

车辆客室热舒适性及顶部侧送格栅风口设计研究

燕成飞¹ 郑学林¹ 臧建彬²

(1. 上海海事大学商船学院, 200135, 上海; 2. 同济大学机械与能源工程学院, 200092, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘要 通过利用多孔介质一维“多孔跳跃”模型和标准 $k-\varepsilon$ 方程模型相结合的方式, 研究车辆客室顶部侧送格栅风口送风角度、顶部侧送格栅风口位置及送风口风速。通过仿真模拟, 比较分析典型截面处的热舒适性指标 PMV(预测平均热感觉)和 PPD(预测不满意百分率)。结论为: 车辆客室上部格栅侧送风口建议采用与车辆客室上部格栅顶送风口错开的布置方式, 格栅方向与列车地板水平面成 45° 夹角, 风口风速为 1 m/s 。

关键词 地铁列车; 空调; 热舒适性; 气流组织

中图分类号 U270.38*3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.022

Study on the Thermal Comfort of the Vehicle Passenger Compartment and the Design of the Top Side Grille

YAN Chengfei, ZHENG Xuelin, ZANG Jianbin

Abstract By using combination of the porous media one-dimensional "porous jump" model and the standard $k-\varepsilon$ equation models, the airflow angle of the top side grille air outlet, the position of the top side grille air outlet and the air speed at the air outlet in the passenger compartment were studied. Through simulation, comparative analysis of thermal comfort index PMV (predicted mean vote) and PPD (predicted percentage dissatisfied) at a typical section were conducted. The conclusion is that the air outlet on the upper grille side of the passenger compartment is recommended to be staggered from the air outlet on the top grille of the passenger compartment. The direction of the grille is at an angle of 45° to the train floor horizontal plane, and the air velocity of the air outlet is 1 m/s .

Key words metro train; air conditioning; thermal comfort; air distribution

First-author's address Shanghai Maritime University, 200135, Shanghai, China

地铁列车密闭的客室内环境主要依靠空调和通风系统来维持^[1]。若不能及时稀释和排走人体散发的气味和呼出的二氧化碳, 客室恶化的空气品

质会给乘客带来很大的不舒适感^[2-5]。客室内空气的流场分布是影响乘客舒适性的主要因素。因此, 保证良好的客室内环境是城市轨道交通车辆通风系统设计的重要组成部分, 其主要任务和目标就是为乘客提供良好的气流组织和温度、湿度环境^[6]。然而, 车辆空调在达到额定制冷量的同时并不一定能使客室内空气的速度、温度和湿度达到人体舒适度的要求。这是因为, 客室内的舒适环境主要取决于送风系统设计是否合理。

本文采用多孔跳跃模型以及 $k-\varepsilon$ 湍流模型对车辆客室进行数值模拟, 再利用 UDF(用户自定义计算)手段得出 PMV(预测平均热感觉)和 PPD(预测不满意百分率)分布情况。研究结果表明, 空调列车设计过程中应全面考虑车辆客室进风口、出风口大小、位置、进风质量、进风速度和进风温度对客室内气流的影响。

1 物理、气流组织模型设定

1.1 物理模型建立

以武汉某条地铁线的列车为研究对象, 由于列车较长且内部结构对称, 本次仿真模拟只选取列车的 $1/4$ 截面进行研究, 其中: 车辆客室长 4.2 m , 宽 2.7 m , 客室中部地板距离顶板高为 2.1 m ; 客室主要分为座椅区和门区两部分; 客室内设 2 排座椅, 位于座椅区左右两侧, 每排座椅限定 6 人。客室的负荷沿客室及车长方向中心截面对称, 为加快计算速度, 取客室的一半进行计算, 模拟计算时只针对满载工况。

1.2 数值计算模型选择

$k-\varepsilon$ 模型在工程应用上的准确性已经得到了大量的试验验证, 精度可靠, 且相对于大涡模拟等, 计算量要小很多。多孔跳跃模型考虑了孔板送风的阻力特性, 气流从客室流经孔板时会受到明显的阻碍作用, 以此反映孔板回风口的阻力作用。

1.3 边界条件的设定

1) 入口、出口边界条件设置: 送风道空气入口

和回风口采用速度入口边界条件;排风口为压力出口,出风口压力设定为 0。

2) 多孔跳跃模型边界条件设置:

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho C_2 v^2 - \frac{\mu}{\alpha}v$$

式中: Δp 为压差, v 为入口气流速度, α 为黏性阻力系数, C_2 为惯性阻力系数, ρ 为密度, μ 为粘度。多孔跳跃模型模拟后得到拟合公式为: $\Delta P = 8.593v^2 - 0.151v$ 。计算得出 $a = 1.19 \times 10^{-4}$, $C_2 = 14.03$ 。

3) 其他设置:客室各部位的传热系数 K 值为 $2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 。在额定乘员条件下,内热源释放的热量为 $192 \text{ W}/\text{m}^3$ 。采用传热学中第二类边界条件,设置边界条件热流密度;根据客室外部主流温度及车体传热系数,确定客室内各部分的热流密度。

2 地铁车辆客室顶送风口结构设计

为了满足乘客更高的舒适性的需求,针对顶部风口位置、侧送格栅送风角度、侧送风口送风速度进行地铁车辆客室顶部侧送格栅设计,以此得到较优列车送风方式。

1) 客室顶部风口位置。根据实车模型建模,客室顶部风口位置分别设置为与顶部格栅送风口位置对顶(以下简称“风口设置 1”)和与顶部格栅送风口位置错开(以下简称“风口设置 2”)。

2) 客室顶部侧送格栅送风角度。确定了侧面格栅风口的位置后,对格栅的方向进行分析,为此选取了 5 个典型的角度:分别为与水平面分别呈 30° 、 45° 、 60° 、 90° 夹角以及 与送风口垂直。5 个典型的角度分别对应工况 1 到工况 5,目的是得到最优的送风角度。5 个典型角度的送风量相等,均为 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。每个模型中都有 22 个大小相等的送风口,均匀分配风量。

3) 客室顶部侧送风口送风速度。确定侧送格栅的送风口位置和方向后,以上述得出的结论为前提,在保证风量不变的前提下,通过改变送风口大小来确定送风风速。风速分别为 0.60 m/s 、 0.85 m/s 、 1 m/s 、 1.20 m/s 、 1.35 m/s ,分别对应工况 1 ~ 工况 5。

3 车辆客室内人体典型截面舒适性分析

3.1 舒适性指标规范

在 ISO 7730^[8] 标准中规定了人体感到舒适的环境为: $-0.5 \leq \text{PMV} \leq 0.5$, PPD 值在 10% 以内才

是推荐的可接受的热舒适范围。PMV 热感觉标尺如表 1 所示。

表 1 PMV 热感觉标尺

舒适性指标	热	暖	微暖	适中	微凉	凉	冷
PMV 值	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

3.2 数值模拟截面划分

对于人体而言,身体各部位对于冷热感最为敏感的部位是人体头部,为直观而有针对性地对客室 PMV 和 PPD 情况进行判断,仿真模拟分析时选取客室内的 2 个典型截面(见图 1)。 Hight1 截面为距车厢底部 1.1 m 高度的截面(坐姿乘客头部高度 $Y = 21.511 \text{ m}$), Hight2 截面为距车厢底部 1.7 m 高度的截面(站立乘客头部高度 $Y = 22.111 \text{ m}$)。

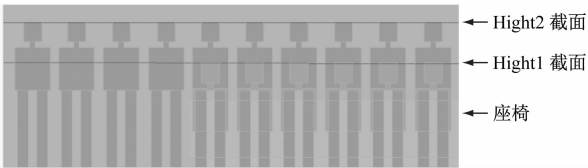


图 1 仿真模拟物理模型主视图

3.3 数值模拟结果分析

3.3.1 客室顶风口位置

根据 PMV 分析可知:在 Hight1 截面处 2 种客室顶部风口位置下的 PMV 值都小于 0;风口设置 2 下整个 Hight1 截面位置上的 PMV 值比风口设置 1 下的更接近于零,舒适性较好;尤其是在座椅区,风口设置 1 下 Hight1 截面位置处的 PMV 值达到 -2 ,乘客会感到偏冷;风口位置 1 下,无论是在座椅区还是沿着客室中心线的位置处,PMV 值在 -1 左右,坐姿乘客的冷感觉很小;风口设置 2 下 Hight2 截面位置处的 PMV 值在 -1 到 0 的区间范围内,人体热舒适性较高。

根据 PPD 分析可知:风口设置 1 下 Hight1 截面门区靠座椅侧壁面的区域,PPD 值较大,乘客的不满意度较高;风口设置 2 下 Hight1 截面门区靠座椅侧壁面的区域所占面积较小,乘客的不满意程度较低; Hight2 截面处客室中心线和送风射流方向区域中,风口设置 2 下客室中线上区域的 PPD 值要低于风口设置 1 下的 PPD 值。

3.3.2 顶部侧送格栅风口送风角度

根据 PMV 分析可知:在座椅区,受送风射流贴壁的影响,座椅附近靠壁面位置、靠近客室中心线区域、靠近客室壁面区域的 PMV 值较低,各工况下

人体热舒适 PMV 值由低到高的排序为:工况 2、工况 4、工况 3、工况 1、工况 5;在门区,热舒适性存在明显区别,就 PMV 值而言,工况 1、工况 2 的优于工况 3、工况 4、工况 5 的;在门区和座椅区连接区域,工况 2 的 PMV 值更满足坐姿乘客的舒适感;在送风角度为 45° 时,在 Hight2 截面,体感微凉区域面积较大。

根据 PPD 分析可知,在靠近客室中心线附近的区域和座椅区靠近客室壁面区域,有 4 种工况下的 PPD 值都超过 50%,工况 1 和工况 3 下乘客不满意程度大于 50% 的区域要明显多余其他工况。

3.3.3 顶部侧送格栅风口送风风速

根据 PMV 分析可知:在 Hight1 截面处的座椅区,对于 5 种模拟工况,因受到气流贴附效应和送风气流特性的影响,座椅靠壁面区域和客室中心线区域的 PMV 值小于 -1 的占比较大,风速为 1 m/s 时的 PMV 值占比最小,靠近客室中心线的 PMV 值小于 -1 的区域基本相同;在门区位置,工况 2、工况 3、工况 5 下,靠近客室壁面的位置会有局部区域出现 PMV 值小于 -1 的情况,其中工况 3 下 PMV 值小于 -1 的占比较大,工况 2 和工况 5 下 PMV 值小于 -1 占比较小;而工况 1 和工况 4 下靠近壁面处的 PMV 值小于 -1 的区域占比非常小;在其他区域,工况 2 和工况 4 下的 PMV 值基本都小于 0;工况 1、工况 3 和工况 5 下都出现局部区域 PMV 值大于 0 的情况;工况 3 下 PMV 值大于 0 但基本在 0.1 左右;工况 5 下的 PMV 值大于 0 的占比较大,且都在 0.5 左右。列车明线运行时,在 PMV 值大于 0 的这一部分区域,可能会出现人体体感偏热现象。在 Hight2 截面处,5 种模拟工况中,存在乘客有较强的冷感的区域,其中工况 2 下的占比最小。

根据 PPD 分析可知:在 Hight1 截面处,整体而言,工况 2 和工况 3 的 PPD 值在 10% 范围波动的区域在门区域占比较高,并且在坐姿乘客处乘客的不满意度也是最低的;工况 2 和工况 3 在该水平高度的热舒适是 5 种工况中最佳的,二者差别不大;在 Hight2 截面处,座椅区乘客的不满意百分比和送风口下方的乘客不满意百分比的区域都是相对较高的,但是工况 2 下在座椅附近的站立区乘客满意度占比要优于其他工况,而且靠门区域有很大部分不满意度在 10% 左右,因此工况 2 是所有工况中热舒适性指标较好的。

4 结语

本文通过仿真模拟对地铁车辆客室人体热舒适性进行研究。研究了顶风口位置、顶部侧送格栅风口送风角度、顶部侧送格栅风口送风风速,主要结论如下:

1) 对于顶部侧送风口位置而言,顶部格栅送风口位置错开的布置方式较列车客室上部格栅侧送风口对应的布置方式,在人体热舒适上占优,因此侧送格栅风口位置建议采用与顶部格栅送风口位置错开的布置方式。

2) 对于顶部侧送风口格栅方向而言,针对格栅与水平面成 30° 、 45° 、 60° 、 90° 以及送风口垂直 5 种工况,对比分析 PMV 和 PPD 热舒适性指标。格栅与水平面成 45° 夹角的情况较其它 4 种工况略有优势,故侧送格栅风口格栅方向建议采用与水平面成 45° 夹角的角度。

3) 对于顶部侧送风口风速,在无太阳辐射情况下,风速为 0.85 m/s 、 1 m/s 时,客室内热舒适较好,但考虑到列车在明线运行时,会引入太阳负荷,因此建议顶部侧送风口风速采用 1 m/s 。

参考文献

- [1] 繆炳荣,张卫华,邓永权.新一代中国高速铁路动车组面临的技术挑战与策略研究[J].中国工程科学,2015,17(4):98.
- [2] 陈焕新,杨培志,赵向红.铁路空调客室内品质的现状与研究对策[J].中国铁路,2001,39(2):59.
- [3] 叶晓江,连之伟,周正平.空调客车的空气品质与热舒适[J].中国铁路,2005,27(9):63.
- [4] KATAKAL T. Prediction of thermal sensation based on simulation of temperature distribution in a vehicle cabin[J]. Heat Transfer Asian Research, 2001,30(3):195.
- [5] MEZRHAB A. Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment[J]. Applied Thermal Engineering, 2006,26(14-15):1967.
- [6] 孙相叶,王书放,谈越明.浅析客车通风铁道车辆[J].铁道车辆,1999,37(9):32.
- [7] 孟添.列车气密性及车内热舒适性研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [8] ISO. Moderate thermal environments-Determination of the PMV-PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort;ISO 7730:1984[S]. Geneva:International Standard Organization,1984.

(收稿日期:2018-01-18)