023.  
HE R B. *Research on Laser Tracking Control Method Based on Composite Fuzzy and Fuzzy PI Control* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [12] 高运普,刘洋,滕云杰,等. 星间激光通信组网中改进自抗扰控制研究[J]. 光学学报, 2024, 44(21): 20-26.  
GAO Y P, LIU Y, TENG Y J, *et al.* Improved active disturbance rejection control in inter-satellite laser communication network [J]. *Acta Optica Si-*

- nica*, 2024, 44(21): 20-26. (in Chinese)
- [13] 于帅北, 曹艳波, 费强, 等. 轻量化量子跟踪系统复合轴精密控制[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(23): 3469-3478.  
YU SH B, CAO Y B, FEI Q, *et al.* Precision control on composite axis of lightweight quantum tracking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(23): 3469-3478. (in Chinese)
- [14] 曹兆锦, 宋晓莉, 范壬秋, 等. 基于双观测器的拼接弧线电机改进积分滑模控制策略[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(1): 105-113.  
CAO ZH J, SONG X L, FAN R Q, *et al.* Improved integral sliding mode control strategy for the segmented arc permanent magnet synchronous motor based on dual observer [J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 105-113. (in Chinese)
- [15] 陈文磊. 激光跟踪仪控制系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
CHEN W L. *Research on Control System of Laser* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [16] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [17] XUE W C, BAI W Y, YANG S, *et al.* ADRC with adaptive extended state observer and its application to air-fuel ratio control in gasoline engines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5847-5857.
- [18] WAN C H, DUAN N, XIE G C, *et al.* An improved two-degree-of-freedom ADRC for asynchronous motor vector system [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2024, 18(14): 1854-1867.
- [19] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, 2003. June 4-6, 2003, Denver, CO, USA. IEEE, 2003: 4989-4996.
- [20] DING H D, LIU S H, WANG Z W, *et al.* An ADRC parameters self-tuning controller based on RBF neural network for multi-color register system [J]. *Machines*, 2023, 11(3): 320.
- [21] LIU L, FAN Y S. Active disturbance rejection course control for USV based on RBF neural network [C]. *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*. July 27-29, 2020, Shenyang, China. IEEE, 2020: 3344-3351.
- [22] SUN Y K, PENG Y T, WU Y J, *et al.* Anti-disturbance control for two-axis turntables using ADRC with LuGre friction model and RBFNN [J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2025, 59(27): 156-161.
- [23] LI C S, ZHANG J L, ZHAO K F. Research on Suppression of low-frequency oscillations in power systems based on improved P-LADRC with RBF neural network [J]. *Electric Power Systems Research*, 2026, 253: 112536.
- [24] LUO W, MA Y C, LI Z, *et al.* Adaptive current control strategy for M3Cs using PSO-RBFNN-Tuned LADRC in fractional frequency transmission systems [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2025, 172: 111248.
- [25] SU J Y, WANG X Q, LI X, *et al.* Pneumatic valve position control of third-order LADRC based on RBF neural network [C]. *2024 China Automation Congress (CAC)*. November 1-3, 2024, Qingdao, China. IEEE, 2025: 1049-1054.
- [26] 段志君, 吴腾飞, 陈宗亮, 等. 激光跟踪测量系统伺服跟踪控制方法 [J]. *中国测试*, 2025, 51(1): 97-104, 118.  
DUAN ZH J, WU T F, CHEN Z L, *et al.* Servo tracking control method of laser tracking measurement system [J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2025, 51(1): 97-104, 118. (in Chinese)

## 作者简介:



陈宗亮(2002—),男,安徽池州人,硕士研究生,2023年于天津大学获得学士学位,主要从事激光跟踪测量系统伺服跟踪控制方法方面的研究。E-mail: czl@tju.edu.cn

## 通讯作者:



吴腾飞(1985—),男,辽宁抚顺人,博士,副教授,2013年于天津大学获得博士学位,主要从事激光及光电测试技术方面的研究。E-mail: wtf@tju.edu.cn