

道床竖向不平顺对地铁环境振动源强特性影响分析

万 壮 胡 传

(成都地铁运营有限公司, 610081, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为探究道床竖向不平顺对于振动源强的影响, 利用多体系统动力学分析方法模拟车轨耦合动力学, 并采用有限元方法建立柔性体模型。通过模拟柔性钢轨上不同不平顺幅值和不平顺波长的余弦函数获得道床竖向不平顺, 提取并分析道床板和隧道壁等位置的振动源强数据。研究表明: 隧道壁垂向加速度的频域峰值主要集中于 100 Hz 以内的低频区域; 道床上浮对于振动源强的影响较为明显, 其中道床伸缩缝位于上浮中心处的工况对道床板垂向加速度的影响最大。

关键词 地铁; 钢轨; 道床竖向不平顺; 振动源强

中图分类号 U211.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.027

Track Bed Vertical Irregularity Influence on Characteristics of Metro Environmental Vibration Source Intensity

WAN Zhuang, HU Chuan

Abstract To explore the influence of track bed vertical irregularity on vibration source intensity, multi-body system dynamics analysis method is applied to simulate vehicle-track coupling dynamics, and finite element method is adopted to establish flexible body model. The track bed vertical irregularity is obtained by simulating the cosine function of the different irregularity amplitudes and irregularity wavelengths on flexible rail. The vibration source intensity data of positions such as track bed slab and tunnel wall are extracted and analyzed. Research shows that the peak value of tunnel wall vertical acceleration mainly concentrates in the region of low-frequency within 100 Hz, and track bed rising has relatively evident influence on vibration source intensity, in which the working condition of track bed expansion joint at the slab rising center is the most influential.

Key words metro; rail; track bed vertical irregularity; vibration source intensity

Author's address Chengdu Metro Operation Co., Ltd., 610081, Chengdu, China

市地下水循环系统破坏、地面不均匀沉降、城市轨道交通下穿建筑时产生的二次结构噪声等问题日益严重, 甚至将会影响城市居民的正常生活。其中, 由振动引起的噪声污染已经成为世界七大公害之一。振动噪声产生的原因主要包括隧道沉降、沿隧道纵向的道床竖向不平顺以及钢轨不平顺。道床竖向不平顺主要包括道床的不均匀沉降及上拱, 主要是由地下水、施工技术、列车振动和隧道不均匀沉降等因素产生的道床脱空及离隙引起的。

文献[1]通过现场试验分析获得了曲线段普通道床与刚弹簧浮置板道床的轨道结构振动响应时频特性。文献[2]基于车轨耦合模型, 通过 Ansys 软件建立了隧道-土层有限元模型, 获得了道床加速度模拟值。文献[3]研究了当列车运行速度为 300 km/h 时, 列车荷载作用下的隧道衬砌结构受力的现场实测与计算模型, 获得了列车荷载对隧道衬砌振动响应的影响规律。本文基于多体系统动力学分析方法进行车轨耦合动力学仿真模拟, 计算分析列车通过隧道时由道床竖向不平顺引起的振动源强, 本研究可为道床病害治理提供借鉴。

1 建立模型

考虑钢轨的柔性变形, 所建模型通过多体动力学软件 UM(Universal Mechanism) 的柔性轨道模块实现钢轨与道床的耦合。轨道随机不平顺采用美国 6 级谱, 模拟了地铁线路中的水平、高低、轨向和轨距不平顺状态。相比于刚性轮对, 柔性轮对的脱轨系数、轮轨横向力及垂向力和轮重减载率均较大, 故采用具有 7 个自由度的柔性轮对更符合实际情况^[4]。本文采用具有柔性轮对的地铁 A 型车作为车辆模型。

道床板和隧道均采用 Ansys 软件进行建模。忽略隧道壁的受力情况, 隧道壁建模采用 solid45 单元, 以减少软件模拟所需时间。为了模拟道床板伸缩缝处的不均匀沉降, 利用 shell181 单元建立 6 块

近年来, 伴随着城市轨道交通的快速发展, 城

尺寸为 4.8 m×2.4 m×0.3 m 的道床板。为了减小误差,网格划分尽量均匀且取为偶数倍,网格纵向长度为 0.3 m。

采用当前城市轨道交通中普遍使用的盾构单线隧道进行模拟,隧道外径为 3.3 m,内径为 3.0 m,管片厚度为 0.3 m。为实现与道床板的耦合,隧道网格纵向采用边长为 0.6 m 的网格,厚度方向用三层网格以确保精度。隧道边界采用固定约束,并沿隧道方向设置固定约束。为简化模型,隧道与外界土体的作用可通过 UM 软件中没有长度的弹簧模型 bushing 力元进行模拟,力元刚度可通过土体弹性模量换算获得。采用线性弹簧模拟隧道与道床板。有限元整体模型如图 1 所示。

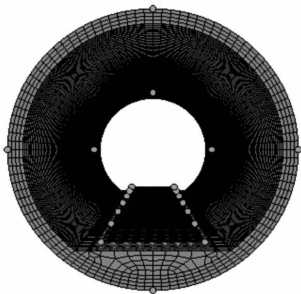


图 1 有限元整体模型示意图

Fig. 1 Diagram of finite element overall model

2 数值模拟

2.1 工况选取

参考文献[5]中关于北京地铁 1 号线五棵松站隧道与道床不均匀沉降与上浮的实测数据,选取隧道下沉为 10 mm 时的道床沉降数据。选取列车运行速度分别为 60 km/h、80 km/h、100 km/h、120 km/h,对 4 种工况进行模拟分析,其主要参数如表 1 所示。

表 1 4 种工况的主要参数

Tab. 1 Main parameters of 4 working conditions

工况编号	工况	运行速度/(km/h)	不平顺波长/m	不平顺幅值/mm
1	道床中部位于下沉中心	60、80、100、120	6.0	9.66
2	道床伸缩缝位于下沉中心	60、80、100、120	3.9	9.36
3	道床中部位于上浮中心	60、80、100、120	2.7	9.91
4	道床伸缩缝位于上浮中心	60、80、100、120	3.0	10.36

注:下沉工况中不平顺波长采用道床脱空数据,不平顺幅值采用钢轨表面的沉降数据;上浮工况中不平顺波长和平顺幅值均采用钢轨表面的上浮数据。

道床板的纵向不均匀沉降可由施加在钢轨上的余弦形函数不平顺进行模拟,具体表达式为:

$$Z_0(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}\sigma_1(1 - \cos 2\pi x/T) \\ -\frac{1}{2}\sigma_1(1 - \cos 2\pi x/T) \end{cases} \quad (1)$$

式中:

Z_0 ——轨道不平顺值,mm;

x ——不平顺里程,m;

σ_1 ——余弦函数幅值,mm;

T ——余弦函数周期,s。

2.2 仿真分析

忽略隧道边界影响,监测点主要设置于隧道中部区域。在距离隧道口 12.60 m、15.15 m、25.00 m 处分别布置两个相同的测点。其中,测点 1 位于道床边缘,测点 2 位于距离道床 1.25±0.25 m 隧道壁处。在不平顺幅值处,地铁 A 型车经过测点的加速度与各工况引起的加速度变化处于同一时刻,产生了叠加的效果,使得 12.60 m、15.15 m 处测点的加速度值较大,不能较为明显地判断工况对于隧道加速度的影响,故仅分析 25.00 m 处测点的加速度时域与频域图谱。

2.2.1 轮轨力

轮轨力随列车运行时间的变化关系如图 2 所示。由图 2 可知:下沉工况中的轮轨力变化较小,经过不平顺时最大轮轨力与最小轮轨力的差值为 22 kN(见图 2 a)虚线框);上浮工况中由于存在惯性作用,导致车体容易产生“跳轨”现象(下沉工况中不易出现该种现象),所以其轮轨力变化较大,最大轮轨力与最小轮轨力的差值可达 100 kN(见图 2 b)虚线框)。

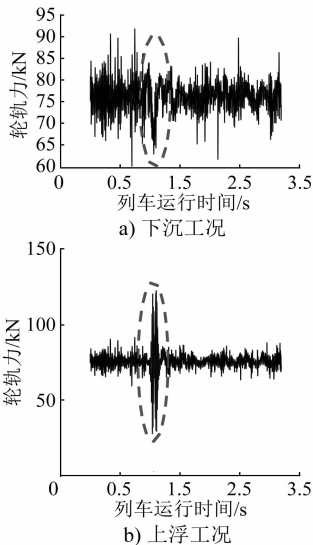
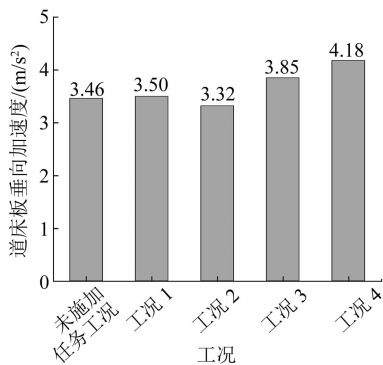


图 2 轮轨力随列车运行时间的变化关系

Fig. 2 Variation of wheel-rail force changing with train running time

2.2.2 测点 1 的垂向加速度

以列车运行速度为 80 km/h 时的工况为例进行分析,各工况道床板垂向加速度最大值如图 3 所示。由图 3 可知,下沉工况(工况 1 和工况 2)中的加速度幅值与未施加任何工况的情况几乎相同,而上浮工况(工况 3 和工况 4)则对道床板的垂向加速度幅值有较大的影响,最大差值达到了 0.72 m/s^2 。提取列车速度为 80 km/h 时工况 1 的道床板垂向加速度时域和频域结果,如图 4 所示。由图 4 a) 可知,道床板最大垂向加速度为 3.46 m/s^2 。由图 4 b) 可知,道床板的垂向加速度优势频率主要集中在 200 Hz 以内的



注:未施加任何工况指仅存在随机不平顺,无道床竖向不平顺引起的轨道线形变化。

图 3 列车运行速度为 80 km/h 时的各工况道床板垂向加速度最大值

Fig. 3 Maximum track bed slab vertical acceleration in each working condition with train running speed of 80 km/h

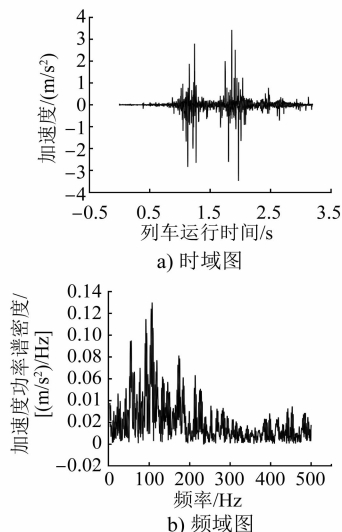


图 4 列车运行速度为 80 km/h 时工况 1 的道床板垂向加速度时域和频域图

Fig. 4 Time-domain and frequency-domain charts of track bed slab vertical acceleration in working condition 1 with train running speed of 80 km/h

低频区域,最大峰值频率处于 100 Hz 附近。

2.2.3 测点 2 的垂向加速度

以列车运行速度为 80 km/h 时的工况为例进行分析,各工况隧道壁垂向加速度最大值如图 5 所示。由图 5 可知,工况 3 的隧道壁垂向加速度最大,相比于未施加任何工况的情况,两者差值可达 0.32 m/s^2 。提取列车速度为 80 km/h 时工况 3 的隧道壁垂向加速度时域和频域结果,如图 6 所示。由图 6 可知,隧道壁垂向加速度优势频率为 60~100 Hz;工况 3 会引起隧道在 62 Hz 附近的振动。

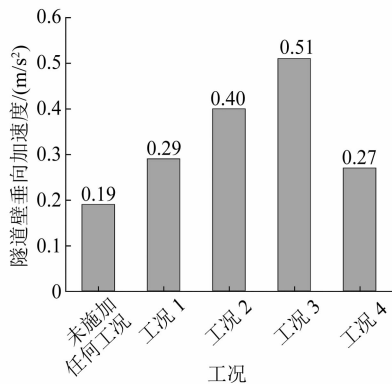


图 5 列车运行速度为 80 km/h 时的各工况隧道壁垂向加速度最大值

Fig. 5 Maximum tunnel wall vertical acceleration in each working condition with train running speed of 80 km/h

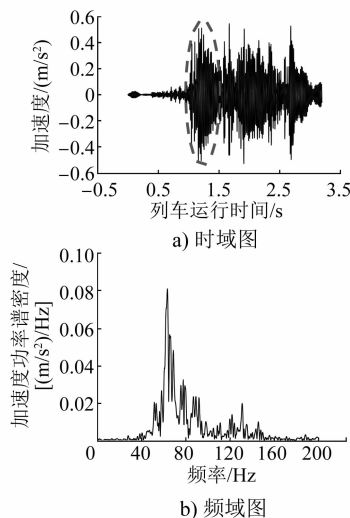


图 6 列车运行速度为 80 km/h 时工况 3 的隧道壁垂向加速度时域和频域图

Fig. 6 Time-domain and frequency-domain charts of tunnel wall vertical acceleration in working condition 3 with train running speed of 80 km/h

不同工况下,不同的列车运行速度对隧道壁的垂向加速度影响有所不同。以 25.00 m 测点处为例,不同列车运行速度下,4 种工况的隧道壁垂向加速度如图 7 所示。在相同速度下,上浮工况(工况 3 和工况 4)的隧道壁垂向加速度普遍大于下沉工况(工况 1 和工况 2)的隧道壁垂向加速度,且工况 4 的垂向加速度大于工况 3 的垂向加速度。

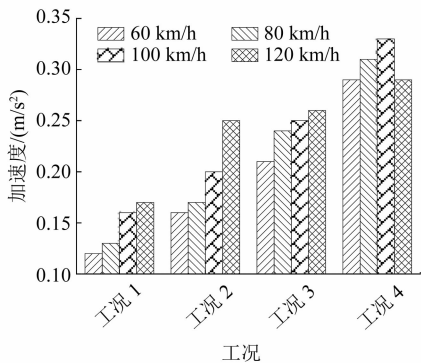


图 7 不同列车运行速度下 4 种工况的隧道壁垂向加速度
Fig. 7 Tunnel wall vertical acceleration in 4 working conditions with different train running speeds

3 结语

本文通过车轨耦合仿真模拟,分析了 2 个测点处的垂向加速度变化情况,探究了道床竖向不平顺对于振动源强的影响,获得以下几个结论:

1) 轮轨力在上浮工况中的最大变化可以达到 100 kN,是下沉工况中轮轨力最大变化的 4.5 倍,较大的轮轨力变化是引起环境加速度增大的主要原因。

2) 道床板各位置的加速度无较大变化,上浮工况中的道床板垂向加速度普遍大于下沉工况中的道床板垂向加速度,其振动频率主要集中在 200 Hz 以内。

3) 隧道壁垂向加速度的平均值为 0.15~0.40 m/s²,隧道壁垂向加速度的最大响应发生在工况 4,最大峰值振动频率为 62 Hz,优势频率主要集中在 60~100 Hz。

参考文献

[1] 王刘翀,刘冬娅,易强,等. 曲线地段钢弹簧浮置板轨道振动特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(3):610.
WANG Liuchong, LIU Dongya, YI Qiang, et al. Field test on vibration characteristic of steel-spring floating slab track in curve section[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(3):610.

[2] 王晓慧,石焕文. 基于车轨耦合模型下地铁对隧土的振动响应[J]. 常州工学院学报,2019,32(6):15.
WANG Xiaohui, SHI Huanwen. Vibration response of metro to tunnel based on wheel-rail coupled model[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2019, 32(6):15.

[3] 田甜,黎国清,齐法琳,等. 速度 300 km/h 列车振动荷载下隧道衬砌加速度响应规律分析[J]. 铁道学报, 2020, 42(6):112.
TIAN Tian, LI Guoqing, QI Falin, et al. Analysis on acceleration response of tunnel lining under vibration load of train with speed of 300 km/h[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(6):112.

[4] 郭训,郑树彬,柴晓冬,等. 基于柔性轮对的轨道车辆动力学仿真分析[J]. 测控技术,2018,37(8):150.
GUO Xun, ZHENG Shubin, CHAI Xiaodong, et al. Simulation analysis of railway vehicle dynamic performance based on flexible wheelset[J]. Measurement and Control Technology, 2018, 37(8):150.

[5] 程霖,杨成永,石勇军,等. 钢轨-弹性支承块式道床-隧道底板相互作用数值模拟[J]. 铁道标准设计,2017,61(12):34.
CHENG Lin, YANG Chengyong, SHI Yongjun, et al. Numerical simulation of interaction among rail, LVT track bed and tunnel floor[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(12):34.

(收稿日期:2020-09-21)



11 月份全国城市轨道交通新增运营里程 111.1 km

据交通运输部消息,2022 年 11 月,31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团共有 52 个城市开通运营城市轨道交通线路 285 条,运营里程 9357 km,实际开行列车 270 万列次,完成客运量 14.2 亿人次,进站量 8.5 亿人次。今年 11 月份,客运量环比减少 2.9 亿人次、降低 16.7%,同比减少 5.5 亿人次、降低 27.9%。本月新增南通市首次开通运营城市轨道交通。新增运营里程 111.1 km,其中,新增运营线路 4 条(南通地铁 1 号线、天津地铁 10 号线、深圳地铁 12 号线和 6 号线支线),新增运营区段 1 个(佛山市南海有轨电车 1 号线后通段)。

(来源:交通运输部网站)