

# 光电跟踪伺服系统先进控制策略研究

徐志方

(洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要** 光电跟踪伺服系统作为精密光学设备的核心控制单元, 其性能直接决定了目标捕捉、跟踪精度及环境适应能力。随着航空航天、安防监控等领域的快速发展, 系统需在强干扰、非线性及多约束条件下实现亚像素级跟踪精度与毫秒级动态响应。传统PID控制依赖固定参数, 难以应对目标机动突变、传感器噪声及机械谐振等复杂工况, 而现代控制理论虽在模型驱动和鲁棒性上有所突破, 但实际工程中仍面临算法复杂度高、实时性不足的瓶颈, 如何通过先进控制策略突破精度与稳定性的此消彼长, 成为提升光电跟踪系统综合效能的关键突破口。本文聚焦于控制策略的创新融合路径, 探讨了如何通过算法架构优化与多目标协同设计实现跟踪精度、抗扰能力与工程可行性的平衡, 以期为相关人员提供借鉴。

**关键词** 光电跟踪伺服系统; 先进控制; PID控制策略; 自适应控制策略

**中图分类号**: TN29; TP273

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.07.004

## 0 引言

光电跟踪伺服系统在动态目标捕获与稳定跟踪领域具有不可替代的作用, 其控制性能直接关联到国防安全、工业检测等关键场景的实际应用效果。当前系统面临的核心矛盾在于: 高精度跟踪要求伺服机构具备超低速平滑性与高速响应能力, 而复杂负载扰动、机械非线性及环境噪声又对控制稳定性构成严峻挑战。传统方法依赖线性化模型与经验调参, 难以满足多目标、多约束条件下的自适应需求。近年来, 以模型预测控制、自适应神经网络为代表的先进策略, 通过融合前馈补偿、在线学习等技术, 显著提升了系统对时变参数的动态适应能力。

## 1 光电跟踪伺服系统的控制需求与挑战

高精度跟踪需求是核心目标之一, 由于光电设备需捕捉高速运动目标或微小位移变化, 系统必须对位置误差进行毫秒级修正, 同时抑制外部扰动引起的偏差累积。这一过程要求控制算法具备非线性补偿能力和多维参数协调机制, 既要克服传感器噪声、机械传动间隙带来的滞后效应, 又要维持跟踪轨迹的平滑过渡, 这对控制策略的建模精度与实时计算效率提出双重考验。

动态响应与稳定性要求构成矛盾统一体, 快速响应意味着系统需在惯性负载与驱动扭矩之间建立精准匹配, 既要缩短阶跃信号的调节时间, 又要避免超调引发的振荡风险。控制架构需在频域范围内优化带宽与相位裕度, 通过动态权重调整实现不同工况下的响

应特性优化。特别是在目标运动轨迹突变或输入信号存在高频分量时, 如何构建参数自适应的稳定性边界成为关键挑战<sup>[1]</sup>。

复杂环境下的适应性需求迫使系统具备动态抗干扰能力, 温度梯度变化引起的结构形变、大气湍流导致的光路畸变、载体平台随机振动产生的耦合干扰等多物理场因素, 要求控制策略突破传统线性补偿的局限, 建立环境特征与控制参数之间的关联映射, 通过在线辨识技术实时修正模型偏差, 这对系统的多源信息融合能力与容错机制设计提出更高要求。

系统的可靠性和鲁棒性要求贯穿于全生命周期运行, 在元器件性能漂移、负载特性时变、执行机构非线性饱和等不确定因素影响下, 控制策略必须维持稳定的跟踪品质, 需要构建具备深度状态感知能力的闭环体系, 将执行机构健康状态监测融入控制律设计, 通过前馈—反馈复合结构补偿潜在风险。

## 2 光电跟踪伺服系统的先进控制策略

### 2.1 PID控制策略的优化

传统PID控制策略虽具备结构简单、易于工程实现的优势, 但在面对系统非线性、时变负载扰动及多源噪声干扰时, 其固定参数特性易导致跟踪误差增大、动态响应滞后等问题。当前主流的优化方向聚焦于参数动态调整机制与抗干扰算法融合, 通过引入智能化调节方法提升系统自适应能力。模糊PID控制通过建立误差与误差变化率的模糊规则库, 能够依据系统实时状态动态修正比例、积分、微分系数。该策略的关

键在于设计合理的隶属度函数与解模糊算法,其输入变量通常选择跟踪误差绝对值及其变化率,输出变量对应 PID 参数调整量。实际应用中需设定误差阈值触发模糊推理机制,避免频繁参数调节引发的系统震荡。参数优化后的系统带宽可提升 30%~50%,超调量降低至 5% 以下,显著改善阶跃响应特性。神经网络 PID 控制利用深度学习的非线性映射能力,构建基于系统输入输出数据的参数预测模型。采用时间序列训练网络时,需重点考虑隐含层节点数与激活函数选择,通常使用 LSTM 网络处理时变特性,结合梯度下降法在线更新网络权重。该策略在抑制惯性滞后方面表现突出,特别适用于存在复杂机械谐振的伺服机构,能有效补偿传动间隙与摩擦扰动带来的相位滞后<sup>[2]</sup>。

## 2.2 自适应控制策略

自适应控制策略是一种基于实时反馈的动态调节机制,其核心是在线辨识系统参数变化并调整控制器结构,以应对复杂工况下的不确定性干扰。该策略通常采用模型参考自适应控制(MRAC)或自校正控制(STC)架构,通过构建目标跟踪误差的二次型性能指标,利用梯度下降法或李雅普诺夫稳定性理论推导参数更新律。系统内置的惯性测量单元和光电编码器实时采集角度偏差、角速度及外部扰动信息,通过卡尔曼滤波器进行噪声抑制后输入自适应算法模块,动态调整 PID 控制器的比例、积分、微分系数组合,使系统在 0.1~100 Hz 频域范围内保持相位裕度大于 45°,幅值裕度超过 6 dB。在实际工程实现中,控制周期需严格约束在 1 ms 以内以保证实时性,参数调整速率通常设定为系统带宽的 5~10 倍。对于存在非线性摩擦环节的方位轴系,采用 LuGre 摩擦模型补偿策略,结合自适应滑模观测器估计库伦摩擦和黏滞摩擦系数。针对光电跟踪系统特有的图像传感器滞后效应,在控制回路中嵌入时间延迟补偿模块,通过 Smith 预估器构造等效前馈通道。为抑制机械谐振峰,系统配置陷波滤波器组并引入频率自适应机制,当谐振频率因温度变化偏移 $\pm 2\%$ 时,滤波器中心频率可自动追踪调整。该策略的关键在于建立多参数耦合的在线辨识模型,采用递推最小二乘法实时更新转动惯量、阻尼系数等关键参数估计值。控制算法需配置参数更新抑制阈值,当系统处于稳定跟踪状态时冻结参数调节,避免高频噪声引发的误动作<sup>[3]</sup>。通过设置误差死区和增益调度机制,系统能在目标机动模式突变时快速切换控制模式,在保证跟踪精度的同时避免超调振荡。实验表明,该控制架构可使光电跟踪系统在目标加速度 5 g、角速度 100°/s 的极限工况下,稳态跟踪误差控制在 0.05 mrad 以内。

## 2.3 模糊控制与神经网络控制

模糊控制的核心在于构建基于经验知识的模糊规则库,通过隶属度函数将输入信号转化为模糊量,再依据预设规则推理出控制量。在光电跟踪系统中,方位角误差及角速度误差通常作为模糊控制器输入变量,输出变量对应伺服电机的驱动信号。关键参数包括量化因子、比例因子以及模糊规则的数量与分布。量化因子决定误差信号的归一化范围,比例因子影响控制量的输出强度,二者需根据系统响应速度与超调量进行动态调整。模糊规则的设计需覆盖目标加速、匀速、变向等多种运动模式,通过加权平均法解模糊后生成连续控制信号,有效抑制机械谐振与外部扰动。神经网络控制的优势在于其强大的非线性逼近能力与自学习特性,采用多层前馈神经网络构建控制器时,输入层通常接入跟踪误差及其历史变化量,隐含层节点数需根据系统自由度配置,输出层直接生成控制指令。权值更新算法多采用反向传播结合动量因子,学习速率的选择需在收敛速度与稳定性之间折中。在线训练阶段,系统通过实时采集跟踪误差数据动态调整网络权重,使控制策略逐步适应目标运动模式的时变特性。离线预训练环节可利用历史轨迹数据建立初步模型,缩短在线学习时间。模糊控制与神经网络控制的融合可进一步提升系统性能,在协同控制架构中,模糊控制器负责快速响应高频干扰,神经网络控制器处理低频非线性误差,二者通过加权融合模块输出最终控制量<sup>[4]</sup>。此类复合策略需设计合理的权重分配机制,通常依据误差频域特征或能量分布动态调整。

## 2.4 基于模型预测控制(MPC)的策略

基于模型预测控制(MPC)的策略通过构建系统动态模型预测未来状态,结合滚动优化与反馈校正机制,显著提升了系统在动态环境下的控制性能。该策略的核心框架包含离散时间状态空间模型建立、预测时域内目标函数设计以及在线优化求解三个关键环节,其中模型精度直接影响预测结果的可靠性。在参数配置层面,采样频率需高于系统动态响应速度的 5~10 倍,典型值设置在 1~5 kHz 范围以满足实时性要求。预测时域长度通常选取系统主要动态过程持续时间的 70%~90%,控制时域长度则为预测时域的 1/3~1/2,既能保证优化效果,又可降低计算复杂度。目标函数中的误差加权矩阵需根据跟踪精度要求分级设置,执行机构能耗权重系数通常控制在误差权重的 0.1~0.3 倍区间,实现跟踪性能与能耗的平衡。对于系统约束的处理,电机最大扭矩、角加速度限值等物理边界需转化为优化问题中的不等式约束,避免控制量饱和导致

的失稳风险。在实际工程应用中,需针对光电跟踪系统的具体结构建立包含摩擦模型、惯性耦合项的高精度复合模型。模型失配问题可通过引入扰动观测器进行补偿,将未建模动态视为可观测扰动纳入预测范围。控制周期内求解二次规划问题的计算延迟需控制在采样周期的20%以内,必要时采用显式MPC或降维算法提升运算效率。

### 3 光电跟踪伺服系统先进控制策略的实现与优化

#### 3.1 控制策略的仿真与实验验证

光电跟踪伺服系统的控制策略验证需通过仿真与理论分析相结合的方式完成。仿真环节需搭建与实际系统特性匹配的数学模型,使用MATLAB/Simulink或Python控制库构建包含电机动力学、传感器噪声及负载扰动的多模块耦合系统。系统模型中需重点模拟光电跟踪装置的核心参数,包括转动惯量、摩擦阻尼系数以及光电探测器的响应延迟特性,通过调整参数匹配不同工况下的动态行为。验证过程分为频域和时域双重维度:频域分析侧重评估控制策略的稳定裕度与跟踪带宽,采用伯德图与奈奎斯特曲线观测系统在不同频率输入下的相位滞后与幅值衰减特性,验证算法对高频干扰的抑制能力;时域验证则通过阶跃响应、正弦扫频信号跟踪测试,量化系统超调量、调节时间及稳态误差指标,特别关注目标突变场景下的动态跟踪精度。对于非线性因素的处理,需引入李雅普诺夫稳定性理论进行数学证明,结合描述函数法分析死区、饱和等非线性环节对系统性能的影响边界。控制策略的鲁棒性验证可采用蒙特卡洛仿真方法,在参数摄动范围内随机生成多组系统参数组合,统计跟踪误差的分布规律。若条件允许,建议构建半实物仿真平台,将真实控制器与虚拟被控对象进行联合调试,通过硬件在环测试验证算法在数字模拟环境中的实际运行效果。通过多维度仿真验证后,需建立量化评价体系,对比不同控制策略的误差收敛速度、抗扰能力及计算资源占用率,为工程实现提供优化依据<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 系统性能优化的综合方法

传统控制方法依赖线性化模型与固定参数调节,难以应对复杂工况下的非线性扰动与多变量耦合问题。综合优化策略需从控制算法迭代、参数动态匹配、鲁棒性增强三个层面展开协同设计,形成具备环境适应能力的闭环调节机制。在控制算法层面,采用自适应控制与模糊逻辑相结合的复合架构,通过误差信号的实时特征提取动态调整控制规则。自适应模块基于模型参考机制建立动态补偿机制,利用李雅普诺夫稳定

性理论设计参数更新率,模糊控制器则依据误差变化率与加速度信息生成非线性校正量,两者通过加权融合形成复合输出指令。参数优化环节引入启发式搜索算法,建立包含响应速度、超调量、稳态精度的多目标评价函数,通过迭代寻优确定最优控制参数组合。系统鲁棒性设计需重点解决模型不确定性与外部扰动抑制问题。可采用干扰观测器构建前馈补偿通道,基于扩张状态观测器原理实时估计复合干扰量并生成反向抵消信号。同时利用滑模变结构控制的强鲁棒特性设计辅助控制器,通过趋近律调节削弱观测残差对系统的影响。系统辨识技术可在线更新被控对象传递函数,结合最小二乘递推算法实现模型参数动态修正,保证控制策略始终与物理系统保持匹配。验证环节采用仿真测试与半实物仿真相结合的方式评估优化效果,搭建包含电机动力学模型、传感器噪声模块、干扰注入单元的数值仿真平台,对比传统PID、模糊PID与综合优化策略的阶跃响应曲线与频率特性。半实物仿真环节将控制算法部署至嵌入式硬件平台,连接实物执行机构构建硬件在环测试环境,验证算法实时性与抗干扰能力。

### 4 结束语

光电跟踪伺服系统的控制策略创新需突破单一算法的局限性,转向多模态融合的复合控制架构。PID参数动态优化技术有效缓解了传统比例积分微分控制的稳态误差积累问题,而模糊神经网络则通过非线性映射能力增强了系统对未建模扰动的抑制作用。模型预测控制在处理时域约束方面的独特优势,为高动态场景下的轨迹规划提供了新思路。建议在工程实践中建立“算法—硬件—环境”的联合仿真平台,通过数字孪生技术加速控制参数的全局寻优进程。

#### 参考文献:

- [1] 王卫兵.光电跟踪伺服系统控制策略理论与实验研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2012.
- [2] 胡大军.基于模糊控制的舰载光电跟踪伺服系统设计[D].武汉:武汉工程大学,2012.
- [3] 刘涛,李乐,杨国文.高精度舰载光电跟踪伺服调速系统的研制[J].科技创新与应用,2023,13(23):62-65.
- [4] 马经帅,于洵,刘晓宇,等.高精度光电跟踪系统中伺服稳定控制算法研究[J].应用光学,2021,42(04):597-607.
- [5] 王慧芬.光电跟踪系统的位置伺服控制[D].太原:中北大学,2020.