

基于车内流场和温度场分析的双层列车空调风道优化^{*}

韩 璐 李良杰 崔 蕾 于菲菲 宗建平

(中车唐山机车车辆有限公司, 063035, 唐山//第一作者, 高级工程师)

摘 要 结合 TRIZ(发明问题的解决理论)工具和风量分配原则对双层列车空调风道系统进行了结构优化设计,采用 CFD(计算流体动力学)仿真分析方法,标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型对空调风道及整车车内流场及温度场进行仿真分析和优化设计,分析了车内流场和温度场的分布特性。通过 1:1 模型车的风道配套试验验证了计算方法和设计过程的合理性和正确性。

关键词 双层列车; 空调通风系统; 风道设计; 流场分析; 计算流体动力学

中图分类号 U270.38⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.12.007

Optimization of Bilevel Train Air-conditioning Duct Based on Indoor Flow Field and Temperature Field Analysis

HAN Lu, LI Liangjie, CUI Lei, YU Feifei, ZONG Jianping

Abstract Structure optimization design of bilevel train air-conditioning duct system is carried out incorporating TRIZ tool and air volume distribution principle. CFD method and standard $k-\varepsilon$ two-equation model are adopted for simulation analysis and optimization design of the air-conditioning duct, indoor flow field and temperature field of the whole vehicle. The distribution characteristics of indoor flow field and temperature field are analyzed. The rationality and correctness of the calculation method and design process are verified by air duct test of 1:1 model vehicle.

Key words bilevel train; air-conditioning system; air duct design; flow field analysis; CFD

Author's address CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

旅客列车车厢内的风速场均匀性、温度场均匀性及气流组织状态等是重要的舒适度指标,其主要取决于列车的空调通风性能^[1-2]。而车厢内部环境受太阳辐射和乘客散热的影响,如用试验方法研究车厢内部气流组织,不仅难度大,且成本高。因此,

利用 CFD(计算流体动力学)数值仿真方法,对列车空调通风系统进行数值仿真,分析空调通风系统性能并改进设计,达到优化设计的目的^[3-4]。

本文主要研究列车空调风道优化设计、车内流场特性分析和相关试验验证:建立双层车车内舒适度数值仿真计算模型,利用 TRIZ(发明问题的解决理论)工具中的不对称原理,调整空调风道内的导流板及风口布置方案,研究客室旅客界面的风口布置,获得送风道风量分配,完成空调送风系统的均匀性分析;采用 FLUENT 软件仿真分析空调风道、车内流场及温度场,依据舒适性评价指标分析评估,获得满足标准要求的空调系统优化方案;通过模型车试验,验证优化方案是否满足设计要求。

1 双层动车组的车内流场计算模型

1.1 几何模型

本文以某双层动车组为研究对象,进行车内流场及温度场仿真分析,并进行空调风道设计研究。车体模型主要包括车体、车窗、座椅、空调送风风道、加热器及送风格栅等,如图 1 所示。其中,一、二位端各含 1 个进风口、1 个回风口和 2 个废排出口。车厢内的乘客分布模型见图 2。

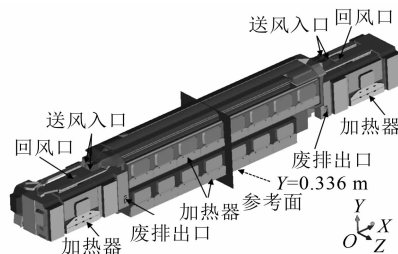


图 1 车体模型

Fig. 1 Simulation model of vehicle body

1.2 网格划分

车内流场计算模型的流动空间形状复杂,采用多面体网格进行划分。由于模型中薄壁结构多、面

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200504)

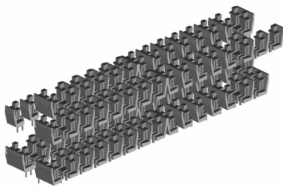


图 2 车厢内乘客分布模型

Fig. 2 Distribution model of passengers inside compartment

积大,整个几何模型的边界尺寸分布跨度很大,故对送风道出口及加热器等热流场变化较为剧烈的部件进行网格加密。

1.3 数学模型

本文湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型,在近壁区使用壁面函数^[5]。其中,进风口和回风口采用速度边界,废排口采用压力出口,表压力取 0。计算时,参考实际情况设置车体(含车顶、侧墙及地板)、车窗、车门的传热系数,并根据人体体表温度设置人体热源温度。

2 空调风道的优化

2.1 空调风道的初步优化及验证分析

空调风道的数值模拟模型见图 3。空调送风道的风速流线图如图 4 所示。根据计算结果:上、下层客室长条形出风口出风不均匀,需将长条形出风口分割为小出风口并采取导流措施;两端支风道 4 个出口流量不均匀,需对出风口设置导流板。

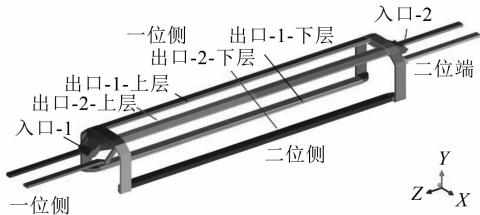


图 3 空调送风道模型
Fig. 3 Air duct model

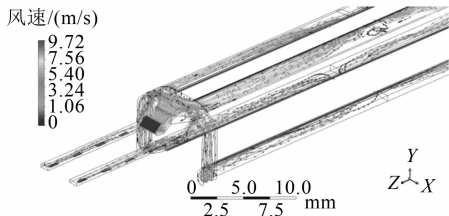


图 4 空调送风道风速流线图

Fig. 4 Flow diagram of air duct velocity

如图 5 所示,空调风道优化措施有:风道内部增设导流板,并封堵中间层部分风口;上下层首节风

道对应的静压箱隔板上增加导流板;风道出风口增加隔板,使风道由通长结构改为分段出风;更改风道内阻力板高度。

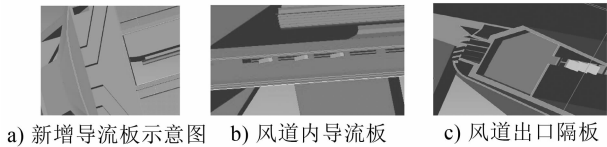


图 5 空调风道优化方案

Fig. 5 Optimization scheme of air-conditioning duct

建立整车计算模型,对空调风道及车内空气流场进行仿真计算,计算结果见图 6。风速超标区域较多,中部区域超标最严重。因此,还需进一步优化空调送风道内栏板高度、出风口面积及格栅导流角度等,以改善客室气流流动情况。

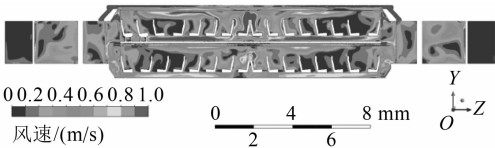


图 6 整车纵向断面风速云图

Fig. 6 Nephogram plot of velocity at longitudinal section of the whole vehicle

2.2 空调风道二次优化及验证分析

应用 TRIZ 工具不对称理论,布置送风道风口形式,将上、下层风口错开布置;在原方案基础上增加静压腔导流板,根据仿真计算结果实时调整送风道内格栅间距、高度;并根据客室风量分配比例(上、下层的人员比例为 1:1,端部单层处和上层的人员比例为 1:3),优化设计送风道内部结构,如图 7 所示。

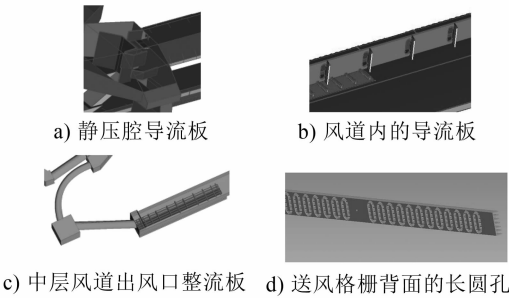


图 7 空调风道优化方案

Fig. 7 Optimization scheme of air-conditioning duct

二次优化后风口截面风速分布的仿真计算结果如图 8 所示。风量分配仿真计算结果如表 1 所示(单位出风总量为 10 081 m³/h)。由仿真结果可知,上、下层客室风道出口流量均匀,且满足客室内风量分配比例要求。

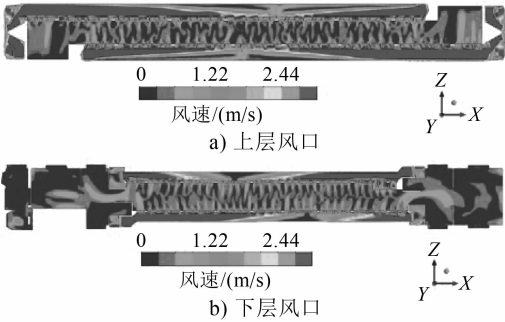


图 8 二次优化后的风口截面风速分布
Fig. 8 Velocity distribution at air outlet section after second optimization

表 1 客室内风量分配计算结果

Tab. 1 Calculation results of air volume distribution in passenger compartment

部位	风量计算值/(m ³ /h)	风量占比/%
二位端室	1 242	12.3
司机室	520	5.2
一位端室	524	5.2
上层客室	3 702	36.7
下层客室	4 093	4.6

3 风道优化效果验证

3.1 车内流场及温度场的仿真验证

对空调风道二次优化后的整车模型进行 CFD 计算,得到典型截面的风速及温度分布如图 9~图 11 所示。由计算结果可知,客室座位附近的风速均匀,楼梯和过道区域风速较高,客室区域的风速及温度满足 ASHRAE23 标准的舒适性评价指标。

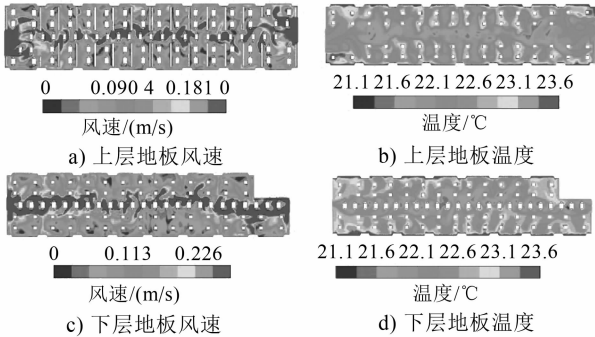


图 9 高度 1.2 m 处水平截面的速度和温度分布云图
Fig. 9 Contour plot of velocity and temperature distribution at horizontal section of 1.2 m height

由图 12 和图 13 可知:上、下层乘客座位附近风速较低,满足标准要求;过道中部上方的风速稍高,可能使乘客产生不适感;客室内温度均匀性较好,满足要求;地板和车窗附近区域温度无明显差异。

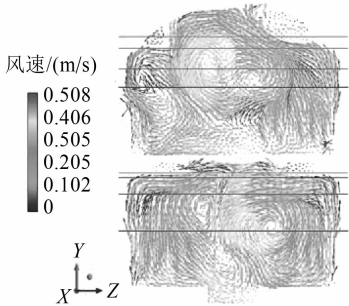


图 10 车辆典型横断面风速矢量图
Fig. 10 Velocity vector map at typical horizontal section of vehicle

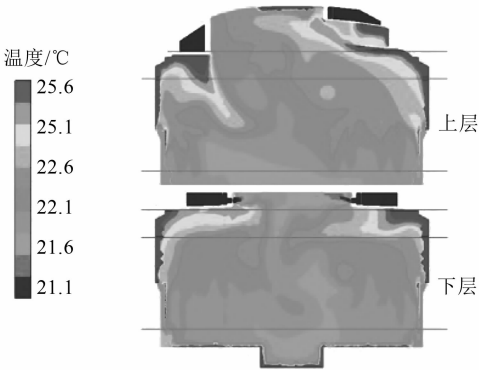


图 11 车辆典型横断面温度分布图
Fig. 11 Temperature distribution at typical horizontal section of vehicle

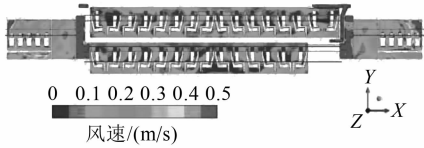


图 12 纵断面速度云图
Fig. 12 Velocity nephogram plot at longitudinal section

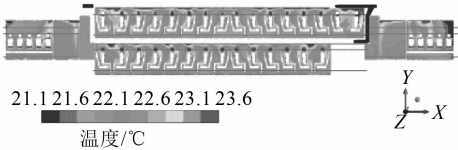


图 13 纵断面温度分布云图
Fig. 13 Temperature distribution nephogram plot at longitudinal section

3.2 模型车空调风道的试验验证

本研究按 1:1 组装了双层不锈钢车体(见图 14),并进行了风道配套试验。风量分配的试验结果见表 1。比较可知,仿真计算结果与试验结果相差在 5% 之内,且车内风速及温度分布符合 ASHRAE23 标准要求。

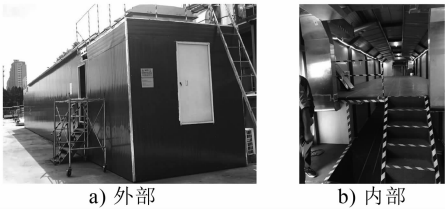


图 14 风道配套试验模型车
Fig. 14 Model vehicle for air duct test

表 2 客室内风量分配结果对比

Tab. 2 Results comparison of air volume distribution in passenger compartment

部位	风量试验值/(m ³ /h)	风量占比/%
二位端室	1 007	9.0
司机室	927	8.3
一位端室	560	5.0
上层客室	4 243	38.0
下层客室	4 449	39.7

4 结语

本文结合 TRIZ 工具对双层列车空调风道系统进行了结构优化设计,采用 CFD 仿真分析方法、标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型对空调风道及车内流场及温度场进行仿真分析和优化设计,分析了整车车内流场和温度场的分布特性。通过 1:1 模型车的风道配套试验验证了本文计算方法和设计过程的合理性和正确性。基于计算分析结果和优化设计过程,得出以下结论:

1) 空调风道优化设计:根据整车结构确定送风形式及风道外形结构,采用 TRIZ 工具中的不对称原理进行风道风口设计,依据送风道风量分配进行风道内部结构优化,进行空调风道送风均匀性分析,完成空调风道优化设计方案。

2) 车内流场和温度场分析:建立整车车内流场和温度场计算模型,利用 CFD 方法对空调风道及车内空气流场进行仿真计算,分析车内空气速度场、温

度场仿真计算;按照 ASHRAE23 标准的舒适性评价指标对客室温度场、速度场的均匀性进行分析评估。

3) 试验验证:通过搭建 1:1 双层不锈钢车体,进行了风道配套试验。通过风道试验,得到各部分风量数值。试验结果表明,仿真计算结果与试验结果相差在 5% 之内,且车内速度、温度分布符合 ASHRAE23 标准要求。试验验证了本文计算方法和设计过程的合理性和正确性。

参考文献

[1] 张吉光,杨晚生,史自强. 铁路客车空调系统送风均匀性的研究[J]. 流体机械,2002(11):50.
ZHANG Jiguang, YANG Wansheng, SHI Ziqiang. Study of supply air uniformity for air conditioning system of passenger car [J]. Fluid Machinery, 2002(11): 50.
[2] 陈焕新,黄素逸,张登春. 空调列车室内气流分布的数值模拟[J]. 流体机械,2002(4):59.
CHEN Huanxin, HUANG Suyi, ZHANG Dengchun. Numerical simulation of air distribution in air-conditioned train passenger compartment[J]. Fluid Machinery, 2002(4): 59.
[3] 张登春,翁培奋,邹声华. 旅客列车空调硬座车厢内热舒适性研究[J]. 铁道学报,2006(5):35.
ZHANG Dengchun, WENG Peifen, ZOU Shenghua. Research of thermal comfort in railway passenger cars[J]. Journal of the China Railway Society, 2006(5):35.
[4] 韩璐,岳丽芳,田雪艳,等. 高速列车司机室内流场数值分析[J]. 中国铁路,2014(5):67.
HAN Lu, YUE Lifang, TIAN Xueyan, et al. Numerical analysis of indoor flow field of high-speed train driver cabin[J]. Chinese Railways, 2014(5): 67.
[5] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:126.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis—principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:126.

(收稿日期:2019-12-27)

(上接第 33 页)

[2] 荀径,杨欣,宁滨,等. 列车节能操纵优化求解方法综述[J]. 铁道学报,2014(4):14.
XUN Jing, YANG Xin, NING Bin, et al. Survey on trajectory optimization for train operation[J]. Journal of the China Railway Society, 2014(4): 14.
[3] LU S, WESTON P, HILLMANSEN S, et al. Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014(6):2506.
[4] 黄友能,宫少丰,曹源,等. 基于粒子群算法的城轨列车节能驾驶优化模型[J]. 交通运输工程学报,2016(2):118.
HUANG Youneng, GONG Shaofeng, CAO Yuan, et al. Optimi-

zation model of energy-efficient driving for train in urban rail transit based on particle swarm algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016(2): 118.
[5] 刘爱军,杨育,李斐,等. 混沌模拟退火粒子群优化算法研究及应用[J]. 浙江大学学报(工学版),2013(10):1722.
LIU Aijun, YANG Yu, LI Fei, et al. Chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm research and its application[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013(10): 1722.

(收稿日期:2019-12-09)