

# 塔机在复杂施工环境下的自适应调节技术研发

贝 晨

广西建工集团建筑机械制造有限公司 广西南宁 530299

**摘 要：**随着建筑工程向超高层、大跨度、复杂地形方向发展，塔机作业面临着风荷载突变、地基沉降、障碍物干扰等复杂施工环境的挑战，传统塔机的固定参数控制模式已难以满足安全高效作业的需求。本文围绕塔机在复杂环境下的自适应调节技术展开研究，分析复杂施工环境对塔机作业的影响机制，提出包含环境感知、参数自整定与姿态自适应的技术架构，并通过模拟实验验证技术的可行性与有效性，旨在提升塔机在复杂工况下的作业安全性与操作效率。

**关键词：**塔式起重机；复杂施工环境；自适应调节；环境感知；姿态控制

## 引言

塔式起重机（以下简称塔机）作为建筑施工领域的核心起重设备，承担着物料垂直与水平运输的关键任务。传统塔机采用预设参数的固定控制模式，其起升、变幅、回转速度等参数无法根据环境变化实时调整，在遭遇突发风荷载或地基不均匀沉降时，易出现吊物摆动幅度过大、塔身倾斜超限等风险，甚至引发塔机倾覆、吊物坠落等安全事故。在此背景下，研发塔机复杂施工环境下的自适应调节技术，实现闭环控制，已成为建筑机械领域的研究热点。本文结合传感器技术、智能算法与机电控制技术，构建塔机自适应调节技术体系，通过实时感知环境与设备状态，自动优化控制参数与作业姿态，为复杂工况下塔机的安全高效作业提供技术支撑。

## 一、复杂施工环境对塔机作业的影响机制分析

### （一）自然环境因素的影响

自然环境因素以风荷载、温度变化为核心，是影响塔机高空作业稳定性的首要因素。风荷载对塔机的影响具有随机性与突发性，当风速超过塔机设计风速阈值时，会引发塔身共振与吊物大幅摆动，一方面增加了钢丝绳的疲劳损耗，另一方面降低了吊物就位精度；强阵风还会对起重臂产生侧向推力，导致塔身弯矩超限，长期作用下易引发塔身结构变形。温度变化则会导致塔机金属结构热胀冷缩，影响传动机构的配合精度，造成变幅、回转动作卡顿，降低控制响应速度。

### （二）场地环境因素的影响

场地环境因素主要包括地基沉降、地面坡度与场地平整度。在软土地基、基坑边缘等施工场地，塔机基础易出现不均匀沉降，导致塔身垂直度偏差超标，传统固定参数控制无法实时补偿垂直度偏差，会使塔身受力求衡，倾覆风险显著提升。山地、丘陵等复杂地形场地存在天然坡度，塔机安装后难以保证水平度，不仅影响起重性能发挥，还会导致回转机构受力不均，加速齿轮磨损。

### （三）作业环境因素的影响

作业环境因素包含密集障碍物、多机协同作业干扰与物料特性变化。在城市建筑群中作业时，塔机起重臂易与周边建筑物、高压线等障碍物发生碰撞，传统人工观察的避让方式存在视野盲区，易引发碰撞事故；多机协同作业场景下，不同塔机的起重臂、钢丝绳存在交叉作业区域，信号干扰与操作协同不当会导致吊物缠绕；此外，吊物重量、形状的不规则变化，也会使塔机的负载特性发生改变，固定起升速度易造成吊物起升冲击或制动不稳。

## 二、塔机自适应调节技术的总体架构设计

### （一）感知层

感知层是自适应调节的基础，通过多传感器融合技术，实时采集复杂环境参数与塔机运行状态数据，为决策层提供数据支撑。感知层的核心传感器包括：一是环境感知传感器。风速风向传感器用于监测塔机作业区域的实时风速与风向，分辨率 $\leq 0.1\text{m/s}$ ，测量范围 $0\text{--}60\text{m/s}$ ；倾角传感器安装于塔身与起重臂，监测塔身垂直度与起重臂仰角变化，测量精度 $\pm 0.05^\circ$ ；激光雷达与超声波传感器布置于起重臂端部与塔身四周，用于探测周边障碍物的距离与位置，探测范围 $0.5\text{--}50\text{m}$ 。二是设备状态

**作者简介：**贝晨（1986.06-），男，汉，广西贺州市昭平县，大学本科，工程师，研究方向：塔机研发制造。

传感器。拉力传感器安装于起升钢丝绳，实时监测吊物重量；编码器安装于起升、变幅、回转机构，采集机构的运行速度与位置；振动传感器布置于塔身关键节点，监测结构振动频率与振幅，判断是否发生共振。感知层采用CAN总线实现传感器数据的同步传输，数据传输频率 $\geq 10\text{Hz}$ ，确保环境与设备状态数据的实时性与完整性。

## （二）决策层

决策层是自适应调节技术的核心，基于感知层采集的多源数据，通过智能算法进行数据分析、风险评估与参数优化，生成最优控制指令。决策层的核心算法包括：一是环境风险评估算法。采用模糊综合评价法，将风速、塔身垂直度、障碍物距离等参数作为评价指标，构建风险等级评价模型，将塔机作业风险划分为安全、预警、危险三个等级，不同风险等级对应不同的调节策略。二是吊物防摆自适应算法。基于PID控制算法，结合风速与吊物摆动幅度数据，建立吊物摆动预测模型，实时调整变幅与回转速度，通过速度平滑控制抑制吊物摆动，使吊物摆动幅度控制在 $\pm 0.5\text{m}$ 以内。三是塔身姿态自整定算法。当倾角传感器监测到塔身垂直度偏差超过阈值时，结合地基沉降数据，通过遗传算法优化塔机平衡重位置与起重臂仰角，补偿垂直度偏差，使塔身垂直度偏差恢复至安全范围。四是障碍物避让路径规划算法。基于激光雷达采集的障碍物数据，采用A\*算法规划起重臂的最优运行路径，自动调整回转与变幅动作，实现障碍物的主动避让。

## （三）执行层

执行层接收决策层的控制指令，通过变频调速技术与液压控制技术，实现塔机起升、变幅、回转机构的参数调节与姿态调整。执行层的核心控制模块包括：一是变频调速模块。通过调整变频器输出频率，改变起升电机、变幅电机与回转电机的转速，实现速度的平滑调节，例如在强风环境下自动降低起升与回转速度，提升作业稳定性。二是姿态调整模块。通过控制平衡重移动油缸与起重臂变幅油缸，调整平衡重位置与起重臂仰角，补偿塔身垂直度偏差，优化塔身受力状态。三是安全保护模块。当决策层判定风险等级为危险时，执行层自动触发紧急制动，停止塔机所有动作，并发出声光报警信号，保障作业安全。

## 三、塔机自适应调节系统的硬件与软件研发

### （一）硬件系统研发

一是传感器模块。选用风速风向传感器、双轴倾角传感器、激光雷达传感器与拉力传感器，确保环境与设

备状态数据的精准采集。二是数据采集模块。设计基于CAN总线的多通道数据采集板，实现传感器数据的同步采集与传输，采集板具备数据滤波功能，可有效降低环境干扰导致的数据噪声。三是控制模块。以STM32F407微控制器为核心，内置模糊控制算法与PID控制算法，负责数据处理、风险评估与指令生成；配备4G通信模块，可实现塔机运行数据的远程传输与监控。四是执行模块。选用西门子MM440系列变频器，控制起升、变幅、回转电机的转速；选用液压比例阀，控制平衡重移动与起重臂变幅动作；配备声光报警器，实现风险预警。硬件系统采用模块化设计，便于安装、维护与升级，整体防护等级达到IP65，可适应建筑施工场地的恶劣环境。

### （二）软件系统研发

软件系统采用C语言与Python语言联合开发，分为数据采集软件、决策控制软件与远程监控软件三个子系统，具体功能如下：一是数据采集软件。基于C语言开发，运行于STM32微控制器，实现传感器数据的实时采集、滤波与传输，支持传感器故障自检，当传感器出现故障时自动发出报警信号。二是决策控制软件。基于Python语言开发，集成模糊综合评价模型、PID防摆算法与A\*路径规划算法，可根据感知层数据实时生成调节指令；软件具备参数自整定功能，可根据塔机型号与作业工况自动优化算法参数。三是远程监控软件。基于B/S架构开发，通过4G通信模块接收塔机运行数据，在远程监控中心实时显示塔机风速、塔身垂直度、作业姿态等参数；支持历史数据查询与故障诊断，可辅助管理人员制定作业方案。软件系统采用可视化界面设计，操作简便，塔机操作人员可通过触摸屏实现参数设置、模式切换等功能。

## 四、模拟实验验证与结果分析

### （一）实验平台搭建

实验平台以QTZ80型塔机为研究对象，配备研发的自适应调节系统；搭建模拟实验场地，通过风机模拟不同风速的风荷载，通过液压千斤顶模拟地基不均匀沉降，通过设置障碍物模拟密集作业环境；采用高精度全站仪监测塔身垂直度与吊物摆动幅度，采用应力传感器监测塔身关键节点的应力变化。

### （二）实验工况与测试指标

设计三种典型复杂工况进行实验：强风荷载工况、地基不均匀沉降工况、障碍物避让工况。测试指标包括：吊物摆动幅度、塔身垂直度偏差、塔身应力峰值、作业效率。

### (三) 实验结果与分析

本次实验对开启与关闭自适应调节系统的塔机性能进行对比测试,核心实验数据如下表1所示,关键指标变化趋势如图2、图3所示。

表1 强风荷载工况下实验数据对比

控制模式	风速 (m/s)	吊物摆动幅度 (m)	塔身应力峰值 (MPa)	作业效率 (次/h)
传统模式	15	± 2.5	128	8
传统模式	18	± 3.1	145	6
传统模式	20	± 3.8	162	4
自适应模式	15	± 0.4	92	10
自适应模式	18	± 0.6	105	9
自适应模式	20	± 0.8	118	7

表2 地基不均匀沉降工况下实验数据对比

控制模式	沉降量 (mm)	塔身垂直度偏差 (‰)	应力峰值 (MPa)	偏差补偿时间 (s)
传统模式	20	0.8	115	-
传统模式	25	1.1	132	-
传统模式	30	1.5	150	-
自适应模式	20	0.3	85	8
自适应模式	25	0.3	92	9
自适应模式	30	0.3	100	10

表3 障碍物避让工况下实验数据对比

控制模式	障碍物距离 (m)	避让成功率 (%)	单次避让耗时 (s)	碰撞风险等级
传统模式	10	65	45	高
传统模式	12	72	38	中高
传统模式	15	80	30	中
自适应模式	10	100	12	低
自适应模式	12	100	10	低
自适应模式	15	100	8	低

实验结果表明,在三种复杂工况下,自适应调节技术均能有效提升塔机的作业安全性与稳定性:强风荷载工况下,开启自适应调节系统后,吊物摆动幅度较传统控制模式降低84.6%,塔身应力峰值降低28.1%,有效抑制了风荷载引发的吊物摆动与塔身共振。地基不均匀沉降工况下,自适应调节系统可在10s内将塔身垂直度偏差补偿至安全范围,塔身应力峰值降低27.6%,改善了塔身受力失衡问题。障碍物避让工况下,激光雷达精准探测障碍物位置,A\*算法规划的避让路径可使起重臂与障碍物保持安全距离( $\geq 2m$ ),实现了障碍物的主动避让,同时单次作业时长缩短39.3%,作业效率显著提升。

### (四) 技术的经济效益分析

塔机复杂施工环境下的自适应调节技术的应用,可从直接经济效益与间接经济效益两个维度为建筑施工企

业降低成本、提升效益。在直接经济效益层面,该技术通过实时感知风荷载、地基沉降等环境因素,自动调整塔机作业参数与姿态,能有效抑制吊物摆动、补偿塔身垂直度偏差、实现障碍物主动避让,大幅降低塔机倾覆、吊物坠落、起重臂碰撞等安全事故的发生概率,减少因设备损坏、人员伤亡、工期延误产生的直接经济损失;同时,自适应调节可优化塔机传动机构、钢丝绳等部件的受力状态,降低设备疲劳损耗,延长塔机使用寿命,减少设备维修与更换成本,经测算,配备该技术的塔机年度维修成本可降低20%~30%。在间接经济效益层面,该技术无需人工频繁干预调整参数,可减少塔机操作人员的工作强度与人力成本投入,且能根据工况自动优化作业流程,提升吊物就位精度与作业效率,相较于传统人工调节模式,塔机单机作业效率可提升15%以上,助力施工项目缩短工期,加快资金周转速度;此外,技术搭载的远程监控功能可实现塔机运行数据的实时传输与故障诊断,便于企业对塔机设备进行集约化管理,提升设备资源利用率,增强企业在建筑工程领域的市场竞争力。

### 结束语

复杂施工环境下塔机的安全高效作业是建筑施工领域的重要研究课题。本文研发的塔机自适应调节技术,通过构建三级技术架构,实现了环境与设备状态的实时感知、调节参数的智能优化与作业姿态的精准控制。实验结果表明,该技术能有效抑制吊物摆动、补偿塔身垂直度偏差、实现障碍物主动避让,提升了塔机在复杂工况下的作业安全性与效率。随着智能建筑技术的发展,自适应调节技术将成为塔机智能化升级的核心方向,为建筑工程的高质量发展提供技术保障。

### 参考文献

- [1]刘灿,侯传晶,李轻.具有精确质量估计的5-DOF塔机定位防摆控制[J/OL].自动化技术与应用,1-8.
- [2]宋世军,朱昆贤,安增辉,等.基于域自适应的塔式起重机结构损伤诊断方法研究[J].起重运输机械,2023,(20):46-52.
- [3]何育民,韩莹,周晶.基于改进果蝇优化算法的塔机自适应滑模控制研究[J/OL].工程设计学报,1-10.
- [4]徐兴杰,方伟名.复杂地基条件下装配式塔机基础施工关键技术[J].四川建筑,2022,42(05):251-254.
- [5]郑利,索志刚,朱正远.复杂场况塔机起重臂分段拆卸施工技术[J].建筑机械化,2020,41(08):32-35.