

地铁列车地板铝型材结构参数的 轻量化隔声特性影响研究

李拥军 林维仁

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘要 [目的]轻量化和低噪声是当前轨道交通的发展趋势,实现地铁列车地板型材结构的轻量化低噪声设计对提高乘车舒适性具有重要意义。[方法]基于 FE-SEA(有限元-统计能量分析)混合法建立地铁列车地板铝型材结构隔声特性预测模型,将仿真与测试结果进行对比验证模型有效性,分析地板铝型材结构的筋板角度、筋板厚度、上下板厚度 4 个参数对其隔声特性的影响,并以质量定律的轻量化原则为判定标准对 4 个结构参数进行选择,确定优化结构,最终实现地板铝型材结构的轻量化声学优化。[结果及结论]结果表明,在所列举的铝型材结构参数优化结构中,选择筋板角度为 47° 、筋板厚度为 2.0 mm、上板厚度为 2.7 mm、下板厚度为 2.7 mm 时,单位面积结构质量减小 1.18 kg/m^2 ,整节车厢地板质量可减小约 70.8 kg,而计权隔声量仅减小 0.3 dB,其轻量化声学优化效果更好。可为地铁列车地板铝型材结构的轻量化降噪优化设计提供参考。

关键词 地铁列车;地板型材结构;FE-SEA;轻量化;质量定律;隔声特性

中图分类号 U270.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.020

Study on Lightweight and Sound Insulation Characteristics of Aluminum Profile Structure Parameters for Metro Train Floors

LI Yongjun, LIN Weiren

(CRRCC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Developing lightweight and low noise is a current trend in rail transit. Achieving lightweight and low-noise design of metro train floor profiles is of significant importance for improving passenger comfort. [Method] A prediction model for the sound insulation characteristics of metro train floor aluminum profile structures is established based on FE-SEA (finite element-statistical energy analysis). Simulation results are compared with test results to verify the validity of the model. The influence of four parameters of the floor aluminum profile structure—rib angle, rib thickness, upper plate thickness, and lower plate thickness—on its sound insulation characteristics of aluminum is analyzed. The light-

weight principle of the mass law is used as the criterion to determine the optimal structure by selecting the four structural parameters, ultimately achieving the lightweight and acoustically optimized floor aluminum profile structure. [Result & Conclusion] The results indicate that among the listed optimized aluminum profile structure parameters, selecting a rib angle of 47° , rib thickness of 2 mm, upper plate thickness of 2.7 mm, and lower plate thickness of 2.7 mm can reduce the structural mass by 1.18 kg/m^2 . The mass of the entire compartment floor can be reduced by approximately 70.8 kg, while the weighted sound insulation only decreases by 0.3 dB, which demonstrates a better lightweight and acoustically optimized effect. Reference is provided for the lightweight and noise reduction optimization design of aluminum profile structures for metro train floor.

Key words metro train; profile structure for floor; FE-SEA; lightweight; mass law; sound insulation characteristics

近年来,伴随着我国地铁的跨越式发展,地铁列车运行引发的振动噪声也对乘车环境造成显著影响。随着乘客对乘车舒适性要求的日益提高,地铁列车车内振动噪声问题已不容忽视。

车体结构的隔声性能在车内噪声水平的控制上起着关键作用^[1],而地铁列车地板的隔声性能对车内噪声控制有显著影响,因此,研究地铁列车地板底架结构的隔声性能是开展车内降噪控制工作的重要基础。文献[2-6]利用 FE-SEA(有限元-统计能量分析)混合法建立了高速列车铝型材地板的仿真模型,研究了铝型材腹板倾角、加强筋几何参数、面板筋板厚度等对其声振特性的影响。轨道列车轻量化是实现更高运营速度和降低能源消耗的有效途径。Wennberg、Cho 等采用蜂窝复合材料、碳纤维增强材料等来代替车体原有材料,实现车体轻量化^[7-8];Gauchia 等利用优化算法对车体结构进行了优化设计,实现车体轻量化^[9]。但盲目降低车体

质量可能会对车内噪声控制产生不利影响,因此,如何设计车体结构,实现结构的轻量化声学优化设计,是城市轨道交通发展面临的关键技术难题^[10]。

本文主要针对地铁列车地板铝型材结构的轻量化隔声性能进行研究。基于 FE-SEA (有限元-统计能量分析) 法建立地铁列车地板铝型材结构隔声特性预测模型,将仿真与测试结果进行对比,验证了模型的有效性,以低质量高隔声为优化目标;分析了底架结构的筋板角度、筋板厚度、上、下板厚度 4 个参数对质量和隔声特性的影响,并以质量定律的轻量化原则为判定标准对 4 个结构参数进行选择,以确定优化结构,最终实现地板铝型材结构的轻量化声学优化。

1 FE-SEA 混合法

本文主要采用 FE-SEA 混合法对结构的隔声和振动声辐射特性进行研究。首先,建立结构子系统的运动方程;然后,求解 SEA 子系统的能量响应;最后,结合各个子系统的能量平衡方程与扩散场互逆原理,计算子系统的位移响应。

结构子系统的运动方程可表示为:

$$D_{\text{tot}} \mathbf{Q} = \mathbf{F} + \sum_{i=1}^l f_{\text{rev},i} \quad (1)$$

式中:

\mathbf{Q} ——结构子系统的自由度;

\mathbf{F} ——作用在子系统上的外载荷列向量;

l ——组合系统中包含的 SEA 子系统的总数;

$f_{\text{rev},i}$ ——第 i 个 SEA 子系统在确定性边界处对 FE 子系统所施加的混响场载荷;

D_{tot} ——结构子系统的总动刚度矩阵,即结构子系统本身的动刚度矩阵与各个 SEA 子系统的直接场总动刚度矩阵的和。

求解式(1),可得确定性子系统的动态位移响应方程为:

$$\langle S_{\text{qq}} \rangle = D_{\text{tot}}^{-1} \left(S_{\text{ff}}^{\text{ext}} + \sum_{i=1}^l \frac{4E_i}{\pi \omega n_i} \text{Im} \{ D_{\text{dir},i} \} \right) D_{\text{tot}}^{-*} \quad (2)$$

式中:

S_{qq} ——确定性子系统位移响应;

S_{ff} ——外部激励作用在确定性子系统上的交叉力谱矩阵;

$\langle \rangle$ ——总体平均;

E_i ——第 i 个 SEA 子系统的统计能量响应;

n_i ——第 i 个子系统的模态密度;

$D_{\text{dir},i}$ ——第 i 个 SEA 子系统的直接场总动刚度矩阵。

子系统的输入功率流等于子系统输出功率流与自身耗散功率流之和且等于外部激励和子系统的输入功率流之和^[11],可得到第 i 个子系统的能量平衡方程为:

$$(M_i + h_{\text{tot},i}) \frac{E_i}{n_i} - \sum_{j=1}^l h_{ji} \frac{E_j}{n_j} = P_{\text{in},0,i} \quad (3)$$

式中:

$P_{\text{in},0,i}$ ——外部激励的输入功率流;

h_{ji} ——第 j 个子系统对第 i 个子系统的功率传递系数;

M_i ——第 i 个模态重叠因子;

E_j ——第 j 个 SEA 子系统的统计能量响应;

n_j ——第 j 个子系统的模态密度;

$h_{\text{tot},i}$ ——第 i 个子系统混响场输出能量的模态能量密度。

结合子系统的能量平衡方程,可求得各 SEA 子系统的能量响应以及位移响应。

2 数值模型

2.1 模型建立

将地铁列车底架截面选取 1 m 范围,在 Hypermesh 软件中对其进行网格划分,再沿纵向拉伸 1 m 得到 1 m × 1 m 的地板铝型材结构有限元模型。铝型材地铁列车地板截面如图 1 所示。

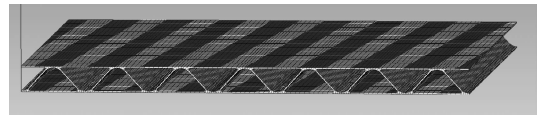


图 1 铝型材地铁列车地板截面图

Fig. 1 Cross-sectional diagram of aluminum profile for metro train floor

在该结构外侧建立空腔,并对其施加大小为 100 dB 的混响声激励,建立铝型材结构隔声特性预测模型,如图 2 所示。该模型中铝型材结构的材料属性如下:弹性模量为 7.1×10^{10} Pa,泊松比为 0.33,密度为 2700 kg/m^3 。四周定义为自由边界条件,计算频率范围为 1/3 倍频程频带 100 ~ 3150 Hz。

建立与对应结构质量相同的均质板,保证其尺

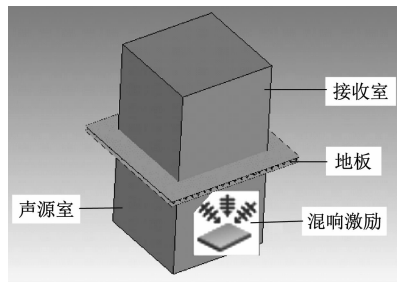


图2 地铁列车地板铝型材结构隔声特性预测模型

Fig.2 Sound insulation characteristics prediction model of aluminum profile structure for metro train floor

寸、参数及声源设置均与铝型材一致,依据质量定律的轻量化原则对于铝型材结构进行分析。

2.2 初始结构隔声结果分析

地板铝型材初始结构参数为:筋板角度为 47° 、筋板厚度为 2.6 mm 、上板厚度为 2.7 mm 、下板厚度为 2.7 mm 。通过实测和仿真计算得到隔声结果如图3所示。 R_w 为仿真计权隔声量。

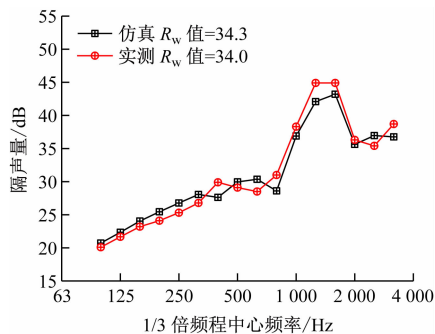


图3 初始结构隔声结果

Fig.3 Sound insulation results of the initial structure

由图3可知:在 $100\sim 3\,150\text{ Hz}$ 1/3倍频程频率范围内,仿真结果与测试结果的隔声曲线整体趋势相近;其差异较大的频率出现在 $1\,250\text{ Hz}$ 处,最大差值低于 3 dB ,且二者的 R_w 仅相差 0.3 dB 。故本文基于FE-SEA混合法理论建立的地板铝型材隔声预测模型有效,可以用作后续参数调查。

3 地板铝型材参数隔声特性分析

在初始模型的基础上,分析铝型材结构的筋板角度、筋板厚度、上下板厚度4个参数对其隔声特性的影响,以 R_w 作为隔声特性的评价指标,并以质量定律作为质量 m 的轻量化原则,对其隔声特性和质量展开优化,确定优化结构,实现铝型材结构的轻量化声学优化。

3.1 筋板角度设计

在铝型材其他结构参数不变的情况下,将筋板角度的下限、上限和间隔分别设置为 40° 、 90° 和 10° ,分析 $100\sim 3\,150\text{ Hz}$ 频率范围内,筋板角度对铝型材隔声特性的影响。筋板角度对应的有限元铝型材截面图如图4所示。由于篇幅原因,本小节仅给出筋板角度为 40° 和 90° 对应截面图。

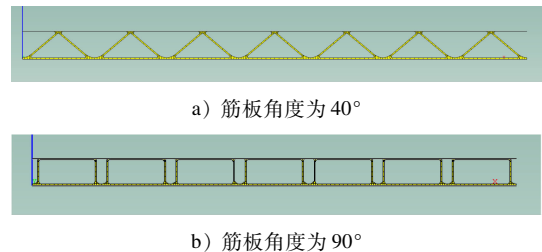


图4 不同筋板角度对应铝型材底架结构

Fig.4 Aluminum profile chassis structure with different rib angles

计算不同筋板角度对应铝型材结构的总质量和计权隔声量,并根据质量定律建立与各铝型材底架质量相同的均质板,得到不同筋板角度的铝型材底架对应均质板的 R_w ,如表1所示。其中 m 为对应型材结构每平方米的质量。

表1 不同筋板角度对应结果

Tab.1 Results corresponding to different rib angles

筋板角度/ $^\circ$	$m/(\text{kg}/\text{m}^2)$	R_w/dB	对应均质板 R_w/dB
40	25.79	34.9	29.7
47	25.74	34.3	29.7
50	26.25	33.6	29.7
60	26.55	34.1	29.7
70	26.30	34.8	29.7
80	25.64	34.6	29.7
90	24.48	35.6	29.6

以筋板角度为 40° 的型材结构为质量基准和计权隔声量基准,根据质量定律的轻量化原则,对筋板角度进行选择。如图5所示,从左至右的点分别对应以质量增序排列的筋板角度对应的型材结构,依次为 90° 、 80° 、 47° 、 40° 、 50° 、 70° 、 60° 。图5中型材结构曲线代表型材结构随质量变化的隔声量变化,均质板曲线代表型材结构对应均质板随质量变化的隔声量变化。

由图5可知:仅从声学角度来看,铝型材结构筋板角度设计为 90° 时,隔声性能最好,且轻量化效果

最好;但考虑到结构强度及安全性,筋板倾角较大时(如 80° 和 90°)结构安全性较差,在工程应用中不做设计考虑;其余角度中,从轻量化角度考虑, 47° 时轻量化效果最好。因此本文中筋板角度设计保持 47° 不变,后续还可结合工程实际及设计标准进行最优角度设计的选择。

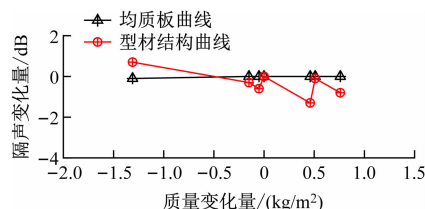


图5 不同筋板角度的型材结构和均质板的仿真结果对比
Fig.5 Comparison of simulation results for profile structures and homogeneous plates with different rib angles

3.2 筋板厚度设计

在铝型材其他结构参数不变的情况下,将筋板厚度的下限、上限和间隔分别设置为1 mm、5 mm和1 mm,分析100~3150 Hz频率范围内筋板厚度对铝型材隔声特性的影响。计算不同筋板厚度对应的型材结构和均质板的结果,如表2所示。

表2 不同筋板厚度对应结果

Tab.2 Results corresponding to different rib plate thicknesses

筋板厚度/mm	$m/(kg/m^2)$	R_w/dB	对应均质板 R_w/dB
1.0	19.20	33.5	29.6
2.0	24.56	34.0	29.6
2.6	25.74	34.3	29.7
3.0	27.38	34.6	29.6
4.0	31.47	34.9	29.7
5.0	35.56	34.8	30.0

以筋板厚度1 mm的型材结构为基准对筋板厚度进行选择。如图6所示,从左至右的点分别对应以厚度增序排列的筋板厚度对应的铝型材底架,依次为1~5 mm。

由图6可知:铝型材结构筋板厚度设计为4 mm时隔声性能最好,但其质量过大,轻量化效果太差;从轻量化角度考虑,筋板厚度为2.0~2.6 mm时,隔声量增大0.3 dB,且与初始结构相比质量减小,可选择2.0~2.6 mm进行优化设计,因此本文筋板厚度设计为2 mm来进行优化。

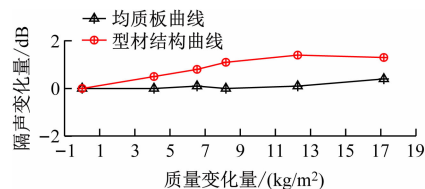


图6 不同筋板厚度的型材结构和均质板仿真结果对比
Fig.6 Comparison of simulation results for profile structures and homogeneous plates with different rib plate thicknesses

3.3 上板厚度设计

在铝型材其他结构参数不变的情况下,将上板厚度的下限、上限和间隔分别设置为1 mm、5 mm和1 mm,分析100~3150 Hz频率范围内上板厚度对铝型材隔声特性的影响。计算不同上板厚度对应的型材结构和均质板的结果,如表3所示。

表3 不同上板厚度对应结果

Tab.3 Results corresponding to different upper plate thicknesses

筋板厚度/mm	$m/(kg/m^2)$	R_w/dB	对应均质板 R_w/dB
1.0	20.62	34.3	29.6
2.0	23.63	34.2	29.5
2.7	25.74	34.3	29.7
3.0	26.64	34.5	29.7
4.0	29.65	35.0	29.8
5.0	32.66	35.7	29.7

以上板厚度1 mm的铝型材为基准对筋板厚度进行选择。如图7所示,从左至右的点分别对应以厚度增序排列的上板厚度对应的铝型材底架,依次为1~5 mm。

由图7可知:铝型材结构上板厚度设计为5 mm时隔声性能最好,但其质量过大,轻量化效果太差;2 mm时隔声性能最差;从轻量化角度考虑,筋板厚度为2.7~3.0 mm时,其隔声量增大0.2 dB,且与初始结构相比质量增加较小,可选择2.7~3.0 mm进行优化设计。因此,本文中上板厚度设计保持2.7 mm不变。

3.4 下板厚度设计

在铝型材其他结构参数不变的情况下,将下板厚度的下限、上限和间隔分别设置为1 mm、5 mm和1 mm,分析100~3150 Hz频率范围内下板厚度对铝型材隔声特性的影响。计算不同下板厚度对应的型材结构和均质板的结果,如表4所示。

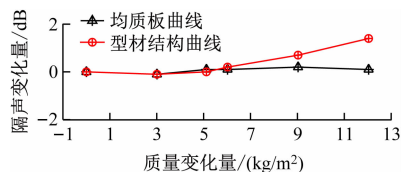


图7 不同上板厚度的型材结构和均质板仿真结果对比
Fig.7 Comparison of simulation results for profile structures and homogeneous plates with different upper plate thicknesses

表4 不同下板厚度对应结果

Tab.4 Results corresponding to different lower plate thicknesses

下板厚度/mm	$m/(kg/m^2)$	R_w/dB	对应均质板 R_w/dB
1.0	20.71	33.3	29.6
2.0	23.67	34.0	29.5
2.7	25.74	34.3	29.7
3.0	26.63	34.3	29.7
4.0	29.59	35.2	29.8
5.0	32.55	35.6	29.7

以下板厚度 1 mm 的铝型材为基准对筋板厚度进行选择。如图 8 所示,从左至右的点分别对应以厚度增序排列的下板厚度对应的铝型材底架,依次为 1 ~ 5 mm。

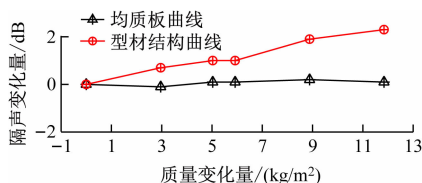


图8 不同下板厚度的型材结构和均质板仿真结果对比
Fig.8 Comparison of simulation results for profile structures and homogeneous plates with different lower plate thicknesses

由图 8 可知:铝型材结构下板厚度设计为 5 mm 时,隔声性能最好,但其质量过大,轻量化效果太差;从轻量化角度考虑,筋板厚度为 2.0 ~ 2.7 mm 时,其隔声量增大 0.3 dB,且与初始结构相比质量减小,可选择 2.0 ~ 2.7 mm 进行优化设计。因此本文中下板厚度设计保持 2.7 mm 不变。

3.5 优化前后隔声特性对比

以上文 4 个最优参数建立最终优化结构,其与初始结构的 1/3 倍频程隔声曲线对比如图 9 所示。

由图 9 可知:优化后铝型材结构质量为 24.56 kg/m² (优化前为 25.74 kg/m²),较优化前减小 1.18

kg/m²; R_w 值为 34.0 dB (优化前为 34.3 dB),较优化前减小 0.3 dB。从隔声效果来看,优化后铝型材结构的隔声量在 500 ~ 630 Hz 略微降低,但在 1 250 ~ 1 600 Hz 频段有明显提高。

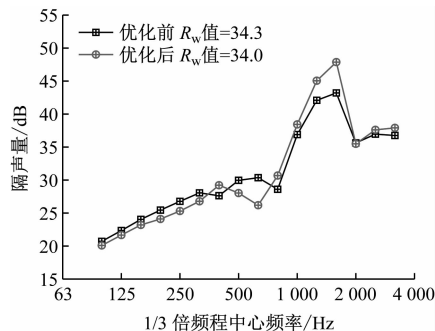


图9 优化前后的隔声结果对比
Fig.9 Comparison of sound insulation results before and after optimization

由于整节车厢地板总面积约为 60 m²,优化后结构质量减小 1.18 kg/m²,可知,优化后整节车厢地板质量可减小约 70.8 kg,轻量化效果明显变好,且其隔声量仅下降 0.3 dB,隔声性能影响很小。综上所述,优化结构整体优化效果变好。

4 结语

本文基于 FE-SEA 混合法,建立地铁列车地板铝型材结构隔声预测模型,并基于试验验证其有效性。以低重量高隔声为优化目标,分析 4 个铝型材结构参数对其隔声性能的影响,并依据质量定律的轻量化原则进行设计,确定优化结构,得到如下结论:

1) 在所列举的地板铝型材参数优化结构中,选择筋板角度为 47°,筋板厚度为 2 mm,上板厚度为 2.7 mm,下板厚度为 2.7 mm 的铝型材结构,其轻量化声学优化效果更好。

2) 以 4 个最优参数建立最终优化结构,将其与初始结构的质量和隔声量进行对比可知:优化后结构质量减小 1.18 kg/m²,整节车厢地板质量可减小约 70.8 kg,轻量化效果明显变好,且其隔声量仅下降 0.3 dB,隔声性能影响很小。因此,优化结构整体优化效果变好,实现了结构的轻量化声学优化。

参考文献

- [1] 朱自未,李牧晶,成功,等. 高速列车噪声源声功率与速度的函数关系[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2): 290.

- ZHU Ziwei, LI Muxiao, CHENG Gong, et al. Functional relationships between sound powers radiated from noise sources of high-speed train and its speed[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(2): 290.
- [2] COTONI V, LANGLEY R S, SHORTER P J. A statistical energy analysis subsystem formulation using finite element and periodic structure theory[J]. Journal of Sound Vibration, 2008, 318(4/5): 1077.
- [3] KIM S H, SEO T G, KIM J T, et al. Sound-insulation design of aluminum extruded panel in next-generation high-speed train[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 2011, 35(5): 567.
- [4] ZHANG Y, THOMPSON D, SQUICCIARINI G, et al. Sound transmission loss properties of truss core extruded panels[J]. Applied Acoustics, 2018, 131: 134.
- [5] 沈火明, 张玉梅, 肖新标, 等. 高速列车波纹外地板低噪声优化设计[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(2): 65.
- SHEN Huoming, ZHANG Yumei, XIAO Xinbiao, et al. Low-noise optimization design of external corrugated floor for high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(2): 65.
- [6] 刘天熙, 张学飞, 王瑞乾, 等. 高速列车侧墙铝型材降噪研究[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(1): 165.
- LIU Tianxi, ZHANG Xuefei, WANG Ruiqian, et al. Noise reduction of side wall aluminum profiles of high-speed trains[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(1): 165.
- [7] WENBERG D, STICHEL S. Multi-functional design of a composite high-speed train body structure[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 50(3): 475.
- [8] CHO J G, KOO J S, JUNG H S. A lightweight design approach for an EMU carbody using a material selection method and size optimization[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(2): 673.
- [9] GAUCHIA A, DIAZ V, BOADA M J L, et al. Torsional stiffness and weight optimization of a real bus structure[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(1): 41.
- [10] WENBERG D. Light-weighting methodology in rail vehicle design through introduction of load carrying sandwich panels[D]. Stockholm: Kth Royal Institute of Technology, 2011.
- [11] 张捷, 肖新标, 王瑞乾, 等. 高速列车铝型材声振特性测试及等效建模[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(3): 545.
- ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, WANG Ruiqian, et al. Vibro-acoustic characteristics measurement and equivalent modeling of aluminum extrusion of high-speed trains[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(3): 545.
- 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-02 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10
· 通信作者:李拥军,正高级工程师,liyongjunnprc@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

北京城市轨道交通运营里程将超 880 km

2024年4月10日,北京地铁3号线一期、地铁12号线等3条年内计划通车的新线进入设备安装调试阶段。在北京地铁12号线三元桥站轨行区内,列车一声鸣笛后,缓缓驶出站台。作为线路正式开通前最重要的流程,12号线将在至少3个月的空载试运行期内,全面检验列车、信号、通信等各系统,特别是自动驾驶系统匹配运行能力。将先后开展新电客车进场接收、冷热滑试验、电客车上线调试、设备系统综合联调、全自动运行系统联合调试等工作。目前全自动运行系统联调通过率已达80%,全线初步实现了无人驾驶。据悉,包括12号线在内,今年年内北京还将实现3号线一期、昌平线南延一期剩余段通车,届时北京城市轨道交通运营里程将超880 km。交通枢纽方面,丰台火车站交通枢纽将接入北京地铁10号线、16号线2条线路,规划20条公交线路、200个出租汽车蓄车位和3000个自行车停车位,设置配套服务及便民服务功能,充分体现站城一体的发展理念。通州城市副中心站综合交通枢纽计划接入京唐城际高铁、地铁平谷线等8条不同制式的轨道交通线路,建成后将成为亚洲最大的地下综合交通枢纽。

(摘编自交通运输部网站)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821