空调座舱热舒适性计算

吴玉庭 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
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要: 热舒适性是评价座舱空调系统的重要指标. 根据人体热平衡方程和 Fanger 的舒适性假设建立了空调座舱的热舒适性计算模型,并给出了空调座舱热环境的评价方法,从而为热舒适的定量评价奠定了理论基础. 应用此模型对 3 种座舱空调方案的热舒适性进行了计算,从热舒适角度比较了 3 种方案的优缺点,结果表明方案 3 是最优方案.

关 键 词: 座舱; 空气调节系统; 舒适性; 热环境
中图分类号: V 245.3+4; O 242
文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2000)01-0056-04

座舱空调是飞行器空调系统的重要组成部分,它的主要任务就是为飞行员创造良好的舱内环境. 评价舱内环境优劣的一个重要方面是热环境. 因而进行空调座舱的热舒适性计算,确立评价空调座舱热环境优劣的指标,对于设计和选择高效、经济的座舱空调系统具有重要的意义.

热舒适感是在周围热环境的综合作用下人感到满意的程度.

影响人的热舒适感的因素很多,如新陈代谢率、衣着、环境特性等,因此不可能用单一的物理量来衡量环境是否使人感到舒适,而应将各因素综合在一起进行考虑. 热环境的评价方法分为实验法和分析法两种.

实验法是在测量两个以上因素的基础上,调查人的热感觉和热应激反应,由此归纳出建立在实验和统计学基础上的评价热环境的综合指数,然后利用该指数来评价有待研究的环境状况,预测人体的热感觉和热应激反应. 分析法是利用人体模型和人体的热平衡方程计算在各种热环境条件下的热感觉和热应激反应,建立人体热反应方程和热舒适方程,对热环境进行评价[1]. 本文在前人工作的基础上,以分析法为主,结合实验给出的舒适性假设,建立了一套完整的热舒适性计算模型,为定量评价空调座舱的热舒适性奠定了理论基础.

1 人体热舒适方程

有限空间内人的热舒适感主要建立在人与周围环境正常的热交换上. 人与周围环境的热交换主要有:对流换热、辐射换热和蒸发散热 3 种类型,如图 1 所示. 由新陈代谢所产生的热量和人与周围环境交换的热量之间的平衡关系,可以用公式表示如下:

$$\Delta q = \frac{H}{A_{du}} - q_e \pm q_c \pm q_r \tag{1}$$

式中, H 是人体内部产热率, W; q_e 是人体的单位面积蒸发散热率, W/m^2; q_c 是人体与周围环境的单位面积对流换热率, W/m^2; q_r 是人体与周围环

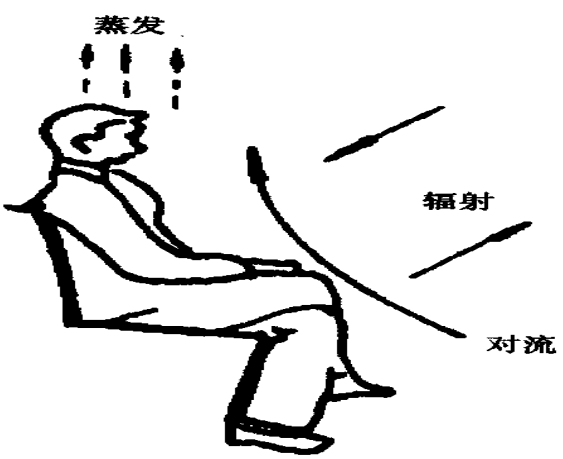


图 1 人体与周围环境的热交换

收稿日期: 1998-06-12
作者简介: 吴玉庭(1970 -),男,河北井陉人,博士生,100083,北京.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

境的单位面积辐射换热率,W/m^2;Δq 是人体单位面积的热负荷,W/m^2;A_{du}是人体的平均皮肤表面积,m^2,对于我国,一般取为 1.5～1.8 m^2.

当 $\Delta q = 0$ 时,人体处于热平衡,体温可维持正常,这是人生存的基本条件. 但是,$\Delta q = 0$ 并不一定表示人体处于舒适状态,因为各种热量之间可以有许多不同的组合,都可以使 $\Delta q = 0$,也就是说,人们会遇到各种不同的热平衡,但只有那种使人体按正常比率散热的热平衡才是舒适的,而正常比率散热也因人的活动状态和环境状态的不同而不同. 处于热舒适状态的热平衡称为正常热平衡,反之,称为负荷热平衡. 负荷热平衡若仍在生理允许的范围内,则人是可以忍受的. 但是,当环境条件恶化到超出了人体代谢调节能力的程度时,出现 $\Delta q \neq 0$ 的情况,于是体温开始发生变化,从生理卫生方面来说,这是不允许的. 显然,为了评价舒适性,还要补充其它生理舒适条件. 丹麦 P.O. Fanger 综合了近千人在不同热环境下的热感觉试验结果,并以人体热平衡方程为基础,认为人的热感觉是热负荷(产热率与散热率之差)的函数,而且人在舒适状态下应有的皮肤温度、排汗散热率分别与新陈代谢产热率之间存在对应关系,在一定的活动状态下,只有一种皮肤温度和排汗散热率是使人感到最舒适的,其数值关系分别为[2],[3]

$$t_p = 35.7 - 0.028\left(\frac{H}{A_{du}}\right) \tag{2}$$

$$E_p = 0.448\left(\frac{H}{A_{du}} - 58.15\right) \tag{3}$$

式中,t_p 是人体皮肤表面平均温度,℃;E_p 是排汗散热率(总的蒸发散热率减去呼吸蒸发散热率),W/m^2.

以上给出了人体热舒适的 3 个基本方程. 下面就以这 3 个基本舒适方程为基础,结合人体各种散热方式的分析来建立人体的热舒适方程.

人体内部产热率 H 可以表示为人体的新陈代谢产热率 M 与机械功有效系数 η 的函数,即

$$H = M - W = M(1 - W/M) = M(1 - \eta) \tag{4}$$

式中 W 为人体所做的机械功. 人体的新陈代谢产热率 M 主要取决于人的活动状态. 代谢产热率可采用热平衡法和气体分析法进行精确测定,但精度要求不高时可通过表 1 来估算[4].

人体的蒸发散热主要通过呼吸、无感蒸发及皮肤出汗 3 条途径进行. 人体的蒸发散热率可通过下式计算:

$$\begin{aligned} q_e = L + E_{hu} + E_p + E_h = \\ 0.0016\frac{M}{A_{du}}(34 - t_n) + \\ 0.00267\frac{M}{A_{du}}(44 - P_f) + \\ 0.407(1.92t_p - 25.3 - P_f) + \\ 0.448\left[\frac{M}{A_{du}}(1 - \eta) - 58.15\right] \end{aligned} \tag{5}$$

式中,L 是呼吸时的显热损失,W/m^2;E_{hu}是呼吸时的潜热损失,W/m^2;E_p 是肤扩散蒸发热损失,W/m^2;E_h 是皮肤出汗造成的热损失,W/m^2;t_n 是人体周围的空气温度,℃;P_f 是人体周围的水蒸气分压力,Pa;t_p 是人体皮肤的平均温度,℃;人体的辐射热损失可通过下式计算:

$$q_r = 3.95 \times 10^{-8} f_y[(t_y + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4] \tag{6}$$

式中,f_y 是穿衣人体的外表面积与裸体时外表面积之比;t_y 是衣着外表面的温度,℃;t_{mr}是平均辐射温度,℃

当衣服热阻 $R_y \leq 0.078$ m^2·℃/W 时

$$f_y = 1.00 + 1.29R_y$$

当 $R_y > 0.078$ 时

$$f_y = 1.05 + 0.64R_y$$

人体的对流热损失为

表 1　飞行器座舱乘员不同作业时的单位面积新陈代谢产热率(M/A$_{du}$)　W/m^2

基本姿势		航空活动		航天活动	
活动类型	代谢率	活动类型	代谢率	活动类型	代谢率
静卧	26	领航员(飞行时)	79	舱内平均	
静坐	58	射击通讯员(飞行时)	84	东方号	58
跪蹲	65	运输机飞行员	95	礼炮号	77
自由站立	70	航线起落	104	出舱活动	
弯腰	78	轰炸机飞行员(飞行时)	109	阿波罗计划	152
立正	82	空城飞行	134	天空实验室	149
		歼击机飞行员(飞行时)	162	航天飞机	129

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$q_c = f_y \alpha_c (t_y - t_n) \tag{7}$$

式中,α_c 是对流换热系数.

$$\alpha_c = \begin{cases} 12.1(v)^{1/2} & v > 0.1\,\mathrm{m/s} \\ 3.9 & v < 0.1\,\mathrm{m/s} \end{cases}$$

v 为空气的相对流速.

衣着外表面的温度 t_y,按热平衡关系为

$$t_y = t_p - R_y(q_r + q_c) = t_p - R_y\{3.95 \times 10^{-6} f_y[(t_y + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4] + f_y \alpha_c (t_y - t_n)\}$$

将式(4)、(5)、(6)、(7)代入式(1)得空调座舱人体的热舒适方程

$$\Delta q = \frac{M}{A_{du}}(1 - \eta) - 0.0016\frac{M}{A_{du}}(34 - t_n) - 0.00267\frac{M}{A_{du}}(44 - P_f) - 0.407\left[43.2 - 0.053\frac{M}{A_{du}}(1 - \eta) - P_f\right] - 0.448\left[\frac{M}{A_{du}}(1 - \eta) - 58.15\right] - 3.95 \times 10^{-8} f_y[(t_y + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4] - f_y \alpha_c (t_y - t_n) \tag{8}$$

2 热舒适性指标

由上可知,有限空间的热环境的舒适性主要与生理状态(新陈代谢率)、衣服热阻、以及 4 个热环境参数(空气温度、速度、湿度以及辐射温度)等因素有关,显然,单一用某一因素来描述热环境的特征是不准确的,必须将各因素综合起来,用一个综合指标来表述. 国内外对热环境评价指标进行了近 20 多年的研究,先后提出了各种评价标准,主要有:作用温度(Operative Temperature)、有效温度(Effective Temperature)、新有效温度(New Effective Temperature)、PMV 指标等[2],[3]. 其中,PMV 指标在 80 年代初得到了 ISO 的承认,并被认为是一种比较全面的评价热环境舒适性的指标,因此,本文将采用 PMV 指标作为有限空间内的热环境舒适性评价的标准. PMV 指标的英文全称是:Predicted Mean Vote ——预测平均热感觉指标. 根据 P. O. Fanger 假设[3],PMV 指标 P_{mv}为

$$P_{mv} = f(\Delta q, M) \tag{9}$$

P. O. Fanger 给出的舒适性指标 PMV 的数学关系式为

$$P_{mv} = \Delta q\left[0.107\exp\left(-0.049\frac{M}{A_{du}}\right) + 0.027\right] \tag{10}$$

将式(8)代入式(10),则可得到

$$P_{mv} = \left[0.017\exp\left(-0.049\frac{M}{A_{du}}\right) + 0.027\right] \times \left\{\frac{M}{A_{du}}(1 - \eta) - 0.0016\frac{M}{A_{du}}(34 - t_n) - 0.00267\frac{M}{A_{du}}(44 - P_f) - 0.407\left[43.2 - 0.053\frac{M}{A_{du}}(1 - \eta) - P_f\right] - 0.4448\left[\frac{M}{A_{du}}(1 - \eta) - 58.15\right] - 3.95 \times 10^{-8} f_y[(t_y + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4] - f_y \alpha_c (t_y - t_n)\right\} \tag{11}$$

根据式(15)可计算人在多种衣着和活动状态下对热环境的舒适感觉,并将这种感觉分为 7 级,用 PMV 指标表示,PMV 值与热感觉的对应关系见表 2[3].

表 2 预测热感觉平均指标

热感觉描述	PMV 值
热	+3
暖	+2
稍暖	+1
舒适	0
稍凉	-1
凉	-2
冷	-3

用方程(15)及表 2,可以对空调座舱的舒适性进行评价. 目前,国内一般认为 PMV 值在 -1 至 +1 范围内均可视为热舒适环境.

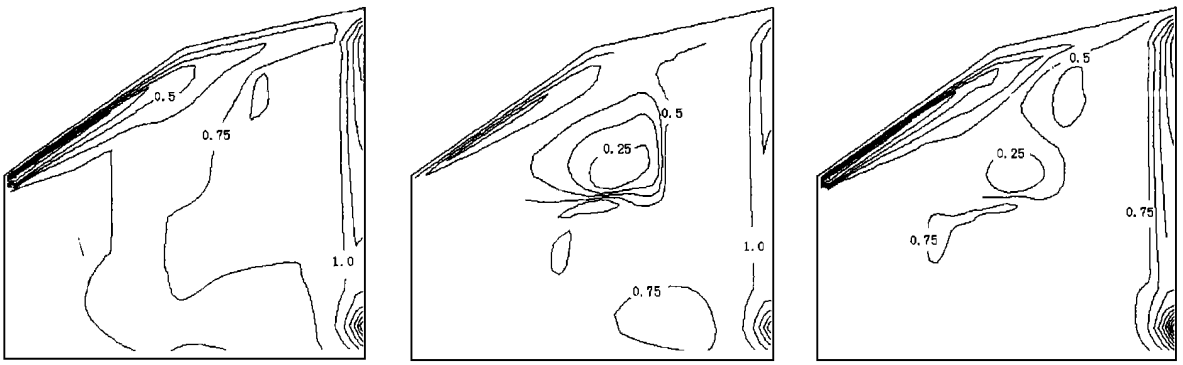
3 空调座舱的舒适性分析

从上述模型中可以看出,PMV 值只与环境空气的温度和速度有关,是环境空气温度和速度的函数. 因此,要进行 PMV 值的计算,必须首先得到空调座舱的温度和速度分布. 作者最近提出了用贴体网格对空调座舱的速度和温度分布进行三维数值模拟,具体模拟方法见文献[5].

应用上述模型,根据作者对某型机座舱 3 种有代表性空调方案的三维温度和速度分布数值模拟结果[5],对这 3 种空调方案进行了舒适分析,分析结果见图 2.

这 3 种方案分别为:①座舱头部送风(方案 1);②座舱头部送风 + 座舱两侧送风(方案 2);③座舱头部送风 + 座舱两侧送风 + 座舱后段顶部送风(方案 3). 由图中可以看出,3 种方案基本上都能满足最基本的要求,即驾驶员周围环境的 PMV

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



a 方案 1　　b 方案 2　　c 方案 3

图 2　空调座舱 PMV 值分布

值均在 ±1 间. 方案 2 和方案 3 由于有两侧送风,在驾驶员胸前形成一片舒适区,舒适区范围较大,而方案 1 却没有;方案 3 由于有顶部送风口,头部舒适区较方案 2 大,且驾驶员周围舒适区的范围也较大,因此可以得出结论,从热舒适的角度考虑,方案 3 优于方案 2,方案 2 优于方案 1.

4　结 束 语

本文根据人体的热平衡方程和 Fanger 的舒适性假设,建立了空调座舱的热舒适计算模型,从而使空调座舱热环境的评价建立在比较科学的基础上,同时也为空调座舱的热舒适定量评价奠定了理论基础. 但也应看到,本文所建立的热环境评价模型是以中性稳态热环境为条件,只考虑人一时的感觉,而忽略了长期的生理和心理的健康,因此还存在一定的缺陷. 随着研究工作的深入,空调座舱的热环境评价将会更加完善.

参 考 文 献

[1] 卫　正,戴自祝,张希仲. 人-热环境系统的评价方法[A]. 见:龙升照主编. 人机环境系统工程研究进展. 第 1 卷[C]. 北京:北京科学技术出版社,1993. 336～341

[2] 叶　歆. 建筑热环境[M]. 北京:清华大学出版社,1996.

[3] Ingersoll J G, Kalman T G, Maxwell L M, *et al*. Automobile passenger compartment thermal comfort model —part II: human thermal comfort calculation[R]. SAE-920266, 1992.

[4] 陈　信,袁修干. 人-机-环境系统工程生理学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1996.

[5] 林国华. 空调座舱流体流动和传热的数值模拟[D]. 北京:北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系,1998.

Human Thermal Comfort Calculation of Air-Conditioned Cockpit

WU Yu-ting

(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 Xiu-gan

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

Abstract: Thermal comfort is a important standard for assessing a cockpit air-conditioning system. A thermal comfort calculation model of air-conditioned cockpit is founded on the base of human thermal balance equation and thermal comfort hypothesis proposed by P. O. Fanger. Furthermore, the assessment method of thermal comfort is presented. As a result, the above-mentioned works lay a theory foundation for the thermal comfort quantitative assessment of air-conditioned cockpit. The thermal comfort of three kinds of air-condition scheme of the cockpit were calculated by using the thermal comfort calculation model and the thermal environment. quality of three kinds of schemes was assessed. The result indicated that the third scheme is the best one in terms of thermal comfort.

Key words: cabins; airconditioning systems; comfortableness; thermal enviroments

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net