

高速铁路无砟轨道线路质量评价指标研究

徐伟昌¹, 仲春艳², 许玉德³, 沈坚锋³

(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:为有效开展线路维修管理,需对线路质量进行状态评价和分级。在分析现有线路质量评价方法的基础上,融合线路几何状态检查、结构状态检查的多源检测数据,建立了涵盖轨道几何状态和结构状态的高速铁路无砟轨道线路质量评价指标及相关计算公式,运用层次分析法和变权模型确定了各个参数的初始权重,并在沪宁高速铁路上进行了应用。结果表明,线路质量评价指标能够准确评价线路质量,反映线路的薄弱环节,并可依据评价结果分析线路薄弱环节的病害,指导线路精确维修作业。

关键词:高速铁路;无砟轨道;线路质量;评价指标

中图分类号:U216.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)01-0052-06

0 引言

无砟轨道作为高速铁路的主要轨道结构形式,其从根本上改变了容易引起轨道变形的道床层结构,具备高整体性、高平顺性和高稳定性等特点,但因其维修的困难性,大大降低了维修的效率,而高速铁路运行密度高、天窗时间短、线路质量要求高的特点又要求现场必须具有较高的维修效率,因而准确地评价线路质量,找出线路的薄弱环节,将有限的维修资源用到合理的地方是必要的。

轨道几何状态反映了线路轨距、水平、高低、方向等参数的状态,几何状态的好坏对乘行舒适度的影响很大,文献[1-10]研究了国内外目前广泛采用的轨道几何状态评价指标与方法,上述文献对轨道几何状态的评价均采用单个检测数据源,各个评价指标之间相互独立,没有充分利用现有检测工具对得到的海量数据进行综合评价,可能会导致对轨道几何状态的评价管理不全面。轨道结构状态表明了线路各结构部件的状态,其状态的好坏对行车的安全性有重要影响,同时结构伤损、病害也是轨道出现几何不平顺的重要原因,文献[11-16]对国内外轨道结构状态的评价方法作了详细介绍,但是目前关于轨道结构状态评价的研究还较少,且其中大多数的研究是将道床沉降作为轨道结构恶化的主要原因,并对道床沉降与恶化规律进行的研究,但是对于无砟轨道来说,从道床沉降、变形的角度的分析并不完全适用。

集合线路几何状态检查、结构状态检查的多源检测数据,提出并应用高速铁路无砟轨道线路质量评价指标 $TQEI$ (Track Quality Evaluation Index),该指标涵盖轨道几何状态指标 TGI (Track Geometry Index)和轨道结构状态指标 TSI (Track Structure Index),并考虑了不同的权重分配。以下介绍线路质量评价指标 $TQEI$ 的计算方法及在沪宁高速铁路线路质量评价中的应用。

1 轨道几何状态指标(TGI)

1.1 轨道几何状态指标(TGI)计算方法

线路几何状态相关的评价方法较多,鉴于各种方法都有不同的侧重点,采用了一种综合的评价方法,提出了轨道几何状态指标 TGI ,以期尽可能全面地评价轨道几何状态。该方法将我国目前可获得的多种

收稿日期:2016-02-26 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.01.10

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,主要从事轨道工务管理的研究。E-mail: xwc000001@163.com

徐伟昌,仲春艳,许玉德,等.高速铁路无砟轨道线路质量评价指标研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(1):52-57.

几何状态检测数据(综合检测车数据、车载式线路检查仪数据、便携式线路检查数据、人工添乘数据,见表 1)都纳入评价系统,用扣分法来表现,计算公式如下

$$TGI = 100 - F(TQI, R_{TQI}, C, T, R, H) \quad (1)$$

式中, F 为扣分值的计算公式,与轨道质量指数(TQI)、轨道质量指数变化率(R_{TQI})、单项超限(C)、添乘仪(T)、人体感觉(R)、晃车仪(H)有关。

TQI 变化率是单位时间内 TQI 值的变化量与上一周期检测的轨道质量指数之比,用 R_{TQI} 表示,其大小表示轨道质量状态的发展变化情况: $R_{TQI} < 0$ 表示轨道质量在变好, $R_{TQI} = 0$ 表示轨道质量没有变化, $R_{TQI} > 0$ 表示轨道质量在恶化,且其值越大,恶化越为严重。将其纳入评价系统,可对现场 TQI 变化较大(快速恶化)的区段进行关注。其计算公式如下

$$R_{TQI} = \frac{TQI - TQI_0}{TQI_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, TQI 为当前检测轨道质量指数; TQI_0 为上一周期检测的轨道质量指数。

以上各项参数的管理标准、量纲不同,在计算扣分系数时,需要对参数进行量纲统一(或无量纲化)处理,形成各项计算参数的当量值,考虑权重比例,计算相应的扣分值,按百分制计算(当 $F > 100$ 时,取 $F = 100$),计算公式如下

$$F = \sum_{i=1}^p \omega_i \cdot E_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^p \omega_i = 1 \quad (4)$$

式中, E_i 为第 i 项计算参数当量值; ω_i 为第 i 项计算参数的权重系数, $i = 1, 2, \dots, p$; p 为几何状态相关技术参数的个数,包括轨道质量指数(TQI)、轨道质量指数的变化率、轨道几何不平顺偏差(高低、轨距、轨向、水平、三角坑)、振动加速度、晃车检查、添乘检查等。

表 1 轨道几何状态信息数据源

数据来源	数据类型	项 目
综合检测车	轨道几何尺寸数据	轨道质量指数 TQI (mm)
		轨道质量指数的变化率(%)
	振动加速度	横向加速度(m/s^2)
		垂向加速度(m/s^2)
便携式线路检查仪	振动加速度	横向加速度(m/s^2) 垂向加速度(m/s^2)
人工添乘	人体感觉	严重晃车(处)
车载式线路检查仪	振动加速度	横向加速度(m/s^2) 垂向加速度(m/s^2)

1.2 轨道几何状态指标(TGI)初始权重确定

轨道几何状态指标计算的各个参数权重运用层次分析法,通过专家问卷、讨论建立判断矩阵,计算其中的几何平均数,数据归一化和判断矩阵的一致性检验后确定,以沪宁高速铁路为例,得到轨道几何状态指标的初始权重系数: $TQI \omega_{11} = 0.1$; $R_{TQI} \omega_{12} = 0.1$; 几何状态偏差 $\omega_{13} = 0.4$; 振动加速度 $\omega_{14} = 0.1$; 添乘仪 $\omega_{15} = 0.15$; 人工添乘 $\omega_{16} = 0.1$; 晃车仪 $\omega_{17} = 0.05$ 。

2 轨道结构状态指标(TSI)

2.1 轨道结构状态指标(TSI)计算方法

用轨道结构状态指标 TSI 来反映线路的结构状态,对于无砟轨道线路来说,主要包括钢轨、扣件系统、轨道板等的状态。上述部件的状态是利用现场人工检查、综合巡检车以及钢轨探伤车等获取的相关数据,并结合了我国铁路结构状态管理以及铁路线路维修规则中线路质量评定的相关内容计算分析得

到的。

将无砟轨道结构划分为钢轨系统、扣件系统、无砟道床系统 3 个子系统:(1)钢轨系统,包含钢轨及钢轨接头;(2)扣件系统,包含扣件及各种连接零件;(3)无砟道床系统,包含轨道板、水泥乳化沥青砂浆填充层、混凝土底座、支撑层、凸形挡台、侧向挡块等。

轨道结构状态信息数据源见表 2。

表 2 轨道结构状态信息数据源

子系统	伤损类型	伤损程度(等级)	
钢轨系统	R1:钢轨伤损	轻伤、重伤	
	R2:光带异常	过宽或过窄、突变、作用边擦痕	
扣件系统	F1:部件失效	非连续、连续	
	F2:部件缺失	非连续、连续	
	F3:部件设置不合规定	非连续、连续	
无砟道床系统	U1:轨道板、双块式轨枕、道床板伤损	裂纹	I级、Ⅱ级、Ⅲ级
		破损	一般部位、关键部位
	U2:水泥乳化沥青砂浆填充层	裂纹	I级、Ⅱ级、Ⅲ级
		破损	轻微破损、严重破损
		离缝	I级、Ⅱ级、Ⅲ级
	U3:底座(板)、支撑层、凸形挡台、侧向挡块伤损	裂纹	I级、Ⅱ级、Ⅲ级
		破损	轻微破损、严重破损
	U4:高强度挤塑板伤损	损坏	轻微损坏、严重损坏
		离缝	I级、Ⅱ级、Ⅲ级
	U5:基础变形带来的道床变形	垂向	扣件调整范围内、扣件调整范围外
横向		扣件调整范围内、扣件调整范围外	

注:①钢轨系统伤损除了考虑钢轨常见伤损外,还将光带情况纳入评价系统,钢轨光带不良有以下几种情况:光带过宽或过窄、光带突变、作用边擦痕;

②钢轨伤损形式主要有轨头磨耗、轨头剥离裂纹及掉块、轨顶面擦伤、波形磨耗、表面裂纹、内部裂纹和锈蚀等。钢轨伤损按程度分为轻伤、重伤。

各个系统的评价指标采用评分法(百分得分制)计算,建立下式

$$(RCI, FCI, UCI) = 100 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w(T_i, S_j) K(T_i, S_j) \quad (5)$$

式中, RCI, FCI, UCI 分别为钢轨系统、扣件系统、无砟道床系统的质量状态指数,其取值范围为 $0 \sim 100$, 0 表示有大量伤损, 100 表示无伤损; $w(T_i, S_j)$ 为权重系数; $K(T_i, S_j)$ 为各类伤损的扣分值, 均与伤损类型和伤损程度(等级)有关。

由上面的分析可知, TSI 与 3 个子系统的状态有关, 是关于 RCI, FCI, UCI 的函数 ($TSI = f(RCI, FCI, UCI)$), 采用简单加权法, 可得到

$$TSI = w_1 RCI + w_2 FCI + w_3 UCI \quad (6)$$

式中, w_1, w_2, w_3 为权重系数。

2.2 轨道结构状态指标 (TSI) 初始权重确定

为了将严重的病害突出, 轨道结构状态指标计算的各个参数权重采用“相关权重”, 建立“变权模型”, 权重 w_1, w_2, w_3 均为 RCI, FCI, UCI 的函数, 对于指标大的项目赋予较大的权重, 对于指标值较小的项目赋予较小的权重, 变权模型如式(7)所示。

$$w_i = \frac{CI_i}{\sum CI} \quad (7)$$

式中, w_i 为第 i 项参数(子系统)的权重; CI_i 为第 i 项参数(子系统)值。

以沪宁高速铁路为例, 得到结构状态指标的初始权重系数分别为: $w_1 = 0.15, w_2 = 0.05, w_3 = 0.8$ 。

3 高速铁路无砟轨道线路质量评价指标 ($TQEI$)

在得到了 TGI 与 TSI 的评价方法以及相应的计算公式的基础上,即可得到 $TQEI$ 的计算公式,见式(8)和式(9)。 $TQEI$ 也采用评分法(百分得分制), $TQEI$ 值越大,线路状况越好,反之越差。 $TQEI$ 的计算也采用加权法, w_1 、 w_2 分别为轨道几何状态指标和轨道结构状态指标的权重, $TQEI$ 构成如图 1 所示。

$$TQEI = f(TGI, TSI) \quad (8)$$

$$\begin{cases} TQEI = w_1 TGI + w_2 TSI \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases} \quad (9)$$

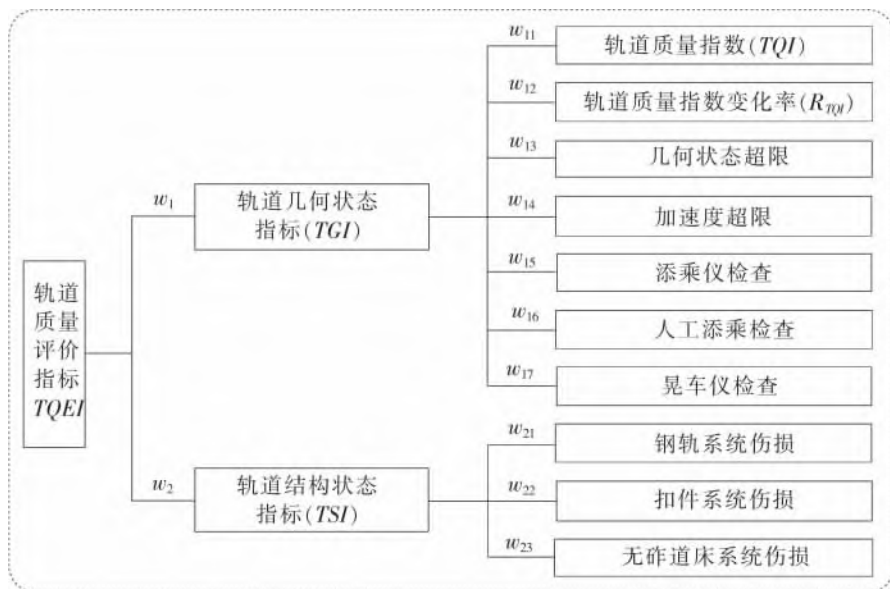


图 1 高速铁路无砟轨道质量评价指标 ($TQEI$) 构成

由于部分结构状态检查还是依靠人工检查并记录,非常耗时耗力,且检查的周期也较长,从而获得的数据周期就较长;而轨道几何状态检查则主要依靠综合检测车、车载检查仪、便携式线路检查仪等,其检测周期非常短,很容易获得全线的检查数据。因而,在利用线路质量等级管理指标评价线路质量时,各线可根据所获得结构状态数据量、以及维修重点等确定权重 w_1 、 w_2 。考虑沪宁高速铁路的实际维修状况,采用轨道几何状态和结构状态并重的思想,确定了 $TQEI$ 的权重系数为: $w_1=0.5$, $w_2=0.5$ 。

4 高速铁路无砟轨道线路质量评价指标应用

几何状态数据采用沪宁高速铁路上行线 2013 年 10 月份的综合检测车数据、车载式线路检查仪数据、便携式线路检查仪数据以及人体感觉数据;在计算 TQI 变化率时用到了 2013 年 9 月份的综合检测车数据。结构状态数据利用当月获得的各类结构数据。对沪宁高速铁路上行 K140+000~K290+000 里程段的线路质量进行评价,并对评价结果进行了分级,其中Ⅲ级为质量较差地段,是现场维修的重点地段,见表 3、表 4。

表 3 沪宁高速铁路(上行 K140+000~K290+000)线路质量情况

等级	单元区段数	所占百分比/%	线路长度/m	所占百分比/%
I	350	85.2	132 300	88.2
II	54	13.1	16 500	11.0
III	7	1.7	1 200	0.8
合计	411	100	150 000	100

表 4 Ⅲ级线路细目表

起点里程/km	终点里程/km	单元区段长/m	区段类型	区段描述	总得分(TQGI)	等级
166.2	166.5	300	道岔	常州站道岔区	83	Ⅲ级
204.4	204.7	300	直线	桥梁	87.9	Ⅲ级
210.4	210.5	100	圆曲线	圆曲线	85	Ⅲ级
223.8	223.9	100	竖曲线	竖曲线	88.5	Ⅲ级
235.8	236	200	缓和曲线	缓和曲线	84	Ⅲ级
236	236.1	100	过渡段	线桥过渡段-圆曲线	77.2	Ⅲ级
237.9	238	100	竖曲线	竖曲线	88.5	Ⅲ级

线路质量评价中,单元区段上行 K166+200~K166+500 为Ⅲ级线路。该段线路评分结果显示,TQI(三角坑单项指标偏差)、动检偏差扣分较高,其中 K166+400~K166+500 单元 TQI 值超标,见表 5。另外,在结构检查中也发现轨道板、底座板存在裂纹,排水设施排水不畅等情况。

表 5 轨道质量指数 TQI

起点里程/ km	终点里程/ km	左轨向/ mm	右轨向/ mm	左高低/ mm	右高低/ mm	水平/ mm	轨距/ mm	三角坑/ mm	TQI/ mm
166.200	166.300	0.55	0.58	0.62	0.70	0.27	0.46	0.29	3.47
166.300	166.400	0.81	1.04	0.73	0.76	0.24	0.71	0.30	4.59
166.400	166.500	0.70	0.79	0.83	0.78	0.66	0.53	1.04	5.33

因此,针对上述问题,制定有针对性的维修方法:几何尺寸方面:对该区段进行精确测量,根据测量数据制定作业方案;结构调整方面:①整修零配件;②检测该区段扣件扭力矩情况,并进行复紧;③对道床结构病害进行修复;④对道岔几何尺寸和结构病害同时整治;⑤对该区段路基沉降情况进行定期观测,制定路基沉降整治方案,以彻底解决路基沉降问题。

对于修理工作,采用精确修理的方法:对于岔区部分,采用高聚物材料对沉降段无砟轨道结构进行注浆抬升;对线路部分,采用在轨道板与 CA 砂浆之间填充预制树脂砂浆板,后进行注胶填充,恢复设计轨面高程;抬板后,对轨道进行精密测量,使用扣件调整件对轨道进行精细调整,共计垫 242 处、抽 44 处、改 64 处;对道岔进行工电联整,处理尖轨离缝、竖切不靠、顶铁顶死等问题;使用改锚器对 1 处锚固螺栓失效进行改锚。

最后,在次月再次进行质量评价,发现该区段结构良好、几何尺寸无超限。可见,通过这一系列流程,实现了线路维修的精确、有效管理,而线路质量评价指标在其中起到了至关重要的作用,解决了哪个地点需要修、修理哪些项目、修理效果如何等问题。

5 结论

(1)在分析国内外线路质量评价方法的基础上,结合我国目前线路检查的主要手段,提出了包含轨道几何状态和结构状态的高速铁路无砟轨道线路质量评价指标 TQEI,建立了包括轨道几何状态指标 TGI 和轨道结构状态指标 TSI 在内的综合线路质量评价体系,其中,轨道结构状态的纳入,改善了线路质量评价重几何、轻结构的现状。

(2)建立了轨道几何状态指标 TGI 和轨道结构状态指标 TSI 的计算公式,并利用层次分析法和变权模型确定了指标中相关参数的初始权重系数。

(3)运用该指标对沪宁高速铁路线路质量进行评定,评定结果准确地反映了线路的薄弱环节,并可追根溯源,分析出病害根源,用于制定针对性的维修方案,实现精确修理。而作业后的再次评价,也进一步对维修效果进行了复核。所以该指标解决了需要修理的地点、项目、修理后状态评价的问题,对有效实现线路维修管理有着较为重要的作用。

参 考 文 献

- [1]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.

- [2] 陈宪麦,王澜,陶夏新,等. 我国干线铁路轨道平顺性评判方法的研究[J]. 中国铁道科学,2008,29(4):21-27.
- [3] 王卫东,刘金朝,梁志明. 综合评价车辆/轨道系统动态特性的广义能量法[J]. 中国铁道科学,2009,30(5):22-27.
- [4] 李海锋,吴纪才,许玉德. 铁路轨道几何状态评价方法比较[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(6):772-776.
- [5] Sadeghi J. Development of railway track geometry indexes based on statistical distribution of geometry data[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(8):693-700.
- [6] Sadeghi J, Askarinejad H. An investigation into the effects of track structural conditions on railway track geometry deviations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2009, 223(4):415-425.
- [7] Li M, Persson I, Berg J S M. On the use of second-order derivatives of track irregularity for assessing vertical track geometry quality[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(2):389-401.
- [8] Li M X D, Berggren E G, Persson M B I. Assessing track geometry quality based on wavelength spectra and track-vehicle dynamic interaction[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(4):261-276.
- [9] 王峰. 高速铁路网格化管理理论与关键技术[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(1):50-55.
- [10] 徐磊,陈宪麦,张晴,等. 基于不平顺谱的轨道不平顺状态评价与识别探讨[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2012,25(3):62-67.
- [11] 堀雄一,三和雅史,内田雅夫. 新しい轨道狂い進みの予測式とその特徴[J]. 新线路,1996,50(11):30-32.
- [12] 石川達也,内田雅夫. 道床バラシト部の左右方向の繰返し変形特性の実験的検討[J]. 鉄道総研報告,1995,9(4):31-36.
- [13] Javad Sadeghi, Hossein Askarinejad. Development of track condition assessment model based on visual inspection[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(12):895-905.
- [14] Javad Sadeghi, Hossein Askarinejad. Development of improved railway track degradation models[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010, 6(6):675-688.
- [15] Rhayma N, Bressollette P, Breul P, et al. A probabilistic approach for estimating the behavior of railway tracks[J]. Engineering Structures, 2011, 33(7):2120-2133.
- [16] 仲春艳. 线路质量等级管理方法与实践[D]. 上海:同济大学,2014:25-27.

Research on Track Quality Evaluation Index of High Speed Railway Ballastless Track

Xu Weichang¹, Zhong Chunyan², Xu Yude³, Shen Jianfeng³

(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: In order to effectively carry out track maintenance and repair management, track quality evaluation and grading is needed. Based on the analysis of existing track quality evaluation methods, combining track geometry and structure inspection data, track quality evaluation indexes and related calculation formula are established of high-speed railway ballastless track, reflecting the track geometry condition and structure condition. The index initial weights are determined using analytic hierarchy process and variable weight model. Track quality evaluation indexes are applied in Shanghai-Nanjing high-speed railway, and the result shows that track quality evaluation indexes can accurately evaluate the track quality and reflect track weaknesses. Further disease analysis of track weakness can be made on the basis of the evaluation results to guide track precise repairing operation.

Key words: high-speed railway; ballastless track; track quality; evaluation index