

文章编号: 1671-6612 (2020) 04-416-08

基于 PMV 指标的驾驶舱热舒适性研究

薛长乐 李艳娜 张涛波

(航空工业第一飞机设计研究院 西安 710089)

【摘 要】 针对某型机驾驶舱热舒适性的问题,在 CFD 软件建立仿真计算模型,模拟了送风温度为 30℃和 40℃时舱室的温度场和速度场,并由试验数据验证仿真模拟的正确性,进而由速度和温度结果推导出舱室热舒适性评价参数 PMV 和 PPD 的值。结果表明,驾驶舱空气分配形成的气流组织满足 HB7489 的要求;送风温度 40℃时机组人员脚部周围空气温度可满足 GJB1129 “足趾温度舒适区为 24℃~30℃”的要求,PMV 和 PPD 值反映机组人员周围的大部分区域舒适性较好,但脚部区域 PMV 值小于-1,需通过增加辅助的加热设备改善脚部舒适性。

【关键词】 舒适性;气流组织;仿真计算;热舒适指标

中图分类号 V245.3 文献标识码 A

Cabin Thermal Comfort Study Based on PMV Index

Xue Changle Li Yanna Zhang Taobo

(AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an, 710089)

【Abstract】 To address thermal comfort of a certain aircraft cockpit, the cabin velocity and temperature were simulated by CFD, when the supply air temperature is 30 or 40℃. Based on the velocity and temperature, we can obtain PMV and PPD value evaluating the cabin thermal comfort. The results show that air distribution of cockpit satisfy the demand of HB7489; under 40℃ supply air, the temperature of air around the pilots' feet is belong to the scope that toe temperature comfort extent in GJB1129 is the extent from 24 to 30℃. The value of PMV and PPD reflects the area around the pilots is quite comfortable, but the PMV value of the feet area is less than -1, auxiliary heater will be added to improve the foot area comfort.

【Keywords】 thermal comfort; air distribution; simulation calculation; thermal comfort index

作者(通讯作者)简介:薛长乐(1989.09-),女,硕士研究生,工程师,E-mail: 932219967@qq.com

收稿日期:2019-05-28

0 引言

随着航空技术的迅速发展,人们对座舱舒适性要求越来越高,尤其是驾驶舱的舒适性,良好的座舱舒适性是保证驾驶员功效的一个必要条件。舒适性是人对环境影响的一种主观评价,受多种因素影响,比如:热环境、声环境、光环境、空气品质等,而且每种因素都不是单一作用,同时各个因素之间也会产生互相影响。热环境包含的因素主要有:空气温度、相对湿度、气流速度、辐射温度,包括人

体本身的服装热阻和代谢率,都与人体热舒适密切相关。在舒适条件下人不会必然产生反应,但不舒服常常会引起人的反应。尽管人体有一定的自我调节能力,环境对人体热舒适的影响仍占主要作用。

近年来,国内外学者分别从送风形式、送风速度、不同季节及个性送风系统等方面进行了飞机舱室内的热舒适性研究^[1-4]。本文采用 FLUENT 软件模拟了现有送风形式下送风温度分别为 30℃和 40℃时驾驶舱的速度场和温度场,结合 PPV-PPD

指标分析了驾驶舱的热舒适性,着重研究了机组成员的头部和脚部热舒适性。

1 数值模拟

1.1 物理模型

根据某型机的驾驶舱的布局,建立几何模型如图1所示,主要包括顶部通风格栅、脚部通风管路、排气格栅、机组人员、地板等。驾驶舱主供气格栅的供气流量分别为300kg/h,脚部通风支路分别为150kg/h。驾驶员左右脚前部区域设有出风口,中间区域设有小孔出风。

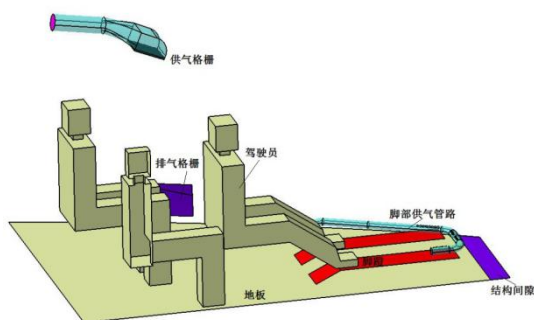


图1 几何模型

Fig.1 The geometrical model

采用FLUENT前处理软件ICEM对驾驶舱区域进行网格划分,所有区域均为四面体网格。图2给出了不同网格数量下左侧驾驶员头部上方直线(点1(4.8, -0.3, 1.3)和点2(4.8, -0.3, 1.3))

处的温度和速度变化,经过网格独立性分析,总网格数约488万可满足计算需求,其中最小网格尺寸为0.2。

边界条件设置如表1所示,蒙皮部分温度为288.15K。

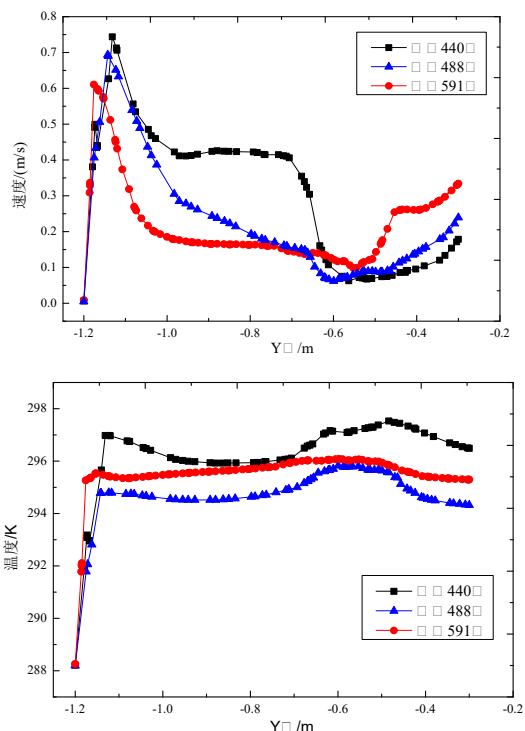


图2 网格无关性分析

Fig.2 Grid independence analysis

表1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

边界位置	边界类型	数值	温度边界
顶部格栅入口	mass-flow-rate	0.042kg/s	303.15K/313.15K
脚部通风管路入口	mass-flow-rate	0.083kg/s	303.15K/313.15K
排气格栅	pressure-outlet	0	277.15K
结构间隙	pressure-outlet	0	277.15K
脚蹬	wall	/	277.15K
地板	wall	/	277.15K
人体表面	wall	/	304.15K
格栅及脚部通风管路	wall	/	绝热
对称面	symmetry	/	/

1.2 数学模型

本文采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,其控制方程如式(1)所示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{u}_i\phi - \Gamma_{\phi,eff} \text{grad}\phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

式中: ϕ 为变量, $\bar{u}_i$ 为时均速度 ($i=1,2,3$), $\Gamma_{\phi,eff}$ 为有效扩散系数, ρ 为密度, S_{ϕ} 为源项。当

ϕ 值不同时, 上式可表示连续性方程、动量方程、能量方程和湍动能方程等。

计算中空气的密度设置采用 imcompressible-ideal-gas, 采用分离求解器求解控制方程, 控制方程求解采用 SIMPLIE 算法。

1.3 评价指标

目前最全面最通用的热环境评价指标是丹麦 P O Fanger^[5] 提出的预测平均热感觉指标 PMV (Predicted Mean Vote), 表示一个可预测任何给定环境变量的组合所产生热感觉的指标。对即使大多数人都满意的环境, 也会有人感到不舒服, 因此采用 PPD 指标 (预期不满意百分率) 来表示对热环境不满意的百分率, 在实际应用中常把 PMV 与 PPD 结合起来。

预测平均热感觉指标 PMV^[5] 主要包括空气温度、湿度、速度及平均辐射温度 4 个因素, 还包括服装与新陈代谢, 方程如下:

$$T_{cl}=35.7-0.028(M-W)-I_{cl}\{3.96\times 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl}+273.15)^4-(T_r+273.15)^4]+f_{cl}h_c(T_{cl}-T)\} \quad (6)$$

$$h_c=2.38\times(T_{cl}-T)^{0.25} \quad (2.38(T_{cl}-T)^{0.25}\geq 12.1u^{0.5}) \quad (7)$$

$$h_c=12.1u^{0.5} \quad (2.38(T_{cl}-T)^{0.25}<12.1u^{0.5}) \quad (8)$$

式中, I_{cl} 为衣服的热阻, $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$; u 为空气流速, m/s 。

PPD 与 PMV 的关系式如下:

$$PPD=100-95\exp(-0.03353PMV^4-0.2179PMV^2) \quad (9)$$

其中人体输出外功为 0, 即 $W=0$; 新陈代谢率 $58.15\text{W}/\text{m}^2$ 。衣服热阻: 以夏季工况为例, 采用一般夏季服装: 短裤、长薄裤子, 短袖、薄短袜和鞋子, 本文中模拟人体表面服装热阻取 0.08 ^[6]。本文中平均辐射温度 T_r 取 25°C , 空气相对湿度为 35% 时水蒸气分压力 P_a 约 756Pa 。

ASHRAE 标准^[7]中将 PMV 分为 7 点生理、心理热感觉标尺, 如表 2 所示, 一般 PMV 在 ± 1 之间认为是舒适状态。

通常认为舒适性应满足 PPD 指标 (预期不满意百分率) <10 的范围。

表 2 PMV 舒适标准

Table 2 PMV comfort standards

热舒适指标	冷	凉	有点凉	舒适	有点暖	暖	热
PMV	-3	-2	-1	0	1	2	3

$$PMV=[0.303\exp(-0.036M)+0.028]L \quad (2)$$

其中 L 的计算公式为:

$$L=M-W-3.96\times 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl}+273.15)^4-(T_r+273.15)^4]-f_{cl}h_c(T_{cl}-T)-3.05\times 10^{-3}\times[5733-6.99(M-W)-P_a]-0.42(M-W-58.15)-1.7\times 10^{-5}[5876-P_a]-0.0014M(34-T) \quad (3)$$

式中, M 为新陈代谢量, W/m^2 ; W 为人输出的外功, W/m^2 ; f_{cl} 为着衣体表面与裸体表面之比, W/m^2 ; T 为当地的空气温度, $^\circ\text{C}$; T_{cl} 为衣服外表面的温度, $^\circ\text{C}$; T_r 为平均辐射温度, $^\circ\text{C}$; h_c 为衣服与空气之间的表面换热系数, $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$; P_a 为水蒸气分压力, Pa 。

其中 f_{cl} , T_{cl} 和 h_c 可根据下列公式计算:

$$f_{cl}=1.05+0.645I_{cl} \quad (I_{cl}\geq 0.078) \quad (4)$$

$$f_{cl}=1.0+1.29I_{cl} \quad (I_{cl}< 0.078) \quad (5)$$

2 模型验证及结果分析

由于人体的头部和脚部对温度较为敏感, 本文侧重分析机组人员头部和脚部的舒适性状态, 同时结合温度场、速度场及 PMV-PPD 综合分析预测驾驶舱的舒适性。

2.1 试验数据验证

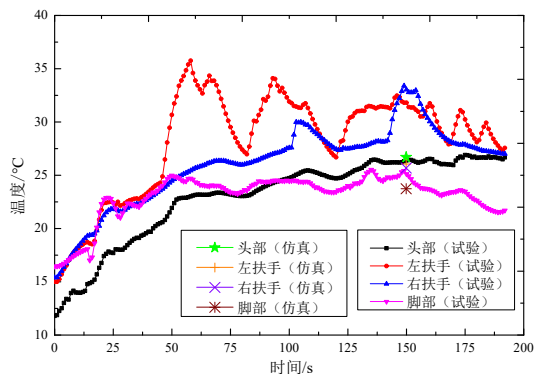


图 3 仿真结果与试验数据对比

Fig.3 Comparison of simulation results and flight test datum

根据供气温度为 40°C 的仿真计算结果, 与试

验数据进行对比分析如图3所示,其中试验数据为瞬态数据,随时间变化波动明显,仿真计算为稳态结果,对比表明驾驶员头部和脚部的仿真计算与试验数据基本吻合,驾驶员左右扶手的温度仿真计算与试验数据存在一定偏差,这是因为试验数据采集时,驾驶员左右两侧气流不均匀,导致试验测试数据差别较大,对本文来说头部和足部数据吻合度较好,因此仿真结果有效。

2.2 结果分析

结果显示所取典型截面图4所示。

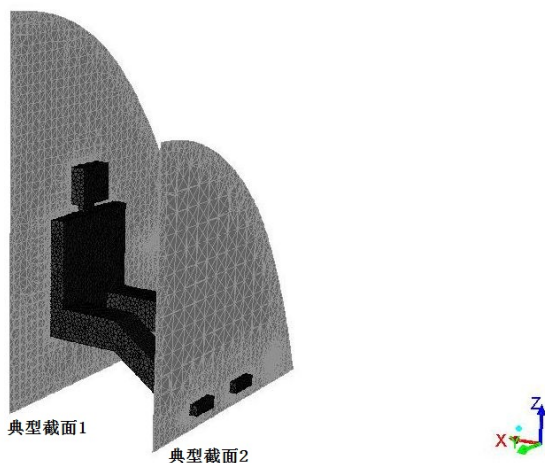
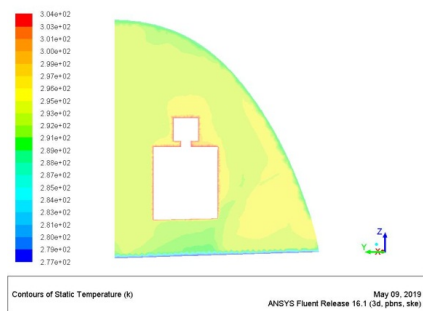


图4 典型截面位置

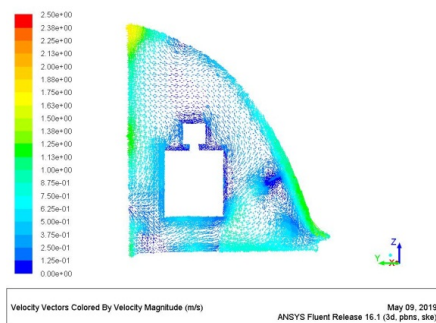
Fig.4 Position of typical section

2.2.1 送风温度 30℃

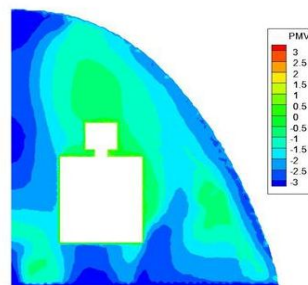
当送风温度 303.15K (30℃) 时,各个典型截面的温度,速度,PMV 及 PPD 分布如图5~图6所示。



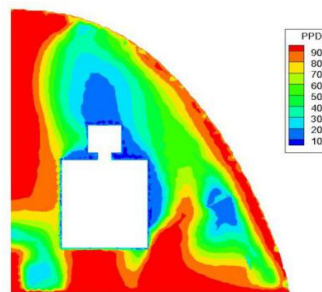
(a) 温度分布



(b) 速度分布



(c) PMV 分布

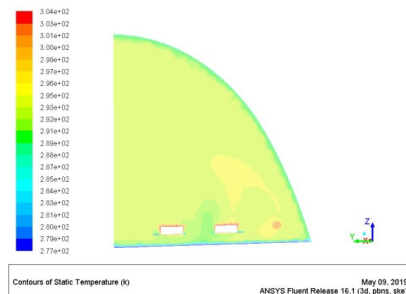


(d) PPD 分布

图5 典型截面1温度、速度、PMV和PPD分布
(驾驶员位置)

Fig.5 Air temperature、velocity、PMV and PPD distribution of typical section 1

驾驶员所在截面模拟结果显示,驾驶员周围空气的温度范围为 20~24℃,速度小于 0.5m/s,除了驾驶员附近及个别区域的 PMV 值在-1~1 的范围,其余均小于-1,该截面大部分区域的 PPD 值大于 10,主观感觉冷。



Contours of Static Temperature (K) May 09, 2019 ANSYS Fluent Release 16.1 (3d, pbrn, sbr)

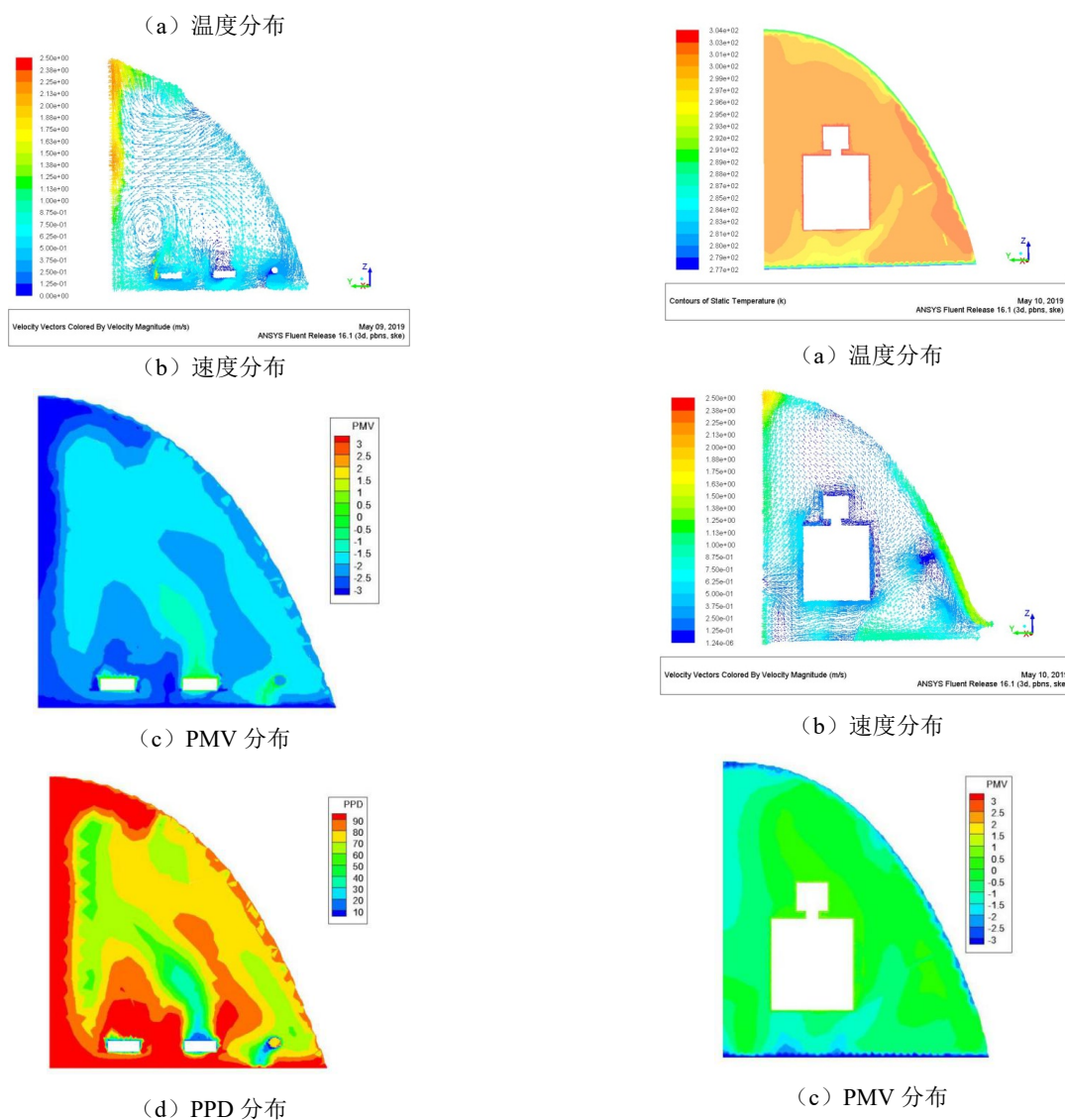


图6 典型截面2温度、速度、PMV和PPD分布
(驾驶员脚部)

Fig.6 Air temperature、velocity、PMV and PPD
distribution of typical section 2

驾驶员脚部所在截面模拟结果显示,驾驶员脚部左右两侧的空气的温度约为 20°C ,两脚中间区域的温度约 18°C ,脚部周围的气流速度约 $0.5\sim 0.75\text{m/s}$,驾驶员左脚上部的PMV值在 $0\sim -1$ 之间,其余PMV值均小于 -2 ,脚部周围的PPD值基本都大于10,感觉偏冷。

2.2.2 送风温度 40°C

当送风温度为 313.15K (40°C)时,各个典型截面的温度,速度,PMV及PPD分布如图7~图8所示。

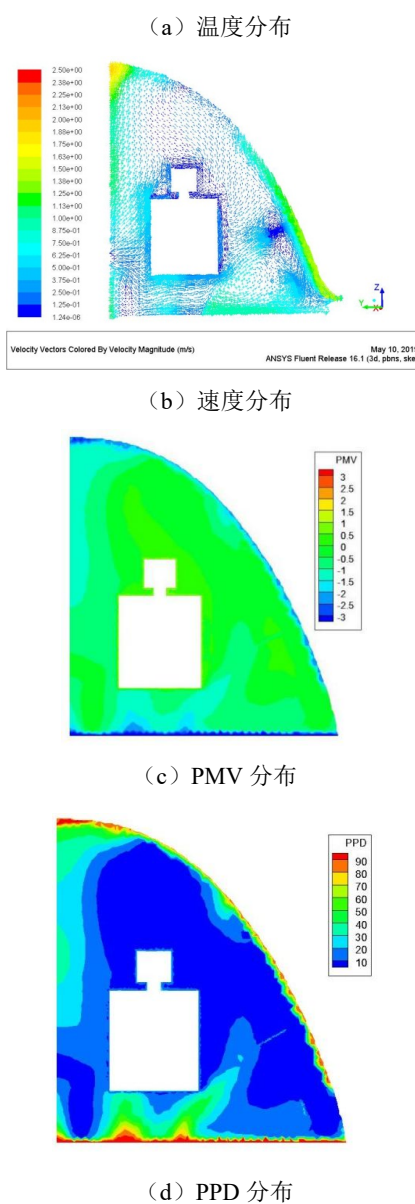
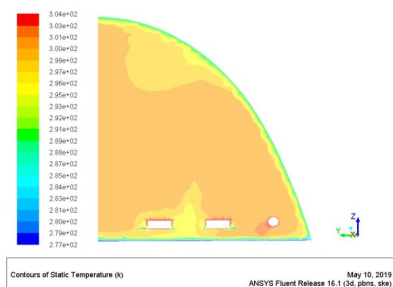


图7 典型截面1温度、速度、PMV和PPD分布
(驾驶员位置)

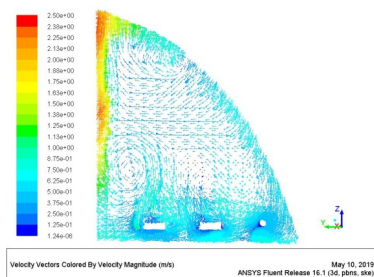
Fig.7 Air temperature、velocity、PMV and PPD
distribution of typical section 1

驾驶员所在截面模拟结果显示,驾驶员周围空

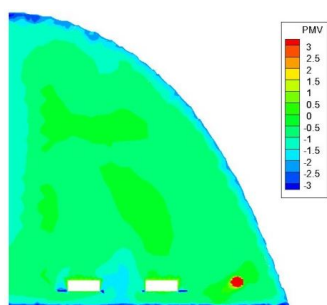
气的温度范围为 $24\sim 28^{\circ}\text{C}$,速度小于 0.5m/s ,该截面大部分区域的PMV值在 $-1\sim 1$ 的范围,PPD值小于10。靠近蒙皮和地板的部分,PMV值小于 -1 ,PPD值大于10,其原因是壁面处的气流速度较大。与送风温度为 30°C 的结果相比,在气流组织一定时,送风温度为 40°C 时人员感觉舒适。由于送风温度为 30°C 时,舱室及人员周围的温度较低,驾驶员感觉冷。



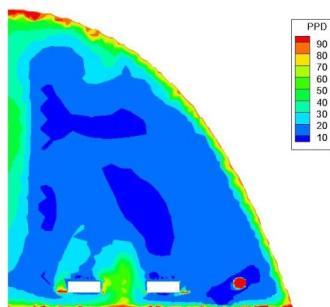
(a) 温度分布



(b) 速度分布



(c) PMV 分布



(d) PPD 分布

图8 典型截面2温度、速度、PMV和PPD分布
(驾驶员脚部)

Fig.8 Air temperature、velocity、PMV and PPD
distribution of typical section 2

驾驶员脚部所在截面模拟结果显示,驾驶员脚部周围空气温度范围是 $24\sim 27^{\circ}\text{C}$,脚部周围的气流速度约 $0.5\sim 0.75\text{m/s}$ 该区域的PMV值在 $0\sim -1$ 之间,但是两脚之间的PMV值小于 -1.5 ,该部分的PPD值大于10,感觉冷,有明显的吹风感,脚部舒适性相比于送风温度为 30°C 时有明显改善,但还有局部的不舒适感,其主要原因是脚部周围气流速度较大。

3 结论

本文通过对某型机驾驶舱模型的适当简化,在现有送风形式下建立几何模型,划分网格,进行模型验证,采用FLUENT软件模拟了送风温度为 30°C 和 40°C 时,驾驶舱机组人员及驾驶员脚部的周围的速度场和温度场,并分析了反映人体热舒适性的指标PMV和PPD的分布情况,得出如下结论:

(1) 驾驶舱现有的顶部和脚部送风,侧壁及地板间隙回风形式形成的气流组织满足HB7489中“驾驶舱机组成员迎面气流速度不超过 1.02m/s ”的要求^[8]。驾驶员脚部的湍流区风速在 $0.5\sim 0.75\text{m/s}$ 。

(2) 当送风温度为 30°C 时,驾驶员脚部区域温度约 20°C ,仅满足GJB1129-91^[9]座舱温度控制生理学评价指标要求“足趾温度工效保证区为 $19^{\circ}\text{C}\sim 23^{\circ}\text{C}$ ”。不满足“足趾温度舒适区为 $24^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ”的要求。机组人员周围大部分区域PMV值均小于 -1 ,PPD值大于10,感觉偏冷。

送风温度为 40°C 时,驾驶员脚部区域温度为 $24\sim 27^{\circ}\text{C}$,满足GJB1129-91^[9]座舱温度控制生理学评价指标要求“足趾温度舒适区为 $24^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ”。此时机组人员周围的大部分区域PMV值在 $-1\sim 1$ 之间,PPD值小于10,人员感觉舒适。但脚部局部区域的PMV值仍小于 -1 ,热舒适性需改善。

(3) 热舒适性指标PMV-PPD可在一定程度上反映舱室的热舒适性情况,但PMV是温度及速度的函数,在局部湍流区,如驾驶员脚部,由于温度偏低或者速度偏高,PMV都会显示为不舒适。

参考文献:

- [1] 孙贺江,吴尘,安璐.大型客机座舱混合送风形式的数值模拟[J].应用力学学报,2013,30(3):339-444.
- [2] 王修岩,张革文,刘艳敏,等.波音 737 飞机的客舱内空气质量数值模拟[J].系统仿真学报,2018,30(5):1974-1979.
- [3] 刘俊杰,李炳烨,裴晶晶,等.不同季节飞机客舱环境的
(下转第 441 页)