

## 基于物联网技术的桥梁监测系统

李政, 张圣, 张卢喻, 张杨

(重庆市城投路桥管理有限公司, 重庆 400015)

**摘要:** 万物互联是当今智能城市发展的趋势, 随着物联网技术的快速发展, 对获取城市重要基础设施的实时状态信息提供了良好的契机。针对传统人工桥梁监控方式存在的监测效率低、灵活性差、检测结果不严谨等问题, 提出了基于物联网 (Internet of things) 技术的桥梁监测系统。该系统通过多种类型传感器和视频节点实时采集桥梁动态数据, 而后通过无线多跳网络将感知数据汇聚传输至桥梁健康监测云平台进行处理和分析, 从而实现桥梁安全状况的实时监测、预警、分析与评估, 对实际桥梁安全工程有重大意义。

**关键词:** 物联网; 桥梁监测; 数据采集; 预警

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00070

## Bridge monitoring system based on Internet of things technology

LI Zheng, ZHANG Sheng, ZHANG Luyu, ZHANG Yang

Chongqing City Investment Road Bridge Management Co., Ltd., Chongqing 400015, China

**Abstract:** The Internet of everything is the trend of today's smart cities. With the rapid development of Internet of things technology, a good opportunity is provided to obtain real-time status information on important infrastructures. Aiming at the problem such as low monitoring efficiency, poor flexibility and rigorous testing results with traditional artificial bridge monitoring methods a bridge monitoring system based on the Internet of things technology was designed. A variety of sensors and cameras were used in the system to collect the data of bridge's dynamic status in real-time, and the wireless multi-hop network was used to transfer the perception data to the bridge health monitoring cloud platform for further processing and analysis. Real-time monitoring, early warning, analysis and assessment of bridge safety conditions could be realized by the system, and is very important to the bridge safety engineering.

**Key words:** Internet of things, bridge monitoring, data collection, early warning

### 1 引言

经济社会的快速发展, 使得大跨度的桥梁需求量日益增大, 大型桥梁通常会面临超负载、自然灾害和重大交通事故等威胁, 使其容易发生不同程度的损伤。目前, 桥梁养护管理通常为定期可见建筑面检查, 而桥梁内部结构的破坏和临界反应往往发生在人为不可接近的地方或隐蔽的地方, 因此, 对桥梁整体健康状况的监测显得尤为重要。随着物联网技术的不断成熟, 对桥梁的全面实时监控

成为研究的热点<sup>[1]</sup>。

目前, 国外在桥梁监测方面, 如北美、西欧、亚洲等国家通过多样的方式对桥梁进行监测和评估, 实时获取桥梁的温/湿度、桥面负载、应力变化, 并通过传感网络和数据融合等技术建立自动监控网络。以日本石海峡大桥为例<sup>[2]</sup>, 为了证实风力、地震、温度等外在因素影响所产生的变形特性, 在大桥上安装了地震仪、风速仪、GPS 应变计等传感器, 实现对该大桥的实时状况测量和安全评估。通过调查韩国桥梁监测系统的背景以及到目前为止

韩国桥梁监测系统的发展历史,文献[3]开发了新一代监测系统,韩国 Seohae 大桥和 Yeongjong 大桥安装了第三代的桥梁监测系统,针对桥梁结构的静、动态性能和桥梁环境荷载进行监测,其中,在 Seohae 大桥上部署了 120 个不同类型的传感器,而在 Yeongjong 大桥安装了多达 380 个传感器来获取大量的感知数据。在国内,将物联网技术运用到桥梁监测的项目已成为主流趋势。为了对江苏润扬长江大桥进行健康监测,李爱群<sup>[4]</sup>等在钢箱梁面板上安装了大量光纤应变和温度传感器,以监测桥梁主梁的应力变化。欧进萍等<sup>[5]</sup>在呼兰河大桥的健康监测项目中,为了检测桥梁施工过程中的受力情况,采用在第二跨预应力箱梁上布设光纤光栅传感器。但是现有的桥梁监控系统方案都没有真正应用物联网技术,大多数监测系统只是对传统变形监测进行技术改进,存在系统集成性不强、在传感数据获取和智能管理方面不够完善的问题。

重庆市作为中国桥梁之都,由于地理环境的原因,其交通非常依赖于桥梁,使得重庆主城拥有数十座特大型桥梁,因此对桥梁进行实时监控对交通安全具有重大意义。本文构建一套基于物联网技术的桥梁监测系统,通过采集不同数据参数、部署实时荷载、位移、应力应变、加速度等力学传感器、温/湿度等环境传感器及视频监控等构成监控网络,通过多种无线技术将传感器信息实时传输到桥梁健康监测云平台进行分析和处理,从而实现对城市

的桥梁安全状况进行实时监测预警、分析、评估以及对高危桥梁及时地发出危险警告,对桥梁健康与交通安全具有重大意义。

## 2 桥梁监控系统

### 2.1 方案设计

针对目前重庆市主要桥梁安全监测的应用需求,以物联网<sup>[6]</sup>技术为基础构建无线监测网络,在感知节点和汇聚节点上安装特殊的传感器,用于获取桥梁的状态信息。无线传感器网络(WSN)成本低、功耗低、灵活性强、效率高,适用于各种工业场景的监测。因此,可在大型桥梁上大范围部署成本低廉的传感节点<sup>[7]</sup>,以保证数据采集的广度和精度,为桥梁安全分析提供基础数据。由于传感器节点部署分散且有移动需求,采用无线多跳的方式进行数据采集更具灵活性,数据汇聚到汇聚节点后,通过有线或无线网络将数据传输到健康监控云平台中心对桥梁安全进行评估预警,整体设计方案如图 1 所示。

### 2.2 桥梁测量参数

结合桥梁的真实交通负荷和结构恶化情况(如疲劳、腐蚀),主要监测交通状况、结构应变和荷载、位移、腐蚀、疲劳裂纹扩展、温度以及其他性能和损害指标。如图 2 所示,确定的监测指标分为 3 个类别:环境类、变形类和结构类。环境类主要是指当前的温度和湿度;变形类主要是指对伸缩

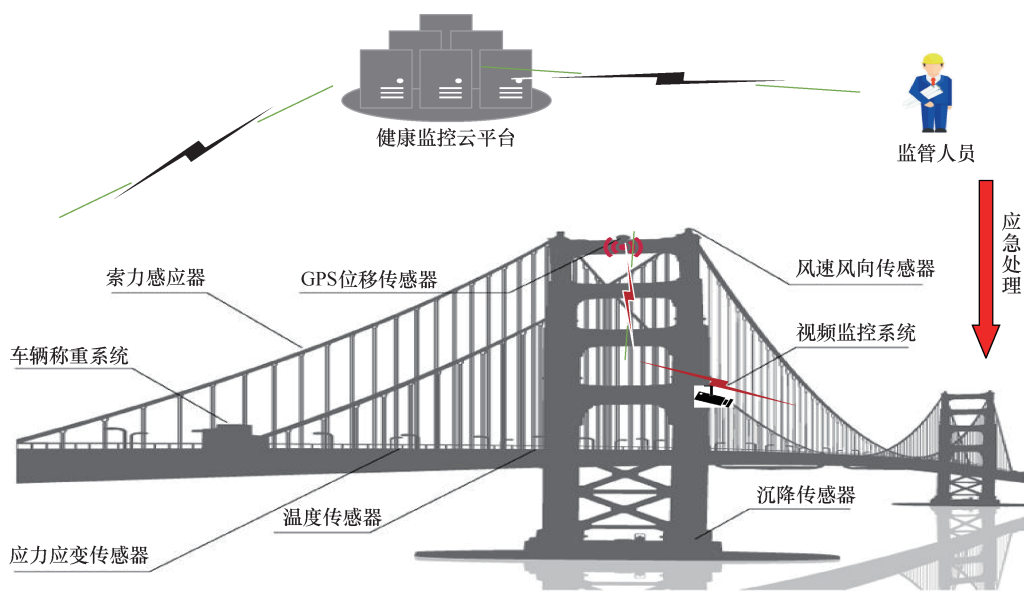


图 1 桥梁监控系统整体设计方案

缝、支座、主架和墩（塔）的变化；结构类主要是指应变、裂缝和振动响应。在进行结构状况评估时，必须将环境状态与结构的响应信号结合进行分析，才能准确地反映结构的真实状况。

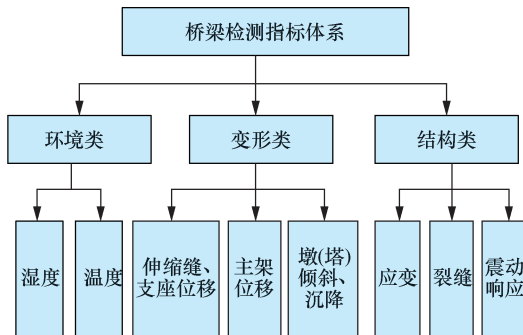


图 2 桥梁具体的监测指标

确定桥梁安全的监测参数后，需要根据不同类型桥型的受力特点选择合适的测量方法、传感器节点的布设方案和数量，以及满足相关要求测试指标的无线网络采集设备。

### 2.3 系统架构

桥梁监测系统采用物联网思维，基于智能数字传感技术、数据通信技术、数据库技术等进行设计，如图 3 所示。

桥梁监测系统架构从逻辑架构上分为 4 层：最底层是传感网络层，由各种传感器（温度、压力等

传感器）和数据感知采集节点构成，周期性进行各个监测参数的测量和数据采集；第二层为传输汇聚层，由分布式无线采集点、中继传输节点以及汇聚传输节点共同构成，完成采集数据导入到远端数据库系统；第三层为核心数据层，主要由桥梁基本数据和健康监测数据存储系统组成，为桥梁健康状况分析和预警提供重要的数据支撑；第四层为业务应用层，以可视化界面及简单明了的输出命令完成监测数据的分析。通过预警、显示和报表等形式，将桥梁健康监测信息提供给管理者的客户端。

### 2.4 各层模块实现

#### 2.4.1 数据采集控制

数据采集部分分解成 3 个子模块：数据采集节点、数据中继传输节点以及汇聚传输节点，其中传感器模块和通信模块组成了数据采集节点，如图 4 所示。

传感器模块作为整个桥梁监控系统的关键基础部分，主要负责完成被测桥梁的状态监测工作，传感器模块凭借感知监测对象相关属性的变动将被测信号转化为相应电信号，从而触发处理器中断，在一个中断过程内将采集信息进行预处理。

数据采集节点工作流程如图 5 所示，首先系统上电之后芯片将进行硬件及系统初始化，而后申请加入网络，根据扫描结果选择合适的信道、网络号

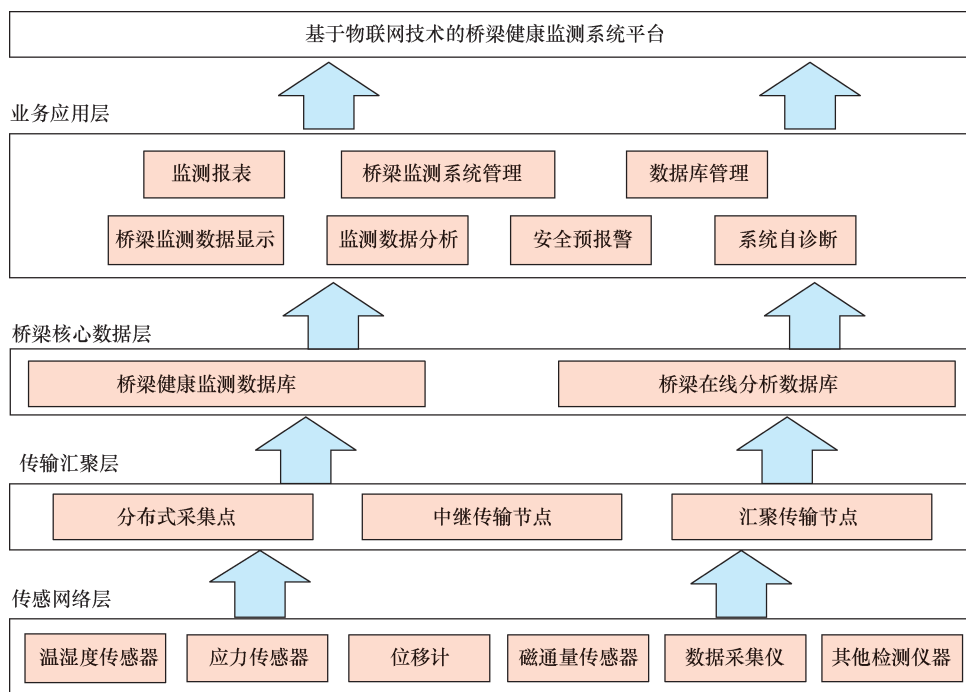


图 3 桥梁监测系统总体设计

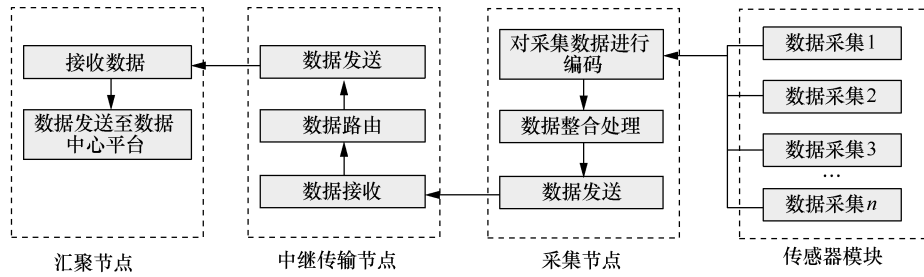


图 4 数据采集模块结构

和网络地址；接下来对网络进行监听并开启定时器，如果收到来自节点的入网请求，则给节点分配网络号并回复请求，若没收到则继续对网络进行监听。当定时器时间达到时，则对接收到的相关采集信息进行预处理，处理完将监测数据上传。

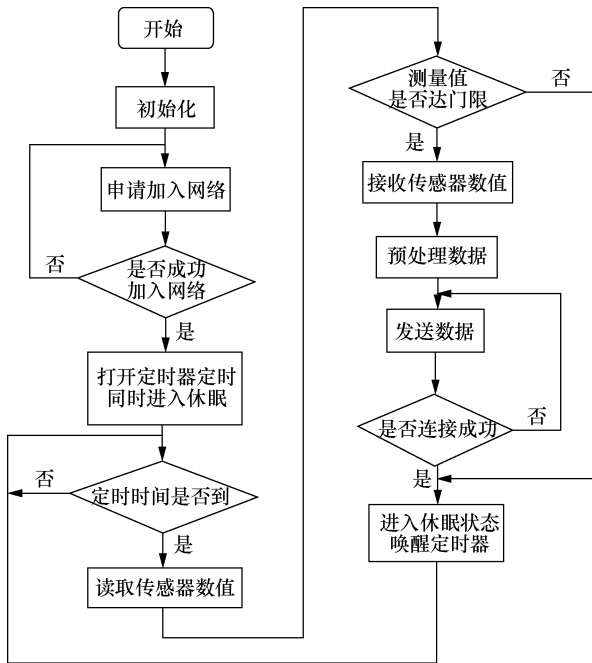


图 5 数据采集节点工作流程

中继传输节点通过源路由发现技术进行节点组网，将数据通过多跳传输的方式发送至汇聚节点。由于桥梁传感器节点分布范围较广，根据监测任务的变化又具有一定的移动性，因此采用中继传输节点对所监控桥梁进行无线覆盖，以满足传感器节点传输的需求；在中继传输节点组网过程中，由于中继节点一般很少移动，节点间路由变化较小，因此采用源路由的方式进行组网，以减少节点路径发现和节点能耗。通过中继传输节点，数据最终传输到汇聚节点，汇聚节点对收集到的数据进行整理与压缩，发送至数据平台。

### 2.4.2 桥梁数据管理

数据管理中心主要负责存储桥梁监控数据，分布在不同数据库中，为上层业务提供数据支持。数据管理中心包含桥梁健康监控数据库和桥梁在线数据分析数据库。其中，桥梁健康监控数据库基于大数据平台进行实现，负责存储不同桥梁节点的传感网络数据，例如不同桥梁的环境参数数据等。上层业务根据具体需求从数据库中读取所需数据。同时上层业务将桥梁状况分析的结果存储到桥梁在线数据分析数据库中。





### 2.4.3 系统业务层

该层主要是依据大桥上已部署传感器监控的桥梁信息对桥梁安全进行综合判决而进行相应的预警，最后由现场人员进行大桥相应的维护和管理。主要功能包括：提供感知数据获取接口，从底层传感器网络中各采集单元获取采集数据，同时下发控制命令来改变底层传感器单元的工作方式及相关参数；可根据桥梁健康监控要求来提供相应的历史数据、在线数据、原始数据、处理后数据等信息，并且可以根据监控结果改变监控参数列表；集成了 Web 和 APP 接口，方便进行远程监控。监测系统把桥梁的安全预警划分为 4 个等级：红色、橙色、黄色和绿色，各预警等级如表 1 所示。

从表 1 可知，红色和绿色等级为两个极端。绿色表示大桥的健康状态良好，各项部件工作正常；红色则表示大桥处于严重危险状态，需要对大桥进行相关的维护及检修。另外两个等级分别是橙色和黄色，橙色表示大桥可能存在潜在的安全隐患并需要对大桥进行常规检查，黄色则代表大桥处于危险状态，可能是大桥中的某个部件出现了问题并需要对其进行相应的检修。

为了正确检测大桥的健康状态，系统对以上 4 种状态进行了阈值设置，当检测结果大于设定的阈值，则进入相应的处理流程以保障大桥的正常工

表 1 桥梁预警等级表

序号	级别	图例	描述
1	红色预警		表示桥梁的安全状况非常严重，桥梁已经出现严重损坏，应停止使用并实施交通管制。如环境中某些危机安全的因素（如地震、洪水等自然灾害）正在加剧，或重大交通事故
2	橙色预警		表示指桥梁的多数指标超过正常范围，需要对每个指标进行逐一排查并处理，避免安全事故的出现
3	黄色预警		表示某些设备超过或者临界正常指标范围
4	绿色预警		表示桥梁各个指标都在正常范围内变化，未出现异常情况

作。通过分析发现，对于工作状态正常的大桥，其结构检测部位基本上与理论值保持一致，所以绿色状态的阈值设置可以根据理论计算得出，在实际环境中，把该状态的下限和上限分别设置为 0.95 倍设计荷载作用效应和 1.05 倍设计荷载作用效应；对于红色状态的阈值，下限和上限分别设置为 1.15 倍设计荷载作用效应和 1.25 倍设计荷载作用效应；对于中间两个状态即橙色和黄色，采用经验值的方式进行阈值设置，其阈值的下限和上限分别设置为 1.05 倍设计荷载作用效应和 1.07 倍设计荷载作用效应。

在整个大桥检测系统中，所有部署在桥梁上的传感器 24 h 全天候工作，系统对采集的传感数据进行实时处理。通过与设定的阈值做比较来判断大桥相应的工作状态，并判断大桥是否处于超负荷状态，同时对其做出相应的预警处理。一般来说，预警发生后有两种预警信息推送方式，即系统控制界面弹出和推送至现场人员的手机中。本文将信息推送至维护人员手机中，在大桥出现问题后，人员能第一时间到达现场进行相关的维修和处理工作。

### 3 桥梁监测点管理

桥梁监测点主要是对桥梁间和检测区域间的检测接入进行控制管理。其主要完成如下功能：对传感器、检测因素及拓扑结构进行相关配置。具体为在传感器出现失灵等情况后，用户可以在后台对其进行重新配置等操作；当温度、应力、位移和振动等检测因素发生改变后，检测平台需要对后台服务器进行相关配置；根据实际检测需求，改变监测点的部署位置从而实现拓扑管理以达到最佳的检测效果，桥梁监测点管理如图 6 所示。

### 4 现场管理及维护

当桥梁监测发现安全隐患时，系统需要通知现场维护人员针对桥梁状况进行维护。维护人员通过

手持终端连接至数据中心，对系统预警情况进行现场定点分析。

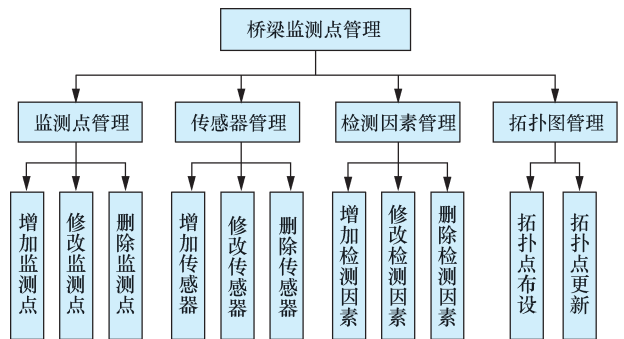


图 6 桥梁监测点管理

如图 7 所示，客户端应用程序与现场目标设备之间的连接流程包括：首先检测终端是否支持蓝牙无线通信，同时开启蓝牙模式；然后查询该终端与本地蓝牙适配器的配对记录，如果在历史记录中发现目标设备则直接进行配对，如果没有发现目标设备则需要对目标设备进行重新搜索并执行配对操作；当成功匹配后，现场维护人员通过获取的数据及诊断信息对桥梁进行相关维护。

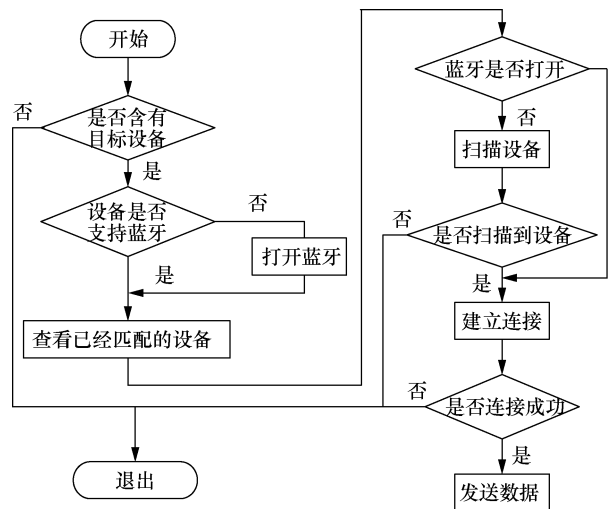


图 7 现场连接流程

### 5 实时监控结果显示

图 8 为监控系统云平台，系统共实时监测重庆市主城区内 5 座大桥的健康状态。左侧列表为监控大桥列表名单；中间为实时地图显示，图 8 显示了系统的监控方位等基本信息；右侧为桥梁实景等信息，包含大桥的建造时间、桥长、监控起始时间及监控天数等基本信息。

除此之外，本系统开发了一个可视化界面，通过后端服务器对传输来的数据进行分析 and 条件评估，实时地展示现场桥梁状态，可直观地反馈给工作人员。

图 9 为桥梁监控系统控制界面，包含被监控桥梁的监控具体参数，左侧的导航栏包含具体的参数列表，主要有索力、位移、倾角、应力、温度、GPS、振动等实时监控信息，图中蓝色曲线为实时检测大

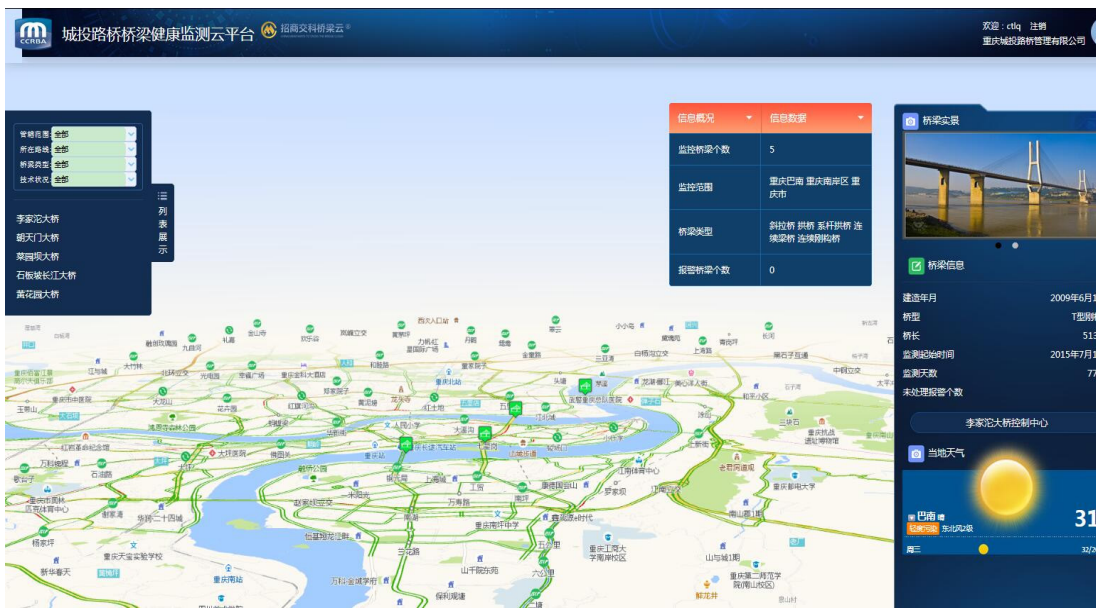


图 8 监控点基本信息



图 9 桥梁监控系统界面

桥的索力变化曲线。

## 6 结束语

随着越来越多的大跨度桥梁在城市发展中大量建设,特别是在桥都“重庆”。桥梁建设完成后将会面临自然老化、天灾、交通事故等各种问题,完整的桥梁监测系统至关重要。本文充分利用物联网技术的优势,并结合桥梁本身的特点与需求,设计了一套智能化桥梁健康监测系统。实际应用表明,该系统能够全天候 24 h 对桥梁健康状况实施有效的监控,对传感器数据的可视化和对监测结果进行详细分析,并指导维修人员对桥梁结构进行管理。下一步,将根据系统长期运营的新需求,进一步优化系统,使其具备适用性、安全性和稳定性。

### 参考文献:

- [1] LI Y, WEI H. Research of sensor fault identification and warning in the urban bridge cluster monitoring system[C]//International Conference on Civil Engineering and Urban Planning. 2012:504-509.
- [2] 雨虹. 世界第一的悬索桥——日本明石海峡桥[C]//养护与管理, 2011.  
YU H. The world's first suspension bridge-Akashi Strait Bridge of Japan[C]//Conservation and Management. 2011.
- [3] SUNG-PIL C, JAEYEOL Y, JUNGWHEE L. Necessity of the bridge health monitoring system to mitigate natural and man-made disasters[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2009, 5(3):173-197.
- [4] 李爱群, 缪长青, 李兆霞, 等. 润扬长江大桥结构健康监测系统研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2003, 33(5): 544-548.  
LI A Q, LIAO C Q, LI Z X, et al. Health monitoring system for the Runyang Yangtse River Bridge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(5): 544-548.
- [5] 欧进萍, 周智, 武湛君, 等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1):45-49.  
OU J P, ZHOU Z, WU Z J, et al. Intelligent monitoring of heilongjiang Hulan River Bridge based on FBGS[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (1): 45-49.
- [6] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023-1029.

QIAN Z H, WANG Y J. IoT technology and application[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023-1029.

- [7] SUI L Y, CHEN Z H, LI W, et al. Study on monitoring and safety early warning technology of bridge health based on Internet of things technology[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 556-562: 5994-5998.

### [作者简介]



**李政** (1980-), 男, 重庆市城投路桥管理有限公司党委书记、执行董事、重庆市桥梁协会副秘书长、重庆市桥梁协会管养专业委员会主任、高级工程师, 主要研究方向为特大型跨江桥梁的管理和维护。



**张圣** (1976-), 男, 重庆市城投路桥管理有限公司副总工程师、结构工程师、建造师, 主要研究方向为桥梁智慧科技管理、桥梁养护标准化以及结构在营运阶段特性研究等。



**张卢喻** (1981-), 男, 重庆市城投路桥管理有限公司总工办主任、重庆市招投标专家库专家、高级工程师, 主要研究方向为特大型跨江桥梁的维护与维修。



**张杨** (1979-), 男, 重庆市城投路桥管理有限公司菜园坝大桥管理处维护科科长, 主要研究方向为桥梁结构健康监测系统、视频监控系统等物联网技术运用以及信息化系统的应用和管理。