

基于局部反演的桥梁支架监测评估系统研究

吴昊

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401120)

摘要: 桥梁临时支撑结构是为桥梁施工过程中提供支撑而临时搭建的结构, 其中贝雷梁是使用贝雷架组成的桁梁, 因其施工简单, 整体性好, 成本较低等特点, 在现浇桥梁的施工中被广泛应用。当前的桥梁施工监测常受限于布置的传感器数量, 无法对监测对象的未知测点进行实时监测分析, 而临时支撑结构需要保持良好的实时监测评估。因此, 使用无线采集仪及各类传感器组成远程监测系统, 再通过有限元模拟仿真, 结合局部监测数据展开反演分析, 从而达到对监测对象整体的力学状态分析, 并通过 Python 开发的 web 端程序, 实现了采集参数的实时监测与评估, 为保障施工质量与安全提供了理论依据, 以期为后续的施工监测系统开发提供一定的参考。

关键词: 施工监测; 反演分析; 拓展监测; 实时评估

中图分类号: U448.29

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0024-06

Research on Monitoring Evaluation System of Bridge Support Based on Local Inversion

WU Hao

(Chongqing Survey Institute Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The temporary support structures of bridge are the structures temporarily erected to provide support during the bridge construction process, in which Beilei beam is a truss beam composed of Beilei frame. The Beilei beam is widely used in the cast-in-place bridge construction due to its simple construction, good integrity and low cost. The current construction monitoring of bridges is limited in the arrangement of sensor number, which is hard to carry out the real-time monitoring and analysis of unknown monitoring points of the monitored objects. However, the temporary support structure needs to be subject to good real-time monitoring and evaluation. Therefore, the wireless data acquisition devices and various sensors are used to establish a remote monitoring system, and then the finite element is adopted for simulation. Combined with the local monitoring data, the inversion analysis is carried out to analyze the integral mechanical state of the monitored objects. And through Python-developed web-based program, the real-time monitoring and evaluation of collected parameters are realized. The theoretical foundation is provided for ensuring the construction quality and safety, which can provide a certain reference for later development of construction monitoring systems.

Keywords: construction monitoring; inversion analysis; extended monitoring; real-time evaluation

0 引言

桥梁施工监测是桥梁施工过程中的一项重要组成部分, 其内容主要是对监测目标的力学状态等进行监测, 是保障施工安全、成桥结构符合设计要求的基础。传统的桥梁施工监测系统是通过将各种传感器布置于所需监测位置, 再用采集仪将采集到的数据传输至网络, 实现实时监测、实时分析与数据共享的监测目标, 但对于土木结构而言, 其结构往往十分

复杂, 受限于成本和空间条件等客观因素的影响, 也只能使用比较有限的传感器布置在关键测点处。因此, 如何利用有限测点数据反演分析监测对象的其他参数成为了本研究的重点。

20 世纪 70 年代末, 岩土工程领域提出了以现场实测得到的反映结构力学行为的应力、应变、位移等物理量为依据的反演分析法^[1], 通过将该方法引用至桥梁工程能使得监测分析更具有实用性^[2]。2012 年, 刘金宝^[3]通过有限元模型模拟某 PC 箱梁的开裂病害, 反演分析了开裂的原因并制定了加固处理措施; 2013 年, 李杰等人^[4]利用有限元模型结合实测数据, 反推结构约束、受载状态, 分析其下挠原因; 2018 年,

收稿日期: 2025-02-07

作者简介: 吴昊(1995—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

曹净等人^[5]以非插值节点处的位移值作为边界条件对结构的位移数据点进行B样条插值,并通过求导等函数分析反算出了荷载作用下结构的内力。

在已有研究成果基础上,本文利用有限元模型分析,结合施工监测实测数据,反演分析某桥梁支架的全局力学状态,构建实时健康评估系统。

1 实时监测评估系统设计

1.1 桥梁监测系统总体架构

桥梁结构健康监测系统是以桥梁本体为载体,通过集成传感器技术、网络通信技术和信息处理技术,将结构状态感知、环境参数采集、交通荷载监测、设备运行监管、智能预警及数据分析等功能模块有机整合的实时监测系统^[6-7]。

本研究采用无线数据采集装置配合多类型感知元件,搭建桥梁在线监测硬件平台,运用Python Dash框架设计并实现可视化Web监测界面^[8-9],以实现远程动态监测与安全评估的总体目标;同时借助ANSYS有限元分析软件开展结构反演分析,建立已布设测点与未布设区域间的数学关联模型,从而在传感器布设有限的现实条件下,实现对桥梁整体结构及其他未直接监测部位的运行状态推演,据此构建符合实际工程需求的专项评估体系,为桥梁管养决策提供科学支撑。该监测体系的技术路线见图1。

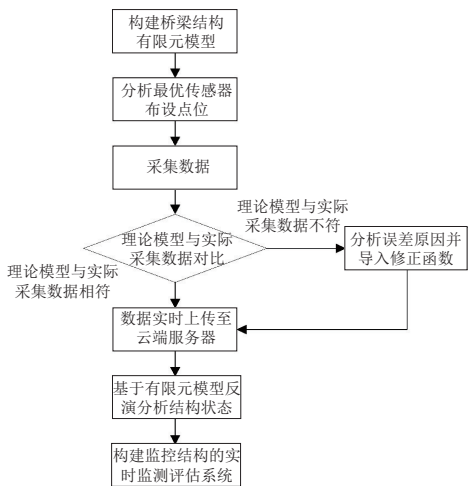


图1 实时监测评估系统流程图

1.2 桥梁监测系统组成

本监测系统采用了模块化设计,由3大核心模块构成。

(1)数据感知传输单元

该模块配置无线数据采集终端,集成表面应变振弦式表面应变计、温度传感器、风速仪等感知设备。

(2)实时分析监测中枢

基于Python Dash框架构建的在线监测平台,预置数据转换算法并集成Plotly动态可视化窗口,可生成实时交互式监测曲线,形成直观的结构状态数字画像^[10]。

(3)结构评估模块

采用有限元建模反演分析。通过建立已安装传感器区域与未监测区域的数学模型,结合模型仿真计算结果,推导出全域结构响应特征,实现实时监测评估结构健康的目标。

各子系统通过云端服务器互联^[11],具备高扩展性、多场景适配性和经济性优势,维护便捷的操作特性使其能适应不同结构类型与施工条件,满足桥梁等基础设施从临时检测到全生命周期监测的多样化需求。

1.3 局部数据反演分析基本原理

本研究选取贝雷桁架弦杆作为核心监测参量,该结构力学响应符合两端约束支撑特征(见图2)。基于均布荷载作用下的简支梁理论,以左支点建立笛卡尔坐标系(x 轴沿结构轴向延伸),推导得出(1)~(3)关键力学公式体系:

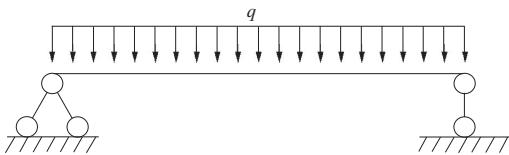


图2 简支梁受均布荷载示意图

$$\sigma(x) = \frac{M}{W}$$
 (1)

$$M(x) = \frac{1}{2}qlx - \frac{1}{2}qx^2$$
 (2)

$$f(x) = \frac{1}{EI} \left(-\frac{q}{24}lx^3 + \frac{q}{24}x^4 + \frac{ql^3}{24}x \right)$$
 (3)

式中: $\sigma(x)$ 为 x 点处梁应力; $M(x)$ 为 x 点处梁弯矩; $f(x)$ 为 x 点处梁挠度; W 为梁截面模量; I 为梁截面惯性矩; q 为均布荷载; l 为梁跨径。

根据理论公式可以推导出,梁跨中应力、梁1/4跨的应力及其函数关系:

$$\sigma(l/2) = \frac{ql^2}{8W}, \sigma(l/4) = \frac{3ql^2}{32W}$$
 (4)

$$\sigma(l/4) = 0.75\sigma(l/2)$$
 (5)

式中: $\sigma(l/2)$ 为梁跨中应力; $\sigma(l/4)$ 为梁1/4跨的应力。

同理可推导梁跨中挠度公式,以及梁跨中挠度与梁跨中应力的函数关系。

$$f(l/2) = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (6)$$

$$f(l/2) = \frac{5Wl^2}{48EI} \sigma(l/2) \quad (7)$$

式中: $f(l/2)$ 为梁跨中挠度。

通过力学的理论推导可知,在材料参数与荷载条件明确的前提下,贝雷桁架各测点间的应力、挠度值呈现线性相关性。此特性使得通过有限测点数据推演全域力学状态成为可能,见式(8):

$$\begin{cases} \sigma(x) = k_1\sigma_0 + C_1 \\ f(x) = k_2\sigma_0 + C_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\sigma(x)$ 、 $f(x)$ 分别为 x 点处贝雷梁应力和挠度; σ_0 为贝雷梁已知测点应力; k_1 、 k_2 为线性相关系数; C_1 、 C_2 为修正常数。

2 远程实时监测评估系统试验实例

重庆市保税港区空港P分区位于绕城高速以北、渝邻高速以西、原六横线以南、平滩河以东围合区域。其中,某在建桥梁全长290 m,位置地势起伏较为明显,该桥上跨沟壑(见图3)。该桥箱梁为钢管柱贝雷支架和盘扣支架组合体系,贝雷梁采用“321”型贝雷梁架设,贝雷片长度3 m,梁高1.6 m。本研究以贝雷梁为监测评估对象,展开该系统的实验分析。

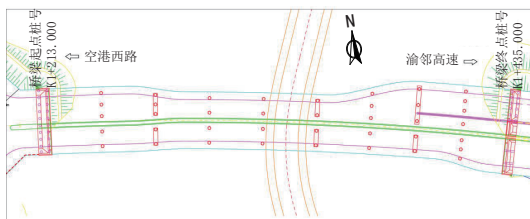


图3 该桥梁平面示意图

2.1 硬件布置及试验步骤

2.1.1 硬件布置

本试验以VS208~432采发仪为数据采发中枢,振弦式表面应变计2个、温度传感器2个和风速仪1个作为数据采集传感器,组成数据感知传输单元(见图4、图5)。其中,表面应变计分别安装在贝雷梁跨中、贝雷梁1/4跨;温度应变计则安装在贝雷梁和盘扣支架;风速仪使用扣具水平安装在盘扣支架上。

2.1.2 数据反演分析与评估体系研发

2.1.2.1 监测数据误差分析

本研究在箱梁顶板浇筑阶段前完成数据感知传输单元硬件安装,依托Python Dash架构的云端监测平台实现多参数动态追踪。顶板浇筑前施工现场照

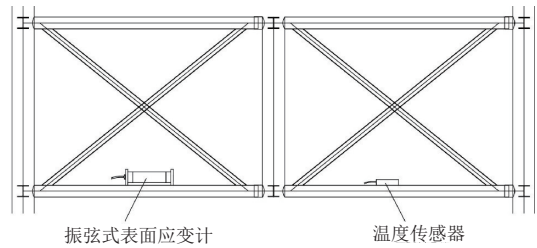


图4 传感器布置示意图

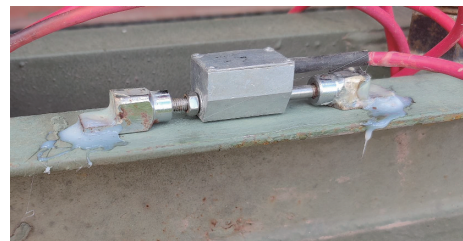


图5 振弦式表面应变计布置

片见图6。



图6 顶板浇筑前施工现场照片

监测数据显示(见图7):混凝土浇筑工序引起桁架应力显著波动,温度场均值24.2℃(最大差值4.3℃),风力等级维持1~2级。根据图7(a)可以看出,传感器布设时序差异可能造成底板、腹板及钢筋自重等荷载参数的缺失,导致监测数据失真,为此建立逆向力学模型进行误差补偿^[12]。

基于ANSYS构建精细化有限元模型,将实测顶板荷载184 200 N转化为弦杆均布荷载,约束端部边界条件后获得理论应力分布(见图8)。

将实测数据与有限元模拟数据对比,贝雷梁跨中下弦杆的实测应力值为17~17.5 MPa,1/4跨下弦杆的实测应力值为12~13 MPa;而在仅受箱梁顶板荷载时,有限元模拟的贝雷梁跨中下弦杆的应力值约为15.148 MPa,贝雷梁1/4跨下弦杆的应力值约为11.635 MPa,模拟值与实测值的误差为0.365~1.852 MPa。通过施工文件得知,箱梁总荷载为338 700 N,将其布置于有限元模型中,可以得到贝雷梁跨中和1/4跨的应力模拟值(见图9)。

根据有限元模拟分析得知,贝雷梁跨中及1/4跨的应力分别为28.053 MPa和21.435 MPa,带入式(4)可推导安装应变计前,贝雷梁承受的荷载:

$$\sigma_1 - \sigma_0 = \frac{q_1 l^2}{8w} - \frac{q_0 l^2}{8w} = \frac{(q_1 - q_0) l^2}{8w} \quad (9)$$

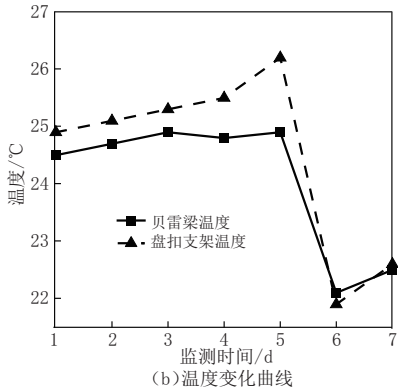
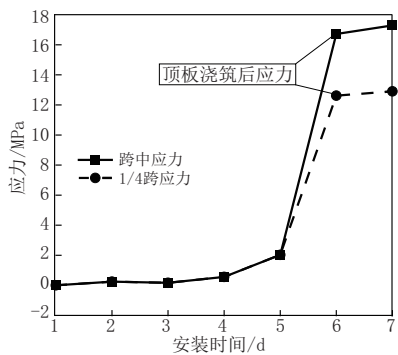


图7 实时监测数据图

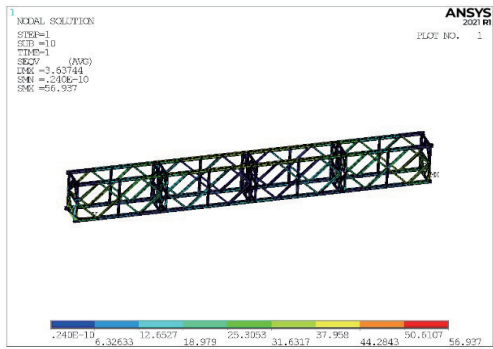


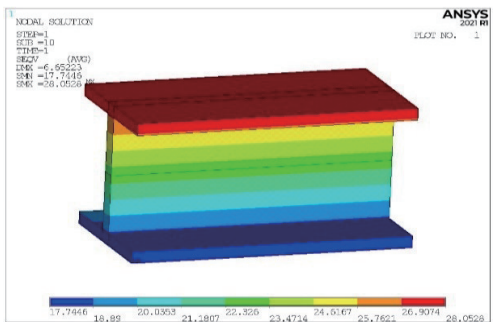
图8 基于ANSYS模拟分析的贝雷梁应力分布图

式中: σ_1 为贝雷梁承受全部荷载时跨中应力模拟值; σ_0 为贝雷梁受箱梁顶部荷载的跨中应力实测值; q_1 为箱梁总荷载产生的均布荷载值; q_0 为箱梁顶部荷载产生的均布荷载值; l 为贝雷梁跨径; w 为贝雷梁弦杆截面模量。

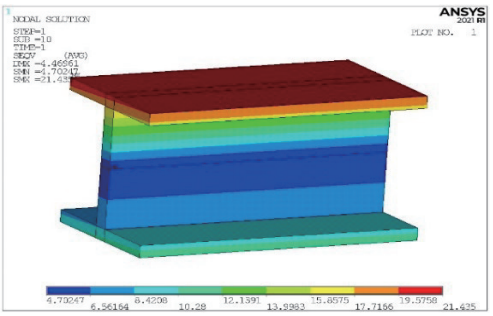
依据设计参数(跨径 12 m, 弦杆截面模量为 7 699.1 cm³),将跨中实测应力 15.148 MPa 代入式(9)得荷载偏差 $\Delta q = 5.52$ N/mm,因此,安装应变计前,贝雷梁承受荷载为 132 480 N,跨中修正常数见式(8), $C=12.905$ MPa。将该差值带入回到基于 Python Dash 开发的实时监测程序中,得到修正的应力变化曲线见图 10。

2.1.2.2 基于有限元反演分析的拓展监测

通过有限元模拟可以发现,贝雷梁最大挠度位于跨中下弦杆,贝雷梁最大应力位于最右侧竖杆与



(a)ANSYS模拟贝雷梁跨中应力



(b)ANSYS模拟贝雷梁1/4跨应力

图9 ANSYS模拟贝雷梁下弦杆应力图

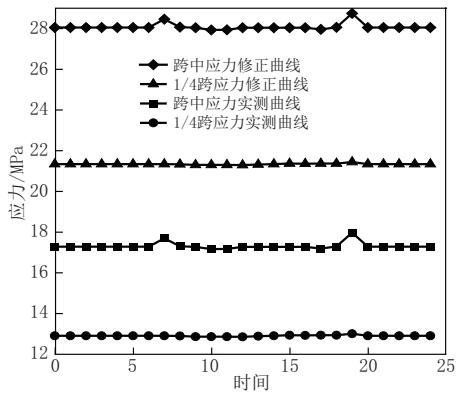


图10 误差修正后的贝雷梁应力动态监测应力图

下弦杆的交界处(见图 11),该处受约束影响,产生的应力集中最大值为 104.623 MPa,应重点关注,但在实际施工监测中,弦杆相交位置存在布置传感器困难等客观因素影响,无法做到有效的动态监测分析。

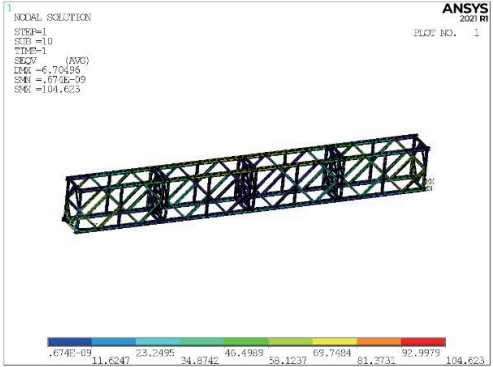


图11 基于ANSYS模拟分析的贝雷梁应力分布图

因此,本研究基于有限元反演分析,以贝雷梁跨中和 1/4 跨应力实测值为控制点,构建已知测点与未

知测点的函数关系^[13]。根据本文章节 1.3 中的推导分析可知,各测点应力之间、测点应力与挠度之间均为线性函数关系,因此,将荷载以均布荷载的方式布置在贝雷梁的弦杆,通过设置荷载子步的方式模拟荷载变化的过程,试验数据见表 1。

荷载子步	贝雷梁不同部位状态			
	跨中应力 σ_1/MPa	1/4 跨应力 σ_2/MPa	跨中挠度 f/mm	最右侧弦杆 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$
0.1	2.769	2.133	0.659	10.476
0.2	5.545	4.269	1.319	20.950
0.3	8.328	6.408	1.980	31.420
0.4	11.119	8.550	2.640	41.887
0.5	13.918	10.694	3.302	52.350
0.6	16.725	12.840	3.964	62.811
0.7	19.542	14.988	4.627	73.268
0.8	22.368	17.137	5.290	83.723
0.9	25.205	19.287	5.955	94.174
1	28.053	21.435	6.622	104.623

通过将模拟参数代入到式(8)中拟合,得到贝雷梁跨中及 1/4 跨应力与跨中挠度的函数关系,和跨中应力及 1/4 跨应力与弦杆交界处应力的函数关系:

$$f_1 = 0.236\sigma_1 + 0.014 \text{ mm} \tag{10}$$

$$\sigma_{1\max} = 3.724\sigma_1 + 0.375 \text{ MPa} \tag{11}$$

$$f_2 = 0.309\sigma_2 + 0.001 \text{ mm} \tag{12}$$

$$\sigma_{2\max} = 4.876\sigma_2 + 0.153 \text{ MPa} \tag{13}$$

式中: σ_1 、 σ_2 为贝雷梁跨中应力和贝雷梁 1/4 跨应力,MPa; f_1 、 f_2 为基于贝雷梁跨中、1/4 跨推导的跨中挠度,mm; $\sigma_{1\max}$ 、 $\sigma_{2\max}$ 为基于贝雷梁跨中、1/4 跨推导的最右侧弦杆应力,MPa。

将跨中和 1/4 跨的应力实测数据,27.2 MPa 和 20.8 MPa 代入到式中:

$$f_1 = 6.433 \text{ mm}, f_2 = 6.428 \text{ mm}$$

$$\sigma_{1\max} = 101.668 \text{ MPa}, \sigma_{2\max} = 101.574 \text{ MPa}$$

$$\bar{f} = \frac{(f_1 + f_2)}{2} = 6.431 \text{ mm} \tag{14}$$

$$\bar{\sigma}_{\max} = \frac{(\sigma_{1\max} + \sigma_{2\max})}{2} = 101.621 \text{ MPa} \tag{15}$$

根据上式算法,可以利用实时监测的跨中及 1/4 跨实测应力,推导出跨中挠度 $\bar{f}$ 和弦杆交界处 $\bar{\sigma}_{\max}$ 的应力,通过将上述实测点与未知测点的函数关系导入到基于 Python Dash 开发的实时监测程序中,随着已知测点数据的实时更新,得到了跨中挠度和弦杆交界处应力的实时动态变化曲线(见图 12),可以看出,随着施工进展,贝雷梁跨中挠度和弦杆交界处应力分别增加了 0.160 mm 和 2.532 MPa。

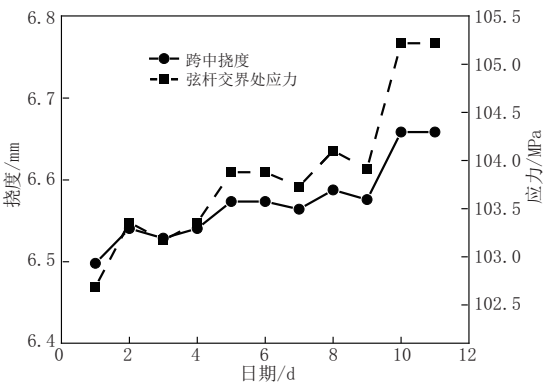


图 12 基于有限元反演分析的拓展贝雷梁理论监测曲线图

2.1.2.3 重要专项的动态监测实时评估建立

通过反演分析构建已知测点与未知测点的函数关系,导入基于 Python Dash 开发的实时监测系统中,以桥梁结构健康监测系统设计规范^[14]为参考,构建贝雷梁的预警阈值标准(见表 2),利用 Python Dash 将安全域布置到监测曲线图中,实现实时监测评估的目的,见图 13。

表 2 支架强度预警阈值			
预警级别	级别描述	预警阈值	颜色标识
I	特别严重	0.9~1.0	红色
II	严重	0.75~0.9	橙色
III	一般	0.6~0.75	黄色

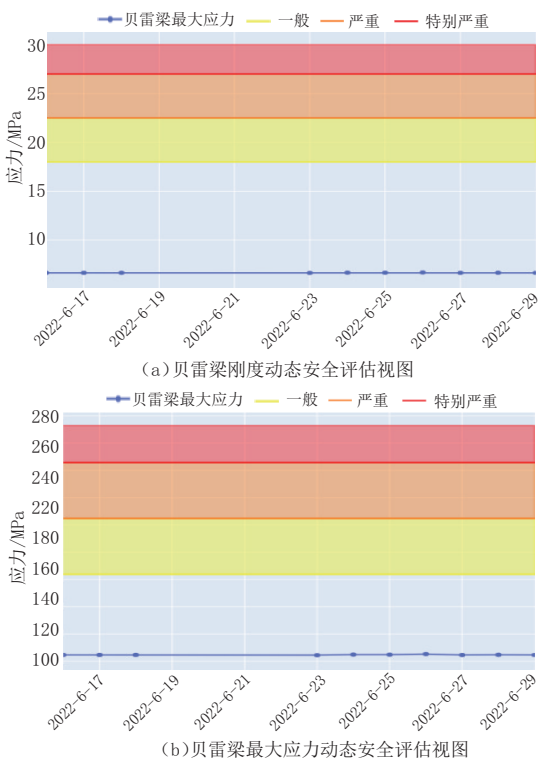


图 13 基于反演分析的web端实时动态安全评估视图

通过动态安全评估视图,可以让监测人员随时了解监测对象的健康状态,而 Python Dash 的模块化设计也能将更多监测数据的动态安全评估视图添加

其中^[15],以使得监测评估系统更加完善,为施工质量及安全保驾护航。

3 结 语

本研究以贝雷支架的施工监测为例,论述了基于局部实测数据反演的支架全局实时动态监测原理与方法,具体内容如下。

(1)基于结构力学的理论推导,得出了在支架结构中,已知测点应力与未知测点的应力或挠度的函数关系。

(2)利用无线采发仪及各类传感器组成远程监测硬件系统,再利用Python Dash开发的Web端程序监测采集数据。

(3)通过ANSYS构建有限元模型,利用有限元反演分析,对实测数据进行误差修正,并利用已知测点构建其与未知测点数据的函数关系,得出了基于已知测点应力推导的未知测点的应力和挠度。

(4)利用Python Dash的强拓展性,开发了可实时评估支架结构安全状态的可视化曲线图。

参考文献:

[1] 孙钧.岩土力学反演问题的随机理论与方法[M].汕头:汕头大学出版社,1996.

[2] 郭杰明.基于三维扫描的混凝土桥梁受力状态反演方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.

[3] 刘金宝.某PC箱梁桥开裂反演分析及加固处置[J].公路交通科技(应用技术版),2012(8):119-122.

[4] 李杰,陈淮,冯冠杰.某在建三跨连续梁桥跨中下挠原因及改造恢复分析[J].施工技术,2013(5):67-71.

[5] 曹净,胡睿,杨海星,等.基于B样条函数的弹性地基梁内力反演研究[J].工业建筑,2018,48(2):104-109.

[6] 祖巧红,张海峰,徐兴玉,等.基于物联网的桥梁健康监控系统设计与实现[J].图学学报,2013,34(5):7-11.

[7] 岳青,朱利明.东海大桥健康监测系统桥梁健康状态评估方法[J].桥梁建设,2006(增刊2):17-175;179.

[8] JACQUES A A.Using Python to Store, Display, and Analyze Pressure Observations from Earthscope's US Array Network[C]//Fourth Symposium on Advances in Modeling & Analysis Using Python, 2014.

[9] TOMABA D, OLALEYE A, OLAYINKA A T, *et al.* Screen shot of web dashboard built with python and git hub using PLSQL Database[Z].2015.

[10] POURESMAEIL L. Using Python to analyze safety records[D].Beaumont: Lamar University, 2015.

[11] 田蕊,谭励,苏维均,等.基于RIA的桥梁结构健康监测状态评估系统[J].计算机工程与设计,2011,32(8):2889-2892;2896.

[12] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

[13] 许小庄.基于ANSYS的梁结构静态与动态分析[D].沈阳:东北大学,2011.

[14] DB32/T 3562—2019,桥梁结构健康监测系统设计规范[S].

[15] 胡晓倩.基于多假设框架的DASH客户端自适应请求算法研究[D].济南:山东大学,2025.

(上接第23页)

[10] 卜政滔.海绵城市理念下透水铺装生态功能浅析[J].城市道桥与防洪,2024,302(6):74-78.

[11] WU H, SUN B B, LI Z, *et al.* Characterizing thermal behaviors of various pavement materials and their thermal impacts on ambient environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2018 (172): 1358-1367.

[12] 郭建国.透水性路面材料对路面温度影响的研究[J].中外公路,2014,34(6):226-228.

[13] 潘述平,孙斌祥,詹培敏,等.基于反射率的路面降温机理及其影响因素研究综述[J].公路交通科技,2019,36(9):14-23.

[14] 刘相如.透水砼透水系数及其力学与抗冻性能试验研究[D].烟台:烟台大学,2019.

[15] CJJ/T 135—2009,透水水泥混凝土路面技术规程[S].

[16] 任思腾.科学实验中的可重复概念[J].自然辩证法通讯,2020,42(9):46-52.

[17] 赵敬源,刘加平.城市街谷热环境数值模拟及规划设计对策[J].建筑学报,2007(3):37-39.

[18] 赵昕,刘洋.路表反射率对路面表面温度影响研究[J].科技创新与应用,2013(30):211-212.

[19] 李朝昌,黄省伟,丁锐,等.太阳辐射下路面材料反射率及潮湿状态下降温效应分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(11):22-25.