

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.020

引用格式:李英子,许红胜,李明,等.大吨位缆索吊机智能控制系统开发研究[J].公路与汽运,2025,41(1):102-105.

Citation:LI Yingzi,XU Hongsheng,LI Ming,et al.Development research of intelligent control system for large tonnage cable hoist[J].Highways &amp; Automotive Applications,2025,41(1):102-105.

# 大吨位缆索吊机智能控制系统开发研究\*

李英子<sup>1</sup>,许红胜<sup>1</sup>,李明<sup>2</sup>,廖万辉<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学,湖南长沙 410114;2.贵州省公路工程集团有限公司,贵州贵阳 550008)

**摘要:**缆索吊机是山区大跨度桥梁建造中的常用非标准特种设备,传统的分系统独立控制和人工干预的设备运行管理方式难以满足工程建设安全风险控制需求。文中依托具体工程,利用故障树分析法分析影响缆索吊机安全运行的风险因素,确定主要监测参数,据此开发缆索吊机参数智能监测系统;结合缆索吊机安全运行控制对策分析,提出缆索吊机智能控制策略及控制系统。

**关键词:**桥梁;缆索吊机;智能控制;拱桥;预制安装

中图分类号:U445.38

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)01-0102-04

近年来,随着施工技术和工程材料的发展,缆索吊机系统在负载能力和施工跨度等方面取得了较大突破,在山区大跨度桥梁建设中得到广泛应用。随着缆索吊机负载吨位和跨度的增大,传统的行走、起吊子系统独立运行和人工干预的设备管理方式已难以满足施工安全风险控制需要,对缆索吊机智能控制系统的研究不断拓展和深入。王连彬介绍了华丽(华坪—丽江)高速公路建设中采用的缆索吊机集中控制方法<sup>[1]</sup>。方乃平等研究了秭归长江公路大桥重型缆索吊机控制系统设计<sup>[2]</sup>。彭建伟等介绍了重庆菜园坝长江大桥缆索吊系统的组成和造价<sup>[3]</sup>。许多学者对缆索吊系统风险进行了分析,如丁亚辉、田国兵等探讨了缆索吊机施工安全风险的相关控制措施<sup>[4-5]</sup>;邓俊等介绍了大跨径桥梁缆索吊系统质量控制方法<sup>[6]</sup>。总体而言,目前国家标准缺乏对缆索吊系统安全风险控制的相关规定,已有缆索吊机智能控制系统存在造价较高、系统复杂等问题。本文基于贵州省渔塘大桥缆索吊机施工,通过对缆索吊机运行安全风险的分析确定缆索吊机关键控制参数,在此基础上研究缆索吊机控制律,进行缆索吊机智能控制系统开发。

## 1 背景工程

渔塘大桥为贵州省首座钢管劲性骨架外包混凝土上承式拱桥,桥梁全长 284.3 m,桥面全宽 12 m,

净跨径为 200 m,净矢跨比为 1/5,拱轴系数为 1.988。图 1 为该桥实景,图 2 为该桥缆索吊机施工情况。



图 1 渔塘特大桥建成照片



图 2 渔塘特大桥缆索吊机工作照片

## 2 大吨位缆索吊机运行风险分析

### 2.1 影响缆索吊机运行安全的因素

根据文献调查分析结果,影响缆索吊机运行安全的因素大体分为环境因素、设备因素、人为控制三类。将各因素发生频率分为 7 级,分别为极少、很少、较少、常见、较多、普遍、非常普遍,对应频率值为 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40、0.60、0.80。根据相关专

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878073)

家问卷调查结果,分析影响大吨位缆索吊机运行安全的主要因素(底事件)及发生频率,结果见表 1~3。

表 1 影响大吨位缆索吊机运行安全的环境因素

影响因素	发生频率
6 级以上大风天气施工 $X_1$	0.10
夜间施工照明强度低 $X_2$	0.05
施工温度过低 $X_3$	0.10
能见度低、雨雪天气 $X_4$	0.20
施工地区地质稳定性差 $X_5$	0.05
汛期对施工作业面的影响 $X_6$	0.05

### 2.2 影响缆索吊机安全的故障树分析

通过分析缆索吊机运营期间各种故障的分类和层次关系,建立影响渔塘大桥缆索吊机运营安全的故障树,采用布尔运算法则对故障树进行最小割集计算<sup>[7]</sup>,分析对缆索吊机运营安全影响较大的因素和事故模式,结果见图 3。从图 3 可看出:影响大吨位缆索吊机运行安全的最小割集达 13 个,即存在 13 种影响缆索吊机运行安全的事故模式。

分析上述 13 种事故模式的发生概率,发生概率较大的前 8 种事故模式见表 4。

## 3 智能监控系统设计

### 3.1 缆索吊机关键控制参数

缆索起重机电气控制系统是由综合监测(人机

表 2 影响大吨位缆索吊机运行安全的设备因素

影响因素	发生频率
承载索锈蚀 $X_7$	0.05
加劲梁自质量偏差 $X_8$	0.10
起重绳、跑车绳打搅 $X_9$	0.10
承载索超载 $X_{10}$	0.05
承载索安装垂度的影响 $X_{11}$	0.10
卷扬机零部件松动、固定不牢 $X_{12}$	0.10
承重绳卡滑动 $X_{13}$	0.20
支护不当、索头碰撞 $X_{14}$	0.05
承重绳磨损、断丝 $X_{15}$	0.30
起重绳工作不同步 $X_{16}$	0.20
塔架较大偏移 $X_{17}$	0.30
导向滑车出现变形 $X_{18}$	0.02

表 3 影响大吨位缆索吊机运行安全的人为控制因素

影响因素	发生频率
人员指挥不当 $X_{19}$	0.20
施工信号不统一 $X_{20}$	0.05
卷扬机断电 $X_{21}$	0.10
卷扬机调吊速度过大 $X_{22}$	0.10
负载过大、电机电流过大 $X_{23}$	0.05
线路短路故障 $X_{24}$	0.05
电机非正常工作 $X_{25}$	0.20
钢丝绳走线超行程限位 $X_{26}$	0.05

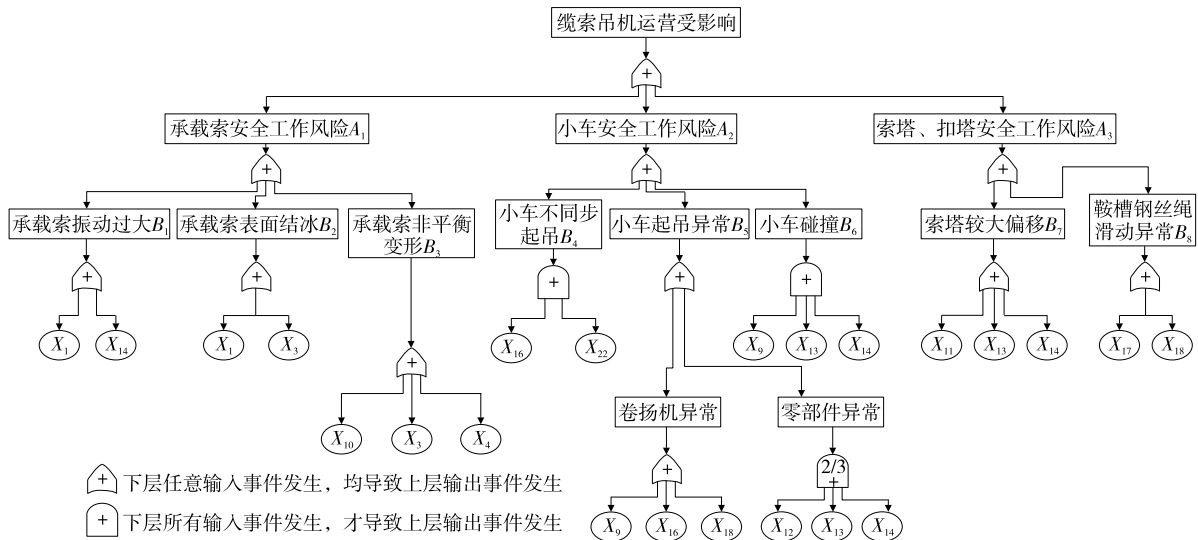


图 3 大吨位缆索吊机故障树分析

界面)+PLC 可编程逻辑控制器+ABB 变频传动组成的三级系统<sup>[8]</sup>,三级之间通过 PROFIBUS-DP 总

线通信实现数据交换。缆索吊机主要事故模式的监测参数及控制措施见表 5<sup>[9]</sup>。

表 4 大吨位缆索吊机运行主要故障模式

最小割集	事故模式	发生概率
$X_1 + X_{14}$	承载索振动过大	0.100
$X_1 + X_3$	承载索表面结冰	0.010
$X_{10} + X_3 + X_4$	承载索非平衡变形	0.200
$X_{16} \cdot X_{22}$	小车起吊不同步	0.020
$(X_9 + X_{16} + X_{18}) + (X_{12} \cdot X_{13} + X_{12} \cdot X_{14} + X_{13} \cdot X_{14})$	小车起吊异常	0.200
$X_9 \cdot X_{13} \cdot X_{14}$	小车碰撞	0.001
$X_{11} + X_{13} + X_{14}$	索塔较大偏移	0.200
$X_{17} + X_{18}$	鞍槽钢丝绳滑动异常	0.300

### 3.2 智能控制系统框架

由于目前缆索吊机的运行跨度、吊装质量均有较大提升,在使用地形、气候条件较复杂的情况下,采用传统控制方法难以保证吊装系统的安全运行<sup>[10]</sup>。同时缆索吊机使用中会受到设计计算、材料性能、缆索吊机安装精度、吊装环境及作业人员操作不规范等确定和不确定因素(误差)的影响<sup>[11-15]</sup>。为确保缆索吊机安全运行,采用信息化手段,利用各类传感器采集现场数据,操作人员通过智能控制系统进行施工控制。缆索吊机智能控制系统框架见图 4。

表 5 缆索吊机主要事故模式的相应控制律

事故模式	监测参数	控制措施
承载索表面结冰	承载索表面温度	温度接近 0 ℃ 时,系统报警;超过 41.6 ℃ 时,温度指示开关断开,切断控制电源停机;夏季温差控制在 20 ℃ 以内
承载索振动过大	小车内部振动频率	利用变频电机使电动机按照 PLC 具体频率运转
鞍槽钢丝绳滑动异常	实时监控钢丝绳运行状态	视频监控钢丝绳运行状态
索塔较大偏移	视频监控塔架偏移	塔架上安装棱镜,利用全站仪实时观测塔架偏移。塔架向中跨最大偏移量(85 mm)满足 1/400 塔高的要求
承载索非平衡变形	小车轮子压力传感器	实时监控小车车轮上压力传感器数值,超过限定值时紧急制动
小车起吊不同步	起重索走线长度	调整起重索走线长度,保证小车起吊一致性

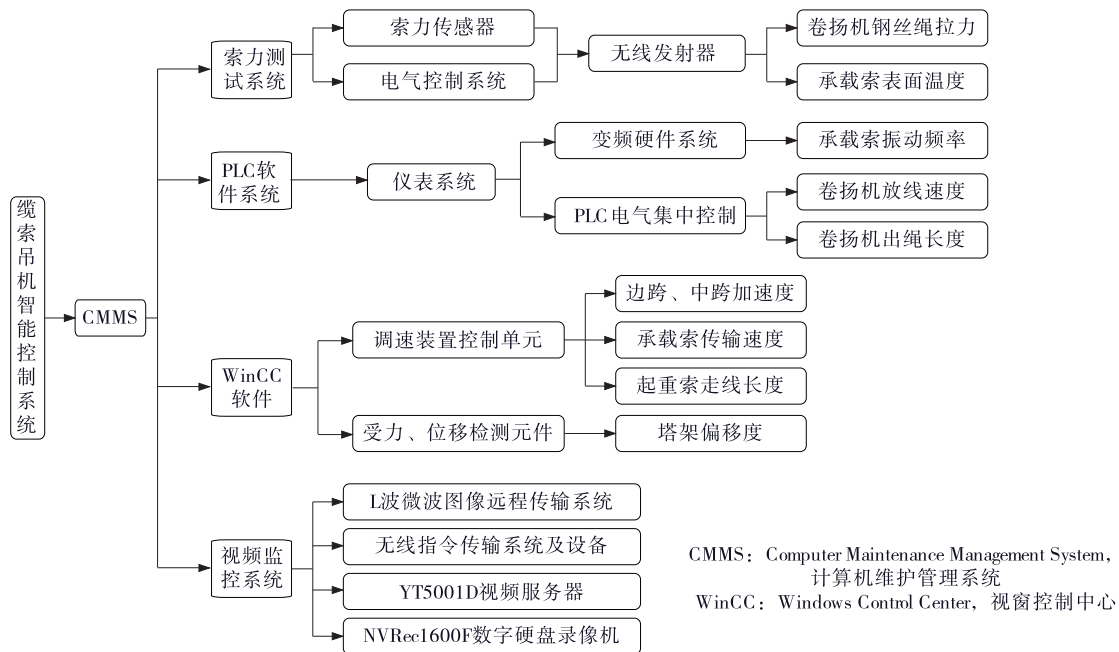


图 4 缆索吊机智能控制系统框架

### 3.3 智能预警机制

为保障大吨位缆索吊机的精确和安全运行,利用现代控制技术和信息化手段,结合各类传感器采

集现场数据,针对大吨位缆索吊机运行主要故障模式,研发缆索吊机智能预警系统。表 6 为缆索吊机智能预警机制。

表 6 缆索吊机智能预警机制

事故模式	预警机制
承载索表面结冰	温度低于 1.5 °C 时系统报警;低于 -1.0 °C 时开关断开,切断控制电源停机
鞍槽钢丝绳滑动异常	鞍槽钢丝绳走丝量超过 10 mm 时,系统报警
索塔较大偏移	索塔偏移量超过理论偏移值 10 mm 时,触发报警机制
承载索振动过大	利用小车上激光测距系统监测承载索的振动,振幅超 0.5 mm 时触发警报
小车起吊不同步	起重索起吊长度超过 25 mm 时触发预警

#### 4 智能控制系统的运行效果

将上述智能控制系统应用于渔塘大桥缆索吊机施工,运行效果见表 7,达到了预期目标。

表 7 缆索吊机智能控制系统的运行效果

项目	运行效果
最大位移	缆索吊机顺利完成了“扣吊合一”的施工任务,吊装过程中索塔的最大位移为 13 cm,与仿真结果基本吻合
实时监控	通过采用监测技术,实现了 1 600 h 无故障运行;实时监控吊点高度,精确到 0.01 m;实时监控跑车在主索上的位置,保证跑车始终在塔前 15 m 外运行;监控跑车的平面位置,精确到 0.01 m
提高工效	PLC 电气集中控制系统完成 16 台卷扬机多工况吊装操作,吊装过程安全、可靠,提高了工效
纠正索塔偏移	通过主动纠正索塔偏移,达到了拱桁悬拼精度要求,索塔塔顶最大偏位在 2 cm 以内,且成桥线形与预测线形之间的误差减小

#### 5 结语

根据渔塘大桥的实际情况,利用故障树分析法研究并确定影响缆索吊机安全运行的关键风险参数,通过研究主要安全风险的控制律,确定相关监测参数和控制参数,在此基础上开发缆索吊机参数智

能监测和预警系统,实现缆索吊机智能控制。将缆索吊机参数智能监测系统和缆索吊机智能控制系统应用于渔塘大桥工程施工,取得了良好效果,验证了其有效性和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 王连彬.缆索吊集中控制研究[J].起重运输机械,2019(13):129-131+140.
- [2] 方乃平,许鑫,王帅.秭归长江公路大桥重型缆索吊机设计[J].桥梁建设,2022,52(1):116-123.
- [3] 彭建伟,李多修.4 200 kN 缆索吊设计施工及工程造价分析[J].铁路工程造价管理,2007,22(2):1-4+40.
- [4] 丁亚辉,沈冲.悬索桥缆索吊设计及使用安全技术[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(9):212-215.
- [5] 田国兵,杨杰,徐量,等.悬索桥上部结构缆索吊机施工安全风险控制措施[J].公路,2020,65(12):107-111.
- [6] 邓俊,李相松.大跨径桥梁缆索吊系统质量控制方法研究[J].公路交通技术,2021,37(5):56-62.
- [7] 孟云,许红胜,颜东煌.面向管养需求的大跨径悬索桥健康监测系统设计研究[J].中外公路,2017,37(5):179-183.
- [8] 杨宇辉.大跨度悬索桥加劲梁缆索吊系统技术及实际应用[J].智能城市,2021,7(16):153-154.
- [9] 金正川.三峡库区大型悬索桥钢箱梁吊装跨缆吊机与缆索吊方案比选[J].交通世界,2020(32):112-113.
- [10] 杨博,郭瑞,施昊.阳宝山特大桥缆索吊设计与施工关键技术研究[J].公路,2022,67(1):193-199.
- [11] 陈艾荣,姜一凡,张其玉,等.带吊机钢桥塔施工状态抖振响应及风振舒适性研究[J].桥梁建设,2021,51(5):20-28.
- [12] 付雷,阎武通,王玉倩.贵州地区在役桥梁安全风险源调研分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016(11):186-188.
- [13] 黄绍结,李莘哲.赤水河特大斜拉桥中跨钢主梁缆索吊装施工关键技术[J].中外公路,2017,37(3):152-156.
- [14] 许红胜,颜东煌,冉贺学.桥梁施工缆索吊机承载索的设计研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009,28(5):837-839.
- [15] 张胜利,王凤存,丁亚辉.缆索吊在山区悬索桥施工中的研究与应用[J].公路,2017,62(6):122-125.

收稿日期:2022-10-26