

地铁车辆客室通风风道性能及其结构优化分析

夏春晶^{1,2} 王云霄² 王常宇²

(1. 中南大学交通运输工程学院, 410075, 长沙;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘要 对比分析了地铁车辆客室通风风道结构设计方案的特点。结合风道结构特点, 运用数值模拟的方法, 对影响风道通风性能的典型特征进行对比分析, 通过优化风道主体结构、送风格栅等主要设计参数, 最终确定了实现通风性能最优的优化方案。

关键词 地铁车辆; 通风风道; 通风性能; 数值模拟

中图分类号 U270.38⁺3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.023

Ventilation Performance and Structural Optimization Analysis of Typical Metro Vehicle Compartment Air Duct

XIA Chunjing, WANG Yunxiao, WANG Changyu

Abstract The characteristics of ventilation air duct structural design for metro vehicle compartment are comparatively analyzed. Combined with the features of air duct structure, the typical characteristics influencing the ventilation performance are compared and analyzed with the numerical simulation method, and major design parameters such as air duct main structure and ventilation grille are optimized, the optimum scheme to realize the best ventilation performance is determined.

Key words metro vehicle; air duct; ventilation performance; numerical simulation

First-author's address School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China

空调系统是地铁列车客室空气质量的主要调节装置, 其设计应满足乘客乘坐舒适性以及尽量降低运营成本和维护成本的需求。

空调系统不断地对从外界吸入的新风及从客室内循环后的回风进行处理, 通过风道送入客室内。但是, 送入客室的风量, 不应让乘客有直吹感, 也不应让乘客有过大的冷热变化感, 这就对风道送风的均匀性、车内的微风速提出了更高的要求^[1], 因此需要不断地优化风道方案。在以往的设计及分析过程中, 主

要应用相应的经验, 对空调系统开展对比分析工作。本文充分考虑空调系统的主要设计因素, 结合仿真分析, 对通风风道结构进行优化设计。

1 通风风道结构

中车长春轨道客车股份有限公司研制的地铁车辆通风风道设计方案如图 1 所示。

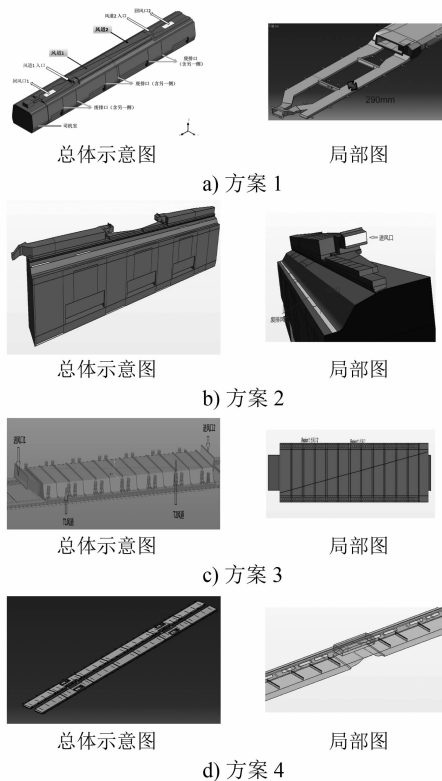


图 1 地铁车辆通风风道设计方案

地铁车辆的通风系统主要包括机组、送风风道+格栅、回风风道+格栅、废排装置。目前, 国内应用较多的为方案 2 所示的送风结构。其主要特点为: 单个机组可控制 1/2 车体的空气循环; 当另外一台机组发生故障时, 单个机组最大可对客室 3/4 的环境产生影响, 但均匀性较差。

方案 1 是在方案 3 的基础上进行的结构优化。方案 1 的风道,实现了温度对角控制的目标^[3]。同时,由于在机组送风入口处增加了回转分配结构,因此能使更多的送风到达机组下方区域。采用方案 1 的风道,单个机组最大可对客室 3/4 的环境产生影响,送风均匀性较比方案 2 也有较大改善。

方案 4 为早期的地铁车辆风道结构设计方案,风道结构简单,但送风均匀性较差。近年来,方案 4 已逐渐被方案 1、方案 2 和方案 3 所替代。

综上所述,在充分考虑各方案送风均匀性(温度均匀性的主要影响因素)方面的优势特点后,本文选取方案 1 作为主要研究方案,在此基础上,对影响送风均匀性的其它结构进行优化分析。

2 通风风道结构优化分析

2.1 原始风道结构几何模型

对原始风道结构,建立风道计算模型,如图 2 所示。车辆总风量为 7 200 m³/h,新风量为 2 100 m³/h;单车设置 2 台独立机组,每台机组下部设置回风口;车辆排风主要为门缝泄露。

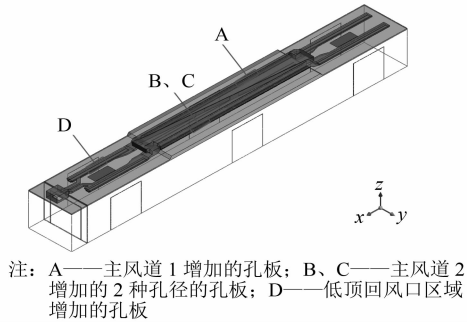


图 2 风道与客室数值计算模型整体示意图

在风道 1 和风道 2 的高顶风道段分别设有 2 块孔板(孔间距为 8 mm×9 mm 的圆孔),同时在风道 1 和风道 2 高顶风道段中间隔板处的腰型孔也设置孔板(孔间距为 4 mm×6 mm 的圆孔),如图 3 所示。

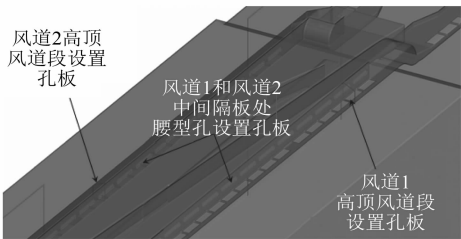


图 3 风道孔板位置示意图

2.2 原始风道结构计算结果

风道模型定义如图 4 所示。同时定义每个风道

由靠近司机室低顶风道段、高顶风道段和远离司机室低顶风道段 3 部分组成。

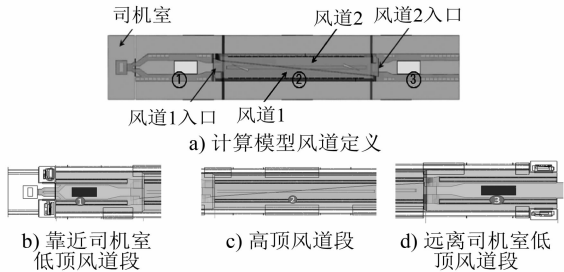


图 4 风道模型定义

通过计算可以得到风道不同段处的风量情况(见表 1)。由表 1 可知,左右两端低顶风道的风量之和约占入口总风量的 33.35%。

表 1 风道各段的风量分配情况(原始结构)

风道	风量/(m ³ /h)	占比/%
风道 1 靠近司机室低顶风道段	709.2	9.85
风道 2 靠近司机室低顶风道段	507.6	7.05
高顶风道段	4 798.2	66.65
风道 1 远离司机室低顶风道段	489.6	6.80
风道 2 远离司机室低顶风道段	694.8	9.65

风道与客室连接格栅处的风速分布情况如图 5 所示。由图 5 可知,风道 1 和风道 2 左右两端低顶风道的风速分布基本类似,靠近风道入口处的低顶风道的风速均大于另一端。

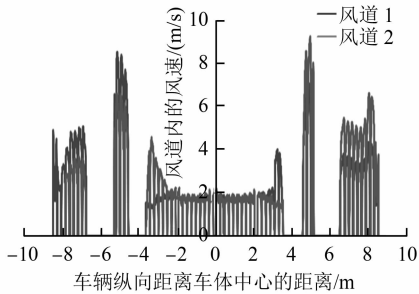


图 5 风道出风格栅处风速分布情况(原始结构)

为了研究风道及客室内流场中风速的分布情况,沿客室的不同方向建立剖切面。各剖切面如图 6 所示。各剖切面及位置说明见表 2。

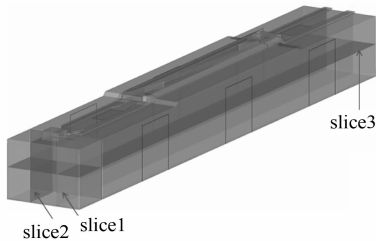


图 6 计算模型剖切面定义(原始结构)

表 2 风道剖切面及位置说明(原始结构)

剖切面	位置说明
Slice1	距离客室中心距离 $Y=+0.47\text{ m}$
Slice2	距离客室中心距离 $Y=-0.47\text{ m}$
Slice3	距离客室底面距离 $Z=1.1\text{ m}$

风道各剖切面风速云图如图 7 所示。由图 7 可知:客室内的微风速均低于 0.9 m/s ,满足舒适性指标要求;风道内最高风速在高低顶过渡区,这是由于低顶区域风道断面窄小所致。

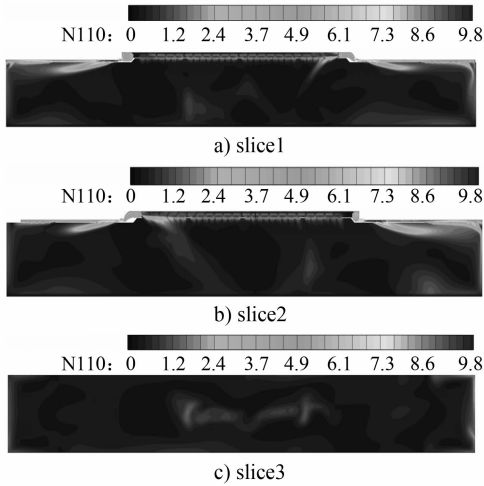


图 7 风道各剖切面风速云图(原始结构)

2.3 优化方案计算结果

优化方案不同段处的风量情况见表 3。由表 3 可知,左右两端低顶风道的风量之和约占入口总风量的 53%。而原始结构中左右两端低顶风道的风量之和只占入口总风量的 33.35%。由此可见,优化方案使风道的风量分配更加均匀,提高了送分均匀性。

表 3 风道各段的风量分配情况(优化方案)

风道	风量/ (m^3/h)	占比/%
风道 1 靠近司机室低顶风道段	1 038	14.4
风道 2 靠近司机室低顶风道段	889	12.4
高顶风道段	3 381	47.0
风道 1 远离司机室低顶风道段	871	12.1
风道 2 远离司机室低顶风道段	1 019	14.1

优化后风道与客室连接的格栅出风口处的风速分布情况如图 8 所示。由图 8 可知:风道左右两端低顶风道的风速分布基本类似,靠近风道入口处的低顶风道风速均大于另一端;高顶风道的气流速度整体低于低顶风道。由此可见,优化方案的送风均匀性有了较大提高。

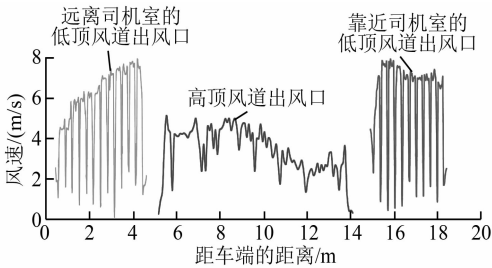


图 8 风道出风格栅处风速分布情况(优化方案)

为了研究优化后风道及客室内流场中风速的分布情况,沿客室不同方向建立剖切面,如图 9 所示。各剖切面及位置说明见表 4。

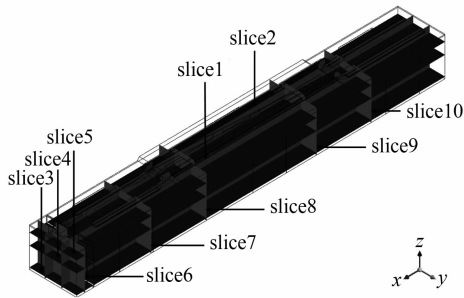


图 9 计算模型剖切面定义(优化方案)

表 4 风道剖切面及位置说明(优化方案)

剖切面	位置说明
Slice1	距离客室中心距离 $Y=0.47\text{ m}$
Slice2	距离客室中心距离 $Y=-0.47\text{ m}$
Slice3	距离客室底面距离 $Z=0.1\text{ m}$
Slice4	距离客室底面距离 $Z=1.1\text{ m}$
Slice5	距离客室底面距离 $Z=1.7\text{ m}$
Slice6	司机室风道入口纵截面 $X=19.6\text{ m}$
Slice7	近司机室低顶风道纵截面 $X=16\text{ m}$
Slice8	近司机室高顶风道纵截面 $X=13\text{ m}$
Slice9	远司机室高顶风道纵截面 $X=7\text{ m}$
Slice10	远司机室低顶风道纵截面 $X=4\text{ m}$

风道各剖切面风速云图如图 10 所示。由图 10 可知:优化后的客室内风速更加均匀,且都处于 $0.25\sim0.90\text{ m/s}$ 的舒适性要求范围内;低顶区域的风道通过流量的重新分配降低风量,使得风速亦有所降低。

3 通风风道结构优化方案

3.1 分配箱结构优化

在风道优化的初始阶段,对比风道的分析结果,发现分配箱处阻力较大,因此对其进行结构优化。优化前后的分配箱结构如图 11 所示。

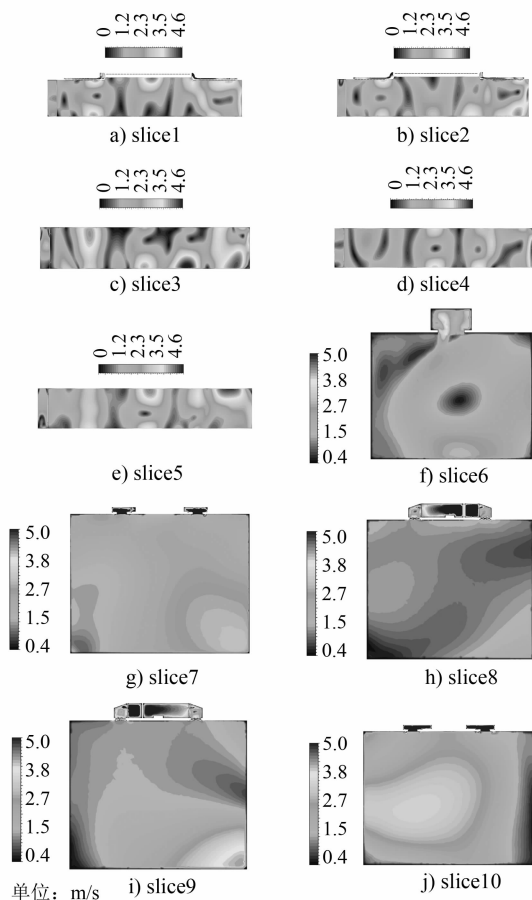


图 10 风道剖切面的速度云图(优化方案)

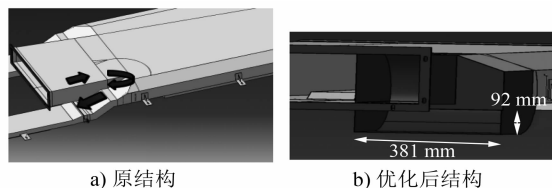


图 11 分配箱结构优化前后对比图

3.2 低顶风道结构优化

通过对比分析发现,造成高低顶区域风量分配不均的主要原因为高低顶风道结构尺寸差异大,导致阻力差异大。解决方案为增大高顶区风道阻力或减小低顶区域风道阻力,但其前提为风道阻力需满足送风量的要求。本文主要描述减小低顶风道阻力,即增大风道截面的方案。低顶风道结构优化前后对比如图 12 所示。

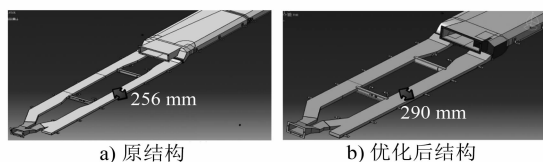


图 12 低顶风道结构优化前后对比图

在本次优化过程中,为了最大程度地增加低顶风道的高度,首次采用了无底风道的设计概念,如图 13 所示。

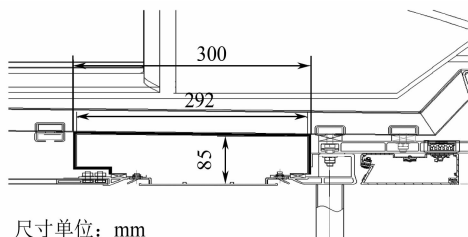


图 13 改进后的无底风道示意图

3.3 静压隔板开孔及送风条缝优化

受车辆整体结构限制,车辆高低顶尺寸相差较大,导致风量分配不均,因此,需要适量增加高顶区风道阻力,对高顶区的静压隔板的开孔大小予以调整,对送风道底部条缝大小进行调整,最终确定结构如图 14 所示。静压隔板上的开孔高度由 60 mm 变更为 8 mm。送风道底部条缝由 1 个宽度为 50 mm 的开孔变更为 2 个宽度为 8 mm 的开孔。

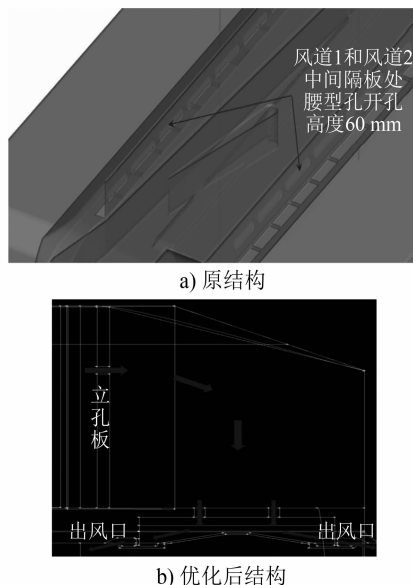


图 14 高顶风道结构优化前后对比图

3.4 送风格栅优化

在初次选型过程中,考虑格栅区域的微风速,选用了新型侧出风格栅,侧出风格栅在国内地铁车辆上鲜有应用^[4]。从图 10 的断面分析结果中可见,局部区域出风直接沿车顶吹出,不会直接吹向乘客头部,让站立乘客产生不适感。在此基础上,对格栅的翅片结构进行多轮优化,最终选取如图 15 所示的优化结构。

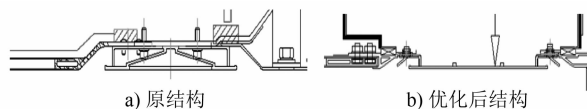


图 15 送风格栅结构优化前后对比图

4 结论

本文采用 CFD 数值计算的方法,对地铁车辆通风风道性能及结构进行优化分析。通过对风道主体结构对比优选、风道尺寸优化、静压隔板开孔及送风孔缝调整、送风格栅优选等,实现送风均匀性、微风速等指标优化的目标。上述所有优选方案,均在试验中得以验证。结合分析过程,得到如下结论:

1) 地铁车辆空调受结构尺寸限制,机组区域风道矮小,总体尺寸难以增加。本文优化过程中通过取消风道底部结构、防寒材外置等方式,最大限度

地增大低顶风道尺寸,减小高、低顶之间阻力差值,对提高送风均匀性有很大提升。

2) 出风格栅对出风口区域的微风速影响极大,格栅侧出风的方式极大地降低了格栅底部区域的微风速,不会直接吹向乘客头部,提高了乘客舒适性。

参考文献

- [1] 刘力伟. 地铁车辆空调通风系统研究[J]. 基层建设, 2018(8): 12.
- [2] 王书傲, 谈越明. 空调客车均匀送风风道的研究[J]. 铁道车辆, 1992(8): 6.
- [3] 龙静, 王书傲. 地铁车辆空调系统送风风道分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2004(4): 40.
- [4] 王俊伟, 宁宝焕, 章义. 地铁车辆风道系统出风均匀性改进研究[J]. 科技风, 2015(8): 18.

(收稿日期: 2019-03-22)

(上接第 86 页)

5 结语

本文以某地铁车辆客室的空调通风系统为研究对象,对车辆空载工况客室内气流组织的平均温度及微风速进行了仿真分析计算。计算结果满足 EN 14750 标准要求,并通过真车进行了试验,验证了仿真分析的准确性,可为后续地铁车辆空调系统风道设计及开发提供重要的可行依据。

参考文献

- [1] 魏润柏, 徐文华. 热环境[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994.

(上接第 89 页)

参考文献

- [1] 齐阳. 多 HVDC 输电系统 SSO 抑制措施的协调控制研究[J]. 中国电力, 2014(4): 108.
- [2] 何洋阳, 黄康, 王涛, 等. 轨道交通牵引供电系统综述[J]. 铁道科学与工程学报, 2016(2): 352.
- [3] 宁建斌. 铁路牵引变电所与开闭所的保护配合分析[J]. 铁道工程学报, 2017(4): 70.
- [4] 齐阳, 刘禹彤, 杨天蒙, 等. 轨道交通用空气直流断路器关键部件仿真研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(1): 1.
- [5] 吴秋瑞, 李群湛, 刘炜. 地铁交流供电方案探讨[J]. 铁道工程学报, 2018(3): 97.
- [6] 赵海军, 陈维江, 沈海滨, 等. 地铁架空地线的雷电防护作用

- [2] 孙一坚. 简明通风空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [3] 李人宪. 有限体积分法基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [5] CENELEC. Railway applications-Air conditioning for urban and suburban rolling stock-Part 1: Comfort parameters; EN 14750-1: 2006[S]. Brussels: CENELEC, 2006.
- [6] 孙丽花. 南方某市地铁 B 型车客室气流组织分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [7] 于晓良, 王宗昌, 刘绍禹. A 型地铁客室气流组织仿真分析及试验[J]. 科技创新与应用, 2016(22): 4.

(收稿日期: 2019-05-01)

研究[J]. 铁道工程学报, 2015(1): 122.

- [7] 荣命哲, 杨飞, 吴翊, 等. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2014(1): 1.
- [8] 陈德桂. 直流开断技术的进展与新型直流断路器[J]. 电器与能效管理技术, 2014(21): 1.
- [9] 朱志豪, 赵芳帅, 袁端磊, 等. 城市轨道交通大容量直流快速断路器的研发[J]. 高电压技术, 2018(2): 417.
- [10] HOLM R. Electric Contacts[M]. 4th ed. New York: Springer-Verlag, 1967.
- [11] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [12] 孙昊, 荣命哲, 马瑞光, 等. 空气介质直流断路器的现状[J]. 低压电器, 2013(20): 8.

(收稿日期: 2018-12-04)