

# 不同捣固阶段有砟道床阻力特性试验研究

王卫东<sup>1,2</sup>, 宋善义<sup>1</sup>, 颜海建<sup>3</sup>, 肖彬<sup>3</sup>, 王国术<sup>3</sup>, 曾志平<sup>1,2</sup>

- (1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙, 410075;
2. 中南大学 重载铁路工程结构教育部重点实验室, 湖南 长沙, 410075;
3. 中铁十四局集团 第五工程公司, 山东 济宁, 272117)

**摘要:** 为确定不同捣固次数下道床横纵向阻力变化规律以及横纵向阻力之间的相关性, 以湖南长株潭城际铁路有砟轨道道床为研究对象, 沿线进行现场原位试验; 根据试验结果, 采用数据分析方法, 研究不同捣固阶段道床横、纵向阻力特征。建立不同捣固阶段道床横、纵向阻力随轨枕位移变化的幂函数模型; 研究结果表明: 道床阻力并非随捣固次数增加而逐渐增大, 捣固 6 遍时, 道床处于限制轨枕在水平方向位移的最佳状态, 道床横、纵向阻力最大; 在不同捣固阶段, 道床横、纵向阻力随着轨枕位移增大而增大, 当轨枕位移达到 4 mm 左右时, 道床阻力趋于稳定; 不同捣固阶段道床横、纵向阻力之间均呈现强线性相关性, 建议采用道床横向阻力检验指标代替道床横、纵向阻力检验指标。研究成果可为无缝线路设计、施工和养护维修提供参考。

**关键词:** 有砟轨道; 捣固遍数; 道床阻力; 最小二乘法; 相关性分析

中图分类号: U213.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)08-2003-06

## Experimental study on resistance characteristics of ballast bed in different stamping stages

WANG Weidong<sup>1,2</sup>, SONG Shanyi<sup>1</sup>, YAN Haijian<sup>3</sup>, XIAO Bin<sup>3</sup>, WANG Guoshu<sup>3</sup>, ZENG Zhiping<sup>1,2</sup>

- (1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. The Key Laboratory of Engineering Structures of Heavy Haul Railway, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, China;
3. Fifth Engineering Company, China Railway Fourteen Bureau Group, Jining 272117, China)

**Abstract:** In order to determine the change rule of lateral and longitudinal resistance of ballast bed during different tamping times and the correlation between the lateral and longitudinal resistance, the ballast bed of the intercity railway of Changsha—Zhuzhou—Xiangtan was taken as the research object. In-situ test was carried out along the line, according to the test results, the method of data analysis was used and the different ballast tamping stages of the resistance of ballast bed were studied. The power function model of lateral and longitudinal resistances of ballast bed with the change of sleepers displacement was established. The results show that the resistance of ballast bed does not increase gradually with the increase in the number of tamping, the ballast bed is in the best condition and the lateral and longitudinal resistances of ballast bed become the maximum when tamping 6 times. In different ballast tamping stages, the lateral and longitudinal resistances of ballast bed increase with the increase of displacement of sleepers, after the

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-10-27

基金项目(Foundation item): 高速铁路基础研究联合基金资助项目(U1334203); 中铁十四局集团有限公司科技开发计划课题(20160016) (Project(U1334203) supported by the Jointed Fund of High Speed Railway; Project(20160016) supported by the Science and Technology Development of China Railway Fourteen Bureaus Group Co. Ltd.)

通信作者: 王卫东, 博士, 教授, 从事铁道工程研究; E-mail: 147745@163.com

sleeper displacement reaches about 4 mm, resistance tends to be stable. In different ballast tamping stages, there is a strong linear correlation between lateral and longitudinal resistances of ballast bed. It is suggested that the lateral resistance test of ballast bed should be used instead of lateral and longitudinal resistance test. The research results can provide reference for design, construction and maintenance of continuously welded rail.

**Key words:** ballast track; number of tamping; ballast bed resistance; the least squares; correlation analysis

有砟轨道是我国高速铁路所采用的主要轨道结构形式之一<sup>[1-2]</sup>。有砟轨道道床质量状态对于保证轨道结构的稳定性、提高轨道结构的工作性能具有重要意义<sup>[3]</sup>。随着大量不同速度有砟轨道铁路新建和改建,确定轨枕道床横纵向阻力随捣固次数的变化规律对于无缝线路设计、施工和养护维修均具有重要现实意义<sup>[4]</sup>。本文作者对湖南长株潭城际铁路III型混凝土枕横纵向阻力进行现场测试,对实测数据进行数理统计分析,研究在不同捣固阶段道床横、纵向阻力变化规律,获得道床横纵向阻力随捣固次数的变化模式;建立不同捣固次数下道床阻力与轨枕位移的关系曲线,探讨不同捣固次数下道床横、纵向阻力之间的相关性,得出优化现行道床质量评价指标体系的建议。

## 1 试验原理及方法

### 1.1 测试工点概况

以长株潭城际铁路有砟道床为工程背景,正线轨道道砟采用特级碎石道砟,道床顶面宽度为 3.5 m,砟肩宽度为 45.0 cm,道床边坡为 1:1.75,道床厚度为 350.0 mm;轨道采用有挡肩 III<sub>c</sub> 型轨枕,轨枕长为 2.6 m,1 km 铺设 1 667 根;与有挡肩 III<sub>c</sub> 型轨枕配套采用 V 型扣件。

### 1.2 试验原理

道床横向阻力是道床所提供的阻止轨枕横向移动的阻力<sup>[5-6]</sup>,道床纵向阻力是指道床抵抗轨道框架纵向拉移的阻力,道床阻力是保证轨道稳定的重要条件<sup>[7]</sup>。测试道床横向阻力时,先将被测轨枕所有的扣件松开并抽出钢轨垫板、液压千斤顶、力传感器及反力架安装在轨枕的一侧端部,利用钢轨和测量装置的竖向挡板提供横向反力来推移被测轨枕,将千分表安装在轨枕的另一侧端部,采用液压千斤顶对轨枕施加横向推力。测力传感器及力显示器记录横向推力,采用千分表测量轨枕相对于钢轨的横向位移。考虑到千分表安装在同一侧钢轨会产生钢轨变形对位移的影响,将千分表安装于另一侧钢轨上。道床横向阻力测试原理图如图 1 所示,现场试验结果如图 2 所示。

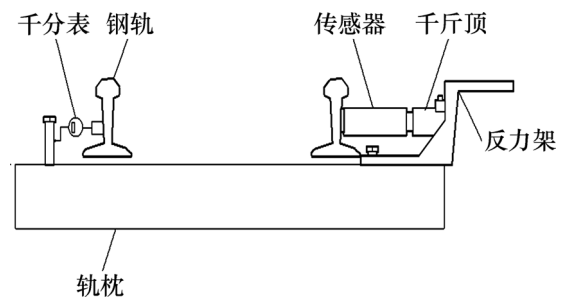


图 1 道床横向阻力测试原理图

Fig. 1 Test principle of lateral resistance



图 2 横向阻力试验加载图

Fig. 2 Test loading of lateral resistance

测试道床纵向阻力时,液压千斤顶,力传感器以及装置支架安装在被测轨枕与紧邻轨枕中间。将千分表安装在被测轨枕的内、外两侧,千分表的磁性底座吸附在内、外两侧的钢轨上。采用液压千斤顶对轨枕施加纵向推力,采用千分表测量轨枕相对于钢轨的纵向位移,记录左、右千分表读数,以其平均值作为轨枕纵向位移,由此可得出纵向阻力与轨枕位移的关系曲线<sup>[8]</sup>。纵向阻力测试原理图如图 3 所示,现场试验结果如图 4 所示。

### 1.3 试验工况及过程

试验前,准备 1 套道床纵向及横向阻力测量装置、2 个磁性底座千分表、千斤顶、压力传感器、力显示器以及其他试验相关工具。根据实地调研结果,道床的捣固次数为 7 遍,并且捣固 1~2 道床的道床横、

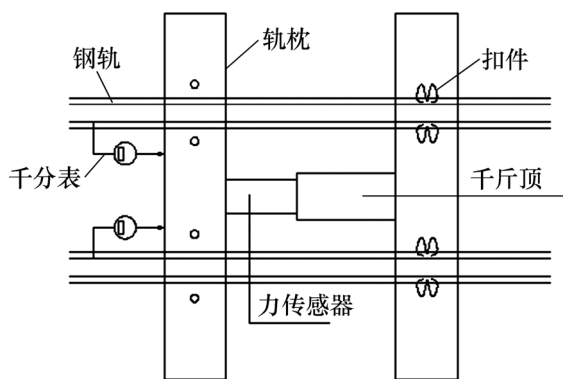


图 3 道床纵向阻力测试原理图

Fig. 3 Test principle of longitudinal resistance



图 4 纵向试验加载图

Fig. 4 longitudinal resistance test loading

纵向阻力尚未稳定, 故本次试验的捣固次数确定为 3~7 遍, 以此测试 5 种工况下道床横纵向阻力。每次测试样本数量为 25 根轨枕。

试验时, 使用千斤顶给轨枕施加推力, 根据千分表的变化速度控制千斤顶加载速度。千分表以 0.2 mm/次读取力显示器的示数及相应的千分表示数得到 1 个阻力-位移散点, 加载直至道床阻力基本不变后卸载。轨枕位移为 2 mm 时力显示器读数为道床横纵向阻力<sup>[9]</sup>。

## 2 试验结果及数据分析

### 2.1 道床阻力与捣固次数的关系

选取道床捣固 3~7 遍的 125 个测试样本。采用偏于保守的数理统计方法统计道床阻力实测值, 以实测值的平均值减去 2.5 倍标准差<sup>[10]</sup>作为道床阻力的最小可能值, 其中道床横向阻力的最小可能值可以作为无缝线路稳定性检算的重要指标<sup>[11]</sup>; 以实测值的均值加上 2.5 倍标准差作为道床阻力的最大可能值, 并结合 TB 10754—2010 “高速铁路轨道工程施工质量验收标

准”(以下简称“验标”)<sup>[12]</sup>中对道床横纵向阻力的要求(轨枕位移为 2 mm 处的道床横向阻力 $\geq 12$  kN/枕, 道床纵向阻力 $\geq 14$  kN/枕)研究测试样本满足“验标”的概率。具体数据处理结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 道床横向阻力统计分析结果

**Table 1** Statistical analysis results of lateral resistance of ballast bed

| 捣固次数/遍 | 平均值/<br>kN | 标准差/<br>kN | 最大可能值/<br>kN | 最小可能值/<br>kN | 满足“验标”<br>的概率/% |
|--------|------------|------------|--------------|--------------|-----------------|
| 3      | 6.81       | 0.73       | 8.64         | 4.99         | 0               |
| 4      | 11.26      | 1.16       | 14.16        | 8.36         | 40.00           |
| 5      | 15.75      | 1.55       | 19.63        | 11.88        | 78.60           |
| 6      | 15.84      | 1.15       | 18.72        | 12.97        | 100.00          |
| 7      | 12.53      | 1.32       | 15.83        | 9.23         | 84.20           |

表 2 道床纵向阻力统计分析结果

**Table 2** Statistical analysis results of longitudinal resistance of ballast bed

| 捣固次数/遍 | 平均值/<br>kN | 标准差/<br>kN | 最大可能值/<br>kN | 最小可能值/<br>kN | 满足“验标”<br>的概率/% |
|--------|------------|------------|--------------|--------------|-----------------|
| 3      | 15.46      | 2.27       | 21.14        | 9.79         | 70.00           |
| 4      | 19.96      | 2.05       | 25.09        | 14.96        | 100.00          |
| 5      | 22.32      | 2.15       | 27.70        | 16.95        | 100.00          |
| 6      | 26.24      | 2.43       | 32.32        | 20.17        | 100.00          |
| 7      | 21.93      | 2.03       | 27.01        | 16.86        | 100.00          |

从表 1 和表 2 可见: 道床阻力的平均值随着道床捣固次数增加, 道床横纵向阻力先增大后减小; 当捣固次数达到 6 遍时, 道床的横纵向阻力达到最大; 捣固 7 遍时, 道床的横纵向阻力均下降。本文引入满足“验标”概率的指标表征道床横纵向阻力随捣固次数增加的变化规律, 该指标是捣固  $N$  遍满足“验标”的样本数量与该遍总的样本数量的比值。通过捣固各次样本满足“验标”的概率可知: 随着捣固次数增加, 道床横向阻力满足“验标”的概率逐渐增加到捣固第 6 遍时的 100%; 在捣固 7 遍后, 有的轨枕横向阻力不满足“验标”的情况; 道床纵向阻力捣固 3 遍时合格率就达 70%; 捣固到 3 遍后合格率均为 100%, 由此可发现道床横向阻力相比纵向阻力更难达到“验标”要求。当被测轨枕的道床横向阻力满足“验标”要求时, 其道床纵向阻力基本都满足“验标”要求, 这个规律为简化道床评价体系提供了数据支撑。

### 2.2 不同捣固次数下道床阻力与轨枕位移的关系

道床横向阻力值  $Q$  与轨枕横向位移  $y$  的关系呈幂函数关系变化<sup>[13]</sup>:

$$Q = Q_0 - By^z + Cy^{1/N} \quad (1)$$

式中:  $Q_0$  为初始道床横向阻力(kN);  $y$  为轨枕在道床中的横向位移(mm);  $B, C, Z$  和  $N$  均为阻力系数。经研究<sup>[14]</sup>,  $N$  可取  $4/3$ 。

基于式(1), 本文根据实测值, 采用幂函数对道床横纵阻力随位移的变化关系进行拟合。当道床捣固 6 遍时, 道床横向及纵向阻力-位移的散点及拟合幂函数曲线分别如图 5 和图 6 所示<sup>[15]</sup>。捣固 3~7 遍时, 根据实测数据拟合所得幂函数公式及结果如表 3 所示, 拟合所得幂函数曲线如图 7 和图 8 所示。

从图 5 和图 6 可见: 拟合所得道床横、纵向阻力-位移曲线变化规律均与对应的实测道床横、纵向阻力-位移曲线变化规律有较好的一致性; 当道床横、纵向阻力在轨枕位移大于 2 mm 时, 其增加幅度逐渐

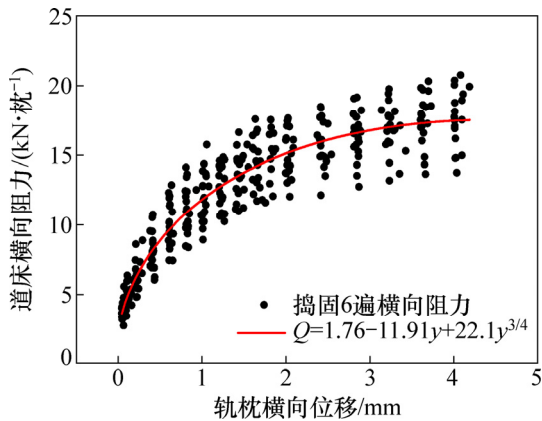


图 5 横向阻力-位移散点及拟合函数图

Fig. 5 Lateral resistance-displacement scatter and fitting function

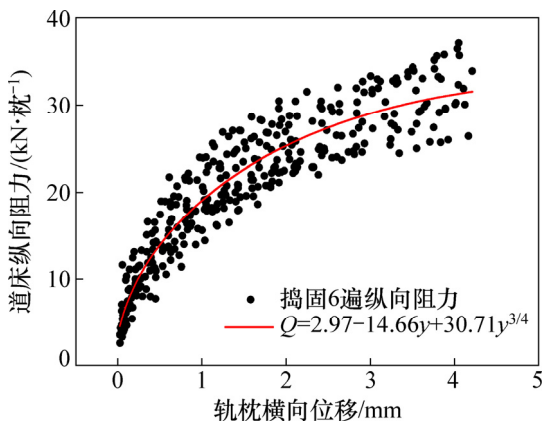
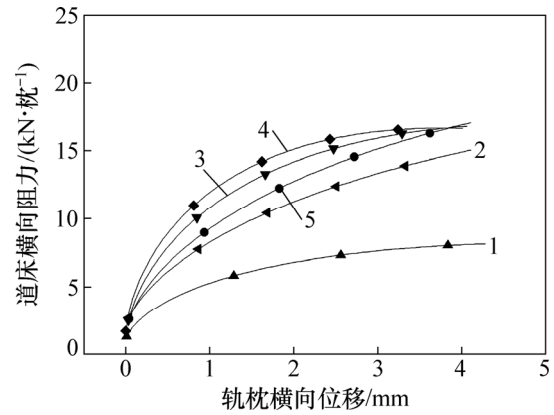


图 6 纵向阻力-位移散点及拟合函数图

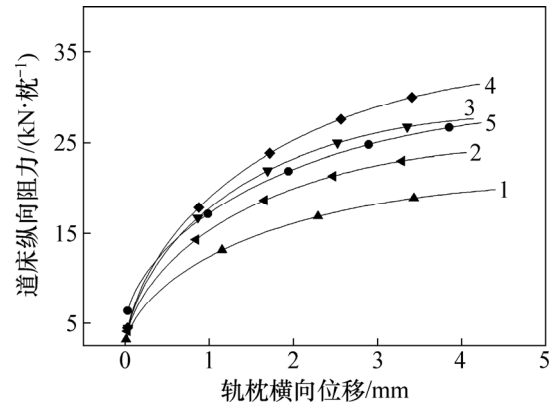
Fig. 6 Longitudinal resistance-displacement scatter and fitting function



捣固遍数: 1—3; 2—4; 3—5; 4—6; 5—7。

图 7 横向阻力拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of lateral resistance



捣固遍数: 1—3; 2—4; 3—5; 4—6; 5—7。

图 8 纵向阻力拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of longitudinal resistance

减小; 当位移达到 4 mm 左右时, 阻力基本趋于稳定。

从表 1 可知: 拟合相关系数为 0.81~0.94, 表明预估模型精度较高, 回归模型效果较可靠。同时验证了道床纵向阻力同样适用此公式, 该拟合式可为理论分析不同捣固阶段道床阻力-位移关系取值提供参考。

从图 7 和图 8 可见: 在不同捣固遍数下, 道床横纵向阻力随着轨枕位移增大而增大, 但其增大速率随轨枕位移增加而减小, 最终道床横纵向阻力均趋于稳定。这表明现行“规范”中道床纵横极限阻力对应轨枕位移的规定适用于不同捣固阶段, 并且更加清晰地揭示了本文关于道床阻力与捣固次数之间的变化规律。

### 2.3 不同捣固次数下道床横纵向阻力相关性分析

研究道床横纵向阻力之间相关性对优化有砟道床评价体系有重要意义<sup>[16]</sup>。由试验结果可知: 道床捣固 6 遍时, 道床横纵向阻力最大, 道床状态相比其他捣固次数更稳定。故先分析捣固 6 遍时道床横、纵向

表 3 道床横向阻力幂函数及其数据表

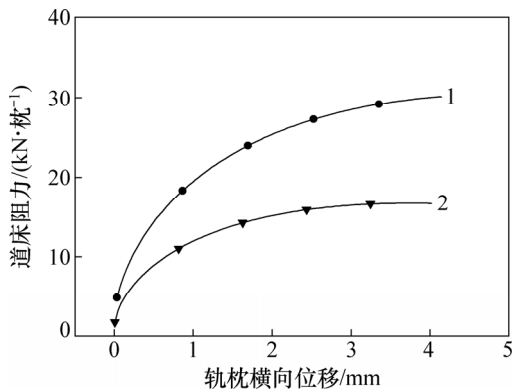
Table 3 Main parameters of resistance fitting function

| 捣固次数 | 道床横向阻力 $Q$ 与轨枕位移 $y$ 关系     | $R^2$ | 道床纵向阻力 $Q$ 与轨枕位移 $y$ 关系      | $R^2$ |
|------|-----------------------------|-------|------------------------------|-------|
| 3    | $Q=1.13-4.05y+8.21y^{3/4}$  | 0.87  | $Q=2.89-8.82y+18.37y^{3/4}$  | 0.83  |
| 4    | $Q=1.96-4.24y+10.56y^{3/4}$ | 0.92  | $Q=3.04-11.99y+24.33y^{3/4}$ | 0.88  |
| 5    | $Q=1.15-9.83y+19.37y^{3/4}$ | 0.87  | $Q=2.79-15.24y+30.21y^{3/4}$ | 0.81  |
| 6    | $Q=1.76-11.91y+22.1y^{3/4}$ | 0.91  | $Q=2.97-14.66y+30.71y^{3/4}$ | 0.88  |
| 7    | $Q=1.74-5.28y+12.83y^{3/4}$ | 0.94  | $Q=5.35-10.46y+22.42y^{3/4}$ | 0.87  |

注:  $R^2$  为拟合系数。

阻力的相关性。

根据表 1 绘制捣固 6 遍的道床横纵向阻力-位移的拟合曲线, 如图 9 所示。对道床横纵向阻力曲线同时在 0~4 mm 进行等间距插值, 得到相同轨枕位移下 100 对道床横纵向阻力, 由此对道床横、纵向阻力之间相关性进行研究。捣固 6 遍道床横向阻力-纵向阻力之间关系如图 10 所示。



1—纵向阻力; 2—横向阻力。

图 9 道床横向和纵向阻力-位移曲线

Fig. 9 Lateral and longitudinal ballast bed resistance-displacement curves

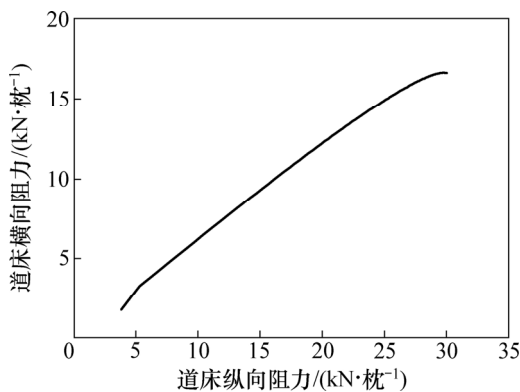


图 10 道床横、纵向阻力的关系

Fig. 10 Relationship between lateral and longitudinal ballast bed resistance

由图 10 可知: 道床横、纵向阻力之间存在明显的线性关系。当 2 个连续变量间呈线性相关且为等间距测度时, 采用 Pearson 积差相关系数表征量化道床纵向阻力、横向阻力两者之间的相关性, 采用 Pearson 相关理论得出道床横、纵向阻力之间的 Pearson 相关系数为 0.976, 相关性非常明显<sup>[17]</sup>。利用该方法得到不同捣固次数下道床横、纵向阻力间的 Pearson 相关系数如表 4 所示。从图 10 可见: 道床横、纵向阻力之间均呈明显的线性相关性。综合道床横、纵向阻力统计分析结果中满足“验标”的概率, 考虑道床纵向阻力检测对道床状态的扰动大于道床横向阻力检测对道床的扰动, 建议有砟道床质量状态评价体系中采用道床横向阻力来代替道床横纵向阻力。

表 4 不同捣固次数下横、纵向阻力相关系数

| 捣固次数 | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 相关系数 | 0.987 | 0.993 | 0.968 | 0.976 | 0.985 |

### 3 结论

1) 在道床捣固 3~6 遍时, 道床横纵向阻力随捣固次数增加而增大; 在捣固 7 遍时, 道床横纵向阻力相较于捣固 6 遍均出现下降现象, 因此, 在施工或养护维修过程中, 要在充分了解道床状态及道砟力学特性后进行适当捣固, 切勿盲目捣固。

2) 在不同捣固阶段, 道床横纵向阻力随着轨枕位移增大而增大。但随着位移增大, 道床阻力增大速率逐渐变小, 轨枕位移达到 4 mm 后, 道床阻力趋于稳定。

3) 基于最小二乘法原理, 建立了捣固 3~7 遍时道床横、纵向阻力随轨枕位移变化的幂函数模型, 可为理论分析不同捣固阶段道床阻力-位移关系取值提供参考。

4) 建议在确定铁路有砟道床质量状态评价标准时,考虑采用道床横向阻力这一项检验指标代替道床纵向、横向阻力这 2 项检验指标,以减小道床质量状态检测过程中对道床的扰动和破坏,提高检测效率。

#### 参考文献:

- [1] LU M, MCDOWELL G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method[J]. *Granular Matter*, 2007, 9(12): 69–80.
- [2] 高亮, 罗奇, 徐旸, 等. 基于离散元法的铁路道床力学特性[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(7): 1064–1069.  
GAO Liang, LUO Qi, XU Yang, et al. Railway ballast bed mechanical property based on discrete element method[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2014, 42(7): 1064–1069.
- [3] 曾树谷. 铁路散粒体道床[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997: 32.  
ZENG Shugu. *Railway ballast bed*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997: 32.
- [4] 石熊, 张家生, 刘蓓, 等. 高速铁路粗粒土填料级配改良试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(11): 3964–3969.  
SHI Xiong, ZHANG Jiasheng, LIU Bei, et al. Test of high-speed railway coarse grained filler of improved particle size distribution[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2014, 45(11): 3964–3969.
- [5] 高亮, 罗奇, 徐旸, 等. 道床断面尺寸对道床横向阻力的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2014, 49(6): 954–960.  
GAO Liang, LUO Qi, XU Yang, et al. Effects of ballast bed section dimension on its lateral resistance[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2014, 49(6): 954–960.
- [6] 徐旸, 高亮, 王红, 等. 道砟级配的分形方法及对道床剪切性能影响[J]. *铁道学报*, 2016, 38(12): 94–101.  
XU Yang, GAO Liang, WANG Hong, et al. Study of fractal method and influence of ballast gradation on ballast bed shear behavior[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(12): 94–101.
- [7] 陈秀方. 轨道工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 21.  
CHEN Xiufang. *Track engineering*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 21.
- [8] 曾志平, 张向民, 孙永宁, 等. 青藏铁路不冻泉地区桥上无缝线路梁轨纵向位移试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(2): 638–642.  
ZENG Zhiping, ZHANG Xiangmin, SUN Yongning, et al. Experimental study of beam and rail longitudinal displacement of CWR track on bridge in Budongquan region along Qinghai-Tibet railway[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(2): 638–642.
- [9] TB 10015—2012, 铁路无缝线路设计规范[S].  
TB 10015—2012, Code for design of continuously welded railway track[S].
- [10] 杨全亮, 朱彬. III型混凝土轨枕道床纵横向阻力试验分析[J]. *铁道技术标准*, 2010, 3(2): 4–6.  
YANG Quanliang, ZHU Bin. Test and analysis of lateral and longitudinal resistance of III type concrete sleeper ballast bed[J]. *Railway Standard Design*, 2010, 3(2): 4–6.
- [11] 梁灿. 无缝线路稳定性及有效保证措施研究[J]. *铁道工程学报*, 2012, 160(1): 26–29.  
LIANG Can. A study on the stability of continuously welded rail tracks and relevant effective measures[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2012, 160(1): 26–29.
- [12] TB 10754—2010, 高速铁路轨道工程施工质量验收标准[S].  
TB 10754—2010, Acceptance standard for construction quality of high speed railway track engineering[S].
- [13] 卢耀荣. 无缝线路研究与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 87.  
LU Yaorong. *Research and application of continuous welded rail track*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004: 87.
- [14] 张向民, 陈秀方, 曾志平. 青藏铁路道床质量状态参数试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2007, 4(3): 64–67.  
ZHANG Xiangmin, CHEN Xiufang, ZENG Zhiping. Experimental study on the quality state parameter of ballast in Qinghai—Tibet railway[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2007, 4(3): 64–67.
- [15] 杨艳丽. III型混凝土轨枕有砟道床纵横向阻力设计参数试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2010, 145(10): 49–51.  
YANG Yanli. Experimental study on design parameters of lateral and longitudinal resistance of ballast bed with type III concrete sleeper[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2010, 145(10): 49–51.
- [16] 马春生. 高速铁路有砟道床质量评价指标优化方法研究[J]. *铁道标准设计*, 2016, 60(5): 20–24.  
MA Chunsheng. Research on evaluation index optimization method of high-speed railway ballasted bed[J]. *Railway Standard Design*, 2016, 60(5): 20–24.
- [17] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 103.  
XUE Wei. *SPSS statistical analysis method and application*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 103.

(编辑 陈灿华)