

输电线路货运索道运行过程监测系统设计

刘晨¹, 秦剑¹, 张飞凯¹, 陈玮雨², 任孝武³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003;
3. 北京智芯微电子科技有限公司, 北京 100089)

摘要: 针对输电线路货运索道施工运行情况和部件受力状态难以全面直观了解等问题, 设计了货运索道运行过程监测系统, 基于无线自组网技术并集成拉力传感器、高精度定位模块和无线自组网设备, 实现包括货运索道运行过程承载索张力、转向滑车载荷、运行小车载荷、运行位置、物料运输速度等监测数据实时采集和传输。结合货运索道精细化计算方法计算货运索道运行过程工作索张力, 并与监测数据进行对比分析, 可视化展示货运索道运行监测数据及影像数据, 实现施工过程货运索道运行状态实时监测。通过输电线路工程中的验证试验, 验证了输电线路货运索道运行过程监测系统的有效性和准确性, 为货运索道施工过程运行安全提供技术支持。

关键词: 输电线路; 货运索道; 物料运输; 监测系统; 无线自组网; 高精度GPS定位

中图分类号: TM 726 文献标志码: A 文章编号: 1672-5581(2025)02-0304-05

Design of monitoring system for transportation of material ropeway of transmission line

LIU Chen¹, QIN Jian¹, ZHANG Feikai¹, CHEN Weiyu², REN Xiaowu³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, Fujian, China; 3. Beijing Zhixin Microelectronics Technology Company, Beijing 100089, China)

Abstract: A monitoring system for transportation of material ropeway of transmission line is designed for the difficulty in fully understanding the construction process and component stress state of material ropeway of transmission line. Based on wireless ad hoc network technology, tension sensors, high-precision positioning modules, and ad hoc network devices are integrated to achieve real-time collection and transmission of monitoring data for material ropeway transportation, such as tension of carrying rope, load of steering pulley, load of running car, position of running car, speed of material transportation. By combining the refined calculation method of material ropeway, the tension of the working rope during the transportation process of the material ropeway is calculated, which is compared with the monitoring data, and the visual display of the monitoring data and image data of the material ropeway transportation is achieved to realize the real-time monitoring of the material ropeway transportation status during the construction process. Through verification tests in transmission line engineering, the effectiveness and accuracy of the monitoring system for transportation of material ropeway of transmission line have been verified, which provides technical support for the transportation safety during the construction of the material ropeway.

Key words: transmission line; material ropeway; material transportation; monitoring system; wireless AD hoc network; GPS positioning

目前在输电线路工程中, 山区物料运输主要采用货运索道运输方式, 其具有结构简单、操作简便、适用性强、工效高、受天气及环境影响小等优点^[1-2]。在货运索道运输过程中, 由于索道长度较

大,且一般跨越多个山丘,架设支架间距大,各支架处无人看管,只能在部分支架附近观察其运行状态,难以全面直观了解货运索道运输情况,存在施工安全隐患。

输电线路施工货运索道使用较为频繁,索道各部件均为受力部件,使用过程中易磨损、变形。同时,大型塔材单件质量大、长度大,对钢丝绳的承载能力、转向滑车强度、运行小车运行高度等均提出了更高的要求。目前货运索道施工中缺乏工作索张力、运行小车运行位置等货运索道运行连续实时数据采集装备,无法实时监测货运索道运行安全状态,无法对货运索道运行风险进行及时预警^[3-4]。

针对智能装备监测领域,国外 Peterka 等^[5]通过无损探伤技术,实现对索道牵引钢丝绳疲劳断裂情况的监测。国内王佳琦等^[6-8]针对客运索道采用无线传输技术研究客运索道缆车监测系统;江明等^[9-10]通过集成空间姿态、载荷等参量传感监测单元设计了适用于输电线路施工的放线滑车监测系统,实现包括放线滑车的三轴姿态角度、空间位置及载荷信息等多参量数据监测。

为防止输电线路货运索道运行过程出现脱索、支架倾覆等安全事故发生,本文设计输电线路货运索道运行过程监测系统,通过集成传感器等设备感知索道运行过程中各状态信息,同时研究适用于山区施工用的通信网络系统,保证通信通畅、施工反应及时,实现货运索道施工过程监测。通过输电线路工程试验验证输电线路货运索道运行过程监测系统的有效性和准确性。

1 系统结构设计

输电线路货运索道运行过程监测系统用于实时监测货运索道运行安全状态,包括货运索道重要部件受力状态和运行过程状态,可实现状态异常及时报警功能。系统分为3个模块:数据采集模块、数据传输模块、数据展示模块。

1.1 数据采集模块

数据采集模块集成传感器和摄像头,用于实时采集货运索道运行过程监测参数,包括力学数据、位置数据和影像数据。

(1) 力学数据,包括货运索道承载索张力、转向滑车载荷、运行小车载荷。

(2) 位置数据,包括运输物料运行位置、物料运输速度。

(3) 影像数据,包括货运索道部件缺陷照片、索道运行过程视频。

1.2 数据传输模块

用于在无线网络环境下将数据采集模块采集的索道运行过程监测参数传输至数据展示模块。

1.3 数据展示模块

用于将采集到的货运索道运行过程监测参数进行存储,可视化展示货运索道运行过程的力学数据、位置数据、影像数据和索道运行状态计算结果数据,实现货运索道运行状态实时监测,在发生危险状况时发出报警。

2 系统硬件设计及数据传输方案

2.1 数据采集模块选型

2.1.1 力学数据

货运索道承载索张力、转向滑车载荷、运行小车载荷为力学数据,采集方式选用拉力传感器。根据常用施工工况得到载荷范围,确定传感器型号,见表1。

表1 力学测量设备参数表

Tab.1 Parameters of mechanical measurement equipment

序号	型号	数量/ 个	精度 FS/%	备注
1	10 t	2	0.3	测量索道承载索张力,包括首端和末端
2	5 t	2	0.3	测量转向滑车载荷(牵引索通过转向滑车包络角按90°计算,转向滑车载荷为1.4倍牵引索载荷),包括首端和末端
3	3 t	1	0.3	测量运行小车载荷(运输物料载荷)

拉力传感器配备锂电池和无线收发器。拉力传感器通过有线连接,锂电池用于提供电源,无线收发器用于收发传感器采集数据。拉力传感器通过集成采集板与有源蜂鸣器集成实现超载报警功能。

2.1.2 位置数据

位置数据包括经度、纬度和海拔,采集方式选用北斗定位装置。货运索道路径常跨越山头,路径通道两侧有灌木、树林等。位置数据采集设备需满足多山头、长距离,在途径通道两侧有遮挡等工况下,实时获取高精度坐标数据。为满足位置数据传输实时性和高精度要求,研发定位装置由北斗 GPS 卫星高精度定位模块和自组网设备组成,可实现数据传输和定位功能。

(1) 高精度定位模块。

高精度定位模块采用 K8-W 北斗 GPS 卫星高精度定位全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)模块,模块参数见表2。

表2 高精度定位模块参数表

Tab.2 Parameters of high precision positioning module

序号	项目	技术参数	
1	定位装置水平距离 L 精度	SPP	RTK
		1.5 m	8 mm
2	定位装置垂直距离 H 精度	SPP	RTK
		3 m	15 mm
3	通信方式	系统采用自组网方式	
4	无线传输距离	2 000 m	

注:串行端口配置文件(serial port profile, SPP);实时动态载波相位差分技术(real-time kinematic, RTK)。

(2) 自组网设备。

选用无线自组网设备实现自动组网,通过无线自组网基站信号覆盖实现监测数据采集。自组网设备由一个基准站模块、多个中继站模块和一个移动终端模块组成。

表3 货运索道运行过程监测系统装置采集数据

Tab.3 Data collection by device of monitoring system for transportation of material ropeway of transmission line

序号	设备名称	设备组成	采集数据	备注
1	运行设备	运行小车拉力传感器、移动终端模块(含高精度定位模块、摄像头),并集成电池、数据采集单元	1.运行小车载荷	运行小车拉力数据
			2.运行位置和物料运输速度	高精度定位模块数据
			3.影像数据	—
2	首/末端设备	索道上、下料点处首/末端拉力传感器(承载索、转向滑车)、基准站模块,并集成电池、数据采集单元	1.承载索张力	承载索拉力数据
			2.转向滑车载荷	牵引索拉力数据
3	中继站设备	中继站模块,并集成电池、数据采集单元	传输运行设备、首/末端设备数据	—

自组网设备为运行设备、首/末端设备及视频监控摄像头传输数据提供数据通道,如设备相隔距离较远、信号弱时,可适当增加中继站设备,以满足网络覆盖需要。货运索道运行过程监测系统装置布置如图1所示。

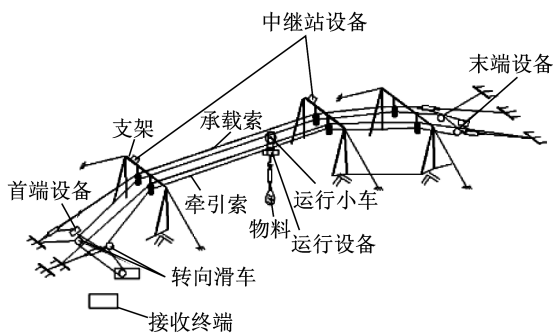


图1 货运索道运行过程监测系统装置布置

Fig.1 Schematic diagram of the layout of the monitoring system for transportation of material ropeway of transmission line

3 系统软件设计

货运索道运行过程监测系统根据货运索道运

基准站模块和中继站模块由基站、基站天线和电池模块组成,用于数据传输。移动终端模块集成摄像头和高精度定位模块,用于定位。

2.1.3 影像数据

影像数据为照片和视频,采集方式选用高清摄像头,选用型号为DS-2DE2D40IW-D3/W/XM,视频采集分辨率1080P,支持录像、拍照、4倍数字变焦,可360°旋转。

2.2 数据传输及装置布置方式

货运索道运行过程监测系统装置包括首端设备、末端设备、运行设备、中继站设备,通过自组网设备实现无线网络覆盖货运索道架设区域,将货运索道运行过程中的力学数据、位置数据、影像数据传输至接收终端,实现货运索道运行过程的实时监测,货运索道运行过程监测系统装置采集数据见表3。

行过程存储采集数据,可视化展示承载索张力、转向滑车载荷、运行小车载荷、运行小车运行位置、物料运输速度等监测数据和索道运行状态计算结果数据,并展示货运索道运行过程影像数据,实现货运索道运行状态展示。系统由数据采集层、传输网络层、应用层构成,系统拓扑结构如图2所示。

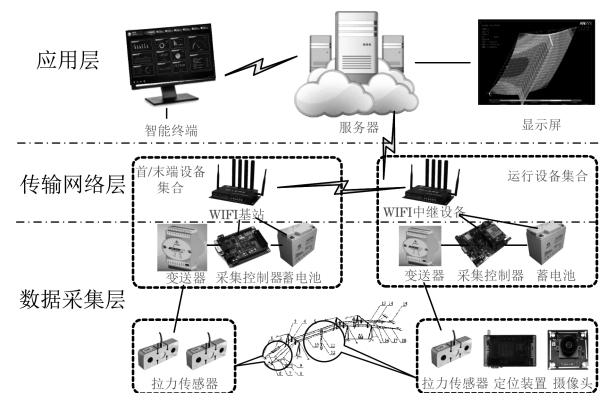


图2 货运索道运行过程监测系统拓扑结构

Fig.2 Extension structure diagram of the monitoring system for transportation of material ropeway of transmission line

货运索道运行过程监测系统软件包含2个模块,

分别是货运索道运行过程监测平台和 Matlab-server。

(1) 接收终端货运索道运行过程监测平台负责接收并存储货运索道现场采集的实时数据,实时展示索道监测数据及设备告警信息,调用 Matlab-server 的远程方法调用(remote method invocation, RMI)服务。

(2) Matlab-server 负责提供 RMI 服务接口,调用 Matlab 工具并且根据监测数据,结合货运索道精细化计算方法^[11-14]计算索道运行状态计算结果数据,包括货运索道首、末端处工作索张力,保存至数据库。

3.1 工作索张力计算

通过计算可以得到受重力作用工作索各索段的跨距 L 与高差 H 可表示为

$$L = \frac{F_H}{q} \left[\frac{qs}{EA} + \operatorname{asinh} \frac{F_{VB} + qs}{F_H} - \operatorname{asinh} \frac{F_{VA}}{F_H} \right] \quad (1)$$

$$H = \frac{F_{VB}^2 - F_{VA}^2}{2qEA} + \frac{F_H}{q} \left(\sqrt{1 + \frac{F_{VB}^2}{F_H^2}} - \sqrt{1 + \frac{F_{VA}^2}{F_H^2}} \right) \quad (2)$$

式中: q 为索单位重力, N/m ; EA 为截面面积与弹性模量乘积, N ; s 为索段初始长度, m ; F_H 为索段水平张力, kN ; F_{VA} 为 A 点垂直张力, kN ; F_{VB} 为 B 点垂直张力, kN 。

工作索索段的 A 、 B 点切向张力 F_{TA} 、 F_{TB} 可表示为

$$F_{TA} = \sqrt{F_H^2 + F_{VA}^2} \quad (3)$$

$$F_{TB} = \sqrt{F_H^2 + F_{VB}^2} \quad (4)$$

通过式(3)和式(4)的计算得到索道运行状态计算结果数据。

3.2 数据接收及对比展示

货运索道运行过程监测系统数据接收及对比执行步骤流程如图3所示。

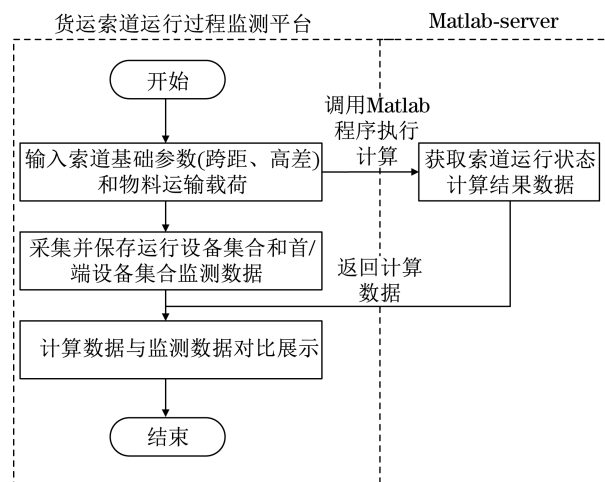


图3 货运索道运行过程监测系统数据接收对比流程

Fig.3 Data reception and comparison process of the monitoring system for transportation of material ropeway of transmission line

通过监测数据、影像数据、计算数据与监测数据对比展示,实现货运索道运行过程监测数据可视化展示及监测。结合货运索道施工流程,货运索道运行过程监测系统软件实现流程如图4所示。

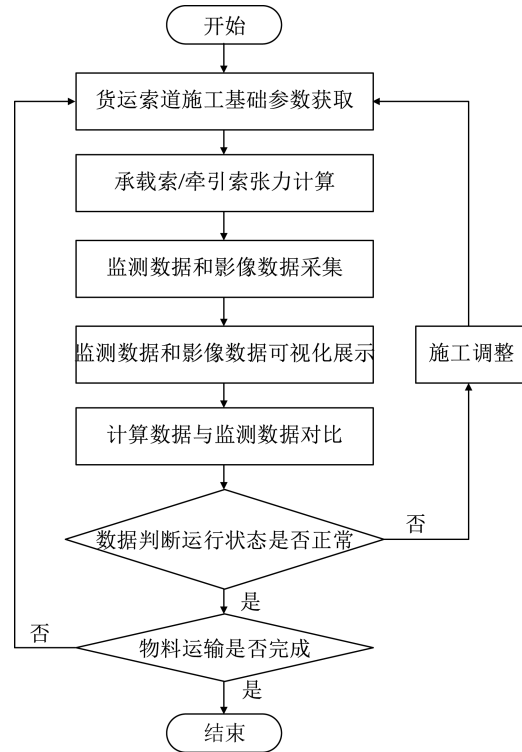


图4 货运索道运行过程监测系统实施流程

Fig.4 Implementation process of the monitoring system for transportation of material ropeway of transmission line

4 试验结果与分析

4.1 试验工况

在白鹤滩-浙江±800 kV特高压直流工程某标段中开展了现场验证试验,试验选用货运索道架设形式为单挡,索道总长243.183 m,档距218.183 m,高差118.668 m,承载索选用Φ20 mm钢丝绳。

分别开展单载荷和多载荷2种载荷试验,试验工况见表4。不同载荷工况重复试验3次,保证试验数据的准确性。

表4 单挡货运索道试验工况

Tab.4 Test conditions of single span material ropeway

试验序号	载荷类型	载荷间距/m	载荷质量/kg	
			载荷1	载荷2
1	单载荷	—	1 700	—
2	多载荷	21	425	850

4.2 试验结果

4.2.1 单载荷试验

根据载荷工况,货运索道运行过程监测系统采

用货运索道精细化计算方法,计算物料运输载荷在距离首端支架11、33、70、83 m的位置时的力值,并与系统装置监测值作对比分析,单载荷试验工况货运索道首端和末端承载索张力试验监测数据与计算结果对比如图5所示。

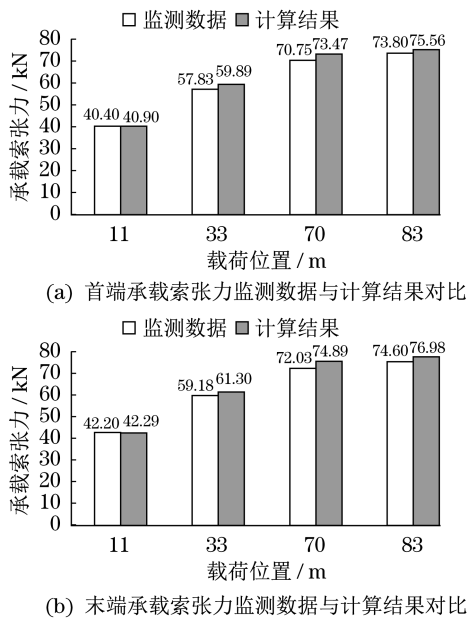


图5 货运索道承载索张力监测数据与计算结果对比(单载荷试验)
Fig.5 Comparison of monitoring data and calculation results of the tension of carrying rope of material ropeway (single load test)

4.2.2 多载荷试验

多载荷试验工况货运索道首端和末端承载索张力试验监测数据与计算结果对比如图6所示。

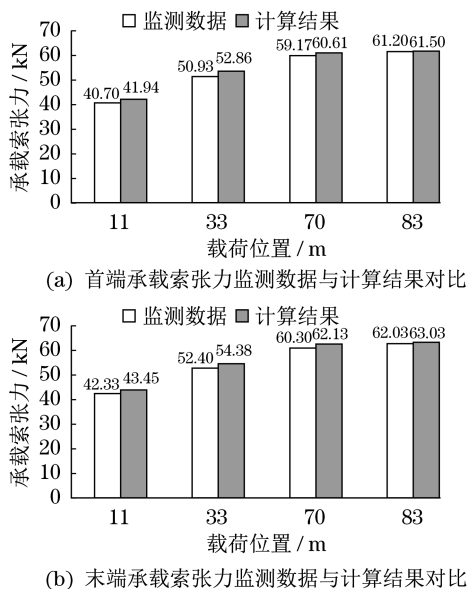


图6 货运索道承载索张力监测数据与计算结果对比(多载荷试验)
Fig.6 Comparison of monitoring data and calculation results of the tension of carrying rope at unloading position of the material ropeway (multi load test)

当物料运输载荷在11、33、70、83 m处测量点时,单载荷试验工况监测数据与计算数据相对误差最大值为3.97%,多载荷试验工况监测数据与计算数据相对误差最大值为3.78%,两者相对误差较小,满足监测要求,验证了输电线路货运索道运行过程监测系统监测数据有效性。

5 结论

(1) 设计了输电线路货运索道运行过程监测系统,将拉力传感器、高精度定位模块和自组网设备集成为一体化设备,实现货运索道运行过程力学数据、位置数据、影像数据等实时监测。

(2) 结合货运索道精细化计算方法计算货运索道运行过程工作索张力,与监测数据进行对比,可视化展示货运索道运行监测数据及影像数据,实现货运索道运行状态实时监测功能。通过输电线路工程中的验证试验,对比监测数据与计算数据相对误差在4%以下,验证了输电线路货运索道运行过程监测系统监测数据的有效性和准确性。

(3) 输电线路货运索道运行过程监测系统可应用于输电线路货运索道运输施工,解决货运索道物料运输在山区远距离监控难题,实现货运索道运行全过程跟踪管理,为货运索道施工过程的安全性提供技术保障。

参考文献:

- [1] 缪谦,白雪松. 货运索道运输技术与设备研究[J]. 电力建设, 2009, 30(12): 93-96.
- [2] 缪谦. 我国电网建设工程施工货运索道运输方式的研究[J]. 华北电力技术, 2010(12): 12-15.
- [3] 孙雪松,陆国智,周敏. 输电线路施工临时架空货运索道安全性分析及对策[J]. 吉林电力, 2014(2): 26-27, 33.
- [4] LIU Z S, CHEN L B, QIN J, et al. Study on risk analysis and structural safety performance of material ropeway construction of transmission line [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 696(1): 012043.
- [5] PETERKA P, KACMARY P, KRESAK J, et al. Prediction of fatigue fractures diffusion on the cableway haul rope [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59: 185-196.
- [6] 王佳琦. 客运索道缆车运行参数监测系统[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2019.
- [7] 纪敏. 工程索道吊运货物双目视觉三维建图与跑车运行参数监测研究[D]. 福州:福建农林大学, 2020.

(下转第314页)

- [12] 肖庆雨,周加喜,徐道临,等. 一种六自由度准零刚度隔振平台[J]. 振动与冲击,2019,38(1):258-264.
- [13] 曹晓政,姜文涛,李倩,等. 车载电子设备隔振的随机振动分析[J]. 云南电力技术,2018,46(6):67-81.
- [14] MA Y H, TANG X X, WANG Y F, et al. Design of nonlinear metal rubber isolator subjected to random vibration [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023,197:110375.
- [15] YI T, LI B, WANG N. Analysis and optimization of a vibration isolation platform based on 6-DOF parallel mechanism[J]. Key Eng Mater,2014,625:748-753.
- [16] RONCEN T, SINOUE J J, LAMBELIN J P. Experiments and nonlinear simulations of a rubber isolator subjected to harmonic and random vibrations [J]. Journal of Sound & Vibration,2019,451:71-83.
- [17] 刘博. 基于 Grms-N 的加速随机振动试验的有限元验证[D]. 广州:暨南大学,2020.
- [18] 罗佳润. 海蚀环境下橡胶隔震支座性能劣化规律研究[D]. 广州:广州大学,2015.
- [19] 全国技术产品文件标准化技术委员会. 军用装备实验室环境方法第 16 部分:振动试验:GJB 150. 16A—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

.....

(上接第 308 页)

- [8] 陈后旺. 多信息融合的客运索道监测与故障诊断技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [9] 江明,郝玉靖,孙国磊,等. 输电线路放线滑车施工过程监测系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2022,30(7):110-115.
- [10] 朱明清,李冬冬,夏昊,等. 架桥机安全监控系统研究[J]. 中国工程机械学报,2022(3):251-256.
- [11] 秦剑,乔良,江明,等. 多承载索货运索道计算方法及张力不平衡效应分析[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(9):44-49.
- [12] 秦剑,乔良,江明,等. 多承载索货运索道计算方法及张力不平衡效应分析[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(9):44-49.
- [13] 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(3):293-300.
- [14] 秦剑,乔良,李其莹,等. 多索索道承载索耦合计算方法及安全性评估[J]. 安全与环境学报,2020(2):433-440.