

文章编号:1005-0523(2014)02-0062-06

动态检测数据在转体桥挠曲变形监测中的应用

陶佳元¹,徐伟昌²,李振廷²,谭社会²

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2.上海铁路局工务处,上海 200071)

摘要:基于沪杭高铁转体桥的挠曲变形监测数据及上部轨道的动态检测数据,对比分析了转体桥挠曲变形幅值与动态检测长波高低不平顺幅值的关系,结果表明:挠曲变形幅值与长波高低不平顺幅值存在差异,但在主跨中心与边跨中心的变形趋势相同;在主跨中心与边跨中心处,挠曲变形幅值与长波高低不平顺幅值间的相关系数均超过0.97,呈现出高度相关性。根据动态检测长波高低数据,对转体桥主跨中心和两边跨中心处一年内的挠曲变形幅值进行估算,并与实际值对比,平均误差仅为1.7 mm。研究认为利用动态检测长波数据对转体桥挠曲变形进行推算,快速准确,是一种有效的辅助监测手段。

关键字:变形监测;转体桥;动态检测数据

中图分类号:U216.3;U446

文献标志码:A

铁路桥梁具有荷载大、动力作用明显、变形控制严等特点。在我国新建的高速铁路中,高架桥所占比例大,并且采用了较多的特殊结构和大跨度结构形式^[1],在提高建设质量的前提下,同时需要对运营期间的铁路桥梁的挠曲变形进行监测,以确保高速运行条件下的安全性、平稳性和乘车舒适性要求。

通过变形监测获得的大量资料,可以了解桥梁的变形现状以及变形规律,为后续的变形发展趋势预测提供科学的依据,当发生异常现象时,及时分析原因并采取相应改善措施。为保证桥梁变形监测的准确性和长期性,必须建立起具有较高精度,且稳定可靠的监测系统^[2]。目前,对于桥梁变形监测方法主要包括:水准测量法、摄影测量法、检测器测量法、空间测量法等。这些方法在测量精度、效率、连续性、灵活性和经济性等方面具有各自特点和适应性^[2-5]。

本文提出了一种基于动态检测长波数据的转体桥变形辅助监测方法,并验证了该方法应用于转体桥变形监测的可行性。

1 动态检测数据

动态检测综合车(简称动检车)是一种用来检测轨道几何状态动态检测设备,可以对线路的弹性变形和永久变形的叠加状态进行动态检测^[6-8],检测项目包括各种横向、垂向和复合不平顺、车体的横向和垂向加速度、钢轨磨耗以及钢轨表面伤损等^[9]。本文所采用的动态检测数据为高低不平顺,即钢轨顶面沿延长方向的凹凸不平顺。

以往动检车检测输出和评价的高低不平顺波长范围为1.5~50 m^[10],对于速度较低的线路,该波长范围足以反映高低不平顺对于行车安全性及舒适性的影响。而随着行车速度提高,需关注长波不平顺。仿真实验结果表明^[11]:在250~400 km·h⁻¹行车速度域,轨道高低不平顺在长波段(80~160 m)同样会出现敏感波长。目前,新型综合动检车所检测的长波波长可以达到70 m及以上。

收稿日期:2014-01-13

基金项目:铁道部科技研究开发计划基金项目(2011G21-E)

作者简介:陶佳元(1989—),男,硕士研究生,研究方向为轨道工务管理。

导师简介:许玉德(1965—),男,教授,博士生导师,研究方向为轨道工务管理。

高低不平顺检测数据可以通过软件转化为波形资料,图1为不同检测波长条件下的高低不平顺波形曲线。由图1可以看出:1.5~70 m高低不平顺幅值明显大于1.5~42 m高低不平顺幅值。这是因为长波检测数据的波形图结果能反映出轨道线下基础在大范围内的变形信息,正是长波检测数据的这一特点,为桥梁变形的监测提供了一种新的思路。

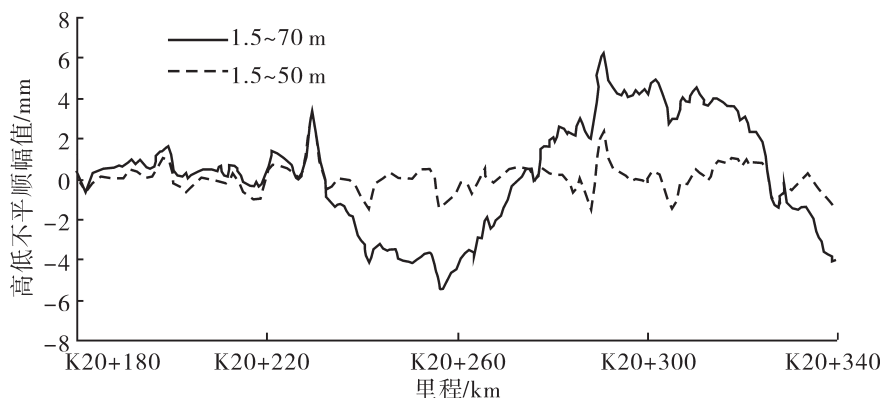


图1 不同检测波长下高低不平顺波形图

Fig.1 Waveforms of track vertical profile irregularity under different inspection wavelength

2 转体桥挠曲变形规律

为了研究利用动态检测数据对铁路桥梁变形实行监测的可行性,需要将已知的桥梁变形情况作为基准进而验证。沪杭高速铁路转体桥(K57+520—K57+858)为主跨160 m,两边跨88.8 m的自锚上承式转体拱梁。采用传统的水准测量法对转体桥挠曲变形进行了监测。根据文献[12]的变形监测结果,转体桥的挠曲变形规律如图2所示。转体桥的挠曲变形规律表现为:当环境温度上升时,主跨为上拱趋势,边跨为下挠趋势;当环境温度下降时,主跨为下挠趋势,边跨为上拱趋势。主跨范围内,主跨中心的挠曲变形最大,变形量约为50 mm;边跨范围内,边跨中心的挠曲变形最大,变形量约为30 mm。

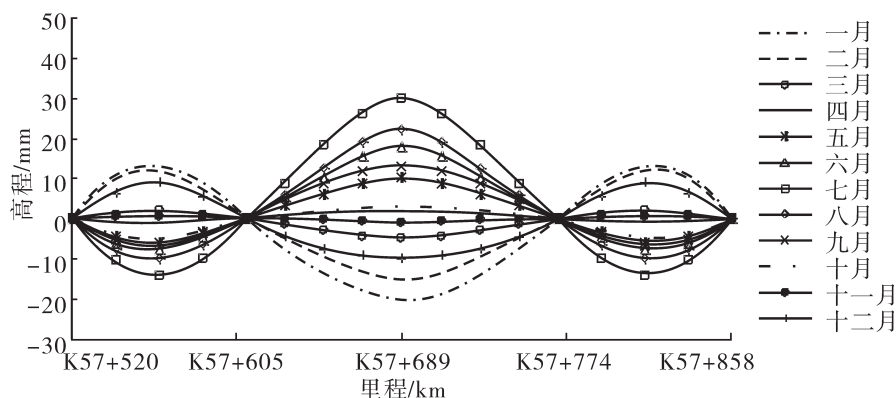


图2 转体桥年挠曲变形波形图

Fig.2 Deformation curves of the swing bridge in a year

分别对各个月份的转体桥挠曲变形波形(半波)进行函数拟合,以一月和七月的挠曲变形为例,拟合结果如式(1)和式(2)所示。

$$y = 36\,031x^3 - 10\,827x^2 + 683.49x + 0.341\,3 \quad (1)$$

$$y = -35\,816x^3 + 11\,562x^2 - 754.98x + 0.276\,8 \quad (2)$$

3 动态检测数据在转体桥变形监测中的应用

本文选取了沪杭高速铁路转体桥区段(K57+520—K57+848)于2011年10月至2012年10月的动态检

测长波数据(共计11组)加以分析,以期验证利用动检车数据对桥梁变形进行辅助监测的可行性。

3.1 波形图分析

对动态检测长波数据经过里程校核、去噪等处理后,其波形图如图3所示。

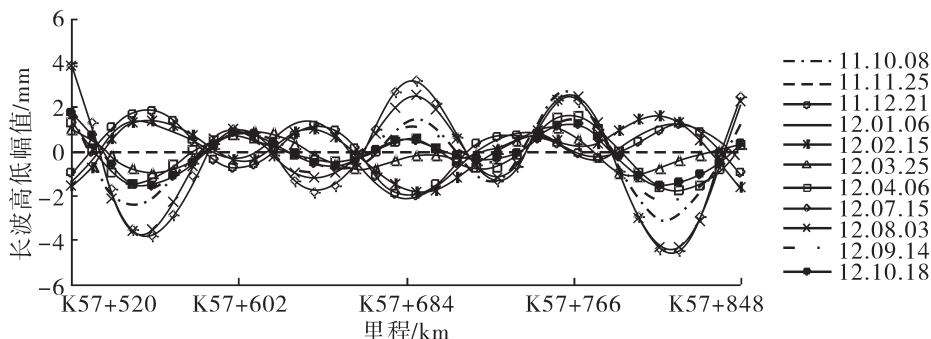


图3 转体桥区段长波高低波形图

Fig.3 Waveforms of long wavelength track vertical profile irregularity

通过对比图2和图3可以发现,动态检测长波高低不平顺的波形图与转体桥真实的挠曲变形波形图主要存在以下差异:①长波不平顺曲线波动频繁,波长较小;②长波不平顺曲线波动幅度为 $[-4\text{ mm}, 3\text{ mm}]$,远小于转体桥挠曲变形幅度;③长波不平顺曲线在边跨中心的波动幅度略大于主跨中心的波动幅度。

造成上述差异主要原因在于动检车的检测波长小于转体桥实际的挠曲变形波长,检测数据并不能完全反映转体桥的真实变形情况。但是,在转体桥主跨中心及边跨中心处,动态检测长波高低波形随着时间推移依然呈现出规律性的上拱及下挠变形,和转体桥挠曲变形规律相似。

假设主跨中心及边跨中心处的动态检测长波高低不平顺幅值与转体桥实际挠曲变形幅值存在相关关系,那么通过分析长波高低不平顺数据,可以推算转体桥主跨中心和两边跨中心处的挠曲变形。由转体桥挠曲变形规律可知,上述3处位置是转体桥挠曲变形的波形极值点,根据这3处位置的挠曲变形值,可以初步掌握转体桥的整体挠曲变形情况,从而实现利用动态检测长波数据对转体桥挠曲变形进行辅助监测的目的。

3.2 相关性分析

根据转体桥年挠曲变形曲线图(如图2),对应动检车检测日期并通过线性内插计算得到各日期下转体桥在主跨中心及边跨中心的实际挠曲幅值,利用统计学的方法量化动态检测长波高低幅值与转体桥挠曲变形幅值的相关程度,即通过“绘制散点图→回归分析→显著性检验”的流程,分析转体桥主跨中心及边跨中心处长波高低幅值与挠曲变形幅值的相关关系。

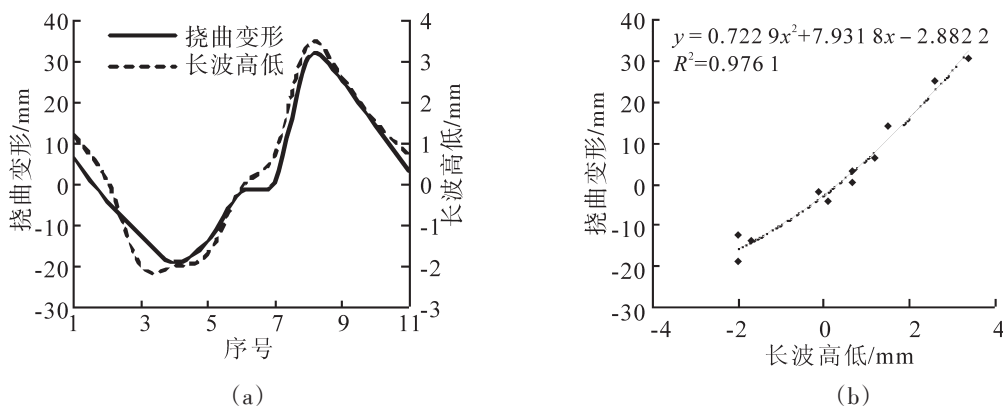


图4 主跨中心处长波高低幅值与挠曲变形幅值相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of long wavelength track vertical profile irregularity and bridge deformation in the center of main span

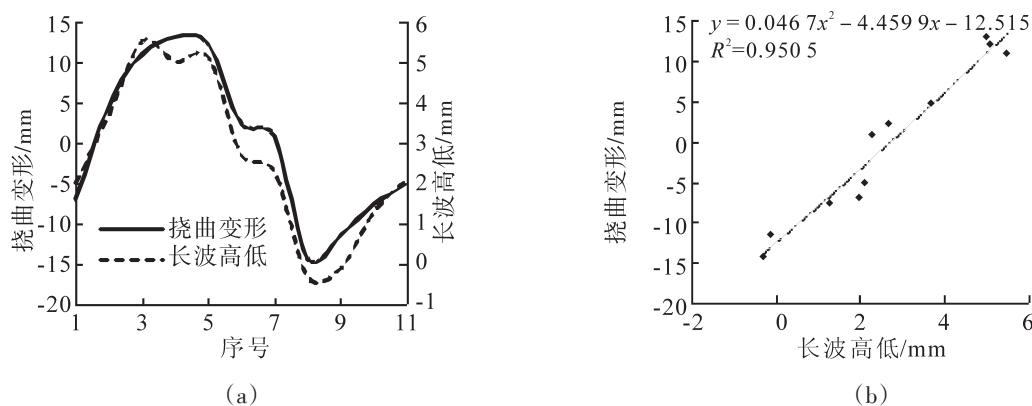


图5 边跨中心处(沪端)长波高低幅值与挠曲变形幅值相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of long wavelength track vertical profile irregularity and bridge deformation in the center of side span (Shanghai direction)

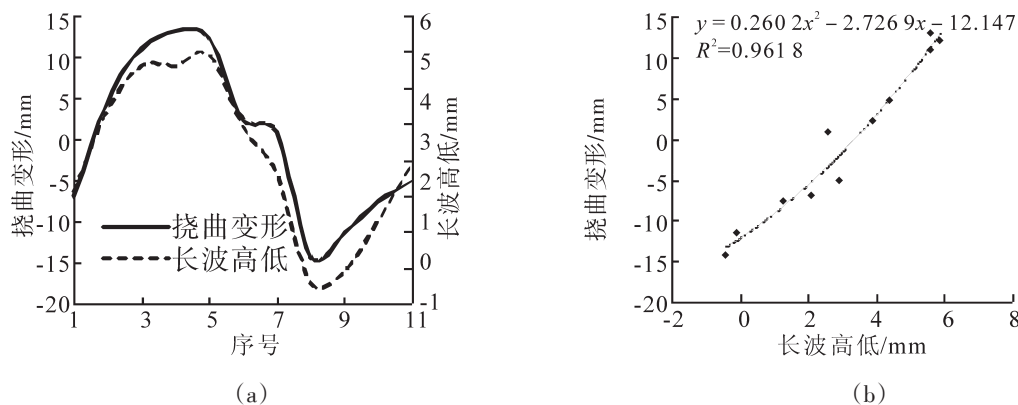


图6 边跨中心处(杭端)长波高低幅值与挠曲变形幅值相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of long wavelength track vertical profile irregularity and bridge deformation in the center of side span (Hangzhou direction)

图4至图6反映了转体桥主跨中心以及两边跨中心处长波高低幅值与挠曲变形幅值的相关程度:长波高低幅值与挠曲变形幅值变化曲线图直观地表现了两者的变形趋势;其相关系数较高(分别为0.988 0, 0.974 9和0.980 7)。采用方差齐性检验(F 检验)对幅值数据进行显著性检验,结果表明主跨中心以及两边跨中心处的长波高低幅值与挠曲变形幅值的相关程度均很显著,即 $F > F_{\alpha=0.01}$ (检验结果如表1所示)。

表1 相关性分析结果

Tab.1 Results of correlation analysis

位置	相关系数	计算的 F 值	回归方程表达式
主跨中心	0.988 0	76.80	$Y_1 = 0.7229x_1^2 + 7.9318x_1 - 2.8822$
边跨中心(沪端)	0.974 9	23.34	$Y_2 = 0.0467x_2^2 - 4.4599x_2 - 12.515$
边跨中心(杭端)	0.980 7	18.65	$Y_3 = 0.2602x_3^2 - 2.7269x_3 - 12.147$
相关检验阈值 $R_{\alpha=0.01} = 0.735$			F 检验阈值 $F_{\alpha=0.01} = 4.85$

3.3 应用分析

由相关性分析可知,在转体桥主跨中心与边跨中心(沪端、杭端),长波高低不平顺幅值与挠曲变形幅值均呈现出高度相关性,所以,可利用动态检测数据对转体桥挠曲变形进行辅助监测。以下利用回归方程计算转体桥主跨中心和两边跨中心的挠曲变形值,分析不同时间段的估算值和实际值误差,结果如图7

所示。

表2 转体桥挠曲变形估算值与实际值误差

Tab.2 The errors between predictive values and actual values

序号	上行主跨中心挠曲变形量/mm			上行边跨中心挠曲变形量(沪端)/mm			上行主跨中心挠曲变形量(杭端)/mm		
	估算值	实际值	误差	估算值	实际值	误差	估算值	实际值	误差
1	7.7	6.3	-1.4	-3.4	-7.0	-3.6	-5.3	-7.0	-1.7
2	-2.1	-4.2	-2.1	4.6	4.7	0.1	4.9	4.7	-0.2
3	-15.9	-12.4	3.5	13.4	10.9	-2.5	11.3	10.9	-0.4
4	-15.9	-19.1	-3.2	11.0	13.0	2.0	11.3	13.0	1.7
5	-14.3	-14.0	0.3	11.4	12.1	0.7	13.0	12.1	-0.9
6	-3.7	-1.9	1.8	-0.1	2.3	2.4	2.4	2.3	-0.1
7	3.0	0.5	-2.5	-2.0	0.8	2.8	-3.3	0.8	4.1
8	32.4	30.5	-1.9	-13.8	-14.2	-0.4	-13.2	-14.2	-1.0
9	22.6	25.1	2.5	-13.0	-11.4	1.6	-12.4	-11.4	1.0
10	10.6	13.9	3.3	-6.6	-7.6	-1.0	-8.2	-7.6	0.6
11	3.0	3.0	0.0	-2.9	-5.1	-2.2	-2.1	-5.1	-3.0

以上行线主跨中心和两边跨中心的长波高低数据为例,根据表1中的回归方程表达式,估算转体桥挠曲变形幅值。对比一年内挠曲变形量的估算值与实际值,平均误差仅为1.7 mm,因此利用动态检测数据对转体桥挠曲变形实行监测是可行的。

4 结论

本文提出了利用动态检测长波数据对桥梁变形进行监测的方法,并对该方法的可行性进行了分析,结论如下:

- 1) 由于动检车检测波长与桥梁实际的挠曲变形波长不匹配,长波高低波形图并未真实反映桥梁实际挠曲变形情况,但长波高低幅值与桥梁挠曲变形幅值两者变形趋势相同。
- 2) 转体桥主跨中心以及两边跨中心处,长波高低幅值与挠曲变形幅值间的相关系数达到0.97以上,呈现出高度相关性。
- 3) 利用回归方程,对转体梁主跨中心处一年内的挠曲变形幅值进行估算,并与实际值对比,平均误差仅为1.7 mm。

综上表明,利用动态检测数据对转体桥挠曲变形实行监测是可行的,能够作为一种有效的辅助监测手段。

参考文献:

[1] 郑健. 中国高速铁路桥梁建设关键技术[J]. 中国工程科学, 2008, 10(7):18-27.
[2] INAUDI D, CASANOVA N, VURPILLOT S. Bridge deformation monitoring with fiber optic sensors[C]//IABSE symposium-Rio de Janeiro-August, 1999:25-27.

- [3] 曹诗荣. 大型桥梁挠度变形监测方法的分析[J]. 地理空间信息, 2010, 8(2):137-139.
- [4] 赵宗源, 姜凤岐, 尹国学. 浅谈桥梁变形成因及观测方法[J]. 森林工程, 1999, 15(1):52-53.
- [5] KALOOP M R, LI H. Monitoring of bridge deformation using GPS technique[J]. KSCE Journal of Civil Engineering. 2009, 13(6):25-27.
- [6] 赵景民. 无砟轨道施工测量与检测技术[M]. 北京:人民交通出版社,2011:136-140.
- [7] 许玉德, 李海锋, 戴月辉. 轨道交通工务管理[M]. 上海:同济大学出版社, 2007:24-26.
- [8] 乔小雷. 轨检车检测技术的比较研究[J]. 城市轨道交通研究, 2009,12(6):33-39.
- [9] 王庆伟. 4G型轨检车与5型轨检车检测原理的对比分析[J]. 上海铁道科技, 2012(4):49-51.
- [10] 毛晓君, 许玉德, 周宇. 基于四点弦测法的轨面不平顺检测及复原方法[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(5):13-17.
- [11] 高建敏, 翟婉明, 王开云. 高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波长研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7):83-88.
- [12] 许玉德, 陶佳元. 沪杭高铁160 m转体梁竖向变形规律及轨道几何形位控制技术研究[R]. 上海:同济大学, 2013:14-15.

Application of Dynamic Inspection Data in Deformation Monitoring for the Swing Bridge

Tao Jiayuan¹, Xu Weichang², Li Zhenting², Tan Shehui²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Railway Bureau Works Department, Shanghai 200071, China)

Abstract: According to the deformation monitoring data of the swing bridge on Shanghai-Hangzhou high-speed railway and the dynamic inspection data, the relationship between bridge deformation and long wavelength irregularity of track vertical profile is analyzed. The contrast results show as follows: there exist differences in deformation and long wavelength irregularity of track vertical profile, while the changing trend in main span and in side span is the same; the correlation coefficients of deformation and long wavelength irregularity of track vertical profile are above 0.97 in the center of main span as well as side span. Deformation of the swing bridge in one year is estimated with the dynamic inspection data of long wavelength irregularity of track vertical profile. In comparison with the error analysis of actual value, the average error is only 1.7mm. It is suggested that estimating deformation of the swing bridge by dynamic inspection data of long wavelength irregularity of track vertical profile is an effective method for deformation monitoring.

Key words: deformation monitoring; swing bridge; dynamic inspection data