

DOI:10.16799/j.cnki.csdqfh.2020.10.048

# 地铁列车荷载作用下地铁车辆段桩承式复合地基动力响应数值分析

匡月青

(广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

**摘要:**为探讨软土地基经桩体加固后,地铁列车荷载作用下地铁车辆段轨道下部结构的复合地基动力特性及分布规律,采用有限元显式动力学方法,分析比较了广州地铁某车辆段轨道下部软基区域经桩体加固前后以及桩体模量对土体动力特性的影响。数值分析结果表明:(1)经桩体加固后,土体的振动加速度比无桩体加固时衰减更快,土体的动应力幅值有所减小,且土体动应力随桩体模量的增大而减小;(2)土体动应力随横向距离和深度方向变化过程中,局部区域呈现先增大再减小的趋势,说明桩顶和桩底附近出现了应力集中现象;(3)软黏土的动应力幅值和振动加速度幅值沿深度方向先快速衰减,后衰减趋于稳定,说明计算动力附加沉降时主要考虑软土浅层区域。

**关键词:**地铁列车荷载;地铁车辆段;软土地基;水泥搅拌桩;动力响应;显式动力学

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)10-0177-04

## 0 引言

地铁车辆段是城市轨道交通系统(地铁、城市轻轨)对车辆进行运营管理、停放、维修和保养的场所。在地铁运行进出车辆段的过程中,轨道将受到列车冲击,对轨道下部结构的土体产生扰动。尤其是建设在软土地基上的地铁工程,由于软土地基自身的动力稳定性和变形特性较差,在工程建设过程中需选择合适的方式对软基进行处理,但是不同处理方式下土体很可能表现出不同的动力特性及规律。针对此,国内外一些学者对部分工况作了相关研究。

由于大型通用有限元软件的发展和普及,且数值分析结果与实测数据吻合性较好,不少学者采用数值分析方法,分析列车荷载作用下土体的动力响应规律与特性。Hall<sup>[1]</sup>通过建立列车-轨道-地基三维有限元耦合数值模型,提出进行数值分析时应考虑软黏土地基的应变软化现象。Kettil等<sup>[2]</sup>通过建立三维模型,研究了列车荷载作用下饱和地基的动力响应,发现当列车高速行驶时将导致路基的变形量增大。Clouteau等<sup>[3]</sup>建立隧道-地基土三维有限元模型,使用有限元法和边界元法分析了隧道-土体动力相互作用。和振兴等<sup>[4]</sup>采用数

值分析手段,发现隧道上方地面加速度和振动的影响范围随地基弹性模量和的增大而减小。白冰等<sup>[5]</sup>建立轨道-隧道-地基二维有限元模型,发现列车荷载作用下土体的内力值比静载下的内力值有大幅度增加;当地铁列车由1列增至2列时,结构的动力响应程度有所增加。马龙祥等<sup>[6]</sup>应用薄片有限元-无限元三维耦合有限元模型,得出隧道上方地面3个方向的振动速度和加速度响应规律类似。邹超<sup>[7]</sup>建立轨道结构-周围土层-临近建筑物三维有限元动力数值分析模型,发现地铁运行时结构振动的加速度幅值随土层剪切波速的增大而减小。

现有关于地铁列车作用下地基土体动力特性的成果存在以下不足:(1)主要集中在研究地铁隧道结构动力响应,对地铁车辆段的研究较少;(2)基于地质条件良好的地基开展研究,对不良地质考虑较少;(3)关于单一性软土地基(未经桩体加固)动力特性的成果较多,对桩承式复合地基动力特性研究较少。

鉴于此,本文依托广州地铁某车辆段轨道下部软土地基改进工程,引入水泥搅拌桩的应用,采用有限元软件Abaqus,建立轨道结构-地基耦合三维数值模型,模拟地铁列车荷载作用下地铁车辆段桩承式复合地基土体的动力特性及分布规律,分析比较了同一区域桩体加固前后以及桩体模量对土体动力特性的影响,期望为同类工程的建设 and 治理提供参考依据。

收稿日期: 2020-04-03

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2018A0303130150)

作者简介: 匡月青(1993—),女,硕士,助理工程师,从事道路设计研究工作。

### 1 三维有限元模型概述

#### 1.1 桩承式复合地基(桩-土)模型概述

以广州地铁某车辆段咽喉区为原型<sup>[8]</sup>建立数值模型。根据现场勘察报告,地基土体从上至下可以简化为4层:人工填土、淤泥质软黏土、粉质黏土、全风化粉砂岩,土层厚度由地基土的实际厚度加权平均;另外,由于本文使用有限元-无限元耦合边界,因此底层全风化粉砂岩的厚度设为无穷大。最终建立的地基模型尺寸为:91.6 m(长)×70.0 m(宽)×35.0 m(高),其几何模型见图1。

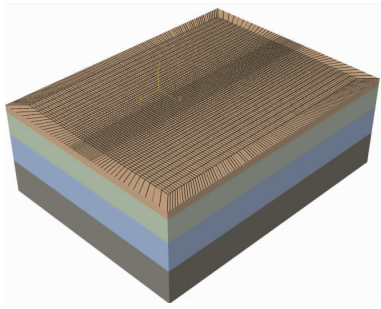


图1 地基层分土体几何模型(有限元-无限元耦合边界)

此车辆段咽喉区的软土地基采用排水固结法处理,但是为了比较分析排水固结处理的软土地基和桩基加固软土地基的动力特性,本文考虑对软土地基采用水泥土搅拌桩进行改进。群桩布置方式为三角形,桩的尺寸和间距采用工程实践的典型值,桩径0.5 m,桩长15 m,相邻桩间距设定为1.5 m,群桩的布置见图2。

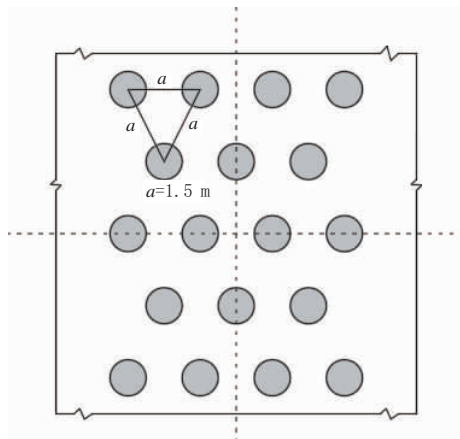


图2 群桩布置方式

土层和水泥搅拌桩均采用线弹性动本构模型,根据地质勘测资料,地基土层材料性质如表1所示。为了比较分析桩身弹性模量大小对地基土体动力响应的影响,对桩体设置了不同的弹性模量,分别为500 MPa和5 000 MPa。

#### 1.2 轨道结构系统(轨道-基床)模型概述

轨道结构由钢轨、轨枕、基床组成。轨道采用60.64 kg/m、U75V 热轧钢轨,截面面积 $7.725 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ,轨距为1 435 mm,全程无缝线路。在该模型中,轨道长91.6 m。轨枕设置为1 680根/km,轨枕宽度220 mm,厚度160 mm,长度2 500 mm,间距0.6 m。基床厚度为1.0 m,边坡为1:1.5,由基床表层和基床底层组成。基床表层为一级道砟,厚为0.5 m,顶宽3.3 m。基床底层采用满足一定技术要求的黏性土填筑,层厚为0.5 m,顶宽8.6 m。

轨道结构系统均为服从线弹性动本构模型,各材料的物理参数见表2。

表2 钢轨-轨枕-基床材料参数

模型结构	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
钢轨	210 000	0.25	7 850
轨枕	30 000	0.20	2 500
基床面层(道砟)	300	0.35	2 200
基床底层(填土)	100	0.26	1 900

#### 1.3 阻尼特性

土体为半无限体介质,在振动时产生瑞利波(R波),数值计算常采用瑞利阻尼<sup>[9]</sup>表示阻尼C的影响:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为质量阻尼系数, $\beta$ 为刚度阻尼系数, $\alpha$ 和 $\beta$ 均为常数; $M$ 为质量矩阵; $K$ 为刚度矩阵。

研究表明,地铁振动引起的动力响应分析中,由于加入质量阻尼而容易导致动力响应结果不准确,因此通常只考虑刚度阻尼的影响<sup>[7]</sup>。

#### 1.4 边界条件

当采用有限元方法来模拟半无限体岩土工程的动力学问题时,为避免波的反射,提高计算精度,

表1 土层动本构模型参数

土层名称	厚度 /m	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动弹性模量 /MPa	泊松比	剪切波速 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	压缩波速 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	阻尼比
人工填土	2.5	1 820	100.0	0.35	198.7	378.7	0.02
淤泥质软黏土	10.5	1 720	27.5	0.38	178.4	360.6	0.02
粉质黏土	10.0	1 890	97.0	0.32	280.2	476.0	0.02
全风化粉砂岩	$\infty$	2 020	293.0	0.21	330.5	564.8	0.02

常采用有限元-无限元耦合边界定义边界条件<sup>[10]</sup>。

### 1.5 单元类型及尺寸

为使模拟结果更精确以及便于区分有限元和无限元,有限元区域的桩体采用梁单元(beam)模拟,其他部件采用 C3D8R 模拟;无限元区域采用 C3D8 单元模拟。

根据已有研究成果<sup>[7,11-12]</sup>,得出有限元单元的最大尺寸应不超过最小剪切波长的 1/4,且随着振动向两侧延伸,单元网格的尺寸逐渐加大。

### 1.6 地铁列车荷载模拟

本文采用梁波等<sup>[13-14]</sup>提出的经验公式确定列车荷载  $F(t)$ :

$$F(t) = k_1 k_2 (P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t) \quad (2)$$

$$P_i = M_0 a_i \omega_i^2 \quad (3)$$

$$\omega_i = \frac{2\pi v}{L_i} \quad (4)$$

式中:叠加系数  $k_1=1.538$ ,分散系数  $k_2=0.7$ ;单动车轮轴重  $P_0=80$  kN,列车弹簧下质量  $M_0=750$  kg; $P_i$  为振动荷载; $\omega_i$  为振动波长的圆频率; $v$  为列车速度; $a_i$  为典型矢高,其参考值  $\alpha_1=3.5 \times 10^{-3}$ , $\alpha_2=0.4 \times 10^{-3}$ , $\alpha_3=0.08 \times 10^{-3}$ ;  $L_i$  为典型振动波长,其参考值  $L_1=10$  m, $L_2=2$  m, $L_3=0.5$  m。

根据已有成果<sup>[8]</sup>,广州地铁车辆段地铁列车运行速度不超过 20 km/h,本文取  $v=14.4$  km/h。时间  $t=1$  s 前所对应的地铁列车荷载的轮轨激振力  $F(t)$  时程曲线如图 3 所示。

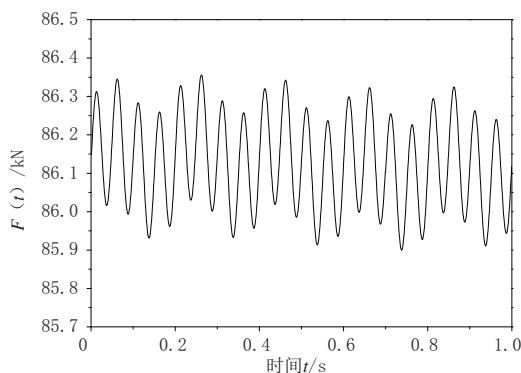


图 3 激振力时程曲线 ( $v=14.4$  km/h)

数值计算过程直接对轨道指定受荷面施加图 3 中的移动荷载,需借助开发软件 VS(Visual Studio) 编译 FORTRAN 语言,并调用 Abaqus/Explicit 子程序 Vdload,实现地铁列车在钢轨上移动。为节约计算时间和成本,本文将将以单节列车班组,即以 1 个应力循环为例开展研究。

## 2 数值模拟结果分析

地铁车辆段结构剖面图见图 4。本文选择了 2

条典型路径对结构动力特性进行分析:其一沿路基内侧的深度方向分布( $Y$ 轴方向,距路基表面的垂直距离);其二沿路基表面的横向分布( $X$ 轴方向,距路基中线的横向距离)。

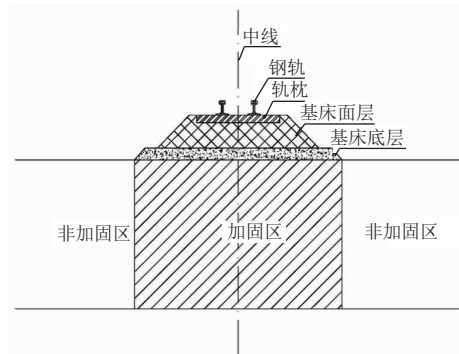


图 4 地铁车辆段结构剖面图

### 2.1 路基振动加速度特性

图 5 和图 6 分别为土体的振动加速度沿深度方向和路基表面横向分布的曲线图。可以看出,水泥土搅拌桩加固区域土体的振动加速度比无桩体加固的土体衰减更快,说明在桩体加固的复合地基区域路基平顺性更好,列车运行产生的振动加速度相对较小,经桩体加固后的软土地基有一定减振效果。桩体加固前后以及桩体模量大小对土体加速度幅值和分布规律影响不大,土体振动加速度沿深度和横向的分布均随着距离的延伸不断衰减,但是横向分布衰减速率比深度方向衰减速率更快。

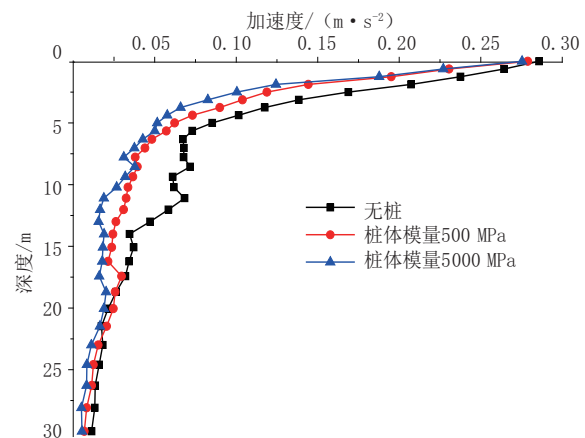


图 5 土体振动加速度沿路基深度分布

### 2.2 路基动应力变化规律

#### 2.2.1 基床动应力分布

基床底层表面的动应力沿横向分布规律如图 7 所示。由图 7 可知,桩体加固前后及其模量的大小对基床底层动应力沿横向的分布规律影响不大。从形态来看,曲线呈半马鞍形分布,动应力先增大再减小,最大值发生于轨道正下方的基床底层表面上,说明在轨道正下方出现了应力集中现

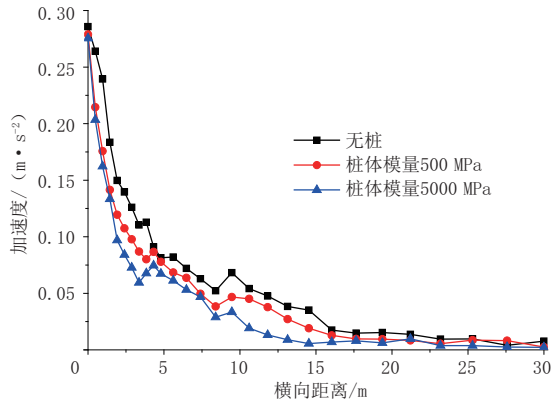


图6 土体振动加速度沿路基表面横向分布

象,距离钢轨中心线越近,越能更好反映列车经过时的冲击特性。

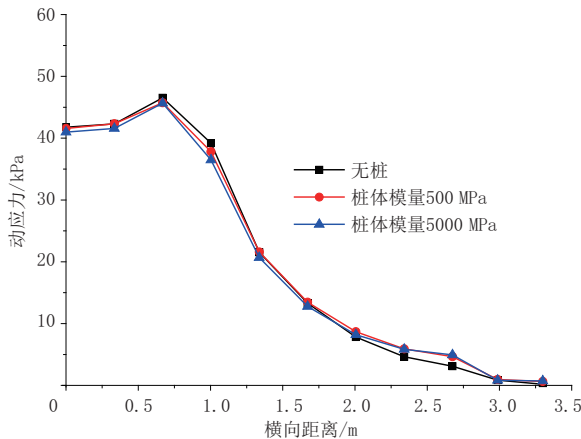


图7 基床底层动应力沿横向距离分布

### 2.2.2 地基土体动应力分布

图8和图9为不同工况下土体动应力沿深度方向和横向距离的变化曲线。由图8图9可知,桩体加固前后地基的动应力幅值均随深度和横向距离的增加总体呈现衰减的趋势,动应力幅值衰减速率随深度的增加先增大再减小,最后趋于稳定。桩体加固的土体动应力在沿深度和横向距离变化的过程中,局部区域出现先增大再减小的趋势,说明桩顶和桩底附近出现了应力集中,从加固区域过渡到非加固区域,因模量差异引起动应力分布规律的波动。

经桩体加固后,地基土体动应力幅值减小的主要原因是经水泥搅拌桩加固后的软土地基土体强度和刚度均大大提高,桩体分担土体部分承担的部分荷载,因此提高了复合地基的稳定性能和承载能力。土体动应力幅值随桩体弹性模量的增大而减小,无桩体加固、桩体模量为500 MPa、桩体模量为5000 MPa的情况下,土体动应力幅值分别约为14.066 69 kPa、11.797 38 kPa、11.081 19 kPa。中国铁道科学院的实测数据表明<sup>[15]</sup>:95%的路基动应力幅值不超过46.95 kPa,说明本文数值计算符

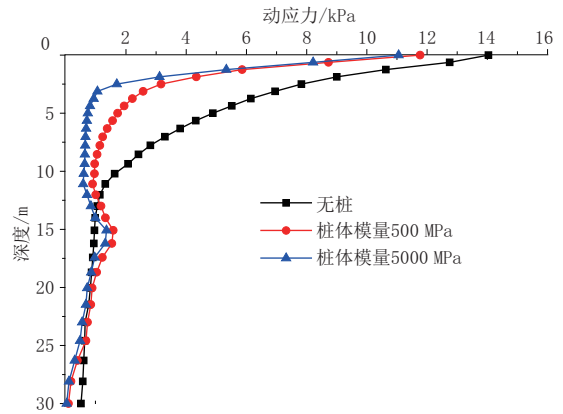


图8 土体动应力沿路基深度分布

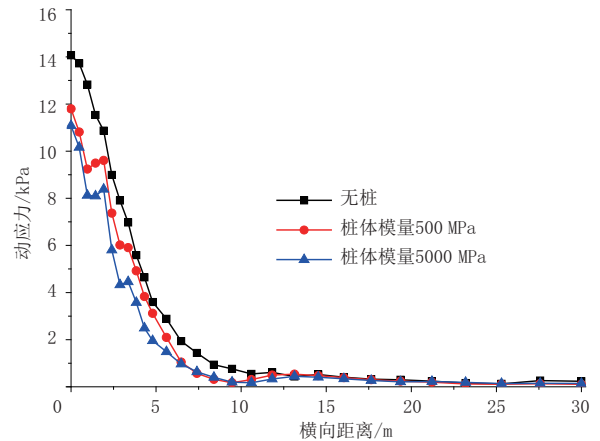


图9 土体动应力沿路基表面横向分布

合这一要求。

### 3 结语

(1)土体的振动加速度比无桩体加固时衰减更快,说明桩体加固后的软土地基有一定的减振效果。

(2)桩体加固后,土体的动应力幅值有所减小,且桩体模量大小对路基土体的动应力影响较大,土体动应力幅值随桩体模量的增大而减小。

(3)土体动应力在随横向距离和深度方向变化的过程中,局部区域呈现先增大再减小的趋势,说明桩顶和桩底附近出现了应力集中。

(4)软黏土层的动应力幅值随深度的增加,其衰减率先增大再减小,最后趋于稳定,说明动力附加沉降主要发生在软土浅层区域。

#### 参考文献:

[1] HALL L. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(5): 403-413.  
 [2] KETTIL P, LENHOF B, RUNESSON K, et al. Coupled simulation of wave propagation and water flow in soil induced by high-speed trains [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, 32(11):1311-1319.

时联动。目前工程例会和管线例会都要通过平台生成的会议报告进行讲述和讨论,反映的数据才够真实。经过实践证明,利用 BIM 数据的工程会议比传统会议模式节省了大约 30%的时间,而且会议内容可追溯。另外,利用会议管理可自动生成督办任务,与人员进行关联,发布任务通知和预警等,在任务完成时效上也提高了 20%的时间。

#### 5.2.4 预制构件管理

预制拼装技术的发展极大提高了工程实施进度。工程建设中对预制构件的管控直接影响到工程的质量和进度。预制构件管控模块本着质量优先、及时协调的原则,对预制构件的下单、生产、养护、运输、吊装各个环节进行管控,可在实际生产中及时发现问题、解决问题。平台还通过二维码技术实现对预制构件的履历追查,方便预制构件的信息查询与定位。通过对预制构件的全环节的管理,为工程顺利进行提高了信息化的保障。

#### 5.2.5 智慧工地

利用物联网技术接入监测设备、监控设备、门禁设备等数据采集设备进行大数据分析。其包括

地质沉降、周边建筑监测、安全帽识别、环境扬尘监测、门禁进出情况、施工人员类型排比等,为施工现场的安全生产管控、提升工程施工质量、提高文明施工提供了智能化手段,全方位提升了工地管理的质量。

## 6 结 语

随着 BIM 技术在市政改建工程中的不断创新与发展,促进现有生产力方式和管理模式将会逐步改变。BIM 平台更要立足科技前沿,结合新技术和市政改建工程特点,以智能化、精细化、信息化为方向,为市政工程管理方式提供服务,做到切实有效地指导施工,智慧管控,为促进市政改建工程的“绿色施工、精细管理、智慧建造”提供强有力的技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 丁烈云. BIM 应用·施工[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
- [2] 凯泽. BIM 的关键力量[M]. 潘婧, 刘思海, 苏星, 译. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [3] 李兴. 基于 BIM 平台的桥梁工程设计与应用[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [3] CLOUTEAU D, ARNST M, AL-HUSSAINI T M, et al. Freefield vibrations due to dynamic loading on a tunnel embedded in a stratified medium[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 283 (1/2):173-199.
- [4] 和振兴, 翟婉明, 罗震. 地铁列车引起的地面振动[J]. *西南交通大学学报*, 2008, 43(2):218-221.
- [5] 白冰, 李春峰. 地铁列车振动作用下近距离平行隧道的弹塑性动力响应[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1):123-128.
- [6] 马龙祥, 刘维宁, 蒋雅君, 等. 基于薄片有限元-无限元耦合模型的地铁列车振动环境影响分析 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(15): 111-117.
- [7] 邹超. 地铁车辆段及上盖建筑物振动传播规律及减振技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [8] CHEN Y K, WANG Y M, ZOU C. et al. Long-term settlement analysis and settlement control technology of rheological soft soil caused by metro train vibration[R]. Guangzhou: Metro Group Co. LTD, 2017.
- [9] CAUGHEY T. Classical normal modes in damped linear dynamic systems[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1960, 27(2):269-271.
- [10] 戚玉亮, 大塚久哲. ABAQUS 动力无限元人工边界研究[J]. *岩土力学*, 2014(10):3007-3012.
- [11] 杨永斌, 郭世荣. 高速列车所引致之土壤振动分析[R]. 台北: 台湾财团法人中兴工程顾问社, 1996.
- [12] 徐孝诚, 尹立中. 关于结构高频响应分析中有限元网格划分的细化标准[J]. *振动与冲击*, 2002, 21(1):52-53.
- [13] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. *铁道学报*, 1999, 21(2): 84-88.
- [14] 梁波, 罗红, 孙常新. 高速铁路振动荷载的模拟研究[J]. *铁道学报*, 2006, 28(4): 89-94.
- [15] 中国铁道科学研究院. 既有线提速 200 km/h 非改建地段试验报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2006.

(上接第 180 页)