

文章编号:1671-8879(2013)03-0106-05

# 关头坝大桥振动监测系统

王超<sup>1,2</sup>, 李妍<sup>2</sup>, 刘坤<sup>2</sup>

(1. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075;

2. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为了对关头坝大桥的结构健康状态和安全寿命作出正确评估,如实反映大桥的结构安全状态和运营安全信息,建立了桥梁振动监测系统。通过对大桥进行结构危险性分析,确定 7 个监测断面,布置 14 个 3 轴加速度传感器。设计了关头坝大桥振动监测系统数据采集及传输模块,此模块由 12 位精度模数转换芯片、89C52、RS232、DS1216 等芯片组成,完成一次数据采集共需约 5 ms。设计了大桥数据采集与分析管理系统,可对监测数据进行分析评估,为桥梁的养护、维修与管理提供决策。监测数据结果表明:桥梁振动监测系统可以实时地对桥梁结构状态进行监测与评估,为大桥在特殊气候、特殊交通条件下或运营状况严重异常时触发预警信号。目前,该系统正在为大桥的运营、管理和维护提供决策依据,对确保大桥的安全运营发挥着重要作用。

**关键词:**机械工程;关头坝大桥;振动监测;加速度传感器;安全报警

**中图分类号:**U447;U445.1 **文献标志码:**A

## Vibration monitoring system for Guantouba bridge

WANG Chao<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, LIU Kun<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to make correct assessment of Guantouba bridge structure's health and safety condition, and to reflect the feature information of the structure state, the bridge vibration monitor system was designed. According to the risk analysis results of the bridge structure, seven monitoring sections were determined and fourteen three-axis acceleration sensors were arranged. The data acquisition and transmission module was designed which consisted of 12 bits A/D chip, 89C52, RS232 and DS1216 etc. It only needed 5 milliseconds to complete one data acquiring procedure. The data acquisition and analysis system could analyze and evaluate the monitoring data to make decisions for the bridge maintenance and management. The results show that the system can carry out the task of the bridge structure realtime monitoring and evaluating. It will trigger warning signal when the bridge is in special climate or dangerous traffic conditions. This system can provide basis for making decisions about the bridge operation, management and maintenance. It plays a very important role in ensuring the traffic safety on the bridge and the bridge operation security. 1 tab, 3 figs, 11 refs.

收稿日期:2012-04-09

基金项目:陕西省交通厅科技计划项目(08-04K)

作者简介:王超(1973-),男,陕西紫阳人,陕西省交通建设集团公司工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:w-darlene@163.com.

**Key words:** mechanical engineering; Guantouba bridge; vibration monitoring system; acceleration sensor; safety alarming

## 0 引言

近20年来,中国交通行业取得了迅猛的发展,新建桥梁越来越多。截至2009年底,中国公路桥梁达 $62.19 \times 10^4$ 座、 $2\,726.06 \times 10^4$  m<sup>[1]</sup>。桥梁在长期的使用过程中难免会发生各种结构损伤,损伤的原因可能是使用、维护不当、车祸事故等人为因素,也可能是环境腐蚀、地震、风暴等自然灾害所致。此外,某些要道上交通量以大大高于预测流量的速度也加剧了桥梁结构的自然老化<sup>[2]</sup>。这些因素均降低了桥梁的承载能力和耐久性,甚至影响到车辆运营安全。

随着大跨桥梁设计的轻柔化以及结构形式与功能的日趋复杂化,为了把握桥梁结构在营运期间的承载能力、营运状态、安全性和耐久性,需要建立桥梁结构健康监测系统<sup>[3]</sup>。目前中国一些桥梁已建立了包含振动监测系统的桥梁健康监测系统,如宁波招宝山大桥、芜湖长江大桥、钱江四桥、南京长江大桥、虎门大桥、润扬长江大桥、东海大桥、苏通大桥、洞庭湖大桥、大佛寺长江大桥、滨州黄河公路大桥、东营黄河公路大桥和天津永和桥等<sup>[4-6]</sup>。

本文以甘肃省关头坝大桥为研究对象,通过对关头坝大桥进行结构危险性分析,确定了监测断面和监测内容。根据桥梁的监测需求和具体结构,设计了关头坝大桥的振动监测系统。监测方案设计了包括传感器模块、数据采集模块、数据分析等模块的关头坝大桥振动监测系统,并实现了工程安装。开发了关头坝大桥振动监测数据评估与预警管理系统,可以对监测数据进行分析处理,得出桥梁的实时振动曲线。在监测数据超出预警值及有突发事件的情况下,系统能够及时预警。利用桥梁振动监测系统可以对桥梁结构的技术状况和承载能力的综合评定进行补充和完善<sup>[7]</sup>。

## 1 关头坝大桥

关头坝大桥主体结构为双链式加劲钢桁架悬索桥,1988年9月建成通车,是甘肃省目前承载量最大的双链式吊桥。其主跨跨度为180 m,全长213.33 m,桥面净宽 $(7.5+2 \times 0.25)$  m。索塔为等

截面钢筋混凝土,高49.27 m,桥墩采用双柱式混凝土方墩。文县岸为1孔8 m的钢筋混凝土板梁引桥,碧口岸为1孔16 m少筋微弯板组合梁引桥。

关头坝大桥是沟通陕、甘、川3省的要津,也是通往九寨沟风景区的必经之路。大桥竣工距今已有20年的使用时间,由于大桥所在地域地震、滑坡等各种地质灾害频发,并且随着经济的快速发展,桥梁交通流量迅速增加,使得桥梁结构的安全性和耐久性面临严峻考验。因此,有必要建立桥梁振动监测系统,对桥梁的安全性进行评判,为桥梁结构安全运营、维修加固提供合理的决策依据。

## 2 振动监测系统总体设计

### 2.1 关头坝大桥振动系统的功能

(1)自动化数据采集系统:通过传感器、数据采集和数据处理设备采集结构响应及环境特征数据。可进一步分为传感器模块、数据采集与传输模块、数据处理与控制模块3部分。

(2)预警评估系统:标准化传感器监测的各类数据,进行统一的数据处理、损伤识别、结构状态评估及预警<sup>[8]</sup>。

### 2.2 振动监测系统的监测目标

(1)建立稳定可靠、实时采集与分析数据的振动监测系统,为大桥的长期安全运营和养护提供强有力的技术支持<sup>[9]</sup>。

(2)通过大量的特征值和实时采集数据的分析,建立实用的安全评估和预警系统。

(3)积累桥梁状态数据,为大桥长期运营和养护提供必要的决策依据。

(4)为同类桥梁提供借鉴。

### 2.3 振动监测系统设计原则

在设计关头坝大桥振动监测系统时,应遵循如下设计思想:

(1)重视监测系统的实用性、可靠性、长期稳定性、可操作性、易于维护性以及可扩容性;

(2)综合考虑系统的可更换性、系统的自诊断、系统采集优化制度、数据库的合理设计等。

关头坝大桥结构振动监测系统功能模块规划如下页图1所示。

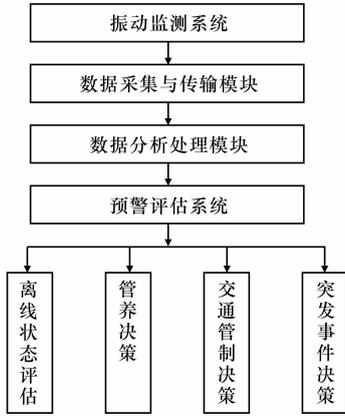


图1 关头坝大桥结构振动监测系统功能模块

Fig. 1 Key function module of Guantouba bridge vibration monitoring system

### 3 大桥结构危险性分析、监测断面选择及传感器布置

甘肃省关头坝大桥的结构基本安全性在设计中得到了保证,桥梁在恒载和各载荷组合工况下的受力状况都经过了较为充分的考虑,并且体现在设计结果之中,所以桥梁在各种组合工况下的安全性问题并不是本项目的关注重点。本系统主要关注的是桥梁经过20多年使用后的状态以及在以后运营中的状态变化,判断结构是否有损伤,是否偏离了健康状态以及损伤程度如何等。根据竣工图建立系统仿真模型,通过计算得到各项指标的最不利位置,见表1。

表1 各指标最不利位置

Tab. 1 The most disadvantageous positions for each parameter

指标名称	最不利位置 $L/m$	指标名称	最不利位置 $L/m$
主梁竖向位移	90	内斜杆内力	70,110
主索索力	0,180	外斜杆内力	7.5,172.5
吊索索力	7.5,87.5,92.5,172.5	下弦横梁内力	90
上弦杆内力	22.5,90,157.5	上弦横梁内力	82.5,97.5
下弦杆内力	22.5,90,157.5	竖杆内力	40,140
斜腹杆内力	90	风构内力	22.5,157.5

注:文县侧桥头坐标原点  $L$  为 0 m,碧口侧桥头  $L$  为 180 m,跨中  $L$  为 90 m,以下相同。

通过对上述计算结果进行分析对比,本系统共选择7个监测断面,分别为截面1( $L_1=22.5$  m)、截面2( $L_2=45$  m)、截面3( $L_3=67.5$  m)、截面4( $L_4=90$  m)、截面5( $L_5=112.5$  m)、截面6( $L_6=135$  m)、截面7( $L_7=157.5$  m),每个截面左右2个测点,每个测点包含  $X, Y, Z$  方向,  $X$  方向为断面横向方向,  $Y$  方向为桥长方向,  $Z$  方向为垂直方向。

全桥布置14个3轴加速度计。选择压电传感器测量加速度,其工作频率范围宽(可从几十赫到几百兆赫)、动态范围大、频响时间快、灵敏度高、温度稳定性好、质量轻、结构简单<sup>[3]</sup>。

## 4 数据采集与传输模块总体方案

数据采集与传输模块完成传感器数据的采集、信号调理与数据传输。各种不同类型的传感器采用不同的信号调理模块,数据采集模块完成对调理后的传感器信号的处理与转换,最终形成统一的数字信号<sup>[10]</sup>;数据传输模块将经过采集模块获得传感器监测参数的数字信号调制成为可供远程传输的信号,并完成信号的远程传输及解调任务。数据采集

与传输子系统同时也应作为向传感器发送采集指令的载体与通道<sup>[4]</sup>。

### 4.1 采集模块功能

采集模块采用开关电源供电,对外提供+12 V、-12 V,所有电源输出均加保险,保证模块板卡设备安全,板卡为传感器提供5 V驱动电源。

采集芯片使用STC12C5616AD单片机,由7805电源模块输出5 V电压供电,该芯片集成8路AD转换通道,均为单端输入,基准电压为5 V,分辨率为10位、15路I/O输出/输入通道、1路PWM输出通道。可以满足不同领域的各种需要。放大电路使用高精度差分运算放大器,具有输入失调电压低,温漂小,零漂小的优点,从而保证数据采集的精度。另外,采集模块还具有多次采样自动平均,产生软件滤波功能。

采集模块晶振为22.118 4 MHz,每块采集板使用6路A/D转换通道间隔采样,间隔时间可以通过上位机设置进行更改,最小间隔时间为0 ms,完成6路采集约为20 ms;最大间隔时间为11 ms,完成6路采集约为2.1 s。监测系统中有14个3轴加速度

传感器,需要采集 42 路加速度信号,因此采集系统中共需要 7 块采集模块来采集全部加速度信号。采集模块出厂设置间隔采样时间为 3.7 ms,完成 6 路采集约为 1 s。

#### 4.2 采集模块结构

关头坝大桥数据采集模块功能结构如图 2 所示,采集模块由电源模块、模数转换模块、主控制模块、数据传输模块和实时时钟组成。其中,电源模块为各模块提供激励电源;模数转换模块对风速风向传感器、压电式加速度传感器信号调理器输出的电压信号进行同步采集和模数转换,并缓存数据;主控制模块控制模数转换模块的采集动作、采集频率,并对数据进行打包,通过数据传输模块上传至上位机。

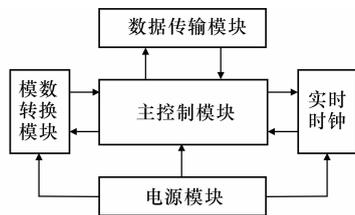


图 2 采集卡结构

Fig. 2 Structure of acquisition card

采集模块软件用 C51 编程语言进行编写,采用模块化设计。要完成该采集模块的各种功能,从 CPU 程序中应包含数据采集模块、身份识别模块、串行通讯模块;主 CPU 程序中应包含采集频率计算模块、时钟读写模块、身份识别模块、数据封装模块、串行通讯模块。

#### 4.3 数据传输模块

采集模块与上位机通信采用 CAN 总线通信。传统的数据采集系统一般采用 RS485 作为组网方式,而 RS485 本身存在总线效率低、系统实时性差、通信可靠性低、后期维护成本高、网络工程调试复杂、传输距离不理想、单总线可挂节点少、应用不灵活等局限性。本系统是基于 CAN 总线的分布式数据采集与通讯系统,解决了 RS485 网络的固有问题。CAN 总线属于总线式串行通信网络,采用独特的非破坏性总线仲裁技术,拥有强有力的错误处理能力和很高的传输可靠性,而且它的工作方式为多主方式,各节点均可在任意时刻主动向网络上的其他节点发送信息,不分主从。CAN 节点在严重错误的情况下有自动关闭输出功能,使总线上其他节点的操作不受影响。因而 CAN 总线具有突出的可靠性、实时性和灵活性<sup>[11]</sup>。

上位机软件使用 C++ Builder 进行自主开发,C++ Builder 是由 Borland 公司推出的一款可视化集成开发工具,支持多线程工作,并且在数据库访问操作上有很大的优势,而且 C++ Builder 支持多层应用程序。上位机软件主要负责将采集板获取的数据进行显示、处理和保存等工作。

## 5 振动监测系统初步监测成果

设备安装完成后,整个系统运行正常,性能稳定,监测数据准确可靠,为大桥的安全运营和科学管理提供了大量有价值的监测数据。

图 3 为 2011 年 12 月 1 日 9:00~10:00 有重载车辆过桥时,截面 1 的加速度传感器实时采集系统传输到监控室的加速度曲线图,表明系统成功实现了对主梁结构承受波动载荷历程的记录。

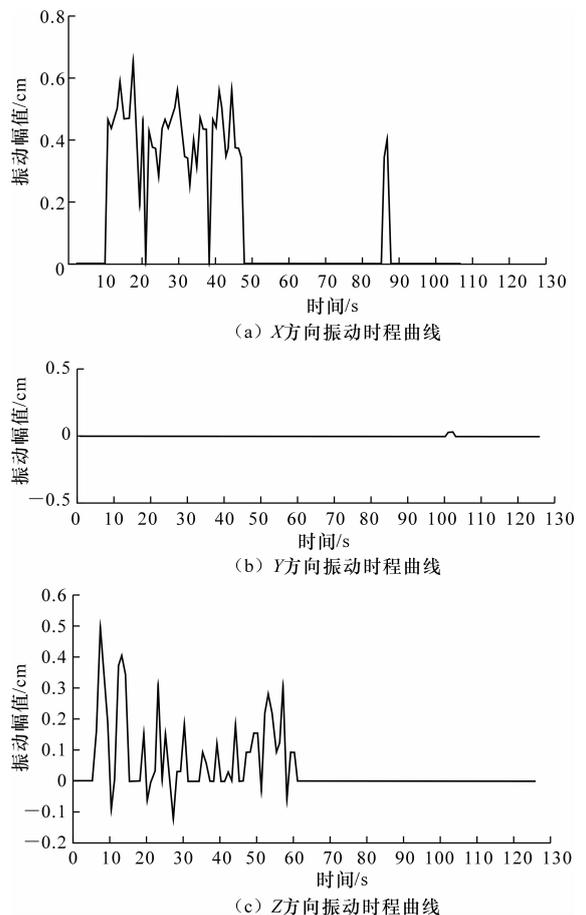


图 3 截面 1 的加速度曲线

Fig. 3 Acceleration curves of section 1

由图 3 可以看出,当有重型车辆过桥时,桥梁结构振动多是多自由度振动,从振动形式上来说最主要的是横向振动即梁在铅垂面内的自由振动,有时还伴有轻微的扭转振动。振动幅值未超过桥梁振动

极限阈值,因此不会触发预警系统。

## 6 结 语

(1)根据关头坝大桥的特点,结合养护管理的需求,在进行应力危险性分析的基础上确定了监测断面,对传感器进行了布设,设计了关头坝大桥振动监测系统方案,对桥梁的安全性进行评判,为桥梁结构安全运营、维修加固提供合理的决策依据。

(2)开发了监测系统数据采集模块、数据传输模块及上位机管理系统软件。数据采集模块可以对现场传感器数据信号进行实时高速采集,数据传输模块可以把各个采集模块的数据信息高效实时传输,上位机管理软件可以对实时数据信息进行处理、报表、打印等功能,管理系统可以对桥梁状况进行评估,发生异常时可以及时报警。

(3)振动监测系统运行已达2年,监测数据结果可靠,证明了该系统硬件设备性能可靠,具有可更换性、扩展性,软件管理系统功能周全,针对性强,维护方便。

### 参考文献:

### References:

- [1] 高占凤,杜彦良,苏木标.桥梁振动状态远程监测系统研究[J].北京交通大学学报,2007,31(4):45-48.  
GAO Zhan-feng, DU Yan-liang, SU Mu-biao. Study on remote vibration state monitoring system for Bridges[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007,31(4):45-48. (in Chinese)
- [2] 侯立群,欧进萍,李宏伟,等.东营黄河公路大桥振动监测系统设计与实现[J].世界桥梁,2008(3):75-79.  
HOU Li-qun, OU Jin-ping, LI Hong-wei, et al. Design and implementation of vibration monitoring system of system of Dongying Huanghe river highway bridge [J]. World Bridges, 2008(3):75-79. (in Chinese)
- [3] 宗周红,孙建林,徐立群,等.下白石大桥健康监测系统的设计与研究[J].铁道学报,2008,30(5):65-71.  
ZONG Zhou-hong, SUN Jian-lin, XU Li-qun, et al. Design and study of structural health monitoring system of Xiabaishi bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2008,30(5):65-71. (in Chinese)
- [4] 周进节,栾忠权,徐小力,等.基于ARM的振动监测仪数采部分硬件设计[J].北京机械工业学院学报,

2006,21(3):12-16.

ZHOU Jin-jie, LUAN Zhong-quan, XU Xiao-li, et al. Hardware design of data acquisition of vibration monitoring instrument based on ARM[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2006, 21(3): 12-16. (in Chinese)

- [5] Bergmeister K, Santa U. Global monitoring concepts for bridges [J]. Structural Concrete, 2001, 2(1): 29-39.
- [6] Yi T H, Li H N, Gu M. Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring [J]. Science China Technological Sciences, 2010,53(10):2597-2610.
- [7] 苏木标,杜彦良,孙宝臣,等.芜湖长江大桥长期健康监测与报警系统研究[J].铁道学报,2007,29(2):71-76.  
SU Mu-biao, DU Yan-liang, SUN Bao-chen, et al. Study on the long-term health monitoring and alarming system for the Wuhu Yangtze river[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(2): 71-76. (in Chinese)
- [8] 董学武,张宇峰,徐宏,等.苏通大桥结构健康监测及安全评价系统简介[J].桥梁建设,2006(4):71-73.  
DONG Xue-wu, ZHANG Yu-feng, XU Hong, et al. Structural health monitoring and safety evaluation system for Sutong bridge [J]. Bridge Construction, 2006(4):71-73. (in Chinese)
- [9] 马跃,陈保平,王响.山西小沟特大桥健康监测系统设计[J].国防交通工程与技术,2007(3):35-37.  
MA Yue, CHEN Bao-ping, WANG Xiang. Research into the health monitoring system of the Xiaogou megabridge in Shanxi [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defense, 2007(3):35-37. (in Chinese)
- [10] 张敏,杨志芳,朱利明.东海大桥桥梁结构健康监测系统设计[J].桥梁建设,2006(2):67-70.  
ZHANG Min, YANG Zhi-fang, ZHU Li-ming. Research and design of bridge structural health monitoring system for Donghai bridge [J]. Bridge Construction, 2006(2):67-70. (in Chinese)
- [11] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, et al. Structural control: past, present, and future [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9):897-971.