

# Application Analysis of Anti-shake and Precise Control Function of Intelligent Crane

Lei Chi

Western Superconducting Materials Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710018, China

## Abstract

Intelligent cranes are transitioning from experience-based operation to model-driven, data-empowered automated operations, where anti-sway and precision control are critical for enhancing safety, efficiency, and repeatability. Anti-sway control primarily addresses load swing angle and amplitude suppression, while precision control focuses on spatial positioning and trajectory tracking of the hook or load. These two aspects interact under dynamic coupling, actuator saturation, operational disturbances, and safety constraints. This paper systematically outlines key technical pathways, system architectures, and evaluation methods from four dimensions—application requirements, perception modeling, control strategies, and engineering implementation—by examining both anti-sway and precision control. It proposes integrated trajectory planning with closed-loop control coordination, robust design for operational uncertainties, and adaptive optimization based on online estimation. These insights provide valuable references for intelligent upgrades in port, metallurgy, assembly, and warehousing scenarios.

## Keywords

intelligent crane; anti-sway control; precise positioning; trajectory planning

## 智能起重机防摇及精准控制功能应用分析

池磊

西部超导材料科技股份有限公司, 中国·陕西 西安 710018

## 摘要

智能起重机正从经验操作的阶段, 向以模型驱动、数据赋能的自动化作业阶段转型, 防摇、精准控制就是提高安全、效率、可重复性的关键。防摇控制主要针对负载摆角、摆幅的抑制, 精准控制主要针对吊钩或者负载的空间定位、轨迹跟踪, 两者在动力学耦合、执行器饱和、工况扰动、安全约束等条件下互相制约。本文从防摇、精准控制两个方面, 从应用需求、感知建模、控制策略、工程落地四个方面整理出主要的技术路径、系统架构、评价方法, 提出一体化轨迹规划与闭环控制协同、面向工况不确定性鲁棒设计、基于在线估计的自适应优化思想, 给港口、冶金、装配、仓储等场景的智能化升级提供一定的参考。

## 关键词

智能起重机; 防摇控制; 精准定位; 轨迹规划

## 1 引言

起重作业有负载惯性大、作业半径大、环境干扰强、安全后果严重等特点。传统的起重机依靠司机的经验和反复的微动来消除摆动、实现对位, 效率低, 难以稳定地再现, 高频装卸、精密装配、狭小空间作业中更容易产生风险。随着伺服驱动、工业网络、传感器、控制算法的发展, 起重机也逐渐具备了摆动状态可观测、轨迹可规划、控制可闭环的条件。防摇和精准控制不是孤立的, 是任务分解、运动规划、执行控制、安全监测的系统工程。本文以需求、技术、工程、评价链条为分析路径, 探究应用实现逻辑和落地路径。

**【作者简介】**池磊(1990-), 男, 中国陕西西安人, 助理工程师, 从事特种设备运行维护与安全管理研究。

## 2 作业需求与性能指标框架

### 2.1 典型场景风险与指标体系

防摇及精准控制的工程价值, 首先是效率、安全、质量这三个目标同时实现。港口岸桥、场桥、门座起重机中吊具/集装箱在风载、绳长变化、大行程运行下需要实现快速稳定的落位, 防摇目标一般表现为摆角峰值、摆幅衰减时间、落位前残余摆动可控, 精准控制体现为平面定位误差、高度误差、对位时间的约束。冶金、铸造场景下负载高温、液态、偏载, 摆动影响落位, 也会引起溅落、碰撞, 因此对最大允许摆角、禁入区约束、紧急制动后残余摆动有更严格的要求。装配、仓储场景下作业空间狭小, 障碍物密集, 精准控制不能只是实现点到点的定位, 还要能够在狭小的通道内沿着规划路线进行安全距离的控制。因此指标不能只用防摇效果来

表述,应该形成面向任务的综合指标集,即动态性能(摆动抑制、跟踪误差、超调与收敛速度)、约束满足(速度、加速度、冲击限制、执行器饱和、禁区、安全边界)、稳定性与鲁棒性(对风扰、载荷变化、摩擦、绳长变化的敏感性)、可用性指标(自动化成功率、人工接管频次、维护成本)。

## 2.2 防摇与精准控制的耦合机理与约束条件

起重机系统的主要难点是欠驱动和强耦合,负载摆动本质上是由悬挂系统摆振响应引起的,摆角状态不是独立可控的量,而是由小车、大车运动、起升速度变化、绳长、载荷参数共同激发。如果只追求快速对位,就会由于加速度、速度的突变产生激励频率成分而造成摆动放大;过度抑制摆动、采用保守的运动方式,可以减少摆幅,但是会拉长循环时间,降低吞吐量。因此防摇和精准控制在一个轨迹、控制框架里同时优化,一方面用轨迹的“先天抑摆”来减少激励源,另一方面用闭环的“后天纠偏”来应对模型误差和外扰。工程约束使耦合问题更加复杂,执行器存在速度、加速度、转矩、功率上限,控制输入受限,理论最优轨迹难以直接实现;钢丝绳弹性、卷筒与滑轮摩擦、结构柔性、测量延迟会引入相位滞后,削弱抑摆效果;现场风载、吊具摆动、偏载引起的摆平面变化,会使二维摆动甚至扭摆耦合不能忽视。

## 3 感知—建模链路:防摇控制的基础支撑

### 3.1 多源感知与状态估计

高质量防摇和精确控制的前提是对关键状态的稳定获取,即吊钩或负载的位置、速度和加速度,小车和大车位移和运动指令,绳长和起升状态,摆角及其变化率,环境扰动和障碍物信息。工程上一般采用编码器/绝对值编码器+起升计量+IMU/倾角传感+激光测距/视觉的组合,编码器提供驱动侧高精度位移,起升计量给出绳长变化,IMU捕捉吊具姿态和摆动特征,激光或者视觉校准空间位置和对位误差。由于起重现场存在振动、遮挡、强反光、电磁干扰等问题,单个传感器很难长时间稳定工作,因此需要多源融合。融合的关键不是堆传感器,而是建立一致的坐标系和误差模型,处理采样不同步和延迟,对异常数据做一致性检验。常用方法是用扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波或基于观测器的估计方法,把编码器、IMU的高频信息和视觉、激光的低频校准结合起来,得到平滑、不过度滞后的状态估计。同时为了满足安全要求,估计系统还要给出置信度输出,当摆角估计可信度降低或者位置观测丢失时,控制器就应当自动收敛到保守策略,并发出报警或者提示人工接管。面向应用的状态估计还要考虑可维护性,即传感器标定、零点漂移补偿、安装偏差自校准、绳长变化引起的动力学参数变化的在线更新。

### 3.2 摆动动力学建模与参数辨识

防摇控制要依靠正确的摆动动力学模型。工程上常从简化模型入手,把负载当作摆锤,用绳长和重力来形成主导

振动频率,把小车或者大车的加速度当作外部激励输入。在小摆角下,线性化模型便于设计输入整形、LQR等方法;但是大摆幅、偏载、双摆(吊具—负载)或者绳长快速变化时,非线性效应和耦合项不能忽略,单纯的线性模型会造成抑摆不足或者对位误差累积。为了在实现性和精度之间取得平衡,可以采用分层建模的思想,底层使用可以实时求解的简化模型来支撑在线控制,上层使用保真度更高的模型(考虑结构柔性、摩擦、风扰)来离线仿真和参数整定。参数辨识是联系模型和现场的桥梁,载荷质量、重心偏置、等效绳长、阻尼、摩擦系数等都会随着工况的变化而变化。应用中可以利用作业时自然产生的激励,通过摆动响应反推出固有频率和阻尼,进而更新控制器需要的参数;也可以在空载或者试吊阶段设置温和的激励序列来进行辨识,兼顾安全和数据质量。数字孪生技术可以把现场的传感数据反向导入到仿真模型里,从而不断地校准、回测。当更换吊具、结构改造或者控制参数更新的时候,可以在孪生环境中验证摆动响应和安全边界,再部署到现场。

## 4 防摇与精准定位的一体化实现的控制策略

### 4.1 轨迹规划与前馈抑摆:从源头降低激励

所谓前馈抑摆,其实质就是设计出速度、加速度、加加速度(冲击度)连续的轨迹来抑制系统对摆动固有频率的激励,使系统在达到目标位置时自然趋向于零摆动。输入整形(Input Shaping)是常用的方法,根据估计的摆动主频和阻尼,把原始指令卷积成带权脉冲或者平滑函数,抵消摆动模态,它的优点是实现简单、对控制器依赖小,适合在PLC或者运动控制器上快速落地。与之配套的是S曲线、限冲击轨迹、多段加减速策略,可以在满足执行器上限的情况下控制动态激励频谱。对于需要“边走边对位”的场景,如集装箱抓取、钢卷落点对齐等,单靠输入整形是无法应对扰动和模型偏差的,轨迹规划还要加入约束条件,禁入区、障碍物、摆角上限、安全距离,将落位阶段微动次数最小化作为优化目标之一。从实践角度出发,一般采用分阶段的方法,长行程以效率为主、抑摆为辅,接近目标时进入精细对位阶段,减小速度并结合闭环修正。前馈轨迹的有效性很大程度上取决于参数的准确性以及工况的稳定性,因此轨迹规划应该具有在线调整的能力,在估计到摆动主频发生变化(绳长改变)或者风载增强的时候,自动重新计算关键段的加速度以及整形参数,保证抑摆一致性。

### 4.2 反馈控制与多目标协同:在不确定性下实现稳准确快

反馈控制有两个目的,第一是位误差的跟踪和消除,第二是摆角状态的抑制和阻尼加强。经典的PID配合摆角反馈可以实现基本的防摇,但是多轴耦合、执行器饱和、延迟存在的情况下容易产生参数敏感和工况迁移困难。因此,在智能起重机中更多的采用状态空间模型来描述系统,用

LQR、 $H_{\infty}$ 鲁棒控制或者滑模、自适应等方法提高对参数变化的容忍度；约束明显并且需要多目标权衡的场合，模型预测控制(MPC)有优势，它可以显式地处理速度/加速度限制、摆角上限、禁区约束等，并通过滚动优化在抑摆、对位、能耗、舒适度之间调整权重。工程实现时要注意计算资源和实时性，可以采用降低预测维度、使用线性MPC或者分层MPC(上层算参考轨迹、下层快速跟踪)来满足周期要求。多目标协同还表现在控制结构上，一般采用位置环、速度环、电流环或者力矩环的级联结构，摆角反馈与位置反馈在上层协调，底层保证执行器快速准确跟随，同时加入抗饱和和反积分饱和机制，防止限幅造成的误差累积和二次激励。为了保证现场的安全性以及可解释性，控制系统还要给出可以监测的状态量和逻辑条件，摆角超限触发减速、风速超阈值进入保守模式、定位误差异常提示人工复核。最终的高质量控制不是某一种算法“最先进”，而是把轨迹、估计、反馈、安全逻辑统一到可验证的闭环框架里，使系统在复杂扰动下仍然可以稳定地得到“稳、准、快”的作业结果。

## 5 工程落地与应用评价：系统架构、验证与发展趋势

### 5.1 控制系统架构、安全冗余与人机协同

从落地的角度来说，防摇、精准控制要嵌入到起重机的整体控制系统中，形成一个“感知、决策、执行、安全”的闭环链路。典型的架构是由现场层的传感器、驱动器，控制层的PLC或者运动控制器、安全PLC，网络层的工业以太网或者现场总线，上位层的HMI、数据记录与诊断平台组成。为了保证实时性，位置闭环和摆角闭环一般在控制层实现，上位层做参数管理、任务配置、数据回放。安全冗余是起重设备不能回避的要求，关键传感器要具备冗余或者交叉校核，关键控制链路要具备故障安全(Fail-safe)和安全停车策略；当自动控制失效时，应平滑切换到人工模式，避免切换瞬间的速度突变再次激发摆动。人机协同也十分重要，在许多情况下，自动控制不是完全取代司机，而是在防摇、一键对位、半自动搬运等方面起到辅助作用。此时系统要把控制意图清晰地反馈给操作者，即用界面显示当前摆角、建议操作、自动对位进度和风险提示，使操作者理解并信任系统，保留可控的人工干预通道，在异常环境或者特殊作业时可以快速接管。工程实践证明，控制参数的可管理性决定了长期效果的好坏，应给出和工况有关的参数模板(不

同的绳长、不同的吊具、不同的载荷范围)，用权限和审计机制防止随意更改参数造成安全隐患。

### 5.2 验证评估方法、运维闭环与发展趋势

防摇、精准控制的评价要符合可复现、可比较、可追溯的原则。验证路径一般分为三层：离线仿真用来筛选控制结构、权重、验证极端工况；半实物或者台架试验来检验实时性、通信延迟、执行器饱和的影响；现场试验最后检验风载、结构振动、摩擦的变化、操作者的行为等实际因素。指标设计时要记录轨迹误差和摆动响应，落位前残余摆角、摆角峰值、收敛时间、对位误差分布、循环时间、紧急制动或故障切换时的安全响应都要记录。更重要的是建立运维闭环，用数据记录、事件回放找出抑摆效果下降的原因(传感器漂移、参数漂移、机械磨损、工况变化)，把诊断结果反馈到模型更新、参数调整的过程中，形成持续优化的机制。未来的发展趋势是一体化智能化更加突出，第一点学习型控制与数据驱动优化，保证安全边界前提下对参数进行自整定、工况自适应，但是需要严格的可验证约束和在线监控机制；第二点更高可靠的环境感知(视觉、激光、地图融合)，推动避障对位、自动抓放等复杂任务，使精准控制由单点对位扩展到路径级安全作业；第三点工业网络和时间敏感通信的发展，提高多控制器协同和数据一致性，为大型装备多机构联动打下基础。

## 6 结语

智能起重机防摇和精准控制的本质就是以可靠的感知、可解释的控制为基础，在执行器约束和工况不确定性下完成安全高效的闭环任务。应用实践表明，单点算法的提高不能代替系统工程，轨迹规划减少激励源，状态估计保证可观测、可信度，闭环控制纠偏抗扰，安全、人机协同保证可用、可接管。以后要在可验证的安全边界内推进在线参数更新、数据驱动优化，用统一的指标体系和运维闭环来支撑长期稳定运行，使防摇和精准控制真正成为起重设备智能化升级的“硬能力”。

### 参考文献

- [1] 陆海舟. 智能起重机电子防摇控制策略研究[D]. 上海应用技术大学, 2023.
- [2] 宋鹏程. 智能塔式起重机定位防摆控制研究[D]. 北京建筑大学, 2022.
- [3] 毕江涛. 桥式起重机防摇定位控制系统开发[D]. 大连理工大学, 2022.