

doi: 10.7690/bgzdh.2022.01.001

某型军用桥梁装备通载状态监测系统

韩赵唤¹, 冯柯¹, 杨宜霖², 周庆园²

(1. 陆军工程大学野战工程学院, 南京 210001; 2. 中国人民解放军 94679 部队, 南京 210046)

摘要: 针对军用桥梁装备通载状态下易发事故的问题, 以某型轮式冲击桥为研究对象, 分析桥跨结构与规定荷载。利用有限元分析方法, 计算通载状态下桥跨的位移、应力及变形。根据计算结果, 确定以挠度、位移和应力作为监测参数选择传感器, 采用基于模态保证准则(modal assurance criteria, MAC)的有效独立法(effective independence, EI)优化传感器布设方案, 采用无线数据传输构建监测硬件系统, 设计硬件模组箱。基于 LabVIEW 平台开发上位机软件, 实现数据采集、数据解析、状态显示与安全预警功能。试验结果表明: 该监测系统能够有效反映通载状态下桥跨的姿态信息, 实现事故提前预警。

关键词: 轮式冲击桥; 通载状态; 监测系统

中图分类号: TJ812⁺.2 **文献标志码:** A

On-load State Monitoring System of Certain Type Military Bridge Equipment

Han Zhaohuan¹, Feng Ke¹, Yang Yilin², Zhou Qingyuan²

(1. College of Field Operations Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210001, China;

2. No. 94679 Unit of PLA, Nanjing 210046, China)

Abstract: Aiming at the problem that military bridge equipment is prone to accidents under the state of on-load, a certain type of wheeled impact bridge is taken as the research object to analyze the bridge span structure and the specified load. The finite element method is used to calculate the displacement, stress and deformation of the bridge span under on-load. According to the calculation results, the deflection, displacement and stress are selected as the monitoring parameters, and the effective independence (EI) method based on modal assurance criteria (MAC) is used to optimize the sensor layout. The monitoring hardware system is constructed by wireless data transmission, and the hardware module box is designed. The host computer software is developed based on LabVIEW. The functions of data acquisition, data analysis, status display and safety warning are realized. The test results show that the monitoring system can effectively reflect the attitude information of the bridge span under on-load, and realize the early warning of accidents.

Keywords: wheeled impact bridge; on-load state; monitoring system

0 引言

军用桥梁装备用于克服河流、沟谷、防坦克壕等障碍物, 普遍具有架设结构复杂、桥跨自重大、通行跨度长、通载负荷大、作战使用条件苛刻的特点; 因此, 该类装备在作战与训练过程中安全方面面临较为严峻的考验。另外, 军用桥梁装备越来越多地参与到国际军事竞赛、跨区机动演习等演训活动以及抗震救灾等非战争军事行动中, 必须在复杂地形与应急条件下进行极限作业, 极易发生桥脚淤陷、桥车甩尾、桥跨倾覆、边坡垮塌、连桥机构断裂等事故。

桥梁装备通行的状态信息主要通过桥跨挠度、沉降、振动及横向位移等参数体现出来^[1]。笔者以某型轮式冲击桥跨为对象, 研究荷载与变形、位移量之间的内在关系, 开发桥跨姿态实时分析与评估

系统, 监测桥跨的姿态信息, 确保冲击桥装备通行的安全性, 为作战、演训行动提供事故预警, 为非战争军事行动的顺利实施提供安全保障。

1 桥跨通载状态分析

1.1 桥跨结构

如图 1 所示, 桥跨由 2 个主体结构对称的半桥节组成, 桥节主体材料为铝合金, 采用车辙式结构, 1 个桥节由 2 个车辙组成, 车辙之间由横向连接系和拉杆相连。2 个桥节下部采用单、双耳销连接, 上部为顶紧块。

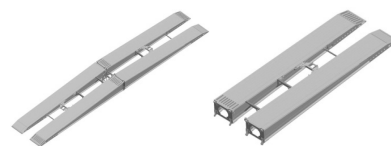


图 1 桥跨结构

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-11-28

作者简介: 韩赵唤(1992—), 男, 江苏人, 硕士, 从事工程装备维修与器材保障研究。E-mail: 1042406249@qq.com。

1.2 荷载分析

该型轮式冲击桥主要用于伴随保障轻型机械化部队的通行^[2], 根据《GJB435—88 军用桥梁设计荷载》, 规定轮胎式车辆荷载 LT-15 和履带式车辆荷载 LD-25 如表 1—2 所示^[3]。

表 1 轮胎式车辆荷载

荷载	全重/kN	最大轴压力/kN	轮着地(宽×长)/m	轮距/m
LT-15	150	100	0.5×0.2	1.8

表 2 履带式车辆荷载

荷载	全重/kN	履带接地长/m	履带中心距/m	履带宽/m
LD-25	250	3.8	2.6	0.4

1.3 有限元分析

根据桥跨结构及尺寸, 使用 Pro/E 软件建立相应的 3 维模型, 将其导入 IDEAS 有限元分析软件, 按照上述荷载参数设置相应的边界条件, 合理划分网格, 最终分析结果如图 2 所示。

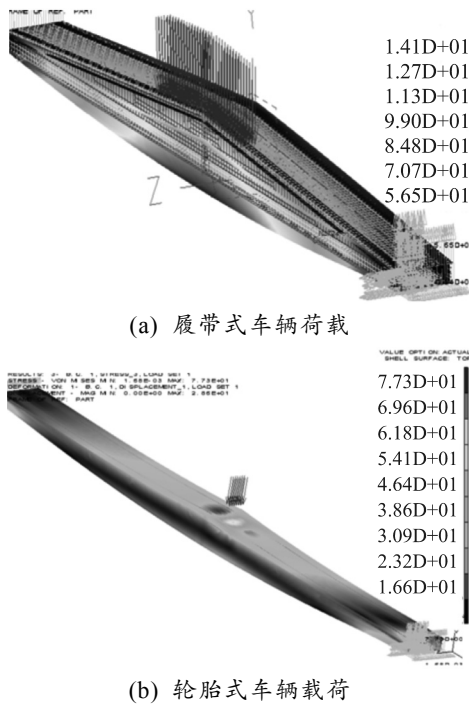


图 2 2 种荷载作用下桥跨整体结构响应

最终分析结果包括最大挠度、最大 Mises 应力以及变形量, 作为该型轮式冲击桥桥跨通载状态监测与安全评估的数据基础。

2 硬件系统构建

2.1 传感器选型方案

根据结构分析的结果, 确定以挠度、位移、应力作为主要监测参数, 选择相应的传感器安装在桥跨相应位置上, 负责监测桥跨在通载状态下姿态的

变化。

2.1.1 挠度监测

桥跨的挠度监测是桥跨结构全寿命监测的重要组成部分, 直接反映了桥梁结构的竖向整体刚度。挠度则需要通过测量桥跨各部位的倾角, 采用相应的倾角—挠度曲线拟合算法得到^[4-5]。为精确测量桥跨各部位的倾角值, 结合装备结构特点与任务环境, 采用 LIS326 双轴倾角传感器。该型倾角传感器体积小、功耗低、精度高, 抗干扰能力和环境适应力强, 适合于军用桥梁装备在野战环境下的监测需求。安装时要注意保持传感器安装面与被测目标面平行, 并减少加速度对传感器的影响。

2.1.2 位移监测

轮式冲击桥的桥跨展开后, 通过 4 个桥脚支撑, 在荷载作用下很容易出现位移, 影响车辆正常通行。为实时监测位移量, 选用 WPS-M-3000-RS485 拉绳式位移传感器, 安装在 4 个桥脚上。该型位移传感器性能均衡, 精度与稳定性高, 具有一定的防护能力, 满足军用桥梁装备监测需求。安装时要注意拉绳与出绳口方向保持平行, 以确保传感器测量精度与使用寿命。

2.1.3 应力监测

桥跨在通载状态下, 需在关键受力部位(如连桥机构)加装 BX120-3AA 应变片负责应力的监测^[6]。该型应变片精度与灵敏度高, 经济性好, 适合大量布设, 能够将关键部位的应力转化为电压信号输出至上位机。

2.2 传感器布设方案优化分析

考虑到装备结构限制以及系统可靠性等因素, 无限制地在桥跨上加装传感器不现实, 需要采用优化算法进行优化设计, 提高监测系统整体效能^[7]。为在最小成本下合理选取传感器数量并优化配置使监测得到的状态信息最为全面, 采用基于 MAC 的 EI 进行优化。

2.2.1 传感器优化布置分析

根据结构动力学理论, 理想结构的各阶模态向量之间相互正交, 但实际上测量的自由度远小于结构本身的自由度, 难以保证正交性; 因此, 在传感器布置上, 要尽可能使模态向量之间有一定的空间交角, 提高实测模态的区分度^[8]。

使用模态置信度 *MAC* 矩阵来评价模态向量正

交性^[9]：

$$MAC_{ij} = (\phi_i^T \phi_j)^2 / ((\phi_i^T \phi_j)(\phi_j^T \phi_i)) \quad (1)$$

式中： ϕ_i 、 ϕ_j 分别为有限元模态矩阵 $\Phi_{n \times l}$ 的第 i 阶和第 j 阶模态向量； n 为传感器预布设的自由度； MAC_{ij} 为 MAC 矩阵中第 i 行第 j 列的元素。从 n 个自由度中选择 m 个自由度作为传感器布设点，使模态置信度 MAC 矩阵的非对角元最大值尽可能小，可得最终目标函数为：

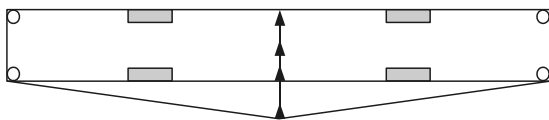
$$\left. \begin{aligned} & \min(\max(MAC_{i,j})) \\ & s.t. \begin{cases} m < n \\ i \neq j \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2.2.2 最终优化方案

根据上述 MAC 准则，针对倾角、位移、应力 3 个体系的传感器系统进行优化计算，综合考虑桥跨本身结构特点与装备任务需求，得到最终优化布设方案如表 3、图 3 所示。

表 3 传感器布设方案

监测对象	监测内容	监测传感器	数量
桥梁装备	桥跨挠度	倾角传感器	4
	桥脚位移	拉绳式位移传感器	4
	关键部位应力	应力计	16



○ 拉绳式位移传感器
 灰色矩形 倾角传感器
 ▲ 应力计

图 3 传感器布设方案

2.3 数据采集与无线传输系统

考虑到传统有线电缆数据传输方式存在接线工作量大、抗干扰能力弱以及便携性差、易损坏等缺点，采用无线传输方式对传感器信号进行传递^[10]。监测系统中的各类传感器信号经 M1502、M1302 总线模块转换为 RS485 信号传输至 LoRa 无线数传电台，转换为无线信号被上位机接收并处理。

根据上述框架可以构建无线传感系统架构如图 4 所示。

该系统各传感节点与终端之间的数据传输，通过制定相应的通信协议进行协调，将最终采集到的数据汇总至数据中心进行综合处理，从而显示出桥跨的姿态与安全状况。

2.4 硬件模组箱设计

为提高便携性，方便快速构建桥跨通载状态监

测硬件系统，设计出相应的硬件模组箱如图 5 所示。

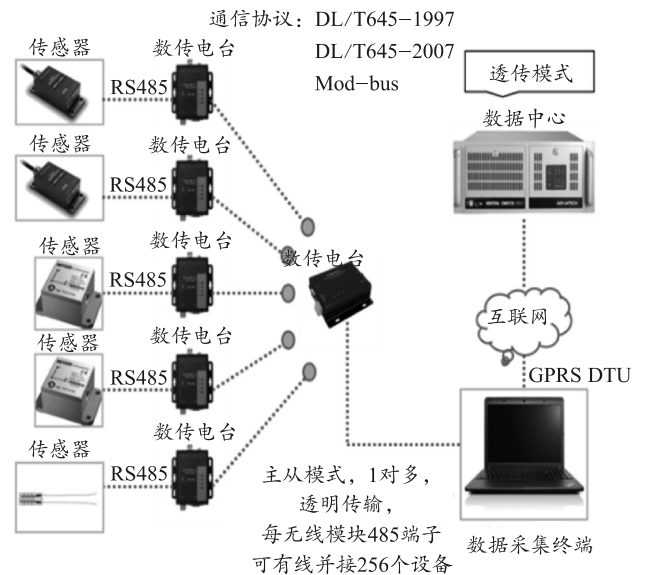


图 4 无线传感系统架构



图 5 硬件模组箱

该模组箱采用模块化设计，充分考虑了使用环境以及任务需求，能够适应野战环境下各类任务的需要。整个硬件模组箱即是一套完整的监测及数据传输硬件系统，包括工控机、电源、各类传感器、数传电台、采集器以及通信线，可以作为伴随保障设备配备至轮式冲击桥车组人员，根据任务需要灵活开展系统架设及撤收作业。

3 软件系统构建及实装试验

3.1 上位机软件

基于 LabVIEW 平台开发监测系统上位机软件，该平台的典型特点是模块化的程序设计理念；因此，在上位机软件开发过程中遵循这一思想，将各个功能设计成集成模块，减少程序的复杂程度^[11]。

上位机软件主要由数据读取、数据解析、状态显示和安全评估 4 大模块组成，其具体程序流程图 6 所示^[12]。

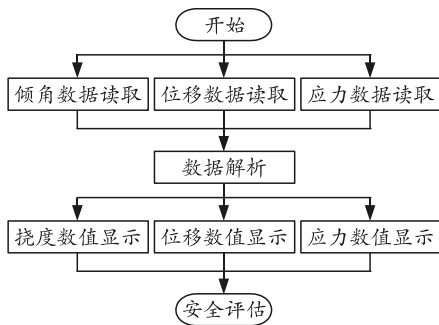


图 6 上位机软件流程

按照以上设计思想及程序流程，依照界面友好、功能齐全、操作简便的要求，开发出轮式冲击桥通载状态监测系统用户软件，界面如图 7 所示。

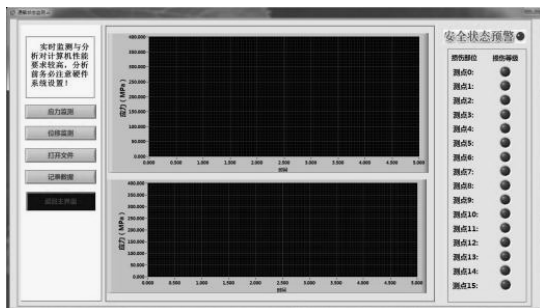


图 7 用户软件界面

最终开发出的用户软件涵盖了倾角、位移、应力的监测曲线显示以及安全状况预警功能，同时还能评估轮式冲击桥跨的整体安全状况，作为装备维护的依据。

3.2 实装试验

根据军事装备试验相关理论^[13]，搭建如图 8 所示的现场实装试验平台，以轮胎式车辆荷载作为试验荷载，最终试验结果(图 9)表明：该系统能够有效监测和记录通载状态下桥跨的状态信息，并针对极端恶劣情况发出预警信号，达到设计目标。



图 8 现场实装试验

4 结束语

笔者针对某型轮式冲击桥研究开发出一整套通载状态监测与安全评估系统。该系统操作简便、运行稳定，能够有效监测通载状态下的桥跨状态信息

和评估其整体安全状况，填补了军用桥梁装备安全监测系统的空白。同时，在系统设计时就考虑了兼容性与拓展性的问题，可根据后续需要进行修改与更新，未来可涵盖更多型号的军用桥梁装备。

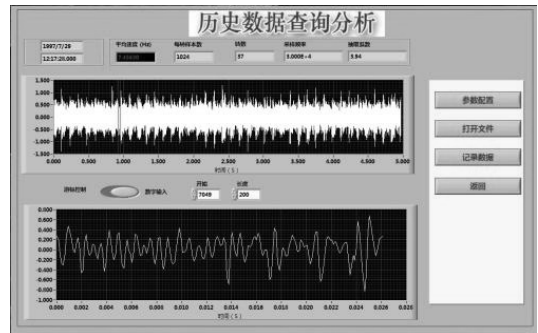


图 9 软件监测数据

参考文献:

- [1] 张乔. 大型桥梁健康监测系统设计实现与应用[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [2] 周波, 裴超毅, 牛赛. 重型冲击桥仿真模拟训练系统[J]. 兵工自动化, 2011, 30(7): 23-25.
- [3] 王建平, 王瑾. 桥梁设计中军用车辆荷载与民用规范对比研究[J]. 四川兵工学报, 2015(3): 151-155.
- [4] 何聪, 钱国明, 韩晓健. 桥梁线形测量系统研究与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2016(5): 64-67.
- [5] 张亚运. 基于倾角传感器的桥梁线形监测系统研究与设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [6] 施洲, 蒲黔辉, 李晓斌. 桥梁结构应力与变形监测方法及其精度分析[J]. 四川建筑科学研究, 2008(4): 93-96, 120.
- [7] 梁鹏, 李斌, 王晓光, 等. 基于桥梁健康监测的传感器优化布置研究现状与发展趋势[J]. 建筑科学与工程学报, 2014(1): 120-129.
- [8] 蒋依坛. 基于改进遗传算法的桥梁监测传感器测点优化布置研究及监测信号处理[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [9] 桂成中, 雷俊卿, 段志, 等. 基于 MSSP/DM-MAC 法的传感器优化布置[J]. 应用力学学报, 2019, 36(6): 1499-1503, 1530.
- [10] 喻言. 结构健康监测的无线传感器及其网络系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [11] 韩艺坤, 李富年, 翁顺, 等. 基于 LabVIEW 的桥梁监测系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2017, 40(20): 169-172.
- [12] 陈文强. 基于 LabVIEW 的桥梁健康监测实时信号处理系统的设计[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [13] 罗小明, 何榕, 朱延雷. 装备作战试验设计与评估基本理论研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014(6): 1-7.