

基于热舒适性的乘员舱气流组织设计

蔡致鹏¹, 王新阁^{1*}, 张晓康², 连彬³, 刘家璐⁴

(1. 空军航空大学, 长春, 130000; 2. 94891部队, 江苏苏州, 215000; 3. 95039部队, 广东汕头, 515000;
4. 93066部队, 黑龙江牡丹江, 157000)

摘要 为研究乘员舱内不同气流组织下的人体热舒适性, 找出进气参数对人体热舒适性影响的规律, 将Fluent计算得到的9种进气方案的流场结果作为环境参数导入TAITherm中进行热舒适性分析。同时引入面部平均空气龄和能量利用率两项指标对乘员舱气流组织进行更全面的评价。结果表明进气总量对3位乘员热舒适性和平均面部空气龄影响程度最大, 1号口进气温度对能量利用率的影响程度最大。综合考虑3位乘员的热舒适性、面部平均空气龄和能量利用率3项评价指标, 发现当进气总量为1 800 kg/h, 1、2号口进气温度都为22℃, 1、2号口进气量比值为6:4时3项指标均表现良好, 为最优的进气参数组合。

关键词 Fiala人体热调节模型; Berkeley热舒适模型; 气流组织; 正交实验法

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.01.009

中图分类号 V7 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)01-0059-09

An Air Distribution Design of Crew Cabin Based on Thermal Comfort

CAI Zhipeng¹, WANG Xinge^{1*}, ZHANG Xiaokang², LIAN Bin³, LIU Jialu⁴

(1. Air Force University of Aviation, Changchun 130000, China;
2. Unit 94891, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 3. Unit 95039, Shantou 515000, Guangdong, China;
4. Unit 93066, Mudanjiang 157000, Heilongjiang, China)

Abstract In order to study the thermal comfort of human body under different air distribution in the crew cabin and find out a law of influence of intake parameters on human thermal comfort, taking the flow field results with nine intake schemes being calculated and imported into TAITherm as environmental parameters, the thermal comfort analysis is made. At the same time, two indexes of mean facial air age and energy utilization are introduced to evaluate the air distribution in the crew compartment more comprehensively. The results show that the total amount of air intake has the greatest effect on the thermal comfort and average facial air age of the three occupants, and the inlet temperature of No. 1 port has the greatest effect on the energy utilization rate. In consideration of the three evaluation indexes in thermal comfort, facial average air age and energy utilization of the three occupants, it is found that the three indexes perform well and the combination of inlet air parameters is the optimal when the total air intake is 1 800 kg/h, the inlet temperatures of No. 1 and No. 2 are both at 22℃, and the inlet air ratio of No. 1 and No. 2 is 6:4.

Key words Fiala model of human thermal regulation; Berkeley thermal comfort model; air distribution; orthogonal experimental method

收稿日期: 2022-06-26

作者简介: 蔡致鹏(1997—), 男, 江西吉安人, 硕士生, 研究方向为飞行器系统工程。E-mail: 2424918745@qq.com

通信作者: 王新阁(1966—), 男, 吉林长春人, 教授, 研究方向为飞行器系统工程。E-mail: 2424918745@qq.com

引用格式: 蔡致鹏, 王新阁, 张晓康, 等. 基于热舒适性的乘员舱气流组织设计[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(1): 59-67. CAI Zhipeng, WANG Xinge, ZHANG Xiaokang, et al. An Air Distribution Design of Crew Cabin Based on Thermal Comfort[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(1): 59-67.

空气在飞机座舱内形成的分布与流动被称为座舱气流组织。从飞行器座舱内气流组织的角度来看,座舱内温度场和速度场分布直接影响飞行员和乘员的热舒适感。有研究表明稍凉的环境下人员的工作效率较高,而过热和过冷都导致工作效率下降,其中过热导致的工作效率下降幅度较大^[1]。同时通过合理设计气流组织可以充分利用制冷功率,减少能耗,减少引气量。所以如何在座舱内营造良好的气流组织,在保障人员安全、舒适、高效工作的同时,减少能耗,成为飞机环境控制系统设计中的重要部分。

计算流体力学(CFD)技术已广泛的应用到座舱气流组织的研究中。Singh 等用 CFD 方法研究了舱内人员的热负荷对座舱流场的影响,计算了座舱的 2 个截面的速度场、温度场,模拟结果与实验数据基本吻合^[2]。Zhang 等计算了波音 767 乘员舱内的速度、温度分布和 CO₂ 浓度场,在此基础上,比较了 3 种空气分配系统的优劣^[3]。Farag 等设计的个性化通风系统能改善飞机巡航期间经济舱的空气质量,降低乘员周围污染物浓度^[4]。张大林对某型军用运输机改装而成的特种飞机乘员舱内的气流组织进行数值模拟,确定供、排气口在纵向的位置,并在实际中得到了应用^[5]。吴丹以某型号战斗机座舱为研究对象,对特定条件下座舱内的气流组织进行了数值模拟,结合相关生理学标准研究送风速度对热舒适性的影响并改进了送风方案^[6]。宋凯结合 Tanabe 人体热调节模型对新舟 MA-700 型飞机座舱内制热和制冷两种气流组织下的人体皮肤温度、核心温度进行预测,并以此为依据评价乘员舒适性^[7]。吴桐在制冷工况下对波音 737 客舱内的流场进行模拟,选取空气分布特性指标和由吹风不满意度作为指标评价局部热舒适性,用功效系数法建立综合评价函数,计算最佳送风速度^[8]。

目前多数研究在进行乘员舱热舒适性分析时把人体按定温或定热流量处理,没有考虑人体自身的生理调节作用,不能完全反映周围环境对人体的热影响。用均匀环境下的舒适性评价方法评价飞机乘员舱这种狭小非均匀环境也存在局限性。本文采用 Fiala 人体热调节模型和 Berkeley 热舒适评价模型,结合 Fluent 模拟乘员舱内流场的结果对不同进气方案下人体热舒适性进行分析,同时采用空气龄和能量利用率对不同进气方案进行评价。

1 人体热调节模型

人体热调节控制见图 1,是由主动控制系统,被动受控系统和环境模型 3 部分组成的负反馈闭环控

制系统。

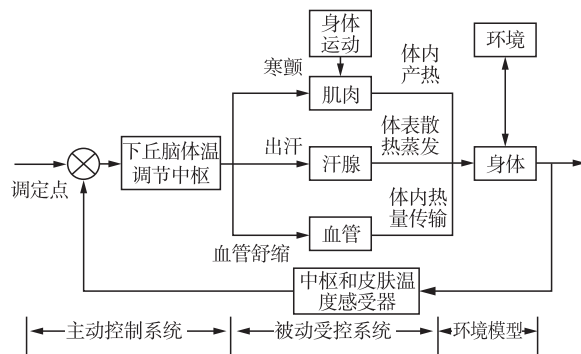


图 1 人体热调节系统简图

1.1 被动受控系统

由于人体几何外形复杂,在 Fiala 的研究中对人体外形做一定的简化。图 2 将人体分为 21 个节段,每个节段抽象成圆柱体,由内到外分为核心层、肌肉层、脂肪层、皮肤层。各节段的尺寸和生理组织参数见文献^[9]。

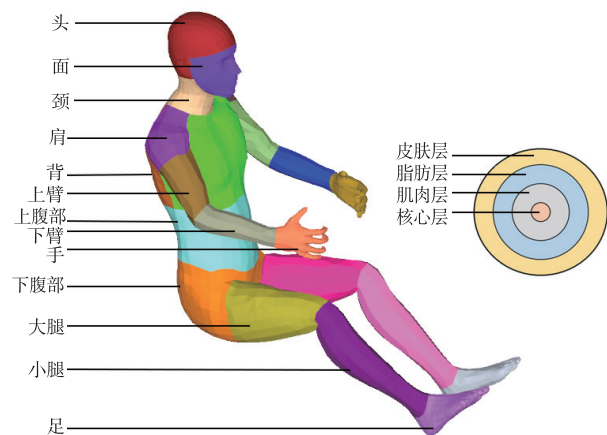


图 2 人体模型节段及组织划分

人体节段和组织之间的传热过程可以用 Pennes^[1]生物传热方程描述:

$$k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \rho^2} + \frac{\omega}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + q_m + \rho_{bl} \omega_{bl} c_{bl} (\theta_{bl,a} - \theta) = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k 为组织之间的热导率($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$); θ 为组织温度($^{\circ}\text{C}$); r 为半径(m); ρ 为组织密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); q_m 为代谢产热率($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$); ρ_{bl} 为血液密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); ω_{bl} 为血液灌注速率($\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$); c_{bl} 为血液比热容($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$); $\theta_{bl,a}$ 为动脉血液温度($^{\circ}\text{C}$); c 为组织比热容($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$); t 为时间(s); ω 为几何系数,取 1 为柱坐标,取 2 为球面坐标(头部)。

血液循环在人体热调节中至关重要,人体血液循环系统被模拟为中央血池、逆流换热、节段血管 3 个部分。中央血池通过动脉向身体各节段供应温

血。在各节段的组织被灌输之前,动脉血液被邻近静脉中的回流血液预冷。根据方程(1)血液在毛细血管中通过对流交换热量后变成静脉血液。静脉血液随后聚集在主静脉中,并在回流到中央血池时被来自相邻动脉的热量预热。假设血管里血液质量是连续的,则逆流换热后动脉血的温度降低对应静脉血的温度升高:

$$\rho_{bl} c_{bl} \int \omega_{bl} dV (\theta_{bl,p} - \theta_{bl,a}) = \rho_{bl} c_{bl} \int \omega_{bl} dV (\theta_{bl,v,x} - \theta_{bl,v}) \quad (2)$$

逆流热交换的热量由 Gordon^[12] 方程得到:

$$Q_x = h_x (\theta_{bl,a} - \theta_{bl,v}) \quad (3)$$

由式(5)和(6)得出:

$$\theta_{bl,a} = \frac{\rho_{bl} c_{bl} \int \omega_{bl} dV \cdot \theta_{bl,p} + h_x \cdot \theta_{bl,v}}{\rho_{bl} c_{bl} \int \omega_{bl} dV + h_x} \quad (4)$$

其中:

$$\theta_{bl,v} = \frac{\int \omega_{bl} \theta dV}{\int \omega_{bl} dV} \quad (5)$$

式中: $\theta_{bl,p}$ 为中央血池温度($^{\circ}\text{C}$); $\theta_{bl,v}$ 为静脉血液温度($^{\circ}\text{C}$); $\theta_{bl,v,x}$ 为逆流换热后静脉血液温度($^{\circ}\text{C}$); Q_x 为逆流换热热量(W); h_x 为逆流换热系数($\text{W} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); V 为体积(m^3)。

1.2 环境模型

人与环境的换热主要通过对流、辐射、蒸发、与环境进行热交换,计算方程为:

$$q_c = h_{c,mix} (\theta_{sk} - \theta_{air}) \quad (6)$$

$$h_{c,mix} = \sqrt{\alpha_{nat} \sqrt{\theta_{sk} - \theta_{air}} + \alpha_{frc} v + \alpha_{mix}} \quad (7)$$

$$q_r = h_r (\theta_{sk} - \bar{\theta}_{sr}) \quad (8)$$

$$h_r = 4.98 \times 10^{-8} \cdot f_{rad} \epsilon (\theta_{sk}^2 + \bar{\theta}_{sr}^2) (\theta_{sk} + \bar{\theta}_{sr}) \quad (9)$$

$$q_e = h_e (p_{sk} - p_{air}) \quad (10)$$

$$h_e = \frac{R_1 \cdot i_{cl}}{0.155 I_{cl} + (i_{cl}/h_c) f_{cl}} \quad (11)$$

式中: q_c 为对流换热量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); θ_{sk} 为皮肤表面温度($^{\circ}\text{C}$); θ_{air} 为环境温度($^{\circ}\text{C}$); $h_{c,mix}$ 为混合对流换热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); α_{ant} 、 α_{frc} 、 α_{mix} 为回归系数; v 为空气流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);环境对身体部位的辐射热通常为长波辐射, q_r 为辐射热交换量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); $\bar{\theta}_{sr}$ 为平均辐射温度($^{\circ}\text{C}$); h_r 为辐射换热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); f_{rad} 为有效面积因子,头部取 0.924、躯干取 0.747、上肢取 0.823、手部取 0.754、下肢取 0.46、足取 0.316; ϵ 为服装黑度^[10]; q_e 为蒸发换热量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); h_e 为蒸发换热系数

($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); p_{sk} 为皮肤表面水蒸气分压(Pa); p_{air} 为空气中水蒸气分压(Pa); i_{cl} 为透湿指数; f_{cl} 为面积系数,即衣物覆盖面积与体表面积之比; I_{cl} 为衣物热阻(clo); R_1 为刘易斯系数,取 0.016 5($^{\circ}\text{C} \cdot \text{Pa}^{-1}$)。

1.3 主动控制系统

Fiala 总结出人体热调节主动控制系统由中枢神经系统调节和辅助性局部调节两部分组成^[11]。人体在热中性条件下,核心温度为 θ_{hy} ($^{\circ}\text{C}$),平均皮肤表面温度为 $\bar{\theta}_{sk}$ ($^{\circ}\text{C}$)。环境条件变化时偏离中性值的大小用 $\Delta\theta_{hy}$ 、 $\Delta\bar{\theta}_{sk}$ 表示。中枢神经系统监测 $\Delta\theta_{hy}$ 、 $\Delta\bar{\theta}_{sk}$ 和平均皮温变化率 $d\bar{\theta}_{sk}/dt$,通过出汗、寒颤、血管舒缩 4 种调节方法来改变肌肉代谢产热量、皮肤表面血液灌输率、出汗量和肌肉血液灌输率达到调节体温的目的。血管舒张量 D_1 ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$)、出汗量 S_w ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)、血管收缩量 C_s ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$) 和寒颤量 S_h (W) 可表示为 $\Delta\theta_{hy}$ 、 $\Delta\bar{\theta}_{sk}$ 的双曲正切函数,当差值为 0 时,人体的热调节响应为 0,当差值越大时,响应强度越大,但当差值达到一定程度时,主动热调节响应达到极限,依靠人体自身的调节作用将不能维持体温稳定,需要寻求外部干预。具体函数表达式为:

$$S_h = 10 [\tanh(0.48\Delta\bar{\theta}_{sk} + 3.62) - 1] \Delta\bar{\theta}_{sk} - 27.9\Delta\theta_{hy} + 1.7\Delta\bar{\theta}_{sk} \frac{d\bar{\theta}_{sk}}{dt} - 28.6 \quad (12)$$

$$S_w = [0.8\tanh(0.59\Delta\bar{\theta}_{sk} - 0.19) + 1.2] \Delta\bar{\theta}_{sk} + [5.7\tanh(1.98\Delta\theta_{hy} - 1.03) + 6.3] \Delta\theta_{hy} \quad (13)$$

$$D_1 = 21 [\tanh(0.79\Delta\bar{\theta}_{sk} - 0.70) + 1] \Delta\bar{\theta}_{sk} + 32 [\tanh(3.29\Delta\theta_{hy} - 1.46) + 1] \Delta\theta_{hy} \quad (14)$$

$$C_s = 35 [\tanh(0.34\Delta\bar{\theta}_{sk} + 1.07) - 1] \Delta\bar{\theta}_{sk} + 6.8\Delta\bar{\theta}_{sk} \times \frac{d\bar{\theta}_{sk}}{dt} \quad (15)$$

局部调节指 Q_{10} 效应, Q_{10} 用于衡量生物组织对环境温度变化的响应程度,是无量纲参数, R 为生物组织响应程度的大小, θ 为组织的温度。冷血动物在不同组织温度下响应不变,机体对温度变化不敏感, $Q_{10} = 1$ 。人体的 Q_{10} 值约为 2,组织温度升高 10°C ,人体的响应强度增大 1 倍。

$$Q_{10} = \frac{R_{\theta}}{R_{\theta-10}} \quad (16)$$

2 热舒适评价模型

Zhang Hui 在大量实验结果的基础上提出

Berkeley 热舒适评价模型,包括局部热感觉,整体热感觉,局部热舒适,整体热舒适^[12-14]。局部热感觉(local thermal sensation, LTS)是局部皮肤温度、平均皮肤温度、局部皮肤温度变化率和核心温度变化率的逻辑函数,在稳态环境中局部热感觉为:

$$L_{TS} = 8 \times \left\{ \left[\frac{1 + \exp(-C_1(\theta_{sk,i} - \theta_{sk,i, set}) - K_1)}{[(\theta_{sk,i} - \theta_{sk,i, set}) - (\bar{\theta}_{sk} - \bar{\theta}_{sk, set})]} \right]^{-1} - 0.5 \right\} \quad (17)$$

式中: $\theta_{sk,i}$ 表示某节段局部皮肤温度; $\theta_{sk,i, set}$ 为某节段局部皮肤温度的调定温度; $\bar{\theta}_{sk,i, set}$ 为平均皮肤温度调定温; C_1 、 K_1 为回归系数。

整体热感觉(overall thermal sensation, OTS)是根据身体各节段的局部热感觉来计算的:

$$O_{TS} = \sum W_i L_{TS} \quad (18)$$

式中: W_i 为不同身体部位的影响权重。

人体局部热舒适(local thermal comfort, LTC)由局部热感觉和整体热感觉共同决定:

$$L_{TC} = \left[\frac{-4 - (C_6 + C_7 |O_{TS}|)}{|(-4 + C_3 |O_{TS}| + C_8)|^n} - \frac{-4 - (C_6 + C_7 |O_{TS}|)}{|(4 + C_3 |O_{TS}| - C_8)|^n} \right] \cdot \frac{e^{25(L_{TS} + C_{31} |O_{TS}| + C_8)} + 1}{-4 - (C_6 + C_7 |O_{TS}|)} \cdot \frac{-4 - (C_6 + C_7 |O_{TS}|)}{|(4 + C_3 |O_{TS}| + C_8)|^n} \quad (19)$$

式中: C_3 、 C_6 、 C_7 、 C_8 为回归系数; n 为修正指数,不同身体部位取值不同。

整体热舒适(overall thermal comfort, OTC)为2个最小局部热舒适与最大热舒适的平均值。评价标尺见表1。

$$O_{TC} = \frac{L_{TCmin} + L_{TCmin, second} + L_{TCmax}}{3} \quad (20)$$

表1 9点评价标尺

热感觉	极冷	冷	凉	稍凉	中性	稍暖	暖	热	极热
热舒适	极不适	很不适	不适	轻微不适	没感觉	轻微舒适	舒适	很舒适	极舒适
赋值	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4

3 数值模拟

3.1 控制方程

流体的流动与传热满足三大守恒定律,3个控

制方程可统一表达为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho\mathbf{U}\varphi) = \text{div}(G \text{ grad } \varphi) + S \quad (21)$$

式中: φ 为通用变量; ρ 为流体密度; \mathbf{U} 为速度矢量; G 和 S 分别为变量 φ 的扩散系数和源项。

3.2 空气龄

空气龄是空气从入口到达某点所需要的时间,某点空气龄越小,空气越新鲜,空气品质越好。稳态条件下空气龄运输方程为^[15]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho\mathbf{U} \cdot \zeta) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} \cdot \left(\frac{\mu}{S_c} + \frac{\mu_t}{S_{ct}} \right) \right) + \rho \quad (22)$$

式中: ζ 为某点空气龄(s); S_c 为 schmidt 数,常取值 1; S_{ct} 为湍流 schmidt 数,常取值 0.7; μ 为动力黏度; μ_t 为涡黏系数。

3.3 能量利用率

能量利用率用于考察气流组织的能量利用有效性^[16]:

$$\eta_e = \frac{\theta_o - \theta_i}{\theta_a - \theta_i} \quad (23)$$

式中: η_e 为能量利用率; θ_o 为排气口温度; θ_i 为进气口温度; θ_a 为舱内平均温度,能量利用率越大越能减少制冷能耗。

3.4 几何模型及网格划分

参照特种机工作舱的内部构造,对乘员舱进行一定的简化处理,保留座椅、人体、进排气口,将操作平台简化成平板。考虑到工作舱的左右对称性,只对一侧进行研究。用 Spaceclaim 建立起长 7 m,宽 2 m,高 2.1 m,6 名乘员的单侧乘员舱模型,天花板和地板进气口尺寸为 6 m×0.08 m,编号为 1 和 2,侧壁上有 1 个排气口,尺寸为 6 m×0.1 m,编号为 3,如图 3 所示。对乘员舱进行非结构网格划分,生成 643 万网格,如图 4 所示。

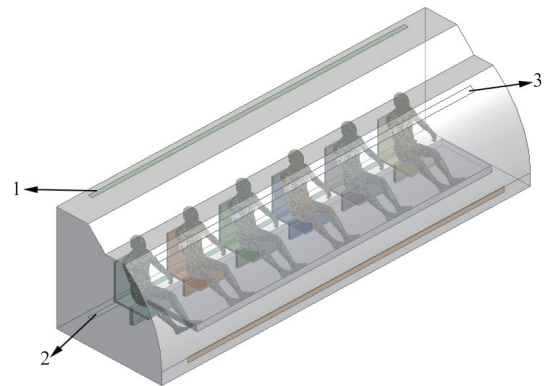


图3 乘员舱简化模型

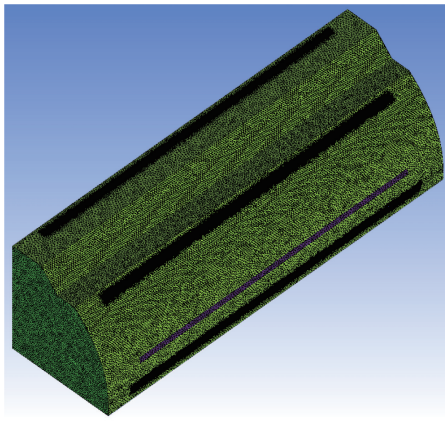


图 4 乘员舱网格

3.5 计算条件设置

入口空气设置为混合物,氧气体积分数为 21%,二氧化碳体积分数为 0.085%,水蒸气体积分数为 0.03%,其余为氮气。采用 RNG $k-\epsilon$ 模型描述湍流。内壁面采用定温度边界条件,温度为舱内平均温度,操作平台热流密度为 100 W/m^2 。乘员代谢水平设置为 1.2 met,着装为长袖夹克、长裤和硬质胶鞋,服装总热阻为 1 clo。采用正交实验法对 A-进气总量, B-1 号口进气温度, C-2 号口进气温度, D-1、D-2 号口进气量分配比进行四因素三水平分析。因素水平表见表 2,实验设计方案见表 3。将 Fluent 计算的流场结果作为环境参数导入 TAITherm 中进行热舒适分析。

表 2 因素水平表

水平 等级	因素			
	A-进气 总量/ (kg/h)	B-1 号口 进气 温度/ $^{\circ}\text{C}$	C-2 号口 进气 温度/ $^{\circ}\text{C}$	D-1、D-2 号口 进气量 配比
1	2 400	18	18	5 : 5
2	3 000	20	20	4 : 6
3	1 800	22	22	6 : 4

表 3 正交实验方案设计

试验编号	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	3	2
3	1	3	2	3
4	2	1	3	3
5	2	2	2	1
6	2	3	1	2
7	3	1	2	2
8	3	2	1	3
9	3	3	3	1

4 结果分析

为方便流场分析,将乘员从右至左依次编号 1 到 6 号,可以预测整个流场左右大致对称,所以选取人面部 $x=0.65 \text{ m}$ 处截面,4 号乘员身体对称面,5 号乘员身体对称面,6 号乘员身体对称面进行分析,如图 5 所示。

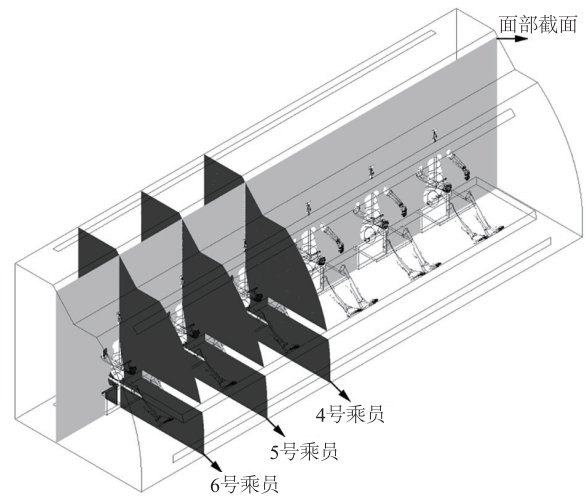
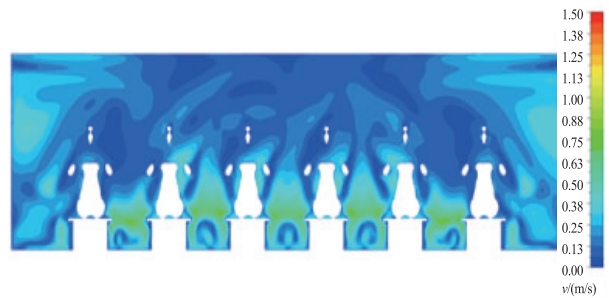


图 5 截面示意图

4.1 流场分析

由于篇幅原因,只分析工况 1 的流场。如图 6 所示,在两乘员之间和乘员舱左右上角是高流速区域,中间乘员胸部,肩部区域空气流速也较高。温度分布呈现下低上高。从图中还可看出流场大致左右对称,印证了之前的预测。



(a) 速度



(b) 温度

图 6 面部截面处流场

如图 7 所示,来自 1 号口的气流与来自 2 号口的气流在靠近地板处相遇对冲。在 2 号乘员到 5 号乘员之间区域,来自 1 号口的气流向斜上方偏转,流向出口。被座椅阻挡的气流一部分反向偏转沿着座椅向上流动,速度衰减,一部分绕过座椅从两侧流动到胸部和手部之间区域再流向出口;来自 2 号口的气流对冲后,偏转流向操作台下方区域,速度逐渐衰减。在两侧的两乘员之间区域,来自 1、2 号口的气流则水平偏转并在脚部区域又向两侧偏转,最后向上流动到出口。所以 4、5 号乘员胸部手部之间区域气流速度较大,6 号乘员脚部区域空气流速较大。

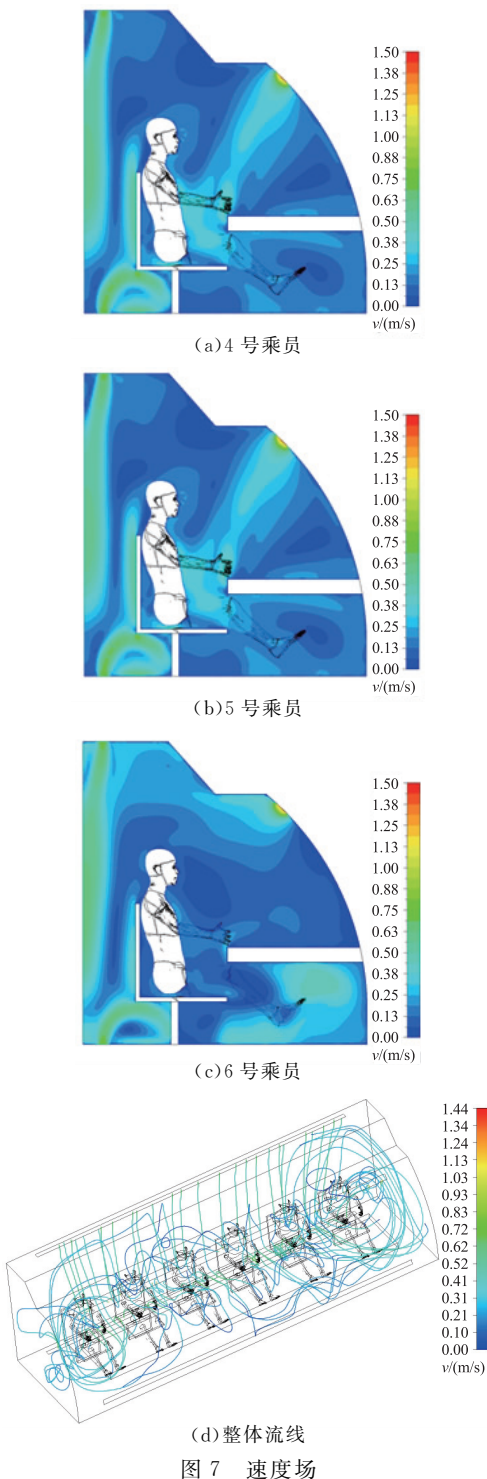
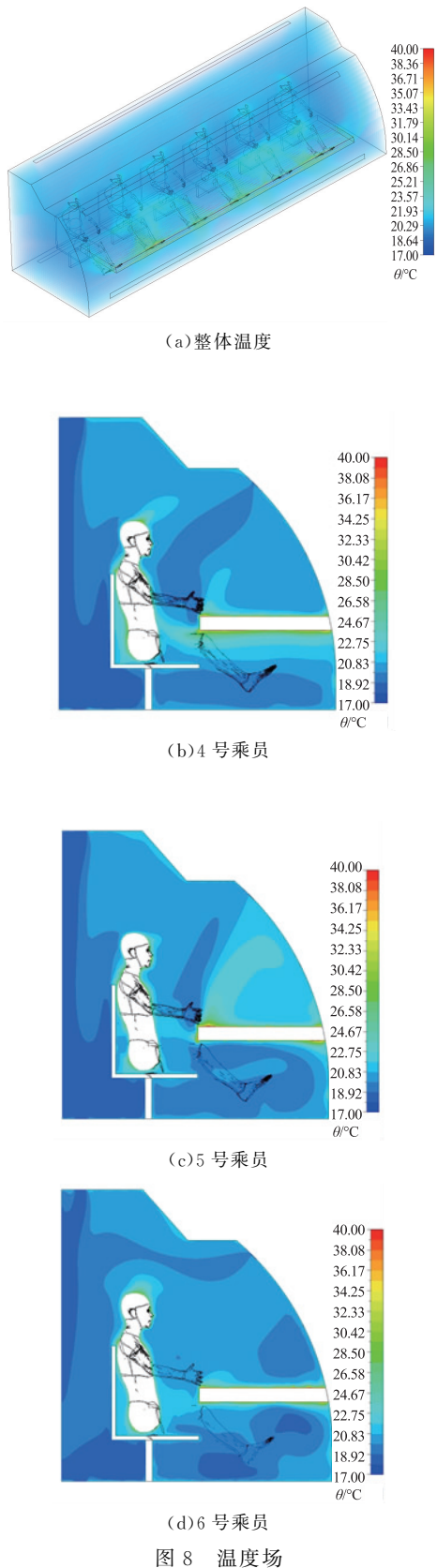


图 8 显示了乘员舱内温度分布情况,整体舱内温度比较均匀,没有明显的大面积高温区域,操作台的散热能被带走。温度场的分布与速度场呈现相关性,即高流速区域温度较低。人体周围有轻微热羽流现象,除 4 号乘员大腿处温度稍高,6 号乘员脚部温度稍低外,乘员周围温度较为均匀。



4.2 热舒适性分析

工况 1 下热舒适情况见图 9。如图 9(a)所示,3 位乘员手臂和脚热感觉指标相对较高,颈、胸、背、腹部热感觉指标相对较低。5 号乘员手部因为空气流速高,感觉到凉,6 号乘员左小腿处风速也较大,感觉为凉。在大部分节段 3 位乘员局部热感觉接近。如图 9(b)所示,3 位乘员腹部的热舒适指标都小于 0,感到轻微不适,其他节段热舒适指标大于 0。大部分节段热舒适情况接近,主要差异在头部、手和右大腿处,5 号乘员因为头部风速较大,舒适性相对于其他两位乘员较低。图 9(c)显示 3 位乘员整体热感觉与热舒适指标差异很小,整体热感觉均在 -1~0 的微凉范围内,整体热舒适指标在 1~2 之间,3 位乘员整体感到舒适。

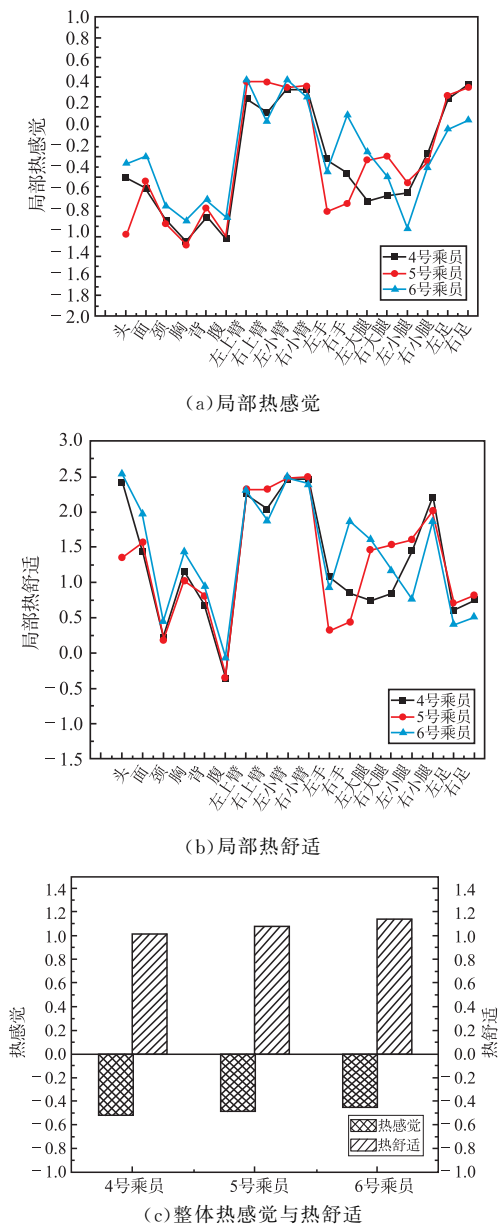


图 9 热感觉与热舒适

4.3 空气龄与能量利用率分析

图 10 显示了工况 1 下整个面部截面的空气龄,两侧乘员面部区域附近空气龄较高,中间乘员面部区域空气龄较低。在实际中面部呼吸区域的空气龄更受关注,对 $y=1.1, z=1.2; y=1.1, z=7.2; y=1.7, z=7.2; y=1.7, z=1.2$ 的 4 点包围区域(红框内)内的空气龄求平均值,得到面部区域平均空气龄为 30.5 s。利用进气口温度,乘员舱内平均温度和排气口平均温度计算得到能量利用率为 1.24。

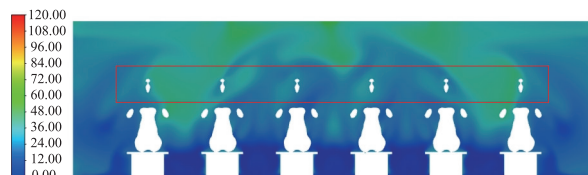


图 10 面部截面空气龄

4.4 极差分析

对 9 种工况的 3 位乘员整体热舒适进行极差分析,结果见表 4。对于 4 号乘员来说,4 种因素对其整体热舒适的影响程度从大到小依次为 A、D、B、C,对于 5 号乘员则是 A、C、D、B,4 种因素对 6 号乘员整体热舒适的影响程度从大到小依次为 A、D、C、B。相对于 4 号乘员,2 号口进气温度对 5 号和 6 号乘员的热舒适性影响程度更大,主要原因是来自 2 号口的气流碰到侧壁后向两侧偏转流过两位乘员的脚部,而脚部又远离中央血池,其舒适性更容易受环境影响。而从图 7(d)可以看出,相对 5 号乘员,流过 6 号乘员脚部的气流量更大,在进气量相同的情况下,进气量分配比对流过脚部的气流量起主导作用,所以进气量分配比对 6 号乘员热舒适性的影响程度相对于 5 号乘员更大。整体热舒适在各因素下随水平变化的趋势如图 11。随着进气总量增加,4、5 号乘员热舒适性下降,6 号乘员热舒适性先增大后减小;1 号口进气温度上升,3 位乘员热舒适性增大;2 号口进气温度上升,3 位乘员热舒适性先减小后增大;1 号进气口进气占比减小,2 号进气口进气占比增加,3 位乘员热舒适性指标增大。

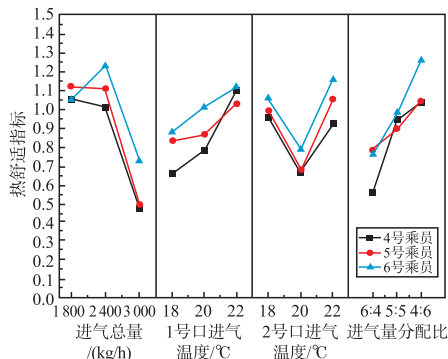
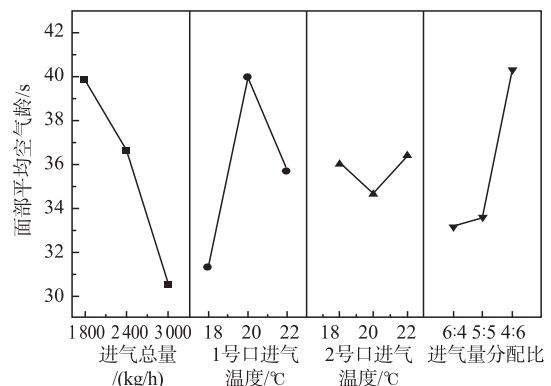


图 11 整体热舒适变化趋势

表 4 极差分析表

	A	B	C	D	面部平均 空气龄	能量 利用率	4号乘员 热舒适性	5号乘员 热舒适性	6号乘员 热舒适性
1	1	1	1	1	30.5	1.24	1.032	1.100	1.141
2	1	2	3	2	46.3	0.58	1.209	1.339	1.646
3	1	3	2	3	33.1	2.34	0.787	0.874	0.887
4	2	1	3	3	24.4	0.96	0.073	0.435	0.513
5	2	2	2	1	31.8	0.89	0.325	0.211	0.498
6	2	3	1	2	35.6	1.01	1.022	0.831	1.154
7	3	1	2	2	39.1	1.09	0.867	0.946	0.968
8	3	2	1	3	42.0	1.27	0.805	1.036	0.874
9	3	3	3	1	38.5	1.39	1.479	1.371	1.297
水平 1 均值	36.63	31.33	36.03	33.6	面部平均空气龄				
水平 2 均值	30.60	40.03	34.67	40.33					
水平 3 均值	39.87	35.73	36.4	33.17					
极差	9.27	8.70	1.73	7.16					
水平 1 均值	1.39	1.10	1.17	1.17	能量利用率				
水平 2 均值	0.95	0.91	1.44	0.89					
水平 3 均值	1.25	1.58	0.98	1.52					
极差	0.44	0.67	0.46	0.63					
水平 1 均值	1.009	0.657	0.953	0.945	4号乘员热舒适性				
水平 2 均值	0.473	0.780	0.660	1.033					
水平 3 均值	1.050	1.096	0.920	0.555					
极差	0.577	0.439	0.293	0.478					
水平 1 均值	1.104	0.827	0.989	0.894	5号乘员热舒适性				
水平 2 均值	0.492	0.862	0.677	1.039					
水平 3 均值	1.118	1.025	1.048	0.782					
极差	0.626	0.198	0.371	0.257					
水平 1 均值	1.225	0.874	1.056	0.979	6号乘员热舒适性				
水平 2 均值	0.722	1.006	0.784	1.256					
水平 3 均值	1.046	1.113	1.152	0.758					
极差	0.503	0.239	0.368	0.498					

4种因素对能量利用率的影响程度由高到低依次为 B、D、C、A,对面部平均空气龄则是 A、B、D、C。面部平均空气龄和能量利用率在各因素下随水平变化的趋势如图 12 所示。随着进气总量增加,面部平均空气龄逐渐减小,能量利用率先增大后减小;1号口进气温度升高,面部平均空气龄先增大后减小,能量利用率先减小后增大;2号口进气温度升高,面部平均空气龄变化很小,能量利用率先增大后减小;1号口进气占比减小,2号口进气占比增大,面部平均空气龄逐渐增大,能量利用率逐渐减小。



(a) 面部平均空气龄变化趋势

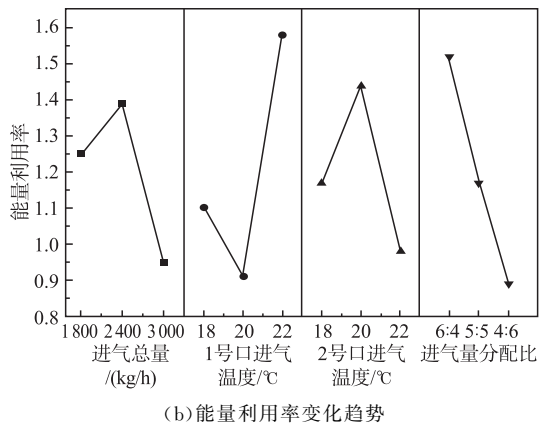


图12 能量利用率与面部空气龄变化趋势

5 结论

利用 Fluent 和 TAITherm 联合仿真,对 9 种工况下乘员舱气流组织和人体热舒适性进行分析,得到以下结论。

1) 由于气流组织的非均匀性,4 种进气参数对不同位置处乘员热舒适性的影响程度大小各不相同。

2) 在 A-进气总量,B-1 号口进气温度,C-2 号口进气温度,D-1、D-2 号口进气量分配比 4 种因素中,进气总量对 3 位乘员热舒适性和平均面部空气龄影响程度最大,2 号口进气温度对 4 号乘员热舒适性和面部区域平均空气龄影响最小,1 号口进气温度对 5、6 号乘员热舒适性影响最小,对能量利用率的影响最大的是 1 号口进气温度,最小的是进气总量。

3) 综合考虑 3 位乘员的热舒适性、面部平均空气龄和能量利用率,最优的进气参数组合是 $A_3B_3C_3D_1$,此进气方案下,4、5、6 号 3 位乘员的热舒适性指标分别为 1.479、1.371、1.297,均在舒适范围内,面部平均空气龄为 38.5 s,能量利用率 1.39,大于 1,3 项评价指标均表现较好。

参考文献

[1] 叶晓江,连之伟,李慈珍,等. 室内热环境、热舒适与工作效率关系的研究[J]. 人类工效学, 2006, 12(3): 3.

[2] SINGH A, HOSNI M H, HORSTMAN R H. Numerical Simulation of Airflow in an Aircraft Cabin Section/Discussion [J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108: 1005.

[3] ZHANG T, CHEN Q Y. Novel Air Distribution Systems for Commercial Aircraft Cabins[J]. Building &

Environment, 2007, 42(4): 1675-1684.

- [4] FARAG A M, KHALIL E. Numerical Analysis and Optimization of Different Ventilation Systems for Commercial Aircraft Cabins[C]//Aerospace Conference. [S.l.]:IEEE, 2015:1-12.
- [5] 张大林. 人机与环境工程中若干问题的数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2002:61-72.
- [6] 吴丹. 飞行器座舱热舒适性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011:29-47.
- [7] 宋凯. 座舱通风与人体核心温度预测研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020:28-54.
- [8] 吴桐. 客舱气流组织与热舒适性数值模拟研究[D]. 天津:中国民航大学, 2020:39-54.
- [9] FIALA D, LOMAS K J, STOTHER M. A Computer Model of Human Thermoregulation for a Wide Range of Environmental Conditions; the Passive System[J]. Journal of Applied Physiology, 1999, 87(5): 1957-1972.
- [10] 郑习娇. 汽车乘员动态热反应及热舒适性研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018:24-25.
- [11] FIALA D, LOMAS K J, STOHRER M. Computer Prediction of Human Thermoregulatory and Temperature Responses to a Wide Range of Environmental Conditions[J]. International Journal of Biometeorology, 2001, 45(3):143-159.
- [12] ZHANG H., EDWARD A, CHARLIE H., et al. Thermal Sensation and Comfort Models for Non-uniform and Transient Environments, Part I: Local Sensation of Individual Body Parts[J]. Building and Environment, 2010, 45(2):380-388.
- [13] ZHANG H, EDWARD A, CHARLIE H, et al. Thermal Sensation and Comfort Models for Non-uniform and Transient Environments, Part II: Local Comfort of Individual Body Parts[J]. Building and Environment, 2010, 45(2):389-398.
- [14] ZHANG H, EDWARD A, CHARLIE H, et al. Thermal Sensation and Comfort Models for Non-uniform and Transient Environments, Part III: Whole-body Sensation and Comfort[J]. Building and Environment, 2010, 45(2): 399-410.
- [15] 邓伟鹏,沈晋明,唐喜庆,等. SARS 隔离病房内的气流组织优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2005, 24(2): 7.
- [16] 周琼瑶. 飞机座舱非均匀环境人体热舒适研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019:33-34.

(编辑:姚树峰)