

湖北石首长江公路大桥结构健康监测系统设计研究

张门哲¹, 金耀², 李小龙², 孙小飞², 吴学伟¹

(1.湖北省交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430074; 2.中交公路规划设计院有限公司)

摘要: 介绍了湖北石首长江公路大桥结构健康监测系统的总体构架与各子系统。详细介绍了自动化传感子系统的测点总体布置及数据采集传输控制的具体功能实现,提出了基于电子化信息化的巡检养护软件系统,建立移动端巡检 APP 用以巡检,在结构预警及安全评估系统中以钢箱梁疲劳和动力分析为例提出了具体的评估内容及算法。与其他国内外监测系统相比,石首大桥监测系统整合了电子化人工巡检系统,进行了标准化知识库的建立,并基于此开发了移动端巡检 APP,是该系统的创新性成果,为日后大跨度桥梁监测系统的构建提供了经验。

关键词: 石首大桥; 健康监测系统; 电子化人工巡检; 结构预警; 结构安全评估

1 工程概况

石首长江公路大桥位于湖北省石首市,是湖北省“九纵五横三环”高速公路网中潜(江)至石(首)高速公路跨越长江的控制性工程。主桥结构为双塔单侧混合梁斜拉桥,其跨径为 $(75+75+75)\text{ m}+820\text{ m}+(300+100)\text{ m}$ 。主桥北边跨采用混凝土主梁,长 251.5 m;中跨和南边跨采用钢主梁,全长 1 193.5 m。全桥采用 6 跨连续半漂浮结构体系。南侧辅助墩、过渡墩钢箱梁内采用混凝土块压重,防止施工期、运营期出现支座上拔力。石首长江公路大桥主桥立面布置图如图 1 所示。

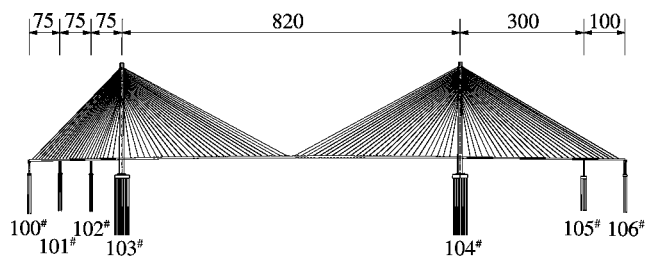


图1 石首长江公路大桥总体布置图(单位:m)

发达国家在 20 世纪 80 年代末期开始在桥梁结构上安装健康监测系统,以把握桥梁结构的服役安全状态,然而传感器耐久性较差,同时系统的自动化、实时性、集成化和网络化的程度较低。目前中国已有很多成功应用长期结构监测系统来实现桥梁结构监测的实

例,已有 100 多座桥梁实施了长期监测系统,如杭州湾大桥、北盘江大桥、港珠澳大桥等。石首长江大桥结构构件众多,构造复杂,对桥梁安全运营及管理工作提出了极高的技术要求,因此进行一体化桥梁监测巡检养护管理,开展集中化、专业化、标准化、规范化、技术手段先进的桥梁管养方式极其必要。该文就石首长江大桥健康监测系统设计,对系统构成和总体架构与功能进行介绍,并对石首长江大桥健康监测系统中实现的测点优化布设、电子化人工巡检及 APP 功能等创新点进行详细阐述。

2 系统构成

石首大桥结构健康监测系统是以大桥主体结构为载体,布设大规模、多种类传感器网络并应用现代通信和网络技术,综合结构及环境监测、数据分析和桥梁巡检养护管理等功能为一体的综合安全监测系统。它实时感知、识别、诊断结构的安全状态及变化趋势及规律,并能有效地让大桥管理方实时、客观、定量地了解桥梁所处的运营环境及关键代表性构件响应数据以及结构的安全置信度水平,整体提高桥梁的信息化、自动化管理能力,为桥梁管养单位提供科学客观的数据,最大限度地辅助桥梁管养决策的制定。

石首长江公路大桥健康监测系统由以下几个子系统构成:

收稿日期:2018-06-21

作者简介:张门哲,男,高级工程师,E-mail:438050569@qq.com

(1) 自动化监测子系统。该子系统通过传感器模块、数据采集传输模块、数据处理设备实时采集结构静态响应、环境数据,并通过数据处理和控制设备对采集的数据做在线预处理。根据该桥的结构特点,自动化监测子系统的监测内容包括环境和结构响应。

(2) 交通监测子系统。对车辆数量、荷载大小等识别、记录、交通状况进行监测,实现可视化触发实时监控管理,并按需求能够进行数据远程传输监控。

(3) 电子化巡检子系统。为满足大桥全方位的维修和养护需求,建立专门的结构外观检查子系统,实现日常巡检的电子化管理、记录、查询、统计分析等。

(4) 数据存储管理子系统。对各子系统数据进行查询、存储、归档等。对自动化监测数据、人工巡检数据、视频监控数据等不同类型的数据库提供可靠的分布式数据存储与交换基础。

(5) 安全报警与状态评估子系统。进行数据识别、分析和报警,综合不同类型数据及检测等资料进行对比分析;对环境因素、索力、变形等典型监测参数建立警示指标体系并报警;综合各种监测检测数据及信息对桥梁结构按需进行专项评估。

(6) 用户界面子系统。作为整个系统的 UI 界面展示及人机交互部分,按照分级权限实现不同用户对桥梁静、动态资料查询展示及对系统的输入、修改、访问等控制和管理功能,满足单桥系统门户权限独立管理以及省级桥群监管平台远程登录或接入集成管理的双向需求。

3 系统总体架构与功能

石首长江公路大桥监测系统的根本功能是采用各种现代化感知技术获取各类结构响应数据,通过对其专业评估并确保结构的运营安全。石首长江公路大桥健康监测系统总体架构如图 2 所示。

3.1 自动化传感测试子系统

3.1.1 监测项目及监测点

总体方案设计基于石首长江公路大桥桥址区运营环境特点和结构受力特性与构造特点,根据实用性、可靠性、技术先进性和耐久性对主桥布设监测点及仪器进行自动化监测,对应进行传感器模块、采集及传输模块以及数据处理和控制模块方案的设计。

石首长江公路大桥自动化监测子系统包括以下几部分监测内容:

(1) 环境参数及荷载源监测(包括:风速风向、降

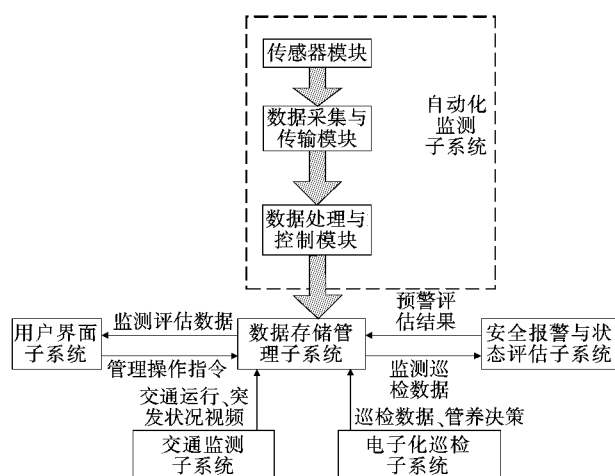


图 2 石首长江公路大桥健康监测系统总体架构示意图

雨量、温度场、环境及结构内部温湿度、车辆荷载、地震动及船舶撞击、基础冲刷等)。

(2) 结构响应监测(包括:塔顶位移、主梁挠度、拉索索力、钢箱梁疲劳、混凝土结构应变等)。

(3) 其他监测:电子化巡检、视频监控等。

根据石首桥梁构件的重要性及易损性,确定监测项目和测点布设,按照最多“设备共享与数据延续”原则,重点围绕主梁、索塔、斜拉索三大受力体系进行布置。在满足专业分析精度的基础上,选择技术先进、环境适应性好、耐久性、可靠性、便于更换维护的传感测试设备及其配套设施。自动化传感测试子系统的监测项目及测点规模见表 1,测点总体布置见图 3。

上述布点方案中,拉索索力的监测,采取了与以往监测系统不同的方法,即采用两种传感器(锚索计、单向加速度计),而以往监测系统只采用一种传感设备。根据两种传感设备的优缺点,频率法测长索索力较准确,故布设单向加速度计,短索频率法误差大,采用对短索精度较高的锚索计监测。

3.1.2 数据采集传输

数据采集传输是连接数据处理与控制系统和传感器硬件的关键部分,一方面按预定采样频率、采集方式将多类型的传感器物理量信号采集回来并通过模数转换、指定传输协议等,转变为系统可识别的数据,交由数据处理与控制系统统一管理。数据采集软件框图见图 4。

3.1.3 数据处理与控制

该子系统对采集到的数据进行统一管理和控制。它通过动态数据库来存储原始数据及其预处理结果,并在该库中要保存足够时间。各项数据均需定期存档、备份。

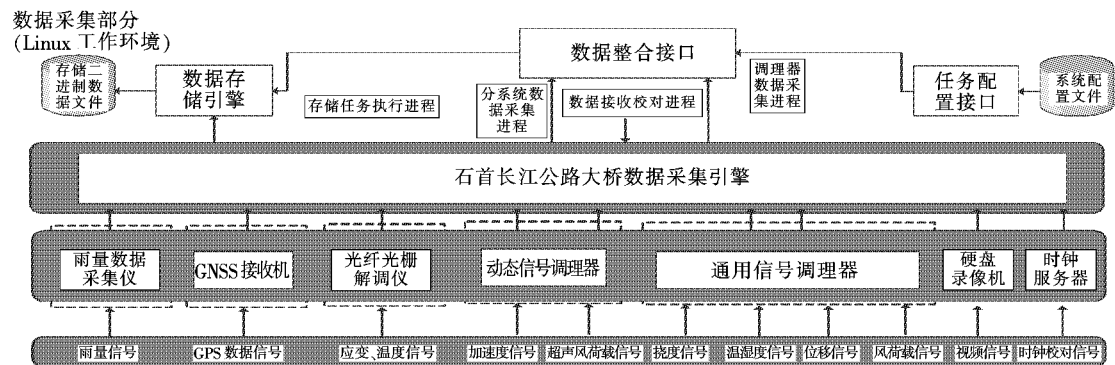


图 4 数据采集软件总体结构框图

数据处理软件设计的要点为:跨平台、可扩展、可靠性。基于以上设计要点,数据处理与控制软件结构图如图 5 所示。

3.2 电子化人工巡检子系统

石首长江公路大桥结构监测系统是一个结合国内外相关专业最新技术,并考虑了实用性和稳定性、可靠

性后综合设计而成的一个庞大的系统工程,基于电子信息化化的巡检养护软件系统是桥梁电子化巡检养护管理的主要工作重点。设计及开发内容如下:

- (1) 结构设计人员按照巡检需要对石首长江公路大桥进行结构离散,分层编制巡检目录树至构件层。
- (2) 知识库(构件库、病害库)建立。

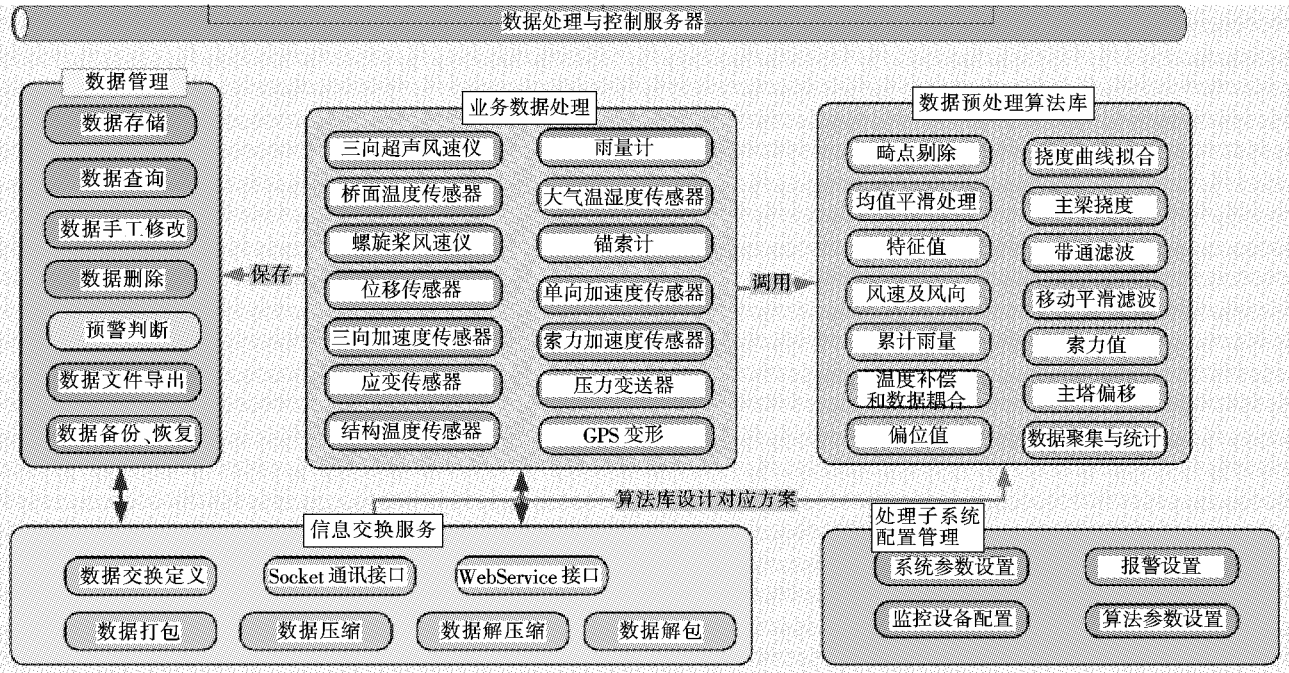


图 5 数据处理与控制软件结构框图

(3) 研发石首长江公路大桥电子化人工巡检软件系统。

3.2.1 知识库建立

(1) 构件库。桥梁电子化巡检子系统的基础是根据结构特点,对已有结构重新进行单元化离散,建立基于唯一 ID 编码的电子化单元体系,并将相应属性赋予每个单元体。通过结构分析、危险性分析和单元特征分析,建立构件属性。桥梁构件的要素属性包括静态

信息、动态信息和知识信息。

(2) 病害库。在前述结构解析的基础上,利用知识库定义构件初始等级和病害初始等级,分析各种类型构件在运营中可能出现的病害,形成病害库。对于石首长江公路大桥项目,其主要构件病害库见表 2。

3.2.2 巡检软件功能

石首长江公路大桥结构形式为混合梁斜拉桥、特大型跨江桥梁,其结构单元种类复杂、数量巨大,传统

基于纸张表格的巡检方法和手段难以满足其现代化管养需求,且日后桥梁的信息化、档案化存在较大困难。构建标准化、规范化的基于信息化手段的巡检养护管

理系统,对巡检养护工作的信息化、现代化、制度化提供了基本保障,也为管养单位的科学决策提供了信息化的数据基础。

表 2 石首长江公路大桥主要构件病害库

构件类型	危险性
钢箱梁	钢构件变形;锈蚀;跨中挠度超限;裂缝;涂层劣化;焊缝开裂;螺栓缺失;结构变位
斜拉索	渗水;锈蚀、腐蚀;锚头损坏;掉漆、起皮;防护套破坏;防护层破坏;断丝
索塔	倾斜变形;蜂窝、麻面;剥落、露筋;锈蚀;混凝土裂缝;沉降;基础冲刷
基础	冲刷、淘空;剥落、露筋;冲蚀;河床损毁;沉降;倾斜;裂缝
支座	锈蚀;开裂;底板混凝土碎裂、露筋、掉角;锚栓剪断;转角超限
桥面铺装	车辙、拥包、高低不平;泛油;破损;龟裂、块裂;裂缝
伸缩缝	凹凸不平;锚固区缺陷;锚固件松动、缺失、焊缝开裂;槽口堵死、失效

根据 JTG/T H21—2011《公路桥梁技术状况评定标准》、JTG H11—2004《公路桥涵养护规范》的相关技术要求,结合石首长江公路大桥结构特点、桥梁管养的实际需求,按规范要求建立桥梁的构件划分、病害类型、巡检制度、评定打分标准等规则,结合欧洲 SCAN-PRINT 及美国 POINTS 系统的功能架构及经验,确定石首大桥巡检养护管理系统的主要功能包括:基于 WebGIS 的桥梁地理信息系统、桥梁静态及动态信息管理、桥梁巡检计划的制定及管理、桥梁状况评估及预测等。其中,巡检信息录入移动巡检 APP 使用流程为:开发便携式智能手持终端 APP,病害快捷录入及上传等功能,智能终端巡检数据在没有网络时能够暂存在设备上,等待有网络的情况下上传至服务器。

为方便、快捷地录入桥梁病害及养护维修信息,智能巡检终端的巡检 APP 通过 WebService 巡检数据接口直接联通监控中心服务器端,真正实现随时随地,移动办公。APP 集成了二维码扫描功能,结合构件解析实现便捷、信息化的巡检。

对于石首大桥结构表观损伤的检测,主要采用电子化人工巡检技术,在基于风险管理的基础上,针对性地巡查桥梁主体工程及其附属设施可视的损伤或病害,保障其能够得到及时、经济合理的维护和维修,减小人为主观判断偏差。养护决策所需的数据通过自动化监测与人工巡检两种手段获取,并通过统一集成的数据处理分析,进行有针对性的结构安全指标的分析,得到结构状态的相关结论,为专家级的评估提供支持。

3.3 结构预警与安全评估子系统

综合预警与结构安全评估子系统是桥梁健康监测系统的核心部分,它通过监测荷载输入和结构响应数

据(位移、变形、加速度等)对桥梁整体及关键构件进行状态评估,判断桥梁是否处于正常使用极限状态。对桥梁安全状态的重要变化及出现不安全预兆时进行预警,提醒养护人员随时关注结构安全状况,及时进行维修养护,保障桥梁正常运营。该子系统内容包括:对监测及识别的结果进行统计、对比分析,趋势分析和相关性分析;对各项监测物理量指标分别建立明确的分级预警阈值;综合多源数据统一分析,对结构进行专项评估。

3.3.1 结构安全预警

预警值的设置参考 JT/T 1037—2016《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》进行设置。具体预警值设置准则参考该规程第 8.3.2 条。

3.3.2 结构安全专项评估

结构安全评估评定是安全监测系统的终极目的,它要求在理解全桥结构特点的前提下,结合监测系统的实测海量数据进行分析,达到精确了解全桥整体安全性能、局部损伤分析、疲劳特性分析等目的,以供管理养护单位进行管养决策。

石首长江公路大桥健康监测系统安全评估由内力状态专项评估分析、钢箱梁疲劳分析专项评估分析、桥梁钢结构疲劳专项评估分析、斜拉索索力专项评估分析、桥梁动力特性专项评估分析及桥梁抗风专项评估分析组成。下文以钢箱梁疲劳分析和结构动力分析为例进行阐述。

(1) 桥梁钢结构疲劳专项评估关键技术

对于石首长江公路大桥钢结构的疲劳评估主要针对钢箱梁正交异性桥面板系统展开。钢箱梁正交异性桥面板系统疲劳问题比较突出,与车轮荷载反复作用、应力

循环多、桥面板应力状况复杂、交叉部位及U肋焊缝等部位质量难以保障有关。

① 算法简介。应力-寿命法广泛用于疲劳寿命分析。该方法通过试验确定的疲劳细节的应力-循环次数关系及相应的疲劳强度,通过回归分析建立 $S-N$ 曲线。对于应力和疲劳寿命的关系通常可由式(1)表示:

$$\log N = b - m \cdot \log S \quad (1)$$

式中: N 为总的循环次数; S 为应力幅值; b 、 m 分别为双对数坐标 $S-N$ 曲线的截距和斜率,与材料特性有关。

② 评估流程。疲劳寿命验算流程如图6所示。



图6 疲劳寿命验算流程

(2) 桥梁动力特性专项评估关键技术

传统的结构动力特性识别是基于已知桥梁结构系统的输出(传感器采集响应)与输入(指定确定性人工激励)来求得频响函数(频域)或脉冲响应函数(时域),从而实现系统的动力特性参数识别。大型结构难以实现有效激励,一般只能得到环境激励下的响应信号,采用人工激励几乎难以实现,或者成本过高。环境激励下模态参数的识别方法包括频域法、时域法及时频域法等。主要方法包括:峰值法(PP)、频域分解法(FDD)、随机减量法(RD)、NExT法、ITD法、随机子空间法(SSI)等。结构振动输出(加速度响应)由布置在桥梁主梁、塔、墩等各处的加速度传感器测得。

通过已有方法的分析,考虑到工程的实用性,综合比较,对石首长江公路大桥结构模态参数识别采用峰值法和随机子空间方法相结合,首先通过峰值法进行模态参数的初步判定和识别,然后采用随机子空间方法进行校验和精确分析,并与成桥荷载试验相比较,确保模态参数识别的可靠、精确。

动力特性参数识别内容包括:① 固有模态及相应

频率的识别;② 振型的识别;③ 阻尼估计。

4 结论

该文较系统和全面地研究了石首大桥结构健康监测系统的设计方法,为特大桥结构监测系统设计和实施提供了可以借鉴和参考的研究成果,得到的主要结论有:

(1) 系统阐述了石首长江大桥结构监测系统的设计,包含总体设计、各子系统设计以及各功能模块的具体实现。

(2) 详细介绍了传感器子系统的监测项目、全桥传感器测点总体布置。总体布置方案中,拉索索力的监测,采取了与以往监测系统不同的方法,即采用两种传感器(锚索计、单向加速度计)进行测点优化布置,充分利用了两种设备的优势。

(3) 电子化巡检子系统提出了标准化知识库与病害库的概念。与其他国内外监测系统相比,石首大桥监测系统整合了电子化人工巡检系统,进行了标准化知识库、病害库的建立,并基于此开发了移动端巡检APP,便于将监测与检测数据无缝融合,是该系统的创新性成果。

(4) 结构预警与安全评估子系统详细介绍了预警参数的选取、结构安全专项评估的主要内容,并对钢箱梁疲劳分析及桥梁动力特性两项评估内容的关键技术进行了详细说明。结合现有评估方法与该监测系统的特点,提出了适合于石首长江大桥的评估方法和指标。

参考文献:

- [1] 李惠,欧进萍.斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I):系统设计[J].土木工程学报,2006(4).
- [2] 冯良平,李娜,张革军,等.中国长大跨桥梁结构安全监测系统研发现状及趋势[J].公路,2009(5).
- [3] 于兴泉,彭大鹏,金耀.杭州湾跨海大桥结构健康与安全监测系统研究[J].公路,2015(6).
- [4] JTG/T H21-2011 公路桥梁技术状况评定标准[S].
- [5] JTG H11-2004 公路桥涵养护规范[S].
- [6] 高翔宇.芜湖长江公路二桥健康监测系统设计及预警阈值研究[D].合肥工业大学硕士学位论文,2016.
- [7] JT/T 1037-2016 公路桥梁结构安全监测系统技术规范[S].
- [8] 吴向男.环境激励下桥梁结构模态分析与损伤识别研究[D].长安大学博士学位论文,2013.