

文章编号: 1005-0523(2021)05-0101-09



基于放大系数和权重组合的无砟轨道 TQI 计算

许玉德¹, 吴琰超¹, 魏子龙², 杨飞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. 中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施检测研究所, 北京 100081)

摘要: 无砟轨道是我国高速铁路普遍采用的轨道结构形式, 由于无砟轨道质量状态好、不平顺幅值小, 应用现行轨道质量指数 (TQI) 进行轨道平顺状态评价时, 难以反映不同线路区间之间的差异, 进而不利于无砟轨道的精细化管理。为此, 文章提出了基于放大系数和不同权重组合的 TQI 计算方法。以某高速铁路无砟轨道不平顺检测数据为例, 利用变异系数分配各单项分量在 TQI 中的权重, 并通过放大系数将单项分量值根据管理标准进行分级处理; 通过新 TQI 值与原 TQI 值的对比分析, 将新 TQI 值计算结果分为 4 个区间: $TQI \leq 600$, $600 < TQI \leq 700$, $700 < TQI \leq 800$, $TQI > 800$ 。与现行 TQI 相比, 文章提出的计算方法能够更为有效地识别出现严重轨道不平顺病害的处所, 以期对高速铁路无砟轨道线路的平顺性进行更好地评估和管理。

关键词: 无砟轨道; 轨道质量指数 TQI; 权重系数; 放大系数

中图分类号: U216.3 **文献标志码:** A

本文引用格式: 许玉德, 吴琰超, 魏子龙, 等. 基于放大系数和权重组合的无砟轨道 TQI 计算[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(5): 101-109.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20211026.007

Calculating TQI of Ballastless Track Based on Amplification Coefficient and Weights

Xu Yude¹, Wu Yanchao¹, Wei Zilong², Yang Fei²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Ballastless track is widely used in high-speed railway in China. Because of its good quality and small amplitude of irregularity, it is difficult to distinguish line sections when using the current track quality index (TQI) to evaluate track smoothness, which is not conducive to the fine management of ballastless track. Therefore, a new method for calculating TQI value based on the combination of amplification factor and different weight combinations is proposed. Taking the irregularity detection data from Shanghai-Hangzhou high-speed railway uplink as an example, the weight of each single component in TQI is allocated by using the coefficient of variation, and the single component value is graded according to the management standard by using the amplification coefficient. By comparing the new TQI value with the original TQI value, the calculation results of the new TQI value are divided into four intervals, $TQI \leq 600$, $600 < TQI \leq 700$, $700 < TQI \leq 800$, $TQI > 800$, in order to better evaluate and manage the smoothness of high-speed railway ballastless track.

Key words: ballastless track; track quality index; weights; amplification factor

Citation format: XU Y D, WU Y C, WEI Z L, et al. Calculating TQI of ballastless track based on amplification coefficient and weights[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 101-109.

收稿日期: 2021-04-22

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司科技研究开发项目(2020YJ063)

轨道质量指数 (track quality index, TQI) 是指 200 m 单元区段内轨道的左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平和扭曲等 7 项不平顺的标准偏差之和, 通过将全线分为若干个单元进行计算后得到 TQI 的平均值, 以表示线路的整体状态^[1-2]。然而, 随着无砟轨道在中国高铁的广泛应用, TQI 表现出了一定的不适应性^[3]: 在对轨道状态的检测中发现, 轨道局部波动不能被有效识别, 存在潜在轨道病害被遗漏的现象; 在工务实践中, 管理人员仅对 TQI 超限地段进行轨道管理, 对上述各单项标准差超限值的关注较少, 导致某些区段评价的失真; 特别是在高速铁路无砟轨道平顺性较好的情况下, 不同线路的 TQI 平均值相差很小, 难以对不同线路平顺状态的优劣进行合理地比较。寻找更合理的评估方法对于科学评价轨道服役状态, 精准指导养护维修作业, 进而保障高速铁路安全平稳运行具有重要的意义。

为改进现行区段管理标准的不足, 众多国内外铁路机构与学者开展了不同形式的修订和完善工作。许玉德等^[4-7]先后提出了过程性能指数 (process performance index, PPI)、轨道几何状态均匀性指数 (track geometry equality index, TGEI)、轨道几何状态综合评价指标 (track geometry comprehensive index, TGCI) 等评价方法, 并对高速铁路无砟轨道几何不平顺区段管理长度进行了研究。陈勋^[8]通过统计分析方法对沪宁城际轨道质量指数的分布规律进行了研究, 发现 TQI 服从对数正态分布。杨飞等^[9]引入滑动标准差计算方式对轨道区段状态进行评价, 结果表明滑动标准差能够找到轨道质量最差的区段并且识别不良区段的起止位置。许贵阳等^[10]利用 LVQ 神经网络和层次分析法及聚类分析, 建立了基于 TQI、轨检车单项几何不平顺、轨检车车辆加速度、晃车仪加速度、添乘仪加速度和人体感觉参数共 6 项指标作为特征参数的轨道单元质量状态评价方法。Huang 等^[11]综合静态检查、机车搭载式检查仪和轨检车获取的检测数据, 提出了轨道综合质量指标 (track integration quality index, TIQI)。Sadeghi 等^[12]根据轨距、高低、水平、扭曲等几何形位实测数据呈正态分布的特点, 提出了基于平均值和标准差的轨道几何形位指数, 该指标不仅能够评价单个参数, 也给出了整个轨道几何形位的状态。田新宇等^[13]基于多体动力学理论和综合检测列车实测

数据, 探讨了 300~350 km/h 高速铁路轨道长波高低不平顺管理标准和评价方法建议。杨翠平等^[14-15]提出了轨道加权质量指数 (track weighed quality index, F-TWQI), 通过带通滤波对轨道不平顺波形分量的标准差赋权; 并且利用主成分分析法对特征变量进行筛选, 快速精简地获得轨检数据所包含的轨道状态信息, 实现对轨道线路潜在病害位置的识别。高望翰^[16]基于时频分析方法对轨道高低不平顺数据进行分析, 提出了基于小波能量谱的轨道板结构状态评估算法, 通过检测里程和波长的时频谱峰值确定轨道板病害。Choi^[17]使用机器学习的方法处理分析车辆振动加速度数据对轨道质量指数进行预测, 提高了预测的效率。

TQI 在我国已应用多年, 在轨道区段质量状态评价中发挥了巨大的作用, 工务管理实践中已经习惯运用 TQI 来管理线路动态质量。然而, 在评价高速铁路无砟轨道不同线路区间时, TQI 差值很小, 无法反映线路状态的差异, 给无砟轨道精细化管理带来新的问题。基于此, 本文对 TQI 的计算方法进行改进, 提出了一种基于放大系数和不同权重组合的 TQI 值计算方法, 对 TQI 中的各单项分量赋予相应的权重, 并将 TQI 波形进行合理地放大, 更加突出平顺性较差的区域, 最后结合加拿大轨道单项几何参数指数的计算原理, 扩大值域范围, 以期对高速铁路无砟轨道线路平顺性进行更好地评估和管理。

1 权重系数

1.1 单项分量在 TQI 中的比重

TQI 是用 200 m 单元区段内的 7 项轨道不平顺的标准偏差之和计算得到的, 计算公式^[18]如下

$$\left. \begin{aligned} TQI &= \sum_{i=1}^7 \sigma_i \\ \sigma_i &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{X}_i)^2} \\ \bar{X}_i &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_i 为各项几何参数的标准差, 其中 $i=1, 2, \dots, 7$, 分别表示左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平和扭曲; x_{ij} 为单元区段内各项几何偏差的幅值, 其中 $j=1, 2, \dots, n$, n 为采样点的个数 (200 m 单元区段中 $n=800$)。

从式(1)中可以看出, 组成 TQI 的 7 个单项分

量的权重都为 1,这表明 7 个单项分量对 TQI 的“贡献率”是相同的。为获取各单项分量的实际“贡献”程度,以某无砟高速铁路在 2011—2020 年的轨道

检测数据为例,计算长度为 120 km 的线路区段中各项分量占 TQI 的比重,计算结果见表 1。

从表 1 中可以看出,各项分量的数值在 TQI 中

表 1 某无砟高速铁路 TQI 中各项分量占比
Tab.1 Proportion of each component in TQI of a ballastless high speed railway

Inspection time	Longitudinal level		Track alignment		Gauge	Level	Twist
	Left	Right	Left	Right			
2011/06/22	14.66	15.43	12.65	11.69	13.29	14.78	17.51
2012/04/16	15.64	14.79	11.72	12.61	12.91	14.66	17.67
2013/06/09	15.38	15.99	12.61	12.34	13.59	13.45	16.63
2014/05/13	16.79	15.84	12.13	13.09	13.67	12.83	15.65
2015/05/12	18.05	16.71	11.69	11.55	12.88	12.87	16.26
2015/11/11	16.58	12.91	12.94	13.72	14.66	13.08	16.11
2016/07/29	15.75	14.75	11.00	10.72	13.34	14.65	19.79
2017/06/16	14.90	14.16	10.59	10.07	14.89	14.81	20.58
2017/12/05	13.47	14.28	11.66	11.03	14.81	15.64	19.11
2018/12/05	13.66	14.46	11.36	10.38	14.43	16.94	18.77
2019/12/05	13.89	14.65	10.96	10.63	14.41	15.40	20.06
2020/03/06	14.94	15.27	10.33	9.97	13.75	15.52	20.22
Mean value	15.31	14.94	11.64	11.48	13.89	14.55	18.20

所占的比重从大到小依次为:扭曲(18.20%)、左右高低(15.31%、14.94%)、水平(14.55%)、轨距(13.89%)、左右轨向(11.64%、11.48%),说明扭曲标准差对 TQI 计算结果的影响是最大的,其次是高低和水平标准差,轨距和轨向标准差对 TQI 计算结果的影响最小。可见,不同分量在 TQI 中所占的比重各不相同,需要找到合适的方法对单项标准差赋予不同的权重,在利用 TQI 对线路整体状态进行评价时突出对 TQI 计算结果影响较大的成分。

1.2 变异系数

为了突出对 TQI 计算结果影响较大的成分,使得其在 TQI 中所占的权重更大,文章引入了统计学中的变异系数^[9](coefficient of variation)概念。变异系数是衡量观测值离散程度的统计指标,消除了平均值对数据离散程度的影响,反映了单位均值上的离散程度。一个线路区间内的单项分量变异系数 cv_i 等于该线路上所有 200 m 单元区段的单项标准差的标准差 S_i 与单项标准差的平均值 $\bar{\sigma}_i$ 之比,计算公式如下

$$\left. \begin{aligned}
 cv_i &= S_i / \bar{\sigma}_i \\
 S_i &= \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\sigma_{ij} - \bar{\sigma}_i)^2} \\
 \bar{\sigma}_i &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_{ij}
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: cv_i 为单项分量的变异系数; $\bar{\sigma}_i=(i=1,2,\dots,7)$ 为该线路区间内所有 200 m 单元区段的单项标准差 $\sigma_{ij}(j=1,2,\dots,m)$ 的平均值, m 为该线路区间内 200 m 单元区段的个数; S_i 为该线路区间内所有 200 m 单元区段的单项标准差的标准差。

采用式(2)的计算方法,统计某无砟高速铁路历年 TQI 各项分量的变异系数,结果如表 2 所示。

单项分量的变异系数反映了单项分量的离散程度,变异系数越大表示该线路区间内的单项标准差越离散。如表 3 所示,各项分量的变异系数在大多数时候从大到小的排列顺序依次为:轨距、水平、扭曲、高低、轨向,说明在该条线路上,轨距标准差的波动较大,但线路的 TQI 值并不能有效识别该项

表2 历年TQI各项分量的变异系数
Tab.2 Variation coefficient of each component in TQI over years

Inspection time	Longitudinal level		Track alignment		Gauge	Level	Twist
	Left	Right	Left	Right			
2011/06/22	0.133	0.110	0.139	0.136	0.188	0.153	0.126
2012/04/16	0.154	0.145	0.146	0.129	0.204	0.157	0.133
2013/06/09	0.155	0.151	0.151	0.140	0.186	0.176	0.179
2014/05/13	0.154	0.159	0.138	0.143	0.187	0.170	0.176
2015/05/12	0.158	0.154	0.156	0.151	0.185	0.181	0.151
2015/11/11	0.136	0.136	0.128	0.155	0.213	0.160	0.145
2016/07/29	0.127	0.095	0.120	0.115	0.137	0.145	0.126
2017/06/16	0.094	0.117	0.102	0.107	0.166	0.141	0.142
2017/12/05	0.164	0.157	0.115	0.125	0.130	0.175	0.153
2018/12/05	0.143	0.120	0.112	0.118	0.150	0.167	0.121
2019/12/05	0.166	0.153	0.103	0.123	0.136	0.131	0.146
2020/03/06	0.135	0.111	0.103	0.106	0.122	0.106	0.102
Mean value	0.143	0.134	0.126	0.129	0.167	0.155	0.142

波动,单纯使用TQI的平均值并不能代表该线路的整体状况。

1.3 单项分量的权重

通俗上来讲,单项分量的数值较大反映了线路区域整体上该项不平顺较差;而单项分量的变异系数较大则反映了该项不平顺在该线路区域上时好时差。为了有效识别这种轨道局部波动,变异系数

较大的单项分量应占据较大的权重。采用变异系数所占的百分比来分配TQI的权重,如式(3)所示。

$$\alpha_i = (cv_i / \sum_{i=1}^7 cv_i) \times 100\% \quad (3)$$

式中: α_i 为单项分量的权重。

根据式(3)的计算方法,统计某无砟高速铁路历年TQI各项分量的权重系数,如表3所示。

表3 历年TQI各项分量的权重系数
Tab.3 Weight coefficient of each component in TQI over years

Inspection time	Longitudinal level		Track alignment		Gauge	Level	Twist
	Left	Right	Left	Right			
2011/06/22	13.51	11.14	14.08	13.84	19.09	15.52	12.80
2012/04/16	14.40	13.62	13.69	12.08	19.08	14.68	12.45
2013/06/09	13.59	13.26	13.24	12.34	16.36	15.47	15.75
2014/05/13	13.66	14.08	12.26	12.72	16.57	15.05	15.65
2015/05/12	13.87	13.56	13.74	13.30	16.26	15.96	13.31
2015/11/11	12.65	12.70	11.91	14.49	19.86	14.93	13.47
2016/07/29	14.73	10.95	13.85	13.34	15.84	16.72	14.56
2017/06/16	10.79	13.45	11.75	12.31	19.11	16.24	16.36
2017/12/05	16.07	15.41	11.32	12.31	12.74	17.15	15.01
2018/12/05	15.35	12.92	12.00	12.67	16.15	17.91	13.00
2019/12/05	17.38	15.99	10.71	12.83	14.16	13.67	15.25
2020/03/06	17.19	14.11	13.08	13.57	15.54	13.53	12.98
Mean value	14.43	13.43	12.64	12.98	16.73	15.57	14.22

2 放大系数

我国高速铁路无砟轨道的平顺性管理主要依据《高速铁路无砟轨道线路维修规则》,其中关于 TQI 及单项分量的管理标准见表 4,该标准仅针对不同速度等级的线路进行分类,没有具体的分级处理方法。

与此同时,管理人员在工务实践中通常仅对 TQI 超限地段进行轨道管理,对单项标准差超限值

的关注较少,导致某些区段评价的失真。以高低不平顺为例,从表 4 中可以看出,对于速度等级为 250~350 km/h 的线路,当高低不平顺标准差小于 0.8 时为合格,否则为超限。实际上当高低不平顺标准差接近 0.8 时,线路不平顺状态已经恶化到一定程度,虽然尚未超限,但也不容忽视。然而,工务管理中对这一部分的关注较少,这对于高速铁路无砟轨道的几何状态不平顺精细化管理是不利的。

表 4 中国高速铁路无砟轨道 TQI 及单项分量管理值

Tab.4 TQI and single component management value of ballastless high speed railway in China

Speed grade/ (km/h)	Longitudinal level(st_1, st_2)	Track alignment(st_3, st_4)	Gauge(st_5)	Level(st_6)	Twist(st_7)	TQI
200~250	1.4×2	1.0×2	0.9	1.1	1.2	8.0
250~350	0.8×2	0.7×2	0.6	0.7	0.7	5.0

文章将单项不平顺标准差的管理值分为“ $\leq st_i / 2$ ”、“ $st_i / 2 \sim st_i$ ”、“ $> st_i$ ” 3 个等级,通过不同的放大系数进行计算,如图 1 所示。放大后的单项分量计算公式如下

$$s_i = \begin{cases} k_1 \sigma_i & \sigma_i \leq st_i / 2 \\ k_2 (\sigma_i - st_i / 2) + st_i / 2 & st_i / 2 < \sigma_i \leq st_i \\ k_3 (\sigma_i - st_i) + k_2 (st_i - st_i / 2) + k_1 st_i / 2 & \sigma_i > st_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: s_i 为放大后的单项分量; st_i 为表 4 中各单项分量的管理值; k_1, k_2, k_3 分别为放大系数(通过试算后,分别取 $k_1=1, k_2=2, k_3=4$)。

从式(4)和图 1 可以看出,对于高低分量小于 0.4 的值,该值距离超限管理值尚远,放大系数为 1,仍采用现值;对于高低分量大于 0.4 但小于 0.8 的值,该值虽未超限,但距离超限值较近,将该分量超

过 0.4 的部分进行 2 倍放大,需要一定程度的关注;对于高低分量大于 0.8 的值,该值已经超限,但由于其它分量较小,TQI 并不会超限,将该分量超过 0.8 的部分进行 4 倍放大,对于该值对应的里程需要重点关注。放大后的单项分量组成的 TQI 值,在原 TQI 值接近超限但尚未超限的区域也会超限,在管理人员对 TQI 超限地段进行轨道管理时能够对单项分量接近超限或已超限的区域管理到位。

3 基于放大系数和不同权重组合的 TQI 综合指数计算方法

针对高速铁路无砟轨道不同线路区间 TQI 平均值相差较小的问题,在赋予单项分量不同权重和放大系数的基础上,还需要进一步将 TQI 的值域范围扩大。最终,结合加拿大轨道单项几何参数指数^[20]的计算原理,提出基于放大系数和不同权重组合的 TQI 综合指数(以下简称“新 TQI 值”),计算公式如下

$$TQI = 1\ 000 - C \sum_{i=1}^7 \alpha_i s_i \quad (5)$$

式中: α_i 为各单项分量的权重,根据表 3 确定; C 为经验常数,经反复试算后取 $C=700$ 。新 TQI 值在 0~1 000 之间变化,值越大说明线路状态越好。

采用式(5)中的计算方法,统计某无砟高速铁路 2020 年 3 月份的新 TQI 值,绘制成频率分布直方图,如图 2 所示。

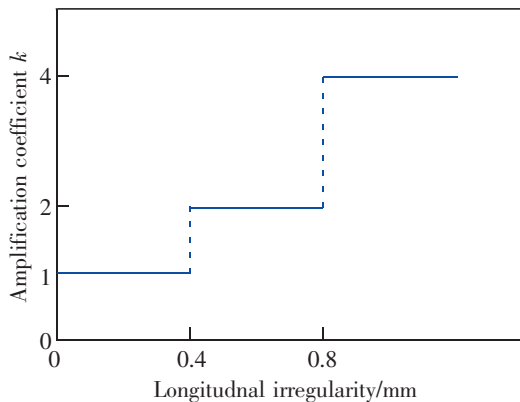


图 1 (250~350 km/h 速度等级下高低分量的放大系数
Fig.1 Amplification coefficient of longitudinal irregularity at 250 ~ 350 km/h speed

从图2可以看出,考虑了放大系数和不同权重后,新TQI最大值为831,最小值为241,值域范围较大。其中新TQI值在600以下的单元区段数占5.4,在600~700之间的占7.6,在700~800之间的占82.2,在800以上的占4.8。

为了对新TQI值与原TQI值的值域范围进行比较,需要将两者计算结果放到同一量级上。取转换前的量 $7 \sum_{i=1}^7 \alpha_i s_i$ 与 $\sum_{i=1}^7 \sigma_i$,计算两者的频率分布情况,结果如图3所示。从图3可以看出,新TQI值的

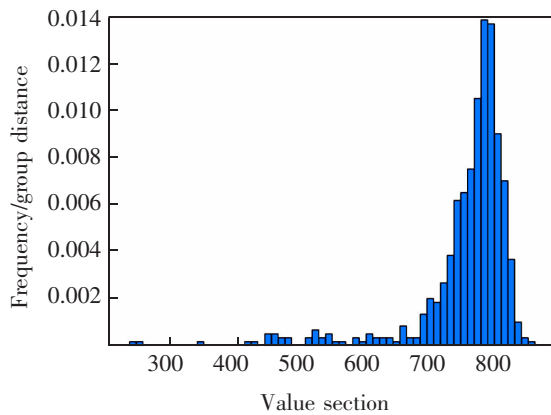


图2 新TQI值频率分布直方图

Fig.2 Histogram of frequency distribution of new TQI

频率分布范围与原TQI值相比更加广泛,放大系数使得原TQI值较大的地方更加突出,较小的地方保持不变,能够更加有效地识别出轨道平顺性较差的位置。

为了探索新TQI值与原TQI值的关系,图4绘制了某无砟高速铁路2020年3月份的新TQI值与原TQI值散点图。从图4可以看出,新TQI值与原TQI值之间的相关系数 r 达到 -0.9876 ,表明两者具有高度相关的线性关系。

采用同样的方法,统计某无砟高速铁路近年来

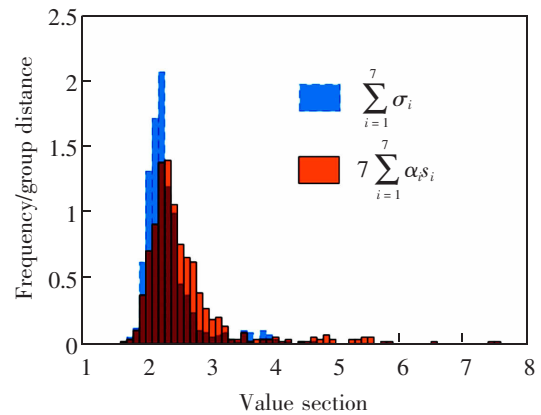


图3 新TQI值与原TQI值的对比情况

Fig.3 Comparison between new TQI and original TQI

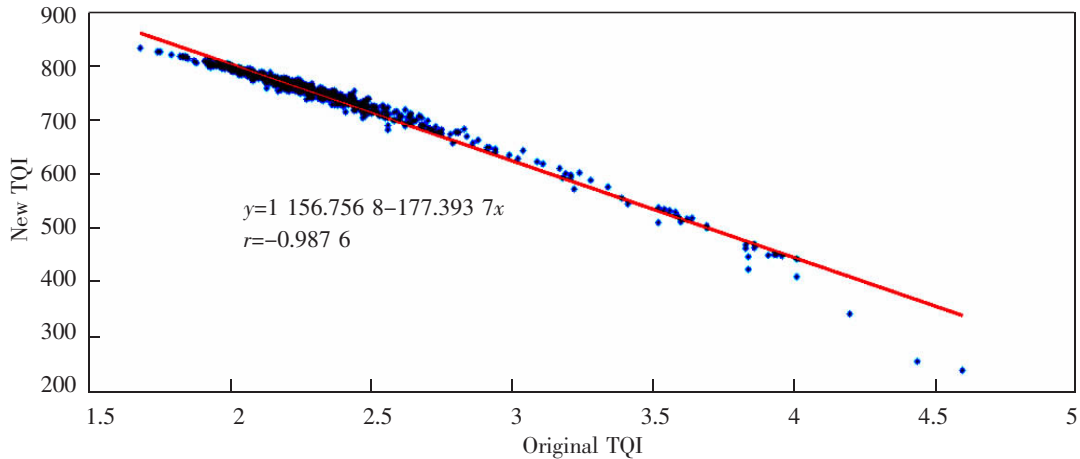


图4 新TQI值与原TQI值散点图

Fig.4 Scatter diagram of new TQI and original TQI

的新TQI值与原TQI值的计算结果见表5和表6。从表5可以看出,将新TQI值分为4个区间,各区间范围存在一定程度的重叠,并且两者具有高度相关的线性关系。

从表6可以看出,在2016年以前,新TQI值在前3个区间内分布较为均匀;而2016年之后,

新TQI值主要集中于700~800之间。如果新TQI值落在4个区间内依次表示差、中、良、优,2016年之后,90%以上的区段为优良,仅不到10%的区段为中或者差。通过查阅线路的维修数据,发现该无砟高铁线路在2016年进行了线路整体精调。

表 5 新 TQI 值与原 TQI 值在各区间内的对应关系
Tab.5 Corresponding relationship between new TQI and original TQI in each interval

Inspection time	$TQI \leq 600$		$600 < TQI \leq 700$		$700 < TQI \leq 800$		$TQI > 800$		Correlation Coefficient
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
2011/06/22	2.71	5.02	2.65	3.26	2.37	2.73	1.29	1.43	-0.980 0
2012/04/16	3.72	5.05	2.93	3.90	2.41	3.01	-	-	-0.982 4
2013/06/09	3.21	5.20	2.67	3.26	2.04	2.73	-	-	-0.982 9
2014/05/13	3.19	5.39	2.63	3.25	2.32	2.72	-	-	-0.989 0
2015/05/12	3.18	5.64	2.68	3.25	2.41	2.73	-	-	-0.988 1
2015/11/11	3.21	5.47	2.53	3.25	1.96	2.70	1.63	1.95	-0.977 8
2016/07/29	3.16	5.47	2.64	3.18	1.87	2.69	1.50	1.97	-0.985 7
2017/06/16	3.20	5.47	2.58	3.18	1.84	2.69	1.46	2.01	-0.977 7
2017/12/05	3.19	5.56	2.56	3.06	1.90	2.64	1.09	1.99	-0.981 4
2018/12/05	3.19	4.47	2.50	3.17	1.91	2.73	1.56	1.98	-0.984 3
2019/12/05	3.17	4.39	2.45	3.17	1.91	2.66	1.55	1.98	-0.987 6
2020/03/06	3.18	4.60	2.56	3.24	1.93	2.68	1.68	1.99	-0.987 6
Mean value	3.19	5.14	2.62	3.26	2.07	2.73	1.47	1.91	-0.983 7

表 6 新 TQI 值在各区间内的百分比统计
Tab.6 Percentage statistics of new TQI in each interval

Inspection time	$TQI \leq 600$	$600 < TQI \leq 700$	$700 < TQI \leq 800$	$TQI > 800$
2011/06/22	30.14	36.21	33.41	0.23
2012/04/16	12.02	59.38	28.59	0.00
2013/06/09	24.53	34.97	40.50	0.00
2014/05/13	34.21	26.75	39.04	0.00
2015/05/12	42.31	14.23	43.46	0.00
2015/11/11	21.96	41.18	35.16	1.70
2016/07/29	5.21	3.00	47.24	44.55
2017/06/16	5.81	3.30	39.09	51.81
2017/12/05	6.15	4.10	65.30	24.45
2018/12/05	4.93	4.61	64.23	26.23
2019/12/05	5.21	4.58	68.56	21.64
2020/03/06	5.40	7.62	82.22	4.76

4 结论

1) 对某无砟高速铁路而言,扭曲不平顺占 TQI 的比重是最大的;然而轨距分量的变异系数更大,表现为轨距标准差在该线路区域上时大时小,在 TQI 计算结果中需要将轨距分量突出。

2) 针对高速铁路无砟轨道不同线路间的 TQI 值相差很小且 TQI 及单项分量的管理标准中没有具体分级处理方法的问题,提出了基于放大系数和不同权重组合的 TQI 计算方法,并将最后结果分为差、中、良、优 4 个区间,依次为 $TQI \leq 600$ 、 $600 < TQI \leq 700$ 、 $700 < TQI \leq 800$ 、 $TQI > 800$,可以对高速铁路无砟轨道线路平顺性进行更好地评估和管理。

3) 该方法在新线联调联试过程中的适应性,需要更多数据进行分析。

参考文献:

- [1] 刘金朝,刘秀波. 轨道质量状态评价方法[J]. 铁路技术创新,2012(1):106-109.
LIU J C, LIU X B. Evaluation method of track quality state [J]. Railway Technical Innovation, 2012(1):106-109.
- [2] 练松良,刘扬,杨文忠. 沪宁线轨道不平顺谱的分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(10):1342-1346.
LIAN S L, LIU Y, YANG W Z. Analysis of track irregularity spectrum of Shanghai-Nanjing railway[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, 35(10):1342-1346.
- [3] 黎国清. 轨道质量指数及其在高铁动态验收中的应用[J]. 铁道工程学报,2016,33(11):45-50.
LI G Q. Research on the track quality index and its application in high speed railway dynamic acceptance[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(11):45-50.
- [4] 王建西,李海锋,许玉德. 基于概率分布推移变化的铁路轨道几何状态评价与预测方法[J]. 中国铁道科学,2008(5):31-34.
WAGN J X, LI H F, XU Y D. Evaluation and prediction method for railway track geometric state based on probability distribution change[J]. China Railway Science, 2008(5):31-34.
- [5] 李海锋,许玉德,王建西. 轨道几何状态均匀性指数及其应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(4):495-499.
LI H F, XU Y D, WANG J X. Track geometry equality index and its application[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(4):495-499.
- [6] 沈坚锋,许玉德,李海锋,等. 轨道几何状态综合评价指标参数权重的敏感性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(11):1709-1714.
SHEN J F, XU Y D, LI H F, et al. Weight sensitivity analysis of parameters of track geometry comprehensive index[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(11):1709-1714.
- [7] 徐伟昌,仲春艳,许玉德,等. 高速铁路无砟轨道几何不平顺区段管理长度研究[J]. 华东交通大学学报,2016,33(2):9-14.
XU W C, ZHONG C Y, XU Y D, et al. Research on management length of geometric irregularity section for ballastless track of high-speed railway[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(2):9-14.
- [8] 陈勋. 沪宁城际高速铁路轨道质量指数分布规律研究[J]. 铁道标准设计,2013(7):1-5.
CHEN X. Research on distribution rule of track quality index of Shanghai-Nanjing intercity high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2013(7):1-5.
- [9] 杨飞,赵钢,尤明熙,等. 滑动标准差在轨道几何区段状态评价中的应用[J]. 铁道标准设计,2017,61(12):10-13.
YANG F, ZHAO G, YOU M X, et al. Application of slip standard deviation in the evaluation of track geometry[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(12):10-13.
- [10] 许贵阳,刘金朝,曲建军,等. 基于 LVQ 神经网络的轨道单元状态综合评判方法研究[J]. 铁道建筑,2013(10):84-87.
XU G Y, LIU J Z, QU J J, et al. Study on comprehensive evaluation method of track unit condition based on LVQ (learning vector quantization) nerve network[J]. Railway Engineering, 2013(10):84-87.
- [11] HUANG S, KANG Y, WANG Z, et al. Track integration quality index[J]. Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable, 2010:1448-1454.
- [12] SADEGHI J M, ASKARINEJAD H. Development of track condition assessment model based on visual inspection[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(12):895-905.
- [13] 田新宇,高亮,杨飞,等. 无砟轨道长波高低不平顺管理标准的研究[J]. 铁道工程学报,2018,35(3):26-30.
TIAN X Y, GAO L, YANG, et al. Research on the long-wave longitudinal level irregularity standards of ballastless track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(3):26-30.
- [14] 杨翠平,从建芳,全源,等. 基于带通滤波的轨道不平顺敏感波长计权评价方法[J]. 振动与冲击,2019,38(19):

- 1-6.
YANG C P, CONG J L, WANG Y, et al. Weighted assessment method for sensitive wavelength of track irregularity based on band pass filtering[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19):1-6.
- [15] 杨翠平, 王平. 基于多时域特征量的轨道不平顺状态综合评估[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(5):57-62.
YANG C P, WANG P. Comprehensive evaluation of track irregularity based on multiple time-domain feature quantities[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(5):57-62.
- [16] 高望翰. 高速铁路轨道几何不平顺分析方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
GAO W H. Study on analytical method of track geometrical irregularities for high-speed railway[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2020.
- [17] CHOI C Y, KIM H K, KIM Y C, et al. Prediction of track quality index (TQI) using vehicle acceleration data based on machine learning[J]. Journal of the Korean Geosynthetics Society, 2020, 19(1):45-53.
- [18] 魏世斌, 杨凤春, 翁绍德. 轨道质量指数的研究和应用[J]. 中国铁道科学, 1996(2):23-33.
WEI S B, YANG F C, WENG S D. Track quality index[J]. China Railway Science, 1996(2):23-33.
- [19] 王文森. 变异系数——一个衡量离散程度简单而有用的统计指标[J]. 中国统计, 2007(6):41-42.
WANG W S. Coefficient of variation—A simple and useful statistical measure of dispersion[J]. China Statistics, 2007(6):41-42.
- [20] 翁绍德. 轨道质量指数在国外铁路中的应用概况[J]. 铁道建筑, 1994(7):32-37.
WENG S D. Application of track quality index in foreign railways[J]. Railway Engineering, 1994(7):32-37.



第一作者:许玉德(1965—),男,同济大学教授,博士,博士生导师,上海市土木工程学会理事、上海市土木工程学会铁道工程专业委员会副主任委员。研究方向为轨道管理、轨道养护维修技术。本科毕业于上海铁道学院,研究生毕业于北京交通大学。E-mail:xuyude2000@163.com。

(责任编辑:吴海燕 姜红贵)