

# 基于物联网的运营地铁隧道结构健康监测系统 软件平台开发

陈虹宇<sup>1</sup> 吴贤国<sup>2</sup> 张浩蔚<sup>3</sup> 吴霖锋<sup>4</sup> 翁 顺<sup>2</sup>

(1. 新加坡南洋理工大学土木工程与环境学院, 639798, 新加坡; 2. 华中科技大学土木工程与力学学院, 430074, 武汉;  
3. 武汉汇科质量检测有限公司, 430070, 武汉; 4. 武汉中城实业开发有限公司, 430040, 武汉//第一作者, 博士研究生)

**摘 要** 建立基于三维全景监测技术的运营地铁隧道结构健康监测系统,对武汉地铁3号线跨江段进行了监测;建立数据采集与传输子系统,实现地铁隧道健康监测数据的转换、汇集和传输;编写Java与Matlab语言交互与调用程序,开发相对应的监测功能软件模块,实现全自动全站仪、倾角传感器的远端三维可视化自动监测,以及三维激光扫描监测断面数据的解析、计算、拟合和分析功能。使用MVC(模型视图控制)以及Struts框架等相关Web框架搭建技术,对软件平台进行了框架搭建,并将开发的监测模块、评估模块集成至框架中,研发形成一套完整的运营地铁隧道结构健康监测系统软件,为实现运营地铁结构健康监测系统的智能化分析与决策提供有效的基础数据与知识支持。

**关键词** 地铁隧道; 结构健康监测系统; 物联网; 数据采集与传输; 功能集成

**中图分类号** U284.48

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.01.020

**Software Platform Development of Operational Metro Tunnel Structure Health Monitoring System Based on Internet of Things**

CHEN Hongyu, WU Xianguo, ZHANG Haowei, WU Jifeng, WENG Shun

**Abstract** Health monitoring system for operational metro tunnel structure is established based on 3D panoramic monitoring technology, and the cross-river section of Wuhan Metro Line 3 is monitored. Data acquisition and transmission subsystem is established to convert, collect and transmit metro tunnel health monitoring data. The program for Java and Matlab interaction and call is written, and corresponding monitoring function software module is developed to realize the remote 3D visualization automatic monitoring of full-automatic station instrument and inclination sensor, as well as the resolution, calculation, fitting and analysis of 3D laser scanning monitoring section data. Using technology related to building Web framework such as MVC and Struts framework, the framework for software platform is built and the developed monitoring

module, assessment module are integrated into the framework, thus a complete set of operational metro tunnel structure health monitoring software is studied and developed, providing effective basic data and knowledge for realizing the intelligent analysis and decision-making of the system.

**Key words** metro tunnel; structure health monitoring system; Internet of Things; data acquisition and transmission; functional integration

**First-author's address** School of Civil Engineering and Environment, Nanyang Technological University, 639798, Singapore

近年来,大城市的地下轨道交通得到了高速的发展。但由于受周边环境、自身负荷、列车运营等方面的影响,其在运营周期内将会发生各种病害。这些病害如果不及时发现并进行评估与维修,将可能威胁公众的生命财产安全。因此,研发一套具有监测和评估功能的轨道交通地下结构安全监测系统,具有重要的实用价值。

文献[1]于2011年根据南京长江公路隧道的监测需要,开发了一套大型盾构隧道结构健康监测系统。文献[2]于2014年对南京市纬三路过江盾构隧道进行了运营期的监测,开发了一套具备预警功能的监测系统。文献[3]针对穿越工程影响下的既有地铁隧道,构建了地铁时空一体化精密监测系统。英国伯明翰大学的研究人员将一种光纤光栅(FBG)传感器应用在隧道衬砌及接缝的变形监测中<sup>[4]</sup>。韩国在高铁隧道中设计并安装了长期健康监测系统,以此对隧道的安全性状况进行评价<sup>[5-6]</sup>。文献[7]以青岛胶州湾海底隧道为工程实例,将三维激光扫描技术运用于隧道工程安全监测中。文献[8-9]将三维激光扫描技术运用到盾构隧道的运营期监测中。文献[10]提出了使用三维激光扫描技术对隧道结构进行

收敛变形监测。从目前的研究情况看,基于物联网的运营隧道结构健康监测系统的研究还比较缺乏。

本研究建立由全自动全站仪、倾角传感器、三维激光扫描仪组成的三维全景监测技术的运营地铁隧道结构健康监测模块,在此基础上构建评估模块以及管养决策模块,采用 MVC(模型视图控制)以及 Struts 框架等相关 Web 框架搭建技术,完成了软件平台的框架搭建,并将监测模块、评估模块、管养决策功能模块集成至软件平台的框架中,构建了基于 WSN(无线传感器网络)的监测系统,为实现运营地铁隧道结构健康监测系统的智能化分析与决策提供有效的基础数据与知识支持。

## 1 基于物联网的运营地铁隧道结构健康监测系统

本研究构建基于物联网的运营地铁隧道结构健康监测系统,主要包括数据采集与传输子系统、监测中心应用管理子系统等。本研究选择武汉地铁 3 号线王家湾至宗关区间跨江段下行线(右线)作为监测对象,监测区段全长约 300 m,全为盾构隧道,采用的施工方法为矿山法开挖、初支衬砌,盾构机拼装管片通过。

### 1.1 数据采集与传输子系统

考虑到该监测段的特点,参考相关文献,本项目采用的监测仪器有:远程自动全站仪、加速度传感器、应变仪、倾角传感器和三维激光扫描仪等。

地铁隧道结构健康监测系统中的数据采集与传输子系统主要负责将地铁隧道结构健康监测数据转换、汇集和传输。本研究构建了基于 WSN 的监测系统,可以为实现运营地铁隧道结构健康监测系统的智能化分析与决策提供有效的基础数据与知识支持,其包括 3 个部分:实现数据采集功能的传感器节点部分,实现数据汇聚功能的汇聚节点部分,实现数据接收和分析处理的监控中心部分。

### 1.2 监测中心应用管理子系统

#### 1.2.1 监测中心应用管理功能模块的搭建

本研究开发的运营地铁隧道结构健康监测系统软件平台采用的是基于 B/S(浏览器/服务器)的 Web 模式架构,即把软件平台的本体部署于云端服务器,用户通过浏览器向部署在云端服务器上的软件发出请求,软件对浏览器的请求进行处理后,再将用户处理后的结果信息返回至浏览器中。

因而在进行软件开发时,既使用了 JavaScript

直译式脚本语言实现浏览器端的软件平台界面显示,又使用了 Java 的计算机编程语言来完成浏览器传回的请求处理。但由于两者是不同的编程体系,所以在开发过程中需要搭建相应的框架来建立二者之间的连接关系。

本研究的框架搭建使用的是基于 MVC 标准的 Struts 技术。即把实现浏览器端界面显示的 JavaScript 程序放在框架的 View 层,把进行请求处理与逻辑业务的 Java 程序放在框架的 Model 层,然后在项目文件中创建 struts-config.xml 文件;struts-config.xml 文件中将编写每个 JavaScript 程序和与之对应的 Java 程序之间的连接关系,配置好连接关系的 struts-config.xml 文件即作为框架的 Control 层。

本软件平台框架如图 1 所示。完成框架搭建并集成后的“运营地铁隧道结构健康监测系统”软件平台功能集成了监测模块、评估模块、管养决策模块、人工监测的数据管理模块等。

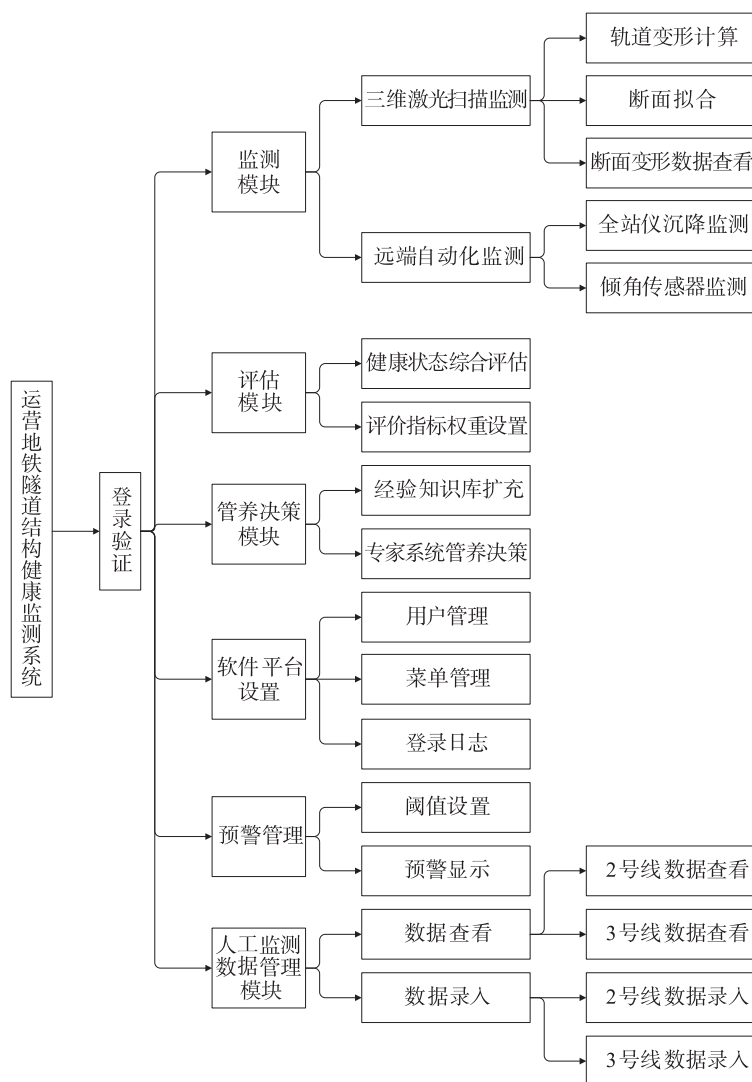
#### 1.2.2 关键技术的实现

##### 1.2.2.1 三维激光扫描监测数据分析

基于地铁三维全景监测的特点与监测后得到的数据特征,开发了能完成点云数据导入、解析、管理、计算与分析的三维激光扫描监测数据分析模块。该功能模块具备轨道变形计算、断面点云数据拟合、断面变形数据查看等 3 项子功能。

1) 点云数据的解析:由于使用三维激光扫描技术进行三维全景监测后得到的监测数据为地铁隧道空间的全息点云数据,所以功能模块首先需要将这些点云数据进行解析,才能进行后续的数据存储与管理、计算与分析。点云指的是在获取物体表面每个采样点的空间坐标后,得到的点的集合。目前,点云数据的格式有很多,比如.las、.pcd、.txt 等格式,但各种格式的点云数据中包含的数据信息均较为统一,一般为各点的三维坐标信息、激光反射强度和颜色信息。而本文使用的徕卡 SiTrack:One 型移动式三维激光扫描仪在进行扫描监测之后支持生成的点云格式有.las 和.txt 两种格式。由于.txt 格式的点云数据通用性更强,而且使用 Java 语言也更易对其进行解析,所以本文主要针对.txt 格式的点云数据进行功能模块的开发。

2) Java 与 Matlab 语言间数据交互与调用接口的实现:采用 Matlab 编写了基于最小二乘法的点云数据断面拟合程序,为了实现断面的点云数据拟合



功能，将编写的 Matlab 程序集成至使用 Java 语言编写的功能模块中，需要编写 Java 与 Matlab 语言之间的调用与数据交互接口程序。

#### 1.2.2.2 倾角传感器原始监测数据解析

由于倾角传感器传回的原始监测数据是没有经过解析的十六进制 ACSII 码,里面除了具有 X、Y 两个方向的倾角数据外,还包含了传感器型号、编号及监测时间等信息。所以从云服务器中调取倾角监测数据后,还需要对这些原始的监测数据按照厂商提供的编码文档进行解析。

#### 1.2.2.3 BIM(建筑信息模型)可视化三维模型集成

由于研发的软件平台界面使用的是基于 Web 的 JavaScript 编程语言进行开发的,而监测数据则是保存至 SQL(结构化查询语言)数据库中,所以若要将 BIM 可视化三维模型集成至功能模块中,实现

三维可视化监测,则需要建立 BIM 在 JavaScript 中的导入接口。

#### 1.2.3 主要功能模块

1) 三维激光扫描监测数据分析模块:外业扫描得到地铁隧道点云数据和三维激光扫描仪如图 2 所示。本研究使用自行行走式徕卡 SiTrack:One 型移动式三维激光扫描仪。三维激光扫描监测数据分析模块主要由轨道变形计算、断面拟合以及断面变形数据查看 3 个子功能组成。其中,轨道变形计算子功能截图如图 3 所示,用户将 SiTrack:One 激光扫描仪扫描得到的轨道点云数据导入界面的导入功能模块中,功能模块将对导入的轨道点云数据进行三维显示,同时进行轨距计算并与规范要求的标准轨距进行对比。





a) 三维激光扫描点云图



b) 三维激光扫描仪

图2 三维激光扫描点云图和三维激光扫描仪

2) 全站仪沉降监测数据模块:用户在断面选择面板中选择了需要查看监测数据的断面里程后,程序即把对应的三维可视化 BIM 断面模型显示在监测点位选择面板中;用户根据需要在该 BIM 断面模型中点选监测点位后,程序将从中心数据库中调取对应的监测数据,并显示在界面的右半部分面板中,

用户可以将调取的监测数据进行报表导出。由于监测数据多而复杂,因此该模块还提供了按照监测时间对监测数据进行索引的功能。

3) 倾角传感器监测数据模块:与上述的全站仪沉降监测数据模块的功能相似,程序也将根据断面里程以及传感器位置从中心数据库中调取对应的倾角监测数据,并绘制为时序曲线,由于一个倾角传感器将采集两组倾角数据(分别为 X 轴方向的倾角数据和 Y 轴方向的倾角数据),所以用户可以在曲线绘制部分自行选择只查看一个方向的曲线或者同时查看两个方向的曲线。

4) 人工监测数据录入模块:用户可以将人工沉降监测的监测报表按照对应的监测区间上传到软件平台中,软件平台即可对监测报表中的沉降数据进行读取、存储,并与同监测里程的上次监测数据进行比对,计算相对沉降,进行曲线绘制与显示。

5) 预警管理功能模块:软件平台会定时从数据库中调取沉降数据并与预先设定的阈值进行比较,当某一监测点位的沉降数据超过阈值时,软件平台即能够将超限的监测点位信息显示至界面中。预警功能设置了蓝色、橙色、红色共三级预警,每一级预警都可以在软件平台中设置阈值上限与下限值。同时,在软件平台的顶部设有蓝色预警、橙色预警、红

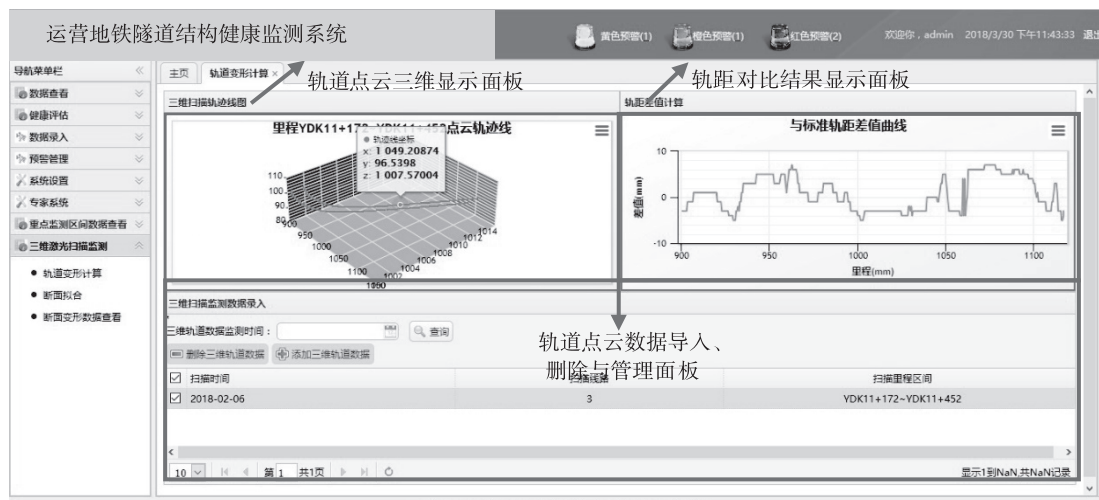


图3 三维激光扫描轨道变形计算界面截图

色预警相对应的预警灯,预警灯后显示的数字为超过该级预警阈值的监测点的个数,点击该数字即可浏览该级预警的详细信息。

## 2 结语

1) 为构建基于物联网的运营地铁隧道结构健

康监测系统,建立了基于三维全景监测技术的数据采集与传输子系统,也构建了基于 WSN 的监测系统,为实现运营地铁隧道结构健康监测系统的智能化分析与决策提供了有效的基础数据与知识支持。

2) 开发了相对应的监测功能软件模块,编写了

(下转第 106 页)

避免了局部极小值问题,同时解决了计算复杂度高、运算速度慢等问题。因此,可得出本文预测方法适用于 TCN 控制系统的时延数据及高实时性、高精度数据的预测。

#### 4 结语

在对试验平台进行搭建后,进行时延测试,通过 MVB 对时延数据进行抓取,得到大量有效的时延数据,并对时延数据进行统计,分析其时延变化特点。本文提出基于改进的 PSO 算法迭代来优化 LS-SVM 算法对 TCN 时延进行预测,试验结果表明本文方法在预测精度及预测速度上较其他方法有大幅度提升,对于 TCN 时延的预测具有良好的效果,为 TCN 时延补偿得到了大量有效数据。

#### 参考文献

- [1] 张彤. 基于 T-S 模糊模型的高速动车组通信网络实时控制方法[J]. 中国铁道科学, 2018(3): 95.
- [2] 李常贤, 赵焱, 张彤. 列车网络控制系统时延特性研究[J]. 中国

铁路, 2018(1): 49.

- [3] 王宏伟, 杨先一, 金文标. 基于 Elman 网络的时延预测及其改进[J]. 计算机工程与应用, 2008(6): 136.
- [4] TIAN Z D, GAO X W, LI K. Time-delay prediction based on LS-SVM optimized by PSO for GPRS industry control network[J]. Journal of Northeastern University, 2012, 33(10): 1377.
- [5] 王宏伟, 宋芄. 基于神经网络的网络时延预测[J]. 微计算机信息, 2008(4): 271.
- [6] GAO X W, TIAN Z D. Time-delay prediction method based on maximum Lyapunov exponent and Elman neural network[J]. Entia Simica, 2013, 43(8): 1042.
- [7] 刘婷, 姜顺, 潘丰. 网络控制系统前向通道随机时延的在线多步预测[J]. 信息与控制, 2017(5): 114.
- [8] 田中大, 高宪文, 李琨. 基于 EMD 与 LS-SVM 的网络控制系统时延预测方法[J]. 电子学报, 2014(5): 868.
- [9] 陈维鹏, 敖志刚, 屠义强, 等. 基于 PSO 优化 LS-SVM 算法的网络空间态势预测研究[J]. 通信技术, 2018(5): 164.
- [10] 杨刚, 王乐, 戴丽珍, 等. 自适应权重粒子群优化 LS-SVM 的交通流预测[J]. 控制工程, 2017(9): 1838.
- [11] 曹净, 丁文云, 赵党. 基于 PSO-LS-SVM 模型的基坑变形时间序列预测[J]. 控制工程, 2015(3): 475.

(收稿日期: 2019-04-08)

(上接第 96 页)

Java 与 Matlab 语言交互与调用程序, 实现了全自动全站仪、倾角传感器的远端三维可视化自动监测, 以及三维激光扫描监测断面数据的解析、计算、拟合、分析功能, 从监测功能模块获取监测数据显示。

3) 使用 MVC 以及 Struts 框架等相关 Web 框架搭建技术, 完成了软件平台的框架搭建, 将监测模块、评估模块、管养决策模块集成至软件平台的框架中, 建立了数据传输模块、监测中心应用管理模块、人工监测数据录入模块、预警管理模块等。

#### 参考文献

- [1] 刘胜春, 张顶立, 黄俊, 等. 大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011(4): 742.
- [2] 黎晨, 赵小军, 范中林. 盾构隧道结构健康监测系统设计[J]. 武汉理工大学学报, 2014(2): 346.
- [3] 邱冬伟, 梁青槐, 杨松林. 北京地铁隧道结构整体变形监测的研究[J]. 测绘科学, 2008(1): 16.

- [4] BHALLS S, YANG Y W, ZHAO J. Structural health monitoring of underground facilities Technological issues and challenges [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(5): 487.
- [5] LEE J S, CHOI I Y, LEE H U. Damage identification of a tunnel liner based on deformation data[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(1): 73.
- [6] 候海民. 三维激光扫描仪在青岛胶州湾海底隧道的应用[J]. 隧道建设, 2010(6): 693.
- [7] 邱冬伟. 穿越工程影响下既有地铁隧道变形监测与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [8] 简骁, 童鹏. 基于地面激光雷达技术的隧道变形监测方法研究[J]. 铁道勘察, 2011(6): 19.
- [9] 康志忠, 托雷, 王保前, 等. 基于三维激光扫描的地铁隧道连续形变监测数据处理软件系统[J]. 测绘工程, 2013(5): 82.
- [10] ZHOU W, SUN Z, TANG S. Research on liquid level on-line monitoring system of deep tunnel drainage basin [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(1): 1.

(收稿日期: 2019-01-10)