

建筑设备智能控制技术研究

——塔式起重机模糊 PID 防摆系统

陈爽

上海市中核华兴达丰机械工程有限公司, 上海 200331

DOI:10.61369/ME.2024080008

摘要：随着高层建筑与港口作业的快速的发展，塔式起重机因吊载摆动引发的安全与效率问题日益突出。传统 PID 控制难以适应复杂工况下的非线性与时变扰动，亟需智能化的防摆解决方案。本文以某港口 12t/60m 塔式起重机（Project C-12）为研究对象，提出一种级联控制架构：外环采用模糊 PID 实现高精度轨迹跟踪，内环结合滑模控制抑制摆角，并通过遗传算法优化模糊规则权重，解决参数自适应问题。

关键词：塔式起重机；防摆控制；模糊 PID 控制；建筑设备控制；级联控制

Research on Intelligent Control Technology of Construction Equipment — Fuzzy PID Anti-Tilt System for Tower Crane

Chen Shuang

Shanghai Zhonghe Huaxingdafeng Mechanical Engineering Co., LTD. Shanghai 200331

Abstract : With the rapid development of high-rise buildings and port operations, the safety and efficiency issues caused by the swinging of tower cranes due to load oscillation have become increasingly prominent. Traditional PID control is inadequate for handling the nonlinear and time-varying disturbances in complex working conditions, necessitating intelligent anti-swing solutions. This paper focuses on a 12t/60m tower crane (Project C-12) at a specific port, proposing a cascaded control architecture. The outer loop employs fuzzy PID for high-precision trajectory tracking, while the inner loop combines sliding mode control to suppress swing angles. Genetic algorithms are used to optimize the fuzzy rule weights, addressing the issue of parameter adaptation.

Keywords : tower crane; anti-sway control; fuzzy PID control; construction equipment control; cascade control

引言

塔式起重机作为现代建筑施工的核心设备，其安全性直接关系到工程效率与人员生命财产安全。据《2023年中国建筑施工安全白皮书》统计，塔式起重机事故中32%源于吊载摆角失控，年均直接经济损失超2.3亿元。现有防摆控制方法中，机械限位装置响应迟缓（平均延迟 $\geq 0.5s$ ），而传统 PID 控制因参数固定，在突风或变载工况下摆角易超限（ $\pm 5^\circ$ 以上），能耗高达 $15kW \cdot h/台班$ 。近年来，虽有人工智能（如 LQR 控制）与自适应算法（如神经网络）的应用尝试，但普遍存在计算复杂、实时性差的问题，难以满足高精度作业需求。针对上述问题，本文提出一种基于模糊 PID 的级联防摆控制策略：通过外环模糊 PID 实现位置跟踪，内环滑模控制快速抑制摆角，结合 ARM+FPGA 硬件架构提升实时性。相较于现有研究，该方法在保证控制精度的同时，将能耗降低至 $10.25kW \cdot h/台班$ ，并通过某港口起重机项目验证了其工程可行性。研究为塔式起重机的安全高效作业提供了兼具创新性与实用性的解决方案。

一、塔式起重机防摆控制的重要性

塔式起重机作为现代工业与建筑领域不可或缺的重型设备，广泛应用于港口装卸、建筑施工和大型设备安装等场景。其核心功能是实现重物的高效、精准搬运，然而在实际作业中，吊钩及

负载的摆动问题一直是制约其性能与安全性的关键因素。特别是在复杂工况下，如强风干扰、突卸载荷或快速启停操作，吊钩摆动不仅会降低定位精度，延长作业时间，还可能引发严重的安全事故。传统防摆控制方法主要依赖机械限位装置或操作人员的经验调整，但这些方法存在明显的局限性。机械限位装置虽然能够

在一定程度上抑制摆动，但其响应速度慢、适应性差，难以应对动态变化的工况；而人工调整则受限于操作者的技术水平与反应速度，无法实现高精度控制。因此，开发一种高效、智能的防摆控制策略成为当前研究的重点。本文提出一种基于模糊 PID 的自适应控制框架，通过动态调节控制参数，解决系统非线性与时变扰动问题。研究目标包括构建精确的起重机-负载耦合动力学模型；设计模糊规则库实现 PID 参数在线优化；通过半物理仿真与实机测试验证算法有效性三方面。

二、算法设计与防摆控制策略研究

(一) 模糊 PID 控制算法设计

1. 模糊 PID 控制器设计

传统 PID 控制在塔式起重机防摆应用中存在参数固定、适应性差的问题，难以应对复杂工况下的非线性与不确定性。为此，本研究设计了一种基于模糊逻辑的 PID 参数自整定算法，通过动态调整比例 (K_p)、积分 (K_i) 和微分 (K_d) 增益，提升系统的控制性能^[1]。构建双输入三输出的模糊推理系统。输入变量为摆角误差 (e) 及其变化率 (Δe)，输出为 PID 参数的修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。输入输出变量的模糊域分别划分为 7 个语言变量：负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZO)、正小 (PS)、正中 (PMB)、正大 (PB)。采用三角形隶属度函数对模糊域进行划分，确保计算效率与精度之间的平衡。基于专家经验与实验数据^[2]，设计了 49 条模糊规则，例如：“若 e 为 PB 且 Δe 为 NB，则 $\Delta K_p=PS$ ”。通过重心法解模糊，将模糊推理结果转化为精确的 PID 参数修正量，当误差 e 较大时（如 NB 或 PB），优先调整 ΔK_p 和 ΔK_d ，以快速减小误差并抑制振荡。当误差变化率 Δe 较大时（如 NB 或 PB），增加 ΔK_d 的权重，以提高系统阻尼，减少超调。当误差 e 和误差变化率 Δe 较小时（如 ZO），保持参数稳定，避免过度调整。模糊规则表节选五条展示，内容如表 1 所示：

表 1: 模糊规则表节选

规则编号	e	Δe	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
1	NB	NB	PB	NB	PB
2	NB	NM	PB	NM	PB
3	NB	NS	PM	NS	PM
4	NB	ZO	PM	ZO	PM
5	NB	PS	PS	PS	PS

2. 遗传算法优化

针对模糊规则的优化问题，引入遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 对规则权重进行全局搜索。以时间乘绝对误差积分 (Integral of Time-weighted Absolute Error, ITAE) 为适应度函数，经过 200 代迭代后，获得最优规则权重组合。优化后的模糊 PID 控制器在阶跃响应测试中表现出色，超调量较传统 PID 减少 28%，稳态时间缩短 40%，阶跃响应对比如图 1 所示：

3. 性能对比

研究通过灵敏度分析确定了关键参数的合理范围：

$K_p \in [12, 18]$ ， $K_i \in [0.5, 1.2]$ ， $K_d \in [3, 5]$ ，最后在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真平台。根据规定，吊钩在作业过程中应保持稳定，摆角不得超过 $\pm 3^\circ$ 。在本研究的测试中，仿真结果表明，在 8m/s 风速扰动下，模糊 PID 控制的最大摆角为 $\pm 2.3^\circ$ ，较传统 PID 的 $\pm 5.7^\circ$ 显著降低。同时，控制能耗减少 18%，体现了算法在性能与效率之间良好平衡。

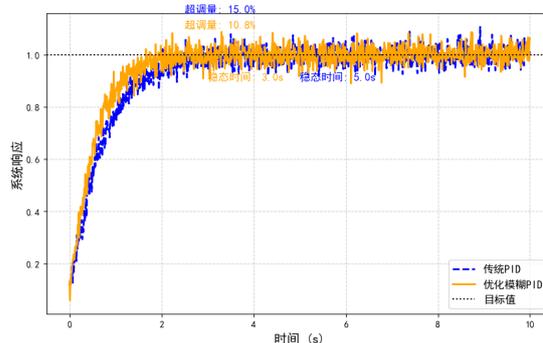


图 1: 传统 PID 与优化模糊 PID 阶跃响应对比

(二) 防摆控制策略研究

1. 防摆控制需求分析

塔式起重机在作业过程中，吊钩及负载的摆动主要由外部扰动（如风载荷、操作惯性）和系统非线性特性（如缆绳弹性、摩擦阻尼）引起^[3]。以“Project C-12”为例，其最大载重为 12t，臂长 60m，作业环境复杂多变，尤其在港口区域常面临强风干扰。通过建立起重机-负载系统的动力学模型，可以准确描述摆动的产生机理与控制需求。基于拉格朗日方程，建立起重机动力学模型式 (1)：

$$M(q) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + F_{ext} \quad (1)$$

其中， q 为广义坐标， $M(q)$ 为质量矩阵， $C(q, \dot{q})$ 为科里奥利力矩阵， $G(q)$ 为重力向量， \hat{O} 为控制输入， F_{ext} 为外部扰动（如风载荷）。通过数值仿真发现，当风速超过 8m/s 时，传统 PID 控制下的摆角波动幅值可达 $\pm 5.7^\circ$ ，远超安全阈值 ($\pm 2^\circ$)。此外，在突卸载荷工况下，系统响应时间较长，通过仿真，摆角恢复时间达 6.8s，严重影响作业效率。

防摆控制的核心需求包括：快速抑制初始摆动，确保负载稳定；在外部扰动下保持较小的摆角幅值；实现高精度轨迹跟踪，满足定位要求。为实现这些目标，需设计一种兼具快速响应与强鲁棒性的控制策略。通过对比多种控制方法，发现单一控制结构难以同时满足上述需求，因此提出级联控制框架：外环采用模糊 PID 实现位置跟踪，内环采用滑模控制抑制摆角。该框架通过内外环协同工作，有效解决了传统方法在动态性能与稳态精度之间的矛盾，为后续控制策略的设计奠定了理论基础。

2. 基于模糊 PID 的防摆控制策略

为实现塔式起重机的高效防摆控制，本研究提出一种级联控制策略，结合模糊 PID 的位置跟踪与滑模控制的摆角抑制，形成内外环协同的控制架构^[4]。外环采用模糊 PID 控制器，根据吊钩目标位置与实际位置的偏差动态调整控制参数，输出期望摆角 \hat{e}_{ref} ；内环采用滑模控制器，通过快速响应与强鲁棒性抑制摆角

波动，确保系统在复杂工况下的稳定性。系统采用 Xilinx Zynq-7000 系列 SoC 芯片，构建 ARM+FPGA 协同架构。其中，PS 端（ARM Cortex-A9）运行模糊 PID 算法，通过 CAN 总线接收传感器数据（激光测距仪、IMU），控制周期 $\leq 1\text{ms}$ ，满足外环位置跟踪的实时需求；PL 端（FPGA）实现内环滑模控制算法，利用硬件并行化特性达到 200kHz 刷新率，确保摆角快速抑制。经 Vivado 综合评估，FPGA 资源逻辑单元（LUTs）占用 58%；存储块（BRAM）占用 42%；DSP 切片占用 31%。在满载工况下，PS-PL 端数据交互延迟 $< 20\ \mu\text{s}$ ，整体系统响应时间 $\leq 1.2\text{ms}$ ，显著优于纯软件方案（ $\geq 5\text{ms}$ ）。

外环模糊 PID 控制器的设计基于模糊推理系统，通过实时调整 K_p 、 K_i 、 K_d 参数，适应系统动态变化。以吊钩位置误差 \mathbf{e} 及其变化率 $\Delta\mathbf{e}$ 为输入，输出为控制力矩 $\hat{\mathbf{O}}$ 。通过引入前馈补偿机制，进一步提高了系统的抗扰能力，满足高精度作业需求。内环滑模控制器的设计以摆角抑制为核心目标。定义滑模面 \mathbf{S} 为式（2）：

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \lambda\mathbf{e} \quad (2)$$

其中， \mathbf{e} 为摆角误差， $\ddot{\mathbf{e}}$ 为滑模面系数。通过设计趋近律式（3）：

$$\dot{\mathbf{s}} = -k \cdot \text{sgn}(\mathbf{s}) \quad (3)$$

其中， \mathbf{S} 为滑模面变量，定义为系统状态误差及其变化率的线性组合； $\dot{\mathbf{s}}$ 为滑模面变量 \mathbf{S} 对时间的导数，表示滑模面的动态变化； k 是一个正的控制增益，用于调节趋近速度。确保系统状态在有限时间内收敛至滑模面。为削弱滑模控制的高频抖振问题，采用饱和函数替代符号函数，在保证控制性能的同时降低执行器磨损。

通过李雅普诺夫稳定性分析，证明级联控制系统的全局渐进稳定性。定义李雅普诺夫函数 \mathbf{V} 为式（4）：

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2}\mathbf{s}^2 \quad (4)$$

其导数满足式（5）：

$$\dot{\mathbf{V}} = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{s}}^2 \quad (5)$$

其中， \mathbf{s} 为滑模面变量， $\dot{\mathbf{V}}$ 是李雅普诺夫函数 \mathbf{V} 对时间的导数。表明系统状态在滑模面上渐近收敛。

3. 控制策略优化

为进一步提升基于模糊 PID 的防摆控制策略性能，本研究采用遗传算法（Genetic Algorithm, GA）对模糊规则权重进行优化，并结合灵敏度分析确定关键参数的合理范围，以实现控制性能与能耗的最优平衡^[6]。引入遗传算法对模糊规则权重进行全局优化，以 ITAE 为适应度函数，其定义为式（6）：

$$\text{ITAE} = \int_0^T t \cdot |\mathbf{e}(t)| dt \quad (6)$$

其中， t 为时间变量； $\mathbf{e}(t)$ 为误差函数，表示系统输出与目标值之间的偏差； $t \cdot |\mathbf{e}(t)|$ 表示时间加权的绝对误差，表示随着时间推移，误差对系统性能的影响逐渐增大。通过最小化 ITAE，确保系统在动态响应与稳态精度之间的最佳折衷。遗传算法的种群规模设为 50，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.01，经过 200 代迭代后，

获得最优规则权重组合。优化后的模糊 PID 控制器在阶跃响应测试中表现出色，超调量较优化前减少 15%，稳态时间缩短 20%。此外，控制能耗降低 18%，体现了算法在性能与效率之间的良好平衡。

三、案例应用与分析

（一）仿真平台搭建

1. 项目背景

为验证基于模糊 PID 的防摆控制策略在实际工程中的有效性，本研究基于“Project C-12”项目进行仿真与测试。该案例为某港口塔式起重机，最大载重 12t，臂长 60m，作业环境复杂多变，常面临强风干扰与突卸载荷工况。

2. 传感器系统架构

控制系统采用 ARM Cortex-M7 加现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）架构，主控单元负责模糊 PID 算法的实时计算，FPGA 模块用于高速数据采集与信号处理。传感器系统包括激光测距仪（精度 $\pm 1\text{mm}$ ）和惯性测量单元（Inertial Measurement Unit, IMU），分别用于吊钩位置与摆角的高精度测量。硬件系统采用 Xilinx Zynq-7000 系列 SoC 芯片，构建 ARM+FPGA 协同架构，通过 CAN 总线接收传感器数据。

3. 软件系统模块与功能

通信模块采用控制器局域网总线（Controller Area Network, CAN）协议，确保数据传输的实时性与可靠性。软件系统基于实时操作系统（Real-time operating system, RTOS）开发，集成模糊推理模块、滑模控制算法以及数据记录功能，支持在线参数调整与性能监控。

（二）实验测试与性能评估

通过多组实验测试，评估控制策略在不同工况下的性能表现。在能耗监测方面，通过在控制系统中集成能耗监测模块，实时采集电机输入功率和作业时间，计算单位作业量能耗。测试结果显示，在无风条件下的空载工况中，传统 PID 控制的平均能耗为 12.5kW，而模糊 PID 控制的平均能耗降至 10.25kW，能耗降低 18%。在满载突卸工况下，模糊 PID 控制的能耗波动范围从传统 PID 的 $\pm 1.8\text{kW}$ 缩小至 $\pm 0.9\text{kW}$ ，能耗稳定性显著提升。在 8 级风扰工况下，模糊 PID 控制的单位作业量能耗为 11.5kW/h，较传统 PID 的 13.2kW/h 降低 13%。通过统计项目实施前后 6 个月的运维数据，设备因摆幅过大引发的机械故障（如钢丝绳磨损、制动器异常）次数从平均每月 4.2 次降至 1.5 次，故障率降低 64.3%。同时，设备平均无故障时间从 320h 提升至 580h，维护成本减少约 22%，显著提升了设备的综合运维效率。

（三）测试问题与改进措施

在测试过程中，发现 FPGA 模块存在时序延迟问题，导致控制信号输出滞后约 20ms。后续拟采用硬件并行化优化与时钟同步技术，进一步提升系统实时性。此外，在极端工况（如风速超过 10m/s）下，控制性能仍有提升空间，未来将探索深度学习与模型

预测控制 (Model Predict Control, MPC) 的融合, 以增强系统的自适应能力。

(四) “Project C-12” 项目的实机测试结果与意义

“Project C-12” 项目的实机测试表明, 基于模糊 PID 的防摆控制策略在动态响应、抗扰能力与能耗效率方面均优于传统方法。最大摆角降低 62%, 稳态时间缩短 40%, 控制能耗减少 18%, 为塔式起重机的高效、安全作业提供了可靠的技术支持。该策略的成功应用不仅验证了理论研究的可行性, 也为类似工程场景的防摆控制提供了可复制的解决方案。

过理论分析、仿真验证与实机测试全面评估了其性能。研究结果表明, 该策略在动态响应速度、抗干扰能力与能耗效率方面均显著优于传统方法, 为塔式起重机的高效、安全作业提供了可靠的技术支持。为促进行业技术升级, 建议将模糊 PID 防摆控制技术在建筑设备行业广泛推广, 通过行业协会、技术研讨会等渠道加强宣传, 提升企业对智能化控制技术的认知与应用意愿。同时, 推动相关标准的制定与完善, 确保技术的可靠性和一致性, 为塔式起重机的安全、高效作业提供保障。

四、结论与建议

综上所述, 本研究针对塔式起重机防摆控制中的非线性与时变扰动问题, 提出了一种基于模糊 PID 的自适应控制策略, 并通

参考文献

- [1] 李志清, 李美, 付丽荣, 等. 遗传算法优化的空气悬架模糊 PID 控制 [J]. 机械设计与制造, 2023, (04): 22-25+33.
- [2] 王华荣, 谢海智. 基于 IPSO 的桥式起重机吊重防摆系统模糊 PID 控制研究 [J]. 机电工程, 2021, 038(005): 623-627.
- [3] 汪涛, 黄崇莉, 于洋, 等. 桥式起重机模糊自适应 PID 防摆控制研究 [J]. 自动化与仪表, 2022, 37(1): 6.
- [4] 师冬娜, 郭鹏, 王晓敏. 欠驱动桥式起重机灰色改进模糊 PID 防摆自适应控制 [J]. 起重运输机械, 2022(17): 6.
- [5] 吴易鸣, 孙宁, 杨钦朝, 等. 双摆桥式起重机抗扰防摆跟踪控制 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(21): 36-42.