

# 钢轨波磨对剪切型减振器段振动影响试验<sup>\*</sup>

蔡小培, 钟阳龙, 郭亮武, 谭 希

(北京交通大学土木建筑工程学院 北京, 100044)

**摘要** 地铁运营中常会出现钢轨波磨,尤其在剪切型减振器地段较为严重。为揭示钢轨波磨对结构振动的影响,选取地铁直线和曲线部分普通扣件和剪切型减振器典型区段进行了钢轨波磨的测量,并对轨道、隧道、地面等结构的振动加速度进行了现场测试。从时域、频域两个方面对比了结构的振动量值和振动传递特性,分析了剪切型减振器钢轨波磨对加速度振级及其减振效果的影响。结果表明:波磨会增大轮轨间动态冲击,使钢轨-道床-隧道-地面的振动显著增加;减振器区钢轨波磨会导致轨下结构振动大于普通扣件区,其减振效果难以实现;减振器区钢轨波磨比普通扣件区严重,曲线半径小、运量较大、速度较快的线路尤为突出,地铁轨道选型应考虑波磨的不利影响。

**关键词** 波磨; 剪切型减振器; 振动加速度; 1/3 倍频程; 现场测试

**中图分类号** U231+.2; TB53; TH825

## 引 言

近年来,城市轨道交通发展迅猛,大量的地铁线路投入了运营。地铁列车在行车过程中会产生较大的振动和噪声。因此,在某些敏感的区域,需要采用一定的减振措施来控制振动,剪切型减振器就是一种常用的减振结构。但在复杂运营条件下,剪切型减振器也带来了一些问题,其中一个较为显著的问题就是采用剪切型减振器区段出现了钢轨异常波磨<sup>[1-3]</sup>。严重的钢轨波磨不仅会加剧轨道结构的振动及其损伤劣化速率,而且还会降低行车的安全性及稳定性。

目前,国内外的研究人员在地铁钢轨波磨产生机理及其影响等方面,提出很多创新性的理论和方法。李伟等<sup>[4-5]</sup>对地铁钢轨波磨的机理进行了调查分析,认为“科隆蛋”扣件轨道的钢轨波磨产生与轨道结构的垂向弯曲振动特性密切相关。谷永磊等<sup>[6]</sup>研究了地铁钢轨波磨对车辆和轨道动态行为的影响,研究表明短波钢轨波磨是导致地铁车辆和轨道零部件振动过大、车辆一系钢弹簧和轨道扣件弹条疲劳断裂的主要原因。钟硕乔等<sup>[7]</sup>基于地铁车辆-轨道耦合动力学模型分析了“科隆蛋”扣件轨道的钢轨波磨对车辆动力学性能的影响,分析认为钢轨波

磨主要影响车辆系统的垂向振动。孙晓静等<sup>[8]</sup>对剪切型减振器扣件的钢轨频率响应特性进行了测试分析,提出车辆系统只有在特定频率的激励下,才能诱发激烈的轮轨相互作用,导致钢轨波磨现象的发生。Ekberg 等<sup>[9]</sup>基于车辆-轨道动力学模型分析了滚动接触疲劳,研究指出钢轨波磨是造成滚动接触疲劳的主要因素。文献[10-11]研究了曲线地段钢轨波磨的产生机理及防治措施,通过对运营线路进行测试并采用数值仿真分析,认为曲线地段钢轨波磨的产生是轮轨粘滑振动引起的。Egana 等<sup>[12]</sup>研究了轨下垫层刚度对钢轨波磨的影响特性。Suda 等<sup>[13]</sup>研究了小曲线地段钢轨波磨的特性,通过对车辆及钢轨进行振动测试,对波磨产生的机理进行了讨论分析。

既有研究主要关注钢轨波磨产生机理及其对行车的影响,而在波磨对轨道及下部基础振动特性的影响方面研究相对较少,其中针对剪切型减振器区段轨道结构振动特性的影响研究更加匮乏。剪切型减振器作为一种常用减振结构,实际应用中在钢轨波磨影响下难以充分发挥减振性能。由此可见,开展钢轨波磨对剪切型减振器区段结构振动影响的研究,对于指导优化轨道结构减振设计具有重要意义。

北京地铁 4 号线沿线建筑物密集,振动敏感点较多,部分地段使用了剪切型减振器扣件,符合实验

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51578053,51778050);北京市自然科学基金委员会-北京市科学技术研究院联合资助项目(L150003)

收稿日期:2017-04-19;修回日期:2018-03-12

地点的选取标准。本研究选取北京地铁 4 号线直线段的普通扣件断面、曲线段的普通扣件断面、直线段的剪切型减振器扣件断面及曲线段的剪切型减振器扣件断面,共 4 个典型断面进行了轨道-隧道-地面结构的现场振动加速度测试,并测量了钢轨波磨的基本特征,以分析钢轨波磨对剪切型减振器区段结构振动的影响。

## 1 测试方案

### 1.1 测点布置

在北京地铁 4 号线陶然亭-菜市口直线段、北宫门-安河桥北曲线段的剪切型减振器及普通扣件区域,开展轨道结构、隧道壁以及对应地面振动加速度现场测试。为准确测试减振器区域的振动特性,测试断面选择列车速度较为稳定的区段,列车速度基本在 60~70 km/h 之间。测试断面布置如图 1 所示。

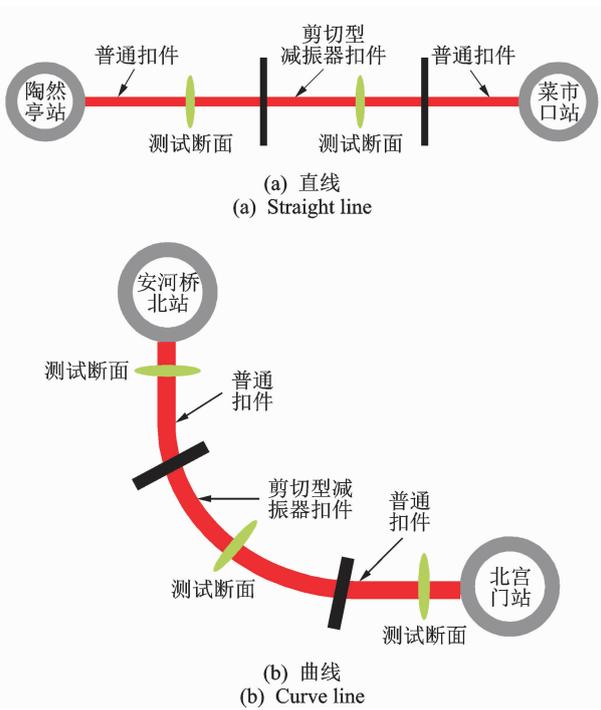


图 1 地铁线路测试断面

Fig. 1 Test section layout of subway line

测点布置主要参考铁路隧道振动测试标准《GB/T 19846—2005 机械振动列车通过时引起铁路隧道内部振动的测量》<sup>[14]</sup>,如图 2 所示。测试内容为钢轨、道床、隧道壁及上部地面的垂向振动加速度。钢轨测点布置在扣件中间区域的轨底上表面;整体道床测点布置在钢轨测点两侧,位置与钢轨测

点同一断面;隧道壁测点距轨面高度约 1.2 m;地面的测点选择隧道内测试断面对应上方。

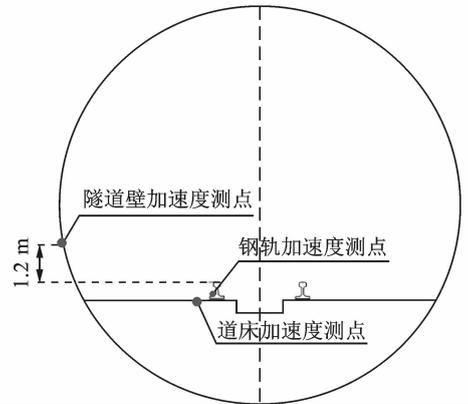


图 2 隧道内测点布置图

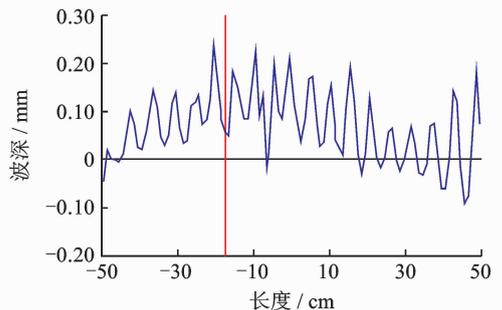
Fig. 2 Test point layout of tunnel section

### 1.2 测试方法

钢轨波磨采用 RECTIRAIL 便携式钢轨平直度电子测量仪,如图 3 所示。测试范围为 1.0 m,相应的最大测试波长为 0.5 m。该测量仪精度为 ±12.5 μm,1 m 基础上使用 100 个无接触式传感器。本次测试中,每个断面至少测试 30 组数据。



(a) 钢轨波磨区域  
(a) Rail corrugation area



(b) 波磨特征  
(b) Corrugation characteristics

图 3 剪切型减振器区段钢轨波磨

Fig. 3 The rail corrugation of egg fastener area

振动加速度测试采用压电式加速度传感器,参数如表 1 所示。数据采集系统采用德国集成测控(integrated measurement & control,简称 IMC)-C1 动态数据采集仪,可进行无时差 8 通道采样,最高频

率可达 100 kHz。

表 1 加速度传感器参数

Tab. 1 Parameters of the acceleration sensor

测点	型号	最大允许加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	频率范围/ Hz
钢轨	CA-YD-181	5 000	1~10 000
道床	CA-YD-186	500	0.5~5 000
隧道壁	CA-YD-189	50	0.2~1 000
地面	CA-YD-159	5	0.1~500

## 2 钢轨波磨及其影响机制

地铁线路剪切型减振器区段出现严重波磨,钢轨波磨对行车、轨道及下部基础振动特性等方面有明显影响,因此,分析钢轨波磨对剪切型减振器区段结构振动的影响具有重要意义。

### 2.1 现场钢轨波磨测试结果

研究钢轨波磨对不同形式及结构的轨道振动特性影响,需要了解波磨区域磨耗的基本特征,现场钢轨波磨如图 3 所示。试验首先对剪切型减振器扣件和普通扣件的直线区段和曲线区段钢轨表面波磨进行测量,波磨的波长和波深特征参数测量结果见表 2。

表 2 钢轨波磨测量结果

Tab. 2 Measurement results of rail corrugation mm

特征参数	特征值	直线段		曲线段	
		减振扣件	普通扣件	减振扣件	普通扣件
波长	平均值	70.70	80.50	94.52	87.82
	最大值	80.00	82.84	100.00	109.08
波深	平均值	0.019	0.017	0.135	0.063
	最大值	0.025	0.020	0.210	0.200

通过对表 2 波磨数据分析发现:相比于直线段,曲线段的钢轨波磨波长和波深均较大。根据既有实验<sup>[15]</sup>和表 2 数据可以发现,减振器区段的钢轨波磨程度比普通扣件区段钢轨波磨程度更为严重,减振器直线区段的平均波深比普通扣件直线地段大 0.002 mm,而减振器曲线区段平均波深比普通扣件曲线地段大 0.072 mm。

在北京地铁,剪切型减振器用于地铁 4 号线、亦庄线、15 号线等部分地段,还有地铁 13 号线、八通线部分车站低速、直线段。现场调研发现,4 号线运量是亦庄线的 2 倍,大约是 15 号线的 4 倍,3 条线路剪切型减振器区段出现钢轨波磨的时间也呈正比关系;而部分车站低速、直线地段却没有出现波磨。现场小曲线半径地段设置剪切型减振器时,由于横向刚度低、轨道动态变形量大,进一步恶化了轮轨关

系、蠕滑作用加强,加大了波磨发生几率和发展速度。目前,剪切型减振器不建议应用在运量较大、线型条件较差的区段;根据工程需要,可考虑在车速较低、直线段的车站范围适当应用。

### 2.2 钢轨波磨的影响机制

车辆-轨道是一个动态相互作用的体系,见图 4 所示,其中  $W$  为车体及构架质量,  $k_F$  为悬挂体系刚度,  $c_F$  为悬挂体系阻尼,  $M_w$  为车轮质量,  $k_{CH}$  为轮轨接触刚度。波磨增加了钢轨表面的粗糙度,引起的轮轨冲击力主要与簧下质量有关。钢轨的基本动力方程如式(1)所示。

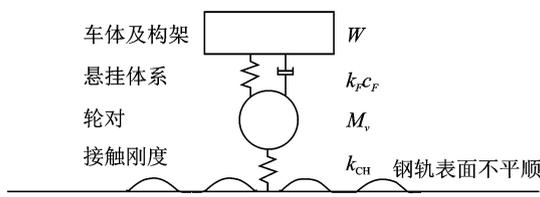


图 4 轮-轨-下部基础作用关系

Fig. 4 Interaction relationship of wheel-rail

$$EI \frac{\partial^4 z_r(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 z_r(x, t)}{\partial t^2} + k_p z_r(x, t) = -F(t) \delta(x - vt) \quad (1)$$

其中:  $EI$  为钢轨弯曲刚度;  $\rho$  为钢轨钢密度;  $A$  为钢轨截面积;  $k_p$  为钢轨基础刚度;  $F(t)$  为轮轨接触力,  $F(t) = k_{CH}(z_w(x, t) - z_r(x, t) + z(x, t))$ ;  $z_w(x, t)$  为车轮位移;  $z_r(x, t)$  为钢轨位移;  $z(x, t)$  为钢轨波磨即轨面短波不平顺;  $v$  为行车速度;  $t$  为行车时间:

$$\delta(x - vt) = \begin{cases} 1 & (x = vt) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

钢轨波磨会增加系统的振动,在钢轨波磨区段,轮轨垂向力变化频率和变化幅值要远大于无波磨地段。轮轨冲击会加剧钢轨受力与变形,扩大轨面不平顺,同时通过扣件等介质的传递,进一步增加道床、隧道、地面的振动。因此,分析波磨对车辆、轨道及下部结构的影响,对保证车辆运行的安全性和平稳性及乘客的舒适度有重要意义,而文中重点关注波磨对地铁剪切型减振器区段的影响,后续作进一步分析。

## 3 振动响应时域分析

隧道内测试断面每天有 280 余组测试数据;地面测点早晚高峰时段各测试 2 h,每个测点有 60 余组数据。数据处理前进行滤波处理,消除信号干扰。

### 3.1 振动时域特征分析

钢轨、道床、隧道壁以及地面振动加速度的典型时程曲线如图 5 所示。

通过图 5 分析发现,振动加速度从钢轨-道床-隧道壁-地面传递过程中,加速度量值逐级递减。车辆荷载经过测试断面时,各个结构的振动加速度出现峰值,随着荷载的远离结构的振动逐渐衰减。

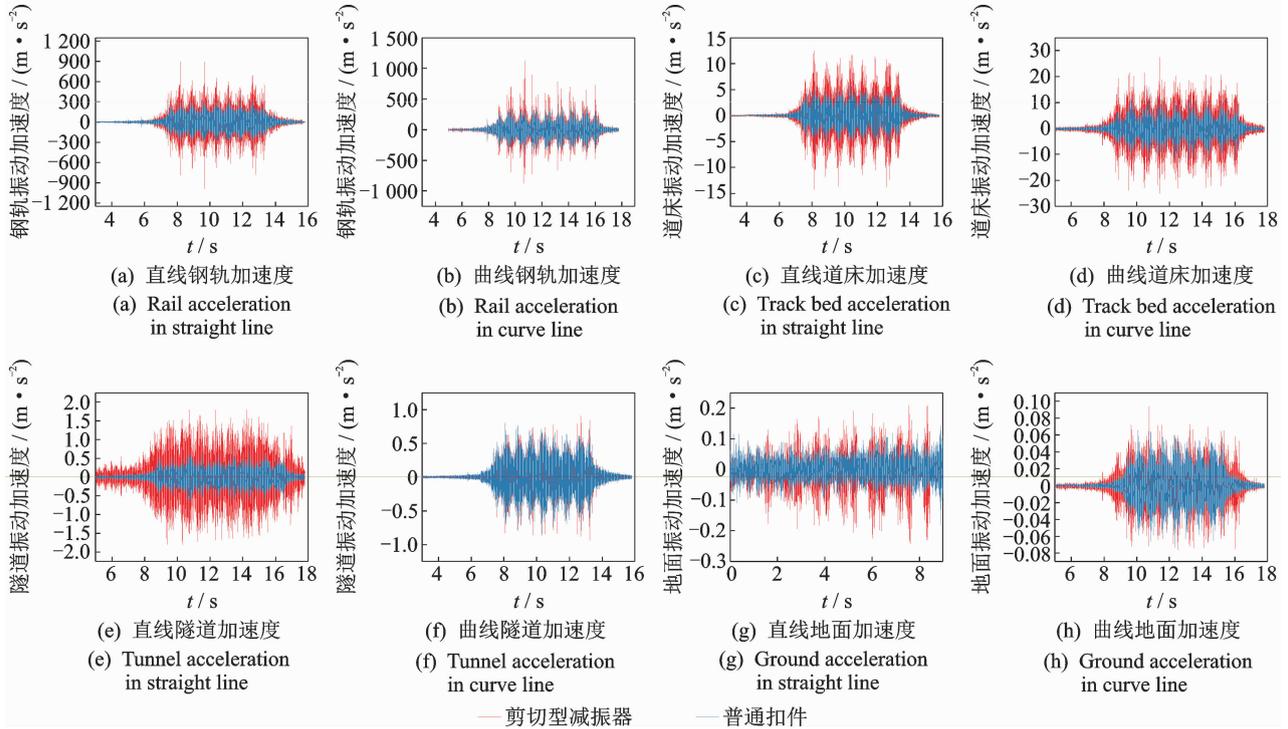


图 5 结构振动时程曲线

Fig. 5 Time history curve of structure vibration

### 3.2 直线段振动加速度

本节统计分析了剪切型减振扣件直线区段和普通扣件直线区段的钢轨、道床、隧道壁及地面振动加速度,如表 3 所示。

表 3 直线地段垂向振动加速度

Tab. 3 Vertical acceleration of straight line

( $m \cdot s^{-2}$ )

地段		普通扣件	剪切型减振器
钢 轨	最大值	362.40	982.08
	平均值	213.73	534.79
道 床	最大值	5.31	12.57
	平均值	5.02	8.04
隧道壁	最大值	0.78	1.78
	平均值	0.48	1.18
地 面	最大值	0.09	0.19
	平均值	0.046	0.180

由表 3 可以得出,剪切型减振器直线区段的钢轨、道床、隧道壁以及地面振动加速度峰值分别为 982.08,12.57,1.78,0.19  $m/s^2$ 。普通扣件直线区

段的钢轨、道床、隧道壁及地面的振动加速度峰值分别为 362.40,5.31,0.78,0.09  $m/s^2$ 。剪切型减振器扣件地段钢轨、道床、隧道壁以及地面的振动加速度峰值分别是普通扣件地段的 2.7 倍,2.4 倍,2.3 倍,2.0 倍;各结构振动加速度平均值分别为普通扣件地段的 2.5 倍,1.6 倍,2.5 倍,3.9 倍。

可见,剪切型减振器扣件直线区段的钢轨、道床、隧道壁以及地面振动加速度峰值和平均值均明显大于普通扣件直线区段。波磨较为严重的剪切型减振器扣件区段比波磨较轻的普通扣件区段振动响应大,这说明波磨对轨道结构振动具有显著影响。

### 3.3 曲线段振动加速度

本节统计分析了剪切型减振器扣件曲线区段和普通扣件曲线区段的钢轨、道床、隧道壁及地面振动加速度,如表 4 所示。

从表 4 可以得出,剪切型减振器扣件曲线区段的钢轨、道床、隧道壁及地面振动加速度峰值分别为 1 123.27,27.39,0.91,0.09  $m/s^2$ ;普通扣件曲线区

表 4 曲线地段垂向振动加速度分析

Tab. 4 Vertical acceleration of curve line

 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 

地 段		普通扣件	剪切型减振器
钢 轨	最大值	413.05	1 123.27
	平均值	328.19	776.00
道 床	最大值	15.51	27.39
	平均值	12.59	18.97
隧道壁	最大值	0.70	0.91
	平均值	0.43	0.80
地 面	最大值	0.066	0.093
	平均值	0.038	0.080

段各结构加速度峰值分别为 413.05, 15.51, 0.70, 0.07  $\text{m/s}^2$ 。剪切型减振器扣件区段的钢轨、道床、隧道壁以及地面振动加速度峰值分别为普通扣件区段的 2.7 倍, 1.8 倍, 1.3 倍, 1.4 倍; 剪切型减振器扣件曲线区段的钢轨、道床、隧道壁以及地面振动平均值分别为普通扣件曲线地段的 2.4 倍, 1.5 倍, 1.9 倍, 2.1 倍。

剪切型减振器扣件区段结构振动加速度峰值和平均值明显高于普通扣件区段, 且剪切型减振扣件曲线地段波磨平均波深比普通扣件曲线地段更大, 曲线地段测试结果同样说明了波磨对结构振动具有显著影响。

## 4 振动响应频域分析

本研究从振动传递规律及减振效果两个方面, 对比分析剪切型减振器地段和普通扣件地段结构的 1/3 倍频程谱, 从而进一步说明波磨对轨道结构振动的影响。

### 4.1 振动传递规律特性分析

由于直线地段干扰因素较少, 振动规律较为明显, 且曲线地段振动衰减规律与直线地段类似。因此, 文中振动衰减分析以直线地段为例, 如图 6 所示。

由图 6(a) 可知, 在剪切型减振器直线区段, 钢轨-道床-隧道壁-地面的振级逐渐递减。钢轨振级峰值为 135.0 dB, 道床振级峰值为 105.4 dB, 隧道壁振级峰值为 96.8 dB, 地面振级峰值为 80.4 dB。从钢轨-道床、道床-隧道、隧道-地面振级分别递减了 29.6, 8.6, 16.4 dB。图中钢轨、道床、隧道壁及地面振动响应均在 40 Hz 附近出现峰值, 这说明剪切型

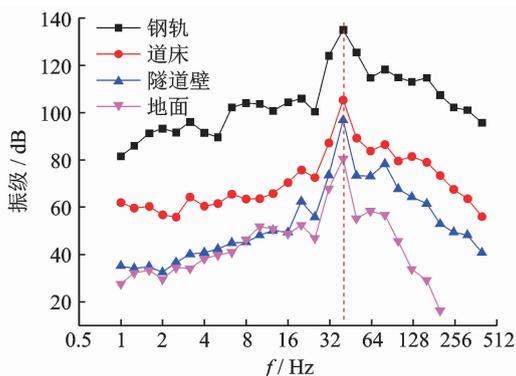
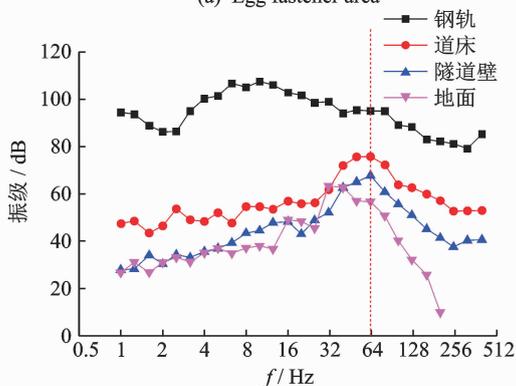
(a) 剪切型减振器扣件地段  
(a) Egg fastener area(b) 普通扣件地段  
(b) Common fastener area

图 6 直线地段振级

Fig. 6 Vibration level of straight line

减振器主频在 40 Hz 附近。

由图 6(b) 可知, 普通扣件直线地段, 振动从钢轨-道床-隧道壁-地面传递过程中, 振级逐渐递减。钢轨振级峰值为 106.7 dB, 道床振级峰值为 75.8 dB, 隧道壁振级峰值为 67.8 dB, 地面振级峰值为 56.6 dB。从钢轨-道床、道床-隧道壁、隧道壁-地面振级分别递减了 30.9, 8.0, 11.2 dB。剪切型减振器区段轨道结构的振动从钢轨-道床衰减量值明显高于普通扣件地段。

### 4.2 减振效果分析

由于三分之一倍频程谱能够有效地反映出特定频段的振动能量, 因此, 结构振动问题中采用三分之一倍频程谱更为普遍。根据国标《GB10070—1988 城市区域环境振动标准》<sup>[16]</sup>, 加速度振级采用式 (2) 计算, 记为  $V_{AL}$ , 单位为 dB

$$V_{AL} = 20 \lg a/a_0 \quad (2)$$

其中:  $a$  为 1/3 倍频程对应的振动加速度有效值 ( $\text{m/s}^2$ );  $a_0$  为基准加速度 ( $10^{-6} \text{m/s}^2$ )。

根据铁路隧道振动测试标准《GB/T 19846—

2005 机械振动列车通过隧道时引起铁路隧道内部振动的测量》<sup>[16]</sup>,隧道壁的 Z 振级是一个重要的衡量振动效果指标。笔者对剪切型减振器、普通扣件区段的隧道壁振动加速度进行了 1/3 倍频程分析,如图 5、图 6 所示。

图 7(a)分析可知,直线地段小于 1.6 Hz 频率范围内,减振器区段隧道壁振级大于普通扣件区段。在 1.6~31.5 Hz 频带内,剪切型减振器区段隧道壁振级小于普通扣件区段。在 40 Hz 时,减振器区段隧道壁振级突增,明显大于普通扣件区段。在 40 Hz 以上频带内,剪切型减振器表现出良好的减振效果,其隧道壁振级明显小于普通扣件区段。由以上分析可知,剪切型减振器区段隧道壁振级在 40 Hz 左右出现峰值,是减振效果不理想的主要原因。

由图 7(b)分析可知,在曲线地段,1~8 Hz 频率范围内,剪切型减振器区段隧道壁振级和普通扣件区段相差不大。在 8 Hz 以上频带范围内,剪切型减振器区段隧道壁振级整体上大于普通扣件区段。在曲线存在钢轨波磨的地段,剪切型减振器区段发挥不了减振效果。

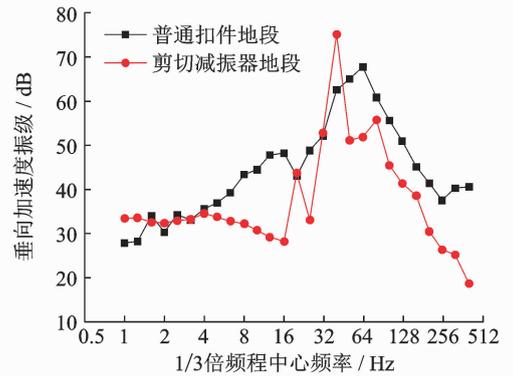
结合既有研究和波磨测试结果,发现波磨的激励频率在 200~400 Hz,刚好与此频段中振动放大区域吻合。说明波磨较为严重的情况下会引发轨道振动的明显增大,继而增加了隧道壁结构的中高频振动。为了保持轨道结构的长期耐久性,建议运营部门严格控制钢轨波磨。

## 5 结 论

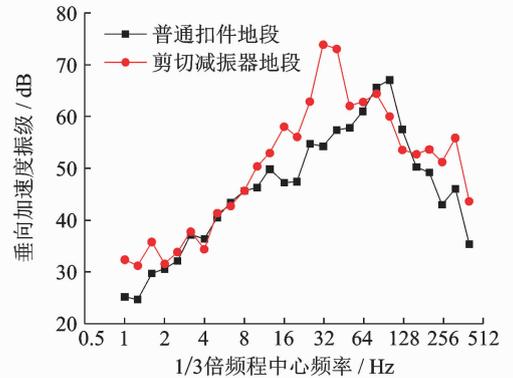
1) 存在钢轨波磨的地铁剪切型减振器区段,轨道结构振动加速度峰值和均值均明显大于未采用减振措施的普通扣件区段。钢轨波磨对剪切型减振器区段轨道结构的振动具有显著的放大作用。

2) 剪切型减振器区段,振动从钢轨-道床衰减量值明显高于普通扣件,剪切型减振器和普通扣件地段振级分别递减 29.6,30.9 dB。波磨会导致较大的轮轨冲击,剪切型减振器虽会增大振动在钢轨-道床间的衰减量,但轨下结构振动仍会大于普通扣件区段,其减振效果难以实现。

3) 从频域上发现,无论是直线段还是曲线段,在 40 Hz 附近,剪切型减振器区段隧道壁振级出现突增,说明此频率能够激发较为激烈的轮轨相互作用,导致剪切型减振器轨道结构振动变大。整个频段范围内,剪切型减振器扣件区段隧道壁振级均较



(a) 直线段  
(a) Straight line



(b) 曲线段  
(b) Curve line

图 7 隧道壁加速度振级

Fig. 7 Tunnel vibration level of subway line

大,说明波磨严重影响减振器的减振效果。

4) 既有地铁运营实践表明,曲线半径较小、运量较大、速度较快、线型条件较差的区段,采用剪切型减振器结构,易出现钢轨波磨现象。地铁减振轨道选型时,应考虑钢轨波磨的不利影响。

## 参 考 文 献

- [1] 张厚贵,刘维宁,吴宗臻,等. 地铁剪切型减振扣件地段钢轨波磨成因与治理措施[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 22-28.  
Zhang Hougui, Liu Weining, Wu Zongzhen, et al. Cause and treatment for rail corrugation developed on egg fastening system section of metro line[J]. China Railway Science, 2014, 35(4): 22-28. (in Chinese)
- [2] 刘卫丰,刘维宁,吴宗臻,等. 北京地铁剪切型减振器扣件钢轨波磨治理的试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 73-79.  
Liu Weifeng, Liu Weining, Wu Zongzhen, et al. Test study on treating rail corrugation for egg fastener in Beijing metro[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 73-79. (in Chinese)

- [3] 刘维宁,任静,刘卫丰,等. 北京地铁钢轨波磨测试分析[J]. 都市快轨交通, 2011, 24(3): 6-9.  
Liu Weining, Ren Jing, Liu Weifeng, et al. In\_situ tests and analysis on rail corrugation of Beijing metro [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(3): 6-9. (in Chinese)
- [4] 李伟,杜星,王衡禹,等. 地铁钢轨一种波磨机理的调查分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(16): 26-32.  
Li Wei, Du Xing, Wang Hengyu, et al. Investigation into the mechanism of type of rail corrugation of metro [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(16): 26-32. (in Chinese)
- [5] 李伟,曾全君,朱士友. 地铁钢轨波磨对车辆和轨道动态行为的影响[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(1): 34-42.  
Li Wei, Zeng Quanjun, Zhu Shiyu. Effect of metro rail corrugation on dynamic behaviours of vehicle and track[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1): 34-42. (in Chinese)
- [6] 谷永磊,赵国堂,金学松,等. 高速铁路钢轨波磨对车辆-轨道动态响应的影响[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 27-31.  
Gu Yonglei, Zhao Guotang, Jin Xuesong, et al. Effects of rail corrugation of high speed railway on vehicle-track coupling dynamic response[J]. China Railway Science, 2015, 36(4): 27-31. (in Chinese)
- [7] 钟硕乔,吴磊,李伟,等. 钢轨波磨对地铁车辆动力学响应的影响[J]. 计算机辅助工程, 2012, 21(6): 26-30.  
Zhong Shuoqiao, Wu Lei, Li Wei, et al. Effect of rail corrugation on dynamical response of metro vehicle [J]. Computer Aided Engineering, 2012, 21(6): 26-30. (in Chinese)
- [8] 孙晓静,张厚贵,刘维宁,等. 采用剪切型减振器扣件的钢轨频率响应特性测试分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 419-423.  
Sun Xiaojing, Zhang Hougui, Liu Weining, et al. Laboratory measurement on rail frequency response behavior for egg fastening system[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 419-423. (in Chinese)
- [9] Ekberg A, Kabo E, Nielsen J, et al. Subsurface initiated rolling contact fatigue of railway wheels as generated by rail corrugation [J]. International Journal of Solids & Structures, 2007, 44(24): 7975-7987.
- [10] Matsumoto A, Sato Y, Ono H, et al. Formation mechanism and countermeasures of rail corrugation on curved track [J]. Wear, 2002, 253(1-2): 178-184.
- [11] Sato Y, Matsumoto A, Knothe K. Review on rail corrugation studies [J]. Wear, 2002, 253(1/2): 130-139.
- [12] Egana J, Vinolas J, Seco M. Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system [J]. Wear, 2006, 261(2): 216-224.
- [13] Suda Y, Hanawa M, Okumura M, et al. Study on rail corrugation in sharp curves of commuter line [J]. Wear, 2002, 253(1/2): 193-198.
- [14] GB/T 19846—2005 机械振动列车通过时引起铁路隧道内部振动的测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [15] 张厚贵, 刘维宁, 杜林林, 等. 剪切型减振器扣件轨道钢轨波磨特性测量[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(4): 128-132.  
Zhang Hougui, Liu Weining, Du Linlin, et al. Rail corrugation characteristics of shear\_type damping fastener track based on measurement [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(4): 128-132. (in Chinese)
- [16] GB 10070—1988 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.



**第一作者简介:**蔡小培 男, 1982年5月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为轨道结构动力学研究及振动控制。曾发表《Analysis of vehicle dynamic behavior under ballasted track irregularities in high-speed railway》(《Noise & Vibration Worldwide》2015, Vol. 46, No. 10)等论文。

E-mail: xpcai@bjtu.edu.cn