

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.06.051

# 跨铁路斜拉桥健康监测与安全评估系统的建立与应用

隋 胜

(石家庄市道桥设施管护中心,河北 石家庄 050000)

**摘要:**与普通公路桥梁养护检查相比,跨铁路桥梁评定的检查复杂度、难度更高,投入的养护资金也更多。依托某跨铁路斜拉桥工程,采用无线传感技术便捷部署桥梁健康监测系统,实现快速、低成本的桥梁状态评估,为桥梁养护维修提供客观依据,从而有效降低跨铁路桥梁定检频次,实现更精准的检测资金分配。

**关键词:**健康监测;无线传感;跨铁路斜拉桥;安全评估

**中图分类号:** U446

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2021)06-0195-04

## 0 引言

随着我国基础设施建设的飞速发展,桥梁在城市运行和交通运输中发挥着至关重要的作用,尤其是跨铁路高架桥在建设和使用过程中的安全性、耐久性和适用性等问题逐渐成为大众关注的焦点。

跨铁路桥梁受铁路运行的限制,在检测时面临巨大挑战。比如:仅在铁路运行空窗期进行检测,铁路上方不允许出现异物,要确保铁路限界等,这些因素使得每次跨铁路高架桥梁检测时都需要投入大量的人力、物力与时间。如果在检测间隔周期内发生意外情况(如强风、地震),检测人员无法及时对桥梁结构安全进行判断,就无法提前预警、规避风险。一旦发生意外,不仅仅是对公路运输,对铁路运输也会造成巨大影响。建立跨铁路桥梁监测系统可弥补人工检测时效性可与靠性上的不足,实现跨铁路桥梁实时监测预警,积累桥梁状态大数据,通过监测评估结果有效指导养护检查人员定向检查,提升检查效率,降低检查频次。

考虑跨铁路桥梁监测系统建设施工与后期运维的便捷性与适用性,本文采用无线传感物联网技术,即通过传感设备无线部署、传感节点与网关自组网络传输实现桥梁状态实时监测预警。

目前,国内相关标准已经建立了桥梁状态评定方法和指标体系。例如《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)对公路桥梁状态评定进行了指导,《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—2017)

中也详细定义了城市桥梁状况指数BCI,将桥梁状况分为五个等级,并提供了桥梁技术状况评价的具体指标和方法<sup>[1]</sup>。这些现有规范标准针对桥梁结构状态评定的方法侧重桥梁结构具体构部件的评价。在实际中,相关管理部门和养护决策人员不仅要了解局部的构部件状态,更要对桥梁的整体状况有所把握。因此,实现桥梁结构综合状态评定是十分必要的。

本文依托某跨铁路斜拉桥工程,基于无线传感监测系统,即用桥梁检测、健康监测中获得的数据,将定性评价与定量评价相结合,对桥梁整体结构状态进行评价<sup>[2]</sup>。

## 1 工程概况

某跨越京广铁路和铁路编组场部分高架桥采用双塔双索面的PC斜拉桥式。该桥跨度为(55+125+55)m,采用塔墩固结、主梁连续全漂浮体系,主梁采用双主肋断面,梁高1.7m,肋宽2m,桥面宽28.9m,梁上索距6.3m,全桥斜拉索72根。全桥按城市主干路标准设计,双向6车道,设计车速80km/h,车辆荷载等级为城-A级。斜拉桥主塔高52.24m,主梁采用挂篮悬浇,主梁底距铁路限界最小距离为3.45m。下为27.5kV高压接触网,防电要求高。桥梁实景图见图1。



图1 桥梁实景

收稿日期:2021-03-28

作者简介:隋胜(1974—),男,学士,高级工程师,从事道路桥梁建设与维护工作。

## 2 监测方案设计

### 2.1 常见病害及特点

某斜拉桥(见图2)是跨越京广铁路的重要工程节点,共跨越包括京广铁路上下行线在内的18股道电气化铁路,在外部列车荷载、风、温度等因素的共同作用下,其结构性能将逐步退化。如何对桥梁进行高效、高质管养以保证高速铁路桥梁的安全运营对管理单位提出了较高要求。同时,由于跨铁路桥梁的特殊性,日常养护人员无法对桥梁跨铁路段进行检测,需要建立一套健康监测系统实时监测桥梁状态,实现跨铁路桥梁实时监测预警。加之京广线运营繁忙,对施工安全要求非常高,设备安装作业要在铁路预约的时间内进行并完成,给施工和监控提出了制约条件。因此,如何结合桥梁结构、高铁运行零影响与零危害方案进行设计和施工工艺显得尤为重要。

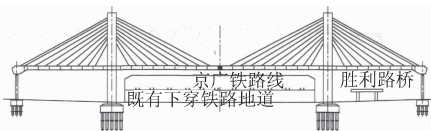


图2 桥梁结构示意图

该桥中跨施工采用前支点挂篮悬臂浇筑,边跨采用支架现浇。为了平衡中跨挂篮重量,采取边跨主梁提前浇筑一个混凝土节段作为平衡压重。该悬浮体系斜拉桥的塔柱和桥墩相固结而塔柱和主梁分离,主梁梁体由斜拉索悬吊而起,梁端支承可看作具有多跨弹性支承的单跨梁,其主梁在塔柱位置无负弯矩峰值,所以该区域主梁受力较均匀,考虑到它的传力途径是梁-索-塔,具有以下特点:(1)梁端和塔顶的水平位移大;(2)释放了温度引起的水平力;(3)纵向静风力和汽车制动产生的塔底弯矩很大。

该斜拉桥主梁宽跨比大,斜拉索为空间索面,边跨不设辅助墩也是该桥特点之一。整座桥梁由塔、梁、索三大部分组成复杂的空间结构体系。结合斜拉索、钢筋混凝土索塔和本桥特点,可能的主要病害有:拉索回缩,拉索钢丝滑丝导致拉索索力退化;拉索主梁振动;拉索锚固处局部裂缝和塔根处的裂缝;跨中下挠导致底板混凝土开裂。基于桥梁结构形式、工作环境、易发事故分析及其重要程度,参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》(GB 50982—2014)。

综合考虑以上因素,从荷载和环境、结构整体和局部响应方面开展结构检测安排评估系统的搭建,主要对环境温湿度、风速风向、主梁振动、挠度、主塔倾斜、支座位移、索力等进行多项监测。

### 2.2 跨铁路桥的有限元分析

为了更准确地确定大桥最不利位置、确定系统运行时的预警限值,本方案采用Midas Civil有限元模型对桥梁进行受力分析。根据模型选取桥梁的边跨跨中、主跨跨中与四分之点、桥梁两端进行监测。全桥有限元模型共211个节点,194个单元。其中,主梁74个单元,索塔48个单元,斜拉索72个单元。主梁和索塔为梁单元,斜拉索为桁架单元,横梁和桥面铺装等以荷载形式来模拟。边界条件模拟为:与设计图纸一致,一侧为单向(横向)活动支座,一侧为双向活动支座。桥塔与主梁均采用C50混凝土,斜拉索标准强度1670 MPa,车道按双向6车道加载。桥梁有限元分析见图3~图5。

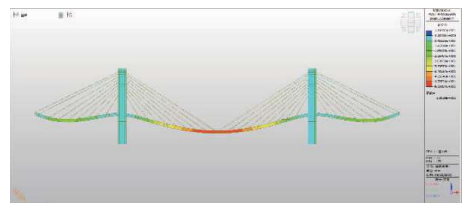


图3 恒载加活载作用下线型变化

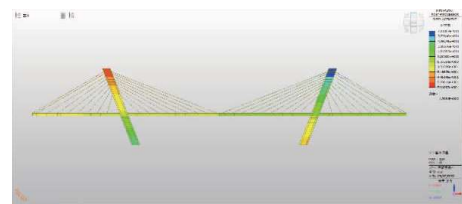


图4 升温作用下纵向变形

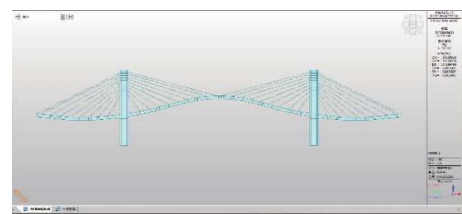


图5 1阶振动模式

根据有限元模型可得:在恒载与活载的作用下,主跨跨中、四分之点与边跨跨中竖向位移较大。其中,主跨跨中挠度最大。因此,在主跨跨中与四分之点、边跨跨中位置布置挠度测点;受温度影响,主梁梁端与桥塔塔顶变形较大,选取主梁梁端进行纵向位移监测,桥塔塔顶进行倾斜监测。

### 2.3 监测方案制定

通过对大桥的受力分析,参考《建筑与桥梁结构监测技术规范》(GB 50982—2014)、检测报告与现场踏勘资料,并结合项目实施目标与监测需要,根据桥梁特点制定以下监测指标:

(1)风荷载对桥梁影响较大,监测桥塔塔顶与桥

面的风速风向,建立风荷载与结构变形的关系,辅助结构内力分析。同时在斜拉索上布置索力测点,监测索在风、车辆等荷载作用下的工作状态。

(2)桥梁结构空间位置变化与结构是一个统一体,以桥梁建成通车时其各主要构件的空间位置为初状态。通过运营期监测数据与初状态的对比,可分析计算出结构内力的变化趋势。在主梁跨中与四分点这些不利位置布置静力水准计,监测主梁线型变化;在桥塔塔顶布置倾角计,监测桥塔的位移。

(3)桥梁自振频率的降低、桥梁局部振型的改变可能预示着结构的刚度降低和局部破坏,或约束条件的改变。在边跨跨中、主跨跨中与四分点布置振动计,通过监测结构振动,从整体上把控桥梁的安全使用状态,实现结构的损伤评估。

### 3 监测系统设计

#### 3.1 无线传输架构

监测系统架构主要分为三层<sup>[3]</sup>:

(1)多种类型无线传感节点构成的监测网络

针对大型桥梁,采用振动计、倾角计、位移计、振弦式应变计、索力计等组成监测网络。

(2)数据传输网络

可以通过有线或无线的方式灵活组建网络,将现场采集到的数据通过4G无线网关或者以太网网关由互联网传输回监测云平台。

(3)监测云平台系统

负责对采集的数据存储监测数据,并提供数据统计、分析、绘图、报表汇总和自动预警等服务,可通过计算机浏览器与移动端App访问使用。

桥梁监测系统方案框架见图6。

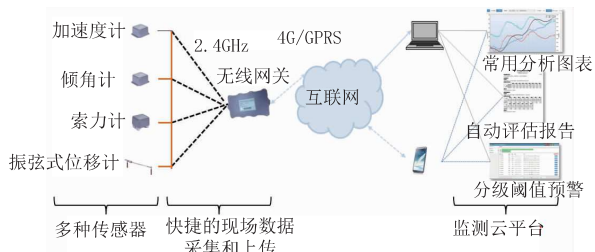


图6 桥梁监测系统方案框架

#### 3.2 监测子系统

本桥监测系统采用先进的无线传感技术是物联网结构安全监测的底层技术基础,是结构监测软件系统的数据源。它使基础设施结构具备自我感知能力,将自身的状态信息收集起来,供整个物联网系统进行进一步处理。

无线传感网由大量节点通过自组织方式组成,包含智能传感器节点与智能通信网节点。其中,智能传感器节点是无线传感网的物质基础,智能网关节点是无线传感网的核心。这些节点同时扮演数据的产生者和中继者,所有的智能传感器节点数据都将汇集到智能网关,并通过网关进行协议转换,最终以单跳或多跳的方式将各传感器节点数据汇聚到基站,再通过以太网或者3G/4G蜂窝网络将数据传输到云服务平台进行数据展示、分析与预警评估。这种技术方案的设计部署便捷,施工周期短,可克服跨铁路桥梁监测施工难度大、制约条件多等不利条件,能够最大程度上适应跨铁路桥梁复杂的基础设施条件和地理环境。

本方案利用无线传感器网络技术,实现桥梁结构数据的采集和传输。图7、图8为部分无线传感器安装示意图。



图7 传感器设备安装示意图

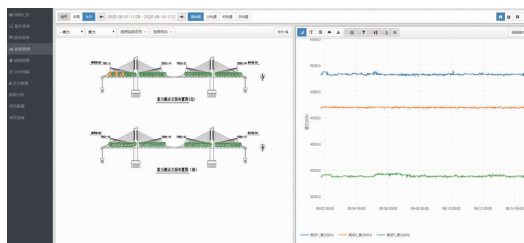


图8 平台展示实时监测数据

#### 3.3 软件子系统

健康监测云平台能够为桥梁提供结构健康安全监测云服务。它的核心任务是存储、处理和分析来自无线传感网的数据(见图9)。根据分析结果,提供桥梁的健康安全评估结果,并对桥梁异常状态和突发事件进行报警。最终的目的是为管养单位提供桥梁养护、维修工作等方面的科学依据,通过科学的管养

延长桥梁寿命、减少桥梁重大事故带来的人员财产损失。

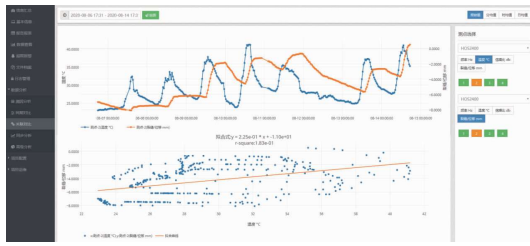


图9 平台数据分析功能

#### 4 桥梁异常状态识别

建立桥梁健康监测系统的一个重要目的是能够有效地对桥梁异常状态进行识别,用于评估运营中桥梁的健康状况,从而为管养人员提供可靠的管理、养护建议。一般情况下,桥梁的异常状态是长期积累演变所产生的。在此期间,桥梁结构监测系统采集到的数据量是非常惊人的。为了及时、有效地对监测数据进行分析,从而识别桥梁的异常状态,提升桥梁监测系统的服务质量,需要构建一种能够满足基于实时监控数据进行桥梁异常状态识别的方法。

而人工神经网络能够有效地利用知识集进行学习,进而对输入特征进行模式识别,因此可以利用人工神经网络构建桥梁异常状态识别系统<sup>[4]</sup>。另外,由于监测桥梁结构异常状态时,从监控系统的日志中获取的相关异常事件可能高达数千条,直接使用原始记录作为特征指标,不利于构建高效、准确的人工神经网络。使用主成分分析方法对原始高维特征数据进行预处理,将结构异常特征变量的主成分作为人工神经网络的输入特征,有效地降低了神经网络的结构复杂度,同时提高了人工神经网络的训练速度,也保证了人工神经网络具有良好的收敛性和稳定性。

通过对大桥进行有限元分析,模拟各种结构异常状态下各传感器布置方案采集到的计算数据,并使用3个月连续监测数据对模拟进行校正,根据累计方差贡献率计算截取得到的前20个主成分特征值。计算表明,使用主成分分析方法可有效地从数百个传感器指标中提取出包含大部分信息的主成分特

表1 桥梁主要异常状态的各项指标评估现状

评估指标	评定结果
全桥整体健康评估	等级1(无明显变动)
梁体预应力损失风险级别健康评估	等级1(无明显变动。其中,风险等级1占比95%,风险等级2占比5%,其他风险等级均为0%)
荷载风险级别健康评估	等级1(无明显变动。其中,风险等级1占比100%,其他风险等级均为0%)
梁体下挠风险级别健康评估	等级1(无明显变动。其中,风险等级1占比100%,其他风险等级均为0%)
梁体开裂风险级别健康评估	等级1(无明显变动。其中,风险等级1占比88%,风险等级2占比6%,风险等级3占比6%,风险等级4占比0%)

征指标。

针对监测选取的主要桥梁异常状态,对该桥的实时监测数据进行全桥的健康评估。由表1可知,该桥目前运行状况整体良好,无实际结构异常状况发生。

#### 5 结语

综上所述,建立大型桥梁结构监测安全评估系统对桥梁的安全运营与维护至关重要。通过部署无线传感器,可以实时获取桥梁运营过程中的环境荷载、桥梁特征和桥梁响应等结构的相关监测数据,对监测数据进行科学、有效的分析能确保监测成果真实、合理、有效。结合巡检子系统检测数据,识别桥梁结构损伤的可能性,使用人工神经网络与已有的专家知识样本,使得对桥梁异常状态的识别更加智能化与自动化。基于无线传感网的监测技术为降低运营维护成本提供科学技术依据,保证结构检查维修策略的制订具有针对性、及时性和高效性。

#### 参考文献:

- [1] 邓勇.某预应力连续梁桥施工监测[J].大连交通大学学报,2014,35(3):115-117.
- [2] 李学会,韦宏.桥梁变形监测方法浅析[J].市政技术,2014,5:138-140.
- [3] 吕峰.桥梁健康监测及发展趋势浅析[J].公路交通科技(应用技术版),2014(4):17-18.
- [4] 柏平,马志华,姜世英,等.基于神经网络的桥梁异常状态识别方法[J].上海公路,2015(3):36-50.