

地铁车辆多方位送回风系统研究

刘林林 龚继如 蔡瑞晶 房明

(中车南京浦镇车辆有限公司设计开发部, 210036, 南京//第一作者, 工程师)

摘要 介绍了地铁车辆客室送风道的结构设计和安装方式,提出了地铁车辆客室多方位送回风系统的概念,采用计算流体力学方法对送风道内流场和客室流场进行数值模拟。研究表明,采用了多方位送回风系统后:送风道各出口预测风量与理论风量偏差在15%之内,出风均匀性良好;客室人员活动区域速度场与温度场分布均匀,微风速在0.20~0.42 m/s之间,断面垂直温差在3℃以内。地铁车辆采用多方位送回风系统,既提高了座椅区域与门区乘客的舒适性,又降低了客室中部的风速,缓解了乘客的吹风感。

关键词 地铁车辆;多方位送回风系统;送风道;数值模拟
中图分类号 U270.38³

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.04.010

Research on Multi-directional Air Supply and Return System for Metro Vehicles

LIU Linlin, GONG Jiru, CAI Ruijing, FANG Ming

Abstract In this paper, the structural design and installation mode of air supply duct for passenger rooms are briefly described and the concept of multi-directional air supply and return system for metro vehicles is put forward. A numerical simulation of flow field in air supply duct and indoor flow field is carried out by using computational fluid dynamics (CFD). The results show that after adopting the multi-directional air supply and return system, the deviation between the predicted air volume and the theoretical air volume at each outlet of the air supply channel is within 15%, and the uniformity of the air outputs is good. The velocity field and temperature field in the moving area of the carriages are evenly distributed, the breeze speed is between 0.2m/s~0.42m/s, and the vertical temperature difference of the section is less than 3℃. The adoption of the multi-directional air supply and return system in metro vehicles not only improves the comfort of passengers in the seat and door areas, but also reduces the wind speed in the middle of the carriage and alleviates the blowing sense of passengers.

Key words metro vehicle; multi-directional air supply and return system; air supply duct; numerical simulation

Author's address CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210036, Nanjing, China

随着城市轨道交通的发展,人们对地铁车辆客室的舒适性要求逐渐越来越高。研究表明,良好的空调气流组织对客室的热舒适性相当重要^[1-2]。目前,地铁车辆主要采用中顶送风,送风道为条缝式静压均匀送风风道^[3]。经过空调处理后的空气集中从客室中顶两侧的散流器送入客室,客室中部局部风速偏大,乘客存在一定的吹风感^[4-5]。对于地铁A型车辆,由于载客量与通风量较大,因此对客室舒适性要求更高^[6]。

为了进一步提高地铁车辆客室的热舒适性,本文提出一种新型的地铁车辆多方位送回风系统,并以地铁A型车为例,采用计算流体力学方法对送风道内流场与客室流场进行数值模拟,验证多方位送回风系统在地铁车辆上运用的可行性。

1 多方位送回风系统

1.1 总体结构

地铁车辆多方位送回风系统是由客室中顶向车辆侧墙送风,同时也向客室中部和侧顶送风组成的多方位送回风系统。该系统主要由空调机组、送风道、送回风口、通风单元(仅首节车配置)和回风通道等组成。中顶送风口位于内装中顶板两侧,沿着车长方向均匀分布,侧顶送风口位于客室一、二位侧的门区与窗区的侧顶板上,如图1所示。每节车配置两台变频热泵式空调机组,总制冷量为88 kW,总制热量为18 kW,送风量为10 000 m³/h,新风量为3 200 m³/h,回风量为6 800 m³/h。

经过空调处理后的冷(热)空气进入送风道后,一部分从主风道底部散流器进入客室,另一部分通过窗区与门区侧顶板上的长圆孔进入客室。进入客室后的空调气流在消除客室内热湿负荷后,一部分通过侧顶板与侧墙板之间的间隙流回车顶,另一部分通过座椅下方侧墙板上的回风口以及侧墙板与车体侧墙之间的夹层(即回风通道)流回车顶。

空气回到车顶后,一部分作为废气通过车顶废排装置排到车外,另一部分作为回风进入空调机组内部

与新风混合并蒸发处理,再一次送入客室,从而形成空气循环。客室断面气流如图 1 所示。

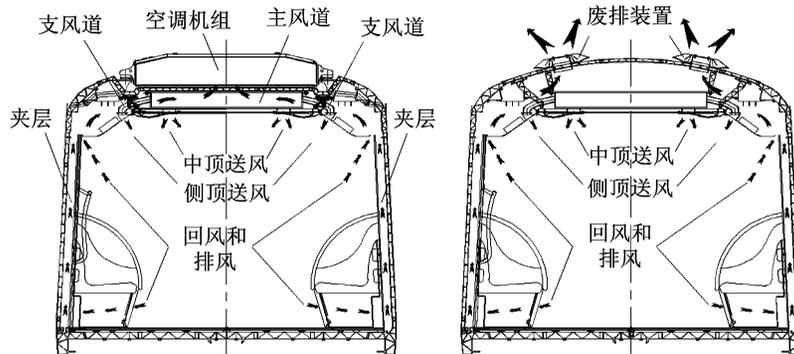


图 1 客室断面气流组织图

1.2 送风道结构

车辆客室送风道总长度为 20.372 m,由 7 节风道组成,其中第 1 节风道一端通往司机室,第 2、3、5、6 节风道包含进风口,如图 2 所示。风道为静压式风道,由主风道、支风道、法兰、安装座、隔板以及分流板等组成,如图 3 所示。

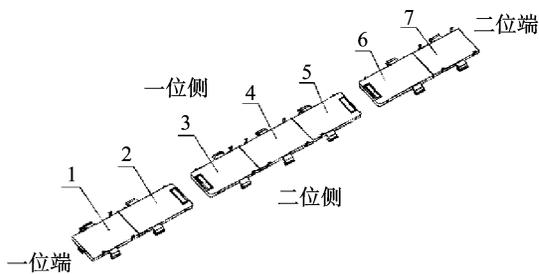
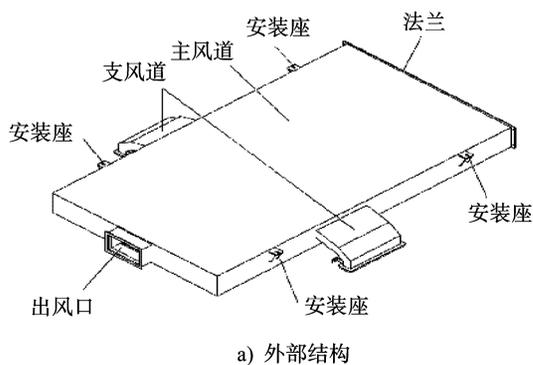


图 2 送风道布置示意图

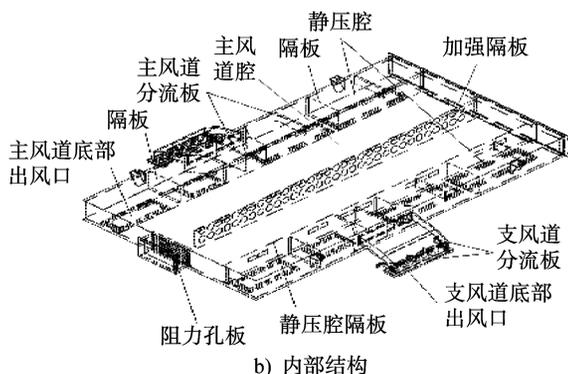
主风道内部由隔板分割成主风道腔和静压腔,静压腔位于主风道两侧,底部设置条缝式出风口。支风道位于主风道两侧,与主风道之间采用铆接形式连接,以便于风道整体安装。单节风道长度分别

为 2.409 m、2.566 m、2.785 m、2.837 m,主风道宽度为 1.346 m,高度为 0.158 m,支风道长度为 0.324 m。风道主体材质为 1.2 mm 厚铝合金,外贴 9.0 mm 厚隔热材,底部出风口四周贴密封条。多方位送回风系统的送风道主要特点如下:

- 1) 风道为整体式结构,主风道两侧铆接支风道;
- 2) 风道横向跨度大,内部中部设置带开圆孔的加强隔板,如此既增加风道强度,又可以减轻风道质量;
- 3) 静压腔内出风口上方设置分流板,增强风口的出风均匀性;
- 4) 静压腔内出风口之间设置隔板,以避免气流相互干扰;
- 5) 每个支风道出口处设置分流板,用于提高单个侧送风口出风均匀性;
- 6) 在通往司机室的出风口处设置阻力孔板,确保司机室的送风量。



a) 外部结构



b) 内部结构

图 3 第一节风道外部与内结构示意图

为缓解客室中部乘客的吹风感,根据散流器射流长和孔板衰减快的送风特性,将中部散流器出风风速控制在 $1.0\sim 1.5\text{ m/s}$,侧顶板出风风速控制在 $1.5\sim 2.0\text{ m/s}$ 。根据车顶空间结构和控制主风道内风速,确定主风道尺寸。主风道出风口宽度尺寸,根据内装中顶板宽度尺寸和灯带尺寸确定。出风口长度尺寸,根据内装横梁排布位置和散流器出风风速确定。支风道外形尺寸,根据侧顶板上空间位置和侧送风风速确定。

1.3 送风末端形式

中顶通过中顶板两侧的散流器向客室进行送风。散流器采用小叶片形式,设置两种送风角度,分别为吹向侧墙(24°)和车中(36°),如图4所示。侧送风口位于门区和窗区的侧顶板上,由规格为 $8\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的长圆孔组成,外形呈椭圆状,既保证出风性能,又提高了美观性,如图5所示。

1.4 送风道安装方式

送风道采用吊挂形式安装。在圆弧顶区域,风道上部采用过渡支架与车顶C型槽连接,平顶区域直接与车顶C型槽连接,如图6所示。主风道上部进风口和底部出风口,分别与车顶钢结构和出风口骨架进行压接密封,如图7所示。两节风道之间采

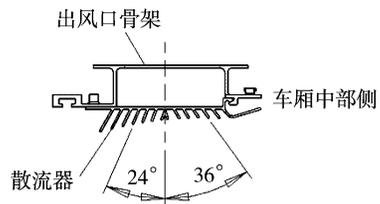


图4 散流器送风角度示意图

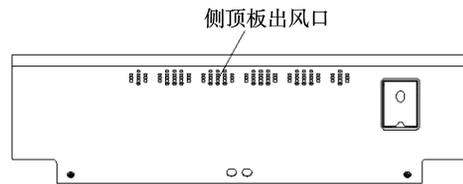


图5 侧顶板开孔形式示意图

用法兰连接。支风道侧面支架固定于内装纵梁C型槽上,底部与侧顶板上方的型腔采用海绵条压接密封,如图8所示。

吊挂安装方式与常规安装于内装横梁相比,存在整体式安装方便,不受内装横梁位置影响的优势。但对支风道的安装定位精度要求高,支风道的支架下边缘不可低于纵梁C型槽下边缘,确保侧顶板能够正常开启,又不可安装过高,确保支风道出口的压接密封。

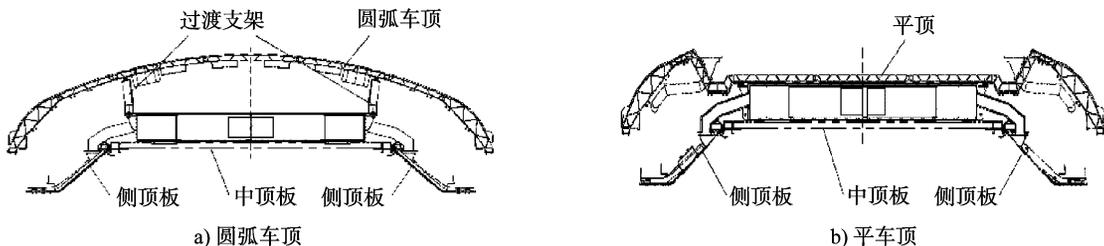


图6 送风道安装示意图



图7 风道上部进风口压接密封

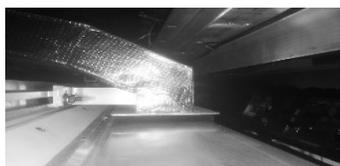


图8 支风道安装形式

2 数值模拟

由于送风道内部隔板和底部出口数量众多,出风均匀性调节难度大,因此,采用Fluent软件对送风道进行数值模拟,反复优化风道结构,提高出风均匀性。同时,建立客室模型,模拟客室的速度场与温度场,验证多方位送回风系统的效果。

2.1 送风道数值模拟

2.1.1 数值方法

为简化计算,需对风道结构进行简化处理并作假设。假设风道内空气温度为恒温 $19\text{ }^\circ\text{C}$,常物性,不可压缩;风道内部气流流动为充分发展的三维稳

态湍流流动;忽略重力的影响;忽略风道内与外的换热。选用 $k-\varepsilon$ 方程 Realizable 湍流模型,采用 SIMPLEC 算法求解。

2.1.2 边界条件

送风道物理模型及进风口编号如图 9 所示。以送风道顶部进口作为计算入口边界,设为速度入口,风道底部出风口作为计算出口边界,设为压力

出口。主要边界设置参数如表 1 所示。

表 1 送风道边界条件参数设置

参数	编号	边界类型	数值
进风口风速/ (m/s)	Inlet 1	Velocity-inlet	10.929
	Inlet 2, Inlet 3		7.136
	Inlet 4		9.373
	Outlet 0~22		0

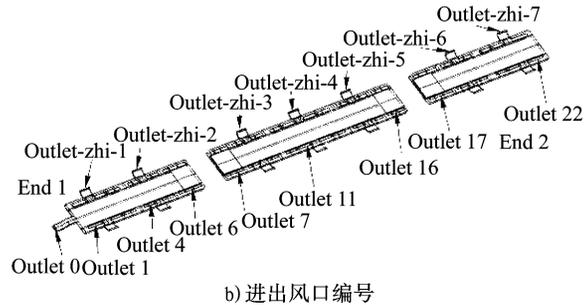
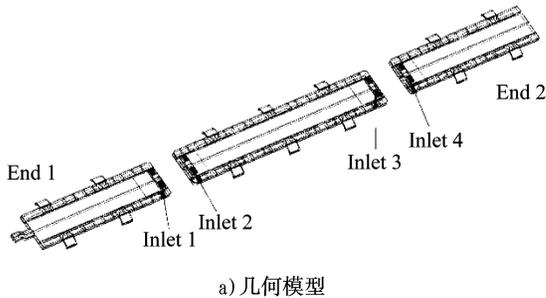


图 9 送风道几何模型及进风口编号

2.1.3 结果分析

如图 10 所示,主风道各出风口预测风量与理论风量偏差在 15% 之内,而支风道编号为 zhi2、zhi3、zhi4、zhi5 的出风口预测风量偏低,偏差在 15%~18%,送风道整体出风均匀性良好。

通过流场分析可知,主风道气流速度在 8 m/s 以内,进口气流速度局部达到 12 m/s,支风道出口风速在 2~3 m/s,内流场分布均匀,如图 11 所示。

为缓解入口气流噪声问题,在靠近进口处风道内粘贴吸音材料。

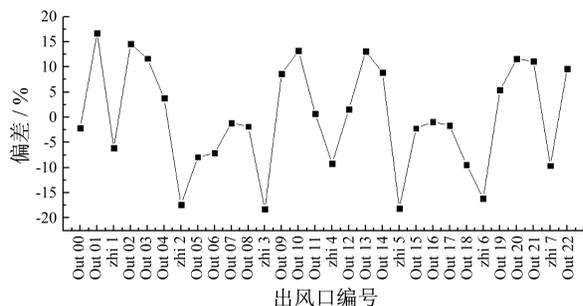


图 10 送风道各出风口预测风量与理论风量偏差

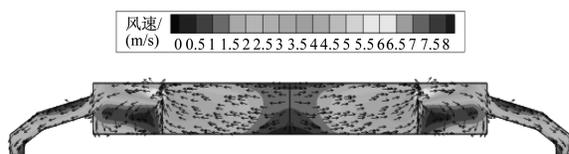


图 11 风道断面速度分布

2.2 客室数值模拟

2.2.1 物理模型

客室物理模型的建立主要针对空调区域。考虑客室座椅对气流的影响,门窗等对车体传热的影响,忽略车内灯、扶手等尺寸较小障碍物对气流的影响。客室一半物理模型如图 12 所示。

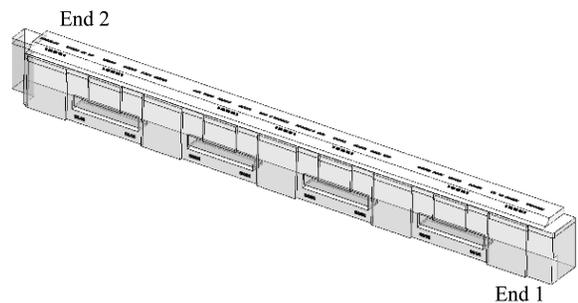


图 12 客室一半物理模型

2.2.2 边界条件

设置的参数为车辆静态下的车内速度场和温度场分布的初始条件。定员为 310 人(AW2 工况);外温 35 °C,内温 27 °C;中顶送风风速为 1.19 m/s,设置 24°和 36°两个角度,侧顶送风风速为 1.65 m/s,送风温度为 19 °C。壁面设置为热流密度;太阳辐射热、电气设备散热和人员负荷采用体热源的形式体现。

2.2.3 结果分析

如图13—图15所示,气流从散流器进入客室后迅速扩散。站立人员头部区域气流风速达到0.42 m/s,脚部风速在0.2~0.3 m/s之间,温度在23~26 ℃之间,垂直温差为3 ℃,满足地铁标准要求^[7]。

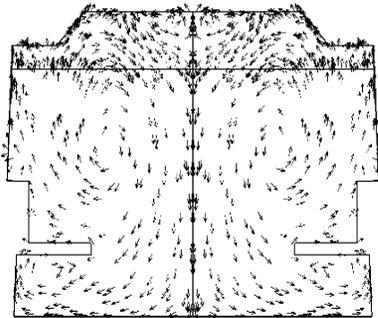
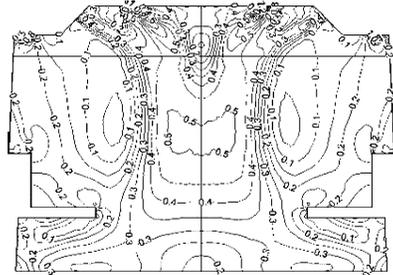
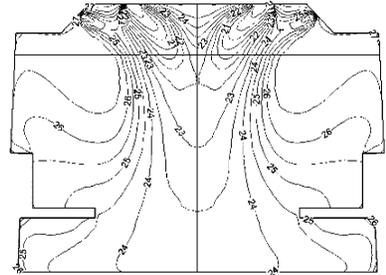


图13 客室断面气流示意图



(单位: m/s)

图14 客室断面气流分布图



(单位: ℃)

图15 客室断面温度场分布图

在散流器下方区域,侧送气流与中顶气流存在部分交汇,并在座椅上方区域形成漩涡,气流风速约为0.1 m/s。因此,在系统方案设计时,需充分考虑侧顶送风量的比例,避免出风气流过大,使站立此区域人员产生吹风感。

3 结论

1) 与传统方式相比,地铁车辆采用多方位送回风系统既可以提高座椅区域与门区乘客的舒适性,又降低了客室中部送风量,缓解了中部乘客的吹风感,满足了地铁车辆热舒适性要求。

2) 通过数值模拟计算,送风道各出风口预测风量与理论风量偏差在15%之内。客室人员活动区域微风速在0.20~0.42 m/s之间,断面垂直温差在3℃以内,速度场与温度场分布均匀,满足地铁标准要求,从而验证了多方位送回风系统在地铁车辆中运用的可行性。

3) 采用多方位送回风系统设计时,需考虑中顶散流器与侧顶送风量的分配比例。此外,由于客室侧顶板与车顶之间安装设备多,风道结构设计时需控制支风道尺寸,确保足够的安装空间。

参考文献

- [1] ASHRAE. Ventilation for acceptable indoor air quality: ASHRAE Standard 62.1—2010[S]. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- [2] 连之伟,刘蔚巍. 空调房间气流组织与人体热舒适[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(5): 22.
- [3] 龙静,王书傲. 地铁车辆空调系统送风风道分析[J]. 地铁车辆, 2004(7): 15.
- [4] 刘松,程勇,刘东,等. 人体吹风感影响因素的总结与分析[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(2): 7.
- [5] ASHRAE. Thermal environment condition for human occupancy: ASHRAE Standard 55—2010[S]. Atlanta: ASHRAE, 2011.
- [6] 钱珊珊,安恩科. 上海地铁A型车车厢体空调气流组织的模拟研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2008, 29(124): 28.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通车辆空调、采暖及通风装置技术条件: CJ/T 354—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

(收稿日期: 2019-08-17)

(上接第8页)

参考文献

- [1] 王伯铭. 高速动车组总体及转向架[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [2] 张捷,肖新标,张玉梅,等. 100%低地板列车车内噪声传递特性分析[J]. 振动工程学报, 2015, 28(4): 541.
- [3] 韩光旭,张捷,肖新标,等. 高速动车组车内异常振动噪声特性与车轮非圆化关系研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50

(22): 113.

- [4] 刘晓龙. 地铁司机室内噪声异响原因探析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [5] 徐志胜,翟婉明. 轨道交通轮轨噪声机理分析[J]. 噪声与振动控制, 2006, 2(1): 52.
- [6] 樊康,华春蓉,闫兵,等. 某航空发动机扭振减振器失效机理分析[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(02): 318.

(收稿日期: 2019-10-20)