

高速列车通风设计方法的研究

庄达民

林国华

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

(中科院力学所 LNM 开放实验室)

袁修干 王晓新

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要: 由于高速列车车厢高度密闭的特性,高速列车的通风设计必须满足旅客的安全性和舒适性.而传统的依赖自由射流的经验公式确定车厢内温度场和速度场的方法因无法考虑送排风气流和室内障碍物的影响,通风设计很大程度上依赖于模型实验.本研究将送排风气流与车厢型状及座椅作为一体来考虑,通过数值模拟车厢内温度场和速度场来保证满足舒适空调要求的同时,还可方便地确定出送风速度和送风温差.该方法不仅适用于高速列车的通风设计,还能适用于一般载人列车及飞机客舱的通风设计.

关键词: 通风;射流;数值计算;高速列车

中图分类号: X 962; V 211.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965(2000)01-0052-04

高速列车是我国目前正在开发研究中的重大科研项目.为了防止列车过隧道等时车外压力急剧变化对车内旅客安全性和舒适性带来的影响^[1],高速列车车厢要求具有高度密闭性能.为此从旅客的安全性和舒适性出发研究适合高速列车的通风设计至关重要.

以往空调列车的通风设计是参照室内通风设计将送风气流看成射流^[2],通过求解射流的经验公式来确定车厢内各个段面的温度分布和速度分布,再视该温度分布和速度分布是否满足设计要求来调整送风口位置、尺寸及送风速度等.由于射流的经验公式无法考虑到具体的车厢型状及座椅等的影响,亦无法考虑排风气流对射流形成的影响,故采用射流的经验公式获得的计算结果是比较粗糙的.本研究采用数值解析的方法来求解高速列车车厢内流场和温度场,由于将送排风气流与车厢型状及座椅作为一体来考虑,除计算精确度高外,还能方便与精确的预测出合适的送排风口位置、尺寸及送排风速度和送风温差.

1 求温度场和流场的经验公式

参照我国广深线准高速列车通风设计方案,

在车厢长度方向布置两长条条缝型送风口,从条缝口送出的气流可看成为两维平面射流,即求出沿车厢长度方向上某一断面的速度和温度分布后就可将其代表车厢长度方向上任一断面的速度和温度分布.从条缝型送风口射出的射流轴心速度和温度及射流断面速度的计算公式^[2]如下所示:

$$\frac{V_x}{V_0} = \sqrt{K \frac{H_0}{X}} \left[1 \pm 1.6 \frac{Ar}{\sqrt{K}} \left(\frac{X}{H_0} \right)^{3/2} \right]^{1/3} \quad (1)$$

$$\frac{t_x}{t_0} = \sqrt{0.83 K \frac{H_0}{X}} \left[1 \pm 1.6 \frac{Ar}{\sqrt{K}} \left(\frac{X}{H_0} \right)^{3/2} \right]^{1/3} \quad (2)$$

$$\frac{Y}{V_x} = \exp \left[- \frac{1}{2} \left(K \frac{Y}{X} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (3)$$

因沿长度方向布置有两条送风口,当两股平面射流重叠时在重叠处的流速按下式计算:

$$V_{12} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (4)$$

上述式中各符号的意义为:

X ——离送风口的距离, m;

Y ——离射流中心面的距离, m;

H_0 ——送风口宽度, m;

K ——送风口型状系数;

Ar ——阿基米得数;

收稿日期: 1998-06-10

基金项目: 国家教委留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介: 庄达民(1953-),男,浙江奉化人,副教授,100083,北京.

- V_0 ——送风口处速度, m/s;
- V_x ——在 x 处的射流最大流速, m/s;
- V ——断面上 y 处的流速, m/s;
- V_{12} ——两股射流重叠处的流速, m/s;
- t_0 ——在送风口处的射流最大温差, ;
- t_x ——在 x 处的射流最大温差, ;
- \pm ——朝下送冷风和朝上送热风时取 +, 朝上送冷风和朝下送热风时取 - .

2 车厢内流场和温度场的数值解析方法

将车厢、送排风气流及室内障碍物(行李架和座椅)作为一体,通过求解时间平均 N-S 方程、和 从属方程及能量方程来得到车厢内任一断面上的温度场和流场.这里 和 从属方程的作用是为了封闭时间平均 N-S 方程中的雷诺应力项而由 N-S 方程及紊流模型推导而出.由于采用无因次量计算,从求出的温度场和流场可直接得到满足舒适空调要求的送风温差和送风速度.另通过调整送排风口的大小及位置可得到车厢内最佳的温度分布和速度分布.采用计算机仿真的基本计算公式为^[3]

$$\begin{aligned} & \partial(\phi(x, y, z))/\partial t = \\ & - \nabla \cdot (U(x, y, z)\phi(x, y, z)) + \\ & \nabla(\phi(x, y, z)\nabla\phi(x, y, z)) + S\phi(x, y, z) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\phi(x, y, z)$ 分别表示变量 $U(x, y, z)$, $T(x, y, z)$, (x, y, z) 和 (x, y, z) . $U(x, y, z)$ 为速度向量(在 x 、 y 和 z 3 个方向上的分量分别称为 u 方程, v 方程和 w 方程); $T(x, y, z)$ 为温度; (x, y, z) 和 (x, y, z) 分别为紊流能量和紊流能量消散率; $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$; $\phi(x, y, z)$ 为对应于 $\phi(x, y, z)$ 的扩散系数; $S\phi(x, y, z)$ 为对应于 $\phi(x, y, z)$ 的生成项.本研究采用 HSMAC 法和高精度差分格式 QUICK^[4]来离散方程式(5).离散方程式(5)时无因次速度 \bar{U} 和温度 \bar{T} 定义为

$$\bar{U} = U/U_0 \quad (6)$$

$$\bar{T} = (T - T_s) / |T_0 - T_s| \quad (7)$$

式中, U 为车厢内任一点的速度, m/s; U_0 为送风口处的速度, m/s; T 为车厢内任一点的实际温度; T_s 为环境空气温度,这里设其为排风口处温度; T_0 为送风口温度;送风温差为 $|T_0 - T_s|$, 其亦为计算基准量.

3 车厢形状及送排风口设定

车厢形状如图 1 所示,车厢两侧左右对称各设 9 排等间距(800 mm)的俩人座椅(宽 400 mm).在车厢上侧左右各设一排行李架(宽 600 mm).图 2 为车厢横断面图,通风方式为上送下排方式,即在车厢顶部对称的设有两排条缝型送风口,在车厢底部对称的设有两排条缝型吸风口.由于车厢内部的布置及送排风方式都前后呼应左右对称,除车厢两端因座椅的布置使边界条件相异外,基本上可认为每两排座椅间的通风条件是相同的.图 2 中 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 分别代表离车厢 1.2 m 高度、0.8 m 高度、0.4 m 高度和 0.1 m 高度上的 4 个断面. Z_1 和 Z_4 代表了乘客坐着时头部和脚部的高度. Z_2 横切了座椅故可反映座椅前后的流场和温度场. Z_3 在座椅下部故可反映座椅下部的流场和温度场.

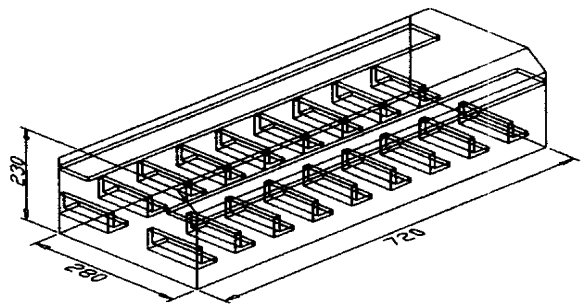


图 1 车厢形状及内部布置

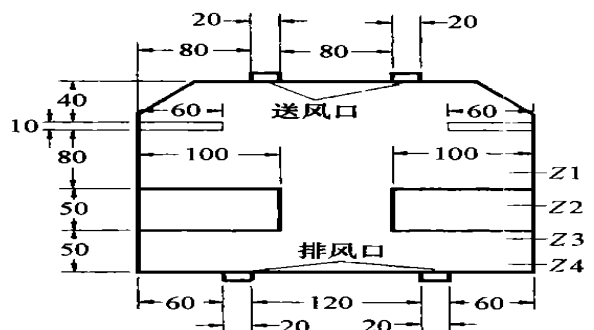


图 2 车厢横断面图

4 车厢内流场和温度场的分布

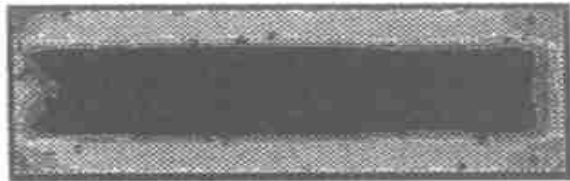
计算所需的边界条件如表 1 所示.计算所得的各个断面的温度场和流场如图 3 和图 4 所示.由图 3 和图 4 可知除车厢两端边界条件相异对温度场和流场分布有些影响外,各排座椅间的温度场和流场分布基本上是均匀的.为此沿车厢长度方向取温度和速度分布的平均值,这样图 3 和图 4 可由图 5 和图 6 所示的车厢横断面上的温度和

速度分布来代表.

表1 初始值及边界条件的设定

边界位置	初始值及边界条件
空气入口	$\bar{U}_n = 1.0; \bar{T}_n = -1.0; \nu = 0.002; Re = 25000$
空气出口	$\bar{U}_n = 1.0; \bar{T}_n = 0.0; \tau_n$:自由滑动
壁面	$\bar{U}_n = 0.0; \bar{U}_t$ 按1/7指数分布确定; \bar{T} 按绝热条件; τ :自由滑动

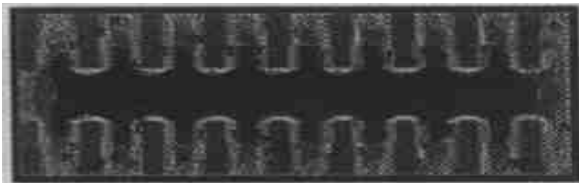
注:下标n和t分别表示与墙面垂直和平行,车厢内的得热量假定均匀散布在车厢空间内.



a Z1 断面温度分布



b Z2 断面温度分布



c Z3 断面温度分布

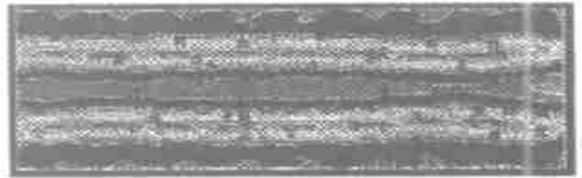


d Z4 断面温度分布

图3 各计算断面上的温度分布

由图5可知人坐着时车厢内垂直高度上最大平均温差分布在Z1和Z3断面处.这是因为Z1断面处于送风上流区,除车厢的两侧因行李架阻挠通风气流有效的带走热量,使该处的温度分布略高于Z2和Z4断面外,受送风冷气流的影响Z1断面的平均温差分布最低.而Z3断面正处于座椅下部,该处除通道外为通风死角区,热量不能被有效带走,故座椅下部的温度要高于其他垂直断面处的温度分布.

将Z1~Z4断面上的各点的温度再取平均值后,Z1和Z3断面处平均温差为 $\bar{T} - 0.21$.参照ASHRAE舒适空调设计要求^[5],该范围的垂直温差推荐不大于3.这样通过式(7)计算可得



a Z1 断面速度分布



b Z2 断面速度分布



c Z3 断面速度分布



d Z4 断面速度分布

图4 各计算断面上的速度分布

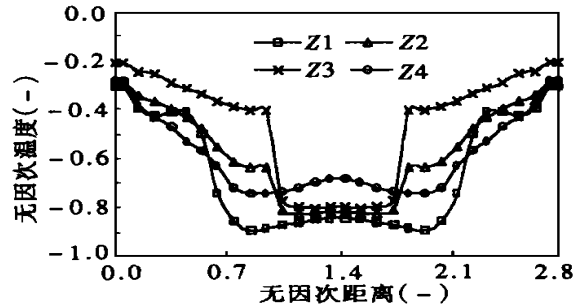


图5 车厢内各垂直高度上平均温差

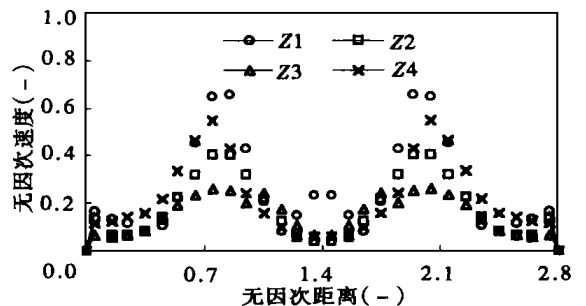


图6 各断面处的平均无量次速度分布

当送风温差 $|T_0 - T_s| = 14.0$ 时,可保证Z1和Z3断面处的垂直温差 $\Delta T \le 3$.与此相比采用射流公式(2)时只能得到射流轴心处的温差分布,

且计算无法考虑到具体的车厢形状及座椅等的影响,故最大的垂直温差分布在 Z1 和 Z4 断面处. 此时设 $|T_0 - T_s| = 12.0$ 、送风速度为 1 m/s 时 Z1 断面处的射流轴心处的温差为 9.325 , Z4 断面处的射流轴心处的温差为 6.448 . 从这两个断面上的射流轴心处的温差分布比较来看尚能满足舒适空调要求,但上述计算没有考虑室内形状、障碍物及排风气流的影响.

图 6 为各断面处的平均无因次速度分布,图 7 为送风速度 1 m/s 、用式 (1) 求得的射流断面速度分布.

图 6 中按 ASHRAE 舒适空调要求^[5]的平均风速应小于 0.25 m/s . 将 Z1 ~ Z4 断面上的各点的速度再取平均值后, Z1 断面处的平均速度 \bar{U}

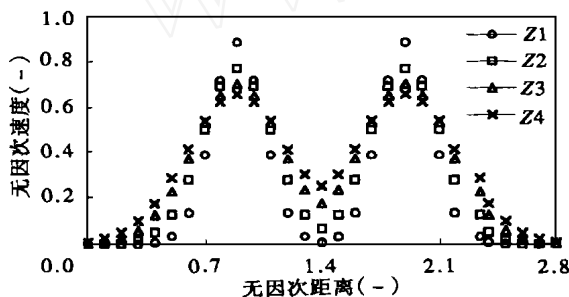


图 7 射流各断面处的无因次速度分布

0.265 为最大. 故为保证平均风速小于 0.25 m/s , 通过式 (7) 计算可得实际送风口速度应低于 0.94 m/s .

由图 7 可知由于没考虑排风影响及实际空间为有限空间,以至越远离喷口处射流所卷吸的空气越多、断面上的平均速度也越大,这显然偏离了实际情况.

5 结束语

本文采用了数值模拟的方法来取代传统的车厢内通风设计法,今后亦结合模型实验来进一步验证数值模拟法的实用性.

参 考 文 献

- [1] 张兴娟,袁修干. 高速列车车厢新型压力控制技术[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(5): 602 ~ 605.
- [2] 庄达民,袁修干. 差分格式优化组合[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(2): 192 ~ 196.
- [3] SHASE handbook [M]. Tokyo: Society of Heating, Air-conditioning and Sanitation Engineers, 1996.
- [4] 庄达民,袁修干. 空气龄的数值解法[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(5): 565 ~ 570.
- [5] ASHRAE handbook [M]. New York: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 1985.

Study on Ventilating Design Method in High Speed Train

ZHUANG Da-min

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

LIN Guo-hua

(Chinese Academy of Sciences, Institute of Mechanics, Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media)

YUAN Xi-u-gan WANG Xiao-xin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract: For the characteristic of high closing in compartment of high speed train, the ventilating design should ensure passengers' safety and comfort. Since the traditional method of temperature and velocity distribution depending on free jet experimental equations cannot consider the effects of push pull flow and obstacle, the ventilating design mainly depends on modeling experiment. By regarding the push-pull flow and the shape of compartment and the seats as a integer, the research method in this paper directly simulate temperature and velocity distribution to ensure the demanding of comfortable air conditioner and conveniently obtain feeding velocity and feeding temperature difference. This method is not only applied in ventilating design of high speed train but also applied in ventilating design of general manned train and of aircraft's cabin.

Key words: ventilation; jets; numerical computation; high speed train