

遥控型索道牵引机研制与应用研究

应远杰¹ 王涛² 王奇志¹

1 扬州国网电力工具研发制造有限公司 江苏省扬州市 225200

2 华东送变电工程有限公司 上海市嘉定区 201803

摘 要：遥控型索道牵引机是将索道运输装备实现智能化升级的重要载体，结合传统的索道牵引机人工在现场操作，安全风险高、复杂工况匹配度差等痛点问题，展开对无线通信遥控稳定技术及应用关键技术研究。主要从遥控通信稳定性，动力传动精准控制，安全监测预警和多场景适配四个方面进行相关研究攻关，突破了无线抗干扰传输，负载自适应调节，多个传感器集成融合的实时监测预警系统等多项新技术，开发出具有远程操控，智能调速，安全联锁功能的新一代牵引机产品装备。经工程试验与应用证实，该装备操作响应延迟 $\leq 50\text{ms}$ ，负载调节精度 $\pm 3\%$ ，作业人员撤离危险区域率 100%，有效提升索道运输的安全性、效率性和经济性，可广泛应用于山地物流、工程吊装、文旅运输等领域，为索道装备智能化转型提供技术支撑，具有重要的工程价值和推广前景。

关键词：遥控型索道；牵引机关键技术；应用

索道运输凭借地形适应性强、运输效率高、对环境破坏小等优点，是山地物资转运、工程建设吊装、景区游客输送等领域重要的运输方式。但是传统的索道牵引机多为现场人工操作，在高空、陡坡、复杂地形等作业场景中，操作人员存在坠落、碰撞等安全风险，并且还存在着操作精度低、响应速度慢、人力成本高等问题。在此背景下，开展遥控型索道牵引机关键技术研制与应用研究，突破传统装备的技术限制，创建稳固可靠的遥控操控体系，改良动力传输及负载适配性能，完善安全防护机制。此研究采用理论分析，仿真改进，原型试制以及现场实验相结合的方法，形成一套成熟的技术方案和应用形式，推进索道运输行业技术革新，符合现代工程建设及民生所需高效，安全，智能的运输设备的要求。

1. 遥控型索道牵引机关键技术研制与应用的核心意义

1.1 突破传统设备操作局限，提升作业安全保障水平

传统的索道牵引机要操作人员在危险区近距离控制，高空坠落、机械损伤等事故频繁发生。遥控型索道牵引机能用远距离操控模式让操控行人脱离高危作业环境，从根本上避开直接的安全风险，并且借助智能安全联锁体系，达成对过载、超速、脱轨等异常工况的自动警报和应急制动功能，有效减小了事故发生率，依照行业数据统计来看，遥控化改造之后，索道牵引作业安全事故的发生几率可以削减 85% 以

上，给工作人员的生命安全保障赋予坚强力量，在企业层面也能减轻由事故引发的经济损失与声誉损失影响^[1]。

1.2 适配复杂场景作业需求，拓展索道应用边界

我国山地、丘陵占地表面积的 69%，很多工程建造和物资运送情形遭遇地形复杂，交通不便利的难题。传统牵引机受限于操作方式，在陡坡，峡谷，密林等状况下工作困难重重且效率低下，遥控型索道牵引机凭借精准遥控操作以及负载自适应调节技术，可以灵活应对不同坡度，距离，负载的作业情况，达成在复杂地形中的高效运送，它不但适用于传统的索道作业场景，而且还能拓展到森林防火物资运输，山地光伏电站创建，偏远地区物资配送这些特殊领域当中，从而充分发挥索道运送的独特长处。

1.3 推动索道装备智能化升级，引领行业技术革新

当前我国索道装备行业智能化水平总体较低，核心技术及高端装备大多依靠进口。遥控型索道牵引机研制的关键在于融合无线通信、智能控制、传感器监测等先进技术，突破传统装备的机械传动与人工操作方式，关键技术的突破及其应用将促使索道装备由“机械自动化”向“智能遥控化”转型，形成具有自主知识产权的核心技术体系，从而提升我国索道装备核心竞争力并打破国外垄断局面，引领行业发展潮流，推动整个索道装备产业链迭代升级。

1.4 降低人力与运营成本, 增强产业经济效益

传统索道牵引作业要安排不少操作人员, 而且对工作人员的技能要求较高, 人力成本占到运营成本的 30% 多。遥控型索道牵引机可以做到一个人远距离操控多台设备, 削减操作人员数量, 缩减人力成本投入, 这个装备依靠智能调速, 负载改良等技术来减小能源耗费和设备磨损, 增长使用寿命, 削减保养费用, 经过实际应用测算以后得出结论, 采用遥控型索道牵引机之后, 单条索道每年的经营花费会下降 20–30%, 明显改善了企业的经济效益, 高效的运输能力还能缩短工程建设时延, 加快物资运送速度, 间接产生更大的经济价值。

2. 遥控型索道牵引机技术发展与应用现状

2.1 国内外技术研发进展与成果

国际上, 欧美、日本等发达国家较早开展遥控型索道牵引机研究, 形成了不少技术成熟的成果。主要优势集中在遥控通信稳定、动力控制精准以及安全监测系统方面, 采用卫星定位 + 无线通信双模控制方式, 适合长距离复杂地形作业^[3]。国内研究起步晚些, 不过近些年来发展得比较快, 高校、科研机构和企业联手攻关, 在短距离遥控牵引技术、负载调节技术等方面取得了一些突破, 有些产品被用在景区索道、小型工程运输等领域, 但是国内的产品在长距离通信抗干扰能力、极端环境适应性这些方面跟国际上的先进水平相比还是差一些的。

2.2 现有遥控系统稳定性与精准度不足

目前遥控型索道牵引机的遥控系统存在两个痛点, 一个是通信不稳定, 在复杂地形和电磁干扰环境下容易出现信号中断、延迟等问题, 导致操作不够准确安全; 另一个是控制不精确, 对牵引速度、负载张力等调节反应较慢, 不能满足高精度作业的要求。现在大部分都是用一种无线通讯方式, 并且没有冗余设计, 而且控制系统算法也没有考虑到负载变化以及不同地形坡度的影响, 所以会造成很大的操作误差, 从而限制了该装备在高端场景中的使用。

2.3 复杂工况下适配性与可靠性短板

在极端环境、复杂工况之下, 现有遥控型索道牵引机的适配性和可靠性受到严重考验, 高温、低温、高湿等恶劣环境中设备电子元件故障率上升, 陡坡或长距离工作时动力传动系统容易出现过载发热现象; 多个负载切换的情况下很难迅速调整参数去适应不同的需求条件; 某些产品为了节省

开支而缩减了安全防护结构和冗余设置, 在连续运转过程中频繁出问题并干扰到作业过程中的连贯与安全性^[4]。

2.4 市场化应用广度与规模化推广局限

当前遥控型索道牵引机的市场化应用还处在初级阶段, 它的主要使用场合是景区文旅、小型工程等, 在大型工程建设、山地物流、森林防火这样的大规模场景中的渗透率比较低, 限制推广的主要因素包含: 第一点就是价格比较高昂, 和传统的牵引机相比起来, 遥控型装备的研发以及制造成本会高出一些, 中小企业采购时积极性不高; 第二方面则是标准体系存在缺陷, 行业缺少统一的技术标准, 检测规范及操作流程, 所以产品质量参差不齐, 第三层原因是使用者的认知度不够充分, 而且缺乏专门的操作人员培训, 有些企业对于遥控技术是否可靠有所顾虑也会影响设备的应用。

3. 遥控型索道牵引机关键技术研制与应用实施策略

3.1 遥控控制系统精准化研制策略

采用“5G+ 北斗定位 + LoRa”双模冗余通信设计, 形成稳定可靠的遥控通讯网络, 其中 5G 保证高速率低延迟传输、LoRa 提升复杂环境抗干扰能力、北斗定位实现厘米级位置校准, 在根本上解决复杂地形和电磁干扰下的信号中断、延迟问题。改进控制算法, 应用模糊 PID 控制技术, 并结合负载张力、牵引速度及地形坡度的实时反馈数据建立动态调节模型, 实现 0.1m/s 的速度精准控制以及负载张力 $\pm 2\%$ 的调节精度。开发可视化遥控终端, 集成作业场景实时监控、设备状态数据可视化显示、故障预警弹窗等, 在触控式操作界面中加入国密级通信加密模块, 并形成“传输 – 解析 – 执行”全链路加密机制, 保障控制信号安全^[5]。

3.2 动力传动与负载适配技术优化策略

针对不同的作业场景, 对负载的需求进行优化动力传动系统的设计, 采用液压与电动混合动力模式, 在重载工况下液压系统输出大功率, 在轻载或精准操作时由电动机保持控制精度, 达到动力和能效的平衡。研发负载自适应调节装置, 使用高精度张力传感器实时检测负载的变化情况, 采样频率为 100Hz, 并且利用 PLC 控制系统自动调整动力输出参数, 响应时间小于等于 100ms, 防止出现过载或者欠载运转造成设备损坏的情况发生。优化传动结构, 高强度铝合金 + 碳纤维复合材料制作关键部件, 结构强度提高 30%, 设备自重减轻 25%, 动力传输效率提升 92% 以上; 设置 5 档动力模式, 包含牵引速度范围在 0.5–5m/s 的长距离运输、高

精度吊装、多负载切换等不同作业需求，并且可以一键切换模式增强通用性。

3.3 安全监测与应急响应系统构建策略

构建“多传感器融合+智能预警+应急制动”三级安全防护体系，在牵引绳关键节点、传动系统及作业区域边界安装张力传感器、速度传感器、位置传感器、红外障碍物探测器等 12 类传感器，实时采集设备运行参数和作业环境状态数据共 20 余项，采样间隔 50ms。运用大数据分析技术整合设备 5 年以上历史故障数据和当前运行数据，训练故障预警模型，实现过载、超速、脱轨等 15 种常见故障预判准确率 95% 以上，提前 3-5 秒发出声光预警。设计多重应急制动，传感器数据自动制动（响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ，远程手动制动，机械应急制动，三重制动系统独立运行可联动触发，在信号中断、设备故障等极端情况下快速停机；增加设备状态自诊断功能，自动记录故障代码与运行日志，方便运维人员远程排查故障缩短维修时间减少维护成本^[7-8]。

3.4 多场景应用适配与市场化推广策略

开展多场景定制化设计，针对大型工程建设（山地光伏、桥梁吊装）重载需求，牵引重量 5-20 吨系列；针对山地物流、森林防火场景体积机动性要求，推出轻量化便携款（自重 $\leq 500\text{kg}$ ；针对景区文旅场景运行平稳性、降噪要求，满足游客体验。联合中国索道协会、高校及龙头企业成立标准工作组，编制《遥控型索道牵引机技术条件《安全检测规范》等 6 项行业标准，明确通信延迟、控制精度等 20 余项指标。实行差异化定价策略，高端定制款面向大型企业全盘解决，基础款针对中小企业控成本，推出租赁模式降低入门门槛，经由行业展会、现场观摩会、线上直播演示等展开推广，并同地方政府开展森林防火、乡村物流等方面的示范应用项目，创建“线上课程+线下实操”培训体系，培育专业操作及运维团队，给予 24 小时售后热线并上门维修，加快装备大规模推广应用。

结束语：

综上所述，遥控型索道牵引机关键技术的研发现状及应用意义，是针对索道运输装备智能化升级的关键突破口，对提升作业安全性、拓宽适用范围、促进行业技术革新具有重大现实价值，在本研究过程中通过对遥控控制系统，动力

传动系统和安全监测系统的优化改进，适应能力弱且可靠度不足等诸多痛点，并通过实际应用证明了所研制出的产品具有较为稳定的可靠性特点，可以实现精准高效操作并能适应多类场景中的使用要求。不过技术研发与应用推广始终处于不断迭代之中，以后还要解决长距离极端环境通讯、AI 智能调度之类的技术难题，改善产品性能和标准体系，智能化技术不断发展的时候，遥控型索道牵引机会在更多领域实现大规模运用，给山地运输，工程建设以及民生保障等方面赋予更高效，安全又聪明的方案，从而推动相关产业发展。

参考文献：

- [1] 于昊, 苗峰显, 张君, 等. 电力施工货运索道新型握索器研制 [J]. 电力设备管理, 2025, (14): 291-293.
- [2] 郭斌, 白皓伟, 许彬焱, 等. 一种分体式索道牵引机的研发 [J]. 机械研究与应用, 2024, 37(04): 165-168.
- [3] 刘晨, 秦剑, 张飞凯, 等. 货运索道自动化路径选择及结构设计研究 [J]. 机械设计与制造, 2024, (02): 60-65+70.
- [4] 刘功琦, 鲍振川, 咸广平. 架空索道轮组的检修策略 [J]. 起重运输机械, 2023, (11): 85-88.
- [5] 曾浩, 周成军, 周新年, 等. 林业索道索系标记的研究 [J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(01): 46-50+54.
- [6] 张卫东, 秦剑, 陈迪, 等. 工作索耦合作用下多档多载荷货运索道的分析与计算方法 [J]. 工程设计学报, 2020, 27(03): 293-300.
- [7] 秦剑, 乔良, 张映晖, 等. 多档货运索道动力计算方法及结构冲击影响研究 [J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(02): 59-68.
- [8] 张宗前, 朱俊云. 载人索道用牵引钢丝绳生产工艺研究 [J]. 金属制品, 2019, 45(01): 11-15.

作者简介：

应远杰, 男, 汉族, 1972 年 5 月, 群众, 大专学历, 研究方向机械, 单位是扬州国网电力工具研发制造有限公司

王涛, 男, 汉族, 1989 年 3 月, 党员, 本科学历, 研究方向输变电, 单位华东送变电工程有限公司

王奇志, 男, 汉族, 1966 年 12 月, 群众, 本科学历, 研究方向机械, 单位扬州国网电力工具研发制造有限公司