

基于监控数据的中承式拱桥吊杆更换及钢纵梁加固方案研究

麻竹倩

(上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200032)

摘要: 针对早期设计与施工局限导致吊杆拱桥在重载交通作用下吊杆疲劳损伤突出、服役寿命缩短, 以及部分无加劲纵梁结构安全储备不足、事故风险较高的工程难题, 提出系统性维修加固解决方案。以浙江某中承式劲性骨架拱桥为工程背景, 围绕吊杆更换与钢纵梁增设全过程, 构建涵盖关键参数选取、监控方法设计及监测结果分析的完整技术体系。实际工程验证表明, 该方案各项控制指标均满足设计要求, 结构安全性与耐久性显著提升, 可为同类型桥梁维修加固提供技术参考。

关键词: 吊杆拱桥; 吊杆更换; 钢纵梁增设; 施工监控; 维修加固

中图分类号: U448.2; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0250-08

Research on Suspender Replacement and Steel Longitudinal Beam Reinforcement Scheme for Half-Through Arch Bridge Based on Monitoring Data

MA Zhuqian

(Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Aiming at the engineering problems and difficulties faced by early design and construction limitations, such as prominent fatigue damage to the suspenders and shortened service life of the suspender arch bridges under heavy traffic, as well as insufficient safety reserves and high accident risks in some unstiffened longitudinal beams, a systematic maintenance and reinforcement solution is proposed. Taking a half-through stiff skeleton arch bridge in Zhejiang as the engineering background, focusing on the whole process of suspender replacement and steel longitudinal beam addition, the technical system containing the selection of key parameters, design of monitoring methods and analysis of monitoring results is constructed. The practical engineering verification shows that all control indicators of the scheme meet the design requirements, and the structural safety and durability are significantly improved, which can provide technical reference for the maintenance and reinforcement of similar bridges.

Keywords: suspender arch bridge; suspender replacement; steel longitudinal beam addition; construction monitoring; maintenance and reinforcement

0 引言

我国交通运输行业持续快速发展, 重载交通流量呈现显著增长态势, 对桥梁结构的长期服役性能提出严苛要求。早期修建的吊杆拱桥受限于当时的设计理念与施工工艺, 在长期重载交通荷载及复杂环境因素的双重影响下, 构件损伤现象日益显现, 吊杆的有效使用寿命大幅缩短。尤为关键的是, 早期

中、下承式拱桥的桥面结构多采用简支体系并直接设置于悬吊横梁上^[1]。横梁间缺乏有效的纵向联系, 导致桥面整体性薄弱, 存在断索后梁体坠落的安全隐患^[2]。德国专家 Finster Watders 的长期跟踪研究指出, 吊杆服役时长超过 20 年后, 其力学性能将无法满初始设计要求, 部分服役年限不足 10 年的吊杆已出现疲劳失效^[3]。工程实践也表明, 吊杆与拱桥主体结构的寿命差异显著, 因此在拱桥正常运营期间, 需多次实施吊杆更换以保障结构安全。此外, 对于未设置加劲纵梁的吊杆拱桥而言, 即便能够更换吊杆, 但结构冗余度严重不足的问题仍未解决, 桥面系结构的长期运营风险依然存在。

收稿日期: 2026-01-29

基金项目: 23DZ1202901、沪建科 2024-Z02-003

作者简介: 麻竹倩(1985—), 女, 本科, 高级工程师, 从事桥梁结构检测和运营管理工作。

我国交通运输主管部门高度重视旧桥加固改造,自上世纪七十年代起便持续推进相关科研与工程实践^[4-6]。当前工程界针对吊杆拱桥的维修加固研究,主要聚焦于吊杆体系更新与桥面系结构强化两大方向,并已取得阶段性成果。王石磊等^[7]针对钢横梁受力主导型拱桥的病害特征展开研究,指出车辆超载是引发结构薄弱部位应力幅超限的核心诱因,提出采用大纵梁体系提升桥梁整体刚度的加固思路。孙继刚^[8]通过车桥耦合振动数值模拟,分析了增设加劲纵梁与吊杆更换组合加固方案对桥梁动力特性的改善效果,证实了方案的技术合理性。张武等^[9]针对中承式拱桥的加固需求,开展了增设加劲纵梁的试验研究,结果表明5种典型工况下,吊杆、拱肋及钢纵梁的应力状态均满足设计要求,桥面竖向挠度改善效果显著。毛闵留^[10]采用临时兜吊法对三跨中承式钢管混凝土拱桥进行吊杆更换与加劲纵梁增设,经仿真数据分析计算,证实了该方法的可行性。孙强^[11]提出临时吊杆法用于钢管混凝土系杆拱桥全桥吊杆更换,通过仿真模拟与施工监测确认了技术可靠性。王菲^[12]的研究表明,吊杆更换前后采用桥面相对高差作为桥面线形控制指标更为有效,并应控制索力偏差不大于20%。张记峰等^[13]提出了新系杆分级张拉与旧系杆分级切断的交叉施工工艺,构建了以索力控制为主线、关键点位移控制为核心、结构应力监测为校核的三维监控体系。丁明亚等^[14]基于MIDAS模型,通过增设刚性纵梁以改善柔性系杆拱桥在吊杆断裂时易发生连续倒塌的问题,提升桥梁的安全性。

本文以浙江某中承式劲性骨架拱桥的吊杆更换与钢纵梁增设工程为研究背景,提出了一套系统的吊杆拱桥维修加固方案。该方案详细阐述了施工过程中结构关键控制参数选取、监控方法设计及监测结果分析等内容。测试结果表明,该维修加固方案能够实现各项参数的预期控制目标,可为后续同类型桥梁吊杆更换的施工监控工作提供参考。

1 项目研究背景

1.1 工程概况

浙江某中承式劲性骨架拱桥主桥全长175 m,计算跨径168 m,矢跨比为1:5。主拱肋采用变截面劲性骨架结构形式,拱轴线采用悬链线布置,拱轴系数 $m=1.756$ 。全桥共设21对吊杆,吊杆采用163丝 $\phi 5$ 高强度低松弛钢丝($R_p=1\ 600$ MPa),配套墩头锚具,

上端锚固于箱型截面拱肋上顶板,下端与横梁底部固定连接。桥面系采用预制T梁结构,施工阶段先简支架设,后通过湿接头工艺与横梁形成整体梁格受力体系。

在对该桥进行检测和评估时发现,部分吊杆下锚头存在局部腐蚀,部分吊杆护套出现表观损伤。考虑到国内同类型桥梁吊杆的平均服役周期为10—15年,该桥上次吊杆更换维修时间为2009年,至今已服役15年,吊杆服役年限相对较久。为保障桥梁正常使用功能,提高结构冗余度和安全储备,增强其安全性和耐久性,现对其进行吊杆更换与钢纵梁增设在内的桥梁维修加固。

1.2 维修加固施工方案设计

1.2.1 主要维修加固内容

(1)拆除拱肋区2片纵向T梁,横梁间增设钢纵梁,钢纵梁两侧安装钢结构护栏,恢复其他附属设施(标线、泄水孔、路灯、亮化设施等)。

(2)拆除桥梁两端共计4根旧吊杆,更换为新吊杆并完成张拉锚固。

1.2.2 吊杆更换方案设计

桥梁吊杆更换技术方法主要分为临时替代换索法与无替代换索法2大类。无替代换索法适用于刚性系杆下承式拱桥的结构体系,而本桥为无系杆悬吊体系中承式拱桥,基于结构受力特性与施工安全性要求,本次吊杆更换采用优化型临时兜吊法。

该方法通过定制化临时承重体系承接原吊杆的竖向荷载,在待更换吊杆对应的拱肋区域布设钢质临时上横梁(截面尺寸 $H400\times 200\times 8\times 12$),同时在横梁下方对称设置2根型钢下托梁,搭配4根 $\phi 32$ 高强度螺纹钢(屈服强度 ≥ 400 MPa)组成临时吊索体系^[10]。针对拱脚区域最短吊杆的狭小安装空间限制,在桥面相应位置增设转换上托梁,确保临时吊索体系的安装精度与受力稳定性。实践表明,该施工方法可有效控制相邻吊杆的索力变化幅度,桥面高程变形量小,桥梁线形易于调控,适用于单根或全桥吊杆更换作业,是当前成熟度高、安全性可靠的吊杆更换技术方案^[15]。临时兜吊体系示意图如图1所示。

1.2.3 吊杆更换施工顺序

为保障换索过程中拱肋与横梁的受力均衡性,吊杆更换施工采用顺桥从中间向两端对称推进的作业方式,逐根完成吊杆更换。整个施工流程分为7个关键阶段:施工准备→新吊杆长度核算与定制生

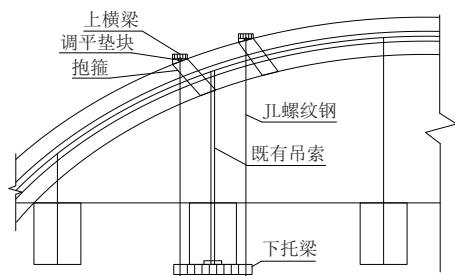


图1 临时吊吊示意图

产→临时吊杆体系安装及预张拉(实现吊杆力安全转移)→旧吊杆拆除→新吊杆安装及精准张拉→临时吊杆体系拆除→防水罩安装等后续收尾工作。吊杆更换施工流程图如图2所示。

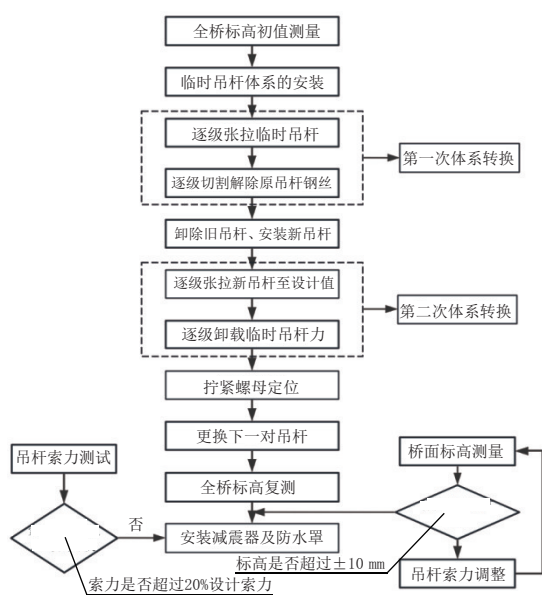


图2 吊杆更换施工流程图

2 施工监控方案设计与优化

2.1 施工监控关键参数选取

由于拱桥吊杆承受着桥面和行车荷载的巨大作用力,更换过程极具风险,因此需对关键参数展开系统的全过程监测。依据《公路桥梁施工监控技术规程》(JTG/T 3650-01—2022),本次主要针对包括吊杆索力、桥面线形及拱肋变形、结构应力应变、温度在内的4个关键参数进行监测。

2.1.1 吊杆索力

吊杆在拱桥结构中发挥着承重传力、控制变形、提高刚度和稳定性的重要作用,它是保障拱桥结构性能的关键构件之一,其索力的大小直接反映吊杆的受力状况。通过监测各吊杆的索力,可以判断吊杆的总受力及各部位的受力分布情况,评价吊杆的承载状态。

2.1.2 结构几何线形

对于拱桥吊杆更换施工监控来说,主梁和拱肋的线形观测是控制成桥线形的核心依据。施工过程中,荷载变化将导致主拱肋空间线形、拱脚坐标及桥面高程发生动态变化。为使这种变化保持在可控制范围内,同时为与理论值及设计值作对比,需要在施工过程中对拱肋线形、拱脚坐标及桥面线形进行测量。

2.1.3 结构应力应变

施工监控中结构应力应变的监测对确保结构安全性、控制施工质量和改进设计具有重要作用。应力监测可以揭示结构中应力较大部位,识别结构薄弱环节,以便采取加固措施。同时,可反映出某些施工方案或步骤的不足,指导施工方案的修正,控制施工质量。

2.1.4 温度变化

大跨度桥梁结构由于温差会产生较大的温度应力和位移。通过监测温度变化,采用数值分析可以得到结构由温差引起的应力和位移,进而能够计算结构在施工期非温度作用下产生的应力和位移。

需要注意的是,更换吊杆过程中的施工控制原则应以吊杆内力和高程为目标,采用内力与标高双控方式,既要保证挠度不超过理论计算值,又要确保索力值处于设计范围内。

2.2 监控方法分析与测点布置

2.2.1 模型建立与计算

利用桥梁计算软件 MIDAS Civil 进行有限元建模,如图3所示。吊杆采用桁架单元模拟,其余构件采用梁单元。全桥共划分1 499个节点,42个桁架单元及2 454个梁单元。

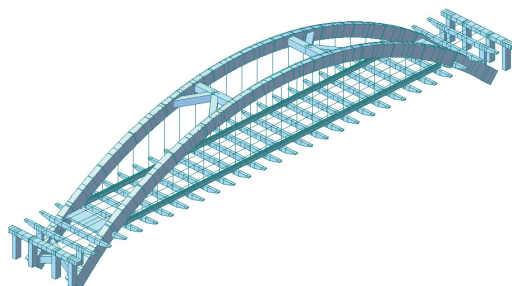


图3 桥梁有限元计算模型

在拆除吊杆附近T梁并增设钢纵梁后,计算得到桥梁在结构自重与恒载作用下理论索力值如图4、图5所示,桥面和拱肋位移如表1所示。其中,W代表西侧,E代表东侧;南侧第一根吊杆编号为1号,北侧第一根吊杆编号为21号。

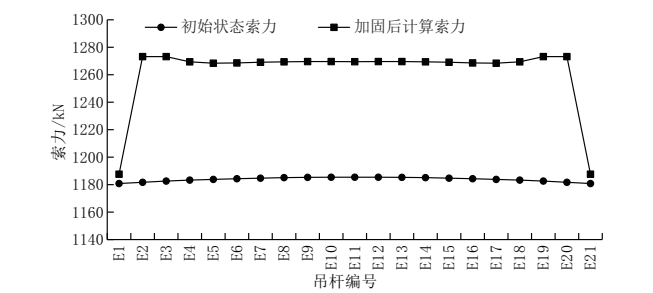


图4 东侧吊杆增设钢纵梁后理论计算索力表

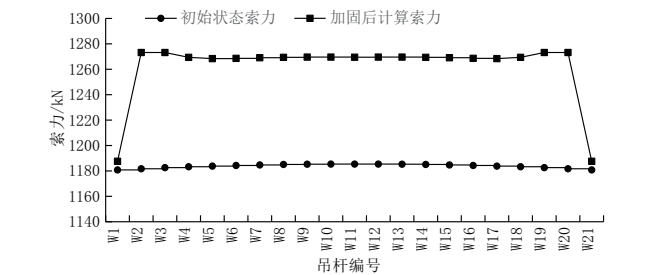


图5 西侧吊杆增设钢纵梁后理论计算索力表

表1 拆除吊杆附近T梁与增设钢纵梁后桥面和

位置	拱肋位移表				单位:mm			
	桥面高程变化				拱肋高程变化			
	拆除T梁	增设钢纵梁	附属设施施工	最终变化值	拆除T梁	增设钢纵梁	附属设施施工	最终变化值
吊杆1	0.6	-0.2	-0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1
吊杆2	1.1	-0.7	-1.6	-1.2	0.3	-0.1	-0.3	-0.1
吊杆3	1.6	-1.2	-2.4	-2.0	0.5	-0.3	-0.6	-0.4
吊杆4	2.1	-1.6	-3.3	-2.8	0.8	-0.5	-1.1	-0.8
吊杆5	2.7	-2.0	-4.2	-3.5	1.1	-0.8	-1.7	-1.4
吊杆6	3.2	-2.4	-5.0	-4.2	1.4	-1.1	-2.3	-2.0
吊杆7	3.6	-2.8	-5.8	-5.0	1.7	-1.3	-2.8	-2.4
吊杆8	4.0	-3.1	-6.5	-5.6	2.0	-1.6	-3.3	-2.9
吊杆9	4.3	-3.3	-7.0	-6.0	2.2	-1.8	-3.7	-3.3
吊杆10	4.5	-3.5	-7.4	-6.4	2.4	-1.9	-4.0	-3.5
吊杆11	4.6	-3.6	-7.5	-6.5	2.4	-1.9	-4.1	-3.6
吊杆12	4.5	-3.5	-7.4	-6.4	2.4	-1.9	-4.0	-3.5
吊杆13	4.3	-3.3	-7.0	-6.0	2.2	-1.8	-3.7	-3.3
吊杆14	4.0	-3.1	-6.5	-5.6	2.0	-1.6	-3.3	-2.9
吊杆15	3.6	-2.8	-5.8	-5.0	1.7	-1.3	-2.8	-2.4
吊杆16	3.2	-2.4	-5.0	-4.2	1.4	-1.1	-2.3	-2.0
吊杆17	2.7	-2.0	-4.2	-3.5	1.1	-0.8	-1.7	-1.4
吊杆18	2.1	-1.6	-3.3	-2.8	0.8	-0.5	-1.1	-0.8
吊杆19	1.6	-1.2	-2.4	-2.0	0.5	-0.3	-0.6	-0.4
吊杆20	1.1	-0.7	-1.6	-1.2	0.3	-0.1	-0.3	-0.1
吊杆21	0.6	-0.2	-0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1

2.2.2 吊杆索力监测

索力监测覆盖施工前所有旧吊杆、增设钢纵梁后所有旧吊杆以及施工完成后所有新吊杆,测点采用两侧对称布置,如图6所示。

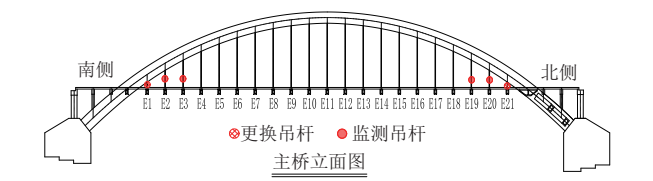


图6 吊杆更换过程中索力监测点

2.2.3 桥面高程与拱肋变形监测

通过在桥面布置测钉、拱肋位置布置棱镜的方式,利用全站仪对施工全过程桥面线形及拱肋线形进行监控并分析。测点采用两侧对称布置,如图7、图8所示。

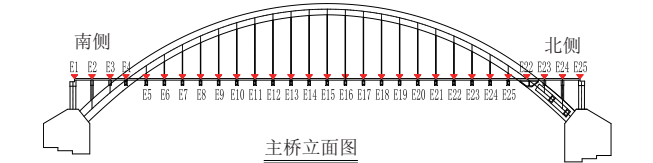


图7 东侧桥面高程测点布置示意图



图8 拱肋线形监测点布置示意图

2.2.4 结构应力应变监测

采用桥梁健康监测系统实现结构响应的实时跟踪观测,针对新增钢纵梁,每片选取3个截面,共6个截面,布置振弦式应变计对其结构内力进行监测,布置示意图如图9所示。

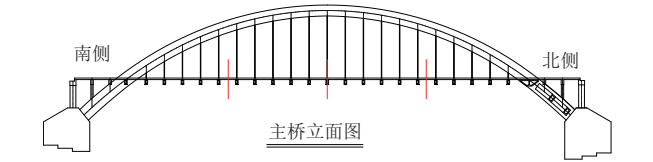


图9 应变监测截面布置图

2.3 关键参数监控频率确定

基于全过程控制理念,结合工程实际情况,制定吊杆更换施工监控过程中关键参数的监测频率方案,如表2所示。

2.4 误差标准设计

为了更好地实现吊杆更换过程施工目标控制,采用误差容许值作为标准对施工控制的结果进行评判,具体内容及要求如下。

2.4.1 施工前后总体控制要求

- (1)更换后的吊杆满足设计要求,索力误差不超过10%。
- (2)更换完毕后全桥线形误差不超过±10 mm。
- (3)结构应力变化控制在允许范围内。

表2 吊杆更换施工监测频率

序号	监测项目	监测频率			
		施工准备阶段	增设钢纵梁后	吊杆更换阶段	施工结束阶段
1	索力监测	全桥吊杆1次索力值	全桥吊杆1次索力值	每根吊杆更换过程临近吊杆索力实时监测	全桥吊杆1次索力值
2	桥面高程	全桥1次标高值	全桥1次标高值	每根吊杆更换过程临近测点标高实时监测	全桥1次标高值
3	拱肋线形	全桥1次初始值	全桥1次变化值	—	全桥1次最终值
4	结构应变	全过程自动化采集			
5	温度	全过程自动化采集			

2.4.2 施工过程中控制要求

- (1)旧吊杆与临时兜吊、临时兜吊与新吊杆之间体系转换平稳。
- (2)局部吊杆更换过程中相对变形不超过±5 mm。

2.5 异常数据应急处理

为确保吊杆更换及钢纵梁增设施工过程中结构安全与稳定,针对可能出现的监测参数异常情况,基于理论计算与误差控制标准,设定分级预警与应急响应机制,其中依据监测值为控制标准值的80%、100%、超限,设定3级预警:黄色预警、橙色预警、红色预警。具体处理策略如下。

2.5.1 异常数据复核

- 当监测数据出现异常波动或达到预警阈值时,立即启动数据复核程序。
- (1)检查监测仪器工作状态,排除设备故障或传输误差;
 - (2)在同一测点采用备用仪器进行复测验证;
 - (3)记录同期温度、风速等环境参数,分析环境因素对监测数据的影响程度;
 - (4)对比相邻测点数据变化趋势,判断异常数据的空间关联性。

2.5.2 分级响应策略

- (1)黄色预警:现场技术负责人组织分析异常原因,加密监测频率至原方案的2倍,重点关注异常区域的发展趋势,同时检查施工工序是否符合方案要求,必要时调整施工节奏。
- (2)橙色预警:立即暂停相关区域施工,成立专项分析小组,结合有限元模型进行实时反演分析,评估当前结构安全状态。若确认异常由施工引起,迅速调整施工参数(如张拉力控制、临时支撑刚度等);若由环境因素主导,则选择温度稳定时段继续

施工。

- (3)红色预警:全面停止施工,启动应急预案。对异常区域采取临时加固措施(如增设临时支撑、调整临时吊杆力);组织专家论证,分析异常成因及发展趋势。根据论证结果制定专项处置方案,必要时反向恢复至上一施工阶段;待异常消除、结构稳定后,方可按调整后的方案继续施工。

2.5.3 典型异常工况处理分析

- (1)索力骤增/骤降:检查临时兜吊体系受力状态,调整高强度螺纹钢张拉力,确保临时体系与永久结构受力转换平稳。
- (2)桥面线形突变:检查横梁支座状态及T梁湿接头完好性,必要时采用千斤顶局部顶升调平。
- (3)应力超限:卸除桥面施工荷载,加强临时支撑,调整施工顺序为间隔跳仓作业。
- (4)温度影响显著:选择凌晨等温度稳定时段进行关键工序施工,实测温度场修正监测数据。

3 施工监控结果计算与分析

3.1 桥面高程监测结果分析

桥面线形变化如图10、图11所示。扣除测量时温度变化及施工过程引起的桥面高程变化,最终东、西两侧桥面高程最大变化分别为8.5 mm、-7.4 mm。考虑到施工期间未封闭交通,车辆通行产生的桥面振动对测量有影响,且其偏差值均小于10 mm,桥面高程变化未出现异常,满足相关要求。

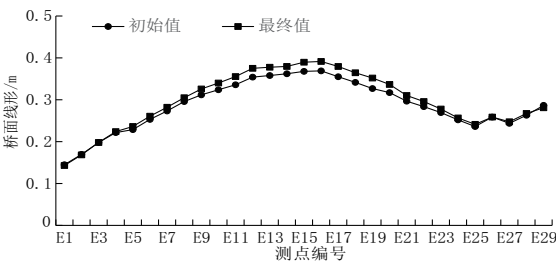


图10 东侧桥面线形变化结果

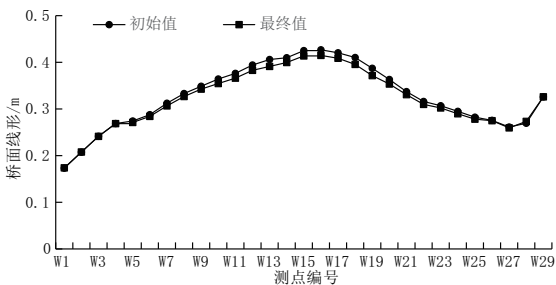


图11 西侧桥面线形变化结果

3.2 拱肋线形监测结果分析

拱肋线形测点坐标变化值如表3所示。扣除测

量时温度变化及施工过程中引起的拱肋变化,最终拱肋水平坐标最大变化值为-3.8 mm,高程最大变化值为3.9 mm,两者偏差值均小于10 mm,拱肋变形未出现异常,满足相关要求。

表3 施工前后拱肋坐标变化值								单位:mm	
测点编号		施工前后坐标变化值			理论计算变化值		拱肋坐标变化与理论偏差		
		DX	DY	DZ	施工影响 DZ_1	温度影响 DZ_2	dX	dY	dZ
东侧	GLE1	-2.2	0.2	3.9	0.0	0.0	-2.2	0.2	3.9
	GLE2	0.9	2.6	11.3	-0.1	13.1	0.9	2.6	-1.7
	GLE3	2.2	1.1	25.4	-3.6	27.4	2.2	1.1	1.6
	GLE4	3.5	-2.5	10.5	-0.1	13.1	3.5	-2.5	-2.5
	GLE5	0.7	-2.1	2.9	0.0	0.0	0.7	-2.1	2.9
西侧	GLW1	1.9	-2	-3.3	0.0	0.0	1.9	-2	-3.3
	GLW2	-2	2.5	-2.3	-0.1	-2.0	-2	2.5	-0.2
	GLW3	-0.5	-3.8	-6.2	-3.6	-4.2	-0.5	-3.8	1.6
	GLW4	-2.2	0.6	-1.8	-0.1	-2.0	-2.2	0.6	0.3
	GLW5	-2.4	-2.4	3.2	0.0	0.0	-2.4	-2.4	3.2

3.3 吊杆索力监测结果分析

吊杆更换过程中振动频率变化如图12、图13所示。由此可见,施工前后吊杆振动频率总体上变化较小,某些吊杆由于在施工过程中,凿除T梁、清理吊杆导管、安装吊杆减震器及防水罩等,改变了吊杆两端边界条件及自由振动长度,造成吊杆自振频率发生改变。

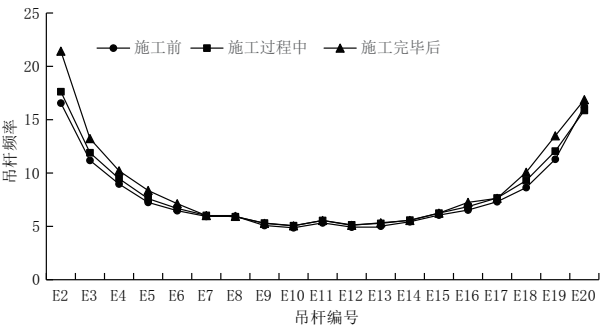


图12 东侧吊杆频率变化结果(单位:Hz)

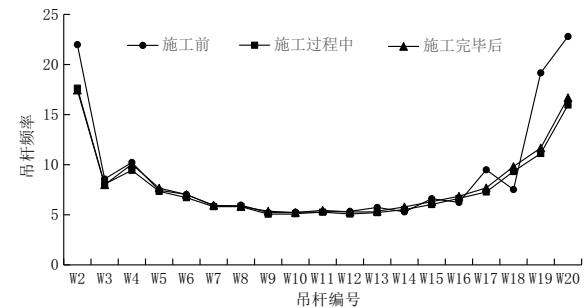


图13 西侧吊杆频率变化结果(单位:Hz)

采用施工完毕后测得的吊杆自振频率,计算得到吊杆的索力值,如表4所示。由于吊杆自振频率为通车状态下测试所得,测试结果受环境影响较大,且吊杆边界条件复杂,因此吊杆索力计算值仅供参考。由此可见,吊杆最大测试索力值为1 642.8 kN,小于吊杆破断索力3 120 kN,吊杆结构处于安全

状态。

3.4 结构应力(应变)监测结果分析

3.4.1 健康监测系统监测结果

依托于桥梁健康监测系统,在桥梁施工全过程对其结构响应进行不间断监测,期间拱肋应变、吊杆振动等关键参数并未出现预警,结构受力状况良好。

3.4.2 钢纵梁应变监测

通过在钢纵梁上布置的振弦式应变计,对钢纵梁施工期间应变进行监测,监测数据如表5、表6所示。由此可见,施工全过程,东侧钢纵梁应变变化在-60~68.6 $\mu\epsilon$ 之间,西侧钢纵梁应变变化在-77.6~33.1 $\mu\epsilon$ 之间,参考钢材的弹性模量206 GPa,将应变变化换算成应力变化,其东侧钢纵梁应力变化为-12.36~14.13 MPa,西侧钢纵梁应力变化为-15.99~6.82 MPa,远小于钢材许可应力-270~270 MPa,钢纵梁状况良好。

4 结 论

本文针对中承式劲性骨架拱桥的吊杆老化与结构冗余度不足问题,采用半封闭交通模式,对中承式劲性骨架拱桥吊杆更换与钢纵梁增设施工实施全过程监控,结合本次监控及监测成果,可得出如下结论。

(1)吊杆更换施工期间,4根端吊杆附近桥面高程变化小于5 mm,附近吊杆索力变化值小于10%,均在允许范围内,新旧吊杆受力转换良好,无异常。施工前后吊杆振动频率总体上变化较小。施工完毕后,吊杆最大测试索力值为1 642.8 kN,小于吊杆破断索力3 120 kN,吊杆结构处于安全状态。

表4 施工完毕后吊杆索力值

吊杆编号	计算索长/m	施工后索力/kN	吊杆编号	计算索长/m	施工后索力/kN
E1	3.08	—	W1	3.08	—
E2	6.54	1642.8	W2	6.54	1037.7
E3	9.58	1412.7	W3	13.13	985.5
E4	12.22	1408.8	W4	12.22	1362
E5	14.48	1346.3	W5	14.48	1121.6
E6	16.36	1258.9	W6	16.36	1219.8
E7	17.89	1072.5	W7	17.89	1047.7
E8	19.08	1200.1	W8	19.08	1153.2
E9	19.93	1033.5	W9	19.93	1065.9
E10	20.45	996.1	W10	20.45	1068.7
E11	20.64	1237.0	W11	20.64	1186.8
E12	20.45	1014.7	W12	20.45	1094.8
E13	19.93	1058.5	W13	19.93	1065.9
E14	19.08	1045.1	W14	19.08	1138
E15	17.89	1159.4	W15	17.89	1186.7
E16	16.36	1304.3	W16	16.36	1158.5
E17	14.48	1110.2	W17	14.48	1129
E18	12.22	1369.1	W18	12.22	1296.2
E19	9.58	1472.9	W19	9.58	1077.7
E20	6.54	962.4	W20	6.54	938
E21	3.08	—	W21	3.08	—

表5 施工期间东侧钢纵梁应变监测数据

测量次数	初始值	1	2	3	4	5	6
EZ1-1	应变	7 195.7	7 203.9	7 237.4	7 234.6	7 201.5	7 209.5
	温度	40.6	41.1	36	33.9	36.1	32.9
	累积变化	—	8.2	41.7	38.9	5.8	13.8
EZ1-2	应变	3 799.6	3 806.2	3 809.1	3 816.5	3 840.2	3 853.6
	温度	38.2	38.9	38.5	33	32.5	32.9
	累积变化	—	6.6	9.5	16.9	40.6	54
EZ2-1	应变	3 981.9	3 986.2	3 986.7	3 953.9	3 949.2	3 943.7
	温度	41.3	41.6	41.7	34.7	35.2	33.5
	累积变化	—	4.3	4.8	-28	-32.7	-38.2
EZ2-2	应变	4 083.8	4 088.2	4 086.8	4 067.3	4 062.4	4 058.9
	温度	38	39.1	39.1	32.9	32.3	32.8
	累积变化	—	4.4	3	-16.5	-21.4	-24.9
EZ3-1	应变	3 670.5	3 673.2	3 637.6	3 648.6	3 630	3 622.1
	温度	40.7	40.4	40.4	33.4	35.6	33.4
	累积变化	—	2.7	-32.9	-21.9	-40.5	-48.4
EZ3-2	应变	3 764.5	3 749.9	3 772.6	3 724.4	3 716.8	3 725
	温度	37.5	35.8	38.1	32.6	32.6	33.4
	累积变化	—	-14.6	8.1	-40.1	-47.7	-39.5

(2)施工全过程中,东、西两侧桥面高程最大变化值均小于10 mm,未出现异常,满足相关要求;最终拱肋水平坐标与高程坐标最大变化偏差值均小于10 mm,拱肋变形未出现异常,满足相关要求;东侧钢纵梁应力变化为-12.36~14.13 MPa,西侧钢纵梁应力变化为-15.99~6.82 MPa,远小于钢材许可应力

-270~270 MPa,钢纵梁状况良好。

通过施工控制及监测数据分析可知,各项监控指标变化平稳且处于可控范围,未出现明显超出控制值的情况,施工过程中桥梁结构整体保持安全状态;施工完成后,桥梁状况良好,各项性能均满足设计要求。采用本文所建立的吊杆拱桥维修加固方

表 6 施工期间西侧钢纵梁应变监测数据

测量次数	初始值	1	2	3	4	5	6
WZ1-1	应变	3 844.8	3 847.9	3 845.9	3 860.9	3 863.8	3 861.2
	温度	39	44	35.6	39.1	35.7	35.8
	累积变化	—	3.1	1.1	16.1	19	16.4
WZ1-2	应变	4 477.1	4 484.9	4 435.9	4 446.6	4 423.4	4 399.5
	温度	35.5	39.1	34.8	37.3	34.8	34.8
	累积变化	—	7.8	-41.2	-30.5	-53.7	-77.6
WZ2-1	应变	3 786.8	3 814.2	3 794.5	3 808.3	3 795.7	3 793.2
	温度	38.3	44.2	35.6	39.3	36.2	35.1
	累积变化	—	27.4	7.7	21.5	8.9	6.4
WZ2-2	应变	3 900.2	3 917.4	3 906.5	3 922.6	3 900.8	3 905.2
	温度	34.8	41.1	33.1	35.5	34.4	32.7
	累积变化	—	17.2	6.3	22.4	0.6	5
WZ3-1	应变	3 721.8	3 726.8	3 706.8	3 720.5	3 694.9	3 703.8
	温度	35.3	37.9	33.4	35.9	34.3	33.1
	累积变化	—	5	-15	-1.3	-26.9	-18
WZ3-2	应变	3 681.2	3 680	3 690.9	3 663.9	3 688.2	3 683.2
	温度	38.3	41	35.8	40.2	35.2	35.4
	累积变化	—	-1.2	9.7	-17.3	7	2

案,成功实现了该桥吊杆更换与钢纵梁增设的预期目标,相关研究可为同类型桥梁的维修加固提供技术参考与工程借鉴。

参考文献:

[1] 陈宝春,刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J].交通运输工程学报,2020,20(1):27-41.

[2] 蒋超越,李章瑜,陈浩.吊杆拱桥新增加劲纵梁结构形式比选及优化设计[J].公路交通技术,2021,37(3):105-110.

[3] Kulicki J M, Strain B P, Marquiss S W, et al. Cable vibration problems and cracked diaphragm weld details on the i-470 tied-arch bridge at wheeling, west virginia[C]//Proceedings of 3rd Annual International Bridge Conference, 1986: 123-135.

[4] 单成林.刚架拱桥病害的综合剖析及整治对策[J].中外公路,2007(1):119-121.

[5] 赵震寅.中承式柔性系杆拱桥系杆更换关键技术研究[D].杭州:浙江理工大学,2023.

[6] 周彬彬,刘建华.中承式拱桥系杆更换技术创新与应用[J].交通

科技与管理,2025,6(20):109-111.

[7] 王石磊,高岩,张勇.以钢横梁受力为主的拱桥桥面系病害分析与加固方案探讨[J].铁道建筑,2010(6):37-40.

[8] 孙继刚.大跨钢管混凝土拱桥车桥振动及加固设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

[9] 张武,吴运宏.钢管混凝土拱桥动态悬吊式主梁结构改造技术[J].桥梁建设,2016,46(2):103-108.

[10] 毛闵留,陈斌,周婕.不中断交通的拱桥更换吊杆及增设加劲纵梁的优化研究[J].市政技术,2022,40(1):98-102.

[11] 孙强.钢管混凝土系杆拱桥吊杆更换施工模拟及监测控制[J].交通世界,2025(20):157-159.

[12] 王菲.大跨度钢管混凝土拱桥吊杆更换关键技术研究[J].铁道工程学报,2021,38(12):61-67.

[13] 张记峰,何熹,梁伟俊,等.中承式拱桥系杆更换方案与施工监控技术研究[J].施工技术,2026,55(2):52-57;81.

[14] 丁明亚,李凌,许淇,等.基于增设刚性纵梁的柔性系杆拱桥力学性能研究[J].城市道桥与防洪,2025(11):132-137;190.

[15] 周青松.中承式拱桥吊杆更换施工监控研究[J].建筑技术开发,2024,51(2):105-107.