

文章编号:1006-2106(2015)04-0010-06

# 高速铁路沉降自动化监测系统 SMAIS 的研发及应用<sup>\*</sup>

禚 一<sup>\*\*</sup> 王 旭 张 军

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

**摘要:**研究目的:为解决高速铁路自动化沉降监测问题,研发出一套“高速铁路工程结构沉降及变形自动监测分析预警系统 SMAIS”,该系统融合传感器、数据采集传输、客户端实时跟踪和远程查询、监测成果后处理、自动预警、人工监测数据管理及监测数据分析、管理与评估等七个子系统,成功在京津城际等高铁部分段落工程上进行长期应用和检验。

**研究结论:**工程应用结果表明:(1)在高铁工程结构的沉降监测过程中,所研发的 SMAIS 自动监测系统具有较高的监测精度,具有较强的适用性和稳定性;(2)SMAIS 数据实时跟踪和远程网络的动态查询访问平台,可实现实时化、可视化、远程化的监测目标,节约大量的人力;(3)SMAIS 监测预警子系统,可实现自动报警和报警后的预警信息分析功能,为信息化施工和科学决策提供指导;(4)本系统可适用于高速铁路路基和桥梁等工程结构的沉降监测。

**关键词:**高速铁路;工程结构;自动化监测;沉降变形;评估分析;系统集成

中图分类号:U238;TU441 文献标识码:A

## Development and Application of Automatic Monitoring System SMAIS for Settlement of High-speed Railway

ZHUO Yi, WANG Xu, ZHANG Jun

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

**Abstract: Research purposes:** In order to solve the high-speed railway settlement problem, this paper researches a Structure Settlement and Deformation Monitoring and Analysis Integrated System(SMAIS) for high-speed railway. The SMAIS system is composed of sensor subsystem, data collection transmission subsystem, data real-time tracking and remote query by client end subsystem, monitoring results post-processing subsystem, automatic early-warning subsystem, manual measurement data management subsystem and data analysis and evaluation subsystem. And the field experiments were successfully carried out in part location of Beijing-Tianjin inter-city railway project for long-term automatic monitoring by SMAIS.

**Research conclusions:** The engineering verification results show that: (1) The SMAIS integrated monitoring system has a good monitoring precision, higher stability and applicability for engineering structure settlement automatic monitoring of high-speed railway. (2) Data track and remote net dynamic query platform of SMAIS realize the automation, real-time transmission, visualization, remote query technique monitoring, automatic alert and generate report functions target, the large manpower has been saved. (3) The alert subsystem of SMAIS realize automatic alert and alert information analysis function, it provide a scientific guidance for construction and decision-making. (4) This system

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-10-24

<sup>\*\*</sup> 作者简介:禚一,1983 年出生,男,高级工程师。



can be used in settlement monitoring of high-speed railway subgrade and bridge.

**Key words:** high-speed railway; engineering structure; automatic monitoring; settlement deformation; evaluation analysis; system integration

## 1 引言

近年来,随着科学技术的进步和交通事业的快速发展,我国的铁路事业,特别是高速铁路实现了跨越式的发展。然而,铁路工程结构的使用期往往长达上百年,环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应、疲劳效应与突变效应等灾害因素的耦合作用将不可避免地导致结构和系统的损伤积累和抗力衰减,从而威胁到铁路的运营安全。此外,随着高速铁路的建设和无砟轨道技术的广泛应用,高速铁路桥涵、路基和轨道等工程结构对沉降的要求变得更加严格,测量精度要求极高,高速铁路的沉降问题受到了密切的关注。因此,为了保障高铁的安全性、舒适性和耐久性的运营要求,在已建或在建高铁工程结构上急需采用有效的监测手段和评价平台对高铁的安全状况进行评价和分析,以便能够及时的控制沉降的加剧和结构损伤的发展<sup>[1-3]</sup>。

目前,国内对铁路桥梁等大型重要基础设施运营状态的评价大多采用传统的人工测量与内业分析评价相结合的方法。传统监测方法<sup>[4]</sup>采用水准仪等测量仪器进行逐站人工测量,由于其观测时间长、观测时段和频率受限制、测量结束后出监测报告周期长等局限,已无法满足日益增长的快速施工和不断提高运营维护效率的要求,此外,铁路工程大多处于封闭状态,采用传统人工测量方法也很难进行连续监测。另一方面,由于网络通讯技术、自动化控制技术、现代数据库技术的发展,全自动监测系统无论从软、硬件上,还是从系统集成、维护和管理等服务上都已经具备了发展成为现代化铁路运营监测系统的必要条件,因此,如果能够结合高速铁路工程的特点,针对高速铁路沉降变形的监测和评估技术要求,研发一套适用于高速铁路工程的完整的自动化、实时化、可视化监测系统,具有十分重要的工程意义和应用价值。

本文提出了一种适用于高速铁路工程沉降监测的自动化监测方法,并进行了系统研发,建立了《高速铁路工程结构沉降及变形自动监测分析预警集成系统》SMAIS (Structure Monitoring and Analysis Integrated System),在临近京津城际和津秦客专高铁等项目中进行了应用。

## 2 SMAIS 监测系统总体设计

自动化监测系统是进行高速铁路、桥梁、路基、地

铁、大坝等各类建筑物变形监测的理想系统。系统以沉降自动采集仪器为传感器,配合所研发的自动监测软件,在计算机的控制下实施全自动的工作,无须人工干预,从而实现沉降监测的实时化、可视化、远程化等目标要求。SMAIS 监测系统的总体设计主要包括监测内容、功能设计和系统架构三个方面。

### 2.1 监测内容

SMAIS 监测系统的监测内容主要包括高速铁路桥墩沉降监测、路基沉降监测、地下水位的变化监测以及环境温度监测等指标。

### 2.2 主要功能

课题组所开发的《高速铁路工程结构沉降及变形自动监测分析预警集成系统》SMAIS 适用于高速铁路的桥涵、路基等工程结构的沉降变形监测,实现从底层传感器安装布设、数据的自动采集传输和存储、现场监测数据的可视化、实时化跟踪、远程网络端成果动态查询、监测成果报告的自动生成、自动预警、直至监测数据分析、管理和评估的一整套功能。此外,为了实现对人工测量数据的统一平台管理,还开发了人工测量数据入库、分析和管理功能。

### 2.3 系统架构

SMAIS 系统主要包含七个子系统,分别为:传感器子系统,数据采集、传输和存储子系统,客户端实时跟踪和远程查询子系统,监测成果后处理子系统,预警子系统,人工监测数据管理和分析子系统,监测数据分析、管理与评估子系统。系统的功能如图1所示,逻辑架构如图2所示。

## 3 SMAIS 系统的核心子系统研发

### 3.1 传感器子系统

传感器子系统的主要功能是通过各种类型的传感器元器件将结构的响应信息转换为电(光)信号,供数据采集、传输和存储子系统进行处理和模数转换。根据精度高、稳定性强、性价比高的需要,选择静力水准系统作为高铁路基和桥梁沉降的监测传感器,系统由一系列含有液位精密振弦式传感器的容器组成,容器间由充液管互相连通。参照点(又称基准点)容器安装在一个稳定的位置,其他测点容器位于同参考点容器大致相同标高的不同位置,任何一个测点容器与参照容器间的高程变化都将引起相应容器内的液位变化,从而获取测点相对于参照点高程的变换。静力水



准系统的组成示意图如图3所示。

静力水准系统中任意测点或基准点容器内的水位变化量,即测点的绝对沉降量,可按照下式计算:

$$\Delta h = (R_1 - R_0) \times G \quad (1)$$

式中  $R_1$ ——传感器当前读数(mm);

$R_0$ ——传感器初始读数(mm);

$G$ ——传感器系数(mm/Digit),通常为正值,由厂家给定;

$\Delta h$ ——容器的水位变化量(mm),当  $\Delta h > 0$  时,水位下降,反之上升。

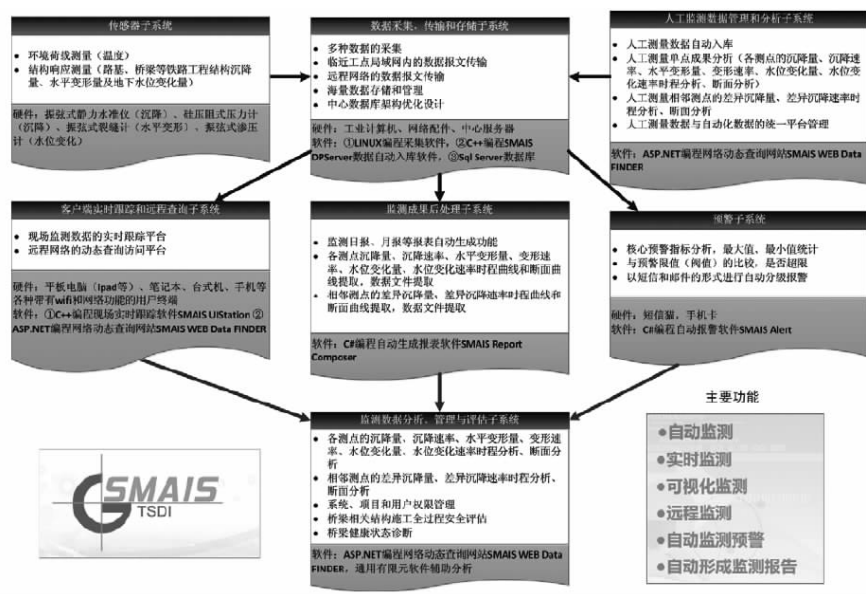


图1 SMAIS 自动化监测系统功能图(截图)

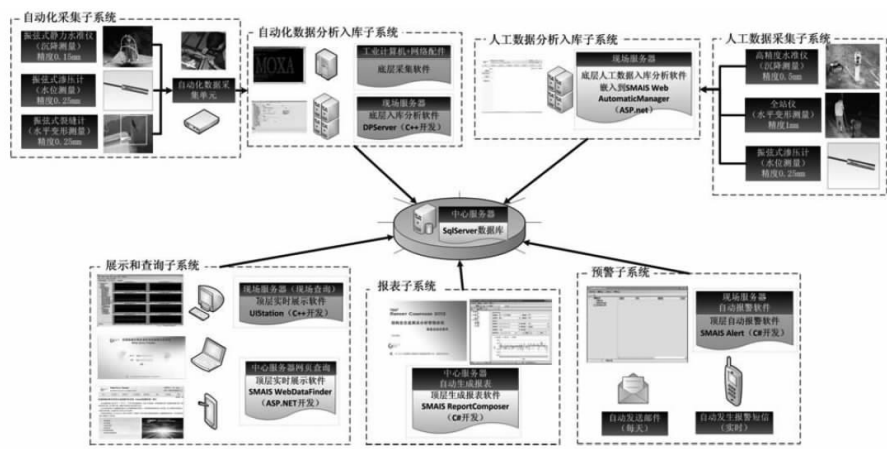


图2 SMAIS 自动化监测系统逻辑架构图(截图)

静力水准系统中任意测点的相对沉降量的计算方法为: $X$ 测点相对沉降量=测点容器水位变化量(绝对沉降量)-参照点容器水位变化量(绝对沉降量),计算公式为:

$$\Delta EL_X = (R_{1X} - R_{0X}) \times G_X - (R_{1REF} - R_{0REF}) \times G_{REF} \quad (2)$$

式中  $\Delta EL_X$ ——测点  $X$  容器的液位变化(相对沉降量)(mm),当  $\Delta EL_X < 0$  时表示沉降,  $\Delta EL_X > 0$  时表示升高;

$R_{1X}$ 、 $R_{0X}$ ——测点  $X$  传感器的当前读数和初始读数(mm);

$G_X$ ——测点  $X$  传感器系数(mm/Digit),由传感器的率定表上给出其系数;

$R_{1REF}$ 、 $R_{0REF}$ ——参照点(或基准点)传感器的当前读数和初始读数(mm)。

### 3.2 数据采集、传输和存储子系统

数据采集、传输和存储子系统的主要功能是对安装在高速铁路基和桥梁上的各种传感器信号进行必要的调理后进行模数转换,然后通过工业以太网传给监控



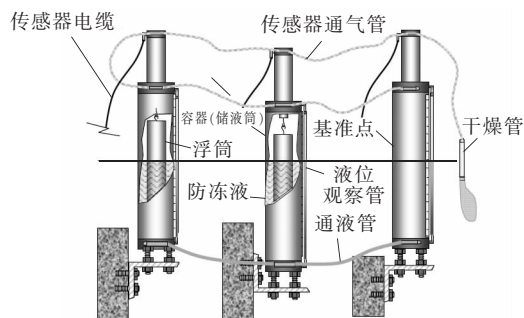


图3 静力水准系统沉降测量原理

中心的计算机服务器。如果现场条件适合,也可将监控中心设置在高铁车站附近。为了方便的进行数据采集、传输和存储工作,课题组还开发了数据采集和处理软件 SMAIS DPSTerver,该程序依托 SQL Server 数据库,可以设定采集和测量数据入库的频率,设定完成后,程序会自动将底层发到中心的报文进行解析,并根据标准存入到数据库中。SMAIS DPSTerver 软件的操作界面如图4所示。



图4 数据采集和存储控制软件 SMAIS DPSTerver 界面(截图)

### 3.3 客户端实时跟踪和远程查询子系统

该子系统主要实现监测系统的可视化功能,根据可视化的形式可分为两部分:一部分为设置于现场的实时跟踪平台 SMAIS UIStation;另一部分为设置于网络客户端的远程查询访问平台 SMAIS Web Data Finder。其中现场实时跟踪平台可安装在任何一台笔记本电脑或台式机上,既可固定的设置于现场的监控中心内,也可流动的进行随机抽查监控,该平台将让用户对现场的监测指标变化及是否超限有一个直观的了解。实时跟踪显示的内容包含沉降量、差异沉降量的单点时程曲线、多点时程曲线及断面曲线等。SMAIS UIStation 的运营界面如图5所示。

客户端实时跟踪和远程查询子系统的另一个重要组成部分是客户端的远程查询访问平台 SMAIS Web Data Finder,该平台可实现包括平板电脑、笔记本、台式机、手机等在内的各种网络客户端,实时进行现场测

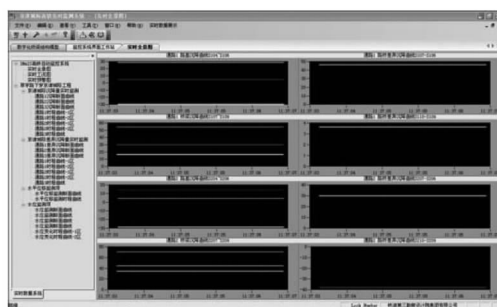


图5 实时跟踪平台 SMAIS UIStation 运行界面(截图)

量数据的查询和访问。SMAIS Web Data Finder 平台的运行界面如图6所示。在访问界面中,提供了监测成果的查询功能,可以查询沉降量、沉降速率、差异沉降量、差异沉降速率等多项监测指标和衍生指标,并在显示曲线图中给出了三级预警限值,在曲线图下方同时给出了当日的温度和施工内容,可以直观的对实时监测结果进行分析。



图6 客户端的远程查询访问平台 SMAIS Web Data Finder 界面(截图)

### 3.4 监测成果后处理子系统

监测成果后处理子系统的主要功能是用于自动生成数据报表和分析图形,主要是生成日报和周报表。为此,研发了自动报表软件 SMAIS Report Composer,界面如图7所示,用户可以根据自己的需要,在该软件中设计一个标准报表的模板,模板里包括文字、图片、监测数据的表格和数据曲线。在设计好模板之后,可以根据模板内容自动生成 Word 文档,有效的提高了监测成果报表的撰写效率。

### 3.5 预警子系统

预警子系统主要包含预警限值设定、预警模块开发和预警结果统计分析三部分。其中,预警限值划分为三级,即黄色预警(最低级)、橙色预警和红色预警(最高级)。根据《高速铁路设计规范(试行)》<sup>[5]</sup>和《铁路线路维修规则》<sup>[6]</sup>技术要求,可确定工后沉降



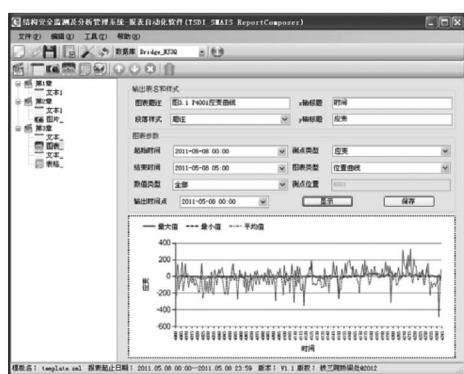


图7 自动化生成报表软件 SMAIS Report Composer 界面(截图)

量、工后差异沉降量等预警指标的三级预警限值。在预警模块研发部分,课题组开发了自动报警软件 SMAIS Alert,界面如图 8 所示。该软件可根据用户设定的预警指标和限值,自动通过短信和邮件的形式对超限的指标向用户进行报警,并且在报警过程中设定报警级别,实现逐级审批式报警功能。



图8 报警信息模块开发界面(截图)

### 3.6 人工监测数据管理和分析子系统

为了提高人工监测成果的分析和管理效率,建立了人工监测数据管理和分析子系统,将人工监测相关的内容纳入到自动化平台中,进行统一的分析和处理。该子系统主要包括三部分内容,分别是人工测量数据自动入库模块开发、人工测量衍生指标的计算和成果的后处理。经过统筹规划和深入分析,将人工监测数据管理和分析子系统与自动化的预警子系统、监测成果后处理子系统无缝对接,实现了统一平台管理。

### 3.7 监测数据分析、管理与评估子系统

结构监测系统的最终目标<sup>[7]</sup>是对高速铁路工程结构的沉降变化情况进行识别和评估。在评估过程中,首先应建立高铁路基和桥梁结构的分析模型,然后结合实测数据对计算模型进行修正,最后利用修正后的模型进行精确的分析计算,从而预测未来桥梁和路

基结构的沉降变化趋势,为高铁的运营和维护决策提供科学的依据。基于此,SMAIS 监测数据分析、管理与评估子系统的核心任务是将底层各个子系统联合得到的数据采集成果转化为反映结构沉降状态的评价指标,同时为模型修正提供基础数据。

## 4 系统在京津城际沉降监测中的应用

京津城际是我国第一条时速 350 km 的客运专线高速铁路,其中武清区翠亨路下穿京津城际工程也是国内首例下穿高铁的立交工程,该项目位于京津城际武清站东侧咽喉区,规划线路全长 459.34 m,线位相继下穿一支渠、既有京津城际和京沪普速铁路,场地位于软土地基,地下水位高,京津城际对沉降要求十分严格。

为了确保施工过程中对京津城际的路基、桥梁不产生严重的沉降影响,需要布设一个高精度的自动化沉降监测系统,对受影响的线路区段进行持续的稳定监测,所研发的 SMAIS 高速铁路自动化沉降监测系统就应用于该项目中。监测范围全长 290 m,覆盖了翠亨路刚构中桥和两侧的路基段落,布设测点 41 个,将沉降传感器安装于路肩和桥梁的悬臂板上,并为每个传感器设计了安全保护桶。同时,在线上还安装了自动化采集单元、工业计算机、无线发射器和采集软件,采集频次为每间隔 10 min 对所有测点进行一次自动测量,采集后即时将测量结果以报文的形式发送至线下的监控中心。线上沉降传感器(静力水准仪)和采集单元的安装现场如图 9 所示。



图9 线上沉降传感器(静力水准仪)和采集单元的安装

整个项目采用 SMAIS 系统进行数据采集、分析和预警。SMAIS 系统的测量精度可达 0.15 mm,自动化和人工的对比结果如图 10 所示。从图中可看出,二者十分接近,由于个别的人工测点与自动化测点位置存在一定的距离,因此个别点位有所差别,但整体线路断面的沉降变化趋势二者基本相同。由此可见,SMAIS 系统完全能够满足高铁工程的监测需求。该系统于 2012 年 6 月正式投入运营,并连续监测运营 1 年,系



系统运转良好,完全达到了预期的效果,目前 SMAIS 系统同时还在津秦客专等高铁中进行应用和推广。

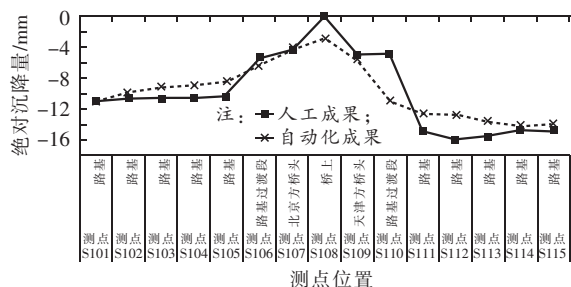


图 10 人工和自动化监测成果对比(线路纵断面)

## 5 结论

本文针对高速铁路沉降变形的监测和评估技术要求,自主研发了一套“高速铁路工程结构沉降及变形自动监测分析预警系统 SMAIS”,实现了对高速铁路桥涵和路基等工程结构的连续自动化监测,该系统的主要优点如下:

(1)建立了适用于高速铁路工程结构的高精度传感器采集子系统,保证了在复杂环境下,在高铁路基和桥涵上进行实时连续、稳定的数据采集,确保了监测精度。

(2)建立了监测数据的实时跟踪和远程网络的动态查询访问平台,实现了实时化、可视化、远程化的监测目标,在无人值守的情况下,可实现全天 24 h 的连续不间断自动化监测,节约了大量的人力。

(3)实时进行数据的采集、处理、存储和自动化报表,大大提高了监测分析和成果处理的工作效率。

(4)建立监测的预警子系统,实现了自动报警和报警后的预警信息分析功能,为信息化施工和科学决策提供指导。

(5)系统维护方便,运行成本低。

SMAIS 监测系统在京津城际武清站段的工程应用结果表明,该系统具有较强的稳定性和适用性,为高速铁路工程的自动化监测提供了一套高精度、实用、有效、可靠的监测分析工具,为科学指导施工和主管部门的决策提供了良好的管理平台。

## 参考文献:

[1] Ou Jinping. Some Recent Advances of Intelligent Health

Monitoring Systems for Civil Infrastructures in Mainland China [C] // Proc. of the First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan, Nov., 13 – 15, 2003:131 – 144.

[2] 冯良平,李娜,张革军,等. 中国长大跨桥梁结构安全监测系统研发现状及趋势[J]. 公路, 2009(5):176 – 181.

Feng Liangping, Li Na, Zhang Gejun, etc. Status Quo of Development and Trend of Safety Monitoring System for Long Span Bridge Structure in China [J]. Highway, 2009(5):176 – 181.

[3] 嵯一,王菲. 基于人工神经网络的混合梁斜拉桥智能诊断方法研究[J]. 铁道工程学报,2011(12):57 – 63.

Zhuo Yi, Wang Fei. Research on Intelligent Diagnosis Methods of A Hybrid Girder Cable – stayed Bridge Based on Artificial Neural Networks [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(12):57 – 63.

[4] 潘国荣,陈晓龙. 城市地铁施工中自动变形监测系统的研发及应用[J]. 测绘通报,2009(12):212 – 215.

Pan Guorong, Chen Xiaolong. Research and Application of Automatic Deformation Monitoring System in City Subway Construction [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009(12):212 – 215.

[5] TB 10621—2009,高速铁路设计规范(试行)[S].

TB 10621—2009, Code for Design of High Speed Railway(Trial)[S].

[6] 铁运[2012]83号,高速铁路无砟轨道修理规则(试行)[S].

Rail Transport [2012] No. 83, Ballastless Track of High – speed Railway Repair Rule[S].

[7] 陈善雄,余飞,刘绍波,等. 铁路客运专线沉降监测数据管理与分析预测集成系统研发[J]. 铁道标准设计, 2010(2):31 – 35.

Chen Shanxiong, Yu Fei, Liu Shaobo, etc. Development of Integrated Software System for Monitoring Data Management and Analysis Prediction for Settlement of Railway Passenger Dedicated Lines [J]. Railway Standard Design, 2010(2):31 – 35.

(编辑 曹淑荣)