

不同轨道结构对地铁车辆轮周多边形不圆顺发展的影响

王伟铭 沈 钢 毛 鑫

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 地铁车辆车轮失圆导致走行部损伤这一现象已引起业界广泛重视。针对这一现象的发展规律进行研究,建立了“轮对-轨道-浮置板”的垂向振动模型。根据该耦合振动模型分析了在恒定制动力/牵引力作用下,当轮周存在多边形不圆顺时,圆周径跳与轮对正压力、蠕滑率、磨耗功率之间的关系。分析了浮置板对车轮失圆的影响。通过对比车辆轮周在有浮置板条件下的结果,发现浮置板虽然降低了路基的振动,但由于其质量刚度参数太大等原因,对车轮失圆情况没有明显改善。

关键词 地铁车辆; 轮轨磨耗; 轮周不圆顺; 轨道结构

中图分类号 U463.34; U231+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.01.016

Influence of Different Track Structures on the Development of Metro Wheel Polygon

WANG Weiming, SHEN Gang, MAO Xin

Abstract The damage of running gear caused by the wheel out of roundness of metro vehicle has attracted extensive attention. The development law of this phenomenon is studied, and the vertical vibration model of wheelset-track-floating slab is established. According to the coupled vibration model, under the action of constant braking or traction, the relationship between the circumferential radial jump and the positive pressure, creep rate of wheelset and abrasion power when there is wheel polygon out of roundness is analyzed. The influence of floating slab on wheel out of roundness is analyzed. By comparing vehicle wheel circumference in conditions with or without floating slab, it is found that floating slab can reduce the vibration of subgrade, but it has no obvious improvement for wheel out of roundness because of its large mass stiffness parameter.

Key words metro vehicle; wear of wheel and rail, wheel out-of-roundness; track structure

Author's address Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

了人们所关注的主要目标之一。但由于多种原因的影响,地铁车辆振动仍在不断加剧。除了钢轨波磨外,车轮的多边形磨耗也对车辆和轨道造成了很大的破坏^[1-2]。文献[3]分析了车轮的非圆化磨耗进程,发现车辆的运行速度和轨道参数都影响着车轮的磨耗。文献[4]计算了高速车轮中动静不平衡的影响,发现动不平衡会进一步加速车轮失圆的发展。文献[5]研究发现车轮存在初始不圆顺后,车轮的垂向运动会随着车辆运行而不断恶化,使车轮轮周多边形进一步发展。文献[6]通过构建轨道系统的有限元模型,研究了簧下质量在轨道上的力与车轮低阶不圆顺之间的磨耗关系。文献[7]建立了车轮轮周磨耗预测耦合模型,预测了车轮轮周多边形不圆顺的发展过程,得到了车轮轮周不圆顺发展的规律。文献[8]在 ABAQUS 软件中建立了有限元弹性振动模型,对车辆通过小半径曲线和直线线路上的车轮轮周多边形不圆顺成因进行了分析。文献[9]借助有限元瞬态动态分析法,得到了车轮的摩擦自激振动加速了车轮多边形磨耗的发展。文献[10]认为轮对一阶弯曲共振是决定车轮多边形磨损波长的主要原因。文献[11]提出了基于冷作硬化的车轮多边形形成机理,并分析了磨耗发展规律。文献[12]分析了高速车辆中的车轮不圆顺与关键部件振动之间的关系。文献[13-14]通过建立刚柔耦合动力学模型分析了不同参数对轮轨力的影响。而这些文献都没有考虑轨上浮置板对车轮多边形的影响。因此,本文对车轮多边形下的轮轨间相互作用进行了探讨性研究,旨在分析浮置板对车轮多边形磨耗的影响。

1 地铁车辆车轮失圆实测情况

地铁车辆车轮失圆情形比较普遍,图 1 为实际测试的某地铁车辆车轮失圆廓形。

城市轨道交通发展至今,乘坐舒适性已经成为

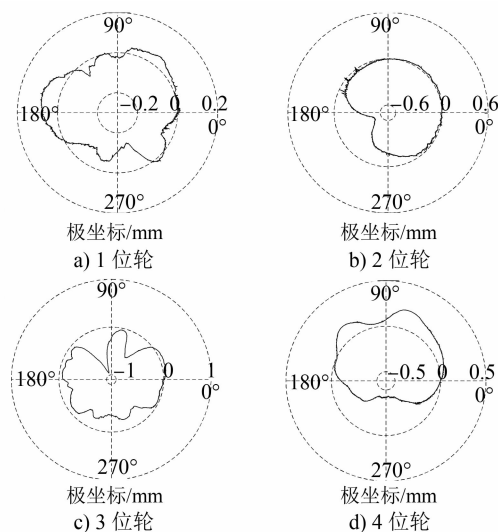


图1 实测车轮失圆廓形图

Fig. 1 Measured profile diagram of wheel out-of-roundness

由图1可见,1位轮主要呈现1~3阶失圆,2位轮和4位轮主要呈现1阶偏心,3位轮主要呈现2阶的椭圆化。

图2为实际测量的车轮失圆粗糙度幅值图。其中,3位轮的情况最为严重,最大粗糙度超过了30 dB。

2 轮对垂向耦合振动模型

为了更好地分析车轮磨损功率与车轮周向径跳之间的关系,建立如图3所示的单自由度车轮-钢轨-浮置板垂向耦合振动模型,并作出如下假设:①一系弹簧刚度和阻尼参数以及轨下刚度阻尼参数均为常数;②钢轨为未磨损的理想钢轨;③轮对和钢轨的位移均为因正压力引起;④仅考虑由于轮对失圆产生的径跳;⑤车辆运行速度恒定。

其中名义滚动圆半径为 R ,不同时刻的实际轮径为 $R(t)$;车辆运行速度为 v ;轮对中心的垂向位移为 Z_1 ,钢轨质心的垂向位移为 Z_2 ,浮置板质心的垂向位移为 Z_3 ;轮对质量为 M_1 ,钢轨局部质量为 M_2 ,浮置板局部质量为 M_3 ;一系垂向定位刚度为 K_1 ,阻尼为 C_1 ;轨下刚度为 K_2 ,阻尼为 C_2 ;浮置板局部垂向刚度为 K_3 ,阻尼为 C_3 。地铁车辆车轮失圆主要呈现低阶多边形形式^[6],因此设置轮对初始多边形阶数为8。

以系统静平衡位置为坐标系原点进行建模,根据牛顿力学定律有平衡方程:

$$M_1 Z_1'' + C_1 Z_1' + K_1 Z_1 = F \quad (1)$$

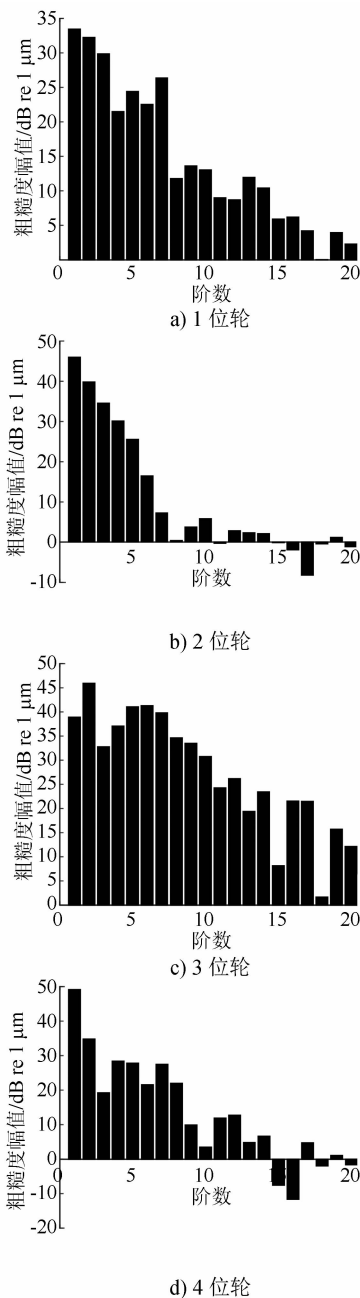


图2 实测车轮失圆粗糙度幅值图

Fig. 2 Measured roughness grade spectrum of wheel out-of-roundness

$$M_2 Z_2'' + C_2 Z_2' + K_2 Z_2 = -F + C_2 Z_3' + K_2 Z_3 \quad (2)$$

$$M_3 Z_3'' + C_3 Z_3' + K_3 Z_3 = C_2 (Z_2' - Z_3') + K_2 (Z_2 - Z_3) \quad (3)$$

式中, F 为轮对所受的动态法向力。

如果车轮具有任意不圆特点,则接触点位置的实际半径 $R(t)$ 为:

$$Z_2 = Z_1 - R(t) \quad (4)$$

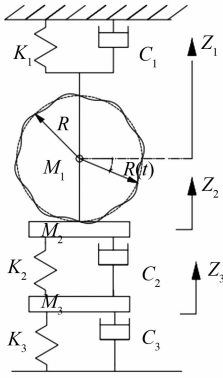


图3 单自由度车轮-钢轨-浮置板垂向耦合振动模型
Fig. 3 Wheel-rail-floating slab vertical coupling vibration model with single degree of freedom

将式(4)代入式(1)、式(2)和式(3)并整理,有:

$$(M_1 + M_2)Z_1'' + (C_1 + C_2)Z_1' + (K_1 + K_2)Z_1 = M_2R''(t) + C_2R'(t) + K_2R(t) + C_2Z_3' + K_2Z_3 \quad (5)$$

$$M_3Z_3'' + (C_2 + C_3)Z_3' + (K_2 + K_3)Z_3 = -C_2R'(t) - K_2R(t) + C_2Z_1' + K_2Z_1 \quad (6)$$

而轮轨间的实际法向力还应加上轮轨间静平衡时候的法向力 F_0 。

轮轨间蠕滑力 T 和蠕滑率 ξ 之间的关系如图4所示。该图像由线性段和饱和段组成,图中 f_N 表示滑动摩擦力。而在不同正压力(即法向力)下,蠕滑力-蠕滑率之间的曲线也会随之变化,将正压力也作为一个自变量考虑,即可得到三维坐标系下的正压力-蠕滑力-蠕滑率关系图,如图5所示。

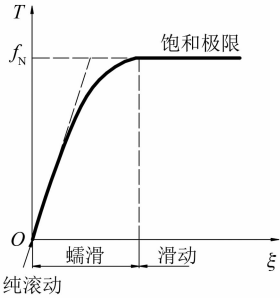


图4 蠕滑力-蠕滑率关系曲线
Fig. 4 Creep force-creep rate relationship curve

根据不同正压力和蠕滑力,即可插值得到在该工况下的蠕滑率。当获得了接触点位置的蠕滑率和蠕滑力后,就可以根据式(7)得到轮轨接触点的瞬时摩擦功率 P_r 。

$$P_r = \xi_x T_x \cdot v \quad (7)$$

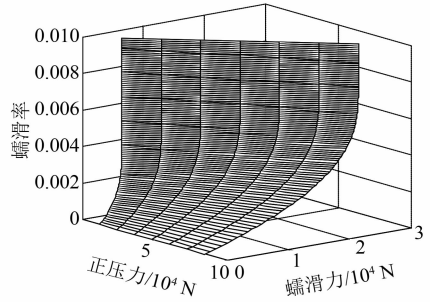


图5 正压力-蠕滑力-蠕滑率关系
Fig. 5 Positive pressure-creep force-creep rate relationship curve

3 车轮圆周磨耗规律仿真

在 SIMPACK 软件中搭建单轮对-钢轨-浮置板垂向耦合振动模型^[15],如图6所示。将标准正弦八边形作为车轮圆周的输入,幅值为 0.2 mm,可以得到如图7 a)所示的廓形示意图以及如图7 b)所示的圆周径跳与周向距离的关系。将模型中车辆运行速度设置为 72 km/h。取轨下刚度 $K_0 = 40 \text{ MN/m}$,轨下阻尼 $C_0 = 5 \text{ 000 Ns/m}$ 。

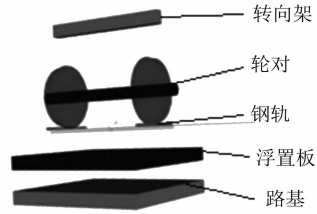


图6 单轮对-钢轨-浮置板垂向耦合振动模型
Fig. 6 Single wheelset-rail-floating slab vertical coupling vibration model

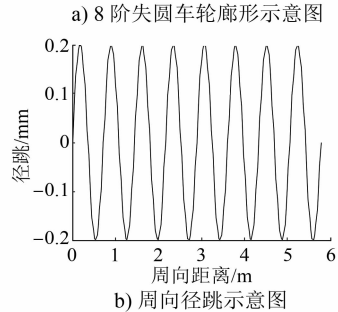
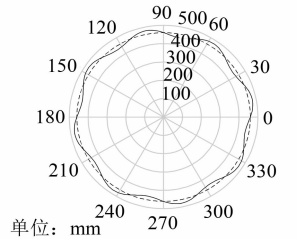


图7 失圆示意图

Fig. 7 Diagram of wheel out-of-roundness

当轨下无浮置板时,车轮所受的正压力、蠕滑率和磨耗功率变化如图 8~10 所示。由图可见,径跳最高的位置正压力最大、蠕滑率最小、磨耗功率也最小,因此会加剧车轮的不圆顺现象。同时,为了检测浮置板在减缓车辆向路基的外力传递过程中所起的作用,输出路基所受的力与车轮径跳之间的关系图,如图 11 所示。

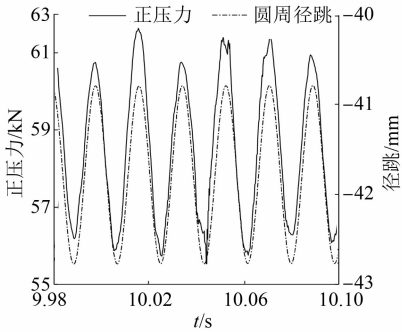


图 8 正压力-径跳图(无浮置板)

Fig. 8 Figure of positive pressure-diameter jump (without floating slab)

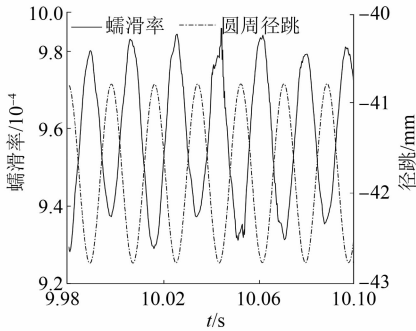


图 9 蠕滑率-径跳图(无浮置板)

Fig. 9 Figure of creep rate-diameter jump (without floating slab)

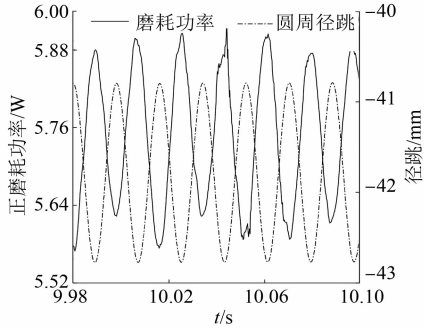


图 10 磨耗功率-径跳图(无浮置板)

Fig. 10 Figure of abrasion power-diameter jump (without floating slab)

设置轨下浮置板参数,然后进行仿真,得到车轮受到的正压力、蠕滑率和磨耗功率变化图如图 12~14 所示。由图可见,相较于车轮其他位置而

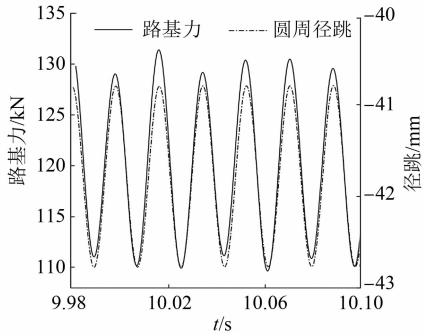


图 11 路基力-径跳关系图(无浮置板)

Fig. 11 Figure of base force-diameter jump (without floating slab)

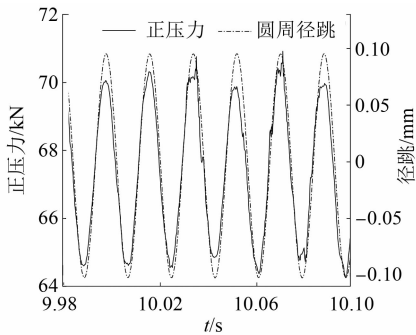


图 12 正压力-径跳图(有浮置板)

Fig. 12 Figure of positive pressure-diameter jump (with floating slab)

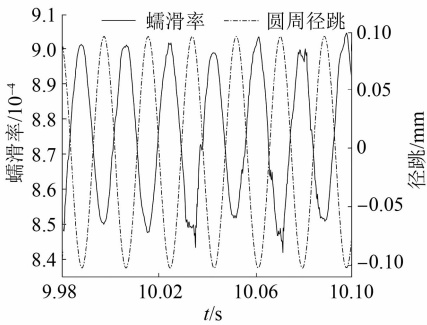


图 13 蠕滑率-径跳图(有浮置板)

Fig. 13 Figure of creep rate-diameter jump (with floating slab)

言,径跳最高位置处所受的正压力仍然最大,蠕滑率与磨耗功仍然达到了极小值。由此可见,浮置板并不会改变车轮不圆顺的恶化趋势,但从数值上可以看出,与不加浮置板的相比,轮对在对对应位置所受到的磨耗功率变小,这会减缓车轮不圆顺发展速度。图 15 为该模型下路基所受力的变化趋势,显然,浮置板可有效降低路基所受的振动。

为了探究不同浮置板刚度对车轮磨耗功率和路基力的影响,改变浮置板垂向刚度进行仿真,得到

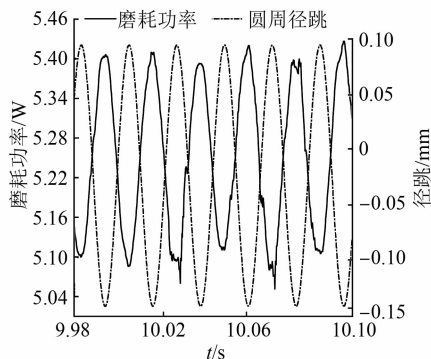


图 14 磨耗功率-径跳图(有浮置板)

Fig. 14 Figure of abrasion power-diameter jump (with floating slab)

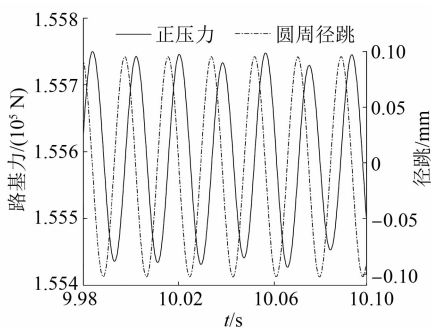


图 15 路基力-径跳图(有浮置板)

Fig. 15 Figure of base force-diameter jump (with floating slab)

的对比图如图 16~17 所示。由图可见:当浮置板垂向刚度变大后,车轮所受的磨耗功率变大,但是相位没有发生偏移;而从路基所受力可见,随着浮置板垂向刚度的增大,路基所受力也增大,而且发生了相位的右移。

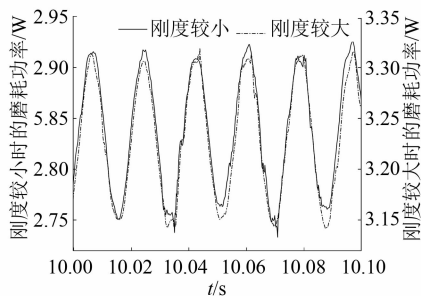


图 16 不同浮置板垂向刚度的磨耗功率对比

Fig. 16 Comparison between abrasion power of different stiffness

4 结语

从不同轨道结构仿真结果可以看出:浮置板确实降低了路基所受到的振动;针对车轮不圆顺的发展,不论有没有浮置板,车轮不圆顺程度都会恶

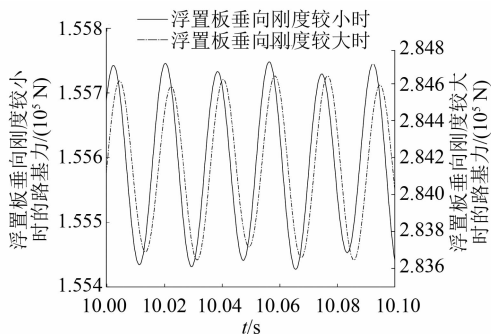


图 17 不同浮置板垂向刚度的路基受力对比

Fig. 17 Comparison between base force of different stiffness

化;浮置板的存在会使车轮在相应位置的磨耗功率变小,这会减缓车轮不圆顺的恶化速率。由于浮置板的质量相较于车轮和钢轨的质量而言太大,其等效刚度和阻尼相较于一系弹簧和轨下刚度阻尼而言也太大,其参数近似于刚性;而改变浮置板的刚度参数,不会影响车轮所受的磨耗功率的相位但会影响路基受力的振动相位;随着浮置板刚度的增加,会导致磨耗功率变大,这会加剧车轮不圆顺的恶化趋势。因此,要想减缓车轮不圆顺的发展趋势,要从轨下参数的优化方面着手。

参考文献

- [1] 付彬. 地铁车辆车轮多边形形成机理探究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
FU Bin. Study into mechanism of wheel polygonalization of metro vehicle[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2017.
- [2] JOHANSSON A, NIELSEN J C O. Out-of-round railway wheels-wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations[J]. Proceedinhs of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,2003,217(2):135.
- [3] MEYWERK M. Polygonalization of railway wheels[J]. Archive of Applied Mechanics,1999,69(2):105.
- [4] MEINKE P, MEINKE S. Polygonalization of wheel treads caused by static and dynamic imbalances[J]. Journal of Sound and Vibration,1999,227(5):979.
- [5] MORYS B. Enlargement of out-of-round wheel profiles on high speed trains[J]. Journal of Sound and Vibration,1999,227(5):965.
- [6] 陈龙. 地铁车轮失圆形成机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
CHEN Long. Study on mechanism of the wheel out-of round formation of metro[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.
- [7] 罗仁,曾京,邬平波,等. 高速列车车轮失圆顺磨耗仿真及分析[J]. 铁道学报,2010(5):30.

- LUO Ren, ZENG Jing, WU Pingbo, et al. Simulation and analysis of wheel out-of-roundness wear of high-speed train [J]. Journal of the China Railway Society, 2010(5):30.
- [8] 陈光雄, 金学松, 邹平波, 等. 车轮多边形磨耗机理的有限元研究[J]. 铁道学报, 2011(1):14.
- CHEN Guangxiong, JIN Xuesong, WU Pingbo, et al. Finite element study on the generation mechanism of polygonal wear of railway wheels[J]. Journal of the China Railway Society, 2011(1):14.
- [9] 王科. 基于摩擦自激振动引起高速列车车轮多边形磨耗的仿真研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- WANG Ke. A numerical simulation of wheel polygonization of high-speed trains based on friction-induced vibration [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [10] 李伟, 李言义, 张雄飞, 等. 地铁车辆车轮多边形的机理分析[J]. 机械工程学报, 2013(18):17.
- LI Wei, LI Yanyi, ZHANG Xiongfei, et al. Mechanism of polygonal wear of metro train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013(18):17.
- [11] 史美英. 车轮多边形成因及失圆后的工程技术对策研究[D]. 上海:同济大学, 2019.
- SHI Meiyang. Research on the cause of wheel polygonalization and the engineering solutions[D]. Shanghai: Tongji University, 2019.
- [12] 邓永果. 车轮非圆化对高速车辆系统动力学性能的影响[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
- DENG Yongguo. Effect of out-of-round wheel on vehicle system dynamics behavior[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [13] 宋志坤, 岳仁法, 胡晓依, 等. 车轮多边形对车辆振动及轮轨力的影响[J]. 北京交通大学学报, 2017(6):88.
- SONG Zhikun, YUE Renfa, HU Xiaoyi, et al. Influence of wheel polygon on vehicle vibration and wheel/rail force[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017(6):88.
- [14] 刘韦, 马卫华, 罗世辉, 等. 考虑轮对弹性的车轮振动及车轮多边形化对轮轨力影响研究[J]. 铁道学报, 2013(6):28.
- LIU Wei, MA Weihua, LUO Shihui, et al. Research on influence of wheel vibration and wheel polygonization on wheel-rail force in consideration of wheelset elasticity[J]. Journal of the China Railway Society, 2013(6):28.
- [15] 翟婉明. 车轮-轨道耦合动力学[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2007.

(收稿日期:2021-01-22)

(上接第79页)

各测温孔中测温点温度随时间均存在阶段性变化特征。

本文通过水平冻结温度实测分析确定冻结34 d后已具备盾构始发与接收条件,最终盾构成功实现始发与接收,现场应用效果较好。因此可知,水平冻结法是复杂地质条件下较好的加固新技术,在地铁隧道工程中有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 付艳斌, 廖少明, 朱合华. 搅拌桩加固挤土效应及在地铁隧道保护中的应用[J]. 岩土力学, 2009(7):2005.
- FU Yanbin, LIAO Shaoming, ZHU Hehua. Soil squeezing effect of DCM pile and its application to subway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(7):2005.
- [2] 陈松. RJP 高压旋喷法及冻结法在盾构接收端头的组合运用[J]. 隧道建设, 2018(6):1037.
- CHEN Song. Combined application of Rodin Jet Pile method and freezing method to shield receiving end soil[J]. Tunnel Construction, 2018(6):1037.
- [3] 武有根. 软土地层 SMW 工法盾构出洞施工技术[J]. 地下空间与工程学报, 2005(增刊1):997.
- WU Yougen. Technology of SMW in soft for shield machine starting to tunnel from working well[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(S1):997.
- [4] 樊文虎, 杨平, 姚梦威. 盾构始发端头水平冻结加固方案设计研究[J]. 铁道建筑, 2015(8):39.
- FAN Wenhui, YANG Ping, YAO Mengwei. Research on horizontal freezing reinforcement and scheme design of shield launching end wall[J]. Railway Engineering, 2015(8):39.
- [5] 周晓敏, 苏立凡, 贺长俊, 等. 北京地铁隧道水平冻结法施工[J]. 岩土工程学报, 1999(3):63.
- ZHOU Xiaomin, SU Lifan, HE Changjun, et al. Horizontal ground freezing method applied to tunneling of Beijing underground railway system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999(3):63.
- [6] 赵亮, 杨平, 刘增光, 等. 杯型水平冻结法端头加固与钢套筒辅助的盾构接收技术[J]. 城市轨道交通研究, 2017(9):126.
- ZHAO Liang, YANG Ping, LIU Zengguang, et al. On shield receiving by horizontal freezing reinforcement technology and steel sleeve[J]. Urban Mass Transit, 2017(9):126.
- [7] 翁家杰. 群孔冻结温度场特征——上海延安东路隧道南线冻结工程温度监测研究[J]. 地下工程与隧道, 1997(4):10.
- WENG Jiajie. Characteristics of freezing temperature field of holes——temperature monitoring of freezing engineering in south line of Yan'andong Rive Tunnel in Shanghai[J]. Underground Engineering and Tunnel, 1997(4):10.
- [8] 陈文豹, 汤志斌. 潘集矿区冻结壁平均温度及冻结孔布置圈径的探讨[J]. 煤炭学报, 1982(1):46.
- CHEN Wenbao, TANG Zhibin. The average temperature in ice wall and the diameter of frozen circle in Panji Coal Field[J]. Journal of China Coal Society, 1982(1):46.

(收稿日期:2020-02-12)