

西堍门大桥结构监测系统的设计与实现(I):系统设计

刘志强, 李娜, 冯良平, 张革军

(中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

[摘要] 研究了西堍门大桥结构监测系统的设计原则, 阐述桥梁结构监测系统的传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据管理子系统以及结构状态识别与综合评估子系统的设计方法和功能要求。

[关键词] 桥梁; 结构监测系统; 设计方法; 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)07-0096-05

1 前言

当前, 我国为适应经济建设的需要, 正大规模地发展交通事业, 桥梁的建设方兴未艾, 并将在未来仍然保持一定的增长。然而, 桥梁结构的使用期长达几十年甚至上百年, 环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应、疲劳效应与突变效应等灾害因素的耦合作用将不可避免地导致结构和系统的损伤积累和抗力衰减, 从而使抵抗自然灾害、甚至正常环境作用的能力下降, 极端情况下容易引发灾难性的突发事件。因此, 为了保障结构的安全性、完整性、适用性与耐久性, 在新建和已经建成使用的大跨度桥梁结构上急需采用有效的手段监测和评定其安全状况、修复和控制其损伤^[1,2]。

欧美等发达国家在二十世纪八九十年代末期开始在桥梁结构上布设结构监测系统, 以把握桥梁结构的服役安全状态。发达国家桥梁建设和服役经验表明, 在经济腾飞时期建造的桥梁结构的性能退化最快。因此, 我国政府、工程技术人员以及科技工作者特别重视目前已经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。由于结构监测系统能够记录和分析桥

梁结构的荷载及其响应, 把握桥梁结构的安全状态, 现已成为桥梁工程领域研究的热点课题。依托我国大规模基础设施建设的背景, 桥梁结构监测系统的研究与应用在我国得到了迅速发展^[3]。

一般来说, 桥梁结构监测系统主要包括传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据管理子系统、结构状态识别与综合评估子系统, 上述各个子系统分别涉及不同的硬件和软件, 需要通过系统集成技术将它们集成为一个协调共同工作的大系统。桥梁结构监测系统涉及多门学科领域, 系统的设计与构建比较复杂, 系统本身的构成不仅与其性能和功能有关, 还需要考虑其未来运营和养护管理情况。

目前国内外在结构监测领域, 对智能传感器以及结构损伤识别方法的研究较多, 但有关特大桥梁结构监测系统的设计、集成与实现的研究较少。文章以西堍门大桥为依托主要研究了桥梁结构监测系统的设计原则, 阐述了桥梁结构监测系统的传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据管理子系统以及结构状态识别与综合评估子系统的设计方法和功能要求, 并着重研究了基于工业以太网的分布式桥梁结构监测系统的架构。

[收稿日期] 2010-04-20

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2008BAG07B05)

[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

2 结构监测系统设计原则

桥梁结构监测系统的总体设计主要包括监测内容和功能设计两个方面。

对于大桥和特大桥,其投资规模较大、重要性高、服役期较长,结构监测系统应选择实时在线监测,而对于较小规模的桥梁可采用定期监测或检测的方式。

2.1 监测内容

一般而言,桥梁结构监测系统的监测内容主要包括荷载监测和结构响应监测。荷载主要有风、雨、温度、湿度、车辆、船撞和地震等;结构响应主要有索力、位移、支座反力、加速度、应力以及腐蚀程度等。

2.2 主要功能

桥梁结构监测系统的主要功能可以概括为:传感器能够捕捉到桥梁荷载和响应信息,数据采集与传输子系统完成信号调理、模数转换和数据的远程传输,数据管理子系统实现海量数据的处理、存储、展示、查询和组织管理等,结构状态识别和综合评估子系统的功能主要是识别桥梁结构的内力状态和损伤状态、对桥梁的安全状态进行评价。

3 传感器子系统

传感器子系统的主要功能是通过各种类型的传感器将桥梁荷载和结构响应信息转换为电(光)信号,供数据采集与传输子系统预处理、模数转换。

3.1 传感器及其测点布设方法

根据桥梁结构监测系统的监测内容和功能选择合适的传感器和布设位置。

荷载监测:风荷载多选用风速风向仪,常安装在风荷载较大、受桥梁结构构件影响较小的位置,例如索塔顶部、主梁合龙段;雨量选用雨量计,温湿度选用温湿度仪,桥梁温度荷载的监测应考虑桥梁构件内的温度梯度分布;车辆荷载一般采用动态称重系统,多布设在桥头,应在车辆正常高速行驶情况下保持较高的精度;地震多选用强震仪,一般布设在索塔的底部、锚碇内。

结构响应监测:索力可以采用索力计,主要有压力环式索力计、磁通量式索力计以及频率法测索力等;桥梁结构的位移多采用GPS系统、连通管系统以及位移计等,多布设在桥梁变形较大的位置。支座反力选用支座反力计,桥梁结构振动选用加速度计,对基频较低的柔性特大桥而言,应选用低频性能

优良的伺服式加速度计;应力应变常用的传感器主要有电阻应变计、振弦式应变传感器、光纤光栅应变计等;电阻应变计动态性能好,但漂移较大,振弦式应变传感器和光纤光栅应变计漂移较小,静态性能优良,光线光栅应变计还可用于监测动应变。应变传感器按照热点应力法进行布设。

3.2 传感器选型原则

传感器应本着技术先进、性价比高、长期可靠稳定、满足监测要求和目的的原则进行选型。

a. 先进性原则:根据监测要求,尽量选用技术先进、成熟的传感器,以提高建成后桥梁的信息化、数字化管养水平;b. 精确性:根据结构计算分析和测试结果,选用精度满足监测要求的传感器;c. 经济实用性:选用性价比高的传感器,节省成本;d. 可靠性、稳定性:选用耐久性好的工业级传感器,在桥梁服役环境下长期可靠稳定地运行。

常用主要传感器的选型原则如下所述:

1) 风速风向仪:准确测量风速、风向,在需进行风谱分析时还要能测量脉动风,按照桥梁的设计风速确定量程和精度。传感器的工作温湿度和防护等级应满足所在地环境要求。

2) 温度计:传感器的精度和量程满足监测和相关规范要求,量程应满足所在地历史统计的最低和最高温度。传感器的工作温湿度和防护等级应满足所在地环境要求。

3) 动态称重系统:应准确测量车速、轴重、总重、轴数和车辆数量,其精度和过载能力满足相关行业标准要求。传感器的工作温湿度和防护等级应满足所在地环境要求。

4) 加速度计:根据桥梁动态特性选用精度、量程和频响合适的传感器,传感器的频响特性要与桥梁的自振特性相匹配。

5) 应变传感器:其精度和零飘满足监测要求,量程与所测材料的极限应变相一致或略高。

6) 位移传感器:根据桥梁结构计算分析和测试结果确定测量精度和量程。

7) 索力计:根据索(股)力的设计值确定测量精度和量程,其长期可靠性和稳定性需满足监测要求。

其他传感器:除此之外的其他类型的传感器,可根据监测要求和桥梁计算分析和测试结果确定测量精度、量程、防护等级和工作温湿度要求。

3.3 西堍门大桥结构监测系统传感器选型和布设

按照上述设计方法和原则,对西堍门大桥结构

监测系统的传感器进行选型和布设。

3.3.1 荷载监测

风荷载:在西墩门大桥南北两个索塔顶布设螺旋桨式风速仪,在钢箱梁的跨中和四分点的左右两侧各布设一个三向超声风速仪。

温湿度监测:在跨中桥面上布设温湿度仪监测大气环境的温湿度,在钢箱梁和锚碇内布设温湿度仪监测钢箱梁和锚室内的温湿度。在钢箱梁和主缆的两个截面处布设了温度计,监测结构温度。

车辆荷载:在西墩门大桥的南引桥上布设动态称重系统监测双向过桥车辆。

地震:在索塔底部和南北锚碇布设强震仪。

3.3.2 桥梁结构响应监测

大桥空间变位的监测:主要包括主缆的空间变位(横桥向、竖桥向、顺桥向)、钢箱梁的空间变位(横桥向、竖桥向、顺桥向)和索塔的空间变位(横桥向、顺桥向)。通过 GPS 系统、位移计和倾斜仪监测大桥的空间变位。

应力应变监测:通过电阻应变计监测钢箱梁的疲劳应力。

桥梁结构振动:通过加速度计监测钢箱梁、索塔、吊索的振动情况。

索力监测:通过压力环式锚索计监测主缆索股和锚碇预应力锚固系统的索力。

4 数据采集与传输子系统

数据采集与传输系统对安装在大桥外场的传感器信号进行必要的调理后进行模数转换,然后通过工业以太网上传给监控中心的计算机服务器。

桥梁结构监测系统中数据采集技术主要分为集中式数据采集技术和分布式数据采集技术。集中式数据采集技术系统由于其固有的缺陷(模拟信号传输距离远、抗干扰能力差、造价较高、工作温度范围较小、功耗较大、耐恶劣环境能力差等)而使其在桥梁结构监测系统中应用受到极大的限制。分布式数据采集系统的优势在于模拟信号的传输距离短,抗干扰能力强,性价比高,能耗较小,为工业级产品,可在恶劣环境中长期工作。但传统的分布式数据采集系统难以做到高精度的同步采集,这极大地限制其应用和发展。当前,随着工业以太网技术的迅速发展和 IEEE1588 的出现,分布式数据采集系统攻克了这一技术瓶颈,加上其固有的技术优势,使其可为桥梁结构监测系统量身定做数据采集与传输系统。

4.1 基于工业以太网分布式数据采集与传输系统

桥梁空间范围很大,尤其是特大桥,空间范围在几公里以上,桥梁结构监测系统中的传感器分布在桥梁的各个部位,信号传输距离较远,从而大大增加了数据采集与传输系统构建的难度。基于工业以太网分布式数据采集与传输系统可为西墩门大桥量身定做数据采集与传输系统。在每个传感器附近安装以太网信号调理器,信号调理器接入桥梁结构监测系统的工业以太网中(例如光纤冗余环网),通过工业以太网与监控中心的上位机通讯。由于就近安装了以太网信号调理器,实质上就是将各个传感器转换成为以太网网络智能传感器,这样上位机所需处理的就仅仅是相同类型的标准以太网信号,可以采用相同的命令格式向不同的传感器发送采集或维护指令,从而大大提高了数据采集系统的效率和技术先进性。而且信号调理器和传感器之间的距离非常近,模拟电缆很短,使得系统的抗干扰能力大大提高。

在基于工业以太网分布式数据采集与传输系统,以太网信号调理器是其中的关键设备。以太网信号调理器主要将各种传感器输出的不同类型的模拟或数字信号转换为统一的标准以太网信号。一般而言,桥梁结构监测系统常用的以太网信号调理器主要包括四类:a. 应变信号调理器;b. 加速度信号调理器;c. 通用信号调理器(主要针对输出 $\pm 5\text{ V}$ 和 $4\sim 20\text{ mA}$ 的传感器);d. 温度信号调理器。

上述四类信号调理器具有的主要功能和特点包括:a. 输出统一以太网信号,支持标准 MODBUS TCP 协议,UDP,TCP/IP;b. 采用高精度 A/D 转换器;c. 可接受 POE 网络供电,作为 PD 端的同时还可向传感器供电,符合 IEEE 802.3af;d. 内嵌实时时钟,测量数据带时间标签,具备模块间时钟同步功能,同步精度为微妙级;e. 工业级产品,可在恶劣环境下(工作温度范围: $-20\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作湿度: $5\%\sim 95\%$ 无凝结,海洋盐雾环境等)可靠稳定地长期工作,内含防雷模块,能够有效抵御感应雷及电气浪涌的冲击(见图 1)。

4.2 时钟同步方案

基于工业以太网分布式数据采集系统的时钟同步是影响和制约这一方案在测控领域广泛应用的关键之一。时钟同步的目的是将时间基准高精度地传递到各测控点。2002 年确立的 IEEE1588 标准(网络化测量和控制系统的精确时钟同步协议,通常称为 precision time protocol,简称 PTP)使得分布式数

据采集系统的时钟同步精度可达到 100 ns。

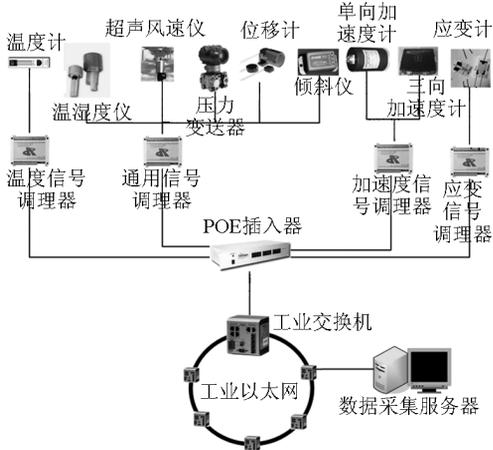


图1 西埃门大桥基于工业以太网分布式数据采集与传输系统的架构

Fig.1 A framework of distributed data acquisition and transmission system based on industrial ethernet for Xihoumen Bridge

IEEE1588 的基本原理是用网络中最精确的时钟去校正或同步其他时钟,最佳时钟的选取是被自动执行,通过最佳主站时钟算法实现。在网络中有两种类型的时钟:主时钟(用于同步其他时钟),从时钟(被同步的时钟)。从理论上讲,系统中的所有时钟都有可能成为主时钟和从时钟。但往往网络中时钟是相对固定的,所有从时钟通过与主时钟的同步消息、去校准自己的时间,这个同步过程分为两个阶段,一是偏移校准,二是延迟校准。

偏移校准:偏移校准是指测量主、从时钟的偏移,并在从时钟上消除这些偏移。在偏移校准阶段,主时钟端周期性(固定的时间间隔,通常是 2 s)的传送一个独特的同步消息(Sync)到相关的从时钟端。这个 Sync 消息包含了该消息被完整地传送出去的一个估计时间。主时钟端发送并测量 Sync 帧被传送出去的精确时间,而从时钟测量被接收到的精确时间。然后主时钟端将测量到的 Sync 帧被发出的时间用 Follow Up 帧发送到从时钟端。从时钟端在接收到 Sync 帧和 Follow Up 帧后,则开始计算主从两端的偏移。如果没有传输延迟的话,那么这两个时钟在下一次发送同步帧时两端的时钟是同步的,校准时间是零。

延迟校准:延迟校准用于确定主从两端的帧传输过程中延迟,这里有一个前提,即从端到主端和主端到从端的延迟是相等的。延迟校准与偏移校准不一样,因为网络拓扑结构不会经常发生改变,特别是

在相对固定的网络中(一个没有冲突的以太网局域网),延迟更是没有什么变化。故而前者不需要经常进行,其执行周期要比偏移校准要大一些,具体取值可以在 4 ~ 60 s 之间。这样设计也可以有效减少网络当中的通信量。

5 数据管理子系统

数据管理子系统是结构监测系统的“仓库”,存储和管理桥梁及其结构监测系统相关信息、设计图纸、荷载试验方案和数据以及监测系统的数据等。

数据管理子系统由数据采集与控制模块、数据处理模块、数据存储模块、用户界面、数据库等组成(见图 2)。

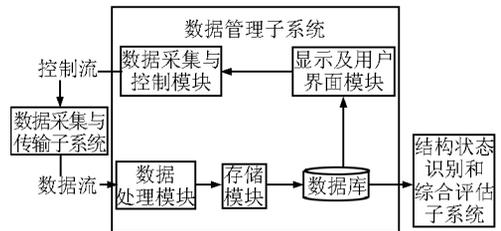


图2 西埃门大桥数据管理子系统

Fig.2 Data management subsystem for Xihoumen Bridge

数据采集与控制模块可以按照既定采集方案驱动数据采集与传输子系统采集数据,采集方案包括时间条件及连续监测参数触发条件,例如可以设定在风速达到某个数值时触发采集等。另外,数据采集与控制模块还能接受用户指令来进行数据采集。

数据处理模块主要对外场数据采集与传输子系统传送过来的数据包进行分解、解析与分类,通过数值分析与比较初步判断数据的优劣,并将有效的监测数据抽取出来存入数据库。

数据存储模块主要对数据采集与传输子系统传送过来的原始监测数据进行初步转换、处理、分析,并将这些中间数据进行保存。

数据库主要包括数据库及其管理系统,主要完成监测数据的存储、SQL 查询等工作,并提供监测数据给状态识别和综合评估子系统使用。

用户界面模块主要为用户提供监测数据的查询、控制采样、实时显示、预警、提示等操作。

6 结构状态识别与综合评估子系统

结构监测系统的核心和最终目标是对桥梁的内力状态和损伤状态进行识别,建立桥梁分析模型,进行桥梁安全综合评估和预测。

桥梁安全状态直接由其内力状态和损伤状态决定。因此,结构状态识别体系是进行结构安全状态评估的基础,是桥梁结构安全综合评估系统的核心内容之一。桥梁结构状态识别体系的中心任务是将数据采集子系统获得的荷载信息、结构响应信息以及人工巡检检查的结构表现损伤信息转化为反映结构安全状态的信息,在此基础上对安全状态信息进行综合评估即可获得结构在特定时刻的安全程度及其安全状况,为桥梁结构的运营及维护决策提供科学依据。

结构状态识别可通过将当前结构状态与成桥状态或无损状态的对比分析来实现。对比分析的内容包括大桥的静力响应指标(索力、吊杆力、变形等)及动力响应指纹(频率、振型、模态曲率指标等)。当大桥当前状态与成桥状态发生较大差异时,则表明结构可能发生状态的改变或损伤。

结构状态识别是基于桥梁结构修正后的有限元模型。根据结构设计图纸和施工监控等信息建立初始有限元模型,随着结构监测系统的运行,不断引入结构的响应信息及结构的损伤信息来修正这个初始有限元模型,以获得“真实”的桥梁结构有限元模型。

鉴于目前准确识别结构状态、建立精确的修正模型和进行桥梁安全评定还存在一定的困难,因此,在设计桥梁实时在线结构监测系统时,一般还需要人工离线进行更细致的辅助分析和判断。

7 结语

文章较系统和全面地研究了西堍门大桥结构监测系统的设计方法,为特大桥结构监测系统的设计和实施标准、指南的制定提供可以借鉴和参考的研

究成果。得到的主要结论为:

桥梁结构监测系统的设计主要包括总体设计和分子系统设计。总体设计包括监测内容和功能设计;分子系统包括传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据管理子系统、结构状态识别与综合评估子系统的方案和功能设计、选型原则。

基于工业以太网分布式数据采集与传输系统和以太网信号调理器攻克了集中式数据采集系统的固有缺陷,优势明显,可在桥梁结构监测系统中加以推广应用,其发展潜力和空间很大。

桥梁结构损伤演变规律、状态识别、综合安全评估和桥梁养护决策是桥梁结构监测系统研究的核心问题和最终目标。桥梁结构监测系统的子系统以及整体大系统的实现和运行是一切研究和实现该目标的基础。在文章的续篇“西堍门大桥结构监测系统的设计与实现(II):系统实现”将详细介绍西堍门大桥结构监测系统的具体设计和实现情况。

参考文献

- [1] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全评定[A]. 走向 21 世纪的中国力学——中国科协第 9 次青年科学家论坛报告文集[C]. 北京:清华大学出版社,1996. 179 - 189
- [2] 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
- [3] 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 (I) : Design methods

Liu Zhiqiang, Li Na, Feng Liangping, Zhang Gejun
(CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

[Abstract] General design principles of bridge structural monitoring system are studied through Xihoumen Bridge structural monitoring system. And the design methods and basic functions of the sensors, data acquisition and transmission, data management and safety evaluation subsystems are illustrated.

[Key words] bridge; structural monitoring; design approach; system integration