

# 基于黏滑振动特性的钢轨波磨形成机制\*

王志强<sup>1,2</sup>, 雷震宇<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海, 201804)

(2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室 上海, 201804)

**摘要** 为了研究钢轨波磨形成机制,首先,基于线路实测钢轨波磨,从黏滑振动理论角度探讨了波磨的形成原因;其次,运用车辆-轨道耦合模型,研究了轮轨系统的黏着蠕滑特性;最后,结合轮对-轨道系统有限元模型模态分析和轮轨黏滑关系,对钢轨波磨的成因进行了解释。当车辆运行在半径为350 m的曲线段时,内轨侧黏滑曲线出现了明显的负斜率特性,从而导致内轮易在内轨表面发生滑动,加剧内轨磨耗;外轨侧黏着系数随着蠕滑率的增加而增大,说明外轮不会发生明显滑动,磨耗相对较少;轨道超高状态对内外侧钢轨的磨耗发展有重要影响。随着线路曲线半径的增加,内外轨侧的黏滑曲线负斜率现象均呈减少趋势,说明波磨的发生概率逐渐降低。结合轮轨黏滑关系和模态特征可知,轮轨系统黏滑负斜率条件下,轮对扭转振动和内轨弯扭振动的耦合作用是造成钢轨波磨的主要原因。波磨演化分析表明,轨面固定缺陷会导致相同位置处产生同相位的钢轨磨耗,并沿着钢轨纵向发展,最终形成钢轨波磨。

**关键词** 轨道工程;波磨;黏滑特性;负斜率;模态分析;耦合振动

**中图分类号** U213.42; TH113.1; TH117.1

## 引言

钢轨波磨是一种轨面纵向周期性损伤,按照波长固定机理和损伤机理<sup>[1]</sup>,其可被分为以下6类:响轨、车辙、接触疲劳、重载、轻轨和特殊轨道型式。钢轨打磨是最为常见的治理波磨措施,但其在减缓波磨的同时,也增加了维护成本,降低了钢轨的使用寿命。因此,探明钢轨波磨的产生原因并找出抑制这一现象的有效措施非常重要。

钢轨波磨现象在小曲线线路上尤为普遍。当车辆运行经过波磨区段时,极易导致车辆轨道部件的异常振动,降低列车运行的平稳性并对行车安全构成隐患。众多理论阐述了关于钢轨波磨的产生原因,例如磨耗腐蚀<sup>[2]</sup>、不均匀塑性变形<sup>[3]</sup>和轮轨共振<sup>[4-9]</sup>等。上述理论能够解释部分特殊情形下的波磨,但对于大多数波磨发生在曲线区段这一普遍现象还有待于进一步研究。部分学者从钢轨表面初始不平顺<sup>[10]</sup>以及钢轨表面不平顺引发的轮轨垂向共振<sup>[11]</sup>角度,研究了波磨的产生和发展特性,但是初始不平顺并不是波磨产生的充分条件,如果轮轨法向力由于轮轨界面几何缺陷受到足够大的扰动,仍然会形成波磨<sup>[12-15]</sup>。

关于钢轨波磨的控制措施,除钢轨打磨外,其他如施加钢轨摩擦调节剂<sup>[16]</sup>、改变列车运营速度分布<sup>[17]</sup>和安装钢轨吸振器<sup>[18]</sup>等方法也得到了广泛应用。但是迄今为止,并没有一个通用的理论模型能够对所有的波磨现象予以解释<sup>[19]</sup>。

笔者分析了钢轨波磨的形成原因,在轮轨黏滑特性的基础上,从轮对和轨道耦合振动这一角度探讨了波磨的形成机制。

## 1 波磨成因

### 1.1 线路实测波磨

测试区间位于天津某地铁线路,该线路于2018年4月开通运营,列车采用6A编组。实测区间轨道扣件类型为ZX-2型,轨下基础为长枕埋入式整体道床,轨道超高为120 mm,线路曲线半径为350 m。通过现场调研发现,该区间外轨存在侧磨,波磨多发于内轨,且波磨程度较为严重,内轨波磨照片如图1所示。

钢轨波磨是一种周期性的轨道不平顺,在实际线路上存在的轨道不平顺是由不同波长、不同相位

\* 国家自然科学基金资助项目(11772230)

收稿日期:2021-03-01;修回日期:2021-05-11



图1 内轨波磨照片

Fig.1 Picture of inner rail corrugation

和不同幅值的随机不平顺叠加而成的,是与线路里程和运量有关的复杂随机过程。因此,使用波长和波深 2 个数据指标对波磨进行评价具有一定的局限性,而采用随机理论中的统计参数来描述则较为合适。笔者选取钢轨表面粗糙度级来对实测区间的波磨情况进行分析评价,其采用三分之一倍频程波长谱的形式表示钢轨波磨的程度。钢轨表面粗糙度级  $L_r$  的计算方法为

$$L_r = 20 \lg(r_{rms} / r_0) \quad (1)$$

其中:  $r_{rms}$  为钢轨表面波磨幅值有效值;  $r_0$  为钢轨表面基准粗糙度级参考值,  $r_0 = 1 \mu\text{m}$ 。

轨面不平顺的测量采用 CAT 波磨采集仪,该设备利用惯性基准原理进行不平顺测量,数据采样间隔为 2 mm,测量速度为 1 m/s。实测轨面不平顺如图 2 所示,相应的三分之一倍频程波长谱如图 3 所

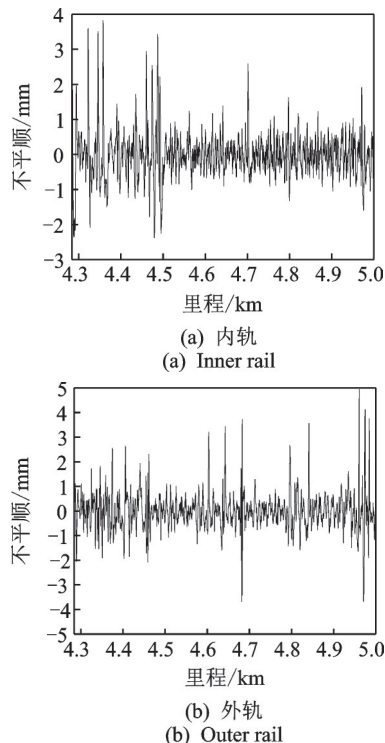


图2 实测轨面不平顺

Fig.2 Measured rail surface irregularities

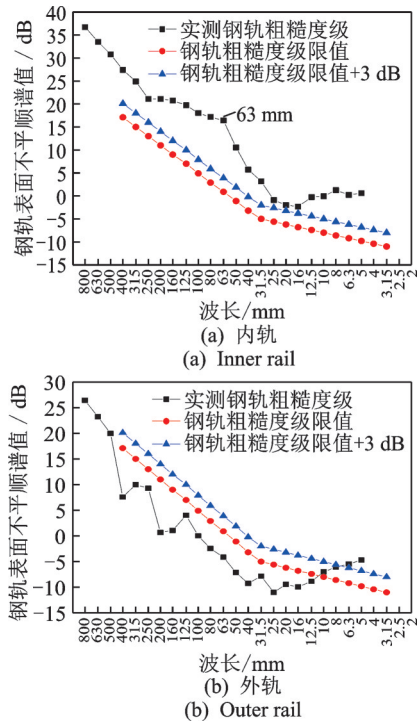


图3 不平顺波长谱

Fig.3 Irregularity wavelength spectra

示。由于钢轨波磨波长一般大于 20 mm(轮轨接触斑长度),根据图 3 可知:内轨各波长对应的不平顺谱值均超出 BS EN ISO 3095 标准<sup>[20]</sup>规定的钢轨粗糙度级限值 3 dB<sup>[21]</sup>以上,尤其当波长为 63 mm 时,其对应的不平顺谱值超出限值最多,说明内轨波磨的特征波长为 63 mm;外轨各波长对应的不平顺谱值均较低,在 20~400 mm 波长范围内不平顺谱值未见超出限值,说明外轨波磨较为轻微或不存在波磨现象。上述分析结果与现场调研情况相符合。内轨波磨的特征频率计算式为

$$f = 1000 v / 3.6 \lambda \quad (2)$$

其中:  $f$  为波磨频率;  $v$  为车辆运行速度;  $\lambda$  为波磨波长。

由于实测区间车辆运行速度为 55 km/h,因此可得内轨波磨的特征频率为 243 Hz。

### 1.2 波磨成因理论

目前,地铁线路采用了多种轨道减振结构来减缓振动和噪声,这些减振结构由于其本身的低刚度特性,更容易导致异常钢轨波磨<sup>[22]</sup>;但是早期的研究表明,支承刚度较大的钢轨更容易产生波磨<sup>[23]</sup>。文献[24]通过分析轨下垫板刚度对钢轨波磨的影响发现,较软的轨下垫板能够减缓钢轨波磨的发展。上述两个看似矛盾的研究结论实则是统一的。

早期铁路车辆的二系悬挂并没有广泛应用空气弹簧,使得车辆的连接刚度相对较高,因而与刚度较大的轨道结构更容易发生共振,从而造成轮轨法向力的较大波动。现在地铁车辆普遍采用空气弹簧作为二系悬挂,降低了车辆的连接刚度,因而更容易与刚度较低的轨道结构产生共振,促使轮轨法向力波动增大,最终可能形成钢轨波磨。钢轨波磨与轮轨法向力的波动密切相关,当法向力的振动频率接近轨道的固有频率时,轨道的垂向振动将会被激发,从而出现共振现象<sup>[25]</sup>。

大多数波磨发生在曲线轨道,尤其是半径小于350 m小曲线轨道的内轨轨面,而当曲线半径大于800 m时则钢轨波磨很少出现。为了解释上述波磨发生的普遍现象,笔者对钢轨波磨的产生机理展开分析。设车轮具有磨耗型踏面,钢轨为标准CHN60轨型面,当轮对在初始位置时,轮对与轨道中心一致,轮对相对轨道无摇头角,此时左右两轮与钢轨的接触角同为 $\delta_0$ ,滚动圆半径同为 $r_0$ 。当轮对向右横移 $y_w$ 时,左右车轮与钢轨的接触面和水平线的夹角分别为

$$\begin{cases} \delta_L = \delta_0 + \varepsilon y_w / s \\ \delta_R = \delta_0 - \varepsilon y_w / s \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\delta_L, \delta_R$ 分别为左右车轮与钢轨的接触面和水平线的夹角; $s$ 为左右车轮两滚动圆跨距之半; $\varepsilon$ 为接触角参数,表示接触面斜率相对于轮对横移量的变化率。

$$\varepsilon = \frac{s}{(R - R')} \left( \frac{s + R'\delta_0}{s - r_0\delta_0} \right) \approx \frac{s}{(R - R')} \quad (4)$$

其中: $R$ 为车轮踏面曲率半径; $R'$ 为钢轨顶面曲率半径。

当轮对横移量为 $y_w$ 时,轮对中心线至轮轨接触点的距离为

$$\begin{cases} s_L = s + \xi y_w \\ s_R = s - \xi y_w \end{cases} \quad (5)$$

其中: $s_L, s_R$ 分别为轮对中心线至左右轮轨接触点的距离; $\xi$ 为轮对中心线至轮轨接触点的距离相对于轮对横移量的变化率。

$$\xi = \frac{R}{(R - R')} \left( \frac{s + R'\delta_0}{s - r_0\delta_0} \right) \approx \frac{R}{(R - R')} \quad (6)$$

由于左右车轮通过轮轴相连接,所以在轮对通过曲线时,左右车轮行驶距离所对应的弧度是相等的。当轮对通过弧度为 $\alpha$ 的圆曲线线路时,左侧车

轮所行驶的距离 $S_L$ 为

$$S_L = \alpha(R_0 - s_L + y_w) \quad (7)$$

其中: $R_0$ 为线路曲线半径。

同理,右侧车轮所行驶的距离 $S_R$ 为

$$S_R = \alpha(R_0 + s_R + y_w) \quad (8)$$

由于 $(R_0 + s_R + y_w) > (R_0 - s_L + y_w)$ ,因此可得左右车轮的行驶距离差 $\Delta S_1$ 为

$$\Delta S_1 = S_R - S_L = 2\alpha s \quad (9)$$

由于车轮踏面为磨耗型踏面,所以左右车轮可能具有不同的滚动圆半径,从而会抵消部分行驶距离差 $\Delta S_1$ 。当轮对横移量为 $y_w$ 时,左右车轮滚动圆半径分别为

$$\begin{cases} r_L = r_0 - \lambda y_w \\ r_R = r_0 + \lambda y_w \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\lambda$ 为等效斜率,表示左右车轮滚动圆半径差对于轮对横移量的变化率。

$$\lambda = \frac{R\delta_0}{(R - R')} \left( \frac{s + R'\delta_0}{s - r_0\delta_0} \right) \approx \frac{R\delta_0}{(R - R')} \quad (11)$$

假设当轮对通过弧度为 $\alpha$ 的圆曲线线路时,轮对自身旋转的角度为 $\varphi$ ,则可得左右车轮的旋转弧长差 $\Delta S_2$ 为

$$\Delta S_2 = \varphi(r_R - r_L) = 2\lambda y_w \quad (12)$$

因此,可得到考虑左右车轮不同滚动圆半径效应之后的左右车轮行驶距离差 $\Delta S$ 为

$$\Delta S = \Delta S_1 - \Delta S_2 = 2(\alpha s - \lambda y_w) \quad (13)$$

可以看出, $\Delta S$ 为 $\alpha, \lambda$ 和 $y_w$ 的函数。在直线线路上, $\alpha = 0, y_w = 0$ ,因此 $\Delta S = 0$ ,即左右车轮的行驶距离相等。

由以上分析可知,对于直线轨道,左右车轮的行驶距离一致,均等于车轮的旋转弧长;对于曲线轨道,内外侧车轮(为便于区分直线和曲线,本研究采用内外侧车轮代替左右侧车轮)的行驶距离不相等,外侧车轮的行驶距离大致等于车轮的旋转弧长,内侧车轮的行驶距离则小于车轮的旋转弧长。因此,内侧车轮存在一段距离为 $\Delta S$ 的滑动区,即内侧车轮只有在内轨表面滑动的情况下才可以补偿减少的行驶距离差 $\Delta S$ ;而外轮并不会趋向于滑动,否则将会产生更大的行驶距离差。上述过程可以简化为外侧车轮正常稳态通过外轨(轮轨黏着状态),内侧车轮则需必要的滑动来保持与外侧车轮步调一致(轮轨滑动状态)。同时,由于动摩擦因数小于静摩擦因数,所以内侧车轮一旦发生滑动,则滑动状态将进一

步发展,直至滑动距离达到 $\Delta S$ ;反之,当内侧车轮滑动时,外侧车轮发生滑动的概率则比较低。因此,由于内侧车轮频繁的滑动作用,内轨轨面磨耗表现得更为严重。

当轮对在曲线轨道上行驶时,内外侧车轮的行驶距离差会导致轮轴承受扭矩作用,当扭矩累积增大到一定值,轮轨界面的黏着力小于扭矩在车轮踏面上所产生的扭转力时,扭矩就会突然释放,车轮踏面与钢轨轨面之间的黏着状态就会转变成滑动状态<sup>[26]</sup>。这一过程是在非常短暂的瞬间完成的,而且周而复始。只要轮轨之间产生滑动,轮对所受的扭矩便会迅速释放,蠕滑力与蠕滑率关系如图4所示。由图4中的 $b, c$ 曲线可知,轮轨蠕滑力下降为动摩擦力且小于静摩擦力,如果轮对的扭矩全部释放,则蠕滑力归于零,轮轨之间成为黏着状态。如此反复,轮对在钢轨轨面上作扭转黏滑运动。当轮轨黏着时,轨面的磨耗较小,即形成波磨的波峰;当轮轨滑动时,轨面的磨耗较大,即形成波磨的波谷。如果轨面存在某一固定缺陷,则会造成轮对在通过这一缺陷时产生同相位的黏滑振动。随着车辆的往复运行,轮对在轨面同一缺陷位置处连续产生同相位的周期黏滑振动,并沿着钢轨纵向发展,最终可能在钢轨轨面形成波浪形磨耗。

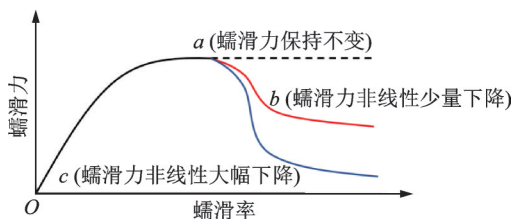


图4 蠕滑力与蠕滑率关系图

Fig.4 Relationship diagram between creep force and creepage

## 2 计算与分析

### 2.1 模型的建立

运用多体动力学软件(universal mechanism,简称UM),构建车辆-轨道耦合动力学模型。车辆模型包括1个车体、2个转向架和4个轮对,其中车体和转向架视为刚体,轮对采用柔性轮对,均考虑其质量和转动惯量。车体与转向架之间的二系悬挂以及转向架与轮对之间的一系悬挂均通过弹簧阻尼元件进行模拟,以使所建立的车辆模型更接近真实情况。车辆各部件参数主要参考文献[27]。轨道模

型中钢轨类型为CHN60轨,扣件模拟为弹簧阻尼元件,轨下基础为混凝土轨枕,轨道结构参数参见文献[28]。轮轨接触采用Kalker精确理论CONTACT算法,该算法以Duvant-Lions变分原理为依据,将摩擦滚动接触问题转化为变分不等式,从而直接求解由接触斑上作用力和位移乘积表示的最小余能<sup>[29]</sup>。

根据上述车辆模型、轨道模型和轮轨接触模型,可以构建车辆-轨道耦合模型如图5所示。

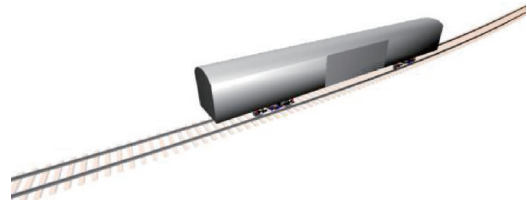


图5 车辆-轨道耦合模型

Fig.5 Vehicle-track coupling model

### 2.2 模型的验证

利用现场实测钢轨垂向振动加速度,对车辆-轨道耦合模型的有效性进行了验证。首先运用波磨采集仪对实测区间钢轨表面不平顺进行测量,然后将实测不平顺作为初始不平顺添加至钢轨模型,并进行仿真计算。模型中车辆速度参考线路实际情况取为55 km/h,钢轨测点位于内轨轨底顶面位置,现场实测照片如图6所示。通过INV3060S仪器进行数据采集,采样频率为2 048 Hz,使用DASP-V10软件进行数据分析。测点断面钢轨垂向振动加速度的仿真与实测结果如图7所示,可以看出,在车辆经过测点的时域区间(蓝色虚线框范围)内,仿真与实测结果一致性较好,从而验证了模型的有效性。

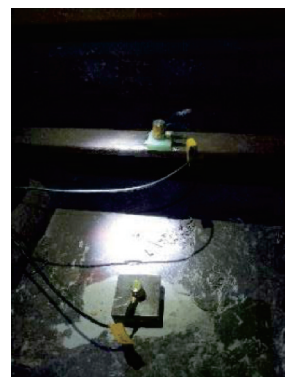


图6 现场实测照片

Fig.6 Test picture on-site

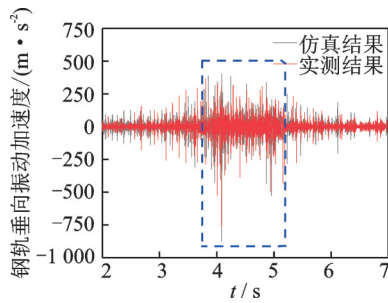


图7 仿真与实测结果对比

Fig.7 Comparison of simulation and measurement results

### 2.3 轮轨黏滑特性

基于车辆-轨道耦合模型,设定线路组成为(50 m 直线+50 m 缓和曲线+200 m 圆曲线+50 m 缓和曲线),圆曲线半径为 350 m,轨道超高为 120 mm,车辆速度为 55 km/h,并将轮轨法向力、轮轨蠕滑力和蠕滑率作为输出变量。对于本节分析的半径为 350 m 的圆曲线轨道,根据轮轨法向力和蠕滑力的计算结果,可以得到车辆在圆曲线轨道上运行时对应的黏着系数,即轮轨蠕滑力与法向力的比值。结合轮轨蠕滑率计算结果,可以得出黏滑特性曲线,如图 8 所示。

通过对黏滑特性曲线进行平滑处理可以看出,内轨黏滑特性曲线与外轨相差较大。内轨侧黏滑

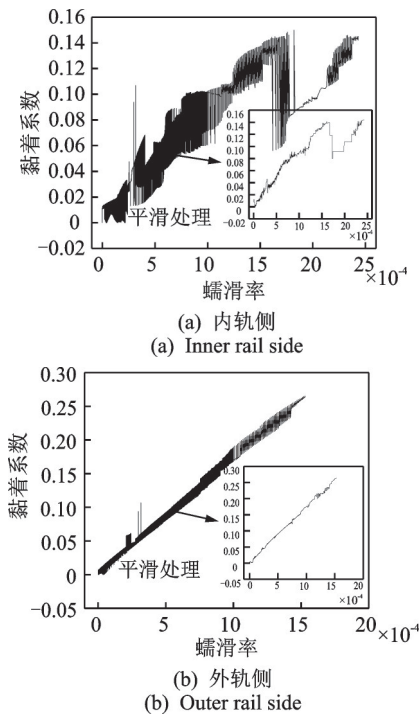


图 8 黏滑特性曲线(过超高)

Fig.8 Curves of stick-slip characteristics (excess superelevation)

曲线出现了明显的负斜率特性,即当蠕滑率增加时,黏着系数反而降低,因此会导致内轮表面发生滑动,从而加剧内轨磨耗。外轨侧黏滑曲线部分区段也出现了轻微负斜率特性,但整体黏着系数是随着蠕滑率的增加而增大的,说明外轮不会发生明显滑动,即运行期间大部分处于滚动状态,磨耗相对较少。上述结果与 1.2 节波磨成因理论分析相符合。

平衡超高计算式为

$$h = 11.8 v^2 / R_0 \quad (14)$$

其中: $h$ 为轨道平衡超高值; $v$ 为车辆速度; $R_0$ 为曲线半径。

由式(14)可知,当车辆速度为 55 km/h、曲线半径为 350 m 时,轨道结构平衡超高值为 100 mm,而实际线路中轨道超高值为 120 mm,说明轨道结构处于过超高状态。为进一步研究轮轨黏滑特性与钢轨波磨的关系,对平衡超高(轨道超高值为 100 mm)和欠超高(轨道超高值为 80 mm)状态下的轮轨黏滑特性进行分析,相应的黏滑特性曲线如图 9,10 所示。

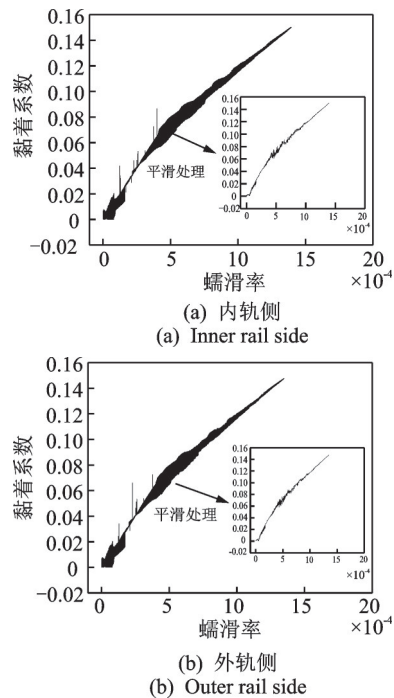


图 9 黏滑特性曲线(平衡超高)

Fig.9 Curves of stick-slip characteristics (balanced superelevation)

由图 9,10 可知:当轨道处于平衡超高状态时,内外轨侧的轮轨黏滑曲线均未出现明显负斜率特性,说明轨道平衡超高状态能够减缓钢轨磨耗;当轨道处于欠超高状态时,内外轨侧的轮轨黏滑曲线变

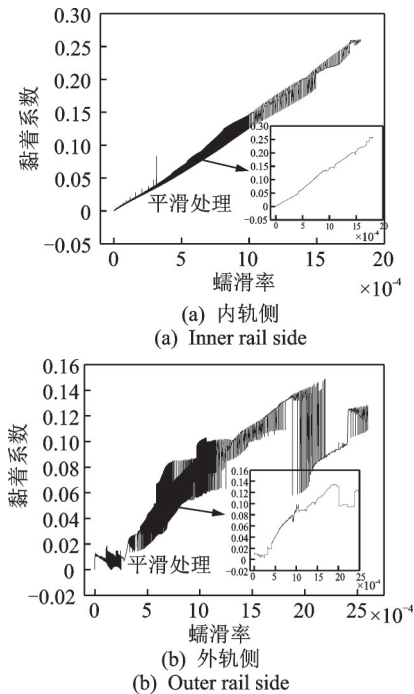


图10 黏滑特性曲线(欠超高)

Fig.10 Curves of stick-slip characteristics (deficient super-elevation)

化趋势大致与轨道过超高时的情况相反,外轨侧黏滑曲线出现了明显的负斜率特性,内轨侧则未出现明显的负斜率现象,表明轨道超高状态对内外侧钢轨的磨耗发展程度具有重要影响。

为进一步研究轮轨黏滑特性与轨道曲线半径的关系,以解释波磨大多发生在小半径曲线内轨这一现象,分别作出曲线半径为800 m和直线线路上的黏滑特性曲线,如图11所示。由图可知:对于半径为800 m的曲线轨道,内外轨侧黏滑曲线变化趋势大致相似,整个蠕滑率区间几乎不再存在负斜率段;直线线路上的黏滑曲线也不存在负斜率段,表明随着线路曲线半径的增加,内外轨侧车轮逐渐趋向于完全黏着滚动状态,滑动磨耗逐渐减小,从而降低波磨的发生概率。

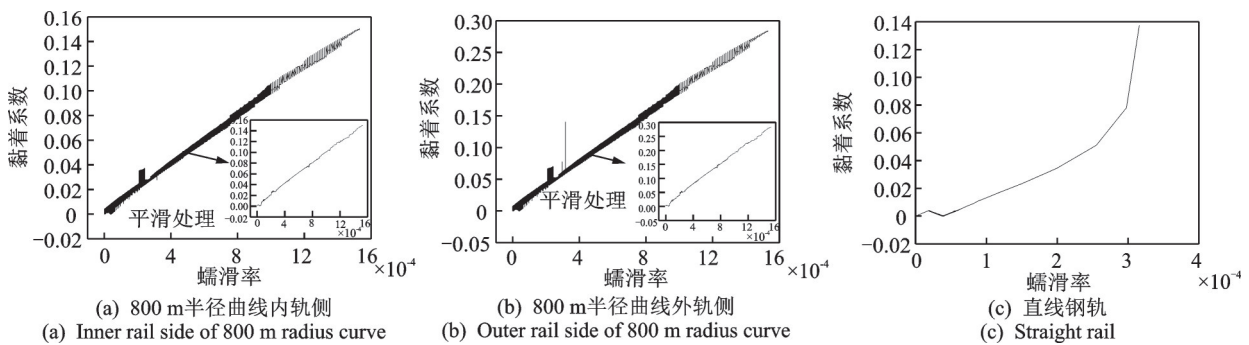


图11 黏滑特性曲线(800 m半径曲线和直线)

Fig.11 Curves of stick-slip characteristics (800 m radius curve and straight lines)

上述分析表明,小半径曲线内轨磨耗更为严重,与实际情况相似,但波磨具有周期性。

### 2.4 轮轨系统模态特性

通过运用有限元软件 ABAQUS,建立轮对-轨道3维实体模型,主要包括1个轮对和2股钢轨,钢轨两端为固定约束,且钢轨通过扣件(弹簧阻尼元件)与轨下基础相连,轮对-轨道有限元模型如图12所示。车轮名义滚动圆半径为420 mm,踏面类型为LM磨耗型,钢轨采用CHN60轨,轮轨摩擦因数设为0.3,轨距为1 435 mm,轨道中心线长度为36 m,对应曲线半径为350 m,轨道超高设为120 mm,轮对-轨道系统的结构参数参见文献[28]。

由文献[30]可知,当轮轨系统出现黏着系数-蠕滑率负斜率特征时,将会导致轮对产生不稳定的自激振动。为此,对所建立的轮对-轨道3维系统模型进行了模态分析,以研究轮轨系统的固有振动特性。根据1.1节可得内轨波磨的特征频率为243 Hz,模态分析结果中与其相近的频率为251 Hz,该频率对应的轮对-轨道系统振型如图13所示。由图可知,内轨发生了明显的弯扭振动,振动幅值最大达到0.22 mm,而外轨未有振动出现。进一步提取出251 Hz下的轮对振型并进行放大,如图14所示,容易看出内外轨侧车轮发生了扭转振动,最大振动幅值为0.066 mm。综合图13,14可得,内轮-内轨的耦合振动作用显著大于外轮-外轨的耦合振动,说明内轮-内轨更容易发生不稳定振动。结合轮轨黏滑特性和模态分析结果可知,内轨更容易产生钢轨波磨。因此,钢轨波磨形成的主要原因是轮轨系统黏滑负斜率条件下,轮对扭转振动和内轨弯扭振动的耦合作用所造成的,波磨成因如图15所示。

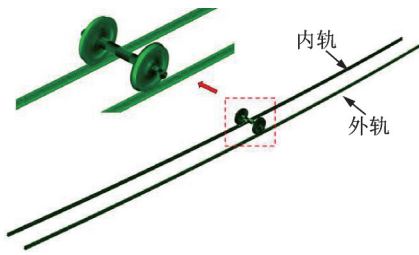


图 12 轮对-轨道有限元模型  
Fig.12 Wheelset-track finite element model

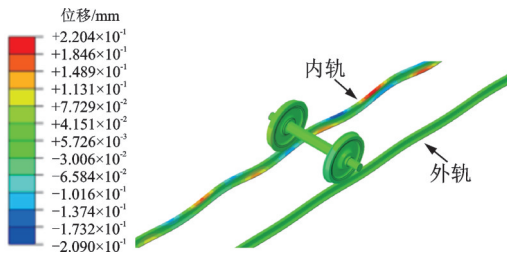


图 13 251 Hz 频率对应的轮对-轨道系统振型  
Fig.13 Vibration mode of wheelset-track system corresponding to the frequency of 251 Hz

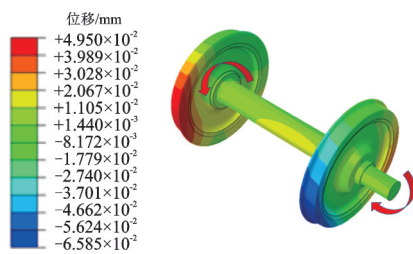


图 14 251 Hz 频率对应的轮对振型  
Fig.14 Vibration mode of wheelset corresponding to the frequency of 251 Hz

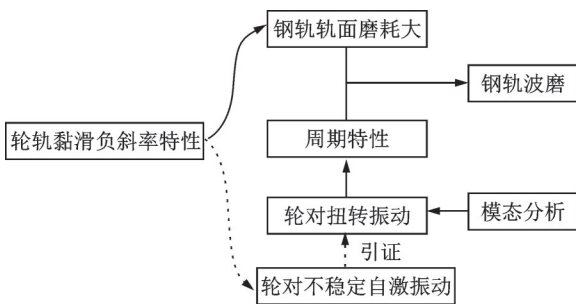


图 15 波磨成因示意图  
Fig.15 Diagram of the cause of corrugation

### 2.5 波磨演化分析

根据波磨成因理论可知,轨面固定缺陷可能会导致相同位置处产生同相位的周期黏滑振动,进而促使波磨继续发展。笔者对存在轨面缺陷的波磨演化过程进行分析,假设内轨轨面存在单凹坑缺陷(呈半正弦形状),凹坑深度为 0.5 mm,波长为 63 mm,

位于圆曲线中点处。采用基于摩擦功理论的磨耗模型计算轨面磨耗<sup>[27]</sup>,通过将单次车辆运行得到的轨面磨耗深度作为不平顺施加在钢轨模型上并再次进行计算,即可得到前次磨耗影响下的下一次磨耗深度,重复上述过程,便可得到多次车辆运行下的轨面磨耗深度。

由于单次计算的磨耗深度极小,因此以 100 000 次计算作为一个输出量级,按照 6 节编组列车每日运行 137 次(参考天津地铁实际运营情况)计算,达到该程度的磨耗约需要 30 d。输出 5 个量级的轨面磨耗深度曲线,如图 16 所示。分析可知:当内轨轨面存在单凹坑缺陷时,随着车辆运行次数的增加,内轨轨面磨耗深度呈现同相位增大趋势,即磨耗深度曲线的峰谷位置始终保持不变;外轨受内轨凹坑导致的轮轨动力作用的影响,轨面磨耗深度也呈现同相位依次增大趋势,但幅值相对内轨磨耗深度较小。上述结果表明,轨面固定缺陷会导致相同位置处产生同相位的钢轨磨耗,即产生同相位的周期黏滑振动,并沿着钢轨纵向发展,最终形成钢轨波磨。

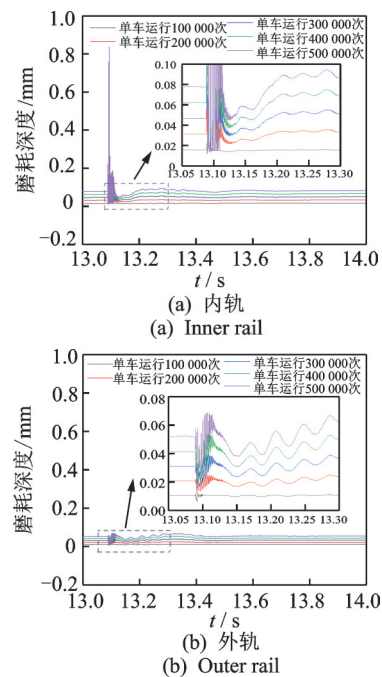


图 16 磨耗深度曲线  
Fig.16 Wear depth curves

### 3 结 论

1) 实测数据分析显示,内轨波磨较为严重,且其特征波长为 63 mm;外轨波磨较为轻微或不存在波磨现象,上述结果与现场实际相符合。

2) 当车辆运行在半径为350 m的曲线段时,内轨侧黏滑曲线出现了明显的负斜率特性,导致内轨易在内轨表面发生滑动,加剧内轨磨耗;外轨侧黏滑曲线部分区段也出现了轻微的负斜率特性,但整体上黏着系数仍随着蠕滑率的增加而增大,说明外轨不会发生明显滑动,磨耗相对较少。

3) 轨道超高状态对内外侧钢轨的磨耗发展具有重要作用。随着线路曲线半径的增加,内外轨侧的黏滑曲线负斜率现象均呈减少趋势,表明车轮的滑动磨耗逐渐减小,从而波磨的发生概率降低。

4) 轮对-轨道系统模态分析表明,与内轨实测波磨特征频率243 Hz接近的频率251 Hz处所对应的振型,为内轨弯扭振动和轮对扭转振动的耦合振型,且内轮-内轨的耦合振动作用显著大于外轮-外轨的耦合振动,说明内轮-内轨更容易发生不稳定振动。结合轮轨黏滑特性可知,轮轨系统黏滑负斜率条件下,轮对扭转振动和内轨弯扭振动的耦合作用是造成钢轨波磨的主要原因。

5) 轨面固定缺陷会导致相同位置处产生同相位的钢轨磨耗,即同相位的周期黏滑振动,并沿着钢轨纵向发展,最终形成钢轨波磨。

#### 参 考 文 献

- [1] GRASSIE S L. Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(6):581-596.
- [2] FELLER H G, WALF K. Surface analysis of corrugated rail treads[J]. Wear, 1991, 144(1/2):153-161.
- [3] 刘启跃,王夏秋,周仲荣. 钢轨表面波浪形磨损研究[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(4): 50-53.  
LIU Qiyue, WANG Xiaqiu, ZHOU Zhongrong. An investigation of rail corrugation[J]. Tribology, 1998, 18(4):50-53. (in Chinese)
- [4] 李霞,李伟,温泽峰,等. 普通短轨枕轨道结构钢轨波磨初步研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2):109-115.  
LI Xia, LI Wei, WEN Zefeng, et al. Preliminary study on the rail corrugation of the fixed-dual short sleepers track[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 109-115. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 李霞,李伟,申莹莹,等. 基于轨道振动理论的梯形轨枕轨道钢轨波磨研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 121-128.  
LI Xia, LI Wei, SHEN Yingying, et al. Study on the rail corrugation of the ladder-type sleepers track based on the track vibration theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(22):121-128. (in Chinese)
- [8] 李响,任尊松,徐宁. 地铁小半径曲线段钢弹簧浮置板轨道的钢轨波磨研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 70-76.  
LI Xiang, REN Zunsong, XU Ning. Study on rail corrugation of steel spring floating slab track on subway with small radius curve track[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8):70-76. (in Chinese)
- [9] 周志军,李伟,温泽峰,等. 地铁钢轨短波长波磨形成原因分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6):1040-1047.  
ZHOU Zhijun, LI Wei, WEN Zefeng, et al. Cause analysis of metro short-wavelength rail corrugation based on dynamic characteristics of wheel-rail structure [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2020, 40(6):1040-1047. (in Chinese)
- [10] SUDA Y. Effects of vibration system and rolling conditions on the development of corrugations[J]. Wear, 1991, 144(1/2):227-242.
- [11] AHLBECK D R, DANIELS L E. Investigation of rail corrugations on the Baltimore metro[J]. Wear, 1991, 144(1/2):197-210.
- [12] BELLETTE P A, MEEHAN P A, DANIEL W J T. Validation of a tangent track corrugation model with a two disk test rig[J]. Wear, 2011, 271(1/2):268-277.
- [13] JIN X S, WEN Z F, WANG K Y, et al. Effect of a scratch on curved rail on initiation and evolution of rail corrugation[J]. Tribology International, 2004, 37(5): 385-394.
- [14] WEN Z F, JIN X S. Effect of track lateral geometry defects on corrugations of curved rails[J]. Wear, 2005, 259:1324-1331.
- [15] JIN X S, WEN Z F, WANG K Y. Effect of track irregularities on initiation and evolution of rail



- corrugation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 285(1/2):121-148.
- [16] EADIE D T, SANTORO M, OLDKNOW K, et al. Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation in curves[J]. *Wear*, 2008, 265(9):1212-1221.
- [17] MEEHAN P A, BATTEN R D, BELLETTE P A. The effect of non-uniform train speed distribution on rail corrugation growth in curves/corners[J]. *Wear*, 2016 (366/367):27-37.
- [18] 钱韦吉,黄志强.蠕滑力饱和条件下钢轨吸振器抑制短波波磨的理论研究[J].*振动与冲击*, 2019, 38(14): 68-73,111.  
QIAN Weiji, HUANG Zhiqiang. Theoretical study on the suppression of short pitch rail corrugation induced vibration by rail vibration absorbers under saturated creep forces condition[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(14):68-73,111. (in Chinese)
- [19] 金学松,李霞,李伟,等.铁路钢轨波浪形磨损研究进展[J].*西南交通大学学报*,2016,51(2):264-273.  
JIN Xuesong, LI Xia, LI Wei, et al. Review of rail corrugation progress[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016,51(2):264-273. (in Chinese)
- [20] European Committee for Standardization. BS EN ISO 3095—2013 Acoustics-railway applications-measurement of noise emitted by railbound vehicles[S]. London: British Standards Institution, 2013.
- [21] 张凯轩,宫岛,周劲松.钢轨波磨对地铁车内噪声影响的试验研究[J].*机械设计与制造工程*, 2018, 47(5): 119-122.  
ZHANG Kaixuan, GONG Dao, ZHOU Jinsong. The experiment study on the influence to metro vehicle interior noise caused by rail corrugation[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2018, 47(5): 119-122. (in Chinese)
- [22] 陆云.地铁小半径曲线钢轨磨耗的防治措施[J].*城市轨道交通研究*,2018,21(1):68-71.  
LU Yun. Measures against rail wear on subway small radius curve section[J]. *Urban Mass Transit*, 2018, 21(1):68-71. (in Chinese)
- [23] ILIAS H. The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 227(5):935-948.
- [24] EGANA J I, 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.
- [25] LIU X G, WANG P. Investigation of the generation mechanism of rail corrugation based on friction induced torsional vibration[J]. *Wear*, 2021(468/469):203593.
- [26] 练松良,孙琦,王午生.铁路曲线钢轨磨耗及其减缓措施[M].北京:中国铁道出版社,2001:161-168.
- [27] 雷震宇,王志强,李莉,等.地铁普通扣件钢轨波磨特性[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(9): 1334-1340.  
LEI Zhenyu, WANG Zhiqiang, LI Li, et al. Rail corrugation characteristics of the common fastener track in metro[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(9):1334-1340. (in Chinese)
- [28] 陈晓丽,陈光雄,夏晨光,等.地铁轨道曲线半径与钢轨波磨的相关性研究[J].*润滑与密封*, 2021, 46(1): 124-129,110.  
CHEN Xiaoli, CHEN Guangxiong, XIA Chenguang, et al. Study on the correlation between rail corrugation and curve radius of metro tracks[J]. *Lubrication Engineering*, 2021, 46(1):124-129,110. (in Chinese)
- [29] 金学松,薛弼一.三维非赫兹滚动接触理论在轮轨滚动接触中的应用-TPLR的编制及应[J].*西南交通大学学报*,1997,32(4):407-412.  
JIN Xuesong, XUE Biyi. Application of three-dimensional non-Hertzian rolling contact theory to wheel/rail rolling contact-compilation and application of TPLR[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1997, 32(4): 407-412. (in Chinese)
- [30] 孙丽霞,姚建伟,侯福国.轮轨干摩擦下的轮对横向自激振动机理[J].*中国铁道科学*,2012,33(5):60-67.  
SUN Lixia, YAO Jianwei, HOU Fuguo. Lateral self-excited vibration mechanism of wheelset subjected to wheel/rail dry friction contact system[J]. *China Railway Science*, 2012,33(5):60-67. (in Chinese)



**第一作者简介:**王志强,男,1993年2月生,博士生。主要研究方向为轮轨关系。曾发表《Parameter influences on rail corrugation of metro tangential track》(《International Journal of Structural Stability and Dynamics》2021, Vol. 21, No. 3)等论文。

E-mail: 1733359@tongji.edu.cn

**通信作者简介:**雷震宇,女,1970年12月生,博士、副教授、博士生导师。主要研究方向为轨道交通振动与噪声。

E-mail: leizhenyu@tongji.edu.cn