

# 地铁列车进出站振源特征测试及数值模拟分析\*

邬玉斌<sup>1</sup>, 宋瑞祥<sup>1</sup>, 江楠<sup>2</sup>, 吴雅南<sup>1</sup>

(1.北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所 北京,100054)

(2.北京市环境保护科学研究院 北京,100037)

**摘要** 为分析地铁列车进出站振源强规律特征及数值模拟方法,以某地铁车站为研究对象,对列车进出站引起的钢轨和车站壁面振动加速度进行了原位测试,结果表明:列车进站时,振源强由进站端向出站端逐渐减小,车站两端壁面振动加速度级相差可达 20 dB;列车出站时,出站端振动响应大于进站端,列车进出站变速运行对钢轨和车站壁面振动加速度频谱特征影响不明显,车站壁面加速度频率主要集中在 30~60 Hz。基于实测数据,给出了车站内列车进出站钢轨振动变化公式,建立了考虑列车进出站运行状态和振源强度变化修正的列车轮轨力荷载模型及施加方法。计算与实测结果对比表明:该计算方法具有较好的计算精度,车站壁面加速度级计算误差小于 6%。

**关键词** 地铁;振动;原位测试;数值模拟;轮轨力

**中图分类号** TH113;TB533

## 引言

随着地铁车站近距离建设项目越来越多,列车进出站对临近敏感建筑的振动影响愈发突出,有必要对地铁车站振源特征及其模拟方法开展研究,满足环境振动影响评价及控制设计工程应用需求。列车进出站引起的振动响应特征相比正线隧道存在显著区别。一方面,车站内列车运行速度慢,但始终处于制动减速和启动加速运行状态,振源特征相比正线区间更为复杂;另一方面,地铁车站多为明挖矩形多层多跨结构,相比区间隧道,车站结构形式复杂、横截面尺寸大,列车轮轨相互作用产生的振动向周边环境的传播途径及分布规律也更为复杂。

国内外学者关于地铁正线区间及车辆段(停车场)区域列车振源特征及分析方法进行了大量研究,并取得许多有意义的研究成果<sup>[1-5]</sup>,但关于地铁车站内列车进出站引起的振源特性及其分析方法研究相对较少。文献[6-7]基于波动原理,采用理论解析方法分析了地铁进出站土层空间振动传播特性和各参数影响规律,研究表明列车进出站引起的土层振动频谱不同于一般行驶状态的频谱特性。雷晓燕等<sup>[8]</sup>采用现场实测方法分析了地铁列车进出站对地铁站厅和站房结构的振动传播规律和频谱特性。刘长卿<sup>[9]</sup>通过有限元法得到建筑结构振动传递函数,并

结合类比地铁隧道振源数据预测地铁站台临近建筑室内的振动。从研究现状来看,目前还没有充分掌握地铁列车进出站引起的振源特征规律,缺少地铁车站列车加减速运行状态下的详细振源测试数据,现有地铁车站列车振动影响预测分析方法也相对简单,因此有必要研究适用于车站振源特点的精确预测分析方法。

笔者以某地铁车站为分析对象,对列车进出站引起的钢轨及车站侧壁振动加速度进行了原位测试,分析了列车进出站运行状态下的振源强度分布规律及频谱特性。在此基础上,研究了考虑地铁列车进出站振源特点的列车轮轨力计算方法,并对其计算精度进行了分析验证。

## 1 车站振源特征实测分析

### 1.1 测试对象及测点布设

笔者测试分析的地铁车站主体结构起始里程为 K18+309.3,有效站台中心里程为 K18+378,车站结构终点里程为 K18+486.7,车站全长为 177.4 m,地铁车站平面及横断面如图 1 所示。

由图 1 可知,本次测试在地铁车站内共布设了 9 个振动加速度传感器,测点 1~4 布设在车站侧壁

\* 北京市科学技术研究院青年学者资助项目(YS202102);北京市自然科学基金资助项目(8192013);北京市科学技术研究院改革发展培育资助项目(PY2020AQ01)

收稿日期:2020-06-23;修回日期:2020-09-25

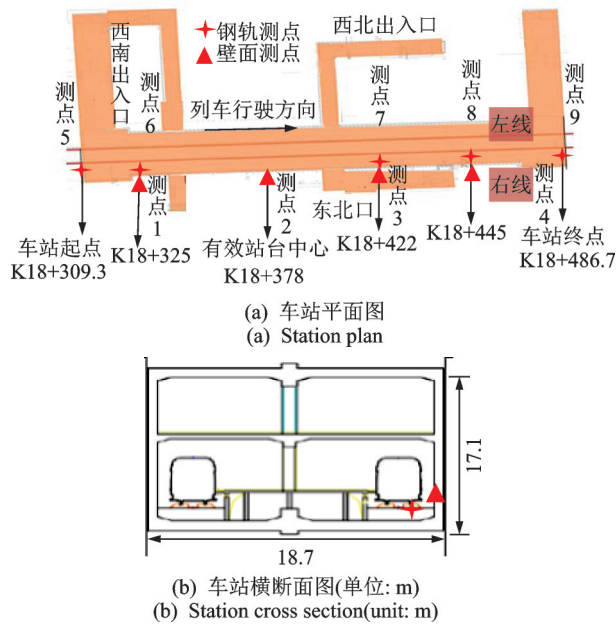


图 1 地铁车站平面与横断面  
Fig.1 Plan and cross section of metro station

上,测点 5~9 布设在钢轨上。测试获得了全天 200 余辆列车进出站各测点振动加速度数据。

测试仪器采用 INV3018C 8 通道 24 位高精度采集仪(最高采样频率为 51.2 kHz)、Bruel&Kjaer8344 型加速度传感器(测量范围为 ±2.6 g, 竖向共振频率 >3.5 kHz, 适用频率范围为 0.2~2.5 Hz) 和 DASP 数据采集及分析软件等。

### 1.2 钢轨振动实测数据分析

图 2 为测点 5 和测点 7 典型钢轨振动加速度时程曲线。由图可知:车站不同断面位置列车进出站钢轨振动响应差异较大,测点 5 位置列车进站钢轨

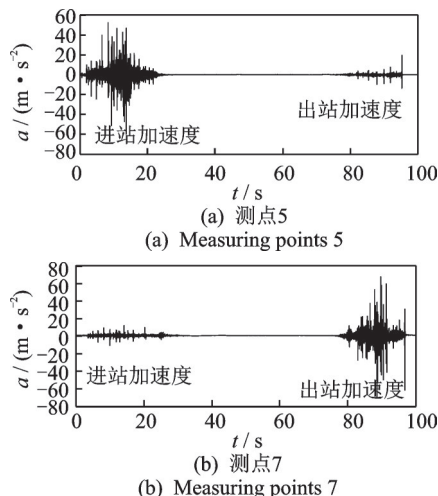


图 2 钢轨振动加速度时程曲线  
Fig.2 Time-history curve of rail vibration acceleration

振动加速度幅值远大于出站;测点 7 位置列车出站钢轨振动加速度幅值大于进站。同一辆列车进站时,车站进站端钢轨振动源强大于出站端;列车出站时,车站出站端钢轨振动源强大于进站端。

图 3 为连续 50 辆列车进出站钢轨振动实测加速度级。由图可知:列车进站时,钢轨振动由进站端向出站端逐渐变小,测点 5 最大加速度级平均值比测点 9 大 36 dB,比测点 8 大 21 dB;列车出站时,钢轨振动由进站端向出站端呈近似增大的趋势,测点 5 最大加速度级平均值比测点 9 小 10 dB,比测点 8 小 18 dB;不同列车产生的钢轨振动强度离散性很大,其引起的同一测点位置钢轨振动加速度级最大相差可达 20 dB。

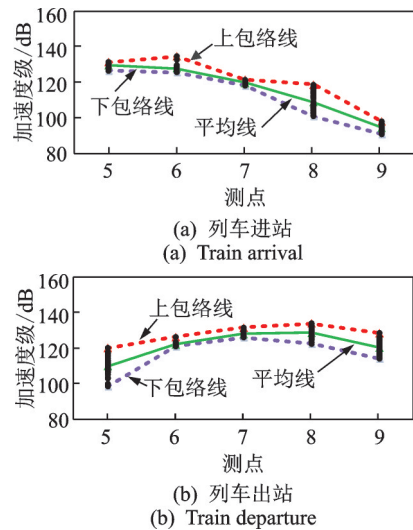


图 3 钢轨振动实测加速度级  
Fig.3 Measured acceleration level of rail vibration

图 4 为测点 5~7 典型列车进站和出站钢轨振动加速度频谱曲线。由图可知:列车进站时,钢轨振动频率主要集中在 600 Hz 以内,最大振动频率峰值在 200 Hz 左右;列车出站时,钢轨振动频率主要集中在 800 Hz 以内,最大振动频率峰值在 330 Hz 左右;列车进站和出站时钢轨振动加速度在 41 Hz 附近均存在一个明显的振动频率峰值。钢轨振动频率特征差异应该是由列车进站制动过程和出站启动过程轮轨作用机理不同而引起,列车进站时往往采用电制动、空气制动或空电配合的方式使列车平稳靠在站点;列车出站时,电机提供的牵引力驱使车辆加速运行,且随着行驶速度的增长,牵引力呈非线性增长,因此列车出站启动过程引起的钢轨振动高频成分更为丰富。实测结果分析发现:钢轨、道床和车站侧壁各测点位置在列车进站和出站过程中均存在 41 Hz 的振动频率峰值,该振动频率应该为轨道系

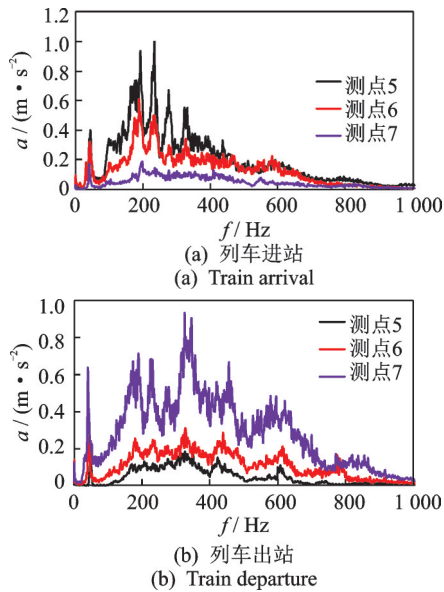


图4 钢轨振动加速度频谱

Fig.4 Frequency spectrum of rail vibration acceleration

统竖向固有频率所致。

为进一步分析钢轨振动频谱特征,对测点5~7 频谱曲线进行了归一化处理,如图5所示。由图可知,列车出站振动频率成分相比进站更为丰富,但3 个位置处的振动频谱特征基本一致,即列车进站或出站时不同断面位置钢轨振动强度幅值不同,但其 振动频谱特征基本相同。

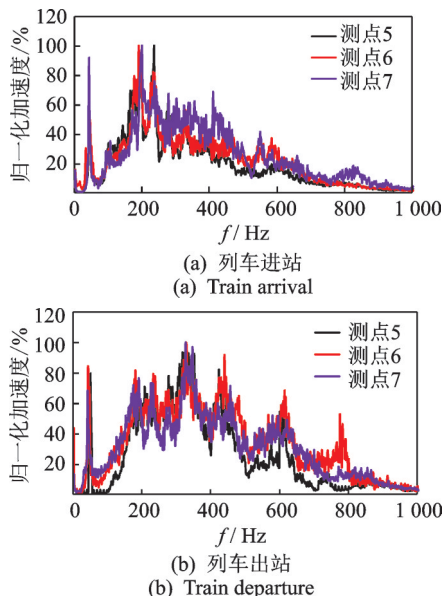


图5 钢轨振动加速度频谱归一化图

Fig.5 Normalized diagram of frequency spectrum of rail vibration acceleration

### 1.3 车站侧壁振动实测数据分析

图6为测点1和测点3典型侧壁振动加速度时

程曲线。由图可知,列车进出站引起的车站壁面振动响应规律与钢轨振动响应规律类似:靠近车站进站端,列车进站引起的振动响应大于出站;靠近车站出站端,列车出站引起的振动响应大于进站。对比图2可知,车站壁面振动加速度远小于钢轨振动加速度,钢轨最大加速度峰值约为60 m/s<sup>2</sup>,而车站侧壁最大加速度峰值仅为0.06 m/s<sup>2</sup>,相差1 000倍。

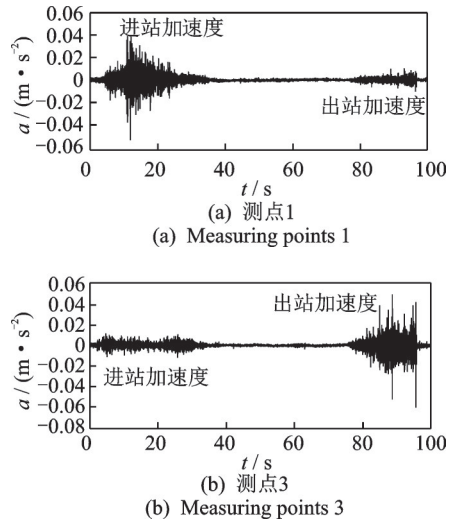


图6 侧壁振动加速度时程曲线

Fig.6 Time-history curve of sidewall vibration acceleration

图7为测点1和测点3列车进站和出站侧壁振动加速度频谱归一化图。由图可知:列车进站和出站时,侧壁主要振动频率范围均为30~60 Hz,最大振动频率峰值约为41 Hz,应该为轨道系统固有频率。相比钢轨振动频谱图可知,列车运行产生的高频振动迅速衰减,车站侧壁以低频振动为主。

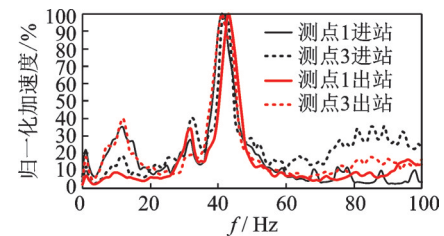


图7 车站侧壁振动加速度频谱归一化图

Fig.7 Normalized diagram of frequency spectrum of station sidewall vibration acceleration

图8为连续50辆列车进出车站4个侧壁测点实测振动加速度级。由图可知:列车进站时,侧壁振动由进站端向出站端逐渐减小,测点1最大加速度级平均值比测点4大20 dB,比测点3大11 dB;列车出站时,侧壁振动由进站端向出站端呈近似增大的趋



势,测点 1 最大加速度级平均值比测点 4 小 6 dB,比测点 3 小 11 dB。不同车次引起的侧壁振动具有一定离散性,列车进站时,测点 1~3 的最大振动差值约为 3~6 dB,测点 4 的最大差值约为 11 dB;列车出站时,测点 1 最大差值为 12 dB,测点 2~4 的最大差值为 5~6 dB。对比图 8(a)和图 8(b)可知:测点 1 列车进站振动平均值比列车出站振动平均值约大 18 dB;测点 2 和测点 3 列车进站与出站振动相差 2~4 dB;测点 4 列车出站振动平均值比进站大 8 dB,即列车进出站对车站两端位置的振动影响更为明显。

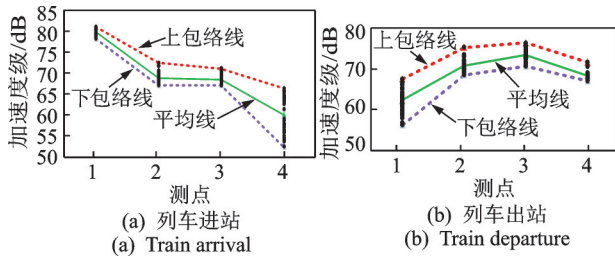


图 8 车站侧壁实测振动加速度级  
Fig.8 Measured vibration acceleration level of station sidewall

## 2 车站列车轮轨力计算方法

由上述实测数据分析可知,列车进出站在不同断面位置处的振源强度差异明显,因此在对地铁车站周边环境进行振动影响分析时,应该考虑列车进站和出站不同运行状态下振源特征规律的影响,否则会由于振源荷载输入不合理而产生计算误差。国内外学者提出了多种列车轮轨力求解方法和模型<sup>[10-12]</sup>,但考虑车站区间列车进出站运行特点和源强特征变化影响的列车荷载模型和输入方法的研究却鲜有报道。

### 2.1 基于钢轨实测数据的轮轨力求解方法

基于钢轨加速度实测数据求解竖向列车轮轨力

$$\begin{cases} m_3(\ddot{\zeta}_2 + \ddot{\zeta}_3) + c_2\dot{\zeta}_3 + k_2\zeta_3 = -m_3 \sum_{n=0}^{N/2-1} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \\ m_2(\ddot{\zeta}_2 + \ddot{\zeta}_3) + k_1\zeta_2 - k_2\zeta_3 - c_2\dot{\zeta}_3 = -m_2 \sum_{n=0}^{N/2-1} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\ddot{Z}_0 = \sum_{n=0}^{N/2-1} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$ 为车轮的振动加速度。

$$P(t) = (m_1 + m_2 + m_3)g + m_1\ddot{Z}_1 + m_2\ddot{Z}_2 + m_3\ddot{Z}_3 =$$

$$(m_1 + m_2 + m_3)g + [m_1 \ m_2 \ m_3] \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{Z}_0 + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\zeta}_1 \\ \ddot{\zeta}_2 \\ \ddot{\zeta}_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

是一种较为常用的列车荷载计算方法<sup>[13]</sup>。其计算过程假设只考虑车辆的竖向振动,可将列车简化为二系弹簧质量系统模型。列车轮轨力荷载简化模型如图 9 所示。

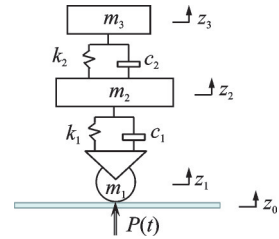


图 9 列车轮轨力荷载简化模型  
Fig.9 Simplified model of train wheel-rail force

基于图 9 列车简化模型,利用平衡法建立车体竖向运动平衡方程为

$$\begin{cases} m_3\ddot{z}_3 + c_2(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_2(z_3 - z_2) = 0 \\ m_2\ddot{z}_2 + c_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_1(z_2 - z_1) - k_2(z_3 - z_2) - c_2(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $m_1, m_2$ 和 $m_3$ 分别为车体模型的质量; $c_1, c_2$ 分别为车体模型的阻尼; $k_1, k_2$ 分别为车体模型的刚度; $z_1, z_2$ 和 $z_3$ 分别为车体模型的位移。

令质量块之间的相对位移分别为 $\zeta_1 = z_1 - z_0, \zeta_2 = z_2 - z_1, \zeta_3 = z_3 - z_2$ ,式(1)可改写为

$$\begin{cases} m_3(\ddot{\zeta}_1 + \ddot{\zeta}_2 + \ddot{\zeta}_3) + m_3\ddot{z}_0 + c_2\dot{\zeta}_3 + k_2\zeta_3 = 0 \\ m_2(\ddot{\zeta}_2 + \ddot{\zeta}_3) + m_2\ddot{z}_0 + c_1\dot{\zeta}_2 + k_1\zeta_2 - k_2\zeta_3 - c_2\dot{\zeta}_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

地铁车站列车运行速度低,车轮与钢轨不会出现弹跳,因此可以假定车轮在运行过程中始终与钢轨保持接触,即车轮与钢轨振动保持一致,则车轮的竖向加速度与钢轨加速度相等, $\zeta_1 = z_1 - z_0 = 0$ ,式(2)可变为

根据 D'Alembert 原理,可得到列车荷载的数学表达式为

根据地铁车辆参数和式(4)即可计算轮轨相互作用力,表1为本项目B型列车基本参数表。基于测点5列车进站钢轨实测加速度数据求解得到的列车轮轨力时程曲线如图10所示。

表1 B型列车基本参数

Tab.1 Basic parameters of type B train

参数	垂向参数	横向参数
$m_1/\text{kg}$	17 500	17 500
$m_2/\text{kg}$	1 709	1 709
$m_3/\text{kg}$	1 610	1 610
$k_1/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	0.48	0.21
$c_1/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	60	25
$k_2/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	0.825	3.900
$c_2/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	120	50

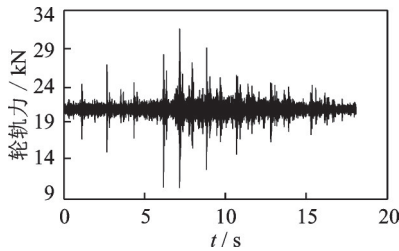


图10 列车轮轨力时程曲线

Fig.10 Time-history curve of train wheel-rail force

### 2.2 车站列车轮轨力修正

对地铁振动影响进行数值仿真分析时,传统方法是将2.1节求解的轮轨力荷载施加在有限元模型中,钢轨不同断面采用完全相同的一组列车轮轨力。笔者实测结果表明,列车进出站在车站不同断面位置产生的钢轨振动具有很大差异性。因此,对于车站振动影响分析,采用一组轮轨力荷载并不合理。

笔者根据车站振源实测数据拟合得出列车进出站钢轨振动随车站位置的变化规律函数,并对式(4)求解的轮轨力进行修正优化,从而获得更符合车站振源特点的列车轮轨力荷载。由于车站不同位置加速度频谱特征基本相同,因此无需对轮轨力频率特性进行修正。

为了分析列车进出站运行状态下钢轨振源强度随位置的变化分布规律,笔者对钢轨振动加速度级进行归一化处理,以车站进站端起始位置作为基准断面,通过计算断面钢轨加速级与基准断面钢轨加速级之比来分析钢轨振源强度在车站区间内的变化分布规律,即

$$Y(x) = \frac{VAL_x}{VAL_0} \quad (5)$$

其中:  $VAL_0$  为基准断面位置(本研究为测点5位置)钢轨振动加速度级;  $VAL_x$  为车站距离基准断面  $x$  处的钢轨振动加速度级。

图11为本次测试获得的典型位置钢轨振动强度变化曲线。其列车进站和出站状态下  $Y(x)$  随距离  $x$  的拟合公式分别如下。

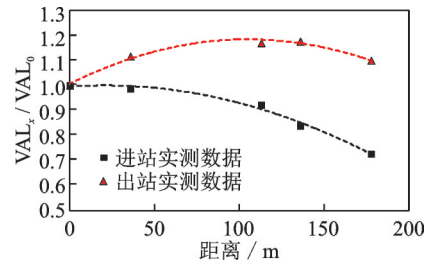


图11 钢轨振动强度变化曲线

Fig.11 Rail vibration intensity change curve

列车进站过程为

$$Y(x) = -0.00001x^2 + 0.00045x + 1 \quad (6)$$

列车出站过程为

$$Y(x) = -0.00002x^2 + 0.00339x + 1 \quad (7)$$

根据式(6)和式(7),可对列车进站和出站运行状态下的列车轮轨力荷载进行修正优化,从而可获得更加符合车站振源特点的列车轮轨力荷载模型。

### 2.3 列车轮轨力施加

根据列车进出站运行状态,采用移动轮轨力加载方式进行激励源强输入,通过判断不同时刻轮轨力作用位置,根据式(6)或式(7)对列车轮轨力进行幅值修正,从而对车站振源实际变化特征进行准确模拟。

为反映列车运行速度、扣件间距及车辆轴距等参数对振动响应的影响,建立轨道精细化有限元模型并进行多点轮轨力移动加载,列车荷载施加示意图如图12所示。首先,建立钢轨-扣件-道床有限元模型,钢轨采用梁单元,扣件采用弹簧-阻尼单元;其

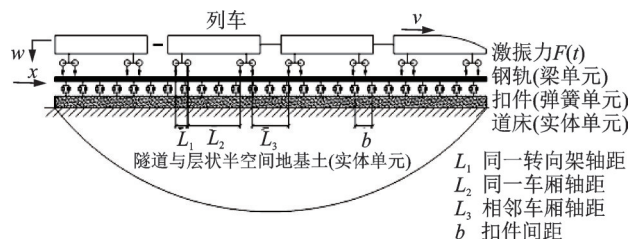


图12 列车荷载施加示意图

Fig.12 Sketch of train load input

次,依据列车关键几何参数确定每个车轮初始位置并施加列车轮轨力;最后,根据列车运行速度计算每个加载时步的列车轮轨力所在位置,并基于式(6)或式(7)对轮轨力幅值进行修正。为了实现加载过程,笔者基于有限元软件二次开发功能,编制了轮轨力荷载幅值修正和加载程序。

### 3 计算方法有效性验证

#### 3.1 计算模型

为了验证计算方法的有效性,根据轨道、地铁站以及场地土地勘资料建立了“钢轨-道床-车站-岩土”3维有限元模型,如图 13 所示,计算模型长、宽、高分别为  $250\text{ m} \times 120\text{ m} \times 40\text{ m}$ 。根据地勘资料将场地土简化为 4 层,土层物理参数如表 2 所示。模型计算单元约为 23.6 万个,计算过程在 750 万亿次/s 计算能力的云计算平台上完成。通过设置黏弹性人工边界条件消除模型边界反射波对计算结果的影响,笔者基于图 10 所示基准列车轮轨力和式(6)修正函数进行列车进站地铁振动响应模拟分析,通过计算与实测结果对比分析,验证了所提计算方法的有效性。

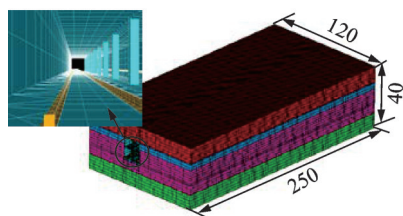


图 13 有限元模型(单位:m)  
Fig.13 Finite element model (unit: m)

表 2 土层物理参数

Tab.2 Physical parameters of soil

土层编号	弹性模量/Pa	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比
1	$1.70 \times 10^8$	1 600	0.3
2	$6.80 \times 10^8$	1 950	0.3
3	$8.50 \times 10^8$	2 040	0.3
4	$1.16 \times 10^9$	2 150	0.3

#### 3.2 计算加速度时域分析

笔者以图 1(a)所示测点 1~4 这 4 个车站侧壁位置作为验证点,列车进站时 4 个位置处的振动加速度计算时程曲线如图 14 所示。由图可知:车站壁面振动加速度峰值由车站进站端测点 1 向出站端测点 4

逐渐减小,测点 1 加速度峰值计算值约为  $0.03\text{ m/s}^2$ ,测点 4 加速度峰值计算值约为  $0.004\text{ m/s}^2$ ,计算结果同实测结果(见图 6)变化规律基本吻合;不同测点振动加速度峰值到达时刻及波形存在一定差异,能够反映列车进站变速运行过程,说明了本研究荷载模型及施加方法的合理性。

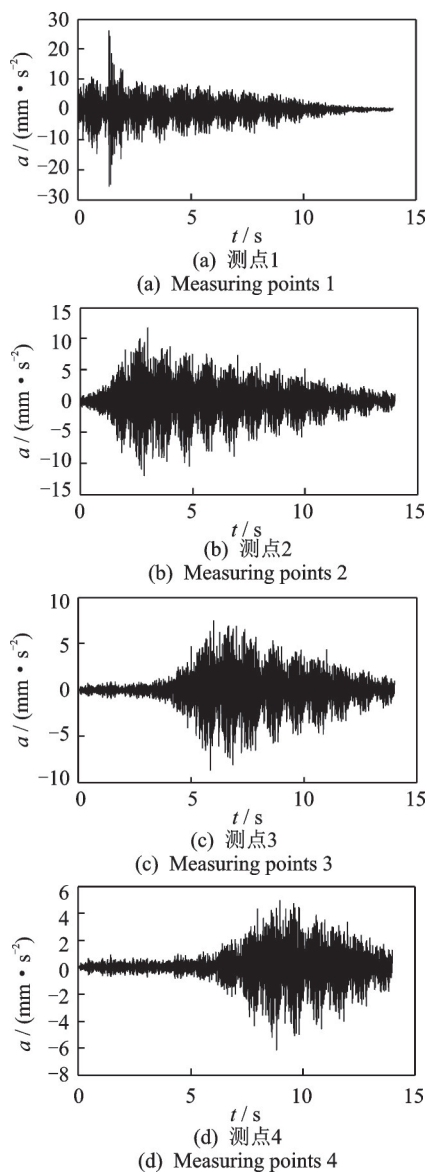


图 14 计算加速度时程曲线  
Fig.14 Calculated acceleration time-history curve

#### 3.3 计算加速度频域分析

图 15 为列车进站时 4 个位置计算加速度频谱图。由图可知,各个测点位置的加速度频谱特征几乎完全相同,主要振动频率集中在  $30 \sim 60\text{ Hz}$  之间,最大振动频率出现在  $41\text{ Hz}$  附近,计算加速度峰值由进站端测点 1 向出站端测点 4 逐渐降低。对比图 7 实

测振动加速度频谱图可知,本研究方法计算得到的振动频谱特征曲线同实测结果具有较好的一致性。由于地铁环境振动频率评价范围一般为1~80 Hz,为提高有限元模型计算效率,笔者按最高振动频率80 Hz考虑进行单元网格划分等模型参数设置,因此本研究模型80 Hz以内的低频振动加速度计算精度相对较高,若要分析更高频率振动响应则需进一步调整优化有限元模型网格尺寸等相关参数设置。

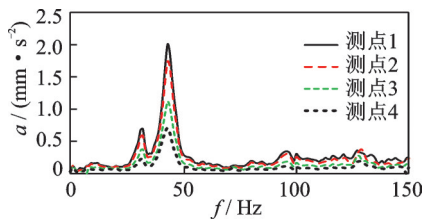


图15 计算加速度频谱图

Fig.15 Frequency spectrum of calculated acceleration

### 3.4 计算加速度级对比分析

为分析本研究方法的计算精度,对比分析了不考虑轮轨力幅值修正的地铁列车进站振动影响(本研究称为一般方法),即有限元模型直接以图10所示的列车轮轨力作为激励源强,计算分析列车进站过程引起的振动响应,同时对2种方法计算结果和实测数据进行对比分析。

表3为车站侧壁加速度级计算与实测值。由表可知:笔者提出的轮轨力修正方法计算得到的振动加速度级同实测结果更为接近,车站区间内不同断面的计算误差较为一致,最大计算误差可控制在6%以内;单一轮轨力计算方法(一般方法)计算得到的各断面位置振动响应基本相同,不符合列车进站引起的振动响应变化规律,计算误差由进站端向出站端逐渐增大,测点4的计算误差达19.2%。

通过上述分析可知,笔者提出的计算方法在加速度时域、频域和加速度级三方面都具有较好的计

算精度,可为地铁车站周边环境振动影响预测评价及控制方案设计提供更准确合理的分析方法。

## 4 结论

1) 受运行状态的影响,列车进出车站引起的振动响应在车站不同断面位置具有很大的差异性。列车进站时,车速由进站端向出站端逐渐减小直至停止,且越靠近进站端断面经受列车车身经过的振动影响持续时间越长,因此钢轨和车站侧壁振动响应由进站端向出站端逐渐减小,钢轨振动加速度级平均值最大可相差30 dB以上,车站壁面加速度级平均值也可相差20 dB;列车出站时,越靠近出站端断面经受列车车身经过的振动影响持续时间越长且车速越快,因此车站出站端振动响应大于进站端,钢轨和车站侧壁加速度级平均值相差分别达10 dB和6 dB;列车进出站对不同位置处的振动加速度频率特征影响不大,车站侧壁振动加速度频率主要集中在30~60 Hz,最大振动频率幅值在41 Hz左右。

2) 本研究基于钢轨振动加速度实测数据,给出了车站钢轨振动强度随位置变化的拟合规律公式,并依此对列车轮轨力荷载进行修正,提出了一种符合车站列车变速运行特点的振源变化规律的轮轨力荷载求解和施加方法;通过计算与实测数据对比分析,验证了本研究方法在加速度时域、频域和加速度级等方面都具有较好的计算精度。

3) 本研究成果可为地铁车站周边环境振动影响预测评价和控制设计提供更为合理的分析方法和思路。受列车车型、车站结构等因素影响,不同车站振动源强变化规律可能存在量值差异,因此具体项目分析时应尽量开展相应现场测试,以期获得更有针对性的输入源强数据。

## 参 考 文 献

- [1] TAKEMIYA H. Simulation of track-ground vibration due to a high-speed train: the case of X-2000 at Ledsgard[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 261(3):503-526.
- [2] SANAYEI M, MAURYA P, MOORE J. Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways[J]. Engineering Structures, 2013, 53:102-111.
- [3] 张凌,雷晓燕,刘全民,等. 地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(1): 89-94.

表3 车站侧壁加速度级计算与实测值

Tab.3 Calculation and measured acceleration level of station sidewall

测点 编号	实测值/ dB	本研究方法		一般方法	
		计算值/ dB	误差/%	计算值/ dB	误差/%
1	80.4	77.1	4.1	77.9	-3.0
2	70.6	74.8	-6.0	77.5	9.8
3	69.1	72.6	-5.1	77.2	11.8
4	64.7	67.6	-4.4	77.2	19.2



- ZHANG Ling, LEI Xiaoyan, LIU Quanmin, et al. Measurement and evaluation of environmental vibration source strength of the subway[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 89-94. (in Chinese)
- [4] 邬玉斌,张斌,刘应华,等. 地铁车辆段库上建筑环境振动影响规律研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(8): 98-103.
- WU Yubin, ZHANG Bin, LIU Yinghua, et al. Law of vibrations influence of subway on metro depot superstructure[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(8): 98-103. (in Chinese)
- [5] 李明航,马蒙,刘维宁,等. 地铁列车振动源强离散机理测试分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(4): 738-744.
- LI Minghang, MA Meng, LIU Weining, et al. Analysis mechanism of vibration source dispersion induced by metro trains through in-situ test[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(4): 738-744. (in Chinese)
- [6] 陈文化,张谦. 地铁列车进出站时土层空间振动特性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3656-3661.
- CHEN Wenhua, ZHANG Qian. Space vibration of subsoil during metro train arriving at or leaving station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3656-3661. (in Chinese)
- [7] 张谦,陈文化. 地铁列车出、进站加、减速的轴向激励引起出平面振动[J]. 振动与冲击, 2016, 35(24): 96-101.
- ZHANG Qian, CHEN Wenhua. Out-of-plane vibration induced by axial excitation while a metro train arriving at or leaving a station[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24): 96-101. (in Chinese)
- [8] 雷晓燕,崔聪聪,张凌. 地铁列车荷载激励下综合交通枢纽车站站房结构的振动响应[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(3): 119-128.
- LEI Xiaoyan, CUI Congcong, ZHANG Ling. Vibration response of station structure of comprehensive transportation hub station under subway train load excitations[J]. China Railway Science, 2019, 40(3): 119-128. (in Chinese)
- [9] 刘长卿. 地铁引起的站台邻近建筑室内振动预测分析[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(3): 100-105.
- LIU Changqing. In-door vibration prediction of the buildings adjacent to subway station platforms induced by subway operation[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(3): 100-105. (in Chinese)
- [10] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 95-131.
- [11] 邬玉斌,宋瑞祥,吴雅南,等. 建筑结构地铁振动响应数值预测分析方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2939-2946.
- WU Yubin, SONG Ruixiang, WU Yanan, et al. Study on numerical prediction method for building vibration response caused by the subway train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2939-2946. (in Chinese)
- [12] 张玉娥,白宝鸿. 地铁列车振动对隧道结构激振荷载的模拟[J]. 振动与冲击, 2000, 19(3): 68-70.
- ZHANG Yu'e, BAI Baohong. The method of identifying train vibration load acting on subway tunnel structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(3): 68-70. (in Chinese)
- [13] 潘昌石,谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析[J]. 土木工程学报, 1990, 23(2): 21-28.
- PAN Changshi, XIE Zhengguang. Measurement and analysis of vibrations caused by passing trains in subway running tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 1990, 23(2): 21-28. (in Chinese)



**第一作者简介:** 邬玉斌,男,1982年1月生,博士、研究员。主要研究方向为轨道交通环境振动噪声预测方法及控制技术。曾发表《地铁车辆段库上建筑环境振动影响规律研究》(《铁道学报》2015年第37卷第8期)等论文。

E-mail: wuyubinwuyubin@163.com

**通信作者简介:** 宋瑞祥,男,1978年11月生,硕士。主要研究方向为环境振动噪声控制。

E-mail: 183306094@qq.com