

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.06.060

基于机器视觉的系杆拱桥的拱位移监测技术研究

杨媛媛,杨天宇,王进潇

[上海城投公路投资(集团)有限公司,上海市 200335]

摘要:随着我国桥梁的服役数量及服役时间的不断增长,桥梁领域越来越重视对系杆拱等特殊结构桥梁的位移监测。本文基于机器视觉方法,通过在拱上特定位置设施靶标、在两端拱脚设置相机的方式,提出了一种拱位移监测方案。随后以S32公路油墩港桥为实例,对该方法进行了试验验证,结果表明该方法能够同时达到亚毫米级位移精度与昼夜动态监测的要求,实现了对油墩港桥的拱位移监测。试验结果可靠,为同类系杆拱桥的拱位移监测方案提供了参考。

关键词: 位移监测;机器视觉;系杆拱桥;动态监测;拱位移

中图分类号:U446

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)06-0254-05

0 引言

系杆拱桥由于其造型美观、结构轻盈,并适用于软土地带的大跨径桥梁等诸多优点,被广泛应用于公路、市政道路和铁路网的建设。随着时代的不断变化,我国桥梁的发展阶段逐渐从建设阶段进入到养护阶段,在“十三五”期间,我国仅仅用于路桥的日常养护与养护工程中的费用就达到10 484亿人民币,其中尤其重视对于系杆拱桥等特殊结构桥梁的健康监测。

系杆拱桥由系梁(系杆)、拱与钢索(吊杆)组成,拱两端的拱脚与系梁固结相连,系梁与拱肋再通过钢索相连。系梁将其承受的荷载通过钢索传递给拱,拱将其承受的荷载通过拱脚传递给系梁,从而形成一个较为复杂的超静定结构。

在系杆拱桥的结构中,拱是主要受力构件。拱轴的偏移会导致拱的失稳垮塌。已有荷载试验表明车辆荷载过大会导致拱轴产生变形^[1],而部分研究通过数值模拟计算发现日常温度的变化也会导致拱轴产生相应的位移,其位移对1/4跨径处及3/4跨径处的钢索、拱脚及系梁的内力与位移会产生明显的影响^[2-3]。因此,对于拱的位移监测是系杆拱桥健康

监测中的一个重要内容。

拱的位移可采用卫星定位、传统光学测量等方式进行监测。在实际工程中,拱的位移值一般为毫米级,因此就要求监测的精度达到亚毫米级。此外在服役状态下,桥梁始终受到动态的车辆荷载作用,因此需要对拱的各部位位移实现昼夜不间断的同步动态监测。现有监测技术与手段尚无法完美解决对拱的位移监测中的精度与动态监测问题,因此有必要对拱的位移监测技术进行进一步研究。

本研究基于机器视觉技术,提出一种拱位移监测的解决方案,并结合油墩港桥的健康监测项目,对该解决方案进行了试验验证和研究。

1 基于机器视觉的系杆拱桥的拱位移监测布置方案

基于机器视觉的系杆拱桥的拱位移监测布置方案如图1所示。该方案中的系杆拱桥跨径为 L ,在 $L/4$ 、 $L/2$ 及 $3L/4$ 处的拱上放置测量靶,在拱的两端墩台上各放置一台相机。拱的位移监测方案要求各靶点的测量精度达到0.6 mm。

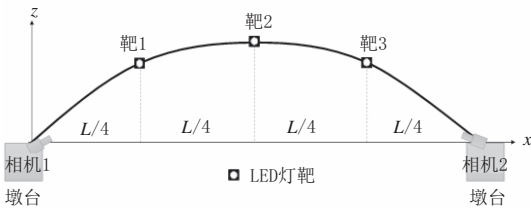


图1 基于机器视觉系杆拱桥拱的位移监测方案

测量靶采用LED光靶,不依赖于日光,解决了24小时保持稳定测量的问题。墩台处的两台相机同

收稿日期:2023-12-18

基金项目:上海城投(集团)有限公司科研项目(CTKY-ZDZX-2022-001)

作者简介:杨媛媛(1982—),女,硕士,高级工程师,从事高速公路运营维护工作。

通信作者:王进潇(1993—),男,博士,从事高速公路运营维护工作。电子信箱:ctglwangjx@chengtou.com

步拍摄三处 LED 光靶的图像,并基于长大结构视觉测量模型^[4]构筑三处 LED 光靶的沉降和横向位移的同步测量模型。采用 TAM (Technology Acceptance Model, 技术接受模型) 系统实现精度为 0.05 像素的 LED 靶的图像解析,从而满足监测方案要求。

2 基于机器视觉的系杆拱桥的拱位移监测原理

基于机器视觉的系杆拱桥的拱位移监测计算原理如图 2 所示,其中 T 为监测过程中某一时刻, L_i ($i=1,2,3,4$) 为距离相邻标靶或相机的距离; α_i ($i=1,2$) 为相机视角与水平面的夹角; x 为水平方向, z 为竖直方向。具体监测步骤如下所示。

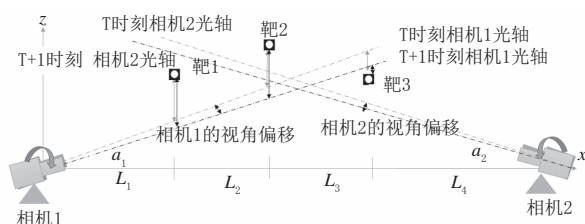


图 2 计算原理示意图

(1) 假定 T 时刻(初始时刻)至 $T+1$ 时刻:

- 相机 1 发生了视角偏转 $\Delta\alpha_1$;
- 相机 2 发生了视角偏转 $\Delta\alpha_2$;
- 1 号靶发生了 ΔZ_1 的沉降;
- 2 号靶发生了 ΔZ_2 的沉降;
- 3 号靶发生了 ΔZ_3 的沉降。

(2) 从相机 1 拍摄到的 T 时刻及 $T+1$ 时刻的图像中可以取得:

- 1 号靶的沉降方向的位置差异 ΔV_{11} , $\Delta V_{11} = V_{11}(T+1) - V_{11}(T)$;
- 2 号靶的沉降方向的位置差异 ΔV_{12} , $\Delta V_{12} = V_{12}(T+1) - V_{12}(T)$;
- 3 号靶的沉降方向的位置差异 ΔV_{13} , $\Delta V_{13} = V_{13}(T+1) - V_{13}(T)$ 。

(3) 从相机 2 拍摄到的 T 时刻及 $T+1$ 时刻的图像中可以取得:

- 1 号靶的沉降方向的位置差异 ΔV_{21} , $\Delta V_{21} = \Delta V_{21}(T+1) - \Delta V_{21}(T)$;
- 2 号靶的沉降方向的位置差异 ΔV_{22} , $\Delta V_{22} = \Delta V_{22}(T+1) - \Delta V_{22}(T)$;
- 3 号靶的沉降方向的位置差异 ΔV_{23} , $\Delta V_{23} = \Delta V_{23}(T+1) - \Delta V_{23}(T)$ 。

(4) 上述变量的相互关系如式(1)~(6)所示:

$$\Delta V_{11} = f \left(\frac{\cos \alpha_1}{L_1} \cdot \Delta Z_1 + \Delta \alpha_1 \right) \quad (1)$$

$$\Delta V_{12} = f \left(\frac{\cos \alpha_1}{L_1 + L_2} \cdot \Delta Z_2 + \Delta \alpha_1 \right) \quad (2)$$

$$\Delta V_{13} = f \left(\frac{\cos \alpha_1}{L_1 + L_2 + L_3} \cdot \Delta Z_3 + \Delta \alpha_1 \right) \quad (3)$$

$$\Delta V_{21} = f \left(\frac{\cos \alpha_2}{L_4} \cdot \Delta Z_1 + \Delta \alpha_2 \right) \quad (4)$$

$$\Delta V_{22} = f \left(\frac{\cos \alpha_2}{L_4 + L_3} \cdot \Delta Z_2 + \Delta \alpha_2 \right) \quad (5)$$

$$\Delta V_{23} = f \left(\frac{\cos \alpha_2}{L_4 + L_3 + L_2} \cdot \Delta Z_3 + \Delta \alpha_2 \right) \quad (6)$$

式中: f 为 2 台相机的焦距。

求解上述式(1)~(6)的联立方程,可以求得以下 5 个变量:

- 相机 1 发生的视角偏转 $\Delta\alpha_1$;
- 相机 2 发生的视角偏转 $\Delta\alpha_2$;
- 1 号靶发生的 ΔZ_1 的沉降;
- 2 号靶发生的 ΔZ_2 的沉降;
- 3 号靶发生的 ΔZ_3 的沉降。

(5) 上述算法为沉降方向的位移计算方法,该算法同样可用于横桥向,以计算出横桥向的位移。

3 油墩港桥的监测方案

3.1 油墩港桥概况

S32 油墩港桥由上行(浙江方向)和下行(浦东方向)两幅桥组成,两幅桥结构相同,如图 3 所示,均为跨径 100 m, 拱高 23 m 的大跨径系杆拱桥。拱架为布置于车道左右两侧的双拱结构,双拱向内倾斜,拱顶上部通过钢横梁连接,拱的两端拱脚通过纵向钢梁固结。



图 3 油墩港桥实拍图

3.2 传感器布置

如图 4 至图 6 所示,在每个拱上各布置 3 个 LED 灯靶和 2 台相机,全桥共形成 4 组测线,分别为拱 G1、G2、G3 和 G4。

3.3 监测时间和监测频率

本文对 2022 年 12 月 1 日—2023 年 2 月 7 日

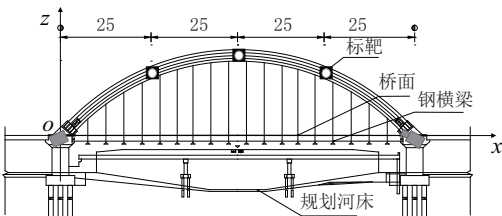


图4 油墩港桥监测方案立面图(单位:m)

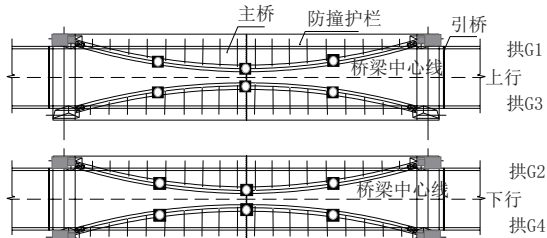
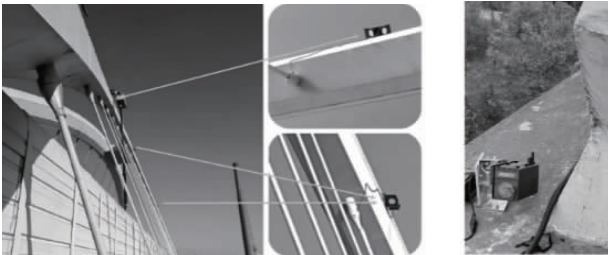


图5 油墩港桥监测方案平面图



(a) LED灯靶

(b) 相机

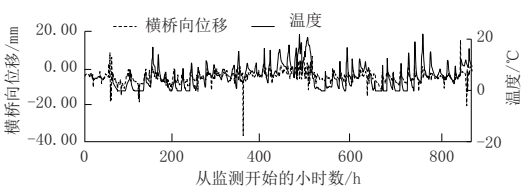
图6 LED灯靶及相机实拍图

期间的监测数据进行分析,监测频率为1次/h。

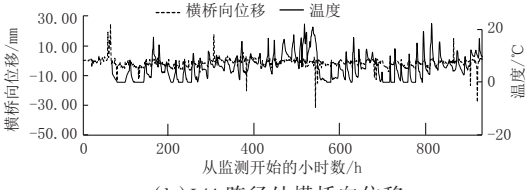
3.4 监测结果

上行桥梁 G1 按时间序列的监测结果如图 7 所示。图 7 表明,拱在 $L/4$ 、 $L/2$ 及 $3L/4$ 跨径处的竖直方向和横桥向的拱位移受日夜温差的影响和通行车辆的影响明显。

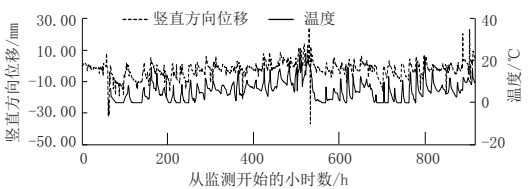
对 G1 拱的竖直方向、横桥向位移与温差的相关分析结果如图 8 所示。上下行桥梁的所有测点温差效应的汇总如表 1 所示。图 8 表明拱在 $L/4$ 、 $L/2$ 及 $3L/4$ 跨径处的竖直方向和横桥向的位移变化均受到昼夜温差影响,和温差存在着强相关性。竖向呈现为夜降日升的变化趋势, $L/2$ 跨径处拱的温差效应在 $0.5\sim 1.2\text{ mm}/^{\circ}\text{C}$, $L/4$ 、 $3L/4$ 拱的温差效应在 $0.2\sim 1.0\text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ (见表 1)。横桥向则表现为:当温度下



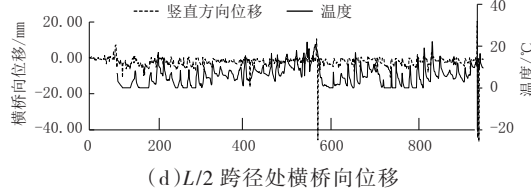
(a) $L/4$ 跨径处竖直方向位移



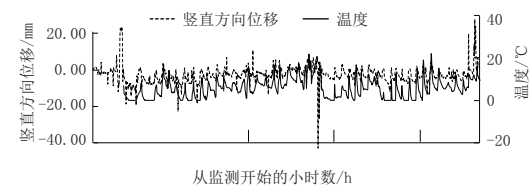
(b) $L/4$ 跨径处横桥向位移



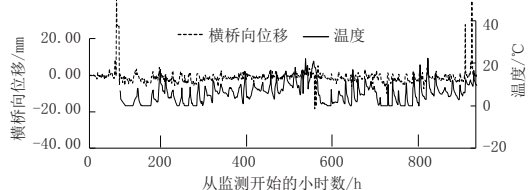
(c) $L/2$ 跨径处竖直方向位移



(d) $L/2$ 跨径处横桥向位移

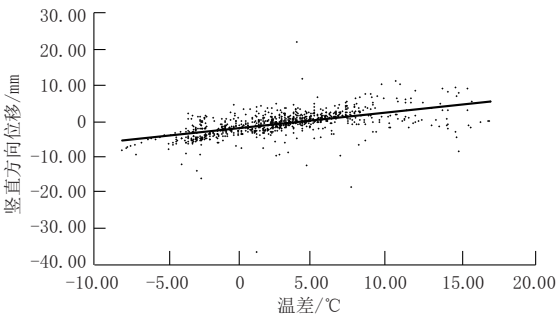


(e) $3L/4$ 跨径处竖直方向位移

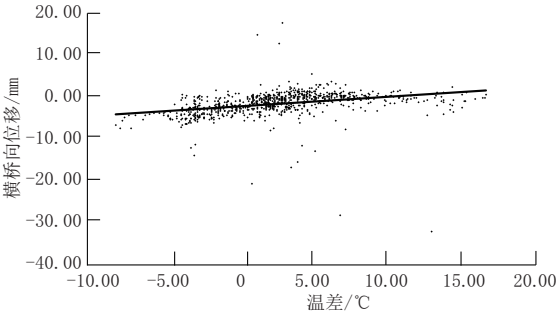


(f) $3L/4$ 跨径处横桥向位移

图7 上行浙江方向桥梁 G1 组的按时间序列的监测结果
降时,双拱各测点向桥两侧外位移;当温度上升时,双拱各测点向桥中线方向位移。所有测点的温差效应均在 $0.3\sim 0.4\text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 范围内(见表 1)。



(a) $L/4$ 跨径处竖直方向位移



(b) $L/4$ 跨径处横桥向位移

图8 温差与位移的相关分析

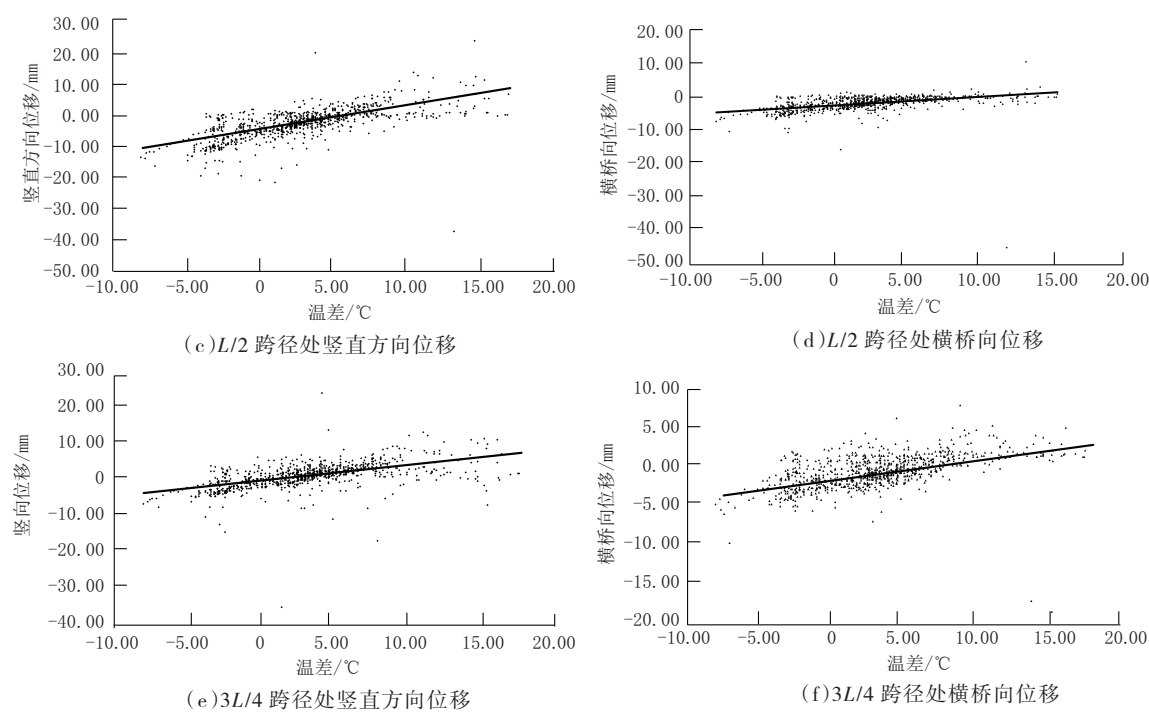


图 8 温差与位移的相关分析

表 1 温差效应汇总表

桥梁	测线	测点 1 /(mm·℃ ⁻¹)		测点 2 /(mm·℃ ⁻¹)		测点 3 /(mm·℃ ⁻¹)	
		垂直方向	横桥向	垂直方向	横桥向	垂直方向	横桥向
上行(浙江方向)	G1	0.346	0.197	0.708	0.189	0.453	0.227
	G3	0.980	-0.352	1.181	-0.281	0.975	-0.339
下行(浦东方向)	G2	0.209	0.244	0.473	0.272	0.313	0.169
	G4	0.338	-0.402	0.720	-0.268	0.553	-0.273

上下行桥梁两侧拱的温差效应差异比较如图 9 所示。图 9 表明,上行和下行桥梁的两侧拱的横桥向位移的温差效应基本一致。而对于竖向位移,上行桥

梁的两侧拱的温差效应明显高于下行,且左右两侧也有更明显差异。

上行桥梁在疑似重车通过时的拱的位移响应如

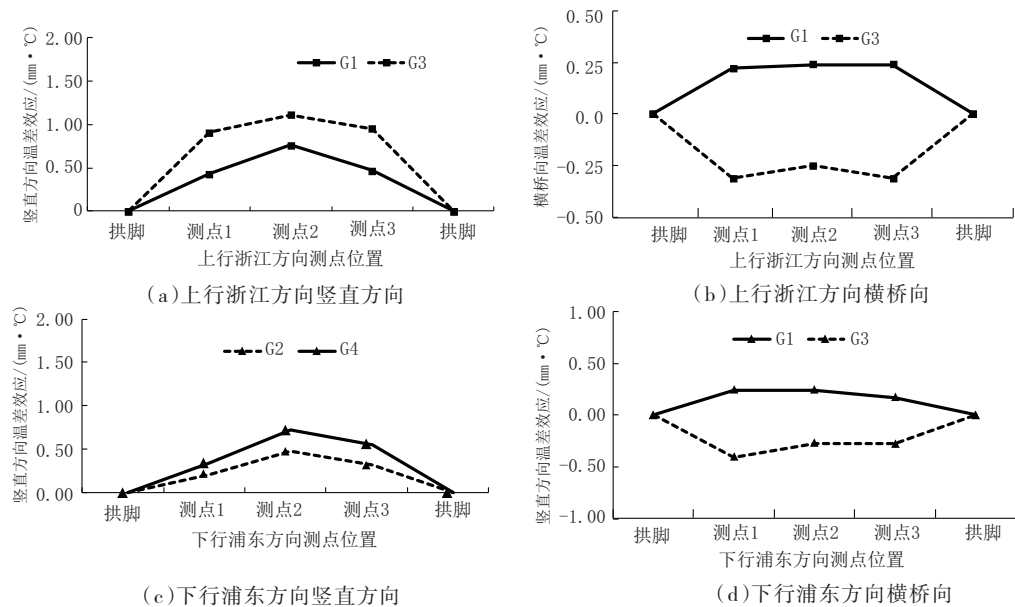


图 9 桥梁两侧拱温差效应的差异

图10所示。在G1的 $L/4$ 跨径处,桥拱存在一个突发性下挠的数据分析结果。疑似重车在通往上行浙江方向桥梁的 $1/4$ 跨径处附近通过时,引起G1桥拱的

$L/4$ 、 $L/2$ 及 $3L/4$ 跨径处的拱竖直方向的瞬间位移分别达到 -36.2 、 -21.3 、 11.1 mm,横桥向位移分别达到 -20.5 、 -16.3 、 0.0 mm。

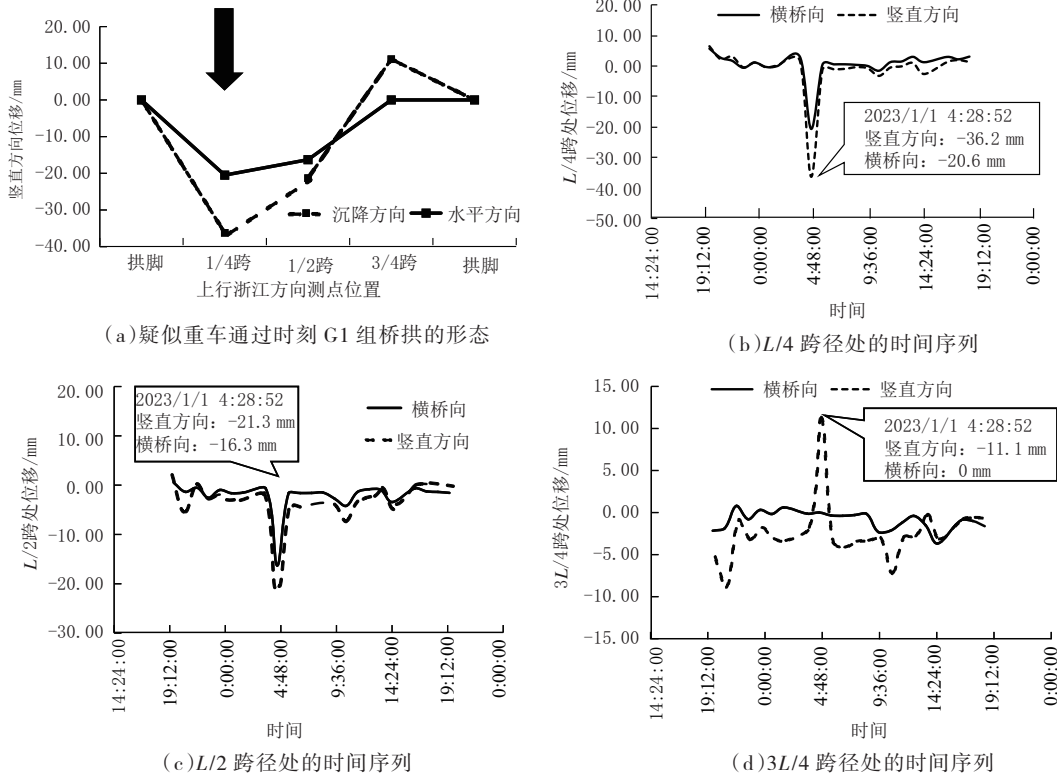


图10 疑似重车通过时的响应

4 结 语

本研究基于机器视觉技术,提出了一种监测拱桥位移的解决方案,并结合油墩港桥健康监测项目实例对该解决方案进行了试验和研究。3个月的监测数据分析表明,该技术方案是可行的,监测精度满足数据分析的要求。

对油墩港桥的监测结果表明,系杆拱桥拱的温度效应和动荷载效应明显。今后将利用监测的拱温度效应和拱脚应变、索力等监测内容进行融合,全面把握系杆拱桥拱的静力性能;同时提高机器视觉

的监测频率,进一步掌握系杆拱桥拱的动力性能。

参考文献:

- [1] 卜志鹏.大跨度CFST系杆拱桥静载试验分析研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(3):388-391.
- [2] 杨阳,杨宏平.温度对CFST系杆拱桥静力性能的影响研究[J].铁道建筑技术,2017(12):13-16,59.
- [3] 贾宏宇,雷啸,梁斌,等.高速铁路大跨度钢管混凝土系杆拱桥温度效应分析[J].河南大学学报(自然科学版),2021,51(2):240-252.
- [4] 上海数久信息科技有限公司.一种桥隧结构位移的测量系统:中国,201710322231.8[P]. 2023-12-15.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com