

# 西堍门大桥结构监测系统的设计与实现(II):系统实现

刘志强<sup>1</sup>, 李娜<sup>1</sup>, 郭健<sup>2</sup>, 冯良平<sup>1</sup>, 宋刚<sup>3</sup>

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 2. 浙江省舟山连岛工程建设指挥部, 浙江舟山 316000;

3. 浙江省舟山大陆连岛工程高速公路有限公司, 浙江舟山 316000)

**[摘要]** 采用“西堍门大桥结构监测系统的设计与实现(I):系统设计”中的设计方法,为西堍门大桥设计并实现桥梁结构监测系统。研究西堍门大桥结构监测系统的总体设计方案、子系统的设计方案及其软硬件的实现。分析西堍门大桥结构监测系统在运营中监测的桥梁荷载和结构响应。研究结果表明,西堍门大桥结构监测系统正常运行,实现了预期设计功能,基于工业以太网分布式数据采集与传输系统在桥梁结构监测系统中得以成功应用,可在其他工程中加以推广。

**[关键词]** 桥梁;结构监测系统;工业以太网;分布式数据采集系统;系统集成

**[中图分类号]** U445.7;U447 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)07-0101-06

## 1 前言

桥梁结构投资规模和社会影响巨大,尤其是特大桥,而其服役环境恶劣、性能衰退显著,因此如何采取有效措施确保桥梁结构的安全服役是桥梁工程研究的重点。

欧美国家桥梁建设和运营经验表明,桥梁结构的性能退化很快,尤其是在经济快速增长时期建造的桥梁。因此,我国非常重视目前已建和正在建造的大型桥梁结构的服役安全,积极推动桥梁结构安全保障技术的研究、应用和发展。鉴于桥梁结构监测系统能够记录和分析桥梁结构的荷载及结构响应,实时把握桥梁结构的安全状态,已成为21世纪桥梁工程领域的研究热点,桥梁结构监测系统的研究与应用在我国得到了迅速发展<sup>[1,2]</sup>。

文章采用“西堍门大桥结构监测系统的设计与实现(I):系统设计”中的设计方法,为西堍门大桥设计并实现桥梁结构监测系统。系统运行结果表

明,西堍门大桥结构监测系统正常运行,实现了预期设计功能。

## 2 工程概况

西堍门大桥全长5.452 km,主桥全长2.588 km,册子岛侧接线长2.864 km。起于册子岛桃夭门岭,于门头山经老虎山跨越西堍门水道,止于金塘岛上雄鹅嘴,接金塘大桥。其中西堍门大桥主桥为两跨连续悬索桥,主跨1 650 m,边跨578 m,居国内第一,世界第二。

西堍门大桥于2007年底合龙,2009年12月25日正式通车,西堍门大桥如图1所示。

## 3 总体设计

西堍门大桥结构监测系统的监测内容主要有荷载和结构响应。荷载主要包括风、温湿度、车辆和地震。结构响应主要包括大桥空间变位(主缆、索塔和钢箱梁)、应变和加速度。该结构监测系统的功

**[收稿日期]** 2010-04-20

**[基金项目]** 国家科技支撑计划项目(2008BAC07B05)

**[作者简介]** 刘志强(1976-),男,山东海阳市人,高级工程师,主要研究领域为桥梁结构监测技术、系统集成;

E-mail: zhiqiangliu@vip.163.com



图1 西堍门大桥  
Fig.1 Xihoumen Bridge

能是实时监测西堍门大桥的受力状态,并对该桥的安全状况进行综合评估。

### 3.1 传感器及布设方案

风荷载采用螺旋桨式风速仪和三向超声风速仪监测,分别安装在索塔顶部和桥面上(见图2)。三向超声风速仪可监测三维风速,可用于计算风谱,量程为0~65 m/s,最高采样频率为32 Hz,精度为1.5% RMS,工作温度为-40~70℃,工作湿度为5%~100%,当降雨量到300 mm/h时仍可正常工作。螺旋桨式风速仪可监测风速和风向,量程高达0~100 m/s。南北塔顶各布设一台螺旋桨式风速仪,钢箱梁主跨中和四分点的左右两侧各布设一台三向超声风速仪。



(a) 三向超声风速仪 (b) 螺旋桨式风速仪

图2 风速仪

Fig.2 Photographs of anemoscopes

环境温湿度采用温湿度仪监测,安装在桥面上、钢箱梁和锚室内。温湿度仪可监测所处环境的温度和湿度,温度的测量范围为-40~85℃,精度为±0.3℃;湿度的测量范围为0~100% RH,精度为±1.5% RH。主跨中桥面上安装有一台温湿度仪,南北锚碇的左右两个锚室各一台温湿度仪,钢箱梁内两台温湿度仪。

车辆荷载采用动态称重系统监测,安装在西堍门大桥南侧的引桥上(见图3)。动态称重系统的速度测量范围为5~200 km/h,总重误差范围小于

±6%,速度误差为±2 km/h,流量统计误差小于1%,单轴承重能力为30 t,过载能力(单轴)达200%。



图3 动态称重系统

Fig.3 Photographs of the weight in motion system

地震信息采用强震仪进行记录,南北塔底各布设一台,南北锚碇内各布设一台,共计4台。

大桥空间变位主要采用GPS系统、倾斜仪和位移计监测,如图4所示。采用16个GPS监测站和1个GPS基准站监测主缆、钢箱梁和索塔的空间变位,其中主缆布设8台GPS监测站,钢箱梁布设4台GPS监测站,索塔布设4台GPS监测站,GPS基准站布设在离大桥不远的监控中心楼顶。采用4个倾斜仪监测钢箱梁的扭转情况,4个位移计监测钢箱梁顺桥向伸缩情况。



(a) 主梁上的GPS (b) 主缆上的GPS

图4 GPS系统

Fig.4 Photographs of the GPS system

应变采用电阻应变计监测,精度为±1 με,精度高、动态性能好、耐久性好,在北塔附近布设两个截面,共计24个测点。

根据西堍门大桥的自振特性,分别选用伺服式加速度计和电容加速度计。在钢箱梁和索塔的振动分别采用12个和6个伺服式加速度计。选取20根吊索采用电容加速度计监测其振动情况。西堍门大

桥结构监测系统传感器布设情况如图 5 所示。

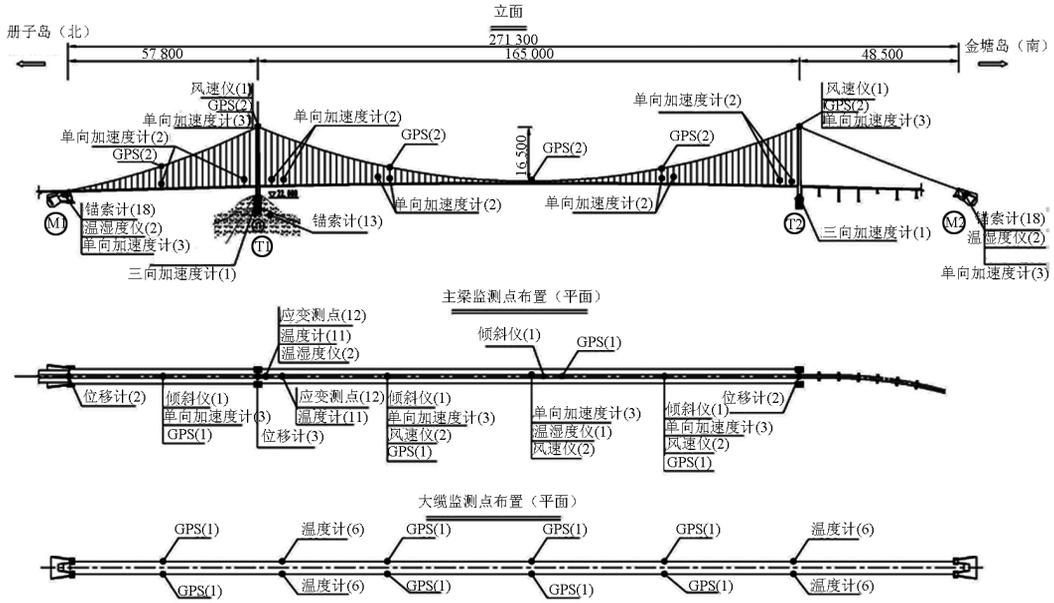


图 5 西垭门大桥传感器布设 (单位:cm)

Fig. 5 Layout of sensors of Xihoumen Bridge (unit: cm)

### 3.2 基于工业以太网分布式数据采集与传输子系统

根据西垭门大桥结构监测系统的传感器及其输出信号类型,研发了加速度信号调理器、应变信号调理器、温度信号调理器和通用信号调理器。信号调理器的主要特点包括:高精度 24 位 A/D;支持标准 MODBUS TCP 和 UDP 协议;可作为 POE 插入器的受电端,同时向传感器提供 12 V, 24 V 和 +12 V 的直流电源;内嵌实时时钟,支持 IEEE1588 精确时间同步协议;工作温度范围为  $-20 \sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,工作湿度为  $5\% \sim 100\%$ ,耐海洋盐雾等;可抵御雷电瞬间过电压 3 000 V,如图 6 所示。采用工业级管理型以太网交换机构建光纤冗余环网,实现大桥外场各信号调理器与监控中心上位机的实时通信。在局域网内设置拥有精确时钟(GPS 时钟)的服务器用以去校正各信号调理器的时钟,实现微秒级的时钟同步精度,完全满足桥梁结构监测系统对时钟同步精度的要求。

工业级交换机、POE 插入器以及电力监控模块、空开、交流接触器、电源和防雷器等安装在大桥外场的机柜内,整套装置称之为“数据采集站”。数据采集站可方便、灵活、甚至“随心所欲”地布置在大桥的各个部位,满足了桥梁空间范围大的特点,体现了分布式数据采集与传输系统的优势。

典型数据采集站的集成如图 7 所示。

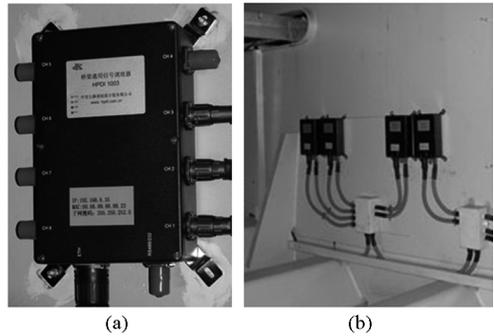


图 6 以太网信号调理器

Fig. 6 The signal conditioning and acquisition module with Ethernet interface

### 3.3 数据管理子系统

选用 SQL Server 2000 数据库系统作为开发平台,它具有独立于硬件平台、对称的多处理器结构、抢占式多任务管理、完善的安全系统和容错功能,并具有易管理、易维护、使用方便的特点,而且有很高的开发效率、丰富的 XML 支持特性、可伸缩性好等特性。数据库利用现有关系型数据库提供的开发和管理工具进行开发,利用 ODBC, ADO 和 OLEDB 等技术对数据库进行访问,涵盖的信息范围包括:桥梁结构信息,传感器和数据采集设备信息,各类监测数据,状态识别和综合评估的分析结果,其他异构数据库的信息等。



图7 数据采集站的集成  
Fig.7 Integration of the data acquisition module

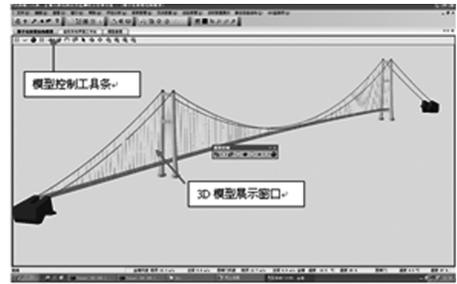
用户界面模块采用 VC++ 6.0 作为开发工具,使用 MFC 应用程序框架进行设计,综合使用 COM、数据库、网络、多线程、动态链接库、插件等技术。用户界面模块中主要包括一个界面框架和 3 个扩展模块,分别是静态资料管理扩展模块、实时数据处理扩展模块和巡检管理扩展模块。以用户界面框架为中心,以插件的形式加载其他扩展模块,并通过界面框架提供的接口进行协调以及相互的功能调用,还可以根据功能需求随时定义和增加新的扩展模块。实现的主要功能包括:a. 使桥梁管养人员可利用该界面进行数据库维护、修改数据采集频率及时间参数等操作,也可进行常规的数据录入;b. 向用户提供桥梁结构及结构监测系统的各种资料和信息;c. 向用户展示监测数据和识别分析结果,并且接收用户的交互式查询请求;d. 可自动生成相关统计和分析报告。系统部分界面如图 8 所示。

### 3.4 结构状态识别与综合评估子系统

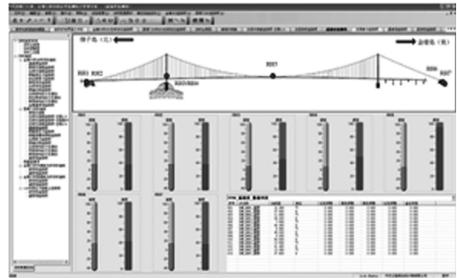
西堍门大桥当前是一座新建桥梁,不存在性能衰退和损伤,大桥当前状态可作为成桥无损状态。桥梁结构监测系统采集到的数据记录了当前的大桥无损状态,为日后大桥安全状态的对比分析和综合评估奠定了基础,同时也为西堍门大桥的模型修正提供了数据和研究基础。

### 3.5 系统运行结果分析

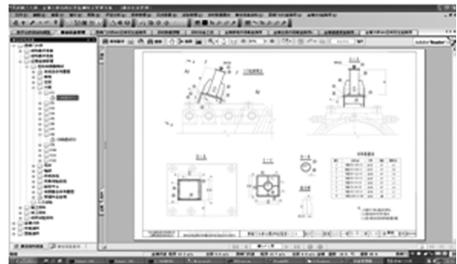
该结构监测系统自 2009 年底正式投入试运行,目前系统运行正常,下面简要介绍一下部分试运行结果。



(a) 系统主界面



(b) 实时数据展示界面



(c) 静态信息查询界面

图8 系统界面

Fig.8 Interfaces of the structural monitoring system

#### 3.5.1 动态称重系统

动态称重系统对西堍门大桥过桥车辆进行统计(见图9),某一天的部分数据结果见表1,因大桥当前试运行,不允许货车通行,所以过桥车辆均为小客车和大巴。

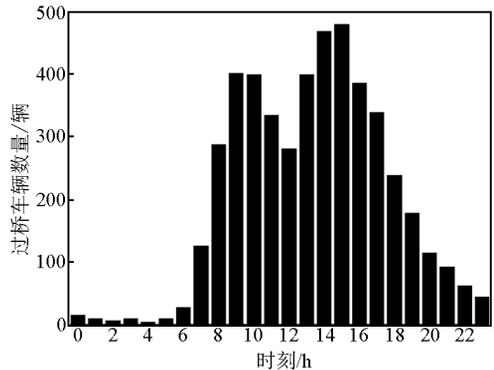


图9 2010年1月某天过桥车辆统计

Fig.9 Statistic of vehicles passing the bridge on a day of January 2010

### 3.5.2 风速

用风速仪测得了大桥普通一天的某一段时间的风速,如图 10 所示。从测得的数据来看,西堍门大桥建设地点的风速较大,风速超过 15 m/s 的情况经常出现,风及其引起的桥梁相关结构响应需加以重视。

表 1 实测过桥车辆数据  
Table 1 Data of vehicles passing the bridge collected

序号	总重/kg	车速 /(km·h <sup>-1</sup> )	轴 1 重 /kg	轴 2 重 /kg	轴 3 重 /kg
19316	1 830	86	1 010	820	0
19317	1 780	92	900	880	0
19318	1 750	80	910	840	0
19319	4 320	115	2 140	2 180	0
19320	1 570	70	810	760	0
19321	2 370	61	1 090	1 280	0
19322	1 500	145	780	720	0
19323	8 380	68	3 390	4 990	0
19324	1 650	78	900	750	0
19325	2 250	81	1 180	1 070	0
19326	1 650	77	890	760	0
19327	1 900	57	990	910	0
19328	1 860	80	920	940	0
19329	6 290	73	1 950	4 340	0
19330	2 740	69	1 390	1 350	0
19331	1 590	77	850	740	0
19332	2 760	72	1 260	1 500	0
19333	3 040	68	1 680	1 360	0

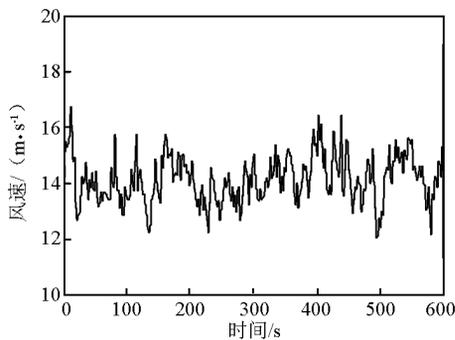


图 10 2010 年 1 月 13 日实测风速

Fig. 10 Wind speed collected on January 13<sup>th</sup> 2010

### 3.5.3 温湿度

用温湿度仪测得了桥面上大气温湿度以及钢箱梁和锚室内的温湿度,如表 2 所示。从测得的数据来看,西堍门大桥处于海洋环境,大气温湿度较大,

而钢箱梁和锚室内由于抽湿机的正常工作,温湿度均小于 50%,满足大桥养护要求。

表 2 实测温湿度

Table 2 Temperature and humidity collected

位置	温度/°C	湿度(RH)/%
桥面上	4.4	70.5
钢箱梁内	4.9	48.9
锚室内	11.2	37.6

### 3.5.4 GPS 系统

通过 GPS 系统测得的主跨中钢箱梁挠度变化如图 11 所示。

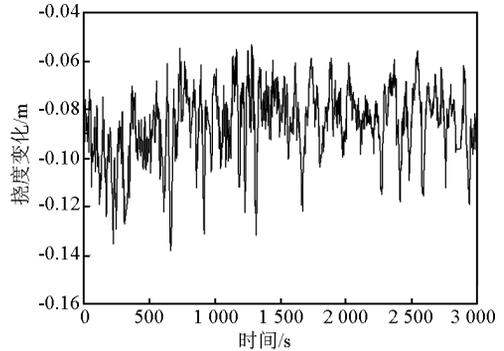


图 11 GPS 测试结果

Fig. 11 Data collected of GPS

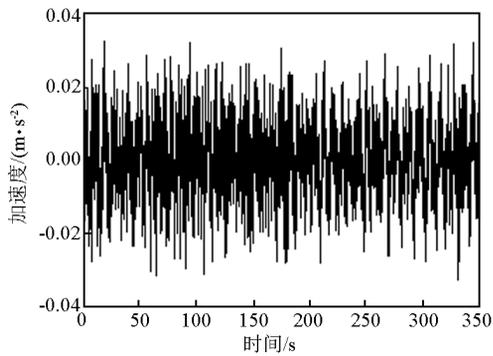
### 3.5.5 加速度响应

钢箱梁和长吊索在环境激励下的振动时程曲线如图 12 所示。通过傅立叶变换识别钢箱梁竖向前三阶振动频率分别为 0.097 Hz, 0.109 Hz 和 0.134 Hz,吊索的基频为 1.29 Hz。

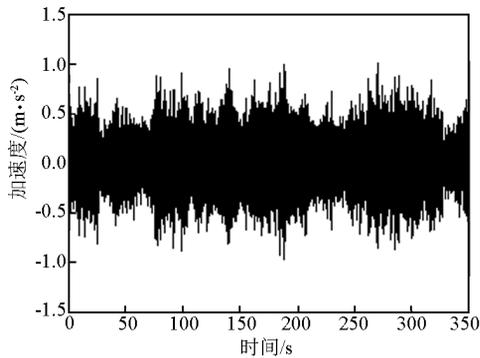
## 4 结语

桥梁结构监测系统是近年来桥梁工程领域的研究重点,但当前桥梁结构监测系统的设计和实施尚未有标准或规范可以依据,文章及其姊妹篇研究了桥梁结构监测系统的设计与实现方法,并依托西堍门大桥设计和实现了桥梁结构监测系统,得到的主要结论为:

文章实现的桥梁结构监测系统运行良好,为桥梁结构监测系统的研究和发展起到示范和推动作用,为西堍门大桥结构性能衰退演化规律、状态识别和综合安全评估以及养护管理决策的研究提供了大量的宝贵数据。



(a) 钢箱梁竖向振动



(b) 吊索振动

图 12 环境激励下的加速度响应

Fig. 12 Acceleration under ambient vibration

基于工业以太网分布式数据采集与传输系统可为桥梁结构监测系统的数据采集进行量身定做,系统运行可靠、稳定,实时性好,抗干扰能力强,应用前景广阔,可加以推广应用。

文章设计和实现了西堍门大桥结构监测系统,为桥梁结构监测系统的设计和实施标准和规范的制定提供了示范工程,积累了宝贵的工程实践经验。

#### 参考文献

- [1] Ou Jinping. Some recent advances of intelligent health monitoring systems for civil infrastructures in mainland China [A]. Proc. of the First International Conference on Structural Health monitoring and Intelligent Infrastructure [C]. Tokyo, Japan, 2003. 131 - 144
- [2] Ou Jinping. Practical implementations of intelligent health monitoring systems in HIT [A]. Proc. of North American Euro Pacific Workshop for Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring [C]. Hawaii, USA, 2004

## Design and implementation of structural monitoring systems for Xihoumen Bridge ( II ) : Implementations

Liu Zhiqiang<sup>1</sup> , Li Na<sup>1</sup> , Guo Jian<sup>2</sup> , Feng Liangping<sup>1</sup> , Song Gang<sup>3</sup>

(1. CCCC Highway Consultants Co. , Ltd. , Beijing 100088, China; 2. Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link Project, Zhoushan, Zhejiang 316000, China;

3. Zhejiang Zhoushan Island - Mainland Linkage Engineering Expressway Co. , Ltd. , Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

[Abstract] The structural monitoring system for Xihoumen Bridge is designed and implemented by employing the design method proposed in the paper of Design and Implementation of Structural Monitoring Systems for Xihoumen Bridge ( I ) : Design Method. The general design framework, the design method and implementation of sub-systems are examined. The loads and responses of the bridge are analyzed when the structural monitoring system is running and collecting data. The results indicate the structural monitoring system for Xihoumen Bridge is running normally and achieves the desired objectives. The distributed data acquisition and transmission system based on industrial Ethernet is applied and developed well in the bridge structural monitoring system, and can be popularized.

[Key words] bridge; structural monitoring; industrial ethernet; distributed data acquisition and transmission system; system integration