

钢管混凝土拱桥施工过程智能调控

冯春萌, 叶志权, 唐睿楷, 梁厚燃, 解威威*

(广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530011)

摘要: 为了克服传统施工方法中需依靠塔架和风缆强大的刚度控制塔顶水平位移的经济性不佳等问题, 该文以来宾马滩红水河特大桥拱肋节段吊装过程为研究背景, 采用 GNSS 自动化监测系统、计算机控制系统以及液压千斤顶组成的全新智能调载控制系统, 并根据目标位移实时全天候调控塔顶水平位移。此外, 以南岸上游的塔顶水平位移 V_1 为研究对象, 对比分析了未调控状态和主动调控状态下的水平偏位, 研究得出在“吊、扣塔合一”的塔架拱肋吊装过程中全新控制系统的主动调控具有精度高、稳定性强以及经济性好等优点。

关键词: 塔顶水平位移; 全新控制系统; 主动调控; 智能调控

1 引言

随着科学的发展和施工技术的进步, 钢管混凝土拱桥从四川旺苍东大桥到主跨为 530 m 的合江长江一桥, 钢管混凝土(Concrete-Filled Steel Tubular, 简记为 CFST)拱桥的跨径在不断地突破和刷新, 且郑皆连等认为按照现有的施工技术发展水平, 有望实现 700 m 大跨径的 CFST 拱桥建造。而在大跨和超大跨 CFST 拱桥拱肋节段吊装施工过程中, 塔顶纵向水平位移变化是影响整桥线形的控制因素之一。

塔顶水平位移现存在的问题, 对于采用斜拉扣挂悬拼施工的 CFST 拱桥在拱肋节段吊装与水平运输过程中, 会出现诸多不良因素。一方面由于主扣塔产生较大的水平偏位, 进而产生一定的力矩, 严重影响塔架的稳定性; 另一方面, 缆索吊装过程中主扣塔随之而动, 悬拼精度得不到保证, 进一步影响拱肋线形。针对以上问题, 传统施工方法常借助大刚度塔架与顶腰风缆使塔顶水平偏位在合理的范围之内, 虽能保证施工过程正常进行, 但这种被动控制方法存在费用高、实时性差等不足, 甚至不能较大限度克服塔顶水平偏位对目标线形的影响。为了消除上述缺陷, 较常采用的是

- *****
- [2] 周健, 樊泽民, 王骑, 等. 基于节段模型风洞试验的莫桑比克马普托大桥主梁选型研究[J]. 世界桥梁, 2014(2).
- [3] 冯国瀚, 陈进昌, 雷俊卿. 桥塔约束刚度对单跨双缆悬索桥受力特性的影响[J]. 中外公路, 2019(5).
- [4] 徐欣, 周国玲. 中欧规范桥梁结构风荷载计算方法对比研究[J]. 中外公路, 2019(5).
- [5] 冯鹏程, 丁仁军, 陈毅明, 等. 沌口长江大桥总体设计[J]. 中外公路, 2017(6).
- [6] 周健, 邹恩杰, 李元博, 等. 莫桑比克马普托大桥锚碇基础方案比选[J]. 世界桥梁, 2012(5).
- [7] 王民, 周永涛, 尚飞, 等. 莫桑比克马普托大桥钢桥面铺装

- 力学响应状态分析[J]. 交通科技, 2018(1).
- [8] 万田保. 改善桥梁结构耐久性的阻尼器性能要求[J]. 桥梁建设, 2016(4).
- [9] 张琦, 徐江, 戴国亮, 等. 马普托大桥南锚碇工程半成岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017(10).
- [10] 祝长春, 罗建军, 赵聪明, 等. 莫桑比克马普托大桥水文地质特征研究[J]. 施工技术, 2016(45).
- [11] 祝长春, 郭常瑞. 马普托大桥南锚碇复杂杂层超深地下连续墙施工技术[J]. 施工技术, 2016(32).
- [12] 曹冬, 石明强, 丁少凌. 基于欧洲规范马普托大桥总体验算[J]. 公路交通科技, 2018.

收稿日期: 2020-12-03(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(编号: 51738004); 交通运输行业重点科技项目(编号: 2018-MS1-003); 广西科技重大专项(编号: 桂科 AA18118055)

作者简介: 冯春萌, 男, 高级工程师.

* 通信作者: 解威威, 男, 工程师. E-mail: 214395494@qq.com

动态实时监测方法,包括加速度计方法、摄影测量方法、激光扫描测量方法、地面微波干涉雷达方法、GNSS 监测方法以及 RTS 测量方法等,其中 GNSS 监测方法运用较为广泛,且为全新控制系统智能调载方法的关键技术。

GNSS 动态实时监测方法最早出现在高塔和烟囱结构位移监测中,20 世纪初期 Lovse 等第一次采用 GNSS 传感器研究了近 200 m 高的卡尔加里塔的结构振动响应。此外,GNSS 监测技术现已涉及多个领域,其中包括由地震、风等引起的外荷载作用下高耸结构动力响应监测。余加勇和邵旭东等从早期的监测试验到现有的桥梁荷载试验以及桥梁健康监测研究 GNSS 监测技术的发展历程,主要运用于大型桥梁结构关键部位变形监测,如日本明石海峡大桥,但尚未运用至大跨径钢管混凝土拱桥施工过程的位移监测控制中,因此有必要开展这方面的动态位移监测研究与分析。对于位移变形观测,相比于传统施工方法中人工架设全站仪,智能调载法具有自动化程度高,监测精度高及实时性强等诸多优点。

鉴于此,为了克服传统施工方法存在经济性不佳等问题,该文采用 GNSS 自动化监测系统、计算机系统以及液压千斤顶系统组成的全新智能调载控制系统,研究分析“吊、扣塔合一”的 CFST 拱桥在拱肋节段缆索吊装施工全过程中塔顶的纵向水平偏位。除此之外,采用对比分析法综合考虑在未调控状态与主动调

控状态下水平偏位的变化情况,其目的是将拱桥节段从起吊至安装就位施工全过程中塔顶水平位移偏位控制在 ± 2 cm 以内,减少施工成本,提高经济效益。

2 工程背景

2.1 依托工程概况

广西来宾市马滩红水河特大桥,其主跨为 336 m,矢跨比为 0.25,拱轴线系数为 1.167,是一座中承式 CFST 拱桥,由左右两幅桥组成。单肋管拱肋采用 4 根直径均为 1 200 mm,厚度分别为 32、28、24、22 mm 钢管组成上下弦管。上弦杆和下弦杆各为 2 根主弦管,通过腹杆连接组成哑铃形结构形式。单条拱肋分 24 段,全桥共 96 段,节段的最大自重为 1 150 kN,最小自重为 541 kN。拱肋采用缆索吊装系统安装,缆索地道战系统沿桥轴线布置,中跨为 460 m,南宁岸塔架(南塔),拱肋起吊场设在 6[#]墩与 8[#]台之间,柳州岸塔架(北塔)设在 3[#]墩与 4[#]墩之间,吊装系统设计两道,每组索由 6 根直径 50 mm 的密封钢丝绳组成。该桥缆索吊系统总体布置图见图 1,主要包含塔架、主索、扣索、风缆索等,其中塔架采用吊、扣塔合一。并由钢管结构组成。主索塔顶宽度为 69 m,其中柳州岸塔高为 136.4 m,南宁岸塔高为 128.4 m,采用 3 个立柱。主塔架顺、横桥向两侧均设顶风缆和腰风缆,风缆采用钢绞线。

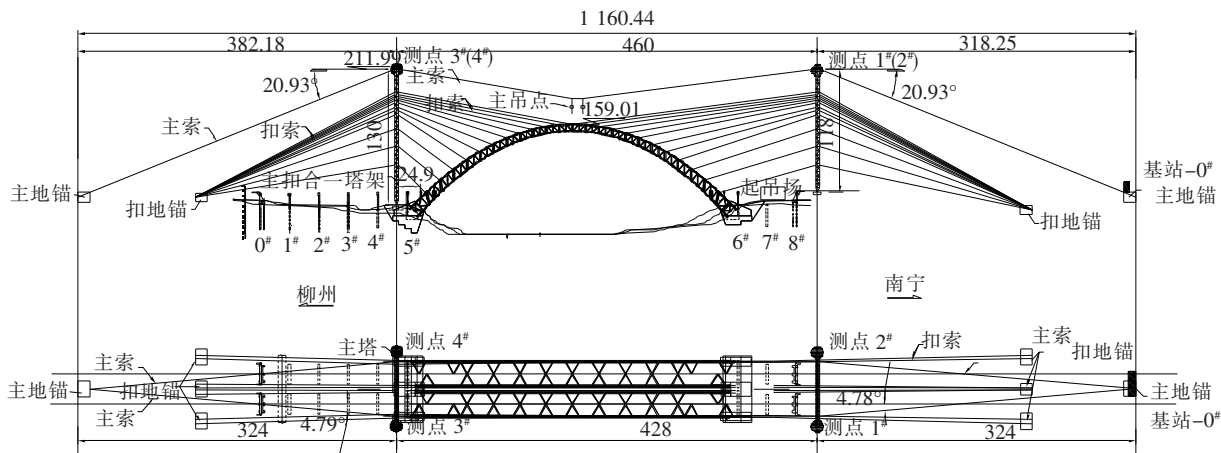


图 1 GNSS 测站布置平面图(单位:m)

2.2 现场设备概况

2.2.1 GNSS 基站和测站位置

马滩红水河特大桥在右幅桥拱肋吊装过程中塔顶水平位移监测采用 N72 型 GNSS 位移自动化监测系统,不仅全面兼容北斗系统信号,而且支持 3 类卫星

(GPS+GLONASS+BDS)的数据解算。该桥在主地锚附近设置 1 个 GNSS 接收机基站。此外,在南北塔上下游的塔顶处分别安装 1 个测站共 4 个,同时记南岸塔上游(NASY)为 1[#]测站、南岸塔下游(NAXY)为 2[#]测站、北岸塔上游(BASY)为 3[#]测站以及北岸塔下

游(BAXY)为4#测站,具体的GNSS测站布置平面如图1所示。

2.2.2 设备材料与现场安装情况

在马滩红水河特大桥的拱桁节段吊运拼装过程中,采用计算机控制系统、GNSS自动化监测系统以及液压千斤顶控制系统组成的闭环控制系统主动向顶风缆适时张拉与放张(回程),旨在控制塔顶水平位移 V_1 在规定范围内,双顶控制塔顶水平偏位设备安装示意图如图2所示。

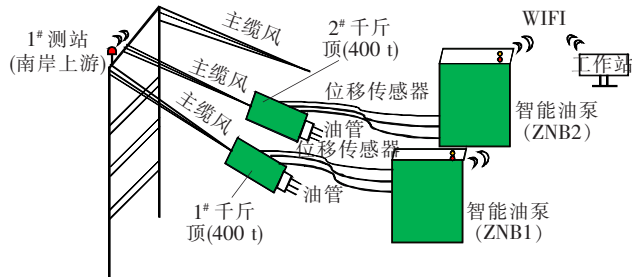


图2 双顶控制设备安装示意图

由图2可知:在南岸(南宁岸)上游的主扣塔顶处安装一个GNSS测站(1#测站),并在南岸上游同侧两束顶风缆上,分别安装1#液压千斤顶(记为C1)和2#液压千斤顶(记为C2)进行张拉与回程控制。此外,在液压千斤顶附近安装放置2台智能油泵(ZNB1和ZNB2,其中ZNB1为主泵)对相应液压千斤顶进行智能控制,所需设备数量详见表1。

表1 南岸上游塔顶水平控制位移设备

GNSS测站	液压千斤顶	智能油泵
1个	2台/200 mm	2台

3 三大控制系统

塔顶水平偏位调载试验依靠于三大基本控制系统组成的全新智能调载控制系统,三者相互协作与相互协调形成闭环循环回路,即包括GNSS自动化监测系统、计算机控制系统以及液压千斤顶控制系统,如图3所示。GNSS自动化系统主要负责塔顶水平位移的数据采集并传输至计算机控制系统,而计算机控制系统

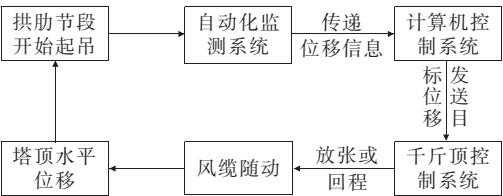


图3 三大控制系统闭环循环回路

接收数据信号经硬件和软件处理后发送至液压千斤顶系统,进行控制液压千斤顶的张拉与回程反复运动。

3.1 GNSS自动化监测系统

马滩红水河特大桥施工过程智能调载试验,采用N72型GNSS自动化监测系统,支持多种卫星解算,该系统动态测量精度水平位移为0.8~1 cm,竖向位移为1.5~2 cm,精度能满足规范要求,而且可以更全面地了解塔架在拱肋吊装各个时期的水平位移变化情况,实现连续观测与数据的自动处理、自动解算处理,及时发现存在的问题,为塔架变形提供更可靠的安全监测资料。

3.2 计算机控制系统

主要指的是软件控制系统,接收数据位移信号后经控制软件处理,并经无线网络发送至智能油泵进行下一步操作。

3.3 液压千斤顶控制系统

液压千斤顶控制系统主要包括穿心式液压千斤顶与智能油泵,通过油管输送高质量液压油,连接并保证液压千斤顶正常工作,且由传感器传递控制室服务器发出的数字信号进而主动控制千斤顶的张拉与回程。

4 双顶主动控制优势及控制原理

4.1 双顶主动控制优势

对于马滩红水河特大桥的右幅桥拱肋吊装塔顶水平偏位控制,前期采用了行程为200 mm的智能千斤顶进行单项张拉,基本满足南岸拱肋吊装过程中的塔顶水平位移控制,但北岸拱肋吊装时未能有效控制塔顶水平偏位(图4),下文以北岸上游4#拱肋吊装过程为例。

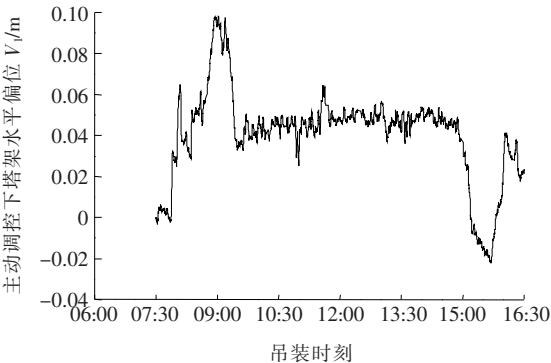
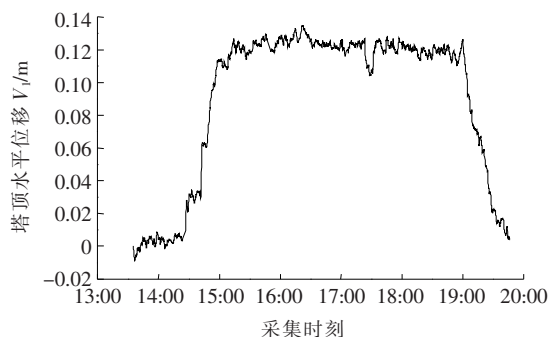
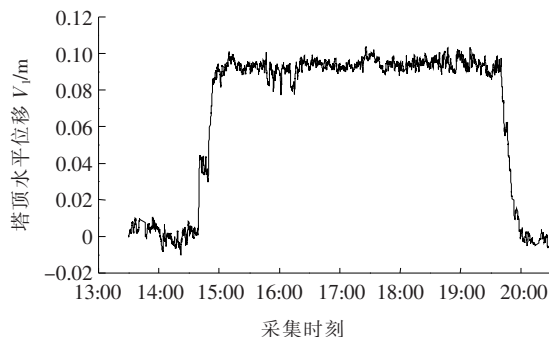


图4 北岸上游4#拱肋单顶主动控制塔顶水平位移

由图4可知:北岸上游4#拱段从起吊至运输过程中,塔顶水平偏位 V_1 最大接近10 cm,通过单项智能

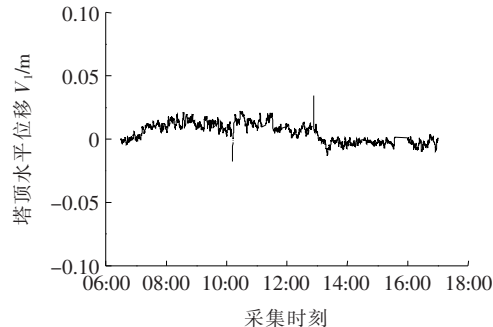


(a) 吊装南岸上游 6# 拱肋

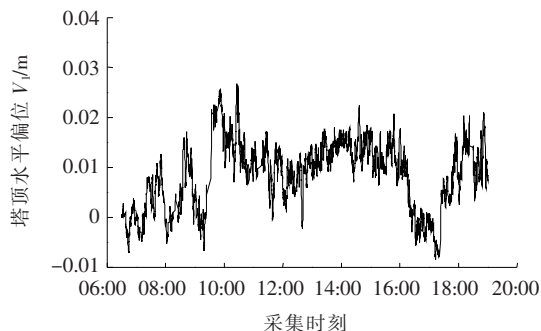


(b) 吊装南岸上游 7# 拱肋

图 6 未调控状态下的塔顶水平位移



(a) 吊装南岸下游 6# 拱肋



(b) 吊装南岸下游 7# 拱肋

图 7 主动调控状态下的塔顶水平位移

由图 6 可知:在右幅桥拱肋吊装过程中未调控状态时,塔顶水平位移偏位最大值为 10 cm 左右,使塔架受到较大力矩,不利于塔架保持直立状态和良好的稳定性;由图 7 可知:在三大控制系统相互协调作用下,计算机控制系统接收位移信号经处理后传至智能油泵控制液压千斤顶的张拉与回程,将塔顶水平位移调控在 $(-2\text{ cm}, +2\text{ cm})$ 之内,即调控回来了 5~7 cm 的行程,而传统做法是通过塔架和风缆强大刚度来实现,经济性较差。

7 结论

(1) 采用计算机控制系统、GNSS 自动化监测系统以及液压千斤顶系统组成的全新控制系统,并形成闭环可操作的智能调载系统进行施工过程中塔顶偏位的控制,克服了传统方法存在经济性不佳等缺陷,可为类似工程提供有价值的参考。

(2) 由智能控制系统得到的未调控状态下塔顶水平位移基本反映了拱肋节段吊装的整个过程位移变化,即为垂直起吊、水平运输以及悬拼安装 3 个阶段,从而说明了 GNSS 自动化监测系统良好的可靠性。

(3) 采用对比分析法研究了在未调控状态与主动调控状态下的塔顶水平偏位,验证了在拱桥节段吊运施工全过程中采用主动调控基本符合高精度目标位移 $(-2\text{ cm}, 2\text{ cm})$ 要求,说明在该套控制系统下的主动调载具有精度高、稳定性强以及经济性好等优点。

参考文献:

- [1] 韩玉,秦大燕,冯智.合江长江一桥施工关键技术及创新[J].公路,2013(3).
- [2] 郑皆连,王建军,牟廷敏,等.700 m 级钢管混凝土拱桥设计与建造可行性研究[J].中国工程科学,2014(8).
- [3] 郑皆连.大跨径拱桥的发展及展望[J].中国公路,2017(13).
- [4] 秦斌.拱桥斜拉扣挂施工中的扣索索力优化研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2011.
- [5] 解威威,杨绿峰,王建军,等.钢管混凝土桁式拱桥稳定承载力的参数分析[J].中外公路,2018(6).
- [6] 余加勇.基于 GNSS 和 RTS 技术的桥梁结构动态变形监测研究[D].湖南大学博士学位论文,2015.
- [7] 余加勇,邵旭东,晏班夫,等.基于全球导航卫星系统的桥梁健康监测方法研究进展[J].中国公路学报,2016(4).

平位移。包括南岸下游 6# 拱肋和南岸下游 7# 拱肋的塔顶水平位移。