

桥梁健康监测系统的设计与实践

■ 林晓艳

(三明市交发集团永达工程检测有限公司, 三明 365000)

摘 要 以永安火电厂大桥为工程背景,全面阐述了该桥健康监测系统中各子模块的设计和应用,对比了桥梁实时远程健康监测与传统常规监控监测的优、缺点。实践表明,采用远程健康监测系统对该桥进行实时监测,有效提高了监控监测的质量,节省了人工成本,值得大力推广。

关键词 桥梁工程 健康监测 人工智能 云平台

1 引言

桥梁结构监测系统是集合了桥梁结构监测、系统辨识和结构评估的综合监测系统。通常采用各种先进传感器对桥梁在外界激励(包括车辆荷载、环境激振等)下的各种响应进行有效监测,在对监测获得的各种数据进行有效处理后,真实可靠地传输至监控中心,然后采用人工智能对传输的海量数据进行识别、智能判断,适时发送预警信息。

展望未来,桥梁结构监测系统将全面结合 5G 移动通信技术,5G 移动通信技术突出特点是高传输速率、低延迟。桥梁传感器采集海量数据实时传递至监控中心后,通过人工智能判断桥梁可能存在的风险,监控中心再通过远程摄像设备等进行甄别与修正,这就需要高传输速率、低延迟地传递信息,结合人工智能做出是否封桥的自动判别。由于桥梁破坏具有突然性,破坏前如何快速判断,及时预警,并减少灾难的损失。5G 技术将发挥巨大的作用。

桥梁结构监测系统将全面结合人工智能技术。以往工程师通过传感器采集数据并结合桥梁有限元模型对结构进行诊断,分析结构的损伤状况,并判断桥梁是否出现问题,往往需要相当长的时间,有时甚至需要几天。而人工智能通过大量的神经网络学习,可以快速做出判断,这就使桥梁破坏预警成为可能。

2 工程背景

永安火电厂大桥位于三明永安市,全长约 250 m,是永安火电厂交通主要干道,于 1981 年建成。主桥桥型为四跨双曲拱桥。桥宽为 0.2 m(栏杆)+1.8 m(人行道)+7.0 m(行车道)+1.8 m(人行道)+0.2 m(栏杆)=11 m;全桥设计荷载为汽-20 级。

由于将对永安市主干道桥梁进行维修加固,维修加固时间约为 1.5 年,永安火电厂大桥便成为永安火电厂及其周边通行车辆必经道路,大桥将承受比以前更大的交通量和交通荷载。故需对永安火电厂大桥进行健康监测,避免在此期间大桥发生结构破坏的事故。通过分析,考虑到车辆通行的陡增,需对永安火电厂大桥进行必要的限载,以保证桥梁通行的安全。

永安大桥设计荷载为汽-20 级荷载标准,验算荷载为挂-100。根据《福建省城市桥梁限载标准》(DB13/T2012)汽-20 级荷载限载为 30 t。根据桥梁实际运行的情况,对限载进一步细化规定如下。

(1)全桥通行车辆荷载小于 20 t,容许其按两车道同时通行。

(2)全桥每个车道容许同时有 4 辆 30 t,均布通行,每辆车前后间距不小于 50 m。由于桥梁有两个车道,因此容许 8 辆 30 t 车,每辆车前后间距不小于 50 m。

(3)桥梁没有其他车辆荷载情况下,容许 1 辆 100 t 的挂车从桥梁正中间匀速通过。

为了彻底贯彻限载措施,在永安火电厂大桥两头均设置车辆限行栏。一方面可以保证限载措施的全面贯彻,另一方面通过健康监测如发现桥梁存在倒塌危险可以实时有效地封桥,保证人民群众的生命和财产安全。

3 永安火电厂大桥桥梁健康监测系统的总体设计

永安火电厂大桥桥梁健康监测系统是由传感器系统、数据采集与传输系统、数据管理系统、桥梁分析与预警系统等主要功能模块组成^[1]。每个系统都有各自的特点,系统间还有互相兼容的问题。总体设计就是全面根据每个系统的特点处理好兼容性问题,形成共同工作。图 1

为监测系统总体设计图。

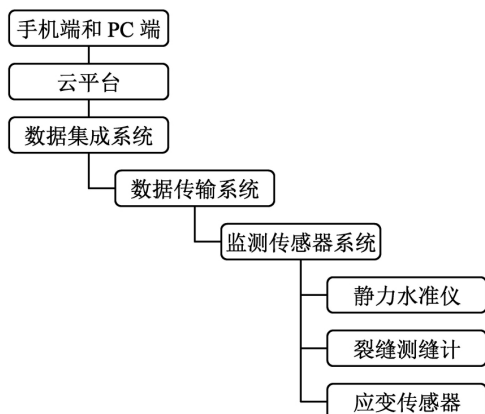


图 1 监测系统总体设计图

3.1 监测传感器的设计

传感器要求具备成熟性,根据监测要求,尽量选用技术成熟、性能稳定的传感器,应遵循以下原则:(1)可靠性原则,保证系统在桥梁服役环境下安全可靠运行;(2)耐久性原则,选用耐久性好和抗干扰强的传感器和传输线;(3)可维护、可扩展原则,传感器易于维护和更换;(4)实用原则,根据桥梁受力和变形特点,选用精度满足监测要求的传感器。

根据永安火电厂大桥监测的技术要求,主要监测内容如下:(1)主拱应变监测:采用应变传感器,对主拱关键截面(拱顶等部位)和病害严重点的应变进行监测。(2)裂缝宽度监测:采用测缝计,针对容易出现问题的腹拱裂缝进行监测,监测裂缝的宽度变化。(3)桥墩沉降监测:利用静力水准仪对部分桥墩的沉降进行监测。

传感器系统要保证采集的数据准确可靠,这是有效监测的关键所在。传感器系统与数据采集系统兼容是一个重要技术节点。如何保证两者兼容,笔者通过室内标定试验和室外测试,使得不同厂家生产的传感器系统和数据采集系统完美结合。图 2~4 为传感器现场安装照片。



图 2 主拱应变监测智能振弦式应变传感器



图 3 裂缝宽度监测传感器(裂缝计)

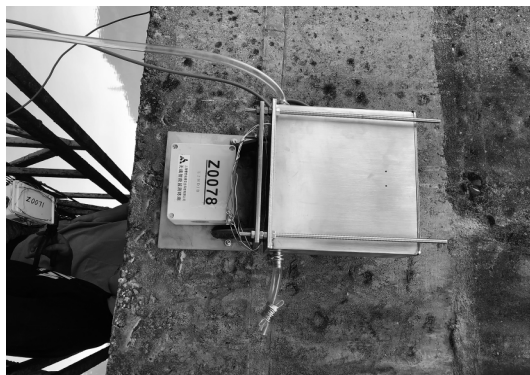


图 4 桥墩沉降监测传感器(静力水准仪)

3.2 数据传输系统设计

监测系统采用网络传输技术,采用远程监测的方式,使所有传感器采集的数据的管理与利用、现场的非实时数据分析等工作在远程的桥梁监控中心的计算机终端上进行;不必在桥梁现场设置控制室从而节省了资金,同时大大提高了桥梁监测工作的效率。

数据采集后实时传输,图 5 为数据采集与传输发射设备(点对点技术)。如何保证信号的稳定、数据包不丢失成为关键问题。由于 5G 移动通信技术还未普及,而本项目研究还是基于 4G 移动通信传输技术,因此永安火电厂大桥传输技术上准备了 2 套方案。方案一采用点对点传输,就是每个采集与传输发射设备均直接与 4G 网络



图 5 数据传输设备及发射天线

连接,单独传输数据。方案二采用中继方式,就是每个采集与传输发射设备统一把数据传输至中继设备上,由中继设备再把数据通过有线宽带等方式传输,该方案适用于4G网络较差的地方。经现场测试发现永安火电厂大桥4G网络信号较好,因此采用方案一。

3.3 数据集成系统设计与云平台系统设计

根据健康监测的要求,正常情况下,每个测点每1h采集1次数据。如果测点数据发生突变,监测系统会自动增加采集频次,可以做到每隔5min采集1次数据,进一步判断桥梁结构的安全。监测期为1年半,采集数据达到上百万级别。如何管理数据并进行分析成为本项目的一个重难点。

数据集成系统^[2]需要满足以下几个方面的要求:(1)能有组织地、动态地存储大量关联数据,并供多个用户访问,实现数据的充分共享、交叉访问,以及与应用程序的高度独立性,起到将现场采集网络与上层管理信息系统网络连接的作用;(2)快速存储动态变化的实时数据^[3],数据库中的所有实时数据都要随监测对象的状态变化而不断刷新,其作为整个监测系统的核心部分必须在线运行,并且使数据及分析结果能够实时显示;(3)实现各功能模块之间的数据传递、数据交换和数据共享;(4)中心数据库需要与Internet结合^[4],使远程用户可以通过浏览器对数据进行查询浏览。

数据集成系统采用云平台系统可以有效地达到此要求。图6~7为该系统的云数据平台测点列表和数据分析列表页面。系统可以实时收集数据并通过图表的形式展现数据、对比数据、设置监控报警阈值。当数据出现异常,通过短信的方式反馈给计算人员,真正做到了智能化。图8~9为传感器设备参数和超过设定阈值自动报警系统图。

ID	类别	电量预估	信号强度	采集间隔	数据量	状态
113	单路位移	-	—	1小时	-	使用中
112	单路位移	-	—	1小时	-	使用中
111	单路位移	-	—	1小时	-	使用中
78	微应变	-	—	1小时	-	使用中
73	微应变	-	—	1小时	-	使用中
72	微应变	-	—	1小时	-	使用中
71	微应变	-	—	1小时	-	使用中
66	微应变	-	—	1小时	-	使用中
64	微应变	-	—	1小时	-	使用中
63	微应变	-	—	1小时	-	使用中

图6 云数据平台测点列表

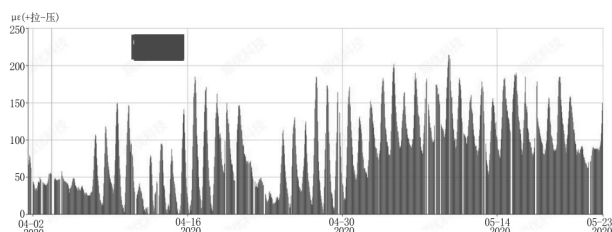


图7 数据分析列表

2. 振弦传感器参数

计算公式: $Pi=k(f_i^2-f_0^2)+C+b(T_i-T_0)$

基准频率 f_0 : 1025.77 Hz

基准温度 T_0 : 20.0000 °C

传感器系统 k 拉: 0.00357076 $\mu\epsilon/Hz^2$ (勿用科学记数法)

传感器系统 k 压: 0.00357076 $\mu\epsilon/Hz^2$ (勿用科学记数法)

自由状态输出 C : 0.000

温度补偿系数 b : 0.000

图8 传感器设备参数图

3. 警报设置

警报开关: ☒ 开启 ☐ 关闭

应力上限: 13.000 MPa (非相对值)

应力下限: -2.000 MPa (非相对值)

说明: 数据超出上下限、掉线、收到空数据均会发送警报短信

图9 超过设定阈值自动报警系统图

4 健康监测系统与常规监控监测的比较

健康监测系统与常规监控监测比较,有着极大的优势。

4.1 监测频次

实时健康监测能够做到:正常情况下所有监测点每1h同步采集1次数据,出现数据异常时所有监测点每隔5min同步发送1次监测数据。常规监控监测采用人工测量无法做到同步监测,监测频次至多1天1次,监测数据量上相差数万倍。

4.2 反馈分析

实时健康监测由于同步进行数据处理,即时报警;相比传统常规监控监测的数据须采集后进行日后分析,实时健康监测在效率和准确性方面大大提升。

4.3 成本分析

健康监测仪器安装调试完成后,人力作用主要表现在对平台及各种设备的维护上;而常规监控监测需要常驻现场,人工成本相当高。

4.4 数据的留存及桥梁健康状况识别

健康监测数据量以百万计,为后期定量判断桥梁健康状况及桥梁改造维修加固提供数据支撑。而传统常规监控监测由于测点数据不是实时同步,不能分析同一时间外部激励的效应,从而无法定量判断桥梁健康状况,只能根据经验定性判断,存在失真现象。

4.5 误差分析

由于全过程非人工参与,相比常规监控监测排除了人工参与带来的人为误差;且所有数据均实时存在云数据平台,不可更改。

此外,健康监测系统与常规监控监测比较,不足之处

在于健康监测系统采用的设备复杂，前期投入的成本较高；但从整个监测周期看，总成本与常规监测成本相持平。随着今后大规模的应用，成本将逐年下降。

5 结语

永安火电厂大桥由于交通环境的变化在 1 年半时间内承受比以往更大的交通量和交通荷载，为了保证桥梁的健康安全采用远程实时健康监测系统。该系统集成了传感器系统、数据采集与传输系统、数据管理系统、桥梁分析与预警系统等主要功能模块，相比传统的常规监测技术优势明显。经过 1 年半的监测实践，该系统数据采集反应灵敏，数据传输平稳，数据分析和预警功能正常，较

(上接第 93 页)

集、验证集、测试集。选择决策树个数为 50 生成随机森林模型。利用 bootstrap 重采样技术对样本进行迭代训练，得到用于圆钢管混凝土脱空缺陷识别的随机森林模型，训练过程运行时间为 0.09 s。

在测试阶段，将测试集代入随机森林模型进行预测，模型反馈时间为 0.01 s，准确率为 100%。

表 2 模型运行时间

步骤	运行时间/s
特征提取	21.07
训练模型	0.09
测试模型	0.01
合计	21.17

3 结论

本文提出了一种基于随机森林算法的结构损伤识别方法。以圆钢管混凝土脱空缺陷试验作为研究对象，采集表面加速度建立数据集，通过随机森林算法建立用于圆钢管混凝土脱空缺陷的识别模型，输入测试信号完成损伤识别，得到以下结论：

(1) 基于随机森林算法的结构损伤识别模型适配性较强，硬件要求低。模型完成及测试时间反馈时间较短，反馈时间分别为 21.97s 及 0.01s，能基本满足实时检测基本要求。

(2) 在实际测试中识别效率较高，准确率为 100%，具备一定的抗噪性能。

好地完成桥梁健康监测工作，并在今后的运营中继续发挥作用。

参考文献

[1]武智霞,韩鹏,郑树泉,等.桥梁健康监测及养护平台设计与实现[J].计算机应用与软件,2018(5):109-114.

[2]任普,丁幼亮,李亚东,等.基于大数据的桥梁健康监测数据存储及预警方法[J].科学技术与工程,2019(19):266-270.

[3]郑毛祥.高速铁路无线桥梁健康监测系统研究[J].铁道工程学报,2017(34):69-72.

[4]曹素功,黄立浦,张勇,等.桥梁健康监测数据的结构化存储与分析[J].岩石力学与工程学报,2019(39):102-108.

参考文献

[1]朱宏平,余璟,张俊兵.结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J].工程力学,2011,28(2):1-17.

[2]Zhongxian Li,Xiaoming Yang.Damage identification for beams using ANN based on statistical property of structural responses [J].Computers & Structures,2008(86):64-71.

[3]Chathurdara Sri NadithPathiragea, Jun Li, Ling Li, et al.Structural damage identification based on autoencoder neural networks and deep learning[J].Engineering Structures,2018(172):13-28.

[4]龙云鹏.基于机器学习的混凝土徐变模型研究[D].北京:北京交通大学,2019.

[5]GuoqingGui, Hong Pan,Zhibin Lin, et al.Data -Driven Support Vector Machine withOptimizationTechniques for Structural Health Monitoring and Damage Detection [J].Design Optimization and Applications in Civil Engineering, 2017,21(2):523-534.

[6]Breiman L.Random forests[J].Machine Learning,2001,45(1):5-32.

[7]Breiman L.Bagging Predictors[J].Machine Learning,1996,24(2):123-140.

[8]董伟广,钟建伟,张钦惠,等.基于数据挖掘技术和随机森林算法对变压器的故障诊断[J].电网运维,2020(3):54-56.

[9]李兵,韩睿,何怡刚,等.改进随机森林算法再轴承故障诊断钟的应用[J].中国电机工程学报,2020,40(4):1310-1319.

[10]唐华松,姚耀文.数据挖掘中决策树算法的探讨[J].计算机应用研究,2001(8):18-19,22.

[11]刘勇洪,牛铮,王长耀.基于 MODIS 数据的决策树分类方法研究与应用[J].遥感学报,2005,9(4):405-412.

[12]廖飞宇,王静峰.钢管混凝土的脱空问题——检测、设计和加固[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.