

# 地铁车辆起动区段钢轨波磨成因分析\*

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** 为研究地铁出站口附近直线起动区段钢轨波磨形成原因,利用有限元软件 ABAQUS 建立了三维实体轮对-轨道瞬态滚动接触模型,并结合现场实测,从时域和频域上对波磨现象进行了分析。研究表明:车辆起动过程中,车轮与钢轨表面接触带会产生准周期特性的滑移区域,且滑移区域中心之间的距离与实测波磨的波长范围接近,从而验证了模型的合理性和有效性;轮轨系统的不稳定摩擦自激振动是导致实测区段钢轨波磨产生的根本原因,正是由于轮轨蠕滑力“饱和-非饱和”的周期特性,最终促使了波磨的形成;钢轨和车轮的垂向振动加速度等级在 160~230 Hz 频率范围内均出现了峰值区域,且频率范围与实测波磨的特征频率范围 174~198 Hz 接近,这进一步说明钢轨波磨是轮轨系统摩擦自激振动引起的车轮-钢轨共振所产生;在忽略初始不平顺的前提下,钢轨表面的波磨会随着车轮运行次数的增加呈现线性增长趋势,因此适当地采取钢轨打磨以及轨面润滑等措施尤为重要。

**关键词** 地铁;起动区段;钢轨波磨;瞬态滚动接触模型;滑移;摩擦自激振动

**中图分类号** U213.42; TH113.1; TH117.1

## 引言

钢轨波磨是一种发生在钢轨表面的具有一定周期特性的波浪状磨耗现象,是地铁线路最为常见的钢轨病害之一<sup>[1]</sup>。由于地铁运营条件有所差异,因此对应的钢轨波磨现象也不尽相同。到目前为止,尚未有统一的理论能够对不同钢轨波磨现象产生机理进行很好的解释。钢轨波磨的存在不仅会导致轨道车辆结构振动加剧、钢轨扣件损伤加重和车辆运行噪声增大,而且会影响乘客乘坐舒适性和轨道车辆部件的使用寿命<sup>[2-3]</sup>。为了从根本上预防和控制钢轨波磨现象,需要结合地铁线路实际情况,对钢轨波磨形成原因进行全面调查研究。

国内外关于钢轨波磨成因的研究颇多。Grassie 等<sup>[4-5]</sup>综述了钢轨波磨的研究情况,将波磨产生机理分为波长固定机理和材料损伤机理,基于上述机理提出了钢轨波磨的分类、成因及对策,并对其提出的波磨分类及成因进行了进一步修正,认为所有类型的钢轨波磨现象均为频率固定机理而非波长固定机理造成。文献[6-7]研究了多个车轮和弹性轨道之间的振动干涉对波磨的影响,通过结合离散支撑板式轨道时域模型、非稳态二维轮轨切向接触模型

和长期磨损模型,模拟了单轮轨和多轮轨相互作用下波磨的增长过程,结果发现,轮对间低频驻波是造成钢轨波磨的主要原因,波长对轮距的依赖性构成了钢轨波磨的波长固定特性。李霞等<sup>[8]</sup>基于轨道结构振动理论,结合现场调研和实测,探讨了梯形轨枕轨道波磨的形成原因,并利用有限元模型分析了轨道结构固有特性与波磨的内在联系,结果表明车辆的往复运行容易造成钢轨相对于轨枕的垂横向弯曲振动,从而加剧轮轨黏滑振动,加速钢轨波磨的形成和发展。李响等<sup>[9]</sup>通过建立车辆轨道系统动力学模型,研究了弹性轨道系统振动特性对波磨形成的影响,认为轮轨间横向滑动引起的钢轨磨耗和轨道结构的垂向振动可能是造成曲线段波磨的主要原因。刘卫丰等<sup>[10-11]</sup>对北京地铁剪切型减振器扣件区段钢轨波磨进行调查测试发现,200~400 Hz 的轮轨共振是引发钢轨波磨的主要原因,并提出在剪切型减振器扣件内增设橡胶垫块和在轨腰安装调频钢轨减振器的波磨减缓措施,测试结果显示上述措施可以有效地控制波磨的发展。潘兵等<sup>[12]</sup>通过建立列车轮对与轨道耦合的三维实体有限元模型,并结合轮对模态测试结果,发现轮轨耦合条件下 200~400 Hz 轮对横向模态特征导致的钢轨横向弯曲振动是实测区

\* 国家自然科学基金资助项目(11772230)

收稿日期:2020-10-22;修回日期:2020-12-20

段40~60 mm波长波磨形成的原因之一。尧辉明等<sup>[13]</sup>对钢轨微观接触斑内的磨耗型波磨产生机理进行了研究,提出了钢轨波磨的微观波长锁定扩展机制,分析了波磨在此机制作用下的形成机理,并通过试验对该波磨形成机理进行了验证。文献[14-23]提出了轮轨蠕滑力达到饱和时轮轨间摩擦自激振动引起钢轨波磨的观点,该观点认为轮轨间的摩擦自激振动造成轮轨法向力的同频率变化,而车轮与钢轨间的摩擦功会随着法向力的变化产生周期性波动,进而导致钢轨波磨。目前,关于钢轨波磨的研究,大多主要集中在频域上展开,而在时域上对钢轨波磨产生和演化过程的分析却较少,部分文献只是对轮轨系统(或车辆轨道系统)的时域动态响应进行了分析,并没有直接得到波磨的发生状态和发展过程,特别是轮轨系统(或车辆轨道系统)的时域动态响应与波磨的形成和发展并没有直接的关联<sup>[24]</sup>。

笔者以上海某地铁线路出站口附近直线区段科隆蛋扣件轨道波磨为研究对象,首先,通过分析实测数据,获得波磨特征波长和特征频率;其次,参考实际线路情况,利用有限元软件ABAQUS建立三维实体轮对-轨道瞬态滚动接触模型,并进行仿真计算;最后,根据计算结果,从时域和频域上,分析钢轨波磨的产生原因,并对钢轨波磨的发展过程进行了简单论述。相对于之前的研究,本研究的不同之处在于将钢轨波磨的发生状态在时域上进行了再现,且计算结果与现场实测具有较好的一致性。同时,本研究也可推广到线路制动区段、小半径圆曲线区段和过渡曲线区段,用以解释钢轨波磨的产生原因和发展特性,尤其是曲线段内轨波磨严重外轨波磨轻微这一普遍现象。

## 1 轮对-轨道瞬态滚动接触模型

### 1.1 模型的建立

直线线路科隆蛋扣件轨道现场实测波磨区段位于地铁出站口附近,该区段运行车辆的动车处于牵引状态,蠕滑力较大,车轮可能出现滑动。应用ABAQUS建立了图1所示的轮对-轨道瞬态滚动接触模型,以模拟实测地铁线路上的车辆-轨道系统。波磨区段的轮轨相互作用属于高频范畴,而车辆-轨道耦合系统的高频动力响应主要取决于轮对和轨道的柔性<sup>[25]</sup>,所以车辆系统一系悬挂以上的所有部件均被简化为质点并通过一系悬挂与轮轴相连,模型结构示意图如图1(a)所示,有限元模型及网格划分

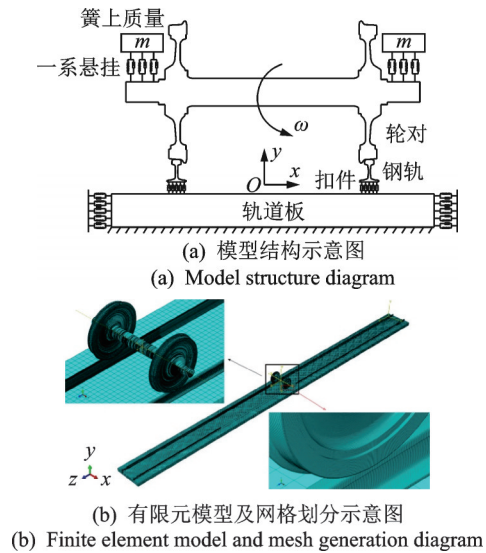


图1 轮对-轨道瞬态滚动接触模型  
Fig.1 Wheelset-track transient rolling contact model

示意图如图1(b)所示。其中:轮对模型包括2个车轮和轮轴,轨道模型包括钢轨、扣件与轨道板;一系悬挂和扣件部分均通过弹簧阻尼单元进行模拟,可以考虑3个方向上的刚度阻尼值;基础对轨道结构的支撑作用采用接地弹簧进行模拟。轮对-轨道瞬态滚动接触模型中考虑的轨道长度为36 m,扣件间隔为0.6 m,各部件的相关参数<sup>[26-27]</sup>如表1所示。

对于轮对-轨道瞬态滚动接触模型而言,轮对和钢轨均离散为8节点六面体单元。钢轨类型为中国60轨(CHINA60,简称CHN60),轨底坡为1:40,车轮踏面类型为车辆磨耗(locomotive wear,简称LM)型踏面,轮轨间接触行为采用基于罚函数的面-面接触算法进行求解,摩擦因数取为0.4。在保证模型解的精度下,为尽可能减小模型计算规模,轮轨网格划分时采用了不均匀网格,即轮轨接触带处网格细密(单元尺寸为2 mm),用以求解轮轨接触,远离轮轨接触带处,网格粗大(单元尺寸为100 mm)。轨道板同样采用8节点六面体单元来模拟,网格单元尺寸为100 mm。轮对-轨道瞬态滚动接触有限元模型的总结点数和总单元数分别为 $836.9 \times 10^4$ 和 $735.6 \times 10^4$ 。

模型边界条件具体为:钢轨和轨道板 $z$ 向两端面设置对称约束,以减小应力波反射对计算结果的影响;轨道板 $x$ 向两侧面设置横向约束;轮对则不设置任何约束。模型荷载施加方面考虑重力作用和轮轴的驱动作用。

### 1.2 模型的求解

模型的求解采用瞬态动态分析,主要包括显式

表1 模型各部件参数

部件	参数	数值
车辆一系悬挂	簧上质量/kg	8 720
	垂向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	1.3×10 <sup>6</sup>
	横向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	547 000
	纵向刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	547 000
	垂向阻尼/(Ns·m <sup>-1</sup> )	2 400
	横向阻尼/(Ns·m <sup>-1</sup> )	1 500
	纵向阻尼/(Ns·m <sup>-1</sup> )	1 500
轮对钢轨	轮对质量/kg	1 420
	弹性模量/Pa	2.059×10 <sup>11</sup>
	塑性模量/Pa	2.1×10 <sup>10</sup>
	屈服强度/Pa	800
	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 800
	泊松比	0.3
扣件部分	垂向刚度/(MN·m <sup>-1</sup> )	12.07
	横向刚度/(MN·m <sup>-1</sup> )	7.58
	纵向刚度/(MN·m <sup>-1</sup> )	7.58
	垂向阻尼/(Ns·m <sup>-1</sup> )	1 361.12
	横向阻尼/(Ns·m <sup>-1</sup> )	974.27
	纵向阻尼/(Ns·m <sup>-1</sup> )	974.27
轨道板	弹性模量/Pa	3.25×10 <sup>10</sup>
	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 400
	泊松比	0.24
基础	支撑刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	1.7×10 <sup>8</sup>
	支撑阻尼/(Ns·m <sup>-1</sup> )	3.1×10 <sup>4</sup>

时间积分和隐式时间积分2种方法,其区别在于求解节点加速度的方式不同。显式时间积分方法直接通过节点计算进行节点加速度的求解,隐式时间积分方法则采用迭代法求解系统的平衡方程组。由于显式时间积分法不能分析具有连接弹簧的模型,而且当时间增量 $\Delta t$ 小于所关心的系统振动周期的1/10时,隐式时间积分算法能够获得比较可信的结果<sup>[21]</sup>,因此笔者选用ABAQUS的隐式求解器ABAQUS/Standard来分析轮轨系统的动态响应,计算过程如下。

在隐式时间积分的计算中,一个节点所受到的内力 $f$ 等于节点外力 $F$ 减去节点所受的惯性力,即

$$f = F - \rho \ddot{x} \quad (1)$$

其中: $\rho$ 为当前节点的材料密度; $\ddot{x}$ 为节点加速度。

将式(1)改写成虚功方程,即

$$\int_V f \delta v dV = \int_V F \delta v dV - \int_V \rho \ddot{x} \delta v dV \quad (2)$$

当采用隐式时间积分求解系统的动态响应时,系统的平衡方程建立在每一个时间增量步的结束时刻。

通过将节点加速度的差值方程带入并将其中的惯性项改写为更加规范的标准密度和标准体积的形式,则此时式(2)中的惯性项为 $-(\int_V \rho N^N N^M dV) \ddot{x}^M$ 。其中: $\int_V \rho N^N N^M dV$ 为系统的标准质量矩阵; $\ddot{x}^M$ 为节点加速度向量。

系统的平衡方程为

$$M^{NM} \ddot{x}^M + I^N - P^N = 0 \quad (3)$$

其中: $M^{NM} = \int_V \rho N^N N^M dV$ ;  $I^N$ 为系统的内力向量; $P^N$ 为系统的外力向量。

将隐式积分算子代入式(3),采用迭代法求解节点加速度,并通过Newmark方法进行隐式时间积分。节点位移和速度的求解方程分别为

$$x|_{t+\Delta t} = x|_t + \Delta t \dot{x}|_t + \Delta t^2 ((1/2 - \beta) \ddot{x}|_t + \beta \ddot{x}|_{t+\Delta t}) \quad (4)$$

$$\dot{x}|_{t+\Delta t} = \dot{x}|_t + \Delta t ((1 - \gamma) \ddot{x}|_t + \gamma \ddot{x}|_{t+\Delta t}) \quad (5)$$

其中: $\beta = (1 - \alpha^2)/4$ ;  $\gamma = 1/2 - \alpha$ ;  $-1/3 \leq \alpha \leq 0$ 。

根据当前的 $x|_{t+\Delta t}$ 求解当前的系统内力向量,并将当前的时间修改为 $t + \Delta t$ ,即可进行下一个增量步的计算。

由于隐式时间积分方法是通过求解系统的平衡方程组来获得节点在积分增量步结束时的加速度,因此该方法是无条件稳定的。在轮轨系统瞬态动态分析过程中,由于波磨产生频率一般处于20~1 200 Hz范围内,因此在计算分析中将积分步长设为0.05 ms。

## 2 波磨成因分析

### 2.1 实测波磨

根据地铁线路实际测量,可得科隆蛋扣件轨道区段上波磨波长约为70~80 mm<sup>[26]</sup>,该区段车辆运行速度约为50 km/h,因此相应的波磨特征频率约为174~198 Hz,波磨现场照片如图2所示。



图2 波磨现场照片

Fig.2 Picture of corrugation on-site

## 2.2 时域特性分析

参考实际线路情况,设定轮对运动速度为 50 km/h,运动时长为 0.8 s,轮轨接触初始位置距离轨道端面为 12.4 m,其中轮对的运动是通过施加在轮轴上的转动速度进行驱动。由于钢轨表面材料的磨损与对应节点的相对滑动密切相关,即只有节点发生滑移,才会产生对应的磨损,因此笔者首先对钢轨表面滑移现象展开研究。假定钢轨表面光滑,无任何初始不平顺,通过仿真计算,可得科隆蛋扣件直线轨道左右轨的滑移区域分布图,钢轨断面切向方向与垂直方向滑移区域分布分别如图 3,4 所示。

由图 3,4 可知,在地铁线路出站口附近,车辆由初始静止状态逐渐加速至正常运营状态过程中,车轮与钢轨表面接触带会产生准周期特性的滑移区域,包括钢轨断面切向方向和钢轨断面垂直方向(轮对运动方向),且滑移区域云图呈现中心滑移量大,四周滑移量小的特性。因此,滑移区域中心处磨损较大,周围区域磨损相对较小,且磨损的出现呈现一定的周期性,这与实测线路上的钢轨波磨现象十分相似。通过对滑移区域分布云图进行测量发现,其各个滑移区域中心之间的距离为 80 mm 左右,与实测波磨的波长范围 70~80 mm 相接近,这一结果既从时域上直接验证了轮对-轨道瞬态滚动接触有限元模型的合理性和有效性,同时也反映出实测线路钢轨波磨的形成是轮轨接触带滑移区域的周期性出现所造成。为进一步研究钢轨波磨的形成机理,下面对滑移区域周期特性出现的原因展开详细分析。

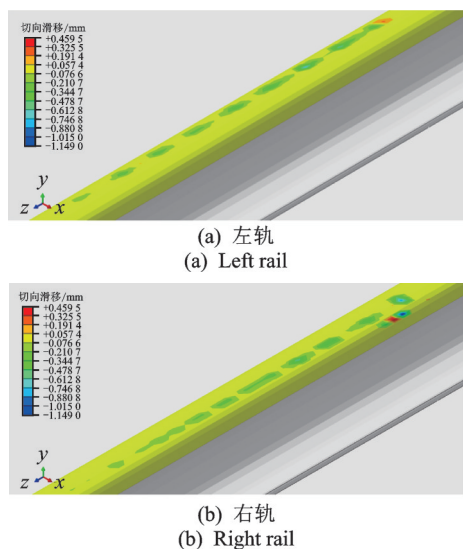


图 3 钢轨断面切向方向滑移区域分布  
Fig.3 Distribution of sliding zone in tangential direction of rail section

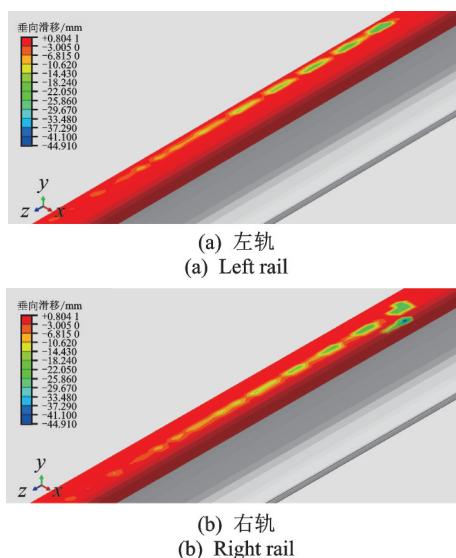


图 4 钢轨断面垂直方向滑移区域分布  
Fig.4 Distribution of sliding zone in vertical direction of rail section

滑移区域的存在表明轮对运动过程中车轮存在滑动,当车轮发生滑动时,轮轨蠕滑力将达到饱和。参考文献[14-23]可知,轮轨间蠕滑力达到饱和将会促使轮轨系统发生不稳定振动,即摩擦自激振动,从而导致波磨的产生。为探究轮轨系统的稳定性以更好地解释钢轨波磨现象,笔者对轮对运动过程中系统的总能量进行分析,系统输出总能量变化曲线如图 5 所示。由图可知,车辆在起动过程中,轮对-轨道系统会发生能量的连续波动,表明轮轨系统在该过程中处于非稳定状态,即轮轨系统在该过程中发生了不稳定振动。结合文献[14-23],可以认为轮轨系统的摩擦自激振动是导致实测区段钢轨波磨产生的根本原因,但是与文献[14-23]不同的是,本研究的轮轨蠕滑力在车辆起动阶段并非一直处于饱和状态,而是呈现“饱和-非饱和”周期性出现的状态,即车轮“滑动-滚动”周期性交替的状态。因此,笔者认为正是由于轮轨蠕滑力“饱和-非饱和”的周期特性,最终促使了波磨的形成,文献[14-23]中轮轨蠕滑力

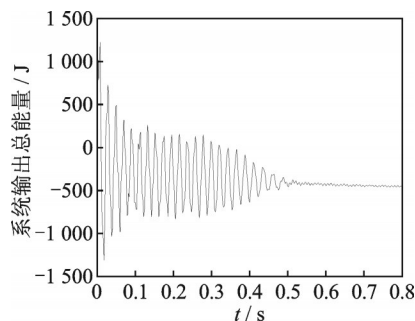


图 5 系统输出总能量变化曲线  
Fig.5 Total energy variation curve of system output

在分析区段始终保持饱和的原因可能与其选择的刚性轮轨(车轨)模型相关。

为进一步分析滑移区域的受力情况,选择滑移区域的确定节点进行研究,其摩擦剪切应力如图 6 所示,其中横向表示钢轨断面切向方向,纵向表示钢轨断面垂直方向(轮对运动方向)。由图可知,当车轮运行经过该确定节点时,其摩擦剪切应力曲线呈现出较大的突变,因此认为急剧增加的摩擦剪切应力会造成该节点滑移量较大并最终导致磨损量增大。根据图 6 可以看出,摩擦纵向剪切应力远大于摩擦横向剪切应力,与图 4 所示滑移区域分布云图相似,这主要是由于线路线型所决定,实际运营中直线线路上轮轨横向力相对较小,纵向力则较大以提供牵引动力作用。

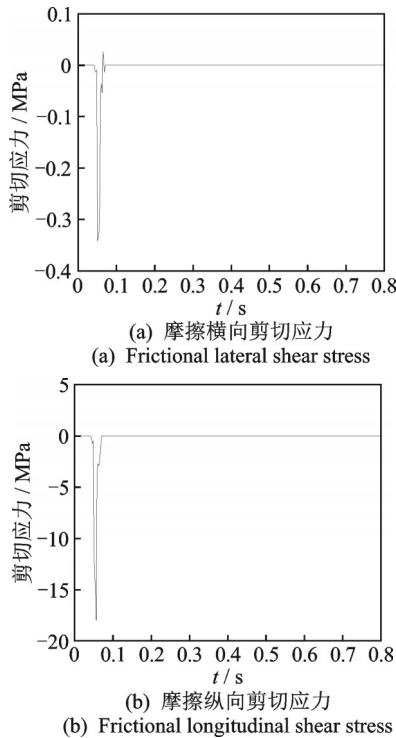


图 6 摩擦剪切应力

Fig.6 Frictional shear stress

为全面研究钢轨波磨现象,对轮轨系统的时域动态响应进行了分析,选择钢轨和车轮确定节点的垂向振动加速度作为输出变量,垂向振动加速度时域曲线如图 7 所示。由图 7(a)可知,钢轨垂向振动加速度响应幅值在车轮经过该确定节点时达到最大,且该时刻的钢轨垂向振动加速度响应幅值相对于其他时刻大得多。由图 7(b)可知,车轮垂向振动加速度在起动阶段发生了不稳定的振荡现象,且振荡幅值相对较大,这与图 5 所示的系统输出总能量曲线变化趋势相类似,说明轮对在起动过程中发生

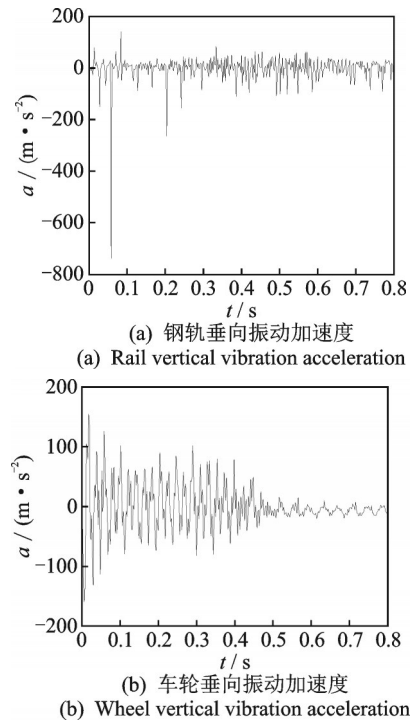


图 7 垂向振动加速度时域曲线

Fig.7 Time-domain curves of vertical vibration accelerations

了不稳定自激振动,最终导致了波磨的形成。

时域分析结果可进一步推广至线路制动区段、小半径圆曲线轨道区段和过渡曲线轨道区段,其中线路制动区段情况与起动区段情况类似。车辆在小半径圆曲线轨道上运行时,附加动压力和轮轨间的相对滑动均与圆曲线半径成反比,因而半径越小,磨损就会越大。小半径圆曲线轨道内轨曲线半径小于外轨,因此车辆在通过圆曲线段时,内侧车轮在内轨上的运行距离要小于外侧车轮在外轨上的运行距离,由此势必会造成内侧车轮在内轨上发生滑动。同时,由于圆曲线线路曲率半径恒定,所以相对于外轨而言,内轨极有可能出现车轮“滑动-滚动”交替的状态,导致内轨表面滑移区域呈准周期特性出现,最终形成钢轨波磨,且相对外轨较为严重。对于过渡曲线轨道区段而言,与小半径圆曲线轨道区段情况相似,不同之处在于过渡曲线段曲率半径连续变化,因而使得各个滑移区域之间的间隔不再固定,即钢轨波磨波长不再固定,而是呈现出一定的变化趋势。上述结论与笔者参与的天津地铁波磨现场实测结果相符合。实测过程中,首先选取线路上的典型波磨区段,然后采用直尺和卷尺对选取区段的波磨波长进行人工测量,并进行拍照。天津地铁实测曲线区段全范围内轨均存在波磨现象,其中圆曲线范围内波磨波长大约恒定在 23 mm,缓和曲线内波磨波长不再恒定,变化范围约为 23~250 mm,圆曲线

范围内轨波磨如图 8 所示,缓和曲线范围内轨波磨如图 9 所示。

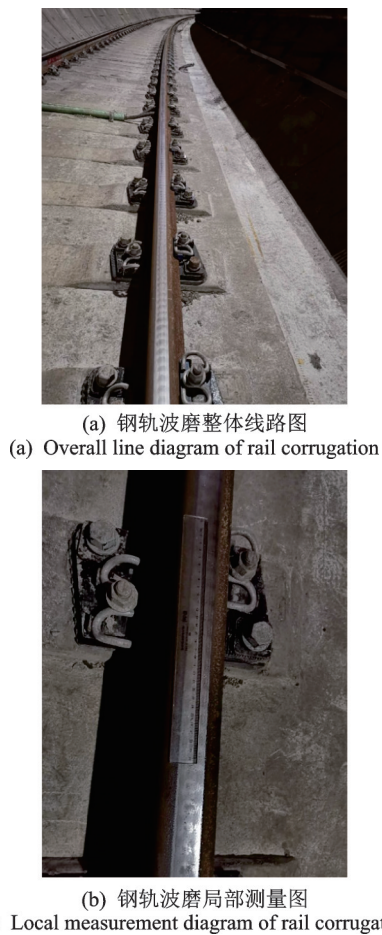


图 8 圆曲线范围内轨波磨

Fig.8 Inner rail corrugation in the circular curve section

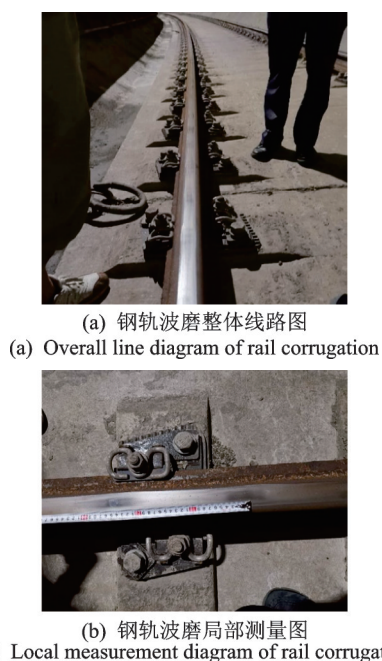


图 9 缓和曲线范围内轨波磨

Fig.9 Inner rail corrugation in the transition curve section

### 2.3 频域特性分析

通过对 2.2 节钢轨和车轮的垂向振动加速度时域曲线进行频谱变换,从而分析轮轨系统动力响应的频域特性,垂向振动加速度频域曲线如图 10 所示。由图可知,钢轨和车轮的垂向振动加速度等级在 160~230 Hz 频率范围内均出现了峰值区域,表明车轮和钢轨可能在上述频率范围内出现了共振现象,从而导致轮轨系统动力响应增大。上述频率范围与现场实测波磨的特征频率范围 174~198 Hz 接近,结合时域分析,进一步说明钢轨波磨是由于轮轨系统摩擦自激振动引起的车轮-钢轨共振所产生,即从频域上也验证了模型的合理性和有效性。

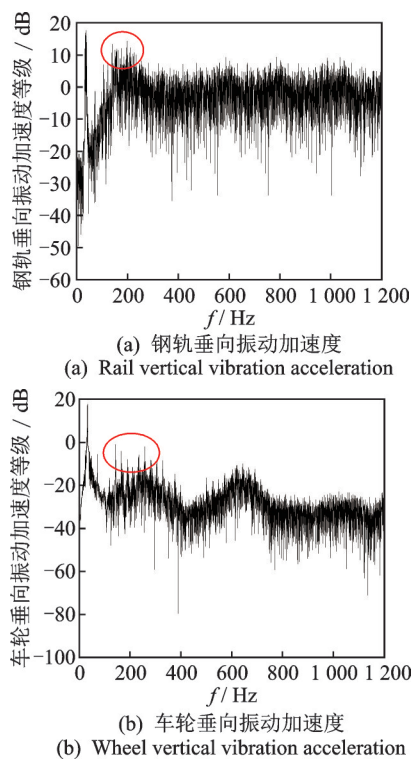


图 10 垂向振动加速度频域曲线

Fig.10 Frequency-domain curves of vertical vibration accelerations

### 3 波磨发展简析

基于波磨成因分析计算结果,本节将对波磨的发展特性展开简单论述。在地铁实际运营过程中,列车停靠站台的位置几乎是固定不变的,即车轮停在钢轨表面上的位置几乎保持不变,因此在列车起动过程中,车轮在钢轨表面产生的滑移区域也是固定的,长此以往,列车的往复运行将会导致滑移区域磨耗不断增大,而滚动区域由于只存在滚动摩擦,所以磨耗较小,最终便会在轨面形成钢轨波磨并处于

继续发展过程中。在忽略钢轨表面初始不平顺的前提下,钢轨表面波磨会随着车轮运行次数的增加呈现线性增长趋势,因此为了控制波磨的发展以延长车辆轨道部件使用寿命并保障行车安全,适当地采取钢轨打磨以及轨面润滑等措施是非常必要的。

对于特殊情况,列车的停靠位置可能会出现偏差,使得车轮停在钢轨表面上的位置发生偏离,从而起动车轮过程中可能会导致滑移区域发生偏移,造成钢轨波磨程度减缓或波长改变,但上述情况发生次数相对较少,因此对钢轨波磨总体发展趋势影响不大。

对于线路制动区段,钢轨波磨发展情况与线路起动车轮区段类似。对于小半径圆曲线区段和过渡曲线区段,由于曲线两端点在整条线路上的位置是固定的,因此当车轮每次运行经过该端点时,相应的轮轨接触状态也将会是固定不变的,所以列车的往复运行最终也将会导致钢轨波磨处于不断发展过程中。

## 4 结束语

针对地铁线路车辆起动车轮区段上的钢轨波磨现象,从轮轨瞬态滚动接触角度阐释了该现象的形成原因。车辆起动车轮会引发轮轨接触界面出现准周期性滑移,并伴有连续的能量波动。滑移的准周期性与实测波磨的周期性相符,且能量波动反映出轮轨系统处于不稳定状态;钢轨和车轮的垂向振动加速度峰值频率与实测波磨的特征频率相近,因此可将实测波磨的成因描述为轮轨系统摩擦自激振动诱发的车轮-钢轨共振。此外,适当地打磨/润滑钢轨轨面以控制波磨现象有利于保障钢轨的服役寿命。

## 参 考 文 献

- [1] 温泽峰. 钢轨波浪形磨损研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [2] 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)
- [3] 蔡小培, 钟阳龙, 郭亮武, 等. 钢轨波磨对剪切型减振器段振动影响试验[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(2):382-388.  
CAI Xiaopei, ZHONG Yanglong, GUO Liangwu, et al. Experimental study on effect of rail corrugation on structure vibration in egg fastener zone [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2):382-388. (in Chinese)
- [4] GRASSIE S L, KALOUSEK J. Rail corrugation: characteristics, causes and treatments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1993, 207(1):57-68.
- [5] 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.
- [6] WANG Y R, WU T X. The growth and mitigation of rail corrugation due to vibrational interference between moving wheels and resilient track[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(8):1257-1284.
- [7] 王誉蓉, 吴天行. 高弹扣件轨道车轮间振动波的反射对钢轨短波长波磨的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6):29-36.  
WANG Yurong, WU Tianxing. Effects of vibration wave reflections between wheels and tracks with high-elastic fasteners on short pitch rail corrugation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(6):29-36. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 刘卫丰, 张厚贵, 孟磊, 等. 北京地铁采用调频式钢轨减振器抑制钢轨振动的试验研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1):105-111.  
LIU Weifeng, ZHANG Hougui, MENG Lei, et al. A test of suppressing rail vibration by tuned rail damper for Beijing metro [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1):105-111. (in Chinese)
- [12] 潘兵, 王安斌, 高晓刚, 等. 轮轨耦合系统横向动态响应特性对钢轨波浪磨耗的影响[J]. 噪声与振动控制,

- 2020, 40(1):132-137.
- PAN Bing, WANG Anbin, GAO Xiaogang, et al. Effects of lateral dynamic response characteristics of wheel-rail coupling systems on rail corrugation[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(1):132-137. (in Chinese)
- [13] 尧辉明,沈钢,高利君.基于试验验证的磨耗型钢轨波磨形成机理[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(10):1427-1432.
- YAO Huiming, SHEN Gang, GAO Lijun. Formation mechanism of worn profile rail corrugation based on experimental verification[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(10):1427-1432. (in Chinese)
- [14] WU B W, CHEN G X, LV J Z, et al. Generation mechanism and remedy method of rail corrugation at a sharp curved metro track with Vanguard fasteners[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2020, 39(2):368-381.
- [15] WU B W, CHEN G X, KANG X, et al. Study on the origin of rail corrugation at a long downhill braking section based on friction-excited oscillation[J]. Tribology Transactions, 2020, 63(3):439-452.
- [16] CHEN G X, ZHANG S, WU B W, et al. Field measurement and model prediction of rail corrugation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(4):381-392.
- [17] CUI X L, CHEN G X, OUYANG H. Study on the effect of track curve radius on friction-induced oscillation of a wheelset-track system[J]. Tribology Transactions, 2019, 62(4):688-700.
- [18] WU B W, CHEN G X, LV J Z, et al. Effect of the axlebox arrangement of the bogie and the primary suspension parameters on the rail corrugation at the sharp curve metro track[J]. Wear, 2019, 426:1828-1836.
- [19] 崔晓璐,闫硕,陈光雄.短轨枕区间钢轨波磨的现场测试和数值研究[J].振动与冲击,2018,37(13):171-176.
- CUI Xiaolu, YAN Shuo, CHEN Guangxiong. Field measurement and numerical simulation for rail corrugation in sector of fixed dual short sleeper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13):171-176. (in Chinese)
- [20] 崔晓璐,陈光雄,杨宏光.轮对结构和扣件刚度对钢轨波磨的影响[J].西南交通大学学报,2017,52(1):112-117.
- CUI Xiaolu, CHEN Guangxiong, YANG Hongguang. Influence of wheelset structure and fastener stiffness on rail corrugation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1):112-117. (in Chinese)
- [21] 崔晓璐,钱韦吉,张青,等.直线线路科隆蛋扣件地段钢轨波磨成因的理论研究[J].振动与冲击,2016,35(13):114-118,152.
- CUI Xiaolu, QIAN Weiji, ZHANG Qing, et al. Forming mechanism of rail corrugation of a straight track section supported by Cologne-egg fasteners[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(13):114-118,152. (in Chinese)
- [22] CHEN G X, ZHOU Z R, OUYANG H, et al. A finite element study on rail corrugation based on saturated creep force-induced self-excited vibration of a wheelset-track system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(22):4643-4655.
- [23] KURZECK B. Combined friction induced oscillations of wheelset and track during the curving of metros and their influence on corrugation[J]. Wear, 2011, 271(1/2):299-310.
- [24] 吴越,韩健,左齐宇,等.钢轨波磨对高速列车车轮多边形磨耗产生与发展的影响[J].机械工程学报,2020,56(17):198-208.
- WU Yue, HAN Jian, ZUO Qiyu, et al. Effect of rail corrugation on initiation and development of polygonal wear on high-speed train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(17):198-208. (in Chinese)
- [25] CHAAR N, BERG M. Simulation of vehicle-track interaction with flexible wheelsets, moving track models and field tests[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(supp1):921-931.
- [26] LEI Z Y, WANG Z Q. Generation mechanism and development characteristics of rail corrugation of Cologne egg fastener track in metro[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(6):1763-1774.
- [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)



**第一作者简介:**王志强,男,1993年2月生,博士生。主要研究方向为铁路轨道结构。曾发表《Rail corrugation characteristics of Cologne egg fastener section in small radius curve》(《Shock and Vibration》2020, No.6)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