

文章编号: 1671-6833(2004)01-0105-04

空调列车室内流场的数值模拟

卢纪富¹, 张莉红², 杨建中¹, 危晓英¹

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 上海理工大学动力工程学院, 上海 20093)

摘要: 用传统的方法计算空调列车的室内气流组织, 通常不能计算考虑太阳辐射引起室内负荷的再分配, 计算结果具有较大的局限性. 首先由 Monte-Carlo 和 Gebhart 方法计算出了太阳辐射在各个壁面上的分配, 并以此为基础建立了空调列车气流组织数值模型的边界条件. 采用双方程模型作为控制方程进行了数值求解, 与实验结果对照表明, 数值计算所建的物理、数学模型及简化措施是合理的.

关键词: 空调列车; 数值模拟; 双方程; 蒙特卡罗方法; Gebhart 方法

中图分类号: TU 834.3 **文献标识码:** A

0 引言

空调列车室内气流组织不好, 导致许多乘客在乘坐空调列车之后常常抱怨空气不佳, 不舒适, 常常有头疼、头晕等症状. 以往空调列车的通风系统的设计, 一般是按照民用建筑的室内通风空调的射流计算公式或者模型试验来预测和分析空调列车内的气流组织是否合理, 但是由于空调列车具有空间较小、室内有复杂的室内障碍物、同时伴随着复杂的传热方式等特点, 因此用射流公式计算空调列车室内气流组织的分布会有相当大的误差. 如用试验方法进行测试研究, 其优点是能够检测出某些测试点的真实值, 但其过程受到许多条件的限制, 如试验成本高、周期长等. 但是如用数值计算的方法就可以避开这些限制, 充分发挥其具有的计算速度快、成本低、资料全等优点, 从而在设计的预测计算阶段就可以很方便地调整送风参数、送风位置、回风位置和其他边界条件等, 使其能够达到设计的目的^[1~4].

近些年来, 许多学者对空调房间内的气流分布进行了大量的研究, 如 Komoriya T 利用试验和模拟计算对汽车空调通风系统进行了分析^[5]; 万建武也用 PHOENICS 软件计算了空调汽车内的二维温度场和速度场及 CO₂ 浓度场^[6]; 靳道勇对空调列车进行了三维气流组织的数值模拟^[7]. 他们均取得了有益的结论. 本文采用了 $k-\epsilon$ 三维紊

流双方程模型, 将送风气流与车厢形状及障碍物作为一体来考虑, 用整体求解法计算了空调列车(硬座车)室内空气流动与传热问题. 对空调列车室内气流组织数值模拟, 着重研究了边界条件对室内流场的影响, 为空调列车室内气流组织优化设计和舒适性研究提供了一定的参考依据.

1 物理模型

本文所模拟计算的对象是空调列车硬座客车(25型). 客室内部空间尺寸: 客室长度 19.68 m、宽 3 m、高 2.4 m; 布置 24 排座椅, 每排 5 人(靠两端车门的座椅每排 4 人), 全车定员 118 人. 送风方式为上送上回形式, 在车厢中间有两条对称的条缝性送风口, 回风形式为门回风. 针对空调列车车厢的特点, 对列车的计算模型采取了以下简化措施:

(1) 列车室内各壁面传热(包括车顶和地板)均匀(忽略热桥的影响).

(2) 计算区域出口边界采用局部单向化处理, 以计算区域临近出口断面的网格单元参数作为出口参数.

(3) 条缝形出风口在客室长度方向是连续、均匀的.

(4) 以计算区域——客室两端的车门开启为模拟计算状态, 这时, 车门即为计算区域出口(回风口).

收稿日期: 2003-09-16; 修订日期: 2003-12-27

作者简介: 卢纪富(1976-), 男, 山东省日照市人, 郑州大学助教, 硕士, 主要从事气流组织模拟评价方面的研究.

(5) 在人体热负荷按座椅表面均匀布置的情况下,不考虑车内物体(座椅等)的实际厚度对流场的影响。

2 数学模型及边界条件

空调列车的气流数学模型的控制方程包括:连续性方程、动量方程、能量方程、紊流动能 k 方程、紊流能量耗散 ϵ 方程。根据上述分析与简化,空调车室内空气紊流流动与传热的时均微分方程组为^[9]

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0.$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + \rho g_i, \quad (i=1,2,3).$$

能量方程:

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{\rho u_j T} \right) + S$$

$k-\epsilon$ 方程分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \\ &\rho \epsilon - g \beta \frac{\mu_t}{\sigma_r} \frac{\partial T}{\partial x_j}; \\ \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &\frac{\epsilon}{k} (c_1 G - c_2 \rho \epsilon). \end{aligned}$$

建立上述的控制方程之后,根据列车车室的实际情况和数值计算的特点,确定了如下的流场模拟计算边界条件。

(1) 客室端部不直接同车外进行热交换,可视为绝热边界。

(2) 取客室长度方向的中间断面为该方向的几何对称面,作为计算区域的另一端部边界,认为绝热边界。

(3) 空气出入口边界:入口边界一条缝形出风口作为计算区域的入口边界,根据计算及试验结果确定的空调送风参数作为计算边界条件;出口边界一以客室端门开启时为计算状态,端门为出口边界,出口边界按充分发展流动的单向化处理。

用向空调客室内传热,形成部分车内热负荷。

3 网格划分和数值求解方法

基于这样一个事实,网格划分并不是越密越好,网格加密之后,不但是计算时间大大增加,而且收敛是越来越困难。针对本文研究对象的特点,采用在笛卡尔直角坐标系下划分了适当的网格,并对控制方程进行按控制容积方法和交错网格进行离散,对流项和扩散项的离散格式采用幂函数格式。计算时采用了压力修正法即 SIMPLE 算法^[7](Semi-Implicit Method For Pressure-Linked Equations,来解决速度与压力的耦合问题。对于给定的压力场(它可以是初始假定的或者是上一层次计算所得的),按次序求解速度分量的代数方程。但由此得到的速度场未必能满足连续性方程的要求,因此,必须对压力场进行修正)。

4 计算结果及分析

4.1 试验结果和数值分析结果的比较

为验证数值计算结果的准确性,对空调列车的室内气流组织进行了试验,试验测点布置如下:在客车长度方向 $Y=7.4\text{ m}$ 处,高度方向上按人脚的高度,座椅的高度,人坐在座椅上时头部的高度、人体站立时头部的高度的位置上布置了4个测点,在车室宽度方向上布置了5个测点;在座椅的中间位置和两侧,实测得到了各点的温度值和速度值。计算结果与实测值对比表明,计算结果是比较理想的。图1、图2是计算值与实测值对比图,在图中清楚的说明了选用第二类边界条件能够更好的与实际测量相吻合。所以进行研究太阳辐射对气流组织的影响的分析的数学模型的边界条件均是在第二类边界条件的基础上考虑的。

表1 数值计算工况表

Tab. 1 Working conditions of numerical calculation

边界条件	工况	是否考虑室外太阳辐射	是否考虑太阳辐射在各个壁面的分配
第一类边界条件	1	否	否
	2	是	否
	3	是	是
第二类边界条件	1	否	否
	2	是	否
	3	是	是

说明:送风形式为顶板条缝送风,送风口宽 14 mm ,送风温度为 $17.5\text{ }^\circ\text{C}$,送风速度为 4 m/s ,方向垂直于顶板。

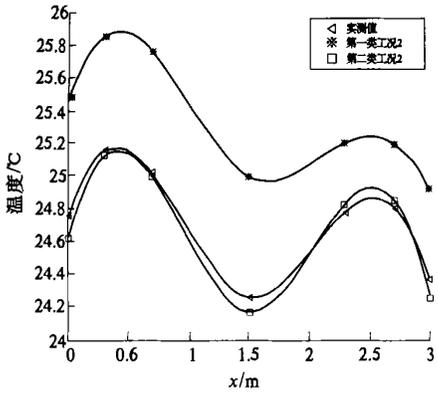


图1 温度比较图(Z=1.7 m)

Fig.1 Temperature comparison (Z=1.7 m)

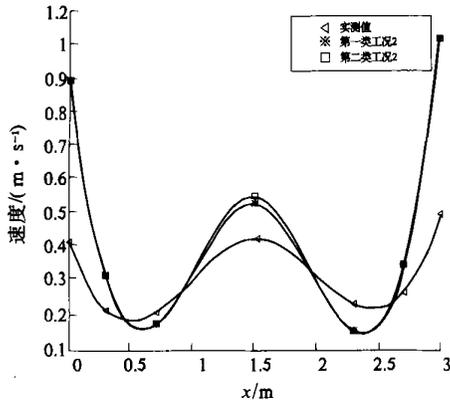


图2 速度比较图(Z=1.7 m)

Fig.2 Velocity comparison (Z=1.7 m)

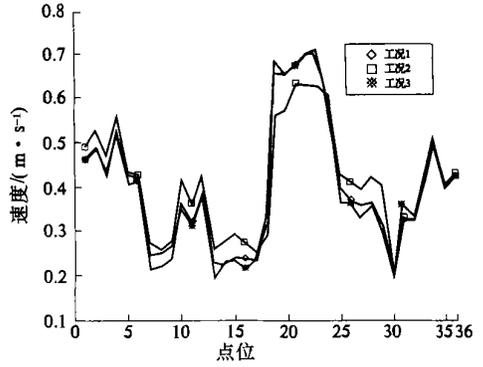


图3 3个工况的速度值

Fig.3 Velocity of three working conditions

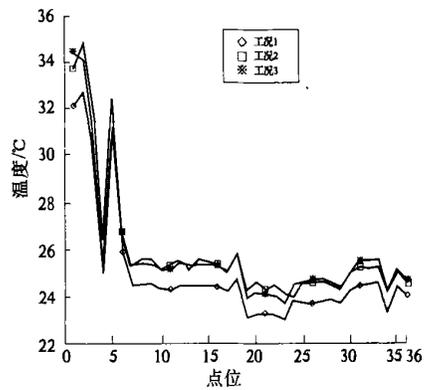


图4 3个工况温度值

Fig.4 Temperature of three working conditions

4.2 太阳辐射对室内温度场和速度场影响的分析

分析由辐射对气流组织的影响,在高度为0.85 m处取一个剖面,在车室宽度方向上取6个点,在车室长度方向上也取6个点,对这36各数据点进行分析比较.速度场考虑X,Y,Z 3个分速度的影响.分析结果表明辐射对于列车车室内的速度场影响尽管绝对数值不是很大,但是偏差的百分比是比较大的,并且考虑辐射之后计算出来的速度场的均匀性有所改善(见图3),对于X,Z方向的速度有较大的影响,速度值均有所增加.而对于Y方向的速度影响不是很大.太阳辐射对列车车室内流场的温度的影响,计算结果表面辐射对于整个流场的温度影响尽管百分比不是很大,但绝对数值较大,平均达到了1℃;在考虑了太阳辐射的基础上又考虑了在室内各个壁面之间的辐射,总体说来对于流场的影响温度值较前者没有大的增加,但温度场更趋向于均匀,对速度场的影响和两类边界条件的工况一比较起来没有较大的变化如图4所示.

5 结论

(1) 从以上的计算与分析中可以看出,计算结果中的温度计算值和实测值比较吻合,而速度值有较大的误差,分析起来主要是和室内物体的简化有关,没有考虑客用小桌和行李架的影响,以及所采用的数学模型有关.

(2) 空调送风系统的送风参数的组合和送风位置对车室内的气流组织的分布起到重要的影响作用.

(3) 对空调列车气流组织进行数值计算,可以预测室内气流分布,具有运算速度快,边界条件改变容易,成本低,准确性高等优点.

参考文献:

[1] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
 [2] 靳宜勇,张桂荣. 紊流k-ε双方程数学模型应用于铁路客车内气流组织的模拟计算[J]. 铁道车辆, 2001, 39(1): 14~16.

- [3] 庄达民,林国华,袁修干.高速列车舱内气流分布的数值模拟[J].铁道学报,2000,22(2):26~30.
- [4] 王定标,胡祥报,郭茶秀,等.大型纵流壳程换热器三维流动与传热数值模拟[J].郑州大学学报(工学版),2002,22(3):13~18.
- [5] KOMORI YA T. Analysis of vehicle passenger compartment ventilation using experimental and numerical model [J]. SAE Paper, 1989, (8 1):336~348.
- [6] 万建武,VANDERKOOI J.长途客车中的空气品质和人体热舒适研究[J].建筑热能通风空调,1998,(3):8~11.
- [7] 帕坦卡S V.传热与流体流动的数值计算[M].张政,译.北京:科学出版社,1984.

Numerical Simulation of Airflow Organizing in Air-Conditioned Railway Passenger Cars

LU Ji-fu¹, ZHANG Li-hong², YANG Jian-zhong¹, WEI Xiao-ying¹

(1.College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2.College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Using traditional calculation method to calculate the air current in air conditioned train can not take into consideration heat load redistribution on faces of sun radiation and the result is limited. This paper applies the Monte-Carlo method and Gebhart method in simulating the distribution of sun radiation in every wall and this can be boundary condition for numerical model. Carrying out the numerical simulation of airflow organizing by using double equation model as control equation. The tests show that the physical and mathematical model in numerical computation is reasonable.

Key words: air condition train; numerical simulation; double equation; Monte-Carlo method; Gebhart method

(上接第104页)

Effects of Melting Temperature on the Tensile Properties of Weld Lines in Short-Fiber-Reinforced Injection Molding

YANG Yang, DONG Bin-bin, LIU Chun-tai

(National Engineering Research Center for Advance Polymer Processing Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The properties of weld line are not only determined by materials, but also by processing conditions. In this paper the tensile strength of injection-molded glass fiber-reinforced PA66 (Zytel 70G33L) with and without weld lines, with different melting temperatures, are studied with experimental and numerical methods. It shows that the strength with and without weld lines strengthens with the melt temperature elevating, for samples without weld line, the strength is enhanced only within about 5%, but for samples with weld line, this varieties approximated 20%. The numerical analysis shows that the main factors that affect the strength of weld line are fiber orientation and skin-core-skin structure.

Key words: short-fiber-reinforced injection molding; weld line; melting temperature