

文章编号: 1674—8247(2017)06—0068—06

长大干线高速铁路自动化沉降监测系统研究

王 旭

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

摘 要:文章以石济客运专线与京沪高速铁路并行段沉降自动化监测工程为背景,从监测传感器选型、软件开发和方案设计三个方面对长大干线铁路自动化监测进行了系统研究。通过不同传感器技术指标比选,选择了光纤光栅式静力水准仪作为该项目的监测仪器。深入研究了高速铁路监测系统的功能需求、软件架构、滤波算法及分布式数据采集计算技术,针对长大干线铁路监测的特点开发了“高速铁路沉降及变形自动监测分析预警集成系统(SMAIS)”。在监测方案的设计上,根据安全评估计算的影响范围确定监测范围,根据规范规定的限值和安全评估计算结果确定监测预警值。研究成果在石济监测项目上进行了应用,获得了大量宝贵的实测数据,为今后高速铁路并行线间距的选取提供了参考。

关键词:高速铁路; 长大干线; 自动化监测; 沉降变形; 监测方案设计

中图分类号: U443.15⁺7

文献标志码: A

Research of Automatic Settlement Monitoring System for Long Trunk High Speed Railway

WANG Xu

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: Taking settlement monitoring project of parallel section of Shijiazhuang-Jinan passenger dedicated line and Beijing-Shanghai high speed railway as background, this paper system atically studies the automatic monitoring of long trunk railway from three aspects: hardware selection, software development and monitoring scheme design. Through comparison of different equipment technical indicators, fiber bragg grating static force level is chosen as the monitoring equipment of this project. A deep research on the functional requirements, software architecture, filtering algorithm and distributed computing technology of high-speed railway monitoring system is made. A software system named SMAIS is developed according to the characteristics of long trunk railway monitoring. On the design of the monitoring plan, monitoring scope is determined according to the influence range calculated by the safety assessment, and monitoring warning value is determined based on the limit value specified by the specification and the calculation result of the safety assessment. The research results have been applied in the monitoring project of Shijiazhuang-Jinan railway, and a lot of valuable measured data have been obtained, which provides a reference for the selection of parallel spacing of high-speed railway lines in the future.

Key words: high-speed railway; long trunk railway; automatic monitoring; settlement deformation; monitoring scheme design

收稿日期: 2017-07-05

作者简介: 王旭(1985-), 男, 工程师。

引文格式: 王旭. 长大干线高速铁路自动化沉降监测系统研究[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(6): 68-73.

WANG Xu. Research of Automatic Settlement Monitoring System for Long Trunk High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(6): 68-73.

近年来随着我国经济的快速发展,许多重要城市之间都在兴建高速铁路、客运专线等高等级铁路。为了节约宝贵的土地资源,新建铁路在选线时往往会在某些区间与既有铁路近距离的并行,而且在地方基础设施建设中,有许多新建的公路或大型管道在局部范围内与已建成的高等级铁路并行或立体交叉。这些临近高速铁路的施工,会对既有线造成附加沉降影响。高速铁路建设标准高、列车运行速度快,对线路的平顺性要求高,任何超出限值的变形都会危及行车安全。因此,采取充分有效措施避免临近工程施工对高速铁路造成影响,确保高速铁路行车安全变得尤为重要。上述工程实施期间对高速铁路进行监测,是其中最直接最有效的措施。

虽然国内在轨道交通领域有很多自动化监测系统的应用实例^[1-6],但是目前国内在高速铁路自动化监测领域尤其是长大干线铁路监测方面缺少成套技术和相应的软件。在硬件设备、软件系统、监测方案等方面面临着诸多技术难题,因此对长大干线自动化监测进行系统研究是具有重要意义的。

1 工程概况

新建石家庄至济南铁路客运专线是我国“四纵四横”快速客运网主骨架的重要组成部分太青客运专线的一部分,横贯我国华北地区,连接河北,山东两省省会石家庄市、济南市,经过地区为河北省石家庄市、衡水市、沧州市、山东省德州市、济南市,是西北与华北地区、华东北部地区客专交流主通道。

本工程主要针对德州市至济南市之间,京沪高速铁路与石济客专并行较近段落进行沉降变形自动化监测。新建石济客专自景德特大桥 D2K 189 + 486.41 里程处,经齐河段至济南西联络线济南西上联特大桥改右 XLDK 416 + 554.18 里程处与京沪高速铁路并行,并行线路总长 98.546 km,其中经过德州东站、平原东站、禹城东站 3 座车站。并行段落内,对应既有京沪高速铁路从沧德特大桥 K 304 + 843.80 至禹济特大桥 K 404 + 293.51,包含沧德特大桥、德禹特大桥,禹城线路所路基段,禹济特大桥以及黄河南引特大桥,并行范围如图 1 所示。



图1 石济客运专线与京沪高速铁路并行段示意图

2 沉降监测传感器选型

石济监测项目具有距离长、测点多、精度高、时间久的特点,对硬件设备具有很高的要求。

目前结构物变形监测仪器主要有高精度 GPS、激光变位仪和静力水准仪。GPS 设备要求安装在开阔场地,上方不能有任何遮挡,而且单台仪器价格较高,只适合个别关键点的监测,不适用于长距离干线铁路监测。激光变位仪在室外环境下的长期稳定性较差,高速列车经过时引起较大的振动也会对仪器测量精度产生显著影响,因此也不适用于本项目。静力水准仪对

环境要求低,而且比较经济,适合长大干线铁路的沉降监测。

静力水准仪的传感器有很多不同类型,在方案比选阶段,选取 3 种工程中常用的传感器进行对比分析。

2.1 光纤光栅静力水准仪

光纤光栅静力水准仪核心部件是光纤光栅传感器^[7]。光纤光栅技术是一门感知和传输被测量对象信号的新型传感技术。它以光波为载体,光纤为媒介,利用反射光波长的变化来测量液位变化从而得到被测结构物的沉降如图 2 所示。

光纤光栅静力水准仪的技术参数如表 1 所示。

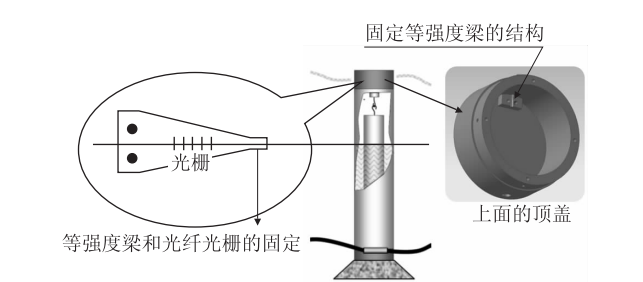


图2 光纤光栅静力水准仪示意图

表1 光纤光栅静力水准仪的技术参数

标准量程	150 mm
测量精度	0.1% FS
分辨率	0.1% FS
波长范围	1 525 ~ 1 565 nm
连接方式	冷接或熔接
外封装	不锈钢外壳铠装引线
安装方式	打孔或焊接安装
温度补偿形式	内置温补光栅
使用温度	- 30℃ ~ 80℃

2.2 振弦式静力水准仪

振弦式静力水准仪核心部件是振弦式传感器,这是一种以拉紧的金属弦作为敏感元件的谐振式传感器。当弦的长度确定之后,其固有振动频率的变化量即可表征弦所受拉力的大小,通过浮子的拉力变化来测量液位变化从而得到被测结构物的沉降如图3所示。

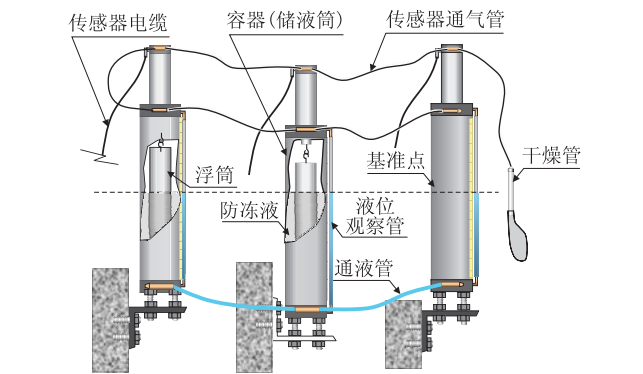


图3 振弦式静力水准仪示意图

振弦式静力水准仪的技术参数如表2所示。

表2 振弦式静力水准仪技术参数表

标准量程	50、100、150、300、600 mm
传感器精度	0.1% FS
传感器灵敏度	0.025% FS
温度范围	- 35℃ ~ + 80℃ (使用防冻液)

2.3 压差式静力水准仪

压差式静力水准仪核心部件为硅压阻式传感器,

它是利用单晶硅材料的压阻效应和集成电路技术制成的传感器如图4所示。

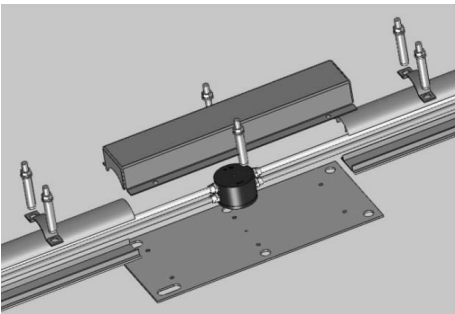


图4 压差式静力水准仪示意图

压差式静力水准仪的技术参数如表3所示。

表3 压差式静力水准仪的技术参数

精度	±0.5 mm
量程	0 ~ 1 000/1 800 mm
分辨率	0.2 mm
大气温度	- 40℃ ~ + 60℃
大气湿度	0% ~ 100% RH
供电电源	直流 12V
通信接口	单总线、RS - 485 串口

2.4 对比分析

针对以上备选传感器,从测量精度、分辨率、长期稳定性、耐久性、环境适应性等方面进行比较,结果如表4所示。

表4 监测传感器对比分析表

种类	光纤光栅静力水准仪	振弦式静力水准仪	压力式静力水准仪
精度	0.1% FS	0.1% FS	±0.5mm
分辨率	0.1% FS	0.025% FS	0.2mm
连接	冷接或熔接	焊接	焊接
温度	- 30℃ ~ + 80℃	- 35℃ ~ + 80℃	- 40℃ ~ + 60℃
优点	测量精度高,技术成熟	测量精度高、稳定、技术成熟	设备小巧,安装方便
缺点	光纤熔接费时费力	成本高,长段落监测布线困难	单区段内能够连接的仪器少
适用项目类型	监测范围长的并行段落	监测范围短的立交工点	监测范围短的并行段落

监测仪器选型应遵循以下原则:

(1) 自动化监测仪器应满足量程、测量精度、分辨率、灵敏度、长期稳定性、耐久性、环境适应性和经济性等要求。

(2) 自动化监测仪器应与自动化监测系统软件兼容,便于系统集成。

(3) 仪器可以方便地进行检定和校准。

根据石济监测项目的特点,参考以上对比分析,最终选择光纤光栅静力水准仪作为沉降监测仪器。

3 系统架构与软件开发

3.1 监测软件系统架构

针对长大干线高速铁路自动化监测项目的特点,科研团队自主开发了“高速铁路沉降及变形自动监测分析预警集成系统(SMAIS)”。该软件是一套“自动化、远程化、实时化、可视化”的系统软件,功能涵盖了数据采集、存储、计算、展示、预警等自动化监测的全过程^[8]。

为了解决大型监测项目面临的仪器设备种类多、数据标准不一致的难题,SMAIS 软件系统采用3层架构模式并提供了统一的数据接口标准。3层软件结构分别为“采集端软件”、“服务器端软件”和“客户端软件”,功能如表5所示。对于不同的仪器只要针对性的开发采集端软件使其满足数据接口要求,即可被系统兼容,而无需对服务器端和客户端软件做任何修改。

表5 SMAIS 系统软件组成

软件类型	运行位置	主要功能
采集端软件	监测现场的数据采集仪	控制数据的自动采集并将结果打包发送给服务器
服务器端软件	云服务器	监测数据的计算、分析、预警和存储以及响应客户端的查询请求
客户端软件	远程客户端计算机	数据的查询和项目的配置

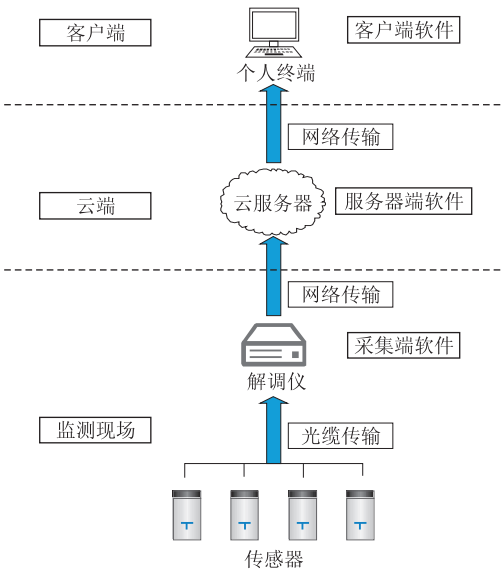


图5 系统架构图

3.2 分布式服务器架构

为了解决铁路长大干线自动化监测项目海量数据存储和查询的问题,SMAIS 系统采用了“分布式并行计算架构”,服务器端分为1台“主服务器”和多台“分布式服务器”(也称“子服务器”)。

主服务器负责用户权限的管理和数据的调度,子服务器负责数据的计算和储存。采集端程序采集到数据后,首先将数据包发送给主服务器,主服务器不对数据包做任何处理,而是将其分配给不同的子服务器处理。子服务器接收到数据包后进行解析、计算、分析和预警,这样就大大缓解了主服务器的计算和存储的压力。当客户端查询监测结果时,首先向主服务器发送查询请求,主服务器根据测点和服务器的对应关系将请求路由给相应的子服务器,子服务器再将查询结果返回给客户端。

分布式服务器架构将计算资源和带宽的压力分散给多个服务器,大大增强了系统的计算能力和扩展性,能够满足长大干线高速铁路监测对实时性和并发性的要求,分布式架构示意如图6所示。

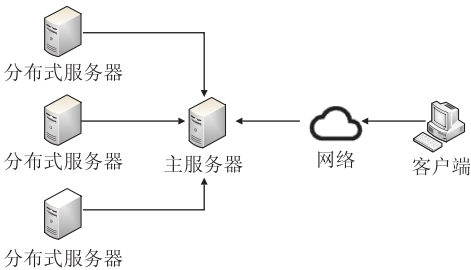


图6 分布式架构示意图

3.3 数据滤波算法

高速铁路行车速度快,列车经过时会引起结构产生较大的振动,这种振动会传导到监测设备上,引起监测数据大幅度的变化。高速铁路线路在白天行车密集,如果不设法剔除异常的数据点,那么数据异常波动会频繁地触发报警。

SMAIS 监测系统采用连续中位数滤波法作为剔除异常数据的方法。该算法采用某一时刻及其之前 $N-1$ 个时刻的测量值的中位数来替代该时刻的测量值。其中参数 N 可以根据测点所在位置的行车间隔以及结构形式等因素设置一个合适的值。

采用这种方法可以保证数据点的密度不降低,通过合理选取参数 N 也可以将数据变化的延迟控制在可接受的范围内,滤波的实际效果如图7所示。

4 监测方案设计

4.1 监测范围的确定

石济客运专线与京沪高速铁路并行线路总长98.546 km,在确定监测范围时,必须同时兼顾安全性和经济性。因此在方案设计之前,首先对并行段落的桥梁进行了细化的安全评估^[9-10],得到新建线施工可

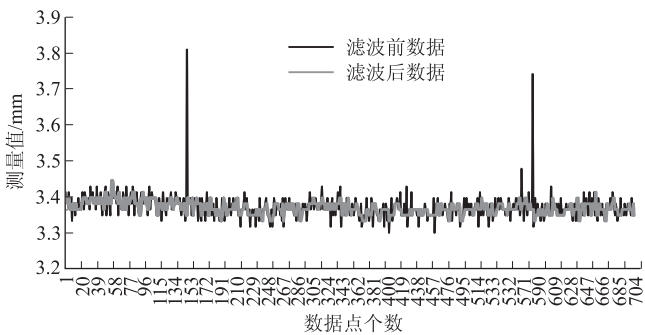


图7 实测滤波效果

能会对京沪高速铁路造成影响的线间距范围,然后将此线间距范围内的京沪高速铁路作为监测的对象,最终确定监测区段总长 48.518 km,共计 1 492 个桥墩。

沿线路方向布置一条监测线路,根据监测范围的分布情况,将监测线路划分为 25 个区段,每个监测区段设置 1 个基点。由于基点也安装在线路上,并不能保证基点的绝对沉降量为零,因此,在自动化监测的基础上,对每个监测基点定期进行人工校核,通过与沿线高程控制网联测确定基点的准确高程,进而修正各自动化监测测点的沉降变形值。

4.2 测点布置和组网

监测仪器的安装和走线方式即要考虑施工可行性和费用,又要注重仪器的保护及后期检查、维修和拆除的便利性。在方案设计时,对测点布置于墩身、墩顶和箱梁内这 3 种方式进行了比选,如表 6 所示,测点布置方案如图 8 所示。

表 6 测点布设方案比选

比选方案	方案一	方案二	方案三
布设位置	布置于墩身	布置于墩顶	布置于箱梁内
优点	安装较方便、费用低	矮墩安装方便	安装及布线方便、不易丢失、安装进度快,费用较低
缺点	受环境因素制约,布线难度大	高墩安装及布线困难,费用高	梁内安装,作业空间小
是否推荐	不推荐	不推荐	推荐

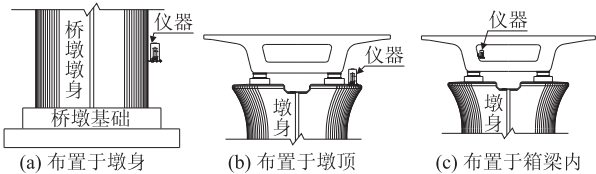


图8 测点布置方案

综合以上方案比选结果,考虑仪器安装的便捷性、可行性和安全性,同时要满足总体施工工期的要求,最终选择将静力水准仪测点布设在箱梁内部。

由于线路纵坡的影响,仪器联通的区段太长会导

致静力水准仪量程超限。因此,每隔一定的距离,设置一个转点断面。在转点断面处布置两台静力水准仪,如图 9 所示,这两台仪器之间不连接通液管,以使其保持各自不同的液面高度,但是通过刚性连接确保两者在竖向的位移相同。这样就可以将两个通液区段的沉降量联系起来。

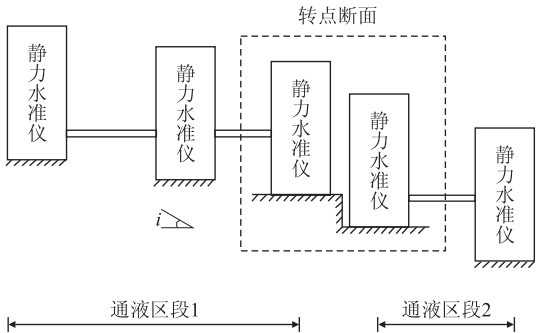


图9 监测转点断面示意图

本监测项目具有距离长、测点多的特点,为了保证采集传输的质量,沿整个监测区段铺设了一条主光缆。数据采集设备采用了 16 通道光纤光栅解调仪,每通道串联不超过 6 台静力水准仪,沿途共设置 25 台解调仪。所有解调仪采集到的数据通过主光缆传输到现场的监控中心后一同发送到云服务器,如图 10 所示。

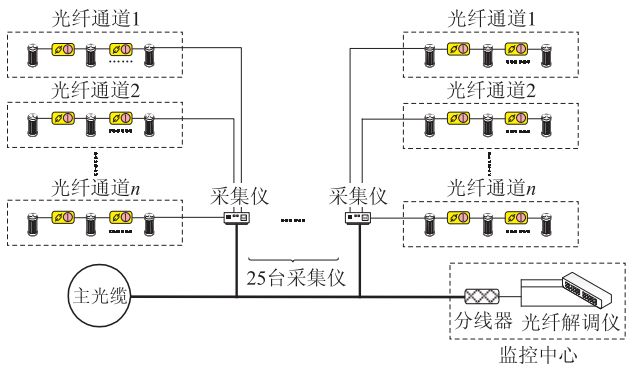


图10 现场组网方案

4.3 数据采集频次

光纤光栅传感器具备高速采集的能力,但是采集频次过高会对数据存储和分析产生不利影响。为了兼顾动态数据显示和数据的存储,SMAIS 监测系统采用了两套不同的采集方案。

方案一:采集设备以 10 Hz 频率采样,并将数据以点对点的形式直接发送给客户端,客户端软件完成数据的解析和显示,这些数据不储存在服务器上,当客户端软件关闭时数据将被丢弃。

方案二:采集设备以 5 min 的时间间隔连续采集,并将数据发送到云服务器,服务器完成数据解析并将

结果保存到数据库中,以待客户端查询。

方案一只有在客户端有高频动态数据显示请求的时候才会被执行,方案二在整个项目周期内一直在不停的执行。这样既可以实现动态数据的显示又可以避免服务器海量数据存储和计算的压力。

4.4 监测预警值的确定

高速铁路无砟轨道的平顺性要求高,对结构的不均匀沉降比较敏感。因此选取相邻桥墩的差异沉降量作为监测的预警指标,预警级别由高到低分为红色、橙色和黄色3级。

预警值的大小要结合相关规范^[11-12]和安全评估的结果确定,本工程采用的预警值计算方法为:

$$\text{黄色限值: } \Delta_{\text{黄}} = \Delta_{\text{初}} + \Delta_{\text{评估}} \quad (1)$$

$$\text{橙色限值: } \Delta_{\text{橙}} = (\Delta_{\text{规范}} - \Delta_{\text{初}} - \Delta_{\text{评估}} - \Delta_{\text{预留}}) \times 65\% + \Delta_{\text{黄}} \quad (2)$$

$$\text{红色限值: } \Delta_{\text{红}} = (\Delta_{\text{规范}} - \Delta_{\text{初}} - \Delta_{\text{评估}} - \Delta_{\text{预留}}) \times 85\% + \Delta_{\text{黄}} \quad (3)$$

式中: $\Delta_{\text{初}}$ ——结构已经发生的差异沉降量;

$\Delta_{\text{评估}}$ ——安全评估计算得到的桥梁差异沉降量;

$\Delta_{\text{预留}}$ ——考虑既有轨道不平顺度的安全储备值,本工程取1 mm;

$\Delta_{\text{规范}}$ ——为《高速无砟轨道线路维修规则(试行)》中给定桥梁差异沉降量容许值4 mm。

5 监测成果分析

本研究的成果已经成功应用在了石济客专与京沪高速铁路并行段沉降监测项目上,系统运行两年多来采集了海量的监测数据。选取石济客专和京沪高速铁路都是简支梁以及石济客专为新建(40+64+40)m大跨连续梁,京沪高速铁路是简支梁的两种典型工点的监测数据,如图11和图12所示,从监测成果中可以看出,新建石济客专对既有京沪高速铁路造成的附加不均匀沉降控制在1 mm之内,验证了石济客专与京沪高速铁路两线并行方案的合理性。

6 结论

(1) 光纤光栅式静力水准仪测量精度高,安装方便,适合应用于长大段落高速铁路的自动化监测项目。

(2) “高速铁路沉降及变形自动监测分析预警集成系统(SMAIS)”是一套“自动化、远程化、实时化、可视化”的监测系统,解决了长大干线监测项目中面临的难题,在石济客专监测项目中得到了成功的应用。

(3) 监测预警值的制定应该以规范规定的沉降限

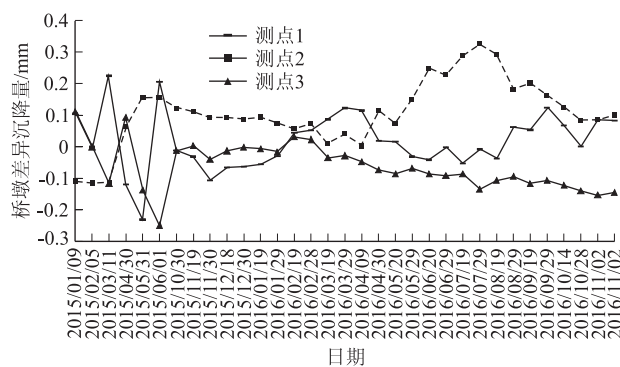


图 11 普通简支梁地段桥墩差异沉降时间-沉降曲线

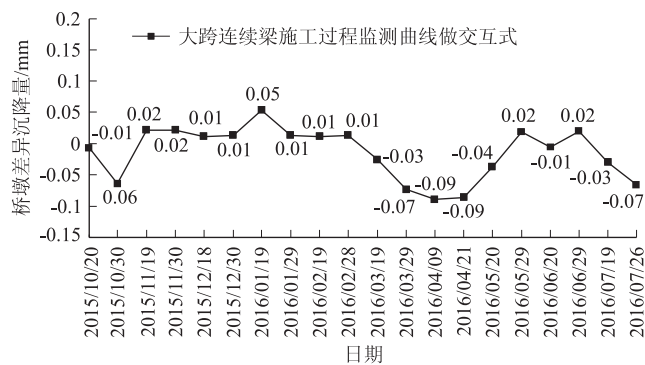


图 12 大跨连续梁地段桥墩差异沉降时间-沉降曲线

值和安全评估结果为依据。

(4) 监测成果验证了石济客专与京沪高速铁路两线并行方案的合理性。合理的线间距选择是保证并行段落既有线运营安全的必要条件,但与此同时线路附近堆载和抽水等其他因素依然可能造成既有线的沉降,因此,在施工过程中对既有线进行实时监测是十分有必要的。

参考文献:

- [1] 李明. 自动化监测技术在天津地铁3号线金狮桥站-天津站站盾构穿越高速铁路工程中的应用[J]. 隧道建设, 2014, 34(4): 368-373.
LI Ming. Application of Automatic Monitoring Technology in Construction of Shield Tunneling Across High-speed Railway at Tianjin Metro[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(4): 368-373.
- [2] Goh K. S. James, Jenkins Paul, 黄育君, 等. 自动化实时监测系统在中国台湾高速铁路浅埋隧道的应用[J]. 铁道标准设计, 2007(41): 194-199.
Goh K. S. James, Jenkins Paul, HUANG YuJun, et al. Application of Automatic Time Monitoring System in Shallow-Buried Tunnels of High-Speed Railways in Chinese Taiwan [J]. Railway Standard Design, 2007(41): 194-199.
- [3] 廖世芳. 戈壁地区高速铁路沉降变形监测与预测研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.

(下转第83页)

(上接第 73 页)

- LIAO Shifang. Research of Settlement Deformation Monitoring and Prediction of High-speed Railway in Gobi Region[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [4] 李晨. 铁路路基变形远程自动监测技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013.
- LI Chen. The Remote Automatic Monitoring Technology of Railway Roadbed Deformation [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2013.
- [5] 张振营. 轨道交通 BT 工程第三方监测技术的应用[J]. 铁道建筑技术, 2015, 42(2): 109-112.
- ZHANG Zhenying. Application of the Third-party Monitoring Technology in BT Project of Rail Transit[J]. Railway Construction Technology, 2015, 42(2): 109-112.
- [6] 傅瀚霆. 地铁施工对桥基沉降影响控制措施研究[J]. 铁道建筑技术, 2015(z1): 144-146.
- FU Hanting. Study on Control Measures of the Settlement Effect on Bridge Foundation Induced by Subway Construction [J]. Railway Construction Technology, 2015(z1): 144-146.
- [7] 王琴. 高速铁路连续弯梁桥光纤光栅结构监测技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- WANG Qin. The study on FBG monitoring technology of high-speed railway continuous curved beam bridge [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [8] 嵇一, 王旭, 张军. 高速铁路沉降自动化监测系统 SMAIS 的研发及应用[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(4): 10-15.
- ZHUO Yi, WANG Xu, ZHANG Jun. Development and Application of Automatic Monitoring System SMAIS for Settlement of High-speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(4): 10-15.
- [9] 孙宗磊. 石济客专临近既有高速铁路桥梁设计[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(2): 37-42.
- SUN ZongLei. Bridge Design near Existing High-speed Railway in Shijiazhuang-Jinan Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(2): 37-42.
- [10] 孙宗磊, 李梢. 石济客专桥梁下穿京沪高铁沉降影响分析[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(2): 53-57.
- SUN Zonglei, LI Qiao. Analysis of Settlement Influence on Beijing-Shanghai High-speed Railway Caused by Under-passing of Shijiazhuang-Jinan Passenger Dedicated Line's Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(2): 53-57.
- [11] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
- TB 10621-2014 Code for design of high speed railway [S].
- [12] 铁运[2012]83 号, 高速铁路无砟轨道修理规则(试行)[S].
- Tie Yun [2012] No. 83, Repair rule for ballastless track of high-speed railway [S].

(编辑: 赵立红 苏玲梅)