

智能化缆索吊装系统应用研究^{*}韩洪举^{1,2}, 张基进¹, 郭吉平^{1,2}

(1. 贵州交通建设集团有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 缆索吊装在大跨度桥梁施工中应用广泛, 其安装质量和吊装效率一直是工程领域关注重点。文中以湄潭至石阡高速公路河闪渡乌江特大桥主梁施工为工程背景, 开展智能化缆索吊装系统应用研究, 基于北斗定位系统结合 PLC 控制技术建立北斗基准站和项目位置模型, 实现跑车位置坐标精准定位和实时状态智能监测与反馈控制, 较大幅度提升主梁安装质量, 提高施工效率, 保证结构受力体系受力安全。

关键词: 桥梁; 悬索桥; 缆索吊装; 北斗定位; 智能监测

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)02-0103-03

悬索桥加劲梁施工较多使用缆索吊装法^[1]。山区大跨度悬索桥一般设有索塔和锚碇, 加配缆索及牵引系统、控制系统即可组成缆索吊机, 可节省大量临时结构建设成本, 缩短工期^[2]。在悬索桥钢桁梁节段吊装中, 缆索吊机架设对环境的适应性较强, 节段杆件的应力较小, 空中作业时间短, 高空作业风险低, 且缆索吊装系统结构简单, 工作效率较高, 行走速度快。缆索吊装系统主要通过人工启停方式控制行程, 跑车通过牵引绳牵引运行^[3], 跑车运行过程中牵引绳的拉力不断改变, 加上缆索系统其他构件的影响, 跑车的定位精度较差, 同步性误差大。缆索起重机电气控制系统控制简单、操作模式单一, 稳定性和可靠性差、寿命短, 缺乏多功能安全可靠的操作控制模式, 不能快速有效地完成吊装施工^[4-9]。本文依托湄潭至石阡高速公路河闪渡乌江特大桥建设工程, 开展基于北斗定位系统的智能化缆索吊装系统研究, 采用北斗定位系统结合 PLC 控制技术建立北斗基准站和项目位置模型, 利用北斗定位技术精准测定跑车位置坐标, 实现跑车的精确定位。同时加强缆索吊装状态的智能监测与控制, 提高主梁安装

定位精度和施工效率。

1 工程背景

河闪渡乌江特大桥为主跨 680 m 单跨钢桁梁悬索桥, 主缆分跨为 249 m+680 m+238 m, 主缆垂跨比为 1/10, 主缆横桥向间距为 27 m, 吊索顺桥向间距为 13 m。主梁采用板桁结合式钢桁梁, 桁高 6.8 m、桁宽 27 m。桥型布置见图 1。全桥共 53 个节段, 标准节段(含桥面板)最大吊装质量为 178 t。综合考虑场地、路基线形等因素, 主梁采用缆索吊装法安装。

2 智能化缆索吊装系统的原理

基于北斗定位系统的智能化缆索吊装系统包括北斗三维精准定位系统、缆索吊装自动监控系统, 用于实现跑车的精确定位和缆索吊装状态的智能监测与控制。

利用北斗定位系统结合 PLC 控制技术建立北斗基准站和项目位置模型, 在跑车上安装北斗定位终端, 利用北斗定位技术实现跑车位置坐标的精准

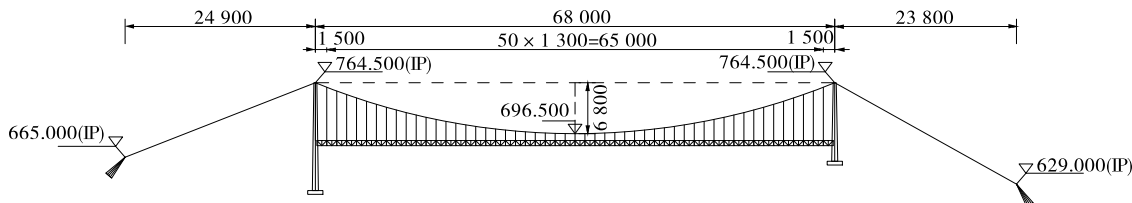


图 1 河闪渡乌江特大桥梁型布置(单位: cm)

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878073)

测定。在桥塔两岸用北斗定位系统模块确定4个坐标点,这4个点的坐标即为两跑车的起、终点坐标,同幅终点坐标减去起点坐标即为基准向量的模。以小桩号向大桩号的顺桥方向为Y轴、跑车在顺桥方向的左右偏移量为X轴、垂直方向为Z轴建立模拟坐标系,两跑车移动时的实时坐标减去各自起点坐标得两跑车运动时的实时向量的模,两跑车实时向量的模相减得两跑车间实时向量的模,跑车实时向量的模在各自基准向量的模上的投影长度即为沿桥长(同幅起、终点间的距离)的实时直线运动长度,其中跑车在X轴上的偏移量可实时得到。

建立北斗基准站,在桥梁主塔上选择一基准参考点并设置临时北斗定位终端,测出基准参考点的三维坐标,结合桥梁设计参数预先计算各节段梁安装就位后的理论位置,得出就位后对应各跑车上北斗定位终端的理论坐标、各吊架上北斗定位终端的理论坐标,并输入计算机控制中心。在跑车和吊点上分别安装北斗定位终端,实时采集各跑车、吊点上北斗定位终端的位置信息并传输到差分服务系统,差分服务系统计算各跑车、吊点的X、Y、Z坐标并将数据传输到数据中心,吊装自动控制系统的计算机控制中心实时读取数据中心的数据并进行处理。

通过卷扬机控制程序与远程控制系统实现跑车的自动控制、精准停放和同步控制。承重索索力采用旁压张力法(旁压传感器)监测,牵引索和起重索索力采用销轴式测力传感器监测,实现吊装过程中各缆索受力的自动监测和反馈。

3 智能化缆索吊装施工

3.1 锚固系统安装

锚固系统采用30 mm厚钢板(Q235)与平衡轮制作而成。在锚碇混凝土浇筑时预埋锚固系统,通过塔吊提升安装平衡轮,用销子连接平衡轮与预埋钢板,完成锚固系统安装(见图2)。



图2 平衡轮示意图

3.2 塔顶支架及索鞍安装

支架预埋件埋设在主塔上横梁。上横梁浇筑完成后,利用塔吊将加工好的支架杆件提升至安装位置进行焊接安装,支架安装验收合格后安装索鞍(见图3)。



图3 塔顶支架及索鞍示意图

3.3 张力传感器与主承重索安装

主承重索单侧设计10线,采用 $\phi 60$ mm钢丝绳。为便于安装和运输,将主承重索分解成10根独立的钢丝绳,单根钢丝绳设计长度为1 293 m,利用架设猫道的牵引系统进行跨江架设,由某岸锚碇前进行放索。首先将一根主承重索的端头通过锚固装置锚固在锚碇上,利用牵引系统进行牵引,途中主承重索跨过两岸主塔的临时索鞍牵引到另一岸锚块处,并绕过转向平衡滑轮;再接长另一根主承重索,采用同样的方法将接长部分牵引至对岸,并绕过转向平衡滑轮;如此反复,直至10根主承重索均锚固在平衡轮上,组成一个循环索。

3.4 北斗定位系统和起重索及滑车组安装

完成主承重索牵引架设后,在主塔塔底穿索完成天车与动滑轮之间的连接,在跑车上安装北斗定位系统模块和供电太阳能板,每台天车安装一个,通过塔吊提升天车,将其挂在主承重索上,通过塔顶索鞍的转向滑轮将起重索一端牵引至起重卷扬机并绕绳,另外一端利用牵引索系统牵引至对岸塔顶支架处并锚固,完成起重索架设(见图4)。

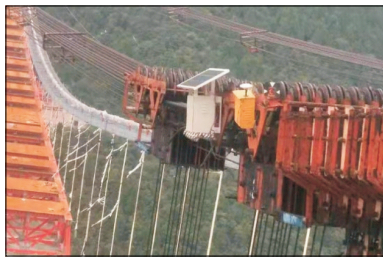


图4 安装好的北斗定位系统和供电太阳能电池板

3.5 测力传感器与牵引系统安装

在索鞍上安装销轴式测力传感器,卷扬机出绳处安装缆索位移监测编码器,将跑车牵引至靠近主塔上横梁位置。先将 1 台牵引卷扬机的绳头通过索鞍处的转向滑轮,绕过 1 台跑车(单侧由 2 台独立跑车组成)后的滑轮,之后返回穿过索鞍处转向滑轮,继续进行牵引;再绕过跑车后的另一个滑轮,最后返回索鞍支架进行锚固,完成一岸单侧牵引系统安装。另一侧牵引系统采用相同的方法完成安装。用牵引系统牵引跑车,同时牵引卷扬机放绳,利用牵引系统将跑车牵引至对岸,以相同的办法完成牵引索的安装。通过牵引系统牵引跑车两岸往返一次即可完成支索器间连接钢丝绳的安装(见图 5、图 6)。



图 5 安装好的销轴传感器



图 6 安装好的编码器

3.6 吊装系统试吊

缆索吊装系统验收合格后,在钢桁梁节段正式吊装前进行一次试吊,对吊装系统各项功能进行检测,判断其工作是否正常。试吊分三步进行:第一步为空载运行,牵引系统将跑车(含吊具)由石阡塔顶牵引至湄潭塔顶,检查牵引系统运行是否正常;下放动滑轮组至塔底,检查起重系统运行是否正常。第二步为静载试验,在塔底拼装钢桁梁节段,将下放的吊具与拼装完成的钢桁梁相连,启动卷扬机,提升动滑轮组将钢桁梁节段垂直提升 10 cm,检测缆索吊装系统的强度,检查锚固装置、塔架、钢丝绳、绳卡是否正常。第三步为动载试验,提升钢桁梁节段至桥面标高附近,由牵引卷扬机牵引至跨中再返回塔底,

检验缆索吊装系统是否能在保证安全的前提下正常运转。试吊时派专人观测标记位置(地锚处、主索、钢绳接头卡子处、索塔顶)是否存在异常,若有异常及时处理;观测承重索垂度和支架变形情况,并将观测值与计算结果进行对比,若两者相差较大,进行相应调整。

试吊步骤为卷扬机分次启动→逐次检查系统各受力部位→荷载试验→再次检查各受力部位→测试数据→下放试吊物。试吊时,根据地锚处设定的标志点,观测起吊前后有无位移变形;针对主索,测量起吊前垂度、起吊后最大垂度,并与计算值相比较;采用全站仪在左、右线和桥轴线两个方向观测塔顶位移;以塔顶控制点为基准,测量塔顶索鞍支架的变形。根据试吊观测结果,评判缆索吊装系统的牵引、起吊、供电和运输等系统的工作性能并提出改进措施。

4 智能化缆索吊装系统效益分析

河闪渡乌江特大桥 2020 年 5 月初开工,2021 年 11 月通车,整个缆索吊装系统安装时间仅 45 d,仅需 1~2 人即可保障缆索吊装系统的日常维护需要,通过控制系统的自动分析与预警控制,工作人员的劳动强度大大降低。吊装过程中跑车的自动控制和精准定点停放,主梁吊装高度的准确、平稳控制,保证了主梁施工质量和效率。

基于北斗定位系统的智能化缆索吊装系统构成简单,技术成熟,安装方便,智能化程度高,大大减少了外部环境和人为因素的干扰,对工程施工质量的提升和施工效率的提高具有重要推动作用。采用智能化缆索吊装系统,充分利用大数据、云计算等现代信息技术,大大提高了工程施工的信息化、智能化管控水平,符合桥梁建造管理的技术发展趋势和工程领域碳中和的要求。

5 结语

本文依托湄潭至石阡高速公路河闪渡乌江特大桥主梁施工工程,开展基于北斗定位系统的智能化缆索吊装系统应用研究。利用该系统实现缆索吊装过程的全程监控,保证吊装效率、主梁安装质量和结构受力体系安全,节省缆索吊装系统的安装时间,经济效益和社会效益显著。智能化缆索吊装系统在大跨径悬索桥施工中具有广阔的应用前景。

(下转第 114 页)

- [7] 丁涛,丁浩,朱世根.加权距离判别分析及其在模式识别中的应用[J].组合机床与自动化加工技术,2013(8):51—54.
- [8] YANG J N, LEI Y, LIN S, et al. Hilbert-Huang based approach for structural damage detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 85—95.
- [9] AMARNATH M, KRISHNA I R P. Empirical mode decomposition of acoustic signals for diagnosis of faults in gears and rolling element bearings[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2012, 6(4): 279—287.
- [10] AMARNATH M, KRISHNA I R P. Local fault detection in helical gears via vibration and acoustic signals using EMD based statistical parameter analysis[J]. Measurement, 2014, 58: 154—164.
- [11] 陈闯,俞鹏,王银辉.基于马氏距离累积量和 EMD 的结构损伤识别两步法[J].振动与冲击,2019,38(13): 142—150.
- [12] CHEN C, WANG Y, WANG T, et al. A mahalanobis distance cumulant-based structural damage identification method with IMFs and fitting residual of SHM measurements[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(21): 1—17.
- [13] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903—995.
- [14] MAHALANOBIS P C. On the generalised distance in statistics[J]. Proceedings of the National Institute of Sciences of India, 1936(2): 49—55.
- [15] 王晓龙,王晓浩,邢宗义.基于 EMD 广义能量的列车车轮故障诊断技术[J].铁道标准设计,2017,61(1): 133—138.
- [16] 陈闯.基于监测数据的大跨径 PC 连续梁桥状态评估[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [17] 韩亚娟.基于马氏田口的多元系统稳健性优化与诊断分析研究[D].天津:天津大学,2007.

收稿日期:2022—02—12

(上接第 105 页)

参考文献:

- [1] 任涵.山区悬索桥缆索吊装关键技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [2] 刘邦,刘建,柯红军.大跨度悬索桥钢箱梁吊装施工技术分析[J].公路与汽运,2021(6):127—130+136.
- [3] 李春贤.移动主索缆索吊机架设拱桥施工技术[J].铁道建筑技术,2005(6):28—30.
- [4] 王晓璐.斜靠式钢管混凝土拱桥拱肋吊装分析及施工稳定性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [5] 邓雪涛,曾德荣,周燕其.大跨度拱桥缆索吊装系统的稳定性有限元分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2007,26(增刊):3—7.
- [6] 陈富强.大跨径悬索桥缆索吊装系统的设计与施工研究[D].西安:长安大学,2007.
- [7] 张朝阳.钢管混凝土拱桥施工过程仿真分析及控制研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [8] 张晨星,田仲初.悬索桥钢箱梁吊装阶段主缆索力计算方法[J].交通科学与工程,2021,37(3):91—97.
- [9] 郭吉平.北盘江大桥缆吊系统及桁架梁安装关键技术[J].世界桥梁,2011(6):22—25.

收稿日期:2022—05—25

(上接第 108 页)

- [2] 陈业丰,陈得良.碳纤维布加固具多裂纹 RC 梁振动分析[J].公路与汽运,2022(1):124—127.
- [3] 冯海龙.在役预应力混凝土空心板梁桥病害处置对策及加固效果试验研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2015.
- [4] 吕哲.既有空心板桥健康评价及钢板加固研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [5] 高勇.某预应力混凝土筒支空心板桥加固性能试验研究[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2020,38(1):48—54.
- [6] 宋泽冈,邓旭东,殷继华.空心板梁桥加固前后受力性能对比试验研究[J].公路,2020,65(9):84—89.
- [7] 项贻强,邢聘,邵林海,等.横向加固空心板梁桥荷载横向分布计算方法与试验研究[J].中国公路学报,2013,26(2):63—68+76.
- [8] 叶李斌,张滨锋.加固后现浇钢筋混凝土楼板静载试验分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(3):32—37.
- [9] 长安大学.公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21—01—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

收稿日期:2022—01—20