

地铁列车客室通风的数值仿真研究

王维斌 陈大伟 姚拴宝 宋军浩

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的: 为了对某地铁列车客室空调通风风道及客室空间的气流组织分布情况进行评估, 需要采用仿真分析手段, 在列车风道设计阶段对客室空间流场及温度场分布情况进行分析。方法: 采用 Star-CCM + 软件, 建立包含送风道、回风道、导流结构及内装构成风道结构, 以及风道内部的线束、排水管、门机构、电器箱, 客室内座椅及门窗等在内的三维几何模型, 应用多面体网格离散计算域, 对风道及客室典型截面的空间流线、速度场、压力场及温度场等进行综合仿真分析。结果及结论: 送风道送风均匀, 具有良好的导流及流量分配作用。回风道内门机构、电器箱等部件的存在, 减小了回风面积, 致使局部风速增大。客室空间气流组织分布均匀。客室内部微正压, 温度分布均匀。空调通风系统整体技术方案满足工程设计要求。

关键词 地铁列车; 空调通风; 风道; 数值仿真

中图分类号 U270.38⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.025

Numerical Simulation of Metro Train Passenger Compartment Ventilation

WANG Weibin, CHEN Dawei, YAO Shuanbao, SONG Junhao

Abstract Objective: To evaluate the airflow organization and distribution conditions in the air-conditioning ventilation air ducts and space of a metro train passenger compartment, it is necessary to adopt simulation analysis method for analyzing and assessing the spatial flow field and temperature field in passenger compartment during train air duct design phase. Method: The Star-CCM + software is employed to establish a 3D geometric model that includes the supply air duct, return air duct, flow control structures, interior components of the duct structure, the wiring harnesses, drainage pipes, door mechanisms, electrical enclosures inside ducts, and compartment interior elements such as seats, doors and windows. The simulation utilizes a polyhedral mesh to discretize the computational domain and conducts comprehensive simulation analysis of spatial streamlines, velocity fields, pressure fields, and temperature fields for the typical cross-sections of ducts and compartment. Result & Conclusion: The supply air duct provides uniform air distribution and performs well in guiding and allocating airflow. The presence of components such as door mechanisms and electrical enclosures in the return air duct reduces the effective area, resulting in increased local airflow velocity. The spatial airflow organization and distribution in compartment are uniform. The compartment interior maintains a slight positive pressure, and the temperature distribution is uniform. The overall technical solution of the air-conditioning and ventilation system meets the engineering design requirements.

Key words metro train; air-conditioning ventilation; air duct; numerical simulation

Author's address CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

地铁列车客室空调通风系统主要由空调机组和风道组成, 气流需要通过送风道向客室内送风, 通过回风道将客室内部分气流回风到空调机组^[1]。地铁车辆风道设计过程中有时会将内装构成风道的一部分, 而送风道、回风道设计存在车辆部件包含在风道内部的情况, 从而增加风道的阻力。为了对某地铁列车客室空调通风风道及客室空间的气流组织分布进行系统研究, 需要采用仿真分析手段, 在列车风道设计阶段对客室空间流场及温度场分布情况进行分析及评估。

目前计算流体力学仿真技术已在风道及客室通风系统设计中得到广泛应用, 可以在设计方案初期通过可视化的仿真分析, 初步评估风道及客室空间速度场、压力场及温度场的分布情况。并可根据仿真计算结果制作风道样件, 进行试验测试, 从而提升研发效率, 降低研发成本^[2]。本文采用 Star-CCM + 软件建立数值仿真模型, 并针对各部位, 完成网格划分、边界设置、仿真计算及结果分析等。

1 建立数值仿真模型

1.1 几何模型

为真实反映地铁车辆风道及客室空间内的流

场特征,需保留并适当简化对流场影响较大的模型结构及细节特征。

在构建送风道几何模型的过程中,保留并适当简化了司机室送风道、主送风道静压腔、送风道内导流结构及内装构成风道结构等。

在构建回风道几何模型的过程中,保留并适当简化了主回风道、回风口挡板,以及风道内部的线束、排水管、门机构及电器箱等^[3]。

在客室空间内,保留并适当简化了座椅、扶手及门窗等部件,省略了安装固定结构等对流场影响不大的部件。图1为最终简化处理后的各主要部位的仿真几何模型。其中,客室空间整体长约23 m,宽约3 m,高约2 m,主送风道长约20 m。

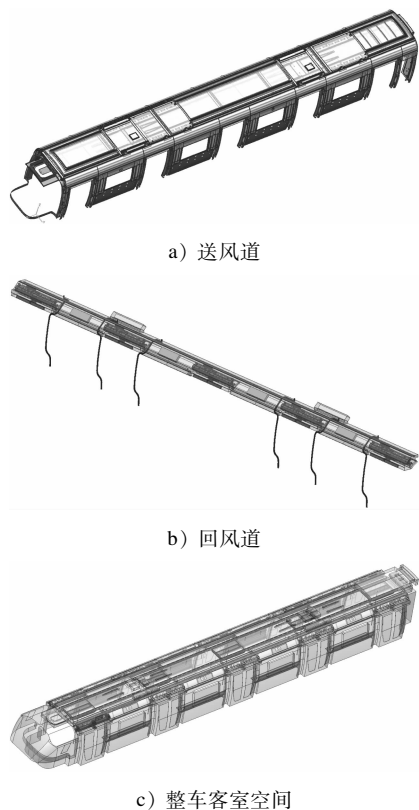


图1 主要部位三维几何模型

Fig.1 3D geometric model of main parts

1.2 模型的网格划分

运用 Star-CCM + 软件自带的网格处理模块,进行风道及整个客室计算域的空间离散^[4]。在网格划分过程中,对司机室送风道、风道内导流结构、线束、排水管、门机构、电器箱、座椅及扶手等几何尺寸较小且对流动特性影响较大的结构进行网格加密处理^[5];对于数据梯度变化不大的区域,将网格尺寸适当放大,使得网格数量和质量得到很好控

制。整车网格划分后的仿真模型如图2所示,整车空间体网格总数约为1 800万个。

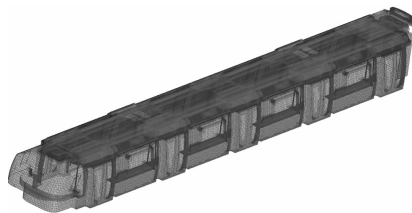


图2 整车网格划分后的仿真模型

Fig.2 Simulation model of whole-vehicle grid division

2 仿真计算结果

2.1 送风道

图3为送风道的空间流线分布。气流经空调送风口进入主送风道以后,经送风口下方导流板导流,向主送风道中间及两侧区域流动,其中一部分气流送往司机室区域。

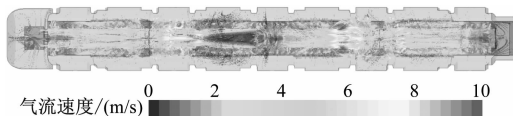


图3 送风道的空间流线分布截图

Fig.3 Screenshot of spatial airflow line distribution of air supply duct

图4为主送风道中间截面速度场分布。由图4可见:空调送入风道内的气流在空调送风口下导流板的作用下向两侧流动;距风口较远的风道两端及风道中间位置的流速较低,导流板区域的流速较高。气流从主送风道静压腔两侧的孔板流入风道两侧,进而实现通过门区及窗区的送风口向客室内送风。

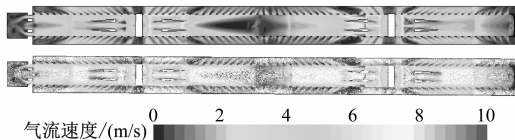


图4 主送风道中间截面速度场分布截图

Fig.4 Screenshot of velocity field distribution at the middle section of main air supply duct

2.2 回风道

图5为回风道空间流线分布。由图5可见:气流经窗下4个回风口进入回风道,经过回风道内的线束、排水管、门机构及电器箱等扰流部件后,再经由2个回风口进入空调机组。

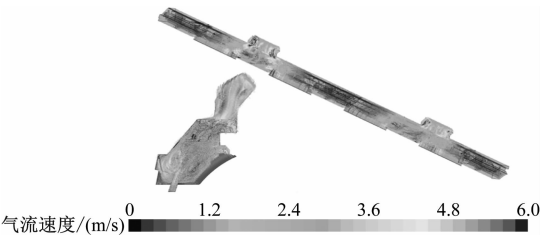


图 5 回风道空间流线分布

Fig. 5 Spatial airflow line distribution of air return duct

图 6 为回风道车门区域截面速度场分布。由于回风道内门机构、电器箱等部件的存在,气流流动相对混乱。在空调机组回风口区域,空调机组排水管、电缆等部件的存在,减小了回风面积,致使局部风速增大。

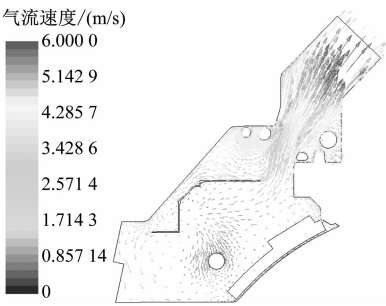


图 6 回风道车门区域截面速度场分布截图

Fig. 6 Screenshot of velocity field distribution at door area cross-section of air return duct

2.3 客室空间

图 7 为整车客室空间流线分布。空调气流进入客室中间主送风道之后,从窗区及门区的两侧隐形送风口向客室内送风,其中一部分气流通过司机室的支送风道向司机室送风。客室内气流一部分通过窗区两侧回风道从空调回风口回到空调机组,另一部分通过客室端部的废排风道排出客室。整体来看,送、回风道可有效地向客室空间区域送风,可保证送风均匀性和气流组织空间分布的均匀性。

图 8 为客室空间典型送、回风截面上的压力分布云图。由图 8 可以看出,整个客室空间内的压力分布比较均匀,压力梯度较小,客室内为微正压。送风道内的正压分布较高,回风道内负压整体最高,可以保证客室内气流在压力差驱动下流动。

图 9 为不同工况下的客室典型截面温度场分布。由图 9 可以看出,空调将较低或较高温度气流从主送风道送入客室,与客室热空气及热源进行热量交换后,整个客室温度分布趋于均匀,制冷工况

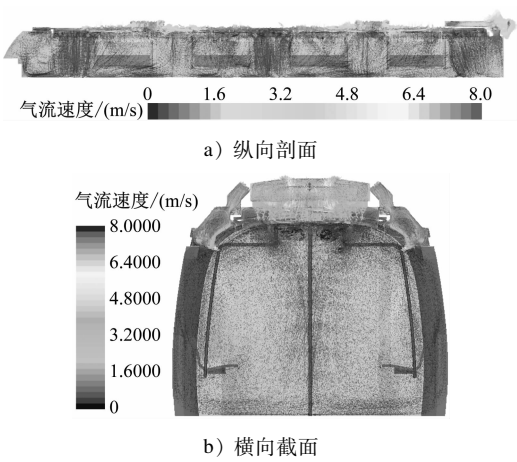


图 7 整车客室空间流线分布截图

Fig. 7 Screenshot of spatial airflow line distribution of whole-vehicle passenger compartment

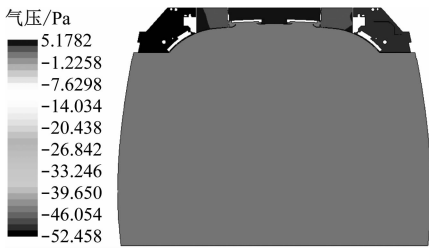


图 8 客室典型截面压力场分布截图

Fig. 8 Screenshot of pressure field distribution of passenger compartment typical cross-section

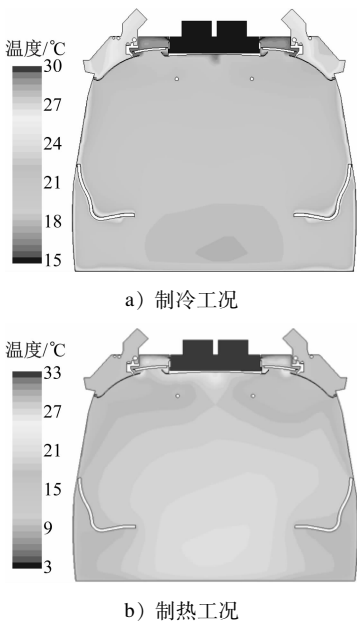


图 9 不同工况下的客室典型截面温度场分布截图

Fig. 9 Screenshot of temperature field distribution of passenger compartment typical cross-section under different working conditions

客室平均温度为 22.5°C , 制热工况客室平均温度为 18°C , 满足工程设计要求。

3 结论

1) 地铁列车空调通风系统整体技术方案满足工程设计要求, 客室空间气流组织分布均匀, 客室内微正压, 温度分布均匀。

2) 送风道送风均匀, 空调送风口下方弧形导流板结构对空调送风具有良好的导流以及流量分配作用。

3) 回风道内门机构、电器箱等部件的存在, 致使气流流动相对比较混乱。回风口区域存在空调机组排水管、电缆等部件, 减小了回风面积, 致使局部风速增大。

4) 整个客室空间内的压力分布比较均匀, 压力梯度较小, 客室内为微正压。送风道内的正压分布较高, 回风道内负压整体最高, 废排风道内的负压次之。

5) 在制冷及制热工况下, 整车客室空间内的温度分布整体较均匀, 温差较小, 满足制冷及制热温度要求。

参考文献

[1] 蒲栋. CFD 技术在动车组空调送风道设计中的应用[J]. 现代

(上接第 137 页)

[6] 黄兵, 华聪立, 沈敏杰. 地铁车门系统门页的仿真分析与试验验证[J]. 机械工程与自动化, 2019(6): 99.

HUANG Bing, HUA Congli, SHEN Minjie. Simulation analysis and test verification of door leaf in subway door system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(6): 99.

[7] 周卫丰, 朱松青, 杨柳, 等. 地铁门系统承载传动机构健康状况测试系统研究[J]. 现代制造技术与装备, 2019(8): 89.

ZHOU Weifeng, ZHU Songqing, YANG Liu, et al. Research on health test system of load-bearing transmission mechanism of underground iron gate system[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(8): 89.

[8] 蒲晨亮, 武莹, 蒲天昊, 等. 地铁车辆门系统行程开关异常动作原因分析[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(3): 120.

制造技术与装备, 2018(2): 19.

PU Dong. The application of CFD technology in design of air duct for EMU air conditioning[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(2): 19.

[2] 刘杰, 李人宪, 陈琳, 等. 高速列车空调系统及车内流场分析[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(1): 127.

LIU Jie, LI Renxian, CHEN Lin, et al. Analysis of air flow field in air conditioning system and compartments of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(1): 127.

[3] 孙术娟, 林鑫. 城际车辆整车空调通风系统的仿真与试验研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 136.

SUN Shujuan, LIN Xin. Simulation and experimental research of air conditioning and ventilating system for intercity train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 136.

[4] 尤立伟, 郑学林, 赵义逢. 地铁列车空调系统送风风道气流组织模拟及优化[J]. 制冷, 2016, 37(3): 39.

YOU Liwei, ZHENG Xuelin, ZHAO Yifeng. Simulation and optimization of air flow organization in the air duct of air conditioning system of metro train[J]. Refrigeration, 2016, 37(3): 39.

[5] 王常宇, 单红娜. 某地铁车辆客室内气流组织仿真与试验对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 84.

WANG Changyu, SHAN Hongna. Comparative analysis of airflow distribution simulation and experiment in a metro coach[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 84.

(收稿日期: 2021-07-22)

PU Chenliang, WU Ying, PU Tianhao, et al. Cause analysis of travel switch abnormal action of metro vehicle door system[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(3): 120.

[9] 侯忠生, 董航瑞, 金尚泰. 基于坐标补偿的自动泊车系统无模型自适应控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(4): 823.

HOU Zhongsheng, DONG Hangrui, JIN Shangtai. Model-free adaptive control with coordinates compensation for automatic car parking systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(4): 823.

[10] 李红利, 敖荟兰. 丝杠系统传动误差的测量与补偿[J]. 机械工程与自动化, 2020(6): 191.

LI Hongli, AO Huilan. Measurement and compensation for transmission error of screw system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(6): 191.

(收稿日期: 2021-03-09)