

施工偏差对钢弹簧浮置板结构尺寸及减振性能影响^{*}张 钰^{1,2} 王建西^{1,2,3} 郭 庆^{1,2} 王晓曼^{1,2} 崔泽毅^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 050043, 石家庄;

2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 050043, 石家庄;

3. 河北省铁路扣件系统技术创新中心, 050043, 石家庄)

摘 要 [目的] 施工偏差会对施工项目造成不同程度的影响, 因此有必要研究施工偏差对钢弹簧浮置板结构尺寸及减振性能的影响。[方法] 针对具体现场施工时, 地铁隧道内曲线段现浇钢弹簧浮置板产生的施工偏差问题, 利用数学几何方法建立了多工序映射理论模型, 考虑不同偏差组合工况, 分析获得基底和浮置板厚度的偏差范围。在此范围内, 基于 ABAQUS 软件建立动力学模型, 分析施工偏差对减振性能的影响。[结果及结论] 当隧道中心线偏移时, 基底厚度的变化范围为 75.72 ~ 281.75 mm, 浮置板厚度的变化范围为 278.28 ~ 325.00 mm。在基底厚度偏差范围内, 钢轨振动响应峰值集中在低频段 12.50 Hz 以内; 当基底厚度为 65 mm 时, 其对减振性能的影响最大, 减振性能降低了 23.90%。在浮置板厚度偏差范围内, 钢轨振动响应峰值集中在低频段 3.15 Hz 以内。当浮置板厚度减小为 45 mm 时, 其对减振性能的影响最大, 减振性能降低了 24.24%。

关键词 地铁; 钢弹簧浮置板; 施工偏差; 减振性能**中图分类号** U231.94**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.12.036**Influence of Construction Deviations on Structural Dimensions and Vibration Reduction Performance of Steel Spring Floating Slabs**ZHANG Yu^{1,2}, WANG Jianxi^{1,2,3}, GUO Qing^{1,2}, WANG Xiaoman^{1,2}, CUI Zeyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Railway University, 050043, Shijiazhuang, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Railway University, 050043, Shijiazhuang, China; 3. Hebei Railway Fastening System Technology Innovation Center, 050043, Shijiazhuang, China)

Abstract [Objective] Construction deviation can affect project outcomes to varying degrees, making it necessary to

study the impact of such deviations on the structural dimensions and vibration reduction performance of steel spring floating slabs. [Method] Focusing on the on-site construction deviation issues during the cast-in-place steel spring floating slab installation in curved sections of metro tunnels, a multi-process mapping theoretical model is established using mathematical geometry methods. By considering deviation combinations of different working conditions, the deviation ranges for the base and floating slab thicknesses are analyzed. Within these ranges, a dynamics model is built using ABAQUS software to evaluate the impact of construction deviations on vibration reduction performance. [Result & Conclusion] When the tunnel centerline deviates, the base thickness ranges from 75.72 to 281.75 mm, and the floating slab thickness ranges from 278.28 mm to 325.00 mm. Within the base thickness deviation, the peak of the rail vibration response is concentrated in the low-frequency range below 12.50 Hz. The greatest impact on vibration reduction performance occurs when the base thickness is 65 mm, reducing the vibration reduction performance by 23.90%. Within the floating slab thickness deviation range, the peak of rail vibration response is concentrated in the low-frequency range below 3.15 Hz. The greatest impact on vibration reduction performance occurs when the floating slab thickness decreases to 45 mm, reducing the vibration reduction performance by 24.24%.

Key words metro; steel spring floating slab; construction deviation; damping performance**0 引言**

钢弹簧浮置板道床作为整体道床的一种特殊形式, 被广泛应用于城市地铁工程中。在地铁施工过程中, 施工质量控制和精度控制是核心环节。线下基础的施工偏差会对施工造成不同程度的影响,

^{*} 国家重点研发计划项目(2021YFB2601003); 河北省自然科学基金项目(E2020210092)

如钢轨无法正常安装、隔振器不满足安装要求、浮置板减振性能降低等,甚至会成为日后运营中的局部隐患。因此,如何在施工过程中处理钢弹簧浮置板轨道施工偏差带来的影响成为了研究重点。

文献[1]提出了预制钢弹簧浮置板设计、施工的要点。文献[2]提出了以盾构姿态、盾尾间隙和土质因素为基础的回归距离计算方法,计算结果可为盾构机操作者提供参考,提高施工效率。文献[3]的研究结果表明,盾构施工中会出现7种偏差情况,并提出了相应的控制措施。文献[4]采用Z计权分析减振轨道系统的减振性能,为地铁开通新线时在选择减振轨道铺设方面提供一定的经验和工程参考。

已有研究大多集中于机械设备方面的改进及施工方案的优化,对施工偏差影响钢弹簧浮置板结构尺寸进而影响减振性能的研究较少。实际施工中有直线段和曲线段两种地段,由于曲线段施工较为复杂,施工偏差组合工况较多,且现浇法施工可以改变基底和浮置板厚度,故本文主要针对盾构圆形隧道内曲线段的现浇钢弹簧浮置板进行分析研究。通过建立多工序映射理论模型,分析得到施工偏差的范围,并在此偏差范围下分析了施工偏差对减振性能的影响。本文研究可为地铁隧道内浮置板的施工提供指导与借鉴。

1 钢弹簧浮置板施工偏差工况

根据CJJ/T 191—2012《浮置板轨道技术规范》可知,地铁盾构管片的半径为2 700 mm,浮置板设计轨道结构高度为840 mm,理论基底宽度为2 212 mm,理论浮置板厚度为325 mm,宽度为3 100 mm,隔振器外筒外边至相对隔振器外筒边距离为2 210 mm,允许误差为2 mm。现场实测表明,在曲线地段,曲线段最大超高为180 mm,按中心高度不变法对曲线段钢弹簧浮置板的侵限偏差工况进行分析计算,由于存在超高及盾构机本身的机械原因,可能会引起隧道中心线与轨道中心线产生偏移,进而造成轨道结构高度不足。浮置板和基底在这种地段需要采取特殊设计,曲线段隧道侵限横断面示意图如图1所示。隧道中心线水平方向最大偏移量为-300~300 mm,竖向最大偏移量为-150~150 mm。

基于上述分析,考虑不同偏差组合形式,将曲线段现浇钢弹簧浮置板施工偏差分为隧道中心线

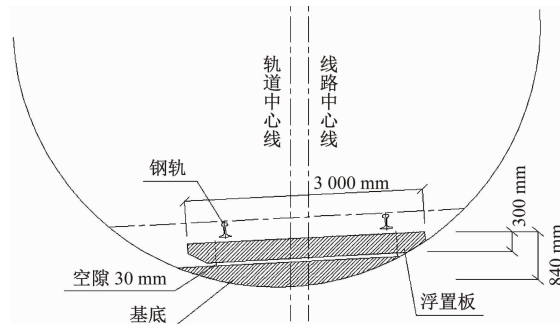


图1 曲线段隧道侵限横断面示意图

Fig. 1 Diagram of tunnel intrusion limit cross-section in curve segment

向内轨偏移、向外轨偏移、向上偏移和向下偏移4种工况。

2 施工偏差分析方法

根据施工偏差工况,建立几何理论分析模型如图2所示。其中: R 为隧道断面半径; Δx_1 为隧道中心线水平方向偏移量; Δx_2 为隧道中心线竖向偏移量; a 为轨下净空; b 为浮置板厚度; c 为基底厚度; α 为曲线超高造成的基底与水平面倾角;虚线表示不发生偏移时的隧道断面及基底位置,实线表示发生偏移后实际的隧道断面、基底、浮置板和钢轨位置。

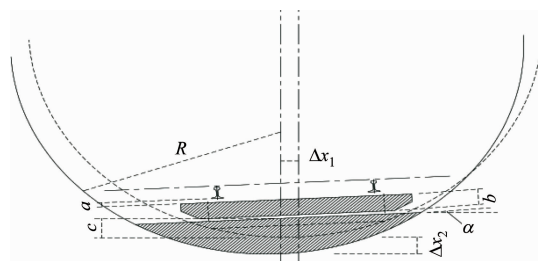


图2 几何理论分析模型

Fig. 2 Analysis model of geometry theory

根据施工工序,以CJJ/T 191—2012《浮置板轨道技术规范》和CJJ/T 96—2018《地铁限界标准》中的隔振器安装位置及限界为控制条件,参照机械方面多工序流波动分析方法^[5],可以获得多工序映射理论模型:

$$(u \tan \alpha + \Delta x_1)^2 + (v + d + \Delta x_2)^2 = R^2 \quad (1)$$

式中:

u 、 v ——基底右顶角坐标;

d ——基底需升高的高度。

针对不同工况代入隧道中心线偏移值,可以得到基底厚度的升高量,确定在不同隧道中心线偏移值下基底应浇筑的厚度,然后以轨道结构高程不变

为控制条件,即可确定浮置板应浇筑的厚度及轨下净空值。

3 钢弹簧浮置板施工偏差分析

3.1 曲线段隧道中心线向内轨偏移

当隧道中心线向内轨偏移过大时,隔振器会置于管片上方,需将隔振器向线路中心线的方向移动,此时隔振器至多位于钢轨下方。为保证隔振器至多置于钢轨下方,需要增加基底厚度。基底顶面设计位置距管片圆心距离为 2 463 mm,则隧道中心线偏移量和基底厚度的升高量满足以下关系:

$$(u \tan \alpha + \Delta x_1)^2 + (v - 2\,463 + d)^2 = R^2 \quad (2)$$

由式(2)的计算结果可知,当隧道中心线向内轨偏移 300 mm 时,基底厚度需按设计值 237 mm 施工,浮置板厚度需按设计值 325 mm 施工。为满足轨道结构高度保持不变的要求,曲线段隧道中心线向外轨偏移的解决方案为:当隧道中心线向内轨偏移量为 0、50 mm、100 mm、150 mm、178 mm、300 mm 时,基底厚度按照设计厚度 237 mm 施工,浮置板厚度按照设计厚度 325 mm 施工,轨下净空取为 72 mm。

3.2 曲线段隧道中心线向外轨偏移

当隧道中心线向外轨偏移过大时,隔振器会置于管片上方,需将隔振器向线路中心线方向移动,此时,隔振器至多位于钢轨下方。为保证隔振器至多置于钢轨下方,需要增加基底厚度。隧道中心线偏移量和基底厚度的升高量满足以下关系式:

$$(u \cos \alpha - \Delta x_1)^2 + (v - 2\,463 + d)^2 = R^2 \quad (3)$$

由式(3)的计算结果可知,当隧道中心线向外轨偏移 300 mm 时,基底需升高 45 mm。为满足轨道结构高度保持不变的要求,曲线段隧道中心线向外轨偏移的解决方案为:① 轨下净空减小 42 mm,浮置板厚度减小 3 mm;② 轨下净空不变,浮置板厚度减小 45 mm。

隧道中心线向外轨偏移分析结果如表 1 所示。由表 1 可知:随着隧道中心线向外轨偏移量的增加,浮置板厚度基本保持不变;当隧道中心线向外轨偏移量为 186.7 mm 时,基底厚度开始增大,最大值为 282 mm。

3.3 曲线段隧道中心线向上偏移

当隧道中心线向上偏移过大时,隔振器会超过钢轨下方,此时需增加基底厚度才可正常安装隔振器,且需将隔振器向隧道中心线方向移动,且至多置于钢轨下方。隧道中心线偏移量和基底厚度的

表 1 隧道中心线向外轨偏移分析结果

Tab. 1 Analysis results of tunnel centerline deviation toward outer rail

隧道中心线向外轨 偏移量/mm	基底厚度/ mm	浮置板厚度/ mm	轨下净空/ mm
0	237	325	72
100.0	237	325	72
186.7	237	325	72
200.0	242	320	72
		325	67
250.0	262	300	72
		325	47
300.0	282	280	72
		322	30

升高量满足以下关系式:

$$(u \cos \alpha)^2 + (v + \Delta x_2 + 2\,463 + d)^2 = R^2 \quad (4)$$

由式(4)的计算结果可知,当隧道中心线向上偏移 150 mm 时,基底厚度降低了 61 mm。为满足轨道结构高度保持不变的要求,曲线段隧道中心线向上偏移的解决方案为:① 轨下净空减小 42 mm,浮置板厚度减小 47 mm;② 轨下净空不变,浮置板厚度减小 89 mm。

隧道中心线向上偏移分析结果如表 2 所示。由表 2 可知:当隧道中心线向上偏移 61.28 mm 时,基底厚度开始减小;当隧道中心线向上偏移 90.00 mm 时,基底厚度达到最小值 176 mm,此时浮置板厚度开始减小,最小值为 278 mm。

表 2 隧道中心线向上偏移分析结果

Tab. 2 Analysis results of tunnel centerline upward offset

隧道中心线向上 偏移量/mm	基底厚度/ mm	浮置板厚度/ mm	轨下净空/ mm
0	237	325	72
60.00	237	325	72
61.28	237	325	72
90.00	176	296	72
		325	43
120.00	176	266	72
		308	30
150.00	176	236	72
		278	30

3.4 曲线段隧道中心线向下偏移

当隧道中心线向下偏移过大时,为满足轨道结

构高度保持不变的要求,当隧道中心线向下偏移 150 mm 时的解决方案为:基底厚度增大 150 mm,浮置板厚度保持不变。

隧道中心线向下偏移分析结果如表 3 所示。由表 3 可知:当隧道中心线向下偏移时,基底厚度不断增大;浮置板厚度保持不变,按照设计厚度 325 mm 进行施工即可。

表 3 隧道中心线向下偏移分析结果

Tab. 3 Analysis results of tunnel centerline downward offset

隧道中心线向下 偏移量/mm	基底厚度/ mm	浮置板厚度/ mm	轨下净空/ mm
0	237	325	72
30	267	325	72
60	297	325	72
90	327	325	72
120	357	325	72
150	387	325	72

4 曲线段现浇钢弹簧浮置板施工偏差对减振性能影响

在多刚体动力学软件中,轨道不平顺选取美国五级谱^[6],按照地铁 B 型车参数设置车体、转向架、轮对质量。提取轮轨垂向力、轮轨横向力(曲线段)施加在钢轨上,对不同基础偏差工况(基底厚度偏差、浮置板厚度偏差、隧道中心线偏移)进行仿真计算。浮置板轨道动力学计算模型如图 3 所示。

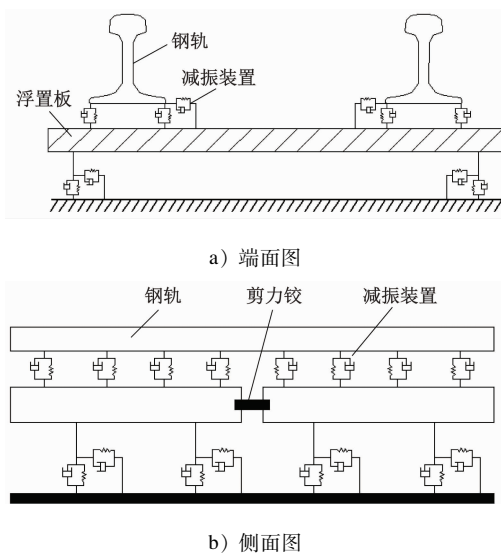
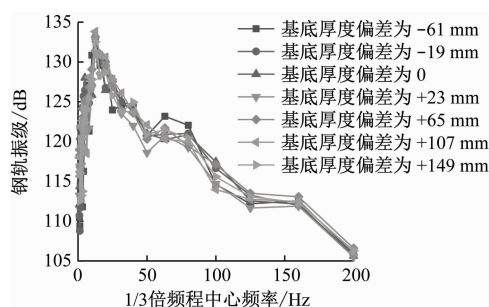


图 3 浮置板轨道动力学计算模型

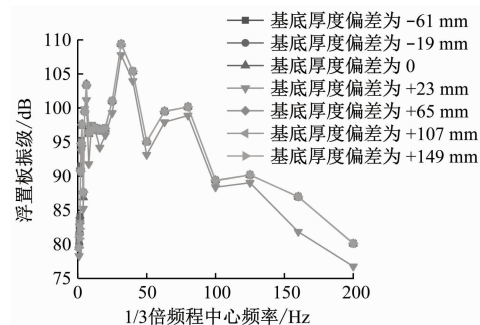
Fig. 3 Calculation model of floating slab track dynamics

4.1 中心线偏移导致基底厚度偏差

不同基底厚度偏差条件下的钢轨和浮置板分频振级曲线如图 4 所示。由图 4 可知:钢轨振动响应峰值主要集中在低频段 12.5 Hz 以内,振动响应最大值为 134 dB;基底厚度偏差对不同中心频率下的钢轨振级影响较小;当中心频率小于 125 Hz 时,不同基底厚度偏差对浮置板振级基本没有影响;当中心频率为 125 ~ 200 Hz 时,不同基底厚度偏差对浮置板振级影响较为显著。



a) 钢轨



b) 浮置板

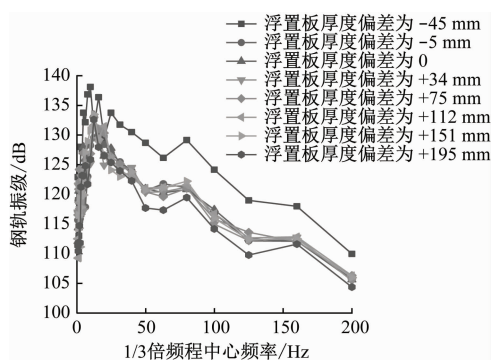
图 4 不同基底厚度偏差条件下的钢轨和浮置板分频振级曲线

Fig. 4 Frequency-segmented vibration level curves of rail and floating slab under different base thickness deviation conditions

将不同基底厚度偏差的 1/3 倍频程计算数据,乘以中心频率所对应的计权因子,可以计算得到钢轨、浮置板、基底振级数据,如表 4 所示。由于扣件及钢弹簧的阻尼作用,振动从钢轨传递至基底时会发生衰减。在基底厚度发生偏差时,基底厚度的增加意味着参与振动的整体质量有所增加,钢轨与基底的振级差也会增大,说明基底厚度发生偏差对浮置板轨道减振性能有影响。当基底厚度增大至 65 mm 时,最大振级差为 58.33 dB,减振性能下降了 23.90%。

表4 不同基底厚度偏差条件下的钢轨、浮置板、基底振级
Tab.4 Rail, floating slab and base vibration level under
different base thickness deviation conditions

基底厚度 偏差量/mm	钢轨振级/ dB	浮置板振级/ dB	基底振级/ dB	钢轨与基底的 振级差/dB
-61	132.87	109.41	93.43	39.44
-19	132.98	109.36	85.42	47.56
0	133.39	109.39	86.30	47.08
+23	131.20	107.78	83.32	47.88
+65	133.14	109.36	74.82	58.33
+107	133.83	109.36	78.09	55.75
+149	132.52	109.35	79.71	52.81

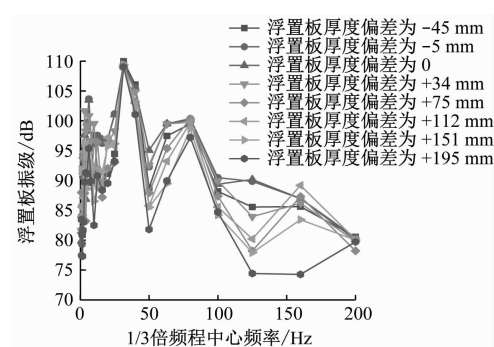


a) 钢轨

4.2 中心线偏移导致浮置板厚度偏差

不同浮置板厚度偏差条件下的钢轨和浮置板分频振级曲线如图5所示。由图5可知:钢轨振动响应峰值主要集中在低频段3.15 Hz以内,振动响应最大值为128 dB;当浮置板厚度偏差为-45 mm时,钢轨分频振级曲线和其他工况有明显的区别;当浮置板厚度偏差为195 mm时,钢轨分频振级曲线在50 Hz以后有明显区别;当中心频率大于50 Hz时,浮置板分频振级曲线有明显的差异,浮置板厚度对该范围内的分频振级影响较大。

将不同浮置板厚度偏差的1/3倍频程计算数据,乘以中心频率所对应的计权因子,可以计算得



b) 浮置板

图5 不同浮置板厚度偏差条件下的钢轨和浮置板分频振级曲线

Fig.5 Frequency-segmented vibration level curves of rail and floating slab under different floating slab thickness deviation conditions

到钢轨、浮置板、基底振级数据,如表5所示。当浮置板厚度偏差为+195 mm时,钢轨与基底的振级差达到了56.33 dB。当浮置板厚度偏差为-45 mm时,最大振级差为58.49 dB,减振性能降低了24.24%。

表5 不同浮置板厚度偏差条件下的钢轨、浮置板、基底振级
Tab.5 Rail, floating slab and base vibration level under
different floating slab thickness deviation conditions

浮置板厚度 偏差量/mm	钢轨振级/ dB	浮置板振级/ dB	基底振级/ dB	钢轨与基底的 振级差/dB
-45	138.11	109.97	79.62	58.49
-5	130.19	109.49	88.06	42.13
0	133.39	109.39	86.30	47.08
+34	131.37	109.03	86.26	45.11
+75	132.97	108.79	77.14	55.82
+112	131.54	109.13	85.99	45.55
+151	133.48	109.42	87.54	45.94
+195	132.62	109.03	76.29	56.33

5 结论

1) 为使隔振器安装位置及限界满足要求,隧道中心线向外轨偏移时,基底厚度和浮置板厚度均保持不变,按照设计厚度237 mm和325 mm施工即可。隧道中心线向内轨偏移186.7 mm时,基底厚度开始增大,最大值为282 mm,浮置板厚度基本保持不变。

2) 为使隔振器安装位置及限界满足要求,隧道中心线向上偏移61.28 mm时,基底厚度开始减小。隧道中心线向上偏移90 mm时,基底厚度达到最小值176 mm,此时浮置板厚度开始减小,最小值为278 mm。隧道中心线向下偏移时,基底厚度不断增大,浮置板厚度保持不变。

3) 当基底厚度偏差为-61 mm~+149 mm时,钢轨振动响应峰值主要集中在低频段12.50 Hz以内,振动响应最大值为134 dB,与偏差为0时的工况相比差异明显。当浮置板厚度偏差为-45 mm~

+195 mm 时,钢轨振动响应峰值主要集中在低频段 3.15 Hz 以内,振动响应最大值为 128 dB,与偏差为 0 时的工况相比基本一致。

4) 当基底厚度偏差为 -61 mm ~ +149 mm 时,其对浮置板轨道的减振性能有影响,且当基底厚度偏差为 +65 mm 时影响最大,此时减振性能降低了 23.90%。当浮置板厚度偏差为 -45 mm ~ +195 mm 时,其对浮置板轨道的减振性能影响程度较大,且当浮置板厚度偏差为 -45 mm 时影响最大,此时减振性能降低了 24.24%。

参考文献

- [1] 郑晓练. 预制钢弹簧浮置板技术创新研究及应用[J]. 现代城市轨道交通, 2021(增刊01): 51.
ZHENG Xiaolian. Technical innovation and application of prefabricated steel spring floating slabs[J]. Modern Urban Transit, 2021(S01): 51.
- [2] 陈刚. 盾构施工纠偏曲线设计[J]. 上海建设科技, 2017(1): 1.
CHEN Gang. Design of deviation correction curve in shield construction[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2017(1): 1.
- [3] 胡二中. 地铁盾构法施工中常见质量问题及防治措施分析[J]. 中外建筑, 2017(4): 173.
HU Erzong. Analysis of common quality problems and prevention

measures in subway shield construction[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2017(4): 173.

- [4] 周志军, 刘玉涛, 李伟, 等. 地铁钢弹簧浮置板轨道振动特性和减振效果研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 57.
ZHOU Zhijun, LIU Yutao, LI Wei, et al. Study on vibration characteristics and vibration reduction effect of steel spring floating slab track in metro[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(5): 57.
- [5] 姜洪, 陈琨, 李兴伟, 等. 多源多工序加工过程波动扩散网络建模与波动源辨识[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 73.
LOU Hong, CHEN Kun, LI Xingwei, et al. Fluctuation diffusion network modeling and fluctuation source identification of multi-fluctuation-source and multi-process machining processes[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 73.
- [6] 涂勤明. 地铁常用减振轨道振动特性及减振效果对比研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(5): 135.
TU Qiming. Comparative study on vibration characteristics and vibration-reducing effects of metro general vibration-reducing tracks[J]. Railway Engineering, 2020, 60(5): 135.

· 收稿日期:2022-10-11 修回日期:2022-11-01 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-11 Revised:2022-11-01 Published:2024-12-10
· 第一作者:张钰,硕士研究生,418572853@qq.com
通信作者:王建西,教授,qianxi-2008@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 223 页)

面临更多的不确定因素、更多的挑战:① 探索全自动运行条件下车站设施设备运营与维修的关系,根据智慧车站建设的特性,适当调整车站管理规章制度,使得车站运营更加合理、高效;② 探索更优的城市轨道交通车站的现代化管理模式,逐步实现车站管理科学化、智能化与智慧化,为智慧城市轨道交通建设和运营不断积累管理经验。

参考文献

- [1] 黄天印, 尤江, 林桓桓. 数字地铁信息资源集成研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 154.
HUANG Tianyin, YOU Jiang, LIN Huanhuan. Research on the integration of digital metro information resource[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 154.
- [2] 朱翔, 陈丽君. 地铁全自动运行系统运营场景的几点探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 228.
ZHU Xiang, CHEN Lijun. Research of operation scenarios for

metro fully automatic operation system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 228.

- [3] 尹聪聪. 城市轨道交通全自动运行线路的运营方式及运营指标要求[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 182.
YIN Congcong. Operation modes and index requirements of fully automatic operation lines in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 182.
- [4] 林佳勇, 范明涛. 智慧车站系统在车站运营中的优势分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(增刊2): 69.
LIN Jiayong, FAN Mingtao. Advantage an alysis of smart station system in station operation[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S2): 69.

· 收稿日期:2022-11-09 修回日期:2023-03-02 出版日期:2024-12-10
Received:2022-11-09 Revised:2023-03-02 Published:2024-12-10
· 通信作者:崔路瑶,工程师,cuiluyao1993@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license