

舟山连岛工程西堍门金塘大桥 运营监测系统预警评估体系研究

郑春¹, 吴重男¹, 张新越¹, 沈旺², 梁柱¹, 马骏¹

(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)

[摘要] 随着大跨径桥梁运营监测系统的不断发展, 有效地利用监测数据对大桥的运营状态进行预警和评估分析, 已成为世界各国桥梁工程界研究的热点问题之一。在已有研究成果的基础上, 依托舟山连岛工程西堍门金塘大桥运营期监测系统, 构建了全面的结构预警和评估体系, 将前沿理论与实际需求相结合, 力求为养护管理决策提供科学依据。

[关键词] 大跨桥梁; 评估体系; 结构预警

[中图分类号] U442 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)07-0084-06

1 前言

自从 20 世纪 50 年代以来, 人们就意识到桥梁运营监测的重要性, 近年来随着大跨桥梁设计的轻量化以及形式与功能的日趋复杂化, 这项技术更成为国内外学术界、工程界的研究热点。我国近年来也在大跨径桥梁监测系统的研究上不断前进, 随着监测系统的成熟化和完善, 利用系统采集得到的数据进行分析, 对大桥的运营状态进行预警和评估, 并规范化, 成为监测系统的核心任务。大型桥梁运营监测不只是传统的桥梁检测加结构评估新技术, 而是被赋予了结构监控与评估、设计验证和研究与发展三方面的意义^[1]。

人们在桥梁的安全评估方面已经进行了大量的研究, 虽然出现了很多的评估方法, 但是目前对于桥梁评估却没有综合性的评估指标。因此无法直接有效地应用于大型桥梁的运营状况评估。美国 AASHTO LRFR 在 LRFD(2000) 制定了比较详细的评估方法及流程, 而我国在此方面相对落后。有鉴于此, 开展桥梁结构评估方法的理论研究和实践, 提

高我国桥梁结构的评估水平, 使桥梁监测系统真正发挥实用性具有重要意义。文章以实施完成的舟山连岛工程西堍门金塘大桥结构运营监测综合管理系统为基础, 构建了新的结构预警评估体系。

2 工程背景

舟山大陆连岛工程二期工程包括西堍门大桥和金塘大桥两座跨海大桥及其相应连接线。

西堍门大桥全长 5.452 km, 主桥为主跨 1 650 m 的两跨连续钢箱梁悬索桥, 在同类桥型中居世界第一, 全长 2.588 km。主梁采用分离式双箱断面钢箱梁, 全宽 36 m, 梁高 3.5 m, 两箱间通过箱型横梁和工字梁连接, 钢箱梁连续长度 2 228 m, 为目前世界上钢箱梁连续长度之最。

金塘大桥项目由金塘大桥(主通航孔桥、东通航孔桥、西通航孔桥、非通航孔桥以及金塘侧引桥、浅水区引桥、镇海侧引桥)和金塘岛接线组成, 全长 26.54 km。

金塘大桥主通航孔桥为五跨连续半漂浮体系钢箱梁斜拉桥, 跨径布置为(77 + 218 + 620 + 218 +

[收稿日期] 2010-04-25

[基金项目] 国家科技支撑计划(2008BAG07B05)

[作者简介] 郑春(1973-), 女, 四川内江县人, 高级工程师, 主要研究领域为桥梁结构安全监测系统, 桥梁设计;

E-mail: zhengchun-ggy@163.com

77)m;东通航孔桥为三跨连续刚构桥(122+216+122)m;西通航孔桥为三跨连续梁桥(87+156+87)m,基础均采用钻孔灌注桩,承台、墩身现浇混凝土。

为保证大桥运营期间的安全,随时掌握桥梁结构的内力状态及损伤情况,在桥梁结构危险萌芽阶段发出预警以及指导规范桥梁全寿命期的养护行为,建立了舟山连岛工程西堍门金塘大桥结构监测系统。

系统主要包括基于自动化传感测试和信号分析的远程控制系统与电子化的结构日常人工巡检养护管理系统,以及基于两者之上的结构预警评估系统。自动化监测系统的范围是监控西堍门主桥、金塘斜

拉桥和东、西航道桥上部结构状态的变化,由此重点推测掌控桥梁的结构内力状态的改变;电子化人工巡检子系统主要针对舟山大陆连岛工程西堍门全桥(5.452 km)、金塘全桥(26.54 km)养管人员可以到达的结构部位,编制巡检养护手册,检查和记录结构构件的表面损伤,制定运营期的构件检测计划。

西堍门大桥的监测项包括:风速风向、地震动、结构温湿度、大缆变形、大缆力、索塔变形、主梁位移、结构动力特性、结构应变。系统监测布点见图1。金塘大桥的监测项包括:风速风向、地震动、结构温湿度、斜拉索索力、支座反力、索塔变形、主梁位移、主梁挠度、结构动力特性、结构应变。系统监测布点见图2。

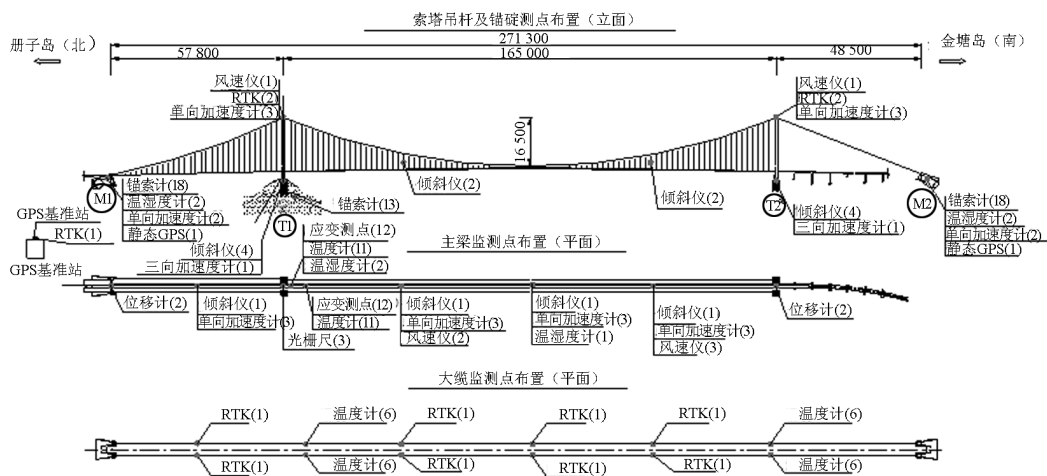


图1 舟山西堍门大桥运营监测系统布点图(单位:cm)

Fig.1 Xihoumen Bridge monitoring system monitor points (unit:cm)

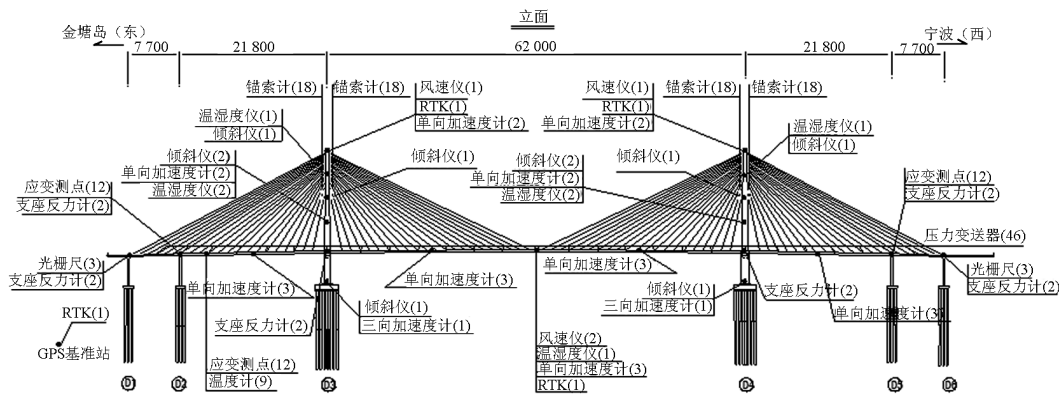


图2 舟山西堍门大桥运营监测系统布点图(单位:cm)

Fig.2 Jintang Bridge monitoring system monitor points (unit:cm)

3 预警评估体系架构

系统预警评估体系的框架,融合了大桥在线监测、人工巡检、荷载试验等三方面的数据,将预警评估系统分为预警及评估两大部分。其中预警模块又分为在线预警、离线预警两类,离线预警又包含结构状态预警和趋势预警,该模块主要采用监测数据来

进行分析。评估模块主要是结合利用监测、人工巡检、试验等三方面数据,对结构的安全性、适用性、耐久性给出定期的评价。系统框架见图3。结构运营状况评估系统将产生月度评估报告、临时(突发)事件评估报告、正常状态评估报告(季度报告),以便对大桥的结构状态给出定性或定量的评判^[2]。

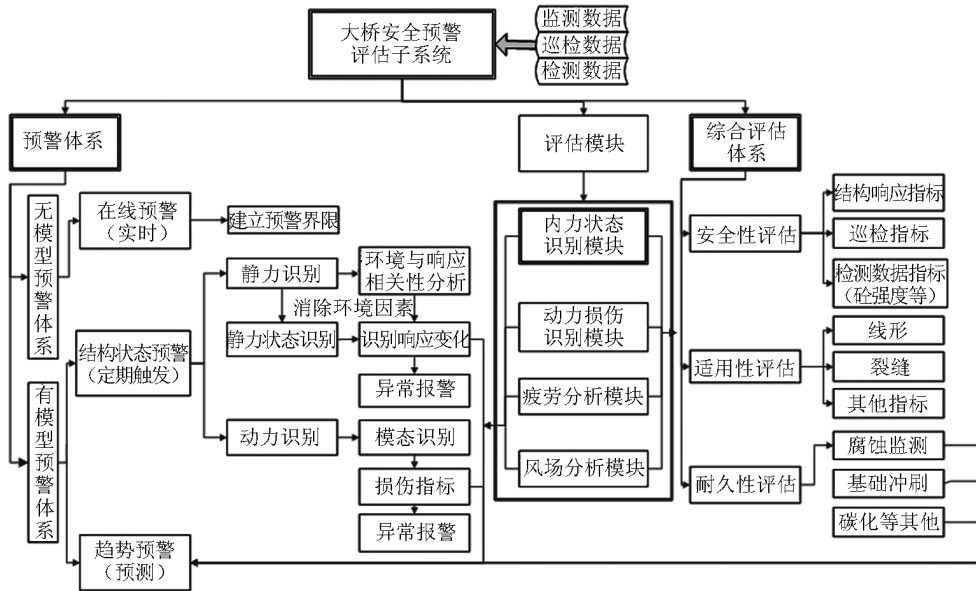


图3 评估系统的框架图

Fig. 3 Evaluation system framework map

3.1 预警系统

3.1.1 在线预警

在线预警值的确定主要通过有限元模型的计算获得主要力学指标在各监测点的预警值,预警是在线实时进行的。预警分为两级预警:黄色预警和红色预警。在台风、地震、船只撞击等特殊情况下,监测系统将根据监测到的环境荷载源数据和结构响应数据比对预设预警限值,并发出安全性预警。

3.1.2 离线预警

1) 结构状态预警。结构状态预警主要是通过通过对监测数据进行深度分析获得结构状态的变化信息,包括静力识别预警和动力识别预警,两者均可通过定期分析或特殊事件触发(如船撞、地震)。

静力指纹比对首先需形成桥梁竣工至通车运营期间无车恒载状态下(或前1~2年)结构响应与环境变量(主要是风和温度)的相关函数关系。动力指纹比对是通过加速度传感器获得的时程数据进行模态分析获得结构模态(频率、振型、阻尼比),然后

对比当前动力指纹(频率、基于振型的曲率模态、模态柔度等指纹)与成桥动力指纹,判断结构动力特性是否发生异常,给出异常预警。

2) 趋势预警。趋势预警主要是考虑结构的累积性损伤随时间的发展,并对之进行预测。预测的内容包括静力指标(主要是缆力或索力及变形)、频率、腐蚀、疲劳寿命进行趋势分析及预测。预测的方法采用回归分析及时间序列分析。

3.2 评估模块

评估模块由内力状态识别模块、动力损伤识别模块、钢结构疲劳分析模块与风致振动分析模块构成,从而实现利用监测系统实测数据对结构安全性、适用性、耐久性三方面的评估。其中有以内力状态识别模块、动力损伤识别模块最为核心,文章重点介绍这两部分。

3.2.1 内力状态识别

评估系统内力状态识别以金塘大桥为例,给出分析过程。斜拉桥状态识别时将主梁及索塔的空间

位置状态、索塔基础变位、部分斜拉索索力、活载参数、环境参数等监测数据作为已知数据。基于上述思路,斜拉桥内力状态识别的基本方法可以概况为:
a. 以主桥通车前时的恒载状态作为识别的初始状态“零”状态;b. 将斜拉索索力作为求解参数(将实测索力+误差作为搜索空间);c. 将主梁及索塔空间位置作为输入数据;d. 活载通过车轴车速仪来获取;e. 对输入参数进行活载、环境参数的滤波及预处理;f. 利用预处理后的输入参数在求解空间内进行结构逆分析;g. 求解的结果是“零”状态后的索力变化及内力状态变化。

图4所示为主梁挠度及斜拉索索力的传感器实测值与识别结果的比较,识别结果包括索、梁、塔的内力,位移等全部响应。

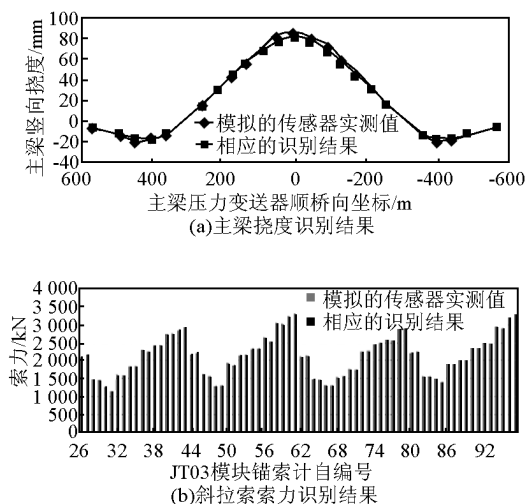


图4 内力状态识别结果

Fig. 4 Internal force state identify results

3.2.2 动力损伤识别

评估系统动力损失识别以西墩门大桥为例,给出分析过程。西墩门大桥有限元模型采用三维梁、杆体系,加劲梁为“鱼骨梁”结构。

基于恒载非线性静力分析得到的刚度和质量矩阵,不考虑阻尼,进行预应力下的模态分析,计算出的前6阶自振频率和振型描述见表1,自振振型见图5。

表1 西墩门大桥动力特性分析前6阶模态及其描述

Table 1 Xihoumen Bridge first six - order vibration modes

阶次	自振频率 f / Hz	振型描述
1	0.046 696	横桥向主梁侧移模态第1阶
2	0.084 463	主梁竖向位移模态第1阶

阶次	自振频率 f / Hz	振型描述
3	0.101 93	横桥向主梁侧移模态第2阶
4	0.103 62	主梁竖向位移模态第2阶
5	0.122 31	主梁竖向位移模态第3阶
6	0.138 06	主梁竖向位移模态第4阶

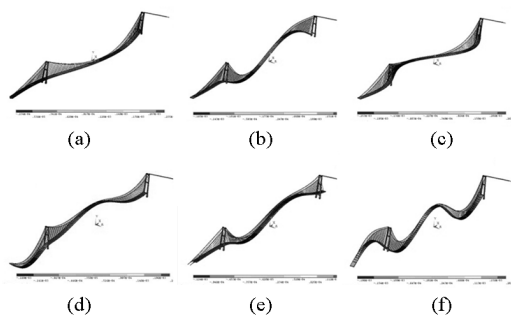


图5 西墩门大桥前六阶自振振型

Fig. 5 Xihoumen Bridge first six - order vibration modes

文章模拟主梁结构的刚度损伤,采取按比例同时折减其轴向、扭转和双向抗弯刚度的方法。该桥主梁共划分为121个单元,分别编号为1~121,假设的损伤情况为西墩门大桥主梁多位置损伤情况1,其损伤单元和损伤程度见表2。

表2 西墩门大桥主梁多位置损伤情况的损伤单元损伤程度

Table 2 Xihoumen Bridge main girder damage location and degree

损伤单元	15	53	54	58	65	76	99
损伤程度/%	30	30	10	30	10	30	10

西墩门主梁多位置损伤情况前后的模态振型计算出的模态应变能变化见图6和图7。

单元模态应变能对刚度损伤非常敏感,且每阶模态的应变能变化都可以精确定位损伤单元。因此西墩门大桥损伤识别方案如图8所示。

3.3 综合评估系统及评估报告

综合评估内容包括安全性评估、适用性评估、耐久性评估。安全性评估:主要针对桥梁各主要构件的承载能力、构件应力、构件刚度、结构性损伤等进行评估。耐久性评估:主要针对桥梁各主要构件的耐久性损伤(如混凝土裂缝及腐蚀、混凝土保护层损伤及碳化深度、氯离子含量、钢构件的锈蚀、构件的疲劳损伤等)进行评估。适用性评估:主要针对桥梁的功能性损伤(如主梁线形、桥面铺装层以及

附属设施损坏等)进行评估。

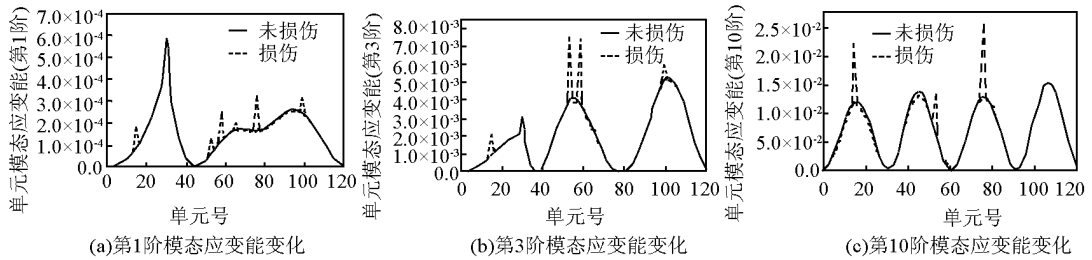


图6 西堍门大桥多位置损伤情况下主梁侧(横)向模式应变能变化
Fig.6 Mode strain energy change of Xihoumen Bridge main girder

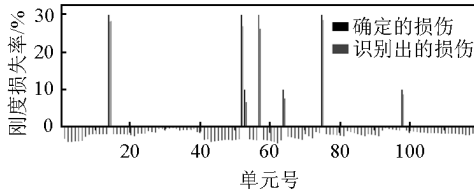


图7 西堍门大桥多位置损伤情况中
单元模式应变能损伤指标和
单元原损伤程度的比较
Fig.7 Damage identify results

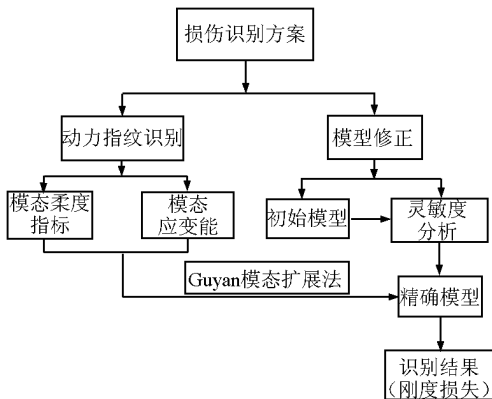


图8 西堍门大桥损伤识别流程图
Fig.8 Damage identify flat chart

系统将根据巡检报告和监测信息自动形成在线评估的初步结论,各分项评估结论尽可能实行等级划分,并且评估结论的等级划分直接与结构状态的安全和养护、维修决策对应。

正常情况下,离线评估每季度进行一次,亦即季度评估报告。离线评估报告的组成如下:a. 在线评估报告的内容总结、优化;b. 动力方面的损伤分析;c. 结构内力状态发展趋势分析;d. 疲劳寿命分析、耐久性分析;e. 各种监测(检查)项目的相关性分析;f. 大桥总体运营状态描述及养护维护意见。

4 结语

对既有桥梁结构的运营安全情况进行预警和评估,因其重要性和复杂性,已引起世界各国桥梁界的广泛关注。文章在已有研究成果的基础上,通过实际工程的经验,构建了新的预警评估体系,其中预警系统分别为在线预警、结构状态预警、趋势预警;评估系统主要针对结构的安全性、适用性、耐久性及其综合评估给出定期的评价。通过上述预警评估系统可有效解决大型运营监测系统采集数据量庞大,难以及时处理的问题。同时,也为桥梁养护管理部门提供了即时桥梁运营状态信息,做到评估式、预测式的桥梁养护管理。

参考文献

[1] 翁沙羚. 文晖大桥健康监测评估系统的研究与开发[D]. 杭州:浙江大学,2004
[2] 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

Study on new assessment system for safety health monitoring of Xihoumen and Jintang Bridges

Zheng Chun¹, Wu Chongnan¹, Zhang Xinyue¹,
Shen Wang², Liang Zhu¹, Ma Qin¹

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

[**Abstract**] With the development of health monitoring system for the long span bridge, how to use the data effectively to give proper assessment is of vital importance in the field of the world bridge engineering. Based on the investigation of present assessment methods, through the experiences of practice engineering—Zhoushan Island Xihoumen and Jintang Bridges' health monitoring system, the authors designed a new assessment system, making comprehensive assessment of long span bridges, combining cutting-edge theory and practice, and striving to provide a scientific basis for maintenance and management.

[**Key words**] long span bridge; structural assessment system; structure pre-warning system

(上接 63 页)

Structural risk analysis of trans-oceanic suspension bridges

Zhang Qiang¹, Ma Jinghai²

(1. Shanghai Sisuo Project Management Co., Ltd., Shanghai 201114, China; 2. Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link Project, Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

[**Abstract**] The paper states the methodology of SRA (structural risk analysis) of Bridges. In terms of the objects of SRA, the contents and approaches of sea crossing suspension bridge SRA are defined. The risks to be controlled necessarily are concluded by the global risk analysis, and how to achieve the control is worked out by the element risk analysis. Meanwhile, the risks of the external special events and special maintenance are included in the SRA to make sure that all risks are analyzed and controlled and none of risks in the bridge life-cycle is ignored.

[**Key words**] suspension bridge; structural risk analysis; bridge management