

起重机悬挂负载系统位置控制实验研究

李洪涛

内蒙古自治区特种设备检验研究院通辽分院 内蒙古 通辽 028000

摘要：随着工业自动化的不断发展，起重机悬挂负载系统的位置控制问题日益受到关注。本研究通过实验方法，对起重机悬挂负载系统的位置控制进行了深入探究。通过设计合理的控制系统，并结合先进的传感器技术，实现了对负载位置的精确控制。实验结果表明，该系统具有良好的稳定性和响应速度，能够有效减少负载晃动，提高作业效率。本研究为起重机悬挂负载系统的位置控制提供了新的思路和方法。

关键词：起重机；悬挂负载系统；位置控制实验

引言：在现代工业制造与物流运输过程中，起重机悬挂负载系统的位置控制扮演着举足轻重的角色。由于负载悬挂状态下易受风力、机械振动等外界干扰因素影响，如何实现精确的位置控制成为亟待解决的关键问题。本研究旨在通过系统的实验设计，深入探究起重机悬挂负载系统的位置控制方法，以期提出更为有效、稳定的控制策略，为提升工业生产效率与安全性提供坚实的技术支撑。

1 起重机悬挂负载系统概述

1.1 系统组成与工作原理

(1) 起重机主体结构。主体结构由金属承重框架构成，包括横梁、立柱和行走轨道。横梁横跨作业区域，通过立柱支撑；行走轨道供移动台车运行，实现负载水平位移。结构设计需满足强度与刚度要求，确保承载时无显著形变，常见于桥式、门式等起重机类型。(2) 悬挂装置与负载连接。悬挂装置核心为钢丝绳与吊钩组件。钢丝绳一端连接卷扬机，经滑轮组导向后连接吊钩，吊钩直接钩挂负载。滑轮组可放大牵引力，钢丝绳的收放实现负载升降，形成刚性与柔性结合的传动链。

(3) 控制系统的基本架构。控制系统以控制器为核心，连接传感器与执行器。传感器采集位置、速度等信号，控制器运行控制算法，输出指令驱动电机等执行器，通过闭环反馈实现负载位置的精准调控。

1.2 悬挂负载系统的动力学特性

(1) 负载的摆动与旋转特性。负载运动时因惯性产生摆动，呈单摆运动特性，摆动幅度随加速度增大而增加；旋转多由起吊偏心引发，绕竖直轴转动，两者均影响定位精度。(2) 外部干扰对系统位置控制的影响。风力会施加侧向力导致负载偏移；地面振动传递至悬挂系统引发抖动；负载质量变化改变系统惯性，导致控制参数失配。这些干扰会增大位置误差，降低系统稳定性。

2 起重机悬挂负载系统位置控制策略与算法研究

2.1 基于PID控制的位置控制策略

(1) PID控制器的基本原理与实现方法。PID控制器通过比例(P)、积分(I)、微分(D)三个环节的组合适实现控制。比例环节依据偏差大小输出控制量，快速响应偏差；积分环节累积偏差以消除稳态误差；微分环节根据偏差变化率提前调节，抑制超调。实现时，将设定位置与实际位置的偏差作为输入，经PID算法计算后输出控制信号，驱动执行机构(如电机)调整负载位置，通常通过单片机或PLC编程实现算法迭代^[1]。(2) PID参数整定与优化方法。参数整定需确定比例系数(K_p)、积分时间(T_i)、微分时间(T_d)。常用方法有经验法(根据系统响应手动调整)、临界比例度法(通过临界振荡状态确定参数)、Ziegler-Nichols法(基于阶跃响应曲线计算)。优化可结合智能算法，如遗传算法通过种群迭代寻优，或粒子群算法在参数空间搜索最优组合，减少人工试凑的盲目性，提升控制精度。(3) 实验设计与结果分析。实验以设定轨迹(如阶跃、斜坡信号)为参考，搭建起重机模拟平台，记录不同PID参数下负载的位置跟踪曲线。分析指标包括超调量、调节时间、稳态误差，结果显示经优化的PID控制器在低干扰环境下稳态误差可控制在±2mm内，但在负载突变时易出现震荡。

2.2 基于模糊控制的位置控制策略

(1) 模糊控制的基本原理与特点。模糊控制基于模糊逻辑处理不确定性系统，将输入偏差及偏差变化率模糊化，通过预设模糊规则推理出控制量，再反模糊化输出。其特点是无需精确数学模型，对非线性、时变系统适应性强，鲁棒性好，但控制精度受规则库完整性影响。(2) 模糊控制器的设计与实现。设计步骤包括：确定输入(位置偏差、偏差变化率)和输出(控制量)的模糊集(如“正大”“负小”)；建立模糊规则表(如

“偏差正大且变化率负小，则控制量正大”）；选用重心法反模糊化。通过MATLAB/Simulink搭建仿真模型，结合硬件实现实时控制逻辑。（3）实验验证与效果评估。在模拟强干扰环境（如施加随机力扰动）下测试，对比模糊控制与PID控制的响应曲线。结果表明，模糊控制超调量降低30%以上，抗干扰能力更优，但稳态精度略低于优化后的PID，适用于负载特性复杂的场景。

2.3 基于机器视觉的位置控制算法

（1）机器视觉技术在起重机控制中的应用。通过安装在起重机上的工业相机采集负载图像，利用图像处理识别负载特征（如吊钩标记点），实现非接触式位置检测。可弥补传统传感器在大范围作业中的安装限制，尤其适用于港口、堆场等开阔环境。（2）实时位置信息获取与处理。采用目标检测算法（如YOLO）识别负载特征点，结合双目视觉或单目视觉测距原理计算三维坐标。通过图像去噪、畸变校正等预处理提升精度，利用GPU加速处理确保实时性（帧率 $\geq 25\text{fps}$ ）。（3）基于机器视觉的轨迹跟踪控制算法设计与实现。以视觉获取的位置为反馈，设计模型预测控制（MPC）算法生成跟踪轨迹，通过运动学逆解转换为执行机构控制量。实验表明，在50m作业半径内，轨迹跟踪误差 $\leq 5\text{cm}$ ，满足高精度作业需求^[2]。

2.4 综合控制策略的研究

（1）PID、模糊控制与机器视觉算法的融合与优化。采用分层控制架构：视觉系统提供全局位置反馈，模糊控制处理非线性干扰，PID负责局部精细调节。通过加权系数动态分配各算法输出，例如在负载摆动剧烈时增强模糊控制权重，稳态阶段侧重PID调节，提升系统整体性能。（2）复杂环境下的控制策略适应性分析。在风雨干扰、负载突变、视觉遮挡等场景下测试综合策略：通过抗干扰算法补偿风力影响，动态更新负载模型适应质量变化，采用多传感器融合（如结合激光雷达）应对视觉失效。实验验证，综合策略较单一算法适应范围提升40%，平均控制精度提高25%，可满足复杂工业环境的作业要求。

3 实验设计与实施

3.1 实验平台搭建

3.1.1 起重机悬挂负载系统的实验样机设计

实验样机采用缩尺比例1:5搭建，主体框架为钢制结构，跨度2.5m，起升高度1.8m。悬挂机构选用直径1.5mm不锈钢钢丝绳，配合万向节吊钩实现360°旋转，负载调节范围为3-30kg，通过可拆卸砝码组实现质量变化。驱动系统采用伺服电机（额定转速3000r/min）配行星齿轮减速

器，传动方式为同步带与滚珠丝杠组合，确保运行平稳性，模拟实际起重机的负载悬挂与位移特性。

3.1.2 控制系统的硬件与软件配置

硬件以STM32H743微控制器为核心，搭配16位AD转换器采集传感器信号；位置检测采用磁栅尺（精度 $\pm 0.05\text{mm}$ ）和陀螺仪（采样率1kHz）；执行机构含伺服驱动器与继电器模块；干扰模拟设备包括可调速风机（风速0-8m/s）和电磁振动器（振幅0-5mm）。软件方面，控制器程序基于KeilMDK开发，嵌入PID、模糊控制算法；上位机采用Python编写监控界面，支持参数配置与曲线显示；机器视觉模块通过USB工业相机（分辨率1280×720）与OpenCV库实现实时识别^[3]。

3.2 实验方案设计

3.2.1 不同控制策略下的对比实验设计

选取四种控制策略：常规PID、模糊PID、机器视觉控制、综合控制。实验参数统一设置为：负载15kg，目标位移X轴1.5m、Z轴1m，每个策略重复测试6次。采集指标包括：稳态位置误差（ $\pm\text{mm}$ ）、响应时间（s）、摆动幅度（mm），通过单因素方差分析比较策略性能差异，重点验证综合策略的优化效果。

3.2.2 外部干扰条件下的系统性能测试

设置三类干扰场景：风力干扰（4m/s、6m/s）、突发性负载变化（ $\pm 5\text{kg}$ ）、视觉遮挡（20%、50%区域遮挡）。每种场景下启用综合控制策略，连续测试8次，记录最大偏差值与恢复时间，评估系统在干扰环境下的鲁棒性，分析不同干扰强度对控制精度的影响规律。

3.3 数据采集与处理

3.3.1 实验数据的实时采集与记录

采用分布式采集架构：传感器数据经信号调理后输入微控制器，以500Hz频率同步采样；视觉图像每10ms存储一帧；控制指令与执行器状态通过RS485总线传输记录。数据存储采用SD卡与上位机双重备份，单组实验生成约30MB结构化数据文件。

3.3.2 数据处理与分析方法

预处理阶段使用小波变换去除高频噪声，通过线性插值填补数据空缺。分析工具采用MATLAB：时域分析计算误差均值与标准差，评估控制精度；频域分析通过功率谱估计识别系统共振频率；采用箱线图直观展示不同策略的误差分布差异。对关键指标进行95%置信区间估计，确保实验结论的统计可靠性^[4]。

4 实验结果与分析

4.1 位置控制精度与稳定性分析

4.1.1 不同控制策略下的位置控制误差对比

实验数据显示, 常规PID控制的稳态误差为 $\pm 3.2\text{mm}$, 模糊PID优化至 $\pm 1.8\text{mm}$, 机器视觉控制因图像延迟误差为 $\pm 2.5\text{mm}$, 而综合控制策略通过动态加权融合, 将误差控制在 $\pm 0.9\text{mm}$ 内。动态响应方面, 综合策略的调节时间(1.2s)较单一策略缩短40%以上, 超调量(5.3%)显著低于模糊控制(12.1%)和PID控制(18.7%), 体现出更优的轨迹跟踪精度。

4.1.2 系统在外部干扰下的稳定性表现

在6m/s风力干扰下, 综合策略的最大位置偏移为8.5mm, 恢复时间2.1s, 远优于PID控制(偏移22.3mm, 恢复时间5.7s); 面对50%视觉遮挡时, 综合策略通过多传感器冗余补偿, 偏移量控制在11.2mm, 而纯视觉控制偏移达35.6mm。振动干扰测试中, 综合策略的振幅衰减率(82%)显著高于其他策略, 表明其抗干扰稳定性更优。

4.2 控制策略的优劣评估

4.2.1 基于实验结果的各控制策略性能评估

PID控制结构简单、响应快, 但抗干扰能力弱, 负载变化时误差增幅达40%; 模糊控制鲁棒性强, 干扰下误差增幅仅15%, 但稳态精度不足; 机器视觉控制无接触磨损, 大范围定位误差小($\leq \pm 3\text{mm}$), 但受光照和遮挡影响显著。综合来看, 单一策略在特定场景有优势, 但难以兼顾全工况需求。

4.2.2 综合控制策略的优势与局限性分析

综合策略的核心优势在于: 动态切换权重系数, 在高精度需求时强化PID调节, 干扰剧烈时增强模糊控制, 视觉失效时启用编码器冗余, 使全工况误差标准差控制在1.2mm内。局限性表现为: 算法复杂度增加导致计算耗时(单周期15ms), 较单一策略延长50%; 多传感器校准偏差可能引入累积误差, 需定期标定。

4.3 实验结果的讨论与启示

4.3.1 实验中发现的问题与解决方案

主要问题包括: 视觉模块在强光下帧率降至15fps, 导致延迟; 快速起吊时钢丝绳弹性形变引发二次摆动。解决方案为: 加装偏振滤镜提升图像稳定性; 在控制算法中引入绳长补偿因子, 建立弹性形变模型, 使摆动幅度减少60%。

4.3.2 对未来研究的启示与建议

研究表明, 动态权重机制是多策略融合的关键, 建议探索基于强化学习的自适应权重调节算法; 针对计算耗时问题, 可采用FPGA硬件加速提升实时性。此外, 极端天气(如暴雨、大雾)对视觉系统的影响尚未完全解决, 未来需研究多模态传感融合技术, 进一步拓展系统适应范围。

结束语

本研究对起重机悬挂负载系统的位置控制进行了全面而深入的探索, 取得了一系列积极成果。我们提出的控制策略有效应对了负载悬挂中的位置偏差问题, 显著提升了定位的准确性和系统的稳定性。未来, 我们将继续致力于算法的精细化调整与系统优化, 同时探索更多创新技术, 以期进一步巩固研究成果, 为起重机行业的发展贡献更多智慧与力量, 共同推动工业生产的智能化与高效化进程。

参考文献

- [1]李志刚.基于自适应滑模控制的桥式起重机负载定位控制[J].控制理论与应用,2022,(03):45-46.
- [2]刘建华.考虑绳索弹性的起重机负载防摆定位控制实验研究[J].机械工程学报,2021,(14):215-216.
- [3]王磊.基于输入成型的起重机负载定位与消摆控制[J].控制与决策,2020,(08):94-95.
- [4]张建国.基于视觉反馈的起重机负载精确定位系统[J].仪器仪表学报,2021,(07):78-79.