

高速铁路动车组主断路器转换阀射流噪声模拟分析 及其降噪措施*

张超¹ 姜赞² 王俊峰² 刘郑森¹ 王俊勇¹

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都; 2. 北京中车赛德铁道电气科技有限公司, 100176, 北京)

摘要 [目的] 高速铁路动车组主断路器转换阀的射流噪声非常高, 严重影响了旅客的乘坐舒适性, 因此有必要研究有效的降噪措施。[方法] 进行了转换阀射流噪声的现场试验, 测得其噪声高达 96 dB, 且呈现明显的间歇性与脉冲性。采用大涡模拟方法建立了转换阀射流噪声仿真数学模型, 选取四种不同形状的喷口, 计算得到了这四种喷口的流场速度云图。将射流流场计算结果导入 LMS. Virtual. Lab 软件, 采用声学边界元方法模拟计算这四种喷口的射流声场, 并将计算得到的四种喷口 1/3 倍频程频谱的模拟值与试验实测值进行对比。选取了既有的四种工业消声器, 以及研发的新型结构复合材料消声器, 对转换阀的降噪效果进行测试。[结果及结论] 转换阀因断开主断路器而产生射流噪声。转换阀射流噪声与排气口形状密切相关, 射流噪声为中高频噪声。五种消声器均能显著降低转换阀射流噪声, 新型结构复合材料消声器的降噪效果最好, 其降噪量可达 20 dB。

关键词 高速铁路; 动车组; 主断路器; 转换阀; 射流噪声; 降噪措施

中图分类号 U266:TB533⁺2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.04.017

Simulation Analysis of Jet Noise from High-speed Railway EMU Main Circuit Breaker Switching Valve and Noise Reduction Measures

ZHANG Chao¹, JIANG Zan², WANG Junfeng², LIU Zhengsen¹, WANG Junyong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Beijing CRRC CED Railway Electric Tech. Co., Ltd., 100176, Beijing, China)

Abstract [Objective] The jet noise generated by the main circuit breaker switching valve of high-speed railway EMU is excessively high, which seriously affects passenger comfort. Therefore, it is essential to study effective noise reduction measures. [Method] Field experiments are conducted to measure the jet noise of the switching valve, revealing a noise

level as high as 96 dB with noticeable intermittency and pulsation. Using LES (large eddy simulation), a mathematical model for simulating the jet noise of the switching valve is established. Four different nozzle shapes are selected, and their flow velocity distribution nephograms are computed. The calculated jet flow results are imported into LMS. Virtual. Lab software, and the acoustic boundary element method is employed to simulate the jet noise fields of the four nozzles. The simulated 1/3-octave frequency spectrum values for them are compared with experimentally measured values. Finally, four existing industrial mufflers and a developed new structural composite material muffler are selected and tested for their noise reduction effectiveness on the switching valve. [Result & Conclusion] Generated by main circuit breaker disconnection, the jet noise of the switching valve is closely related to the shape of the exhaust port and falls into the mid-to-high-frequency noise range. All five mufflers can significantly reduce the jet noise from the switching valve, with the new structural composite material muffler demonstrating the best noise reduction effect, achieving a reduction of up to 20 dB.

Key words high-speed railway; EMU; main circuit breaker; switching valve; jet noise; noise reduction measures

高速铁路动车组的运行噪声严重影响了旅客的乘坐舒适性, 已成为亟需解决的关键问题^[1]。主断路器是动车组主电路的高压电气开关, 通过转换阀进行开闭控制。主断路器断开时, 传动气缸的压缩空气由转换阀排气口排出, 此时会产生很大的排气射流噪声。

射流噪声是压缩空气从喷口喷出后, 高速气流与周围环境空气产生剧烈摩擦及相互融合而形成的空气动力性噪声^[2-3]。射流噪声的产生机理十分复杂, 目前主要通过数值仿真方法进行研究^[4]。而在工业生产中, 气动机械的排气射流噪声十分普遍, 主

* 国家重点研发计划项目(2016YFB1200401-102B)

要采用消声器对其进行降噪处理^[5]。

本文基于流体动力学与声学理论,对转换阀产生的射流噪声进行研究。首先,进行转换阀射流噪声试验,分析其噪声的成因及特点;其次,采用大涡模拟与声学边界元方法,建立转换阀射流噪声仿真模型,研究排气口形状对射流噪声的影响;最后,为降低转换阀射流噪声,设计了新型结构复合材料消声器,并通过试验检验其降噪效果。

1 转换阀射流噪声试验

图1为转换阀射流噪声测量装置实物图。如图1所示,气源供给500 kPa的压缩空气,采用电信号控制该气路的通断;气路断开时,压缩空气经转换阀排气口排出,以此模拟转换阀的排气工况;噪声测量使用AWA6228+型声级计,测点距离声源1 m。声级计与电脑相连,可以实时记录噪声的测量结果。

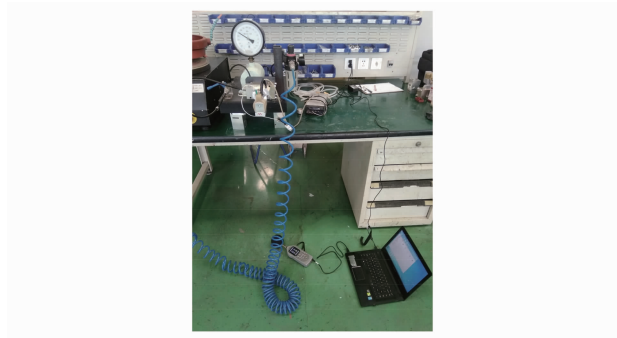


图1 转换阀射流噪声测量装置实物图

Fig. 1 Photo of switching valve jet noise measurement device

转换阀射流噪声测量结果如图2所示。由图2可知:转换阀射流噪声高达96 dB。

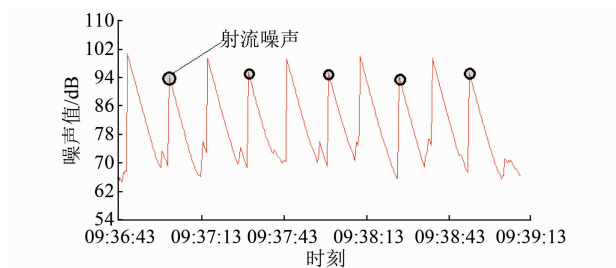


图2 转换阀射流噪声测量结果截图

Fig. 2 Screenshot of switching valve jet noise measurement results

转换阀的射流噪声因主断路器断开而产生,其特点与主断路器工作特性密切相关:①主断路器使用500 kPa的压缩空气,与环境气压的比值约为5,这使得排气口处气流速度达到声速,排气过程呈阻塞喷注状态。②主断路器断开时间约为30 ms,排

气时间极短,排气过程为瞬态过程。③动车组每次过分相前,主断路器都需断开,而动车组过分相的间隔时间约为4~6 min。由此可知,转换阀两次极短时间(30 ms)射流噪声间的时间间隔较长(4~6 min);转换阀每次产生的射流噪声互不影响,呈现出明显的间歇性和脉冲性。

2 转换阀射流噪声仿真

2.1 仿真模型及边界条件

转换阀射流典型结构是压缩空气由喷口排入大气,其计算域分为喷口和外流场两部分^[6-7]。仿真计算时:①以喷口入口为计算域入口,采用压力入口作为边界条件,此时压力取为500 kPa;②以外流场边界为计算域出口,采用压力出口作为边界条件,此时压力取大气压;③喷口壁面采用标准壁面条件。

仿真时,首先使用Reynolds Stress模型进行稳态计算,得到收敛的稳态计算结果。然后以稳态计算结果作为瞬态流场计算的初始条件,使用LES(大涡模拟)方法进行瞬态计算。为研究喷口结构对转换阀射流噪声的影响,本文设置了四种喷口结构,如表1所示。

表1 四种喷口结构

Tab. 1 Four nozzle structures

喷口	喷口左视图	喷口主视图
A		
B		
C		
D		

注:表中数字的单位均为mm。

表1中:喷口A模拟既有转换阀排气口结构;喷口B为圆角矩形截面的直喷口;喷口C为圆形截

面的直喷口;喷口 D 为圆形直喷口,截面面积为喷口 C 截面面积的 2 倍。

这四种喷口的结构流场均采用圆柱形,其左视图及主视图如图 3 所示。

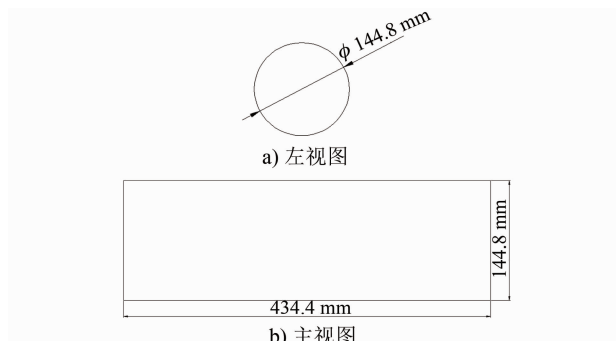


图 3 四种喷口的流场空间

Fig. 3 Flow field space for the four nozzles

为获得准确的计算结果,进一步对四种喷口的流场网格进行网格无关性检验。以喷口 A 为例,在射流中心轴线上取 $A_1(100,0,0)$ 、 $A_2(200,0,0)$ 、 $A_3(300,0,0)$ 三个点,在三种网格数量(2 万个、6 万个及 10 万个)下分别进行射流仿真计算,得到这三个点的速度值如图 4 所示。从图 4 中可知:网格数量从 2 万个增加到 10 万个时,三个点的速度值变化很小。这说明三种网格数量对计算结果的影响很小,可认为 2 万个的网格数量已达到网格无关,因此本文将计算网格数量定为 2 万个。

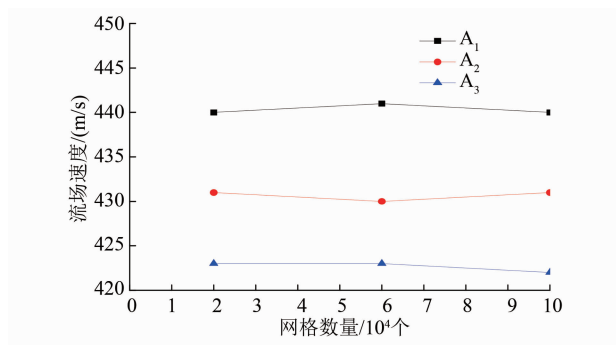
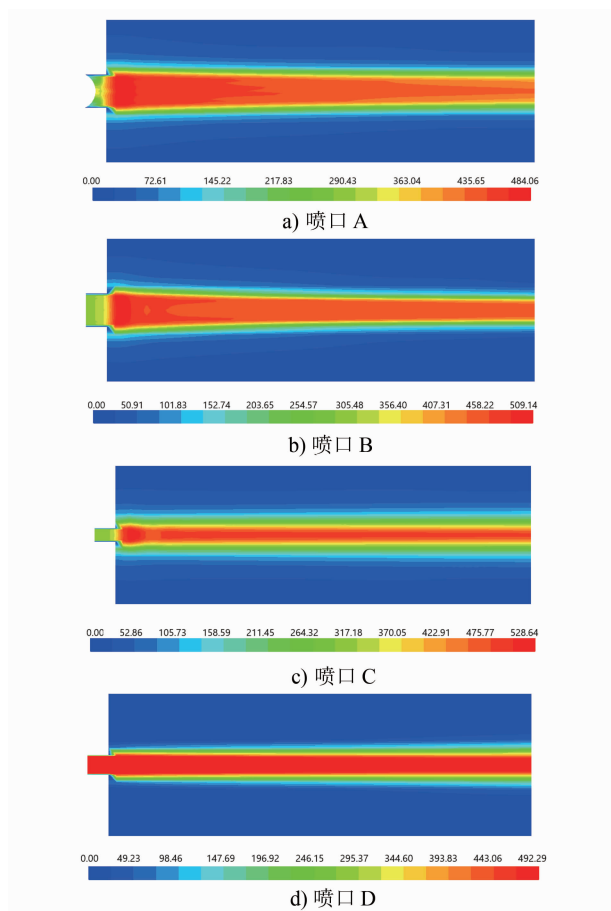


图 4 喷口 A 三个测点在不同网格数量下的流场速度

Fig. 4 Flow field velocities at three measuring points of nozzle A with different mesh quantities

2.2 射流流场仿真结果

使用 LES 方法计算这四种喷口的射流流场,得到不同喷口的流场速度云图如图 5 所示。由图 5 可知:这四种喷口的射流流场结构相似,射流流场主要包括射流核心区、射流边界层两部分。其中:射流核心区位于射流中央,核心区内的气流速度基本不变,且明显高于周围流体的速度;核心区外侧为射流边



注:流场速度的单位为 m/s 。

图 5 四种喷口的流场速度云图

Fig. 5 Nephogram of flow field velocity for the four nozzles 边界层,边界层内气流与周围环境空气发生了强烈的剪切作用,使得边界层很快转化为湍流状态,同时带动周围的静止空气一起运动。

由图 5 还可看出,因喷口结构的不同,其流场形态有所差异。比较流场形态差异较大的喷口 A 与喷口 D 可知:喷口 A 的射流核心区较短,射出气流很快与周围空气混合;喷口 D 的射流核心区较长,在计算域内一直保持较高的射流强度。考虑到喷口 A 模拟的是既有的转换阀排气口,因此可以得到以下结论:与其他形状规则的喷口相比,既有转换阀排气口因其形状特殊,削弱了射流流场的强度。

2.3 射流声场仿真结果

使用 LMS Virtual. Lab^[8] 软件对射流声场进行计算。将射流流场计算结果导入软件,采用声学边界元方法模拟计算这四种喷口的射流声场。将计算得到四种喷口 1/3 倍频程频谱的模拟值与试验实测值进行对比,其结果如图 6 所示。

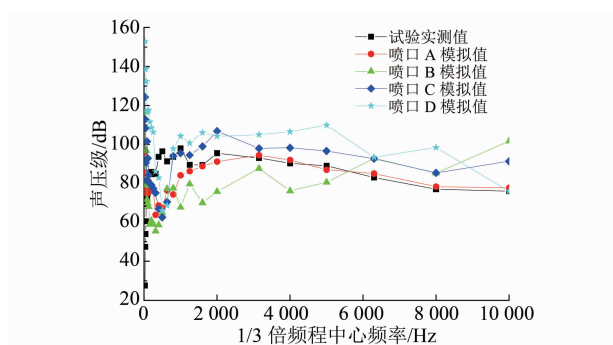


图6 四种喷嘴1/3倍频程频谱模拟值与试验实测值的对比
Fig. 6 Comparison between 1/3 octave spectrum simulated values of four nozzles and experiment measured values

图6中,将喷嘴A的1/3倍频程频谱模拟值与试验实测值进行对比可知:二者在中高频段内的相符性较好,但在低频段的差异较大。相比于仿真结果,试验实测值得到的频谱向低频段移动。考虑到试验时转换阀断开过程不仅有排气的射流噪声,还有转换阀的振动噪声,故可以推断转换阀的振动噪声影响了射流的频谱特征,使其向低频段移动。

从图6还可看出,这四种喷嘴的频谱具有相似性,射流噪声均具有明显的宽频特性,且集中于中高频段。比较这四种喷嘴的声压级可知,射流强度较高的喷嘴D声压级较高,射流强度较低的喷嘴A声压级较低。其原因主要有两个:①在转换阀排气过程中,高速气流瞬时排入大气,成为变化的气体质量源,即产生了单极子声源;②高速气流与周围的静止空气发生剧烈的相互作用,流场内气体的流速和压强快速发生变化,即产生了四极子声源。

3 转换阀降噪措施

3.1 选用既有的四种工业消声器

既有研究表明,在排气口处安装消声器,能够有效地降低射流噪声^[9]。本文首先选用工业中常用的四种消声器(见图7),对转换阀射流噪声进行降噪处理。四种消声器实物图如图8所示,将四种消声器分别安装于转换阀排气口,用以测量射流噪声。

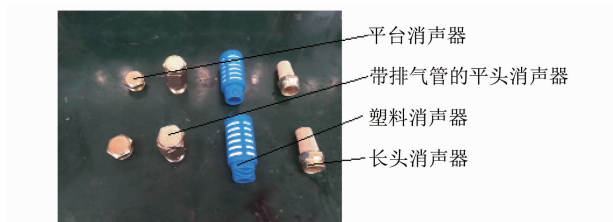


图7 选用的四种消声器实物图

Fig. 7 Photo of four types of mufflers selected

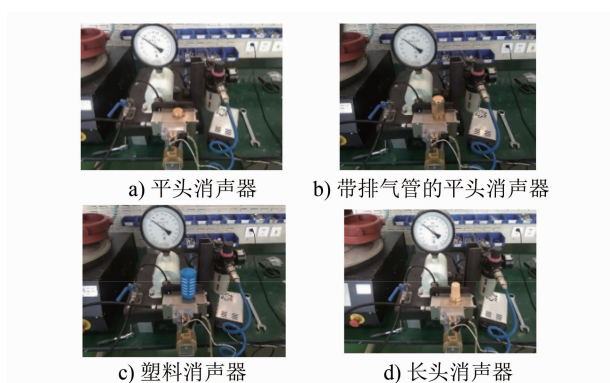


图8 四种消声器的降噪试验装置实物图

Fig. 8 Photos of noise reduction test device of four mufflers

3.2 研发新型结构的复合材料消声器

为更有效地降低转换阀射流噪声,本文研发了新型结构的复合材料消声器。该消声器由内吸音棉、内孔网、外孔网、外吸音棉、外壳、下盖及铜消声器等组成,其结构如图9所示。

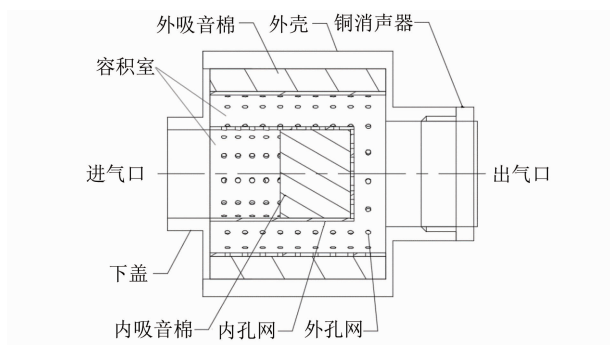


图9 新型结构复合材料消声器的结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of a new structural composite material muffler

图9中:①转换阀排气时,气流从左侧的进气口进入,从右侧的出气口排出。②内孔网为不锈钢冲孔网,冲孔直径为1.5 mm的小孔既能保证良好的冲孔工艺性,还不会发生阻塞,可以避免产生较大的排气阻力。③内孔网有两个作用,一是基于小孔喷注原理,使射流噪声频率转移到人耳不敏感的高频区;二是离散气流的冲击力可以缓和气流对消声器的强烈冲击,同时可将气流引至消声性能良好的外吸音棉。④容积室有两个作用,一是降压减速作用,容积室的体积较大,有存储气体的能力,可使气流速度降低,吸声材料能更好地吸收噪声;二是滤波吸声作用,容积室壁面铺设吸音棉,能很好地吸收高频噪声。⑤在出气口处装有铜消声器,用于进一步过滤排出气流,减小排气压力与流速,降低出气口处的噪声。

在选材方面,主要使用金属材料与吸音材料。为保证消声器具有一定的强度和刚度,消声器的外壳、下盖均采用铝材。为确保具有良好的吸音性能,吸音棉采用泡沫塑料吸音材料。泡沫塑料吸音材料具有许多微小的孔洞,孔洞之间相互连接。噪声传播到材料表面时,孔洞中的空气与孔壁的纤维发生振动,在黏滞力与摩擦力作用下,可将声能转换为热能。同时,泡沫塑料吸音材料在制作过程中加入了稳定剂、催化剂等辅助材料,使之具有阻燃、隔热、耐腐蚀等优良性能。新型结构复合材料消声器的试验装置实物图如图 10 所示。

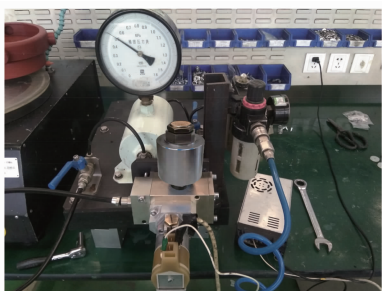


图 10 新型结构复合材料消声器的试验装置实物图

Fig. 10 Photo of test device for the new structural composite material muffler

3.3 试验结果分析

经过试验,既有四种工业消声器及本文研发的新型结构复合材料消声器的降噪效果对比情况如图 11 所示。

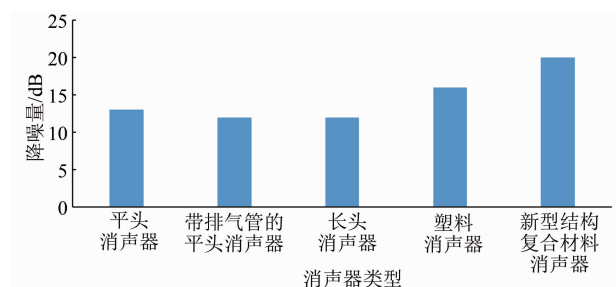


图 11 五种消声器的降噪效果对比

Fig. 11 Comparison of the noise reduction effects of five types of mufflers

由图 11 可知,四种工业消声器及新型结构复合材料消声器均能显著降低射流噪声,且降噪效果与消声器类别相关:

1) 平头消声器、带排气管的平头消声器及长头消声器属于排气放空消声器,使用铜烧结材料。其降噪原理为将金属铜烧结为带有丝米级微孔的颗粒,利用小孔扩散原理将排气气流在细小孔隙中分成许多小气流,以此减小排气气流与周围空气的剪

应力,进而减小湍流噪声。试验结果显示,这三种消声器的降噪效果相近,平头消声器的降噪量为 13 dB,带排气管的平头消声器及长头消声器的降噪量均为 12 dB。

2) 塑料消声器属阻性消声器,其降噪原理为利用多孔材料作为声衬,声波在多孔材料中传播时,通过摩擦将声能转换为热能。塑料消声器的降噪量为 16 dB。

3) 新型结构复合材料消声器的降噪量为 20 dB。该消声器综合了排气放空消声器和阻性消声器的优点,其降噪效果最好。

4 结语

本文通过对高速铁路动车组主断路器转换阀的射流噪声进行研究,得到以下结论:

1) 转换阀因断开主断路器而产生射流噪声,其噪声值高达 96 dB,且呈现明显的间歇性和脉冲性。

2) 转换阀射流噪声与排气口形状密切相关。既有转换阀排气口因其特殊的形状,削弱了射流强度,且在一定程度上降低了射流噪声。另外,经频谱分析得到,转换阀射流噪声具有明显的宽频特性,且集中于中高频段。

3) 排气放空消声器、阻性消声器及本文研发的新型结构复合材料消声器均能显著降低转换阀的射流噪声。其中,本文研发的新型结构复合材料消声器的降噪效果最好,其降噪量可达 20 dB。

参考文献

- [1] 李明高. 动车组噪声控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
LI Minggao. Noise control technology of EMU [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [2] VISWANATHAN K, SHUR M L, SPALART P R, et al. Comparisons between experiment and large-eddy simulation for jet noise[J]. AIAA Journal, 2007, 45(8): 1952.
- [3] 马文 E. 戈德斯坦. 气动声学[M]. 闫再友, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014.
GOLDSTEIN E M. Aeroacoustics[M]. YAN Zaiyou, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [4] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [5] 李靖祥, 赵升吨. 气缸排气噪声的时频域特性及控制研究综述[J]. 精密成形工程, 2015, 7(2): 14.

(下转第 99 页)

能大为提升。此优化方案大大提高了办理保护区段的灵活性,提升了列车运营的效率。

参考文献

- [1] 张大涛. 城市轨道交通信号系统保护区段设置的研究[J]. 控制与信息技术, 2020(2): 85.
ZHANG Datao. Research on protection section setting of urban rail transit signaling system[J]. Control and Information Technology, 2020(2): 85.
 - [2] 孟军, 尹逊政, 李亮. CBTC 系统中保护区段的计算与优化[J]. 铁路计算机应用, 2015, 24(3): 50.
MENG Jun, YIN Xunzheng, LI Liang. Computing and optimization of protection section in CBTC System[J]. Railway Computer Application, 2015, 24(3): 50.
 - [3] 陈虹. CBTC 中联锁对保护进路分类及处理方法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15(8): 47.
CHEN Hong. Classification and treatment of overlap protection route by interlocking subsystem of CBTC system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(8): 47.
 - [4] 刘江, 谢鲲. CBTC 系统在车站保护区段的解锁优化方案[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 55.
LIU Jiang, XIE Kun. Optimum scheme of overlap releasing in urban rail transit CBTC system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(8): 55.
 - [5] 宁滨, 刘朝英. 中国轨道交通列车运行控制技术及应用[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 1.
NING Bin, LIU Chaoying. Technology and application of train operation control system for China rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 1.
 - [6] 刘会明, 高翔, 刘明霞. 互联互通的 CBTC 系统中 ATS 接口实现方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(增刊1): 10.
LIU Huiming, GAO Xiang, LIU Mingxia. Implementation of ATS interface in interconnection and interoperable CBTC system[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(S1): 10.
 - [7] 何占元, 阴佳腾, 王明主. 基于线性规划模型的城轨列车运行图调整策略[J]. 太原科技大学学报, 2019, 40(4): 296.
HE Zhanyuan, YIN Jiateng, WANG Mingzhu. Urban rail train diagram adjustment strategy based on linear programming model[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2019, 40(4): 296.
 - [8] 王婵婵, 陈菁菁. 城市轨道交通列车延误时多线换乘站列车跳停方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(12): 69.
WANG Chanchan, CHEN Jingjing. On the skip-stop schemes at rail transit transfer station in case of train delay[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(12): 69.
- 收稿日期:2021-09-26 修回日期:2022-01-04 出版日期:2024-04-10
Received:2021-09-26 Revised:2022-01-04 Published:2024-04-10
• 通信作者:李洁,高级工程师, ljbzx029@126.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 94 页)
- LI Jingxiang, ZHAO Shengdun. Research review of pneumatic exhaust noise time-frequency characteristics and suppression control[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(2): 14.
 - [6] 比斯, 汉森. 工程噪声控制: 理论和实践[M]. 邱小军, 于森, 刘嘉俊, 译. 北京: 科学出版社, 2013.
BEES D A, HANSEN C H. Engineering noise control—theory and practice[M]. QIU Xiaojun, YU Miao, LIU Jiajun, trans. Beijing: Science Press, 2013.
 - [7] 刘斌. Fluent 19.0 流体仿真从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
LIU Bin. Fluent 19.0 fluid simulation from entry to mastery [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
 - [8] 詹福良, 徐俊伟. Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
ZHAN Fuliang, XU Junwei. Virtual. Lab Acoustics: acoustics simulation calculation from introduction to mastery [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013.
 - [9] 李靖祥, 赵升吨, 钟斌, 等. 基于时频分析的非稳态排气噪声辐射特性研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50(1): 91.
LI Jingxiang, ZHAO Shengdun, ZHONG Bin, et al. Study on radiation characteristics of unsteady exhaust noise based on time-frequency analysis [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2015, 50(1): 91.
- 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10
• 第一作者:张超,硕士研究生, 2437300013@qq.com
通信作者:王俊勇,教授, sfswjy@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