

通信塔自动吊装装备关键技术与现场应用分析

李慧勇 赵晓冰 许超超

河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450008

摘要: 针对角钢塔、单管塔及拉线塔等通信塔桅天线与RRU安装中传统人工吊装安全风险高、劳动强度大、作业效率低等突出问题,本文提出一种融合轻量化机械设计、多源信息感知与智能控制、云端协同决策的自动吊装装备方案。采用模块化折叠结构设计,主体材料选用航空级铝合金与碳纤维复合材料;集成多传感器融合感知系统,实现作业环境与负载状态的实时监测;基于模型预测控制(MPC)算法,构建吊物-绳索动力学模型,实现抗摆控制;依托5G MEC架构构建“云-边-端”协同系统,实现远程监控与智能调度。

关键词: 通信铁塔施工;智能吊装;轻量化装备;多传感器融合;模型预测控制

引言: 随着5G深度覆盖与6G技术预研推进,通信基站数量已超千万级,施工场景向山区、城区等复杂环境延伸。传统人工吊装存在高空坠落、碰撞风险、对位精度差及人力投入大等缺陷,亟需研发智能化自动吊装装备^[1]。本文针对角钢塔、单管塔、拉线塔的不同特点,设计了一套集轻量化机械、多源感知、MPC抗摆控制和云边协同决策的自动吊装系统,并完成现场应用验证^[2]。

1 需求与技术指标

1.1 施工场景与需求

通信塔桅类型多样,主要包括角钢塔、单管塔、拉线塔等,不同塔型的结构特点与施工环境差异显著。角钢塔结构稳定、承载能力强,吊装需规避塔体角钢遮挡;单管塔结构简洁、占地面积小,设备安装在顶部抱杆,安装空间极为有限,对吊装设备的定位精度与防撞能力要求较高;拉线塔结构轻便,受风力影响大,需便携且环境适应性强。

结合不同塔型施工特点,轻量化智能吊装装备的核心需求可概括为:整机重量控制在15公斤以内,具备单人搬运和快速部署能力,以适应山区、狭窄场地等复杂施工环境;同时需具备强抗干扰能力,能在5级风力下保持吊装平稳无摆,避免摆动引发的碰撞风险;在智能化方面,应集成环境监测、故障预警与远程操控功能,最大限度减少人工直接操作;此外,装备还需广泛兼容不同规格的天线和RRU设备,以满足多样化塔上作业需求。

1.2 核心技术指标

整机重量 $\leq 15\text{kg}$, 现场部署(含组装) $\leq 15\text{min}$ (纯组装 $\leq 2\text{min}$); 额定负载5-100kg, 吊高20-60m; 抗风 ≤ 5 级(风速 $\leq 10.7\text{m/s}$), 最大摆角 $\leq \pm 1^\circ$; 具备超载、过流、倾翻保护, 故障响应 $\leq 1\text{s}$ 。

2 系统总体架构设计

针对通信塔桅施工山区、楼顶等复杂场景,传统吊装低效且安全隐患大,本文设计模块化轻量化智能装备,满足快速部署、安全操作与成本经济要求。

2.1 总体设计思路

针对通信塔桅施工的特殊性,本文提出的智能吊装装备遵循“模块化、轻量化、智能化”的设计原则。设计需满足以下核心需求:

- (1) 轻便易携,适应山区、楼顶等复杂场地的搬运与部署;
- (2) 快速安装,与现有滑轮、大绳系统兼容,部署时间 ≤ 5 分钟;
- (3) 智能操作,具备自动控制与人工干预双重模式;
- (4) 本质安全,集成多重保护机制;
- (5) 成本经济,便于在施工队层面推广应用。

为此,确立的设计目标包括:整机重量 $\leq 15\text{kg}$; 提升速度0-20m/min连续可调;额定负载5-100kg;具备超载、过流、失速等安全保护功能;支持本地与远程双模式控制。

2.2 模块化折叠结构设计

为了实现单兵携带与快速部署,装备的结构设计是关键。

轻量化材料选型: 主体结构采用航空级7075铝合金与碳纤维复合材料。7075铝合金用于承受主要弯矩的基座连接件,具有强度高、韧性好的特点;主体采用碳纤维管材^[3],其密度仅为钢材的1/5,而比强度是钢材的5倍以上,在保证足够刚度的前提下极大减轻了重量。

折叠与自锁机构: 借鉴无人机机臂折叠原理,设计多关节锁紧机构。装备可折叠为三个独立模块(动力模块、控制模块及支架模块),最大单件重量 $\leq 6\text{kg}$ 。总重严格控制在 $\leq 15\text{kg}$ 。展开后通过快锁机构连接,可在2min内完成组装。创新设计的“楔形自锁”装置确保负

载状态下不会因震动而松脱。抱箍式快速固定装置：为解决在不同规格角钢塔主材（角钢边宽50mm-120mm）及单管塔爬梯上的通用固定难题，设计了可调节张角的V型抱爪与高摩擦力橡胶衬垫相结合的固定方式。配合手动加力扳手，可实现10秒内完成与塔材的刚性锁紧，且不损伤塔身镀锌层。

3 传感器融合感知系统

吊装作业的智能化首先依赖于对环境和设备状态的全面感知。针对高空强风、塔身摆动等复杂环境，本文设计了一套多传感器融合感知系统^[4]。

3.1 传感器配置与感知原理

系统集成多种传感器以实现冗余探测和精确测量。

吊物状态感知：在吊钩动滑轮组处集成六维力/力矩传感器，实时检测吊重及吊绳偏角。同时，吊钩内置UWB定位标签，通过与固定在塔身基座上的多个锚点进行测距，计算出吊物相对于塔身的实时三维位置。环境与本体感知：顶端安装高精度风速风向仪，实时监测作业环境风速。根部安装惯性测量单元（IMU），实时监测装备本体的姿态（横滚角、俯仰角）和振动频率，用于判断装备是否因塔身晃动而产生倾斜。视觉辅助感知：前端配置防抖高清摄像头，结合AI视觉识别算法，可识别待安装设备上的特征点，辅助操作员进行毫米级的微调对位。

3.2 多层次安全防护体系

针对高空作业的高风险特性，构建了“硬件-控制-预警”多层次安全防护体系。

硬件级安全：关键执行机构采用冗余设计，制动系统配备电磁制动与机械制动双备份；供电系统集成UPS，所有结构件安全系数 ≥ 2.5 。控制级安全：实现多重软件保护：实时监测电机电流（超载110%报警，130%停机）；双编码器冗余测速；基于三维模型的电子围栏功能，防止碰撞；独立的急停链设计，确保紧急情况下快速制动。智能预警与诊断：基于传感器数据与历史数据，采用随机森林算法构建故障预测模型，可提前预警轴承磨损、电机过热等潜在故障，实现预防性维护。

4 基于 MPC 的智能抗摆控制算法

高空吊装面临的重大技术挑战是“摆”。由于绳索属于柔性连接，在风载和加减速作用下，吊物会产生复杂的单摆或圆锥摆运动，极易碰撞塔体。传统的PID控制在面对这种非线性、时变系统时，抗摆效果不佳。本文引入模型预测控制（MPC）算法^[5]。

4.1 系统建模

首先，建立吊物-绳索的二阶非线性系统动力学模

型。忽略空气阻力的非线性部分，将吊物视为质点，考虑吊臂顶端的运动输入，建立拉格朗日方程。该模型描述了吊臂回转机构的加速度与吊物摆角、摆角加速度之间的关系，为控制器的设计提供了基础。

4.2 MPC控制器设计

MPC的核心思想是利用动力学模型预测系统未来的动态行为，并在满足约束条件（如电机最大转速、吊物允许摆动幅度）的前提下，求解最优的控制输入序列（即电机的驱动速度）。

预测模型：在当前时刻 k ，基于状态变量（吊物位置、速度、摆角），预测未来 $[N, N+n]$ 步内的系统输出。滚动优化：定义目标函数，既要考虑吊物快速到达目标位置（跟踪性能），也要考虑在整个过程中的摆角最小化（抗摆性能），同时控制量变化不能太剧烈（节能与机械磨损）。通过二次规划求解，得到最优控制序列。反馈校正：将控制序列的第一步作用于执行机构。在下一个采样周期，系统根据传感器融合的最新状态，重复上述预测与优化过程，实现滚动优化与实时修正。

4.3 自适应参数调整

考虑到每次吊装的设备重量和绳索长度不同，系统设计了自适应机制。在正式吊装前，系统会进行小幅度的提升测试，通过IMU采集系统的阶跃响应特性，在线辨识出当前的负载质量和阻尼系数，自动更新MPC控制器内部的预测模型参数，确保能获得最优控制效果。

5 基于 5G MEC 的云边协同系统

为实现多设备的远程集群作业监控与智能化管理，本文构建了基于5G MEC的云边协同架构^[6]。

5.1 端-边-云体系架构

端（设备端）：即装备本体，搭载嵌入式工控机（边缘计算节点），负责实时采集传感器数据，运行MPC控制算法，执行电机驱动指令，保证控制的实时性（控制周期 $\leq 10\text{ms}$ ）。

边（边缘节点）：依托基站侧的5G MEC平台。运行重度的视觉分析模型（如施工人员安全帽识别、危险区域闯入检测）和多装备协同调度算法，利用MEC低延迟的优势，将分析结果实时下发至设备端或现场手持终端。云（中心云平台）：汇聚所有站点的施工数据，进行大数据分析，用于装备的故障预测、全生命周期管理以及施工工艺的持续优化。

5.2 远程监控与智能决策应用

基于该架构，开发了可视化的远程操作平台。管理人员可在监控中心大屏上实时查看塔上吊装的第一视角画面、吊物三维轨迹图以及装备的健康状态（如电机温

度、电池电量)。

当系统感知到风速突然增大或吊物摆动异常时,边缘节点立即触发两种决策:若风险较低,则自动调整吊装速度进行抑制;若风险较高,则执行“软急停”并发出告警,同时云平台记录此事件作为安全案例。此外,通过分析历史吊装数据,平台可以智能评估不同塔型的最佳吊装路径,为新手操作员提供标准化作业指引。

6 通信塔桅设备自动吊装现场应用、效果验证与优化策略

本章针对RRU、天线等通信塔桅核心设备的吊装作业,通过对典型施工项目的实测试验,验证装备的应用效果,并针对现场问题提出优化策略。

6.1 工程应用项目概况与试验方案

为了全面验证装备在不同工况下的性能,选取了具有代表性的通信塔施工项目作为试验场景:

城区项目:位于某城市核心商业区,对35米单管塔进行5G天线扩容。需在塔顶抱杆及侧面支架上安装3套64T Massive MIMO AAU天线(重约24.5kg/套)。施工场地仅12m×8m,周边高层建筑及道路狭窄。山地项目:位于某山区基站,对45米角钢塔进行天线替换及RRU拆除。需安装3套8T8R AAU天线(重约29.5kg/套)。施工点海拔600m,进场土路坡度15°,所有设备及工具需人工搬运。

试验方案采用对照试验,以相邻同类塔型、相似工况的传统人工吊装为对照组。评价指标包括:单台天线从抓取到锁紧完成的平均耗时(效率指标)、完成全部吊装所需总作业人数(人力指标)以及安全事件次数与高空作业时长(安全指标)。

6.2 现场施工应用实施流程

场地勘测与装备快速部署:进场前利用无人机或手持扫描设备获取安装点三维模型,自动规划装备站位及吊装路径。到达现场后,装备一键自动展开调平。城区项目由于场地平整,部署时间约8分钟;山地项目因需组装折叠模块,部署时间约15分钟。全自动吊装作业:操作人员在安全区域启动“一键吊装”程序。柔性夹持机构自适应夹紧;卷扬系统以0-20m/min速度缓升,MPC抗摆控制器实时抑制摆动,确保吊物平稳升至安装高度;

由塔上人员手动完成最终安装,实现了“自动吊装、人工辅助锁紧”的协同作业模式。完工自检与转运:全部设备安装完毕后,系统自动通过视觉复核安装姿态,并核对紧固力矩,生成电子验收报告。

6.3 应用效果对比与优势分析

施工效率与人力成本:在城区项目中,自动吊装平均每套设备耗时7分钟,而传统人工吊装平均需15分钟/套。安装全部3套设备,自动吊装总耗时约21分钟,传统方式需约1小时。作业人数由6人减至3人。在山地项目中,自动吊装3h可完成全部3套设备安装,传统方式需1天。综合人力成本降低约50%。

复杂场地适配性:在城区狭小空间内,装备的紧凑尺寸及避障功能可贴近建筑物作业,无需封路。在山地无道路区域,模块化装备的便携性解决了传统人工搬运方式中转场效率低、体力消耗大的痛点。

结束语

本文针对通信塔桅设备安装施工中的突出问题,设计并实现了一套轻量化智能吊装装备。该装备通过碳纤维复合材料与折叠结构实现了 $\leq 15\text{ kg}$ 的单兵便携目标;基于多传感器融合与模型预测控制算法,有效解决了高空强风环境下的吊物摇摆难题;依托5G MEC架构,实现了施工过程的远程监控与数据驱动决策。现场试验验证了其在效率、安全和适应性方面的显著优势,为通信塔桅施工提供了可行的自动化解决方案,具备良好的推广前景。

参考文献

- [1]李娟娟,武潭,王国防,等.面向智能制造的起重智能化关键技术综述[J].机电工程技术,2025,54(15):1-8.
- [2]廖卫芬,赵大江.建筑工程技术中智能吊装与定位技术研究[J].中国房地产业,2025(24):38-42.
- [3]周晓光,吴凯.碳纤维复合材料在轻量化结构设计中的应用[J].材料科学与工程,2022,40(4):601-608.
- [4]陈明,王浩,李响.多传感器融合在工程机械中的应用综述[J].传感技术学报,2023,36(9):1345-1353.
- [5]张伟,刘洋.基于MPC的起重机防摆控制策略研究[J].控制工程,2024,31(6):1120-1127.
- [6]赵刚,孙丽丽.5G边缘计算在工业互联网中的应用[J].通信技术,2024,57(3):45-52.