

文章编号: 1005-0523(2016)02-0009-06

# 高速铁路无砟轨道几何不平顺区段管理长度研究

徐伟昌<sup>1</sup>, 仲春艳<sup>2</sup>, 许玉德<sup>3</sup>, 李海锋<sup>3</sup>

(1. 上海铁路局工务处, 上海 200071; 2. 上海铁路局上海高铁维修段, 上海 200439; 3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:**对于高速铁路, 轨道几何不平顺状态对行车平稳性、乘客舒适性影响巨大, 严重几何不平顺对行车安全构成威胁。轨道质量指数(TQI)是评价线路区段几何不平顺状态的主要方法, 其值受计算长度的影响较大。通过对轨道几何不平顺区段管理方法及区段管理长度影响因素的研究, 确定了高速铁路无砟轨道 TQI 计算长度的选取原则, 并利用综合检测车检测数据, 分析了轨道几何不平顺在不同计算长度下的标准差统计特征以及区段半峰值与标准差的相关性, 得到了高速铁路无砟轨道线路 TQI 计算长度的取值范围为 100~150 m, 建议值为 100 m。

**关键词:**高速铁路; 无砟轨道; 几何不平顺; 轨道质量指数; 计算长度

中图分类号: U216.4 文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.02.002

轨道不平顺是导致机车车辆和轨道产生振动和破坏的原因, 由于轨道不平顺激励引起的动荷载将进一步加速轨道状态的恶化和轨道不平顺的发展, 从而影响了行车安全及设备使用寿命。我国工务部门对于轨道几何不平顺的管理主要是峰值与均值管理。峰值管理是为了控制一定波长范围内的不平顺峰值(最大值), 使其小于管理限值; 均值管理主要是利用数学统计原理, 反映区段线路几何不平顺的离散情况。对于高速铁路而言, 区段平顺状态对行车的平稳性、乘客的舒适性影响巨大。因此, 合理的评价线路的区段平顺状态对于提高行车平稳性、乘客的舒适性尤为重要<sup>[1-3]</sup>。

各国都采用了一些评价方法来评价线路区段平顺状态, 如英国采用 200 m 单元区段内的单项几何参数的统计特征值—标准差  $\sigma$  的方法来评价轨道区段的平均质量, 把单元区段质量状态分成 4 个质量段; 日本铁路采用 500 m 单元区段内轨道不平顺指数(P 值)来评价轨道区段质量, 考虑到由于无砟轨道板产生固定波长不平顺, 目前正在研究以板长为单元区段的管理方法; 美国铁路采用 0.2 英里(约 320 m)单元区段内的轨道质量指数(TQI)来评价轨道区段质量; 加拿大国铁采用 0.25 英里(约 400 m)单元区段内的轨道质量指数(TQI)来评价轨道区段质量; 法国铁路采用 300 m 的单元区段内平均偏差指数来评价轨道区段质量<sup>[4]</sup>。

目前, 我国采用轨道质量指数(TQI)来评价线路区段平顺状况, TQI 值计算结果与区段长度的选取有关, 现行的管理标准采用 200 m 的区段长度计算 TQI, 是基于我国有砟线路的分析所确定的, 高建敏、翟婉明等人对既有干线轨道不平顺区段管理长度进行了分析, 结果表明, 当前轨道不平顺区段管理中, 区段长度取 200 m 是合适的<sup>[5]</sup>。但是对于高速铁路无砟轨道线路是否合适, 还有待进一步的研究。本文将分析不同计算长度的 TQI 的特征, 从而找到更适于高速铁路无砟轨道线路的 TQI 计算长度。

收稿日期: 2016-01-16

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAG20B01); 国家自然科学基金(50908179); 上海市自然科学基金(11ZR1439200)

作者简介: 徐伟昌(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为轨道工务管理。

通讯作者: 许玉德(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道管理、养修技术和安全环境评价。

## 1 轨道质量指数 TQI 计算方法

我国工务部门采用 200 m 内的轨道质量指数(TQI)来评价线路的区段平顺状态,其计算公式如式(1)~(3)所示

$$TQI = \sum_{i=1}^7 \sigma_i \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (2)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_i (i=1, 2, \dots, 7)$  为各项几何不平顺偏差的标准差;  $\bar{x}_i$  为基本单元区段内各项几何不平顺连续采样点偏差值的算术平均值;  $n$  为采样点的个数。

## 2 TQI 计算长度选取原则

为了找到适合高速铁路无砟轨道线路的 TQI 计算长度,就需要建立相应的长度选取原则。文献<sup>[6]</sup>对区段管理长度的影响因素做了简要研究,认为 TQI 计算长度不宜过长或过短,且应便于现场使用和管理;另外日本和国内学者研究得出轨道几何不平顺在一定区段长度内的半峰值和标准差之间具有线性相关性<sup>[7-8]</sup>。作者认为 TQI 计算长度的选取原则从以下几个角度来考虑:

1) 考虑到各段轨道不平顺差异性较大,计算长度的选取会影响到不平顺的统计特征。为找出最需要养护维修的区段, TQI 计算长度应以能够突显轨道几何不平顺的统计特征为原则。

2) 计算长度不能定得太长,以免湮没轨道不平顺严重的地段;考虑现场作业“顺坡”的需求,计算长度也不宜太短,即在突出统计特征的前提下,计算长度不宜过短(尽量长)。

3) 考虑到目前我国轨道养护维修作业中的管理体制、劳力组织、作业方式以及管理习惯等因素,有利于现场的使用和管理,计算长度取为 25 m 的整倍数。

4) 考虑到轨道几何不平顺区段内的半峰值与标准差之间的相关性,在计算长度内,两者应具有强相关性,可以兼顾到局部峰值与区段标准差,两者间可以相互利用,便于管理。

## 3 TQI 计算长度的统计特征

### 3.1 数据源及预处理

分析所采用的数据为沪宁高速铁路 2012 年 1 月份至 2013 年 10 月份间的综合检测车检测得到的轨道几何不平顺数据。

由于综合检测车采用惯性基准法检测轨道不平顺,为确保统计所用检测数据的准确性,应使用较高速度的检测数据(速度大于  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )。其次,检测过程中传感器可能受到周边环境的干扰,造成检测数据异常,不宜使用。

### 3.2 统计特征分析

统计分析对象为沪宁高速铁路(里程段:K170+000 ~ K200+000)的综合检测车数据(轨道几何不平顺数据)。此里程段范围位于常州站与丹阳站之间,线路允许速度为  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最小曲线半径为 5 000 m,最大坡度为 12.5‰,铺设 CRTS I 型板式无砟轨道,采用  $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ , 100 m 定尺钢轨, WJ-7 型扣件。

主要分析项目为轨距、水平、左高低、右高低、左轨向、右轨向、三角坑不平顺以及 TQI,统计量为不同计算长度下的各单项不平顺的标准差均值、标准差的标准差及 TQI 的均值与标准差,另外还分析了各单项不平顺区段半峰值与标准差的相关性。

3.2.1 标准差均值特征统计

以 25 m 为步长,计算不同计算长度下,各个单项不平顺的标准差及 TQI,并统计分析了不同计算长度下各单项不平顺标准差的均值以及 TQI 的均值的特征,得到了如下的趋势图,图中的管理值为计算长度为 200 m 时,各单项不平顺标准差的管理值。

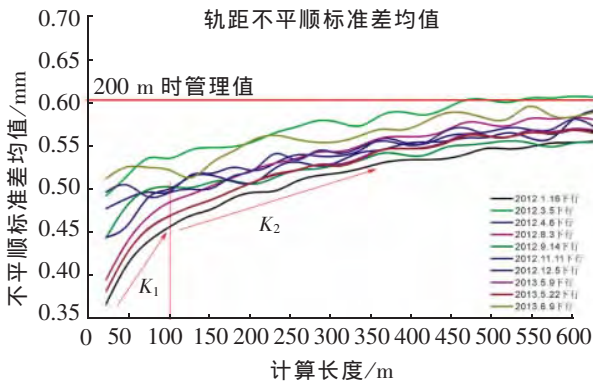


图 1 轨距不平顺标准差均值统计趋势图

Fig.1 Average of gauge irregularity standard deviation

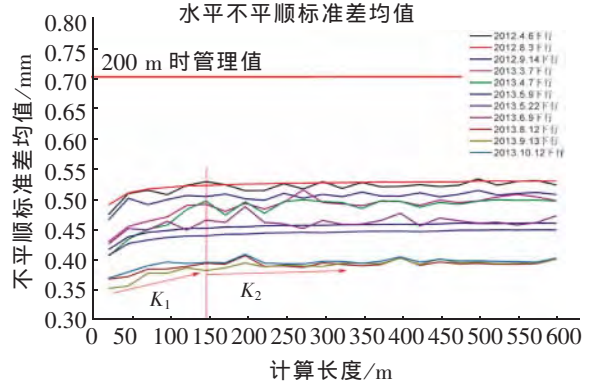


图 2 水平不平顺标准差均值统计趋势图

Fig.2 Average of cross-level irregularity standard deviation

由图 1、图 2 可知,随着计算长度的增加,轨距不平顺标准差的均值,在计算长度为 100 m 以内时,以较大速度( $K_1$ )增大,在计算长度大于 100 m 时,以较小的速度( $K_2, |K_2| < |K_1|$ )增大;水平及高低不平顺标准差的均值,在计算长度为 150 m 以内时,以较大速度( $K_1$ )增大,在计算长度大于 150 m 时,以较小的速度( $K_2, |K_2| < |K_1|$ )增大。

同理作类似分析得到,随着计算长度的增加,各单项不平顺标准差的均呈增大趋势,TQI 的均值也呈增大趋势,对于轨向不平顺标准差的均值以及 TQI 的均值,在计算长度为 125 m 以内时,增大趋势较为明显,在计算长度大于 125 m 时,增大趋势较弱,基本趋于缓和;对于三角坑不平顺标准差的均值,整体上以较快的速度增加,且历次数据差异较大,没有明显的拐点。

3.2.2 标准差的标准差特征统计

仍然以 25 m 为步长,计算了不同计算长度下,各单项不平顺的标准差及 TQI,统计分析不同计算长度不平顺标准差的标准差及 TQI 的标准差的特征,得到了如下的趋势图:

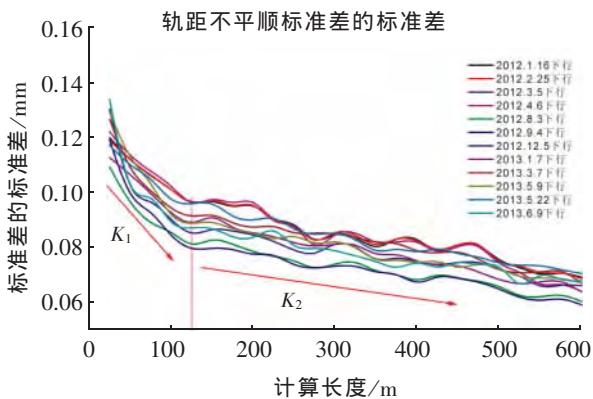


图 3 轨距不平顺标准差的标准差趋势图

Fig.3 Standard deviation of gauge irregularity

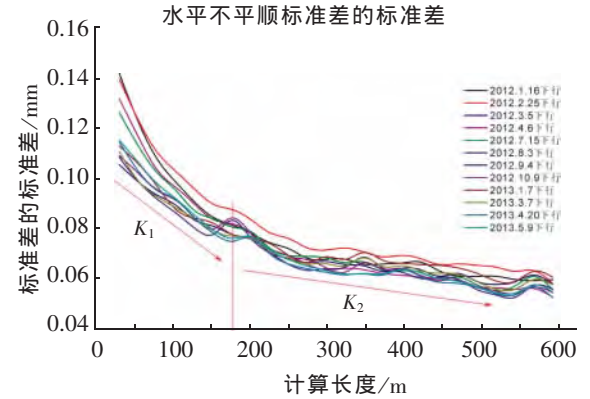


图 4 水平不平顺标准差的标准差趋势图

Fig.4 Standard deviation of cross-level irregularity

由图 3、图 4 可知,随着计算长度的增加,轨距不平顺标准差的标准差,在计算长度为 125 m 以内时,以较快的速度( $K_1$ )减小;在计算长度大于 125 m 时,以较慢的速度( $K_2, |K_2| < |K_1|$ )减小;对于水平不平顺标准差

的标准差,在计算长度 175 m 以内时,以较快的速度( $K_1$ )减小,在计算长度大于 175 m 时,以较慢的速度( $K_2, |K_2| < |K_1|$ )减小,并趋缓;

同理作类似分析得到,随着计算长度的增加,各单项不平顺标准差的标准差整体呈减小趋势,TQI 的标准差也成呈减小趋势。对于高低不平顺标准差的标准差,在计算长度 150 m 以内时,以较快的速度( $K_1$ )减小,在计算长度大于 150 m 时,以较慢的速度( $K_2, |K_2| < |K_1|$ )减小,并有趋缓的趋势;对于轨向不平顺标准差的标准差及 TQI 的标准差,在计算长度 125 m 以内时,以较快的速度( $K_1$ )减小,在计算长度大于 125 m 时,以较慢的速度( $K_2, |K_2| < |K_1|$ )减小,并有趋缓的趋势;对于三角坑不平顺标准差的标准差,在计算长度为 125 m 以内时,快速减小,在计算长度大于 125 m 时,起伏增大。

3.2.3 区段标准差与半峰值关系分析

以沪宁高速铁路上行线 K170+000-K200+000 里程范围内的动态检测数据为研究样本,进行区段半峰值与标准差的相关性分析。样本检测时间为:2012 年 8 月 3 日;计算长度取 100 m。

分析发现,轨距不平顺区段半峰值与标准差线性相关性较弱(如图 5 所示,散点图带宽比较大,分布较离散),水平、高低、轨向、三角坑不平顺区段半峰值与标准差有良好线性相关性(水平不平顺散点图如图 6 所示,散点图带宽较窄,其它各项不平顺有类似散点图)。

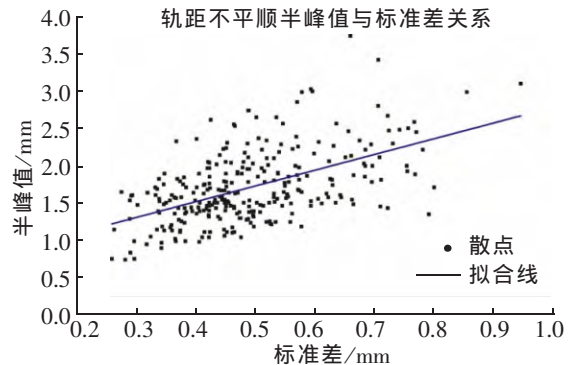


图 5 轨距不平顺区段半峰值与标准差散点图  
Fig.5 Scatter diagram of half peak and standard deviation at gauge irregularity section

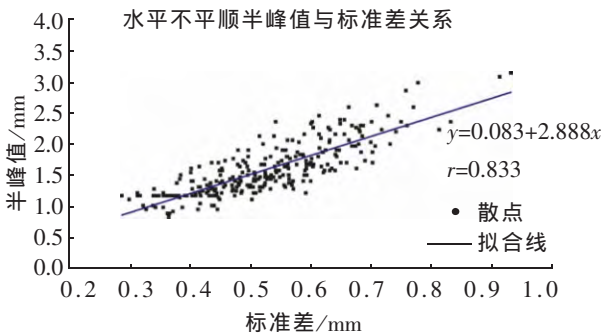


图 6 水平不平顺区段半峰值与标准差散点图  
Fig.6 Scatter diagram of half peak and standard deviation at cross-level irregularity section

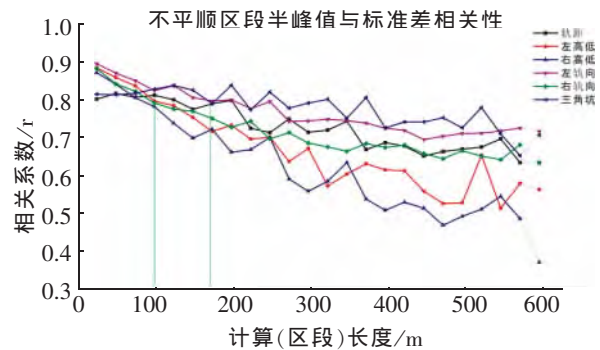


图 7 计算长度与相关系数趋势图  
Fig.7 Tendency between length and correlation coefficient

另外,通过分析不同计算长度内不平顺峰值与标准差的相关系数,发现,计算长度对相关性有一定影响,如图 7 所示,根据相关性强度判断表(见表 1),当相关系数大于 0.8 时,即为极强相关。

表 1 相关强度判断表

Tab.1 Judgment standard of relevancy

相关系数 $r$	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	0.2 ~ 0.4	0.0 ~ 0.2
相关强度	极强相关	强相关	中等程度相关	弱相关	极弱相关或无相关

由图 7 可知,随着计算长度的增加,相关系数总体上在不断减小,即相关性在减弱;对于左轨向和三角坑不平顺,在计算长度为 175 m 以内时,区段半峰值与标准差的相关系数大于 0.8;对于轨距、高低、右轨向



不平顺,在计算长度为 100 m 以内时,区段半峰值与标准差的相关系数接近 0.8;表明此时区段半峰值与标准差有极强相关性,以此长度为区段管理长度可以兼顾到局部峰值与区段标准差,两者间可以相互利用,便于管理。

### 3.3 基于统计分析的 $TQI$ 计算长度

通过 3.2 中关于轨道几何不平顺统计特征及区段半峰值与标准差的相关性的分析可知,为了突出轨道几何不平顺的标准差均值特征,轨距不平顺的计算长度应不大于 100 m,水平不平顺的计算长度应不大于 150 m,轨向不平顺的计算长度应不大于 125 m,高低不平顺的计算长度应不大于 150 m;通过 3.2 中区段半峰值与标准差的相关性的分析可知,为了兼顾轨道几何不平顺局部峰值与区段标准差的相关性,轨距、高低、右轨向不平顺区段管理长度应不大于 100 m,左轨向、三角坑不平顺区段管理长度应不大于 175 m。由此可建立  $TQI$  计算长度的控制表,见表 2。

表 2 沪宁高速铁路  $TQI$  计算长度( $L$ )控制表

Tab.2 Control table of  $TQI$  calculating length( $L$ ) in Shanghai- Nanjing high speed railway

统计量	标准差均值/m	标准差的标准差/m	标准差与半峰值关系/m
左高低	$L \leq 150$	$L \leq 150$	$L \leq 100$
右高低	$L \leq 150$	$L \leq 150$	$L \leq 100$
左轨向	$L \leq 125$	$L \leq 125$	$L \leq 175$
右轨向	$L \leq 125$	$L \leq 125$	$L \leq 100$
轨距	$L \leq 100$	$L \leq 125$	—
水平	$L \leq 150$	$L \leq 175$	$L \leq 100$
扭曲(三角坑)	—	$L \leq 125$	$L \leq 175$

由表 2 可知,高速铁路无砟轨道几何不平顺区段管理长度上限值基本上在 100~150 m 内,另外根据文中确定的  $TQI$  计算长度选取原则第二条,考虑现场作业“顺坡”的需求,计算长度也不宜太短,即在突出统计特征的前提下,计算长度应尽量长,由此建议高速铁路无砟轨道  $TQI$  计算长度取值范围为 100~150 m;其次,考虑到现场管理的简便性及高速铁路无砟轨道采用 100 m 定尺钢轨的实际情况,建议高速铁路无砟轨道  $TQI$  计算长度取 100 m。

## 4 结论

1) 本文通过对轨道几何不平顺区段管理方法及区段管理长度影响因素的研究,确定了  $TQI$  计算长度的 4 个选取原则,即突出不平顺统计特征、不宜过短、为 25 m 的整倍数、区段(计算长度)内不平顺半峰值与标准差强相关。

2) 基于各单项不平顺在不同长度下的标准差的统计特征的分析,以及计算长度内的半峰值与标准差的相关性的分析,得到了高速铁路无砟轨道几何不平顺区段管理长度( $TQI$  计算长度)的取值范围为 100~150 m;

3) 建议高速铁路无砟轨道  $TQI$  计算长度取 100 m,以此作为高速铁路无砟轨道线路养修管理基本的管理单元长度。

### 参考文献:

- [1] 王午生. 铁路线路工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,2000:23-41.
- [2] 管震舜. 轨道几何不平顺对高速客车动力响应影响分析[J]. 山西建筑,2009,35(5):1-2.

- [3] 练松良. 轨道动力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003: 11–15.
- [4] 许玉德, 李海峰, 戴月辉. 轨道交通工务管理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007: 31–33.
- [5] 高建敏, 翟婉明, 徐涌, 等. 既有干线轨道不平顺区段管理长度分析[J]. 铁道建筑, 2009(5): 105–108.
- [6] 中国铁道科学研究院基础设施检测研究所. 提速线路轨道不平顺质量指数 TQI 管理建议值及管理方法的研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2008.
- [7] 内田雅夫, 森本滕, 三和雅史. 在来線高速線区の軌道狂い進みの実態と予測手法の検証[J]. 铁道総研報告, 1998, 12(3): 17–22.
- [8] 许玉德, 周宇, 吴纪才, 等. 轨道不平顺半峰值和标准差的相关性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4): 26–30.
- [9] 陶佳元, 徐伟昌, 李振廷, 等. 动态检测数据在转体桥挠曲变形监测中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(2): 62–67.

## Research on Management Length of Geometric Irregularity Section for Ballastless Track of High-speed Railway

Xu Weichang<sup>1</sup>, Zhong Chunyanfeng<sup>2</sup>, Xu Yude<sup>3</sup>, Li Haifeng<sup>3</sup>

(1. Shanghai Railway Administration Works Department, Shanghai 200071, China; 2. Shanghai Express Railway Maintenance Section of Shanghai Railway Administration, Shanghai 200439, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Track geometric irregularity has a huge effect on running stationarity and riding comfort of high-speed railway. Track quality index is the main method for evaluating smoothness condition of track geometric regularity sections, whose value is greatly influenced by calculation length. This study explored the management methods and management length of track geometric irregularities sections. By use of data from the comprehensive inspecting train, it analyzed statistical characteristics of track irregularity in different calculation length, and the correlation between section half peak and standard deviation. It finally concluded the range of calculation length for high-speed railway ballastless track is 100–150 m, and the recommended value is 100 m.

**Key words:** high-speed railway; ballastless track; track geometric irregularities; track quality index; calculation length

(责任编辑 王建华)