

文章编号: 1002-0268 (2004) 11-0043-04

钱江四桥桥梁实时健康监测 系统开发研究

谭永朝¹, 郑翰献¹, 俞菊虎¹, 杨骊先², 孙炳楠²

(1. 杭州市城市基础设施开发总公司, 浙江 杭州 310006; 2 浙江大学土木系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 桥梁实时健康监测系统是近年应用于桥梁管理与维护的一项新技术, 目前仅在国内外少量大跨度桥型做过尝试。钱江四桥虽然跨度不大, 但桥型独特结构复杂, 在建设中已引入健康监测系统。本文将该系统作用于钱江四桥的情况作一简要介绍。

关键词: 钱江四桥; 健康监测; 系统; 开发研究

中图分类号: U446.3

文献标识码: A

Development and Research on A Real Time Structural Health Monitoring System for the 4th Qian-tang River Bridge

TAN Yong-zhao¹, ZHENG Han-xian¹, YU Ju-hu¹, YANG Li-xian², SUN Bing-nan²

(1. Hangzhou City infrastructure development headquarter, Zhejiang Hangzhou 310006, China;

2 dept of civil engineering, Zhejiang university, Zhejiang Hangzhou 310027, China)

Abstract: As a new technology, Structural Health Monitoring System has been applied to the management and maintenance of bridge in recent years. However, we can only find such examples of long-span bridges. In this paper, we present the monitoring system for the 4th Qian-tang river bridge which is a complex structural arch bridge with a double-deck and concrete filled steel-tube truss.

Key words: The 4th Qian-tang river bridge; Health monitoring; System; Development and research

1 工程简介

钱江四桥位于浙江省杭州市市区南部, 是钱塘江上在建的第一座跨江城市桥梁 (其它已建或在建桥梁均属公路桥), 设计荷载标准为城-A 和汽-20, 挂-100 (主跨), 建设期为 2002~2004 年。钱江四桥采用的是组合跨径的双层钢管混凝土系杆拱桥方案, 跨江主桥段全长 1 376m, 跨径组合为 $2 \times 45.75\text{m}$ (连续梁) + $2 \times 89\text{m}$ (小拱) + 196m (大拱) + $5 \times 89\text{m}$ (小拱) + 196m (大拱) + $2 \times 89\text{m}$ (小拱) + $2 \times 45.75\text{m}$ (连续梁), 桥跨布置如图 1 所示。该桥上层桥面设置 6 条机动车快速行车道, 下层桥面则预留了杭州地铁 1 号线双向越江整体道床, 并在双侧布置有公交专用道与行人非机动车道, 上下桥面同宽, 均为

26.4m。

钱江四桥作为 1 座集上承式、中承式、下承式拱桥为一体的钢管混凝土拱组合的双层桥面悬挂体系, 规模宏大, 桥型在国内外绝无仅有, 结构形式非常复杂。由于该桥桥位处于潮汐与洪水相互作用的钱塘江河口段, 环境气候异常潮湿, 咸潮浪溅对桥梁外露金属结构的工作寿命影响较大。而北岸主跨跨越了地质构造破碎带, 导致桥梁建成后不仅有可能受到超出设计承载能力的公路荷载的作用, 还很容易因环境条件 (如近海台风、涌潮、地震、温度荷载等)、材料老化以及疲劳等因素对正常工作状态造成影响。此外, 虽然钢管混凝土拱桥近年在国内取得长足发展, 但其结构机理仍处于探讨阶段, 至今还未形成较成熟的设计施工规范, 这为钱江四桥的建设与使用带来了许多探

索性的课题。因此，为确保该桥建成后安全耐久的使用，桥梁业主——杭州市城市基础设施开发总公司钱江四桥工程建设指挥部（下称指挥部）根据有关专家

意见，决定在钱江四桥建立一个有效工作期为 30 ~ 50 年的桥梁健康监测系统，对桥梁主要构件的工作受力状态进行实时监控。

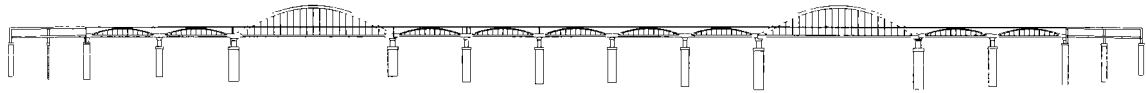


图 1 钱江四桥主桥立面图

2 系统方案设计

2.1 方案确定

钱江四桥的主跨虽然仅 196m，但特殊的桥型结构和特定的使用环境对健康监测系统提出了很高要求，系统方案技术含量极高。为了选择最合理的实施方案，指挥部组织了系统方案招投标，选择该方面具有丰富工作经验的浙江大学与香港理工大学作为合作伙伴，并在投标方案的基础上组织专家对系统工作大纲进行完善性论证，最终确定了目前的实施方案。

2.2 系统监测目标

建成后的系统通过对使用阶段的桥梁结构及其工作环境进行实时监控，取得分析结构健康状况、评价桥梁承受静、动荷载能力及结构耐久可靠性的基本数据，为运营、维护、管理提供决策依据。其主要目标概括起来有以下 5 点：

- (1) 采集关键数据，对大桥的初始结构状态进行评定，为大桥竣工验收提供结构安全验证测试。
- (2) 获取桥梁整体结构信息，实时把握桥梁整体结构的健康状态（如动力特性的变化，获取结构“指纹”），对大桥出现的损伤进行及时报警和定性分析并提出维修建议，做到防患于未然。
- (3) 监测运营中桥梁的一些主要构件如吊杆、拱脚的受力特性，桥墩和桥面结构的变位，以及桥面和拱轴的动力响应等，结合整体结构特征对桥梁有可能出现的损伤情况作出定位和定量的分析，从而为桥梁维修提供决策依据。
- (4) 监测车辆荷载和环境荷载的实际状态及其对桥梁的影响，在非常时期（如车辆荷载大幅超标或台风地震）发布预警措施，对突发事件后桥梁的安全性、承受能力和剩余寿命作出评估，为桥梁的运营决策与管理提供科学依据。
- (5) 通过连续监测，验证大桥设计理论与方法，为完善钢管混凝土拱桥的设计理论和规范修改提供实验依据。

2.3 系统结构

钱江四桥健康监测系统由 4 个子系统有机构成，

即传感系统、数据采集与预处理系统、结构安全评价与智能健康诊断系统、安全预警与决策系统。各系统间的工作流程见图 2。

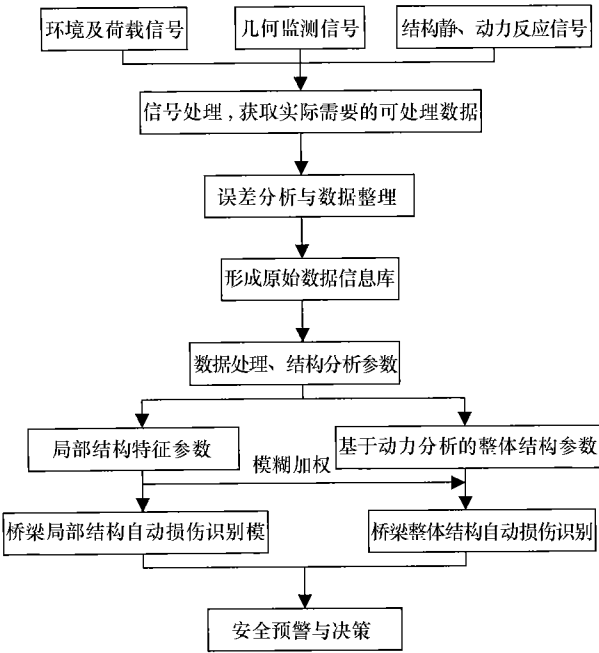


图 2 钱江四桥实时健康监测系统工作流程图

2.3.1 传感系统

传感系统主要包括风速、动态称重、温度、应变、振动加速度、位移等多种传感器及相应的信号放大与接口装置，主要完成桥梁结构环境状态与载荷信号以及各种静、动态响应的传感和变换功能。

2.3.2 数据采集与预处理系统

数据采集与预处理系统是实现桥梁健康监测与评价工作的重要环节。本系统要实现对多种信息源不同物理信号的量化、记录、传输和管理。

2.3.3 结构安全评价与智能健康诊断系统

结构安全评价与智能健康诊断系统的核心就是自动损伤识别，是整个桥梁健康监测系统中最关键也是难度最大的部分。根据监测内容，从局部和整体 2 个方面对桥梁结构进行自动损伤识别和智能检测。

2.3.4 安全预警与决策系统

在安全评价与智能健康诊断的基础上，对结构健康状况进行客观、定性、定量（如结构健康指数等量

化参数)的评价。在结构超越安全警戒指标时提供安全预警;根据损伤识别结果,提供大桥运营和维护决策依据。

3 系统安装与实时监测

针对钱江四桥的结构特点,经对比分析,选择了

地质条件较差的一个 196m 主跨(第 5 跨,跨越地质构造破碎带)进行重点实时监测,同时兼顾另一个 196m 主跨(第 11 跨)和 1 个 89m 小跨(第 6 跨)的监测,测点及相关仪器的布置情况见图 3。

3.1 桥梁工作环境监测

桥梁工作环境监测主要包括车辆荷载监测、环境

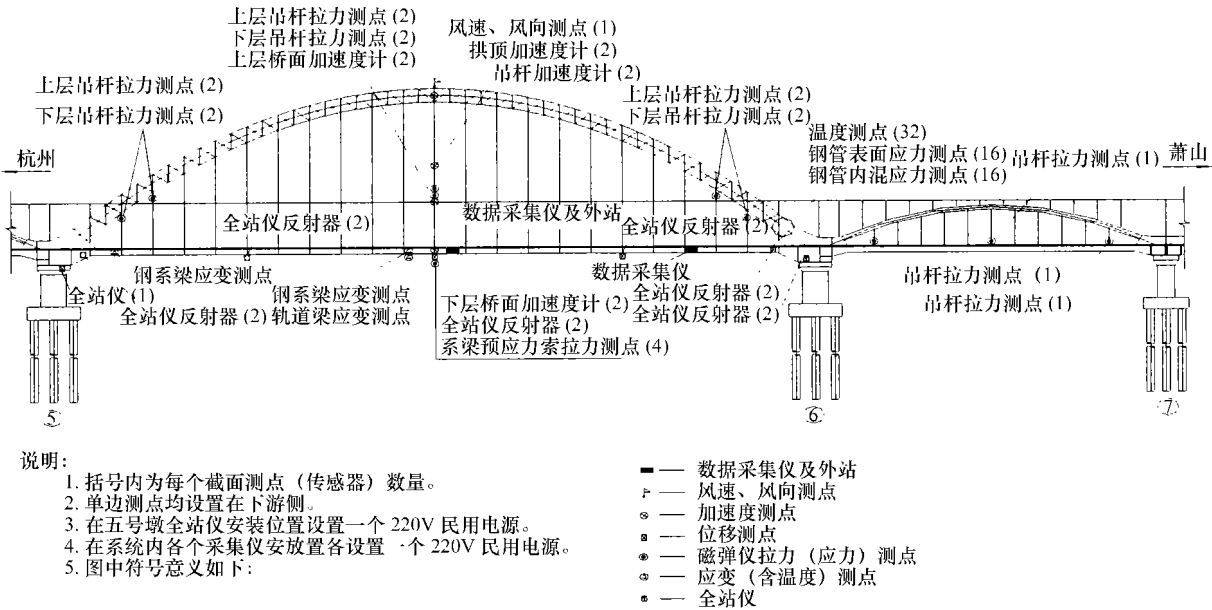


图 3 第5 第6 跨监测仪器布置图

温度监测和桥址处风速、风向监测。环境监测有着十分重要的意义,首先,它为后期结构自动损伤识别提供不可缺少的资料和依据;其次,实时监测所得的数据和分析结论对桥梁的设计者和建造者来说是十分宝贵的资料,为以后的项目提供设计和建造依据。

除车辆荷载监测由另一个单独设立的交通监控系统负责外,环境温度监测由本系统设置的相关采集件采集。通过对环境温度及桥上温度梯度进行监测,得到主要受力结构的时间温度分布资料,为分析桥梁结构的受力和变形提供依据。通过对风速、风向监测,得到风速、风结构的资料,对风场进行全面分析,进而为分析桥梁工作环境、评价行车安全状况、验证桥梁风振理论提供依据。

3.2 吊杆拉力监测

钱江四桥采用双层悬吊桥面系,每一分跨均自成一个完全独立结构体系,超静定次数高,受力情况非常复杂。因此吊杆拉力的监测显得尤为重要,是本次实时健康监测的重点。

该项数据采集由固定在吊杆上的磁弹性测力仪完成。通过对吊杆拉力监测,得到测点拉力变化时程曲线,为分析吊杆乃至整个桥梁结构的健康状况和疲劳

程度、验证桥梁设计理论及大桥吊杆的更换和养护维修提供依据。

3.3 主跨系梁(下层桥面)挠度监测

钢管混凝土拱桥具有跨越能力大、结构轻盈等特点,但与其它形式的拱桥相比也存在刚度较小、稳定性较差等缺点。设置桥面主跨系梁(下层桥面)竖向挠度监测可以监测桥梁的刚度性能,并间接反映桥梁稳定性。

该项数据采集由安装在主跨系梁底部的全站仪和棱镜完成。通过对主跨(下层桥面)挠度监测,得到挠度变化时程曲线,为分析评价桥梁的刚度特性提供依据。

3.4 主拱拱脚截面钢管和混凝土应力监测

主拱应力是拱桥结构的主要强度控制指标。目前,钢管混凝土结构的工作机理还处于研究阶段,设计计算时的简化和假定、以及一些经验的处理方法是是否合理还有待进一步的研究和探讨。而且,在钢管混凝土拱桥的拱脚部位受到的弯矩和压力最大,实时掌握这一重要的健康指标,不仅有助于了解主拱圈的强度状况,而且对钢管混凝土结构工作机理的研究和对理论计算的验证具有重要意义。

该项数据采集由埋入拱角的应变计完成。通过对拱脚处钢管表面及内部混凝土应力监测,得到测点应力应变时程曲线,为评价主拱脚处强度性能和钢管混凝土结构工作状态提供依据。

3.5 系梁预应力索拉力监测

钱江四桥主跨系梁为 $2\,500\text{mm} \times 2\,500\text{mm}$ 的钢箱结构,其作用是平衡拱脚水平推力,使得上部结构成为一个自稳定体系。系梁预应力索有效预应力的直接大小直接影响到整个上部结构的内力分配,对结构整体工作性能和安全状况起着至关重要的作用。

该项数据采集由固定在预应力索上的磁弹性测力计完成。通过对行系梁预应力索拉力监测,得到测点拉力变化时程曲线,为分析系梁乃至整个桥梁结构的健康状态和疲劳程度、验证桥梁设计理论及系梁预应力钢束的更换提供依据。

3.6 钢系梁应变监测

对钢系梁应变的监测能够间接反映系梁预应力束的拉力变化情况,起到对预应力索拉力监测的补充和校验,同时轨道梁应变监测又能反映车轮通过的频率。此外,本项监测还可以与加速度进行同步监测以便于后期的损伤检测工作。

通过对钢系梁及轨道梁的应变监测,得到测点应力变化时程曲线,为监测系梁预应力束拉力变化、车轮通过频率及后期损伤检测提供依据。

3.7 桥墩变位监测

钱江四桥上部结构为外部静定的自稳定体系,下部结构的变位对上部结构的影响不大。但是由于桥址处地质条件较为复杂(存在 3 条断层破碎带),而且处于上海-上饶地震附带,此外考虑到墩台经常遭受涌潮的冲击,因而根据设计文件,对受基岩构造影响较大的 5、6 号墩进行变位监测。

该项数据采集由安装在墩顶上的全站仪和棱镜完成。通过对桥墩位移监测,得到测点位移变化的时程曲线,为评价桥梁下部结构工作状态提供依据。

3.8 桥梁结构动力性能监测

桥梁动态性能的改变反映了桥梁的刚度性能的改变,因而获取桥梁的动力特性即获取了结构的“指纹”,作为评价桥梁健康状态的主要指标。钱江四桥采用双层悬挂桥面系,整体性较差,结构超静定次数高,结点多,行驶车辆可能引起车桥共振现象。因此桥梁结构动力性能监测的必要性是不言而喻的。

该项数据采集由分别安装在拱脚、跨中、 $1/4$ 、 $3/4$ 跨的全站仪和棱镜完成。通过对桥梁结构的振动

监测,得到测点振动时程曲线,为评价桥梁结构整体健康状态、验证大桥设计理论和运营管理提供依据。

4 系统设备

应用与本系统的仪器及外部设备包括全站仪、GPR 棱镜、EM 传感器、数据采集仪、埋入式应变计、钢弦式应变计、M-R 型风速仪、弦式读数仪以及稳压电源、数据采集箱、通信线路、外站计算机系统等等。

5 研发计划

整个健康监测系统研发将通过四阶段工作完成:

(1) 系统总体方案设计

拟定系统工作大纲,进行传感元件的选择及性能测试考核;外站单片机开发及其接口设计;传感元件安装技术及施工工艺研究。

(2) 信号采集与数据处理系统设计

确定不同物理信号的采集模式;各测试工况自动分析与设置,包括连续实时监测、定时开机监测和触发式监测等;数据管理及数据通讯模块设计。

(3) 实时监测与报警系统设计

进行大桥健康诊断和安全预警系统研究与软件开发。

(4) 系统安装与调试

现场进行设备安装、调试,将系统移交给大桥管理部门。

6 结语

最近几年,国内西南地区几座拱桥相继发生过坍塌或局部破坏事故,这在很大程度上与使用频率过高造成构件疲劳、传统的养护监测手段无法及早追踪发现结构内部锈蚀与机理损伤有关。通过健康监测系统的开发应用,将有助于管理者发现早期结构病害,及时采取有效措施确保桥梁的使用安全并进行必要的维修延长桥梁寿命。此外,对于技术人员来说,通过开发该系统促进对复杂桥型结构的深入认识、进一步丰富完善相关设计与建造理论同样具有非常深远的意义。

参考文献:

- [1] 郭玲,张利.桥梁结构健康监测[J].华东公路,2002(4).
- [2] 程朋根,史文中,高暂明.基于 GIS 的桥梁结构监测与管理信息系统[J].华东公路,2002(6).