

文章编号: 1006—2106(2010)07—0020—05

无砟轨道的误差组成及其权值初步分析*

赵东田**

(中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

摘要: 研究目的: 对无砟轨道的误差源和误差传递规律进行分析, 提出降低误差的相应措施, 最大限度的降低误差传递和无砟轨道施工误差, 提高无砟轨道初始精度, 保证轨道综合质量。

研究结论: 通过对无砟轨道误差源进行的定性、定量分析, 其合成误差中各分项的权值是动态变化的, 经研究提出了其权值分配; 施工中应选择合理的施工方案、重视扣件系统管理、保证轨道测量的可靠; 以工程技术控制为主线, 将工序、标准落实到每个工作岗位, 采用先进的设备避免误差传递和积累, 最终保证无砟轨道工程质量。

关键词: 无砟轨道; 分项误差; 权值分布; 合成误差; 评价改进; 轨道初始精度

中图分类号: U213.2+44 文献标识码: A

Analysis of Error Composition and Weight Value of Ballastless Track

ZHAO Dong-tian

(China Railway 18th Bureau Group Co. Ltd. Tianjin 300222, China)

Abstract: Research purposes: This paper analyzes the error resource and error transferring regulation of ballastless track and offers the measures for reducing the error for the purposes of reducing the error transfer and the construction error of ballastless track, improving the accuracy of initial ballastless track and ensuring the comprehensive quality of track.

Research conclusions: From the qualitative and quantitative analyses it is known the weight values of all sub-items are variable and the distribution of the weight values are offered through the study. In the course of construction, the rational construction scheme should be chosen, the attention should be paid to the fastening management and the measurement reliability of track should be ensured, the construction technology should be taken as the control sector, the construction procedure and standard should be implemented to every job, and the advanced construction machinery should be used to avoid the error transfer and accumulation and guarantee the construction quality of ballastless track.

Key words: ballastless track; sub-item error; weight value distribution; combined error appraisal and improvement; track initial precision

无砟轨道的检测数据和精度受到诸多随机因素的影响^[1-4], 需要准确掌握各项误差存在的规律, 进而严格的控制、最大限度的降低误差。

国外无砟轨道施工完成后也存在一定比例的后期调整, 但是, 我国无砟轨道后期调整量普遍高于国外比例。目前, 我国专家学者在无砟轨道精密测量控制网、

机具设备、施工工艺和轨道调整等方面都取得了很多学术理论、设计思想、实践经验^[1-12], 使得我国技术水平取得长足进步。之前作者就无砟轨道的全面质量管理、过程控制标准、系统控制、重视轨道后期维护等方面提出了一些观点和认识, 本文结合秦沈线、温福线、宜万线、武广线、福厦线、襄渝二线等铁路无砟轨道施

* 收稿日期: 2010-03-26

** 作者简介: 赵东田, 1972年出生, 男, 教授级高级工程师。

工经验和教训,对误差源和误差传递规律进行分析,提出降低误差的相应措施,以提供高速行车的初始稳定轨道结构和平顺的运行表面,消除相应敏感波长的线路不平顺,保证旅客舒适度。文章以误差传递比较复杂的 CRTS 型双块式无砟轨道为例进行分析,为建立和优化多目标精度控制和深入研究误差传递规律提供思路。

1 误差及误差传递

误差是某未知量的观测值与其真值的差数,计算误差时,用观测值的最或然值代替真值(是接近于真值的最可靠值)。为便于分析,从系统误差和随机误差等方面以目标函数 $f(x)$ 形式来表示换铺长钢轨和线路锁定后的检测最终误差。表示式为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n K_i [\phi(x) + \epsilon(x)] - g(x) \quad (1)$$

式中 $f(x)$ ——轨道静态检测数据, $\phi(x)$ 为轨距、 $\phi(x)$ 为中线、 $\phi(x)$ 为高程、 $\phi(x)$ 为水平、 $\phi(x)$ 为轨向、 $\phi(x)$ 为高低;

$\sum_{i=1}^n K_i [\phi(x) + \epsilon(x)]$ ——施工中的各项误差的组合, K 为影响权值、 ϕ 为系统误差、 ϵ 为随机误差、 n 为误差存在项数、 $g(x)$ 为线路锁定后钢轨自顺功能可消除的部分误差。

1.1 误差源

静态检测主要指标有轨距、高程、水平、中心线、轨向、高低。主要存在项有:施工方案、精密控制网精度、底部沉降变形、轨排组装、扣件系统、钢轨偏差、测量误差、混凝土浇筑影响、道床板质量状态、长钢轨铺设和线路锁定质量、行车影响、静态与动态测量数据的检测差异等。

1.2 误差的组成及分析

轨道最终误差是各阶段产生的各种误差的组合,无论是理论分析还是实践验证,各种误差对轨道轨距、中线、波长等参数的影响权值是不同的,需要分开研究。

1.2.1 产生制造的误差

1.2.1.1 钢轨,包括循环使用的工具轨(即工装)和换铺到线路上的正式钢轨两类。作为高速铁路和客运专线上使用的钢轨断面尺寸允许偏差:高度 $\pm 0.6 \text{ mm}$ 、轨底宽度 $\pm 1 \text{ mm}$ 等。

对正式钢轨,应按照检验频率检查,定期、定批在现场复查确认。对循环使用的工具轨,对轨道结构最

终的合成误差影响大,所占权值也大,应控制严格,钢轨高度偏差不大于 0.3 mm 。

1.2.1.2 扣件类的铁垫板为铸铁制造,其离散性比较大,根据检测统计,有 60% 的偏差达到 $0.4 \sim 0.7 \text{ mm}$ 、5% 的偏差达到 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}$ 、有的甚至达到 2 mm 。同时绝缘缓冲垫板和轨下橡胶垫板也存在一定的小偏差。铁垫板的轨距调整量可在 $+12 \sim -12 \text{ mm}$ 范围内无级调整,若不加以控制,安装后就会导致轨距和中线 40% ~ 60% 偏差达 $2 \sim 6 \text{ mm}$ 、甚至可达 12 mm 以上。

综上所述,轨排装虽然是一道很简单的工序,但它产生的误差却很大,应将其误差消除在道床板混凝土浇筑前。

1.2.2 测量仪器的系统误差

系统误差指在相同的观测条件下,对其进行的一系列观测,数值大小和正负符号固定不变,或按一定规律变化的误差。无砟轨道系统误差主要存在于三级精密控制网和轨检仪中。系统误差具有累积性,对观测结果影响很大,必须采用适当的措施消除或降低其影响:

- (1) 观测前对仪器进行检校,确保仪器几何轴线关系的正确性;
- (2) 全站仪设站尽量在 CPⅢ 点中间,距 CPⅢ 点的长度不应小于 15 m ;换站测量时要联测 3 对 CPⅢ 点;
- (3) 对观测值加以改正,避免温度的影响;
- (4) 进行冗余观测和平差分析评估。

1.2.3 施工操作误差

现代管理理论认为,人的因素是第一位的,先进的设备和仪器是基础,而测量人员的思想素质、技术水平和责任心则是检测质量的重要保证^[13]。总结武广线的精调经验^[7],可以说,轨道调整工作的成败,不取决于对精调技术掌握的熟练程度,而决定于现场管理的严谨性和管理水平。

1.2.3.1 测量示值误差。仪器搬运振动后,如不进行水平检核,会造成示值误差,如果检核补偿不到位,高程、中线的示值与真值间的偏差会达到 2 mm 。环境条件差,会造成仪器稳定性差,对 CPⅢ 复测,棱镜安装、仪器支立状态不细致,达不到操作要求,测量数据也会出现偏离其真值 2 mm 以上的误差。

1.2.3.2 轨道的调整误差。依据偏差逐步消除原则^[14],轨道通过准确就位、粗调和精调 3 个步骤调整,逐步达到较精确的三维定位,整体趋于均匀和平顺。如果轨道调整次数过少,会导致一次调整量大,工具轨产生塑性变形,牵动前后调整点发生变化,加大了误差。不合理的操作一般会增大误差值 0.3 mm 甚至达

到 1 mm 以上。

1.2.4 混凝土浇筑产生的误差

1.2.4.1 工具轨法。若支撑系统刚度不足,混凝土浇筑对轨距、中线、高程、轨向等参数的影响比较大。

1.2.4.2 轨道组合排架法^[14-15]。轨距误差可严格控制在 1 mm 以内,操作人员和混凝土浇筑对中线、高程、轨向等参数的影响一般也可控制在 0~0.5 mm 以内。该工法对合成误差的影响主要取决于排架加工误差和调整技术。

1.3 误差传递

1.3.1 静态

根据随机量之和的方差 $D(\xi + \eta) = D(\xi) + D(\eta) + 2K_{\xi\eta}$ (其中, $K_{\xi\eta} = \rho\sigma_1\sigma_2$, 为 ξ 、 η 的相关系数) 公式对轨距、中线、高程、轨向、高低、水平的简单分析(参考表 1)。如:高程最终误差主要由测量示值误差、仪器系统误差、测量操作误差、扣件和钢轨制造

误差、混凝土浇筑影响和数据顺接处理误差组成。

1.3.2 动态

一般来讲,当静态检测良好、精度控制比较高、扣件联结状况优良^[16-20],过程施工控制都到位的情况下,动态检测比较容易通过。动态调整是根据轨道动态检测情况对轨道局部缺陷进行修复,进一步优化轨道线型,使轮轨关系匹配良好。

1.3.3 误差的权值

误差的来源和大小对轨道几何参数的影响权值是不同的,不同的优化方案和作业水平也从另一方面影响着其权值的大小;不同的施工队伍和阶段及环境状况,合成误差中各分项的权值是动态变化的。根据对影响因素的分析、公式推导和发生的概率,结合大量的现场统计数据,初步提出了其权值分配以供参考(表 1)。

表 1 分项误差的权值分布表

轨道参数	合成误差	施工方案	钢轨制造、打磨误差	扣件制造误差	扣件安装(匹配)误差	仪器系统误差	测量操作误差	测量示值误差	数据顺接处理	混凝土浇筑影响	钢轨自顺功能可消除的误差影响
轨距	1	组合轨道排架法	0.2	0.1	0.4	—	—	0.2	—	0.1	小
中线	1		—	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	小
高程	1		0.2	—	—	0.1	0.3	—	0.2	0.2	大
水平	1		0.4	—	—	—	0.4	—	—	0.2	小
高低	1		0.4	0.1	0.1	0.2	—	—	0.2	—	大
轨向	1		0.3	—	0.3	0.2	—	—	—	0.2	大
轨距	1	工具轨法	0.2	—	0.1	—	—	0.1	—	0.6	小
中线	1		—	—	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	小
高程	1		0.2	—	—	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	大
水平	1		0.4	—	—	—	0.4	—	—	0.2	小
高低	1		0.4	0.2	—	0.1	—	—	0.1	0.2	大
轨向	1		0.2	—	0.3	0.2	—	—	0.1	0.2	大

2 减少合成误差的相应措施

要充分应用控制论、信息论的手段来系统把握各施工环节^[21-22],保证无砟轨道综合施工质量。

2.1 减少各分项误差

2.1.1 研究编制施工方案起点要高,明确工序精度控制指标,分层次控制误差积累,最大限度的降低各分项误差。

2.1.2 合理选择、使用、保护好测量仪器,混凝土浇筑设备,轨排精调支撑固定系统。

2.1.3 仔细观测和研究工装设备、混凝土品质、测量方法产生的误差大小,掌握测量数据的科学评判和合理处理技术。

2.1.4 精选工具轨, WJ-7 型扣件原位留用,注意组

装顺序及操作要点。

2.1.5 高度重视 CPII 的评估,轨检仪校定补偿,搭接段顺接段的测量数据正确处理等。

2.1.6 确保测量数据真实可靠。

2.1.7 换铺长钢轨、应力放散和锁定规范,钢轨焊接满足平顺标准;重视轨道维护。

2.1.8 轨道调整后对扣件状态进行复查确认。扭力矩,轨距块与钢轨和挡肩的间隙达到标准。

2.2 重视理论分析,提高各项数据的综合评判和正确处理能力

观测值接近真值的程度,称为准确度,愈接近真值,其准确度愈高。一组观测值之间相互符合的程度(或其离散程度)为精密度。准确度与精密度两者均高的观测值才称得上高精度的观测值。

系统误差对观测值的准确度影响极大, 在观测前, 认真检校仪器, 观测时采用经过分析论证的观测法, 观测后对观测的结果加以计算改正, 消除系统误差或减弱至最低可以接受的程度。根据偶然误差的特性对观测值进行数学处理和判断, 求出最接近于未知量真值的估值, 来评定观测结果质量。

在一定的观测条件下, 偶然误差的绝对值不会超过一定的限度。根据数理统计和误差理论, 在大量等精度观测中^[22], 偶然误差绝对值大于 2 倍中误差出现的概率仅为 4.6%; 大于 3 倍中误差出现的概率仅为 0.3%。实际测量中可取 2 倍中误差作为容许误差进行评判分析, 观测值不可靠或出现了错误, 应舍去不用, 尤其是在钢轨接头和沾染灰尘部位, 最好能在现场当即判断正确取值。

3 结论

(1) 无砟轨道施工精度和科学的维护对后期轨道综合整理影响巨大, 是轨道原始精度的基础, 控制的源头。

(2) 对各阶段的误差源进行定量或定性分析, 并结合其权值分配, 采取相应强化措施, 才能达到合成误差最小。

(3) 现场应用测量理论、系统控制理论、信息管理方法、实验数据分析方法和重视人的因素等综合手段, 才能保证无砟轨道工程质量。

参考文献:

- [1] 卢祖文. 树立全新建设理念建设一流客运专线[J]. 铁道工程学报, 2005(1): 1—9
Lu Zuwen. Establishment of Completely New Concept for Building First-class Passenger Dedicated Line[J]. Journal of Railway Engineering Society 2005(1): 1—9
- [2] 何华武. 无砟轨道技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005
He Huawu. Ballastless Technology [M]. Beijing China Railway Publishing House 2005
- [3] 卢祖文. 客运专线铁路轨道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008
Lu Zuwen. Passenger Railway Track Engineering [M]. Beijing China Railway Publishing House 2008
- [4] 赵东田, 王铁成, 刘学毅, 等. 板式轨道 CA 砂浆的配制和性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学版), 2008(7): 22—28
Zhao Dongtian, Wang Tiecheng, Liu Xueyi, etc. Configuration and Performance of CA Mortar for Ballastless Slab Track [J]. Journal of Tianjin University 2008(7): 22—28
- [5] 金守华. 系统理解客运专线标准体系树立全新铁路建设理念[J]. 铁道建筑技术, 2005(2): 1—8
Jin Shouhua. Get An all-round Understanding of the Standard System for Passenger Dedicated Railway and Establish a New Concept of Railway Construction[J]. Railway Construction Technology 2005(2): 1—8
- [6] 朱颖. 客运专线无砟轨道铁路测量技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008
Zhu Ying. Ballastless Track Measurement [M]. Beijing China Railway Publishing House 2008
- [7] 伍林. CRTS₂ 双块式无砟轨道精调技术研究[J]. 铁道标准设计, 2010(1): 74—79
Wu Lin. Fine Tuning Technique for CRTS₂ Double Block Ballastless Track [J]. Railway Standard Design 2010(1): 74—79
- [8] 赵国堂. 客运专线轨道动态检测中应注意的几个技术问题[J]. 中国铁路, 2005(4): 19—21
Zhao Guotang. Track Dynamic Testing should be Noted that Several Technical Problems [J]. China Railway 2005(4): 19—21
- [9] 赵坪锐. 板式无砟轨道动力学性能分析与参数研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003
Zhao Pingrui. Slab Track Dynamic Performance Analysis and Parameter of [D]. Chengdu Southwest Jiaotong University 2003
- [10] 江成, 林之珉. 高速铁路无砟轨道结构的试验研究[J]. 中国铁路, 2000(7): 22—24
Jiang Cheng, Lin Zhimin. Test and Research on the Ballast-free Track Structure for High-speed Railway [J]. China Railway 2000(7): 22—24
- [11] 张梅, 王晓洲, 沈东升, 等. 客运专线无砟轨道施工手册[K]. 北京: 中国铁道出版社, 2009
Zhang Mei, Wang Xiaozhou, Shen Dongsheng, etc. Ballastless Track Construction Manual [K]. Beijing China Railway Publishing House 2009
- [12] 卢祖文. 高速铁路轨道技术综述[J]. 铁道工程学报, 2007(1): 1—9
Lu Zuwen. Overall Comments on Track Technology of High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society 2007(1): 1—9
- [13] 王行广. 检测质量控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002
Wang Xingguang. Inspection Quality Control [M]. Beijing China Railway Publishing House 2002
- [14] 赵东田. 双块式无砟轨道施工质量控制技术及措施[J]. 铁道工程学报, 2009(5): 24—27
Zhao Dongtian. Quality Control Technology and Measure for Double-slab Ballastless Track [J]. Journal of Railway Engineering Society 2009(5): 24—27

- [15] 赵东田, 孙晖. CRTSⅠ双块式无砟轨道综合整理技术[J]. 铁道标准设计, 2009(11): 28—30
Zhao Dongtian Sun Hui Technology for Comprehensive Trimming of CRTSⅠ Double Block Ballastless Track[J]. Railway Standard Design 2009(11): 28—30
- [16] 段昌炎, 邹振华, 赵东田, 等. 创时速 321.5 公里客运专线长轨铺设综合技术[R]. 武汉: 中铁十一局集团有限公司, 2005
Duan Changyan Zou Zhenhua Zhao Dongtian et al Record Speed of 321.5 km Long Track—laying Passenger Integrated Technology [R]. Wuhan China Railway 11th Bureau Group Co. Ltd 2005
- [17] 赵东田. 高速铁路精密控制网布设和量测分析[J]. 山东大学学报(理学版) 2009(12): 47—50
Zhao Dongtian High-speed Rail Networks and Precise Control of Measurement and Analysis [J]. Journal of Shandong University (Natural Science) 2009(12): 47—50
- [18] TJBGF—2007/2008 客运专线双块式无砟轨道组合轨道排架法施工工法[Z].
TJBGF—2007/2008 Construction Method of Combined Rail Frame for Passenger Track Double Block Ballastless Track [Z].
- [19] 赵东田, 朱鹏飞, 上官涛, 等. 隧道双块式无砟轨道的控制技术和提高精度措施[J]. 现代隧道技术, 2009(9): 118—123
Zhao Dongtian Zhu Pengfei Shang Guantao et al Control Technology and Measures to Improve the Accuracy for Double-slab Ballastless Track of Tunnel Modern Tunneling Technology 2009(9): 118—123
- [20] 赵东田. 无砟轨道在铁路建设中的应用分析[C]//铁道部工程设计鉴定中心. 中国铁道学会编著论文集. 武汉: 长江出版社, 2005(1): 88—91
Zhao Dongtian Ballastless Application in Railway Construction [C]//MOR Collection Edited by CRS Wuhan Chang Jiang Press 2005(1): 88—91
- [21] 潘正风, 杨正尧, 程效均, 等. 数字测图原理与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009
Pan Zhengfeng Yang Zhengyao Cheng Xiaojun et al Digital Mapping Principles and Methods [M]. Wuhan Wuhan University Press 2009
- [22] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004
Fei Yetai Error Theory and Data Processing [M]. Beijing Mechanical Industry Press 2004

(上接第 19 页)

- Dong Lang Zhao Chenggang Cai Degou et al Numerical Simulation and Experimental Research on Dynamic Characteristics of High-speed Railway Ballastless Track Subgrade [J]. Journal of Civil Engineering 2008(10): 81—86
- [5] 罗震, 蔡成标, 姚力. 路基参数对无砟轨道结构受力影响的有限元分析[J]. 路基工程, 2008(5): 81—86
Luo Zhen Cai Chengbiao Yao Li Finite Element Analysis on Effect of Subgrade Parameters on Structural Stress of Ballastless Track [J]. Subgrade Engineering 2008(5): 81—86
- [6] 魏永幸, 蒋关鲁. 客运专线无砟轨道路基关键技术探讨——以遂渝线无砟轨道综合试验段为例[J]. 铁道工程学报, 2006(5): 39—44
Wei Yongxing Jiang Guanlu Discussion on Key Technology of PDL Ballastless Track Subgrade—Cases in Comprehensive Pilot Section of Chongqing—Suining Railway Ballastless Track [J]. Journal of Railway Engineering Society 2006(5): 39—44
- [7] Huang Y H. Pavement Analysis and Design 2nd Edition Pretice Hall 2004
- [8] 中铁二院工程集团有限责任公司, 等. 遂渝线无砟轨道试验段路基工程关键技术研究——无砟轨道路基与桥隧涵构筑物刚度匹配技术试验研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司等, 2009
China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd et al Research on Key Technology of Subgrade Engineering Ballastless Track Pilot Section of Chongqing—Suining Railway—Experimental Study on Stiffness Matching Technology for Ballastless Subgrade with Bridge Tunnel and Culvert Structures [R]. Chengdu China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd 2009
- [9] 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所. 铁路路基基床结构设计方法及参数研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 2008
Building Research Institute of China Railway Science Research Institute Design Method and Parameters for Bed Structure of Railway Subgrade [R]. Beijing Building Research Institute of China Railway Science Research Institute 2008
- [10] 中国铁道科学研究院, 等. 武广客运专线高速铁路武汉试验段综合试验报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院等, 2009
China Railway Science Research Institute et al Comprehensive Test Report of Wuhan Pilot Section of Wuhan—Guangzhou High-speed Railway for Passenger Only [R]. Beijing China Railway Science Research Institute et al 2009