

文章编号: 1673-9469(2017)04-0051-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.012

## 轨道科研试验线的轮轨力、脱轨系数及减载率研究

唐吉意, 罗雁云, 廖博, 蒋宇春, 单傲  
(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 为了对同济大学轨道交通科研试验线进行脱轨安全性评定, 采用测力钢轨法测试轨道交通科研试验线列车通过时的轮轨力, 包括轮轨垂直力及横向力, 由轮轨力计算脱轨系数及轮重减载率。结果表明, 列车以速度 20、30 及 40 km/h 驶过时, 南侧钢轨的轮轨垂直力平均值在 54.91~56.14 kN 范围内, 北侧钢轨的轮轨垂直力平均值在 72.91~76.62 kN 范围内; 南侧钢轨的轮轨横向力平均值在 5.77~7.86 kN 范围内, 北侧钢轨的轮轨横向力平均值在 6.48~7.11 kN 范围内; 脱轨系数分别为 0.096、0.104 及 0.113, 轮重减载率分别为 0.141、0.152 及 0.154, 脱轨系数及轮重减载率都远小于限界值, 都具有很大的安全余量, 轨道交通科研试验线在脱轨安全性评定方面完全符合要求。

**关键词:** 轮轨作用; 脱轨系数; 轮重减载率; 轮轨垂直力; 轮轨横向力; 科研试验线

**中图分类号:** U211.5

**文献标识码:** A

## Research on wheel-rail force derailment coefficient and wheel load reduction ratio of the scientific research track line

TANG Jiyi, LUO Yanyun, Liao Bo, Jiang Yuchun, Shan Ao  
(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

**Abstract:** The train running on the track test line without derailment is the basic premise of track engineering scientific research test. In order to carry out the assessment of the derailment safety of the rail transportation comprehensive test line of Tongji University, this article measures the wheel-rail force of the rail transportation comprehensive test line, including wheel rail lateral force and vertical force, and then calculates the derailment coefficient and wheel load reduction rate through the wheel rail force. Results show, when the train passes at the speed of 20, 30 and 40 km/h, the average value of the wheel rail vertical force of the south rail is in the range of 54.91~56.14 kN, those of the north rail is in the range of 72.91~76.62 kN; t of the south rail is in the range of 5.77~7.86 kN, those of the north rail is in the range of 6.48~7.11 kN; The derailment coefficient are 0.096, 0.104 and 0.113, wheel load reduction rate are 0.141, 0.152 and 0.154. The derailment coefficient and wheel load reduction rate is less than the limit value, and has great safety margin, the scientific research test rail transportation line meets the requirements completely in the derailment safety evaluation.

**Key words:** wheel-rail interaction; derailment coefficient; wheel load reduction ratio; wheel rail vertical force; wheel rail lateral force; scientific research line

同济大学轨道交通科研试验线是国内第一条轨道交通科研试验线<sup>[1-3]</sup>, 有必要对轨道科研试验线进行脱轨安全性评定指标的研究, 轮轨力的研究与测试是评定轨道科研试验线脱轨安全性的基础<sup>[4-5]</sup>。国

外学者在轮轨力的研究与测试方面, 进行了诸多尝试, 包括研发新的方法与装置, 减小横向力和垂向力之间的耦合, 测试轮轨力的同时检测车轮的缺陷及轮轨力连续测量系统等<sup>[6-17]</sup>。国内学者近年来对

收稿日期: 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678446)

作者简介: 唐吉意(1992-), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通与铁道工程。

轮轨力连续检测进行了许多研究,包括轮轨垂向力连续测量,滚动实验台上轮轨力模型试验,连续测量的神经网络方法及连续测试系统设计等<sup>[18-26]</sup>。在国内外研究基础上,本文主要采用测力钢轨法测试轨道科研试验线列车通过时的轮轨力,包括轮轨垂向力及横向力,由轮轨力计算脱轨系数及轮重减载率,然后对轨道交通科研试验线进行脱轨安全性评定,为轨道科研试验线的安全运行提供一定参考作用。

### 1 轮轨力测试

#### 1.1 试验概况

试验在同济大学轨道交通科研试验线上进行,轨道结构类型为无砟轨道,线路类型为直线段平坡路线,扣件间距为 0.6 m,钢轨类型为普通 60 kg/m,道床下部由宽度为 4 500 mm 的钢筋混凝土基础构成,厚度为 250 mm,道床上部宽 2 500 mm,厚度为 360 mm,接触网供电。试验列车为城市轨道交通 A 型车,1 动 1 拖共两节车厢编组,列车轴重 14.5 t,轴距为 2 500 mm,共有 4 个转向架,每个转向架 2 个轮对,共计 8 个轮对,如图 1 所示。

#### 1.2 试验设备及断面

试验设备名称、型号及数量如表 1 所示。

测试断面位于一段轨道线路状态良好的直线段,如图 2 所示,该断面的南侧钢轨与北侧钢轨的轮轨力测试同时进行。

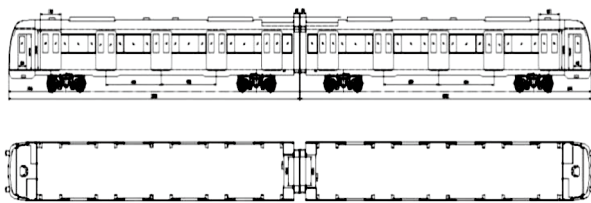


图 1 车辆侧视及俯视示意图  
Fig.1 Side view and overhead view of vehicle

表 1 试验设备  
Tab.1 Test equipment

设备名称	型号	数量
信号调理器	SCXI-1000	2
动态信号测试分析系统	DH5920	5
LABVIEW 信号采集系统	INV3060S	4
笔记本电脑	DELL	8
应变花	直角型	若干
千斤顶	10 t	2
反力架	不详	2

#### 1.3 试验准备

按照图 3、图 4 分别进行轮轨垂向力及轮轨横向力的贴片及组桥,在贴片前,对钢轨贴片处进行打磨并用丙酮进行清洗,以保证贴片处光滑平整。贴片完成后,先进行贴片质量检查,将测试桥路接入应变仪的通道,进行调平,用大拇指分别在各应变花上轻轻按压,在应变仪的表头上观察指针偏转的情况,要求其输出不大 15  $\mu\epsilon$ ,如果超出,应变片应当重贴;然后再粘贴接线端子,焊接引线,并进行绝缘性能检查,要求绝缘电阻达 500 M $\Omega$  以上。

应变片调平完成以后,进行测试荷载标定,目的是确定所设置的贴片系统与实际施加力的相互关系,钢轨受力大小与贴片系统产生的电压大小成一定比例,利用标定施加模拟轮轨力确定这个比例系数,在后续试验数据处理中可以通过比例关系将电压值转化为实际的轮轨力。

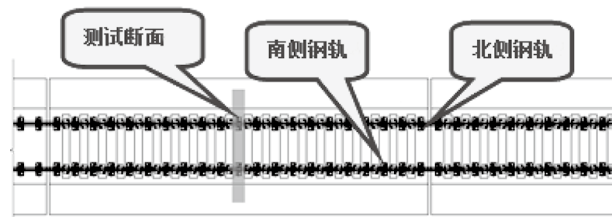


图 2 测试断面示意图  
Fig.2 Sketch map of test section

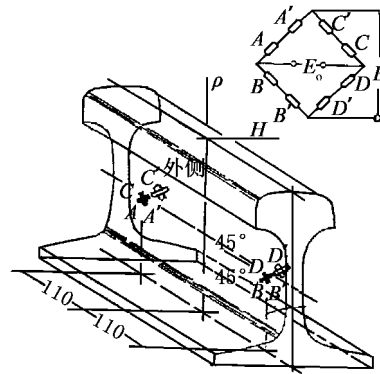


图 3 轮轨垂向力贴片及组桥方式  
Fig.3 Patch mode and bridge mode for wheel-rail vertical force

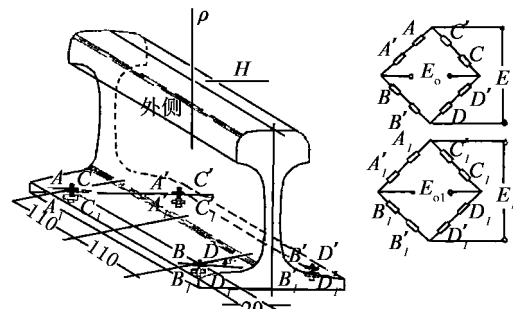


图 4 轮轨横向力贴片及组桥方式  
Fig.4 Patch mode and bridge mode for wheel-rail lateral force

## 1.4 试验过程

标定后进行测试, 采样频率设为 5 000 Hz, 由于列车有 8 个轮对, 每次列车经过时, 测试断面可以采集到 8 个轮轨垂直力波峰及 8 个轮轨横向力波峰。为评定不同速度下列车的脱轨安全性, 让列车分别以 20、30、40 km/h 的速度通过测试断面, 记录下每次列车通过时的垂直力与横向力波形图, 典型的轮轨垂直力与横向力波形图如图 5—图 6 所示。

## 2 轮轨力分析

为便于区分, 将 8 个轮对按离车头的距离由近至远, 分别编号为轮对 1—轮对 8, 不同行车速度下测试断面的 8 个轮对的轮轨垂直力及横向力如表 2 所示; 对 8 个轮对的轮轨垂直力及横向力求得平均值, 如表 3 所示。

在轮轨垂直力方面, 以南侧钢轨为分析对象, 列车速度分别为 20、30 及 40 km/h 时, 8 个轮对的轮轨垂直力分别在 49.50~61.54、48.59~66.16 及

52.31~65.69 kN 范围内, 平均值分别为 54.91、55.66 及 56.14 kN; 以北侧钢轨为分析对象, 列车速度分别为 20、30 及 40 km/h 时, 8 个轮对的轮轨垂直力分别在 67.27~79.21、68.28~81.55 及 69.26~85.35 kN 范围内, 平均值分别为 72.91、75.67 及 76.62 kN。结果表明, 轮轨垂直力随列车速度的增大而逐渐增大, 因为轨道表面并不是绝对光滑的, 存在一定的高低不平顺, 车轮滚动经过这些不平顺区域时会对轨面产生竖向冲击且速度越大冲击作用越大, 所以轮轨垂直力会随速度增大而逐渐增大。

在轮轨横向力方面, 以南侧钢轨为分析对象, 列车速度分别为 20、30 及 40 km/h 时, 8 个轮对的轮轨横向力分别在 3.87~9.23、2.85~10.58 及 1.99~21.96 kN 范围内, 平均值分别为 5.77、7.02 及 7.86 kN; 以北侧钢轨为分析对象, 列车速度分别为 20、30 及 40 km/h 时, 8 个轮对的轮轨横向力分别在 2.17~11.16、1.48~10.74 及 4.04~13.5 kN 范围内, 平均值分别为 6.48、6.63 及 7.11 kN。结果表明, 轮轨横向力随列车速度的增大而逐渐增大, 因为列车在运行过程中存在蛇形运动且蛇形运动会使轮轨间横向相互作用加剧, 列车速度越大蛇形运动越剧烈, 进而导致轮轨横向力逐渐增大。

从 8 个轮对轮轨力的平均值来看, 列车以不同速度驶过时, 南侧钢轨的轮轨垂直力在 54.91~56.14 kN 范围内, 平均值为 55.57 kN; 北侧钢轨的轮轨垂直力在 72.91~76.62 kN 范围内, 平均值为 75.07 kN; 北侧钢轨的轮轨垂直力要比南侧钢轨的轮轨垂直力明显偏大, 因为该测试截面处北侧钢轨高度比南侧钢轨高度略低, 导致列车分布于北侧钢轨的垂直力略大。

从 8 个轮对轮轨力的平均值来看, 列车以不同速度驶过时, 南侧钢轨的轮轨横向力在 5.77~7.86 kN 范围内, 平均值为 6.88 kN; 北侧钢轨的轮轨横向力在 6.48~7.11 kN 范围内, 平均值为 6.74 kN。虽然该测试截面处北侧钢轨高度比南侧钢轨高度略低, 但北侧钢轨的轮轨横向力跟南侧钢轨的轮轨横向力很相近, 差别不明显, 表明轮轨垂直力受两股钢轨的细小高程差的影响较大, 而轮轨横向力受两股钢轨的细小高程差影响较小。

## 3 脱轨系数分析

脱轨系数用于评定列车车辆在轮轨横向力和垂

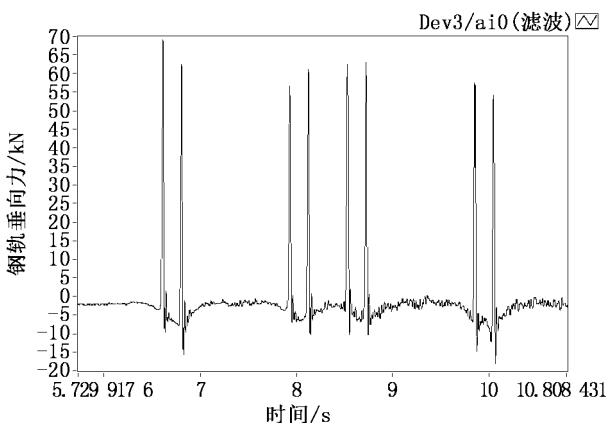


图 5 轮轨垂直力波形图示例

Fig.5 Example of wheel-rail vertical force waveform

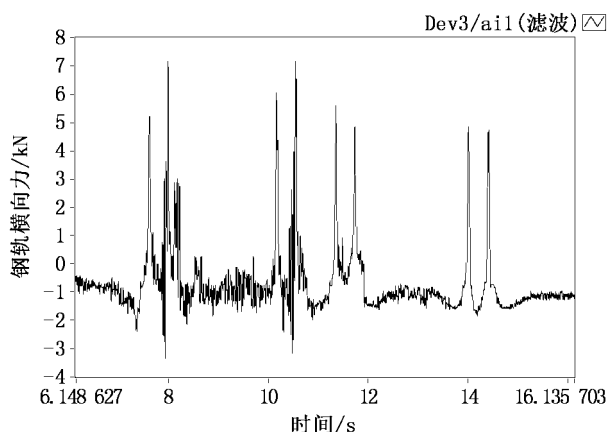


图 6 轮轨横向力波形图示例

Fig.6 Example of wheel-rail lateral force waveform

表2 测试截面的轮轨垂直力及横向力  
Tab.2 Vertical and lateral forces of the wheel-rail of the test cross section

列车速度 (km·h <sup>-1</sup> )	南侧钢轨				北侧钢轨			
	轮对编号	垂直力/kN	轮对编号	横向力/kN	轮对编号	垂直力/kN	轮对编号	横向力/kN
20	1	61.54	1	5.86	1	79.21	1	8.98
	2	56.50	2	9.23	2	77.00	2	4.13
	3	54.56	3	6.84	3	75.11	3	11.16
	4	59.18	4	7.37	4	69.15	4	5.64
	5	50.35	5	3.87	5	67.27	5	8.18
	6	50.80	6	4.11	6	69.32	6	2.48
	7	56.81	7	4.75	7	72.02	7	9.07
	8	49.50	8	4.13	8	74.20	8	2.17
30	1	56.07	1	5.23	1	81.55	1	7.69
	2	66.16	2	6.85	2	79.07	2	3.27
	3	51.86	3	9.16	3	79.97	3	10.74
	4	59.19	4	10.58	4	73.09	4	7.21
	5	49.73	5	5.67	5	68.28	5	7.47
	6	48.59	6	7.26	6	73.06	6	1.48
	7	57.88	7	8.59	7	72.20	7	7.83
	8	55.77	8	2.85	8	78.11	8	7.35
40	1	54.44	1	6.39	1	76.28	1	7.15
	2	52.31	2	1.99	2	79.11	2	4.04
	3	55.90	3	21.96	3	69.26	3	13.5
	4	65.69	4	7.07	4	72.20	4	5.96
	5	57.41	5	8.33	5	82.33	5	6.83
	6	55.65	6	6.92	6	77.00	6	6.92
	7	54.70	7	3.95	7	85.35	7	6.17
	8	52.99	8	6.23	8	71.41	8	6.28

表3 测试截面的轮轨垂直力及横向力平均值  
Tab.3 The mean value of wheel-rail vertical force and lateral force of test cross section

列车速度/(km·h <sup>-1</sup> )	南侧钢轨		北侧钢轨	
	垂直力/kN	横向力/kN	垂直力/kN	横向力/kN
20	54.91	5.77	72.91	6.48
30	55.66	7.02	75.67	6.63
40	56.14	7.86	76.62	7.11
平均值	55.57	6.88	75.07	6.74

直力的综合作用下,车轮轮缘爬上钢轨的安全程度,脱轨系数越大越容易脱轨,参照标准《GB5599-1985 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》给出的公式:

$$[Q/P] \leq 0.8 \quad (1)$$

式中  $Q$  为轮轨垂直力,  $P$  为轮轨横向力。当脱轨系数超过上述限度时,需要检查超限值的持续作用时间,当轮轨横向力的作用时间  $t < 0.05$  s 时,容许的脱轨系数为:

$$[Q/P] \leq 0.4/t \quad (2)$$

式中  $t$  为轮轨横向力作用时间(s)。

经过计算,列车在速度为 20、30 及 40 km/h 时

的脱轨系数分别为 0.096、0.104 及 0.113,都远小于限界值 0.8,结果表明,在脱轨系数方面,轨道交通科研试验线有很大的安全余量。

#### 4 轮重减载率分析

以前发生脱轨事故之后,我们常归因于轮轨横向力过大,但在实际运行中我们发现,在轮轨横向力较小但轮重减载率过大时,也会发生脱轨现象;也就是说,为了防止列车脱轨,需要对两股钢轨上的轮轨垂直力之差进行限定。参考国内外相关标准规范,目前建议采用的轮重减载率安全指标为

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{P} = 0.65 \text{ (危险限度)} \\ \frac{\Delta P}{P} = 0.60 \text{ (允许限度)} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\Delta P$  为两股钢轨上的轮轨垂直力之差的一半,  $\bar{P}$  为两股钢轨上的轮轨垂直力的平均值,  $\frac{\Delta P}{P}$  为轮重减载率。经过计算, 列车在速度为 20、30 及 40 km/h 时的轮重减载率分别为 0.141、0.152 及 0.154, 都远小于限界值 0.60 及 0.65, 结果表明, 在轮重减载率方面, 轨道交通科研试验线也有很大的安全余量。

## 5 结论

列车以速度 20、30 及 40 km/h 驶过时, 南侧钢轨的轮轨垂直力平均值在 54.91~56.14 kN 范围内, 北侧钢轨的轮轨垂直力平均值在 72.91~76.62 kN 范围内; 南侧钢轨的轮轨横向力平均值在 5.77~7.86 kN 范围内, 北侧钢轨的轮轨横向力平均值在 6.48~7.11 kN 范围内; 脱轨系数分别为 0.096、0.104 及 0.113, 轮重减载率分别为 0.141、0.152 及 0.154, 脱轨系数及轮重减载率都远小于限界值, 都具有很大的安全余量。

### 参考文献:

- [1] 罗雁云, 唐吉意, 林龙锋. 基于落锤激励的某新型减振扣件减振性能分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(1): 1-5.
- [2] 罗雁云, 唐吉意, 朱茜, 等. 不同减振扣件落锤激励下的减振性能对比研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2017(5): 16-20.
- [3] 罗雁云, 唐吉意, 林龙锋, 等. 基于逐层钻孔法的闪光焊钢轨轨底残余应力分析 [J]. 机械设计与制造工程, 2017(6): 63-67.
- [4] 练松良. 轨道工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [5] 陈秀方. 轨道工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [6] LI Yifan, LIU Jianxin, LIN Jianhui. Wheel-Rail Lateral Force Continuous Measurement Based on Rail Web Bending Moment Difference Method [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1473(105): 755-759.
- [7] ZHANG Hai, HU Xiaoyi, LIN Fengtao, et al. Research on Finite Element Model of Wheel-Rail Contact [J].

- Applied Mechanics and Materials, 2014, 3468(644): 7-10.
- [8] JUNGYOUL Choi. Influence of Track Support Stiffness of Ballasted Track on Dynamic Wheel-Rail Forces [J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(7): 709-718.
- [9] SPIROIU M A. Wheel-rail dynamic forces induced by random vertical track irregularities [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 147(1): 117-122.
- [10] SHENG Xiaozhen, LIU Yuxia, ZHOU Xin. The response of a high-speed train wheel to a harmonic wheel-rail force [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 744(1): 1-15.
- [11] RONASI, HAMED, JOHANSSON, et al. Identification of wheel-rail contact forces based on strain measurements, an inverse scheme and a finite-element model of the wheel [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2014, 228(4): 343-354.
- [12] DELPRETE C, ROSSO C. An easy instrument and a methodology for the monitoring and the diagnosis of a rail [J]. Mechanical System and Signal Processing, 2009, 23(3): 940-956.
- [13] FILOGRANOP M L, CORREDERA, R-BARRIOS A, et al. Real time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors [J]. Sensors Journal, 2012, 12(1): 85-92.
- [14] OTTER D E, EL-SIBAIE M A, HIGGINS R L. A design for next generation load measuring wheel sets [C]// Railroad Conference, 1991. Proceedings of the 1991 IEEE/ASME Joint. IEEE, 1991: 37-42.
- [15] KESLER J K. Measurement techniques for onboard wheel/rail loads [C]// Proceedings of International Conference on Wheel/Rail Load and Displacement Measurement Techniques. 1981: 19-20.
- [16] STRATMAN B, LIU Y M, MAHADEVAN S. Structural health monitoring of railroad wheels using wheel impact load detectors [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2007, 7(3): 218-225.
- [17] POCKLINTON A R. Improved Data from Load-Measuring Wheels [J]. Railway Engineer, 1977, 2(4): 37-43.
- [18] 黄辉, 雷晓燕, 刘庆杰, 等. 轮轨垂向力连续测量方法研究 [J]. 噪声与振动控制, 2015(6): 181-184.
- [19] 曾宇清, 张格明, 张岩, 等. 轮轨垂向力地面连续测量的线性状态方法 [J]. 中国铁道科学, 2015(6): 111-119.

- [20] 李奕璠. 轮轨力连续测试方法及车轮失圆的检测与识别研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [21] 李奕璠, 林建辉, 刘建新. 基于组合预测模型的轮轨力连续测试[J]. 西南交通大学学报, 2012(4): 597-604.
- [22] 衣汉彪. 轮轨垂向载荷连续测量与识别方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [23] 任利惠, 黄磊, 周劲松, 等. 1: 5 滚动实验台轮轨力连续测量系统[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011(6): 895-900.
- [24] 陈建政, 林建辉. 在线连续测量轮轨接触点的神经网络方法[J]. 振动与冲击, 2007(5): 90-92.
- [25] 潘周平, 张立民. 轮轨力连续测试系统设计[J]. 西南交通大学学报, 2004(1): 69-72.
- [26] 赵国堂, 田越, 刘铁, 等. 轮轨水平力连续测试技术的研究[J]. 铁道学报, 2000(3): 69-73.

(上接第 41 页) 测手段, 它能够有效探测出道路各结构层之间的分界面并由此推测各结构层的厚度, 同时对道路的不均匀沉降有较好的检测效果, 以上表明了地质雷达用于已通车公路检测是可行的, 可以对公路已存在的隐患进行判别, 能够对后期的修补工程提供参考依据。

2) 对地质雷达信号进行 Hilbert 二次处理, 得到其瞬时特征图, 实现对雷达数据信号的多角度解读, 相对于原始数据, 二次处理后的结果具有分辨率高、分辨深度大、图像清晰直观等优点; 同时, 将多个参数联合进行评估, 能够提高地质雷达图像解释的精度和可信程度。

#### 参考文献:

- [1] 林志军, 林波. 探地雷达在高速公路路基病害检测中的应用[J]. 西南公路, 2016(3): 195-198.
- [2] 刘澜波, 钱荣毅. 探地雷达: 浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报, 2015(8): 2606-2617.
- [3] 王曦光. 探地雷达在工程应用中的典型图像分析[J]. 北方交通, 2016(5): 138-142.
- [4] 肖宏跃, 雷宛, 杨威. 地质雷达特征图像与典型地质现象的对应关系[J]. 煤田地质与勘探, 2008(4): 57-61.
- [5] 朱能发, 孙士辉, 陈坚. 地质雷达在公路路面无损检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2014(4): 522-527.
- [6] 冯德山, 戴前伟. 高速公路路面厚度探地雷达检测[J]. 地球物理学进展, 2008(1): 289-294.
- [7] RODES J P, GRACIA V P, REGUERO A M. Evaluation of the GPR frequency spectra in asphalt pavement assessment[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 181-188.
- [8] KHAMZIN A K, VARNAVINA A V, TORNASHOV E V, et al. Utilization of air-launched ground penetrating radar (GPR) for pavement condition assessment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 130-139.
- [9] 汤井田, 化希瑞, 曹哲民, 等. Hilbert-Huang 变换与大地电磁噪声压制[J]. 地球物理学报, 2008(2): 603-610.
- [10] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 复信号分析技术在地质雷达预报岩溶裂隙水中的应用研究[J]. 岩土力学, 2009(7): 2191-2196.
- [11] 张先武, 高云泽, 方广有. Hilbert 谱分析在探地雷达薄层识别中的应用[J]. 地球物理学报, 2013(8): 2790-2798.
- [12] 刘成禹, 余世为. 基于探地雷达单道信号处理的岩溶分析方法[J]. 岩土力学, 2016(12): 3618-3626.
- [13] 肖立锋. 铁路路基病害地质雷达检测方法[J]. 工程地球物理学报, 2012(3): 346-350.
- [14] 余志雄, 薛桂玉, 周创兵. 复信号分析技术及其在地质雷达数字处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(5): 798-802.