

CJ818旅客机客舱气流组织数值仿真研究

袁建新 霍西恒 杨智 白穆

(上海飞机设计研究所,北京航空航天大学大型飞机高级人才培训班)

摘要:旅客机客舱供、排气系统对于客舱内部气流流动和温度分布具有重要影响,乘客的几何结构和热载荷等因素也会影响舱内气流流动。对 CJ818 客舱、供气系统和排气系统进行了几何建模及有限元建模,应用非结构化网格对模型进行离散,应用全隐式多网格耦合求解技术求解 N - S 方程,采用 RNGk - 模型封闭方程组。分别对单排座椅和多排座椅客舱进行了简化建模,研究了其在设计方案下舱内流动情况,并分析了乘客几何结构和乘客散热对舱内流动的影响,同时分析温度场和流场之间的依变关系。研究结果对于客舱空气分配系统设计和优化,客舱空气质量控制具有参考意义。

关键词:环控;气流组织;供气系统;排气系统

0 引言

旅客机座舱内的流场和温度场是影响客舱舒适性的主要因素,良好的气流组织是为乘客提供优质舒适环境的重要保证。客舱内空气的流动与许多因素有关:供、排气口的位置和几何形状;供气射流参数(主要指送风温度、速度和流量);座舱内空间的几何形状以及各种热源(如乘客)的位置以及客舱的内部布置情况等^[1]。

鉴于影响客舱气流组织的因素较多,且因素间的相互关系复杂,采用常规的理论计算或经验设计很难设计出良好的座舱气流组织。特别是在民用飞机设计中,客户不同的要求会导致客舱内部的布置不同,若每次更新设计都采用试验的方式来重新设计座舱供气系统不仅费用昂贵,而且设计周期长。

随着计算机技术和 CFD 技术的发展,对于复杂流动和换热问题,与试验研究相比,数值模拟的方法可以不受试验条件的限制,具有通用性强、成本低、研究周期短的特点^[2]。因此应用 CFD 技术预测、分析和优化座舱气流组织被认为是一种切实可行的方法。

本文以 CJ818 旅客机座舱为研究对象,通过合理的简化,建立了客舱气流组织数值仿真模型,分析了单排座椅和多排座椅模型在乘客以及热载荷等情况下对客舱流场和温度场是否产生影响。

1 问题描述、物理模型及网格离散

本文供气口采用天花板格栅式,并在位于座椅上方的行李架底部设置有人通风口,排气口位于机身和地面的交界附近。

由于客舱内部几何结构较为复杂,人体形状也各不相同,若以整个客舱作为研究对象需要极大的计算资源,因此进行如下合理简化:

(1)由于客舱前后相同、左右对称,先取半排座椅及座椅前的空间进行分析,对于 CJ818 旅客机单排座椅而言就是半个过道和 3 个座椅进行分析,多排座椅的研究亦如此。

(2)在展向剖面几何结构完全按照 CJ818 机身及座舱形状进行建模。

(3)对座椅和人体进行了简化处理,不考虑扶手的影响,对人体进行标准建模。

(4)忽略舱内小部件的影响,对于部分尖角进行圆滑处理,并假设各表面光滑。

图 1 为单排座椅有乘客时的客舱简化图。

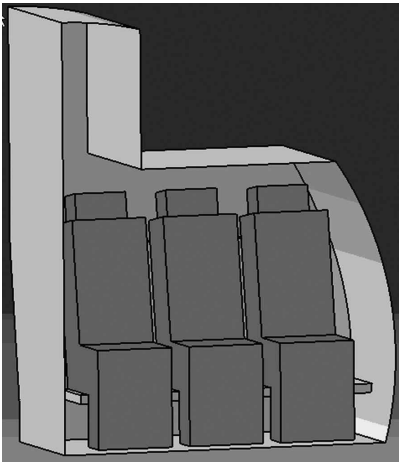


图 1 单排座椅有乘客时的客舱简化图

采用非结构化网格对模型进行离散,对空气进、出口以及座椅附近区域进行了网格加密处理,进行只考虑单排座椅时网格数量大概为 65 万,节点数大

概为 11 万,考虑多排座椅时网格数大概为 100 万,网格节点数大概为 20 万。

2 数值仿真模型

2.1 控制方程和湍流模型

本文假定客舱内为定常、不可压、牛顿粘性流体,在求解区域内应用质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律 3 个基本物理规律,可得到如下控制方程^[3]:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \rho u_i u_j + S_i \tag{2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T \tag{3}$$

采用 RNGk - 湍流模型对控制方程进行封闭,采用壁面函数法模拟近壁区流动。

2.2 边界条件及数值仿真假设

(1)座舱中心平面设置为对称面。垂直于该平面的各个变量的变化梯度为 0,垂直于该平面的速度大小为 0。

(2)假设天花板、地板、座椅等表面假设为绝热表面,同时设置无滑移条件,即通过这些表面的热量为 0,表面速度为 0。

(3)根据文献[4],将人体边界条件设置为第二类边界条件,用数字式暖体假人仿真计算模型模拟,热流密度大小^[5]取 58W/m²。

(4)进口边界条件:根据文献[1]可知,对于旅客机,正常情况下每人每分钟需 0.7 ~0.9kg 的新鲜空气,文中取 0.9kg 每分钟,单排座椅时供气口大小为 500mm ×100mm,根据前面边界条件,可取天花板供气口速度为 0.996m/s,个人通风口 0.8m/s 供气温度取 18 。

(5)出口边界条件取压力边界条件,环境压力。参考环境压力,取座舱高度为 2 400m 时的大气压力,75.69kPa

3 计算结果

3.1 单排座椅无乘客时计算分析

该状况下只考虑仅有一排座椅时客舱内的气流组织情况,不考虑乘客的影响,温度场不在研究范围内。

图 2 为单排座椅无乘客时客舱内流线图,其中图 2(a)为气流由天花板进口进入客舱后的流线图,图 2(b)为气流由个人通风口进入客舱后的流线图。由图 2(a)可以看出,空气从供气口进入客舱后,在过道位置以较高的速度直接冲向地面,遇地面阻碍后向排气口方向流动,并在座椅上方形成了漩涡,有利于向乘客供应新鲜空气。由图 2(b)可以看出,从个人通风口进入的气流受天花板供气口射流的影响非常大,流线均往过道方向靠近,同时也在座椅上方形成了漩涡。舱内流动形式和波音公司研究结果类似^[6]。

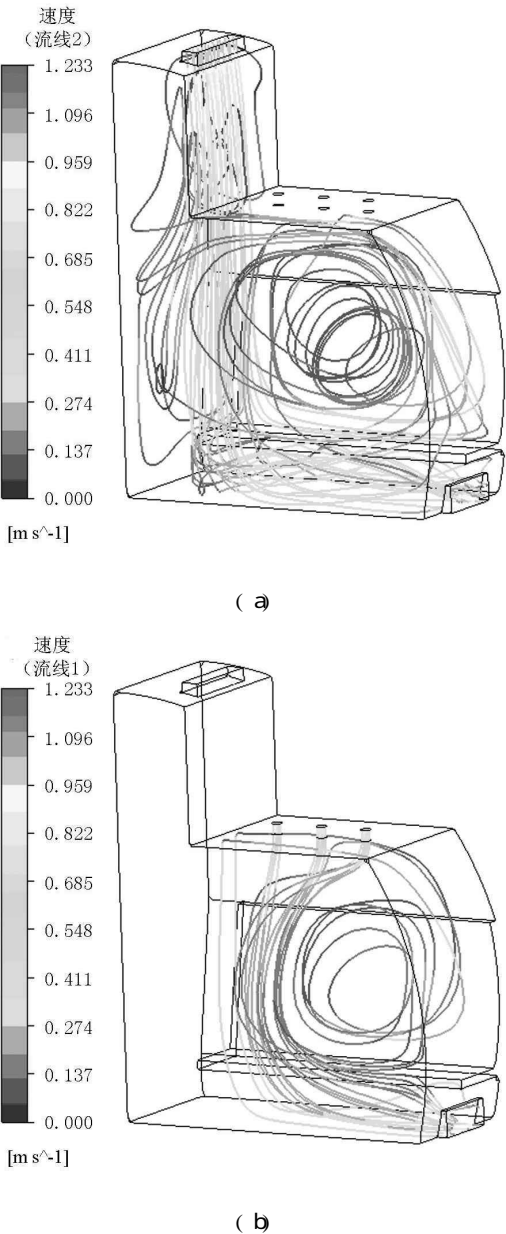


图 2 单排座椅无乘客时客舱内流线图

图 3 是单排座椅无乘客时客舱内速度矢量图, (a)、(b)分别对应无乘客时客舱内的速度矢量,通

过座椅的平面以及座椅前平面,可以看出,在天花板供气口下方速度已经超过了 0.5m/s 会让乘客有穿堂风的感觉,但是在乘客乘坐的座椅上方,速度比较均匀,处于 $0.2\text{m/s} \sim 0.3\text{m/s}$ 的范围内,乘客具有比较舒适的乘坐环境。

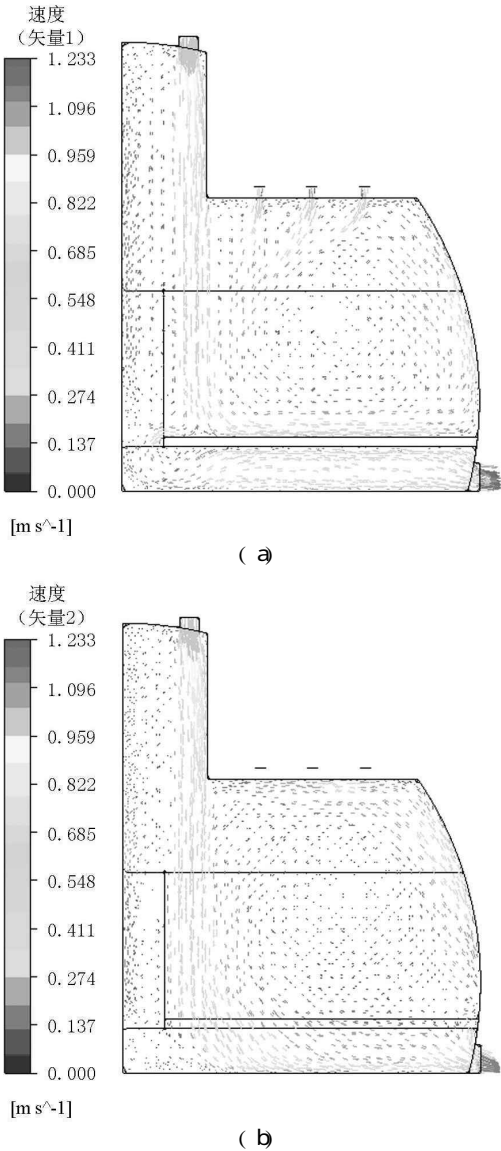


图 3 单排座椅无乘客时客舱内速度矢量图

3.2 多排座椅无乘客时计算分析

该状况下考虑 4排座椅时客舱内的气流组织情况,不考虑乘客的影响,温度场不在研究范围内。

由图 4可以看出,各排座椅内的总体流动基本类似,且呈现互不干扰的态势,沿座舱纵向的流动较少。

图 5是 4排座椅无乘客时客舱内速度矢量图,图 5(a)通过过道,图 5(b)通过座椅。可以看出过道的速度分布较不均匀,下部速度较大,易刮起地面灰尘,不利于乘客舒适性,且后部速度大于前部速度。

而座椅上部速度较为均匀,速度值均处于 0.2m/s 左右,乘客感觉较为舒适。同时也可以看出沿机身纵向的流动较少,气流基本在本排座椅范围内流动。

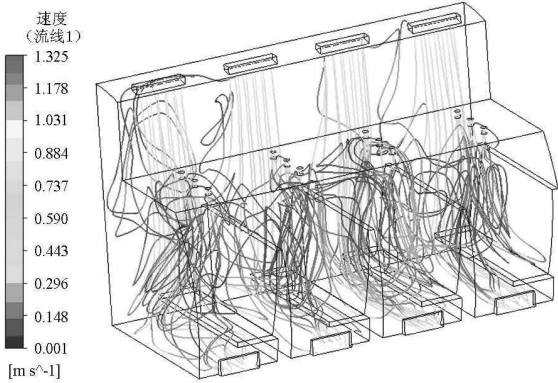


图 4 4排座椅无乘客时客舱内流线图

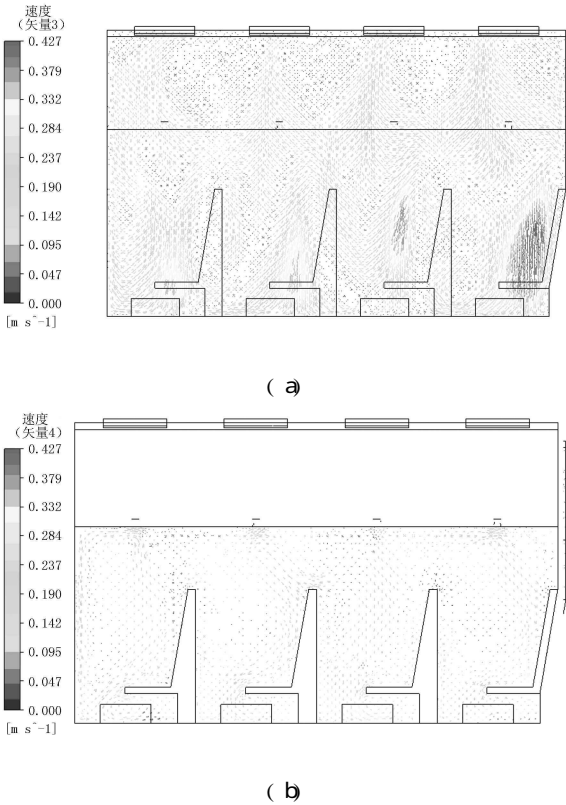


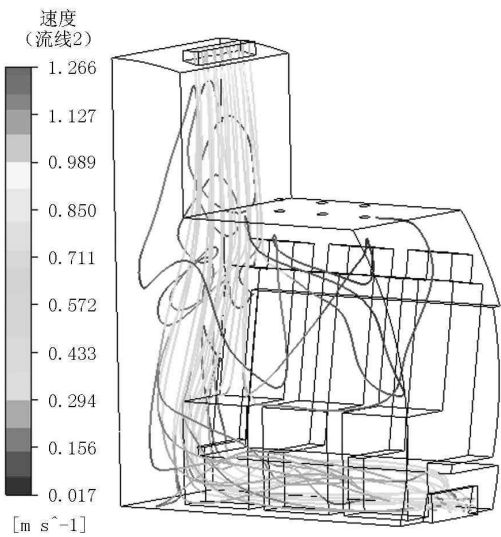
图 5 4排座椅无乘客时客舱内速度矢量图

3.3 单排座椅有乘客无热源时计算分析

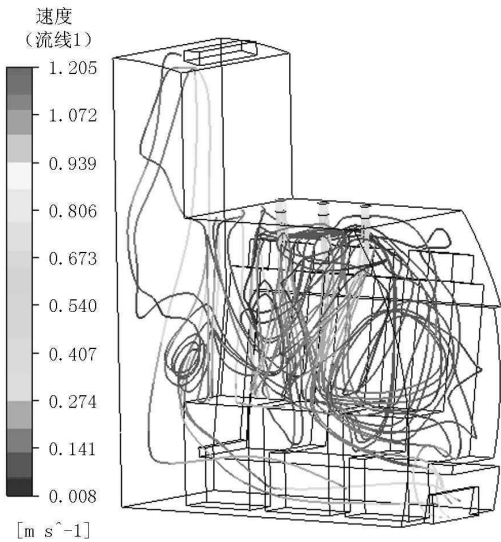
该状况下考虑单排座椅时客舱内的气流组织情况,只考虑乘客几何结构对舱内流动的影响,温度场不在研究范围内。

由图 6可以看出,乘客的存在对客舱内的流动具有较大影响。从天花板供气口进入客舱的气流大多从座椅下面流过,从而排出客舱,几乎没有在乘客上方形成回流的现象。而个人通风口进入的气流,

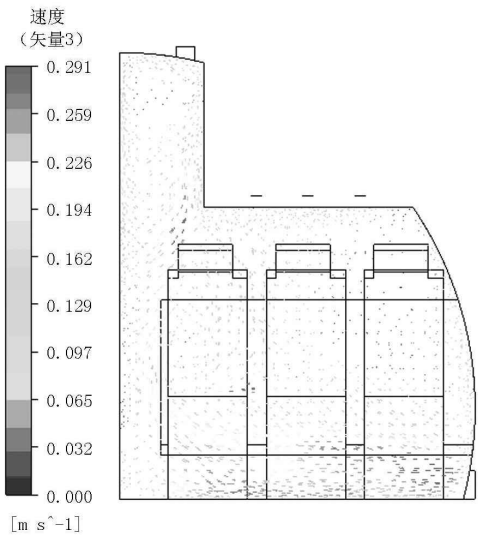
受天花板供气口射流的影响较小,在乘客周围形成了较为复杂的回流现象,且大多从乘客上方流出客舱。两股流体泾渭分明。



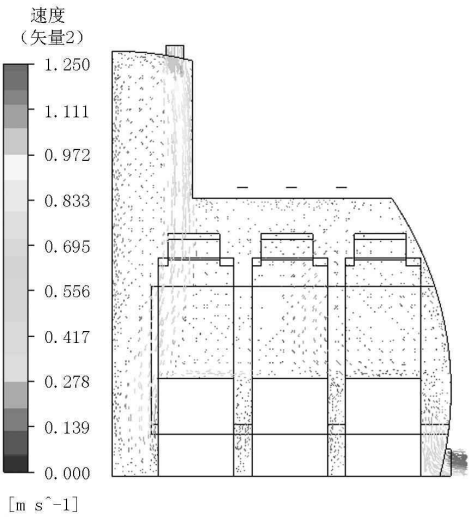
(a)



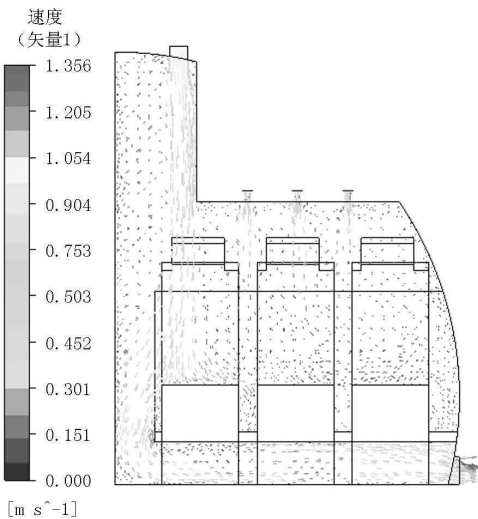
(b)



(a)



(b)



(c)

图 6 单排座椅有乘客无热源时客舱内流线图

图 7 是单排座椅有乘客无热源时客舱内速度矢量图,图 7 (a)、(b)和 (c) 分别对应 $y=0.1\text{m}$ 、 0.3m 和 0.5m 平面。由图 7 (a) 可以看出,座椅前的平面内速度分布较为均匀,呈上小下大的分布,上部的速度值基本上处于 $0.1 \sim 0.18\text{m/s}$ 的人体感觉舒适的范围内。而由图 7 (b) 和 (c) 可以看出,乘客周围速度分布也较为均匀,在供气口和排气口附近存在一些高速区,位于靠近过道的乘客右边身体可能会受到天花板供气口射流的影响,设计时可在这边进行改进。

图 7 单排座椅有乘客无热源时客舱内速度矢量图

3.4 单排座椅有乘客有热源时计算分析

该状况下考虑单排座椅时客舱内的气流组织情况,同时考虑乘客几何结构以及乘客散热对舱内流动的影响,并研究客舱内温度场情况。

由图 8(a)可以看出,乘客散热对从天花板供气口进入客舱的气流影响较小,流动和图 6(a)基本类似。而对于个人通风口进入的气流,受乘客散热的影响较大,在靠近机身的乘客周围以及过道上方形成了较为复杂的回流现象。

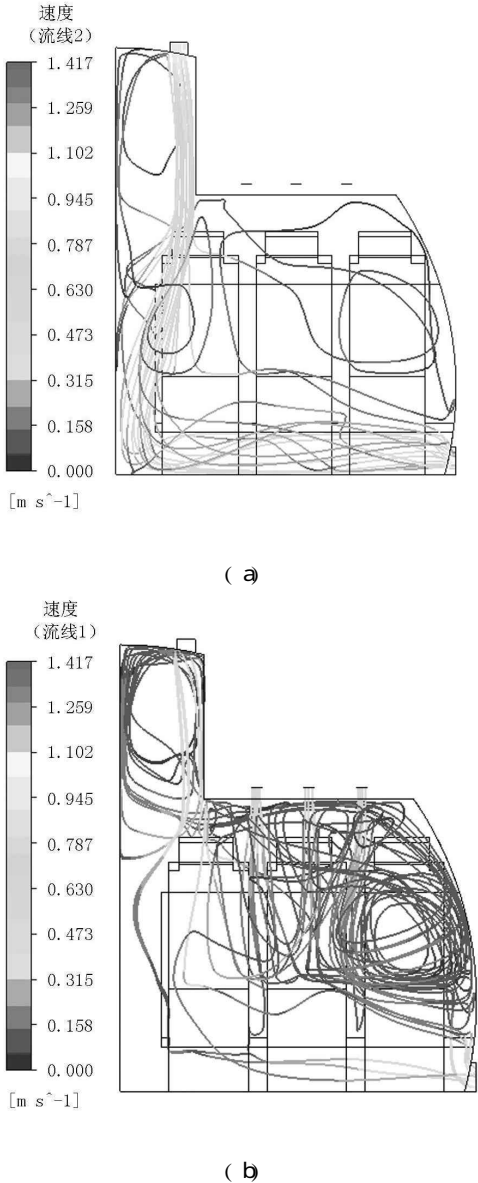


图 8 单排座椅有乘客有热源时客舱内流线图

图 9 是单排座椅有乘客有热源时客舱内温度分布图,图 9(a)、(b)和 (c) 分别对应 $y=0.1\text{m}$ 、 0.3m 和 0.5m 平面。可看出在靠近机身附件的乘客上方存在高温区,原因是该区域流过的的气流较少,气流在此处形成漩涡,漩涡中心恰好对应于最高温部分。

同时可看出个人通风口对客舱的冷却效果远小于天花板供气口的效果,天花板供气口射流流过区域气温都较低,因此天花板供气口的设计是关键。

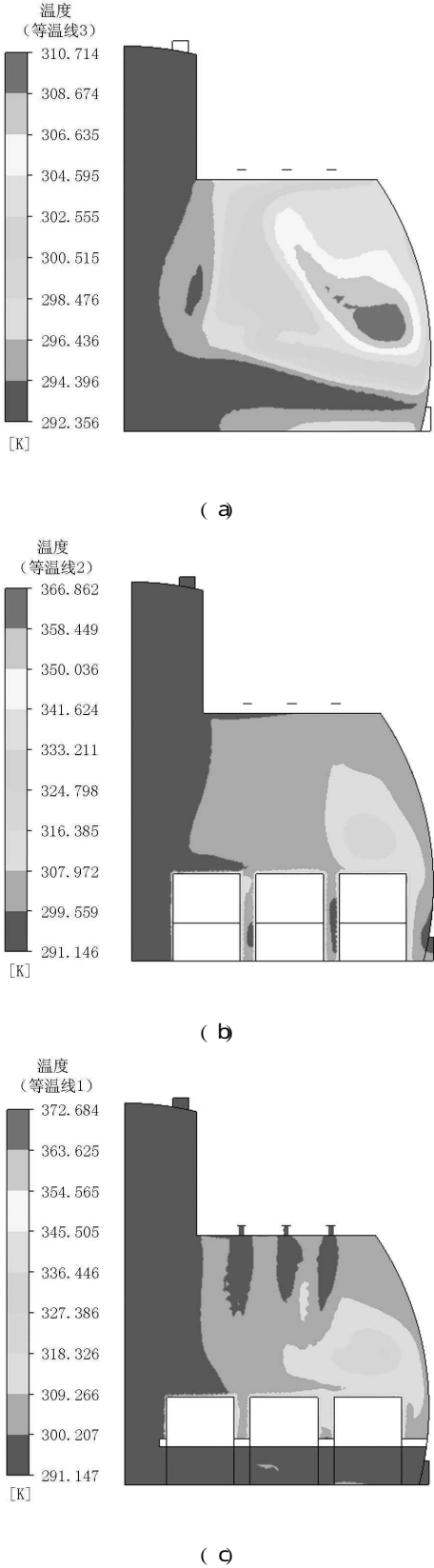


图 9 单排座椅有乘客有热源时客舱内温度分布图

4 结论

本文通过对 CJ818大型客机客舱气流组织进行了数值仿真研究,研究分析了单排座椅和多排座椅客舱舱内的流动情况以及乘客几何结构和热载荷对客舱内部流动的影响,并分析了存在热载荷时舱内温度场分布和流场分布之间的依变关系。结果表明,舱内流动形式和波音公司研究结果类似,气流在座椅上方的流动较为均匀,速度在人体舒适范围内,沿机身纵向的流动较少,CJ818的供排气系统设计较为合理;乘客的几何结构对舱内流动具有一定影响,乘客热载荷对从个人通风口进入的空气流动影响较大,客舱内部的温度场分布和舱内流动具有密切关系,设计天花板供气口是设计供气系统的关键。研究结果对于客舱空气分配系统设计和优化以及客舱

空气质量控制具有参考意义。

参考文献:

- [1] 寿荣中,何慧珊.飞行器环境控制(第一版)[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [2] 朱自强等编著.应用计算流体力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,1998:8.
- [3] John D. Anderson, JR. Computational Fluid Dynamics The Basics with Applications[M]. Beijing Tsinghua University Press, 2002.
- [4] 陈江平,孙召璞,阙雄才,陈芝久.载人车室内部空气流场温度场的数值模拟[J].汽车工程.
- [5] 吴玉庭,林国华,袁修干.空调座舱热舒适性计算[J].北京航空航天大学学报,2000:2:56~59.
- [6] Fred A. Mathew J.W and Dipankar C. Numerical Analysis of Airflow in Aircraft Cabin[R]. SAE - 911411.