战斗机地面停放时飞行员综合热应激预测模型

邱义芬 付 杨 李艳杰 任兆生

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191) (空军航空医学研究所, 北京 100036)

摘 要: 预测夏季战斗机地面停放时飞行员的热应激,以提高航卫等有关人员对飞行员受高温影响的认识,并为采取必要的防护措施提供依据. 首先由气象条件估算战斗机座舱内热环境参数,分析穿着夏季飞行基础服装时飞行员在座舱热环境中的热调节过程,模拟飞行员热生理指标变化情况,从而预测飞行员的热应激水平. 编制了飞行员穿夏季基础着装在座舱中的热分析软件,给出了热应激预测结果,经高温舱试验验证,人体平均皮肤温度、核心温度及平均体温增值计算与试验结果变化趋势相同,且量值接近,热应激预警结果一致. 综合热应激指数模型预测与试验结果对比偏差均小于 20%,预测模型合理可靠,能满足使用要求.

关 键 词: 生命保障技术; 综合热应激指数; 数值模拟; 飞行员; 战斗机

中图分类号: V 445.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)07-0830-03

Estimation model of comprehensive index of heat stress on fighter pilots on ground

Qiu Yifen Fu Yang Li Yanjie

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Ren Zhaosheng

(Institute of Aviation Medicine, Air Force, Beijing 100036, China)

Abstract: Comprehensive index of heat stress (CIHS) was given to pay attention to the high temperature influence on fighter pilots, and to supply proof to take necessary protection to the pilots. According to the airport weather report thermal environment parameters of fighter cabin were estimated first, heat and mass transfer process was analyzed about thermal system concluding pilot, summer flying wear and the cabin environment, and changes of human body thermal physiological parameters were simulated, then the CIHS was calculated. The heat and mass transfer analysis software of the thermal system was developed. The CIHS estimation curve under a given weather was plotted. The high temperature cabin experiments show that calculated results about average skin temperature, core temperature and average body temperature are similar to the experimental results, they have same change tendencies, similar increments between initial and final values. The heat stress early-warning results are the same. The deviations between experimental and calculated results are less than 20%, so the estimation model is reliable and reasonable, can meet the application very well.

Key words: life-support technology; comprehensive index of heat stress; numerical simulation; pilot; fighter

在我国长江流域及南方地区,夏季战斗机飞行员在飞机起飞前的座舱准备、一等战备值班和低空飞行阶段,均受到高温侵害. 目前因第 3代战斗机座舱普遍采用了较先进的环控系统,使得飞行员在飞行前热暴露阶段的热应激已成为整个飞行过程热生理的突出矛盾[1]. 本文对战斗机地面停放时座舱热环境下飞行员的热应激进行预测,为提高航卫等有关人员对飞行员受高温影响的认

收稿日期: 2007-06-06

作者简介: 邱义芬 (1968 -),女,湖北丹江口人,副教授, qiuyifen@vip.sohu.com.

识及采取必要的防护措施提供参考[2]. 地面条件下战斗机飞行员的热应激状态采用综合热应激指数表示. 本文首先根据夏季不同时期的气象条件推算出座舱环境参数,然后计算在座舱热环境下飞行员的热生理指标,得到相应条件下的综合热应激指数,从而预测人体(文中均指飞行员人体)的热应激水平.

1　综合热应激指数

飞行员综合热应激指数 CIHS (Comprehensive Index of Heat Stress)计算如下:

$$C = 0.01 \times \Delta H_b + \Delta \bar{T}_b + 0.1 \times S_w + S$$

式中,ΔH_b 为心率增值,次/min; ΔT_b 为平均体温增值,℃; S_w 为出汗量,g/min; S 为积热量,$S = 3.49\Delta \bar{T}_b$, kJ/kg 增值指计算或试验结束时的终值与初始值间的变化量. 其中 $\Delta T_b = T_{b2} - T_{b1}$.

初始平均体温 $\bar{T}_{b1}$ 计算方法:

$$\bar{T}_{b1} = 0.33\, T_{s1} + 0.67 T_{c1}$$

式中,$\bar{T}_{s1}$ 为飞行员人体初始平均皮肤温度,℃; T_{c1} 为人体初始核心温度,℃

飞行员热暴露结束时平均体温 $\bar{T}_{b2}$ 计算方法:

$$\bar{T}_{b2} = 0.2\, \bar{T}_{s2} + 0.8 T_{c2}$$

式中,$\bar{T}_{s2}$ 为人体热暴露结束时平均皮肤温度,℃; T_{c2} 为人体核心温度,℃

由上可见,首先应根据气象台干球温度 T_{db} 和相对湿度 Φ 数据推算地面条件下座舱的热环境参数,然后在该热环境下建立"飞行员-夏季飞行基础着装-座舱环境"热系统模拟过程,分析计算人体平均皮肤温度、核心温度以及 S_w 等热生理参数变化,从而预测地面条件下战斗机飞行员的热应激状态. 由于计算结果中没有心率的变化情况,且心率增量加权系数较小,因此本文采用下式:

$$C = 4.49 \times \Delta \bar{T}_b + 0.1 \times S_w \qquad (1)$$

2　战斗机地面条件下座舱环境参数

座舱外大气的饱和水蒸汽分压为

$$p_s = \exp(-5\,800.220\,6 T_{db}^{-1} + 1.391\,499\,3 T_{db}^{0} - 0.048\,602\,39 T_{db}^{1} + 0.000\,041\,764\,768 T_{db}^{2} - 0.000\,000\,014\,452\,093 T_{db}^{3} + 6.545\,967\,3 \ln(T_{db})) \qquad (2)$$

式中,T_{db} 为气象台干球温度,K

实际水蒸汽分压为

$$p_v = \Phi \times p_s \qquad (3)$$

座舱外空气含湿量为

$$d = 622 p_v / (p_b - p_v) \quad \text{g/kgda} \qquad (4)$$

式中,p_b 为大气压力,Pa

夏季我国南方地区机场地面条件下 3球温度指数 T_{WBGT} 与 T_{db} 的拟合关系为

$$T_{WBGT} = 0.65 T_{db} + 9.956\,4\ ℃ \qquad (5)$$

夏季我国南方地区机场地面条件下座舱干球温度 T_{cdb} 与 T_{db} 拟合关系为

$$T_{cdb} = 1.261\,4 T_{db} - 6.116\,7\ ℃ \qquad (6)$$

将座舱湿球温度 T_{wb} 代入式(2)得到 T_{wb} 对应的饱和水蒸汽分压力 p_{ws},相应的饱和含湿量为

$$d_{ws} = 622 p_{ws} / (p_b - p_{ws}) \quad \text{g/kgda} \qquad (7)$$

由不饱和湿空气状态至湿球温度下饱和湿空气状态为绝热加湿过程. 座舱内外空气含湿量是相同的, p_v 不变,则座舱中两状态间参数关系为

$$d = [(2\,500 - 2.347 T_{wb}) d_{ws} - 1\,010 (T_{cdb} - T_{wb})] / (2\,500 + 1.84 T_{cdb} - 4.187 T_{wb}) \qquad (8)$$

式中,温度单位均为℃,含湿量单位为 g/kgda

将式(4)、式(6)及式(7)代入式(8),解式(8)可求出 T_{wb}. 根据式(5)拟合的 T_{WBGT} 及式(6)拟合的 T_{cdb},由下式可计算座舱内辐射温度 T_r:

$$T_{WBGT} = 0.7 T_{wb} + 0.2 T_r + 0.1 T_{cdb} \qquad (9)$$

将座舱干球温度 T_{cwb} 代入式(2),得到座舱中空气饱和水蒸汽压力 p_{cs},则座舱内相对湿度为

$$\Phi_c = p_v / p_{cs} \qquad (10)$$

由此得到战斗机地面条件下座舱环境参数: T_{cdb}, T_r 和 Φ_c.

3　热系统模拟

对于"飞行员-夏季飞行基础着装-座舱环境"热系统,在人体与环境的实际热交换过程中,由于皮肤表面汗液的蒸发和向服装织物中的渗透,传热与传质现象是同时存在的. 根据实际情况,本文按人体皮肤表面有显式出汗处理,传热传质过程如图 1所示[3-6]. 着装热平衡方程为

$$\phi_1 + \phi_2 - \phi_v = 0 \qquad (11)$$

由质量平衡方程,着装中液态水量 W 为

$$\frac{dW}{dt} = \psi_1 + \psi_E - \psi_2 \qquad (12)$$

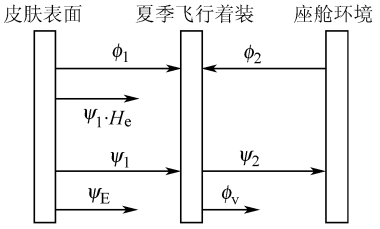
其中

$$\phi_1 = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{I_{cl}} \qquad \phi_2 = \frac{t_a - t_{cl}}{I_a}$$

$$\psi_1 = \frac{C_{sk} - C_{cl}}{J_1} \qquad \psi_2 = \frac{C_{cl} - C_a}{J_2}$$

$$\phi_v = \psi_2 H_e$$

式中,t_{sk} 为人体皮肤表面温度; t_{cl} 为着装外表面温度; t_a 为座舱内气温及辐射温度的加权温度[3]; I_{cl}



ψ_1—人体皮肤表面水汽的质量流率;ψ_2—着装外表面水汽的质量流率;ψ_E—人体皮肤出汗的质量流,取决于人体热调节过程出汗活动情况;ϕ_1—皮肤表面与着装外表面间的导热热流;ϕ_2—座舱热环境与着装间的对流辐射换热热流;ϕ_v—液态水从着装向座舱环境中蒸发所产生的附加热流;H_e—水的汽化潜热.

图 1 人体-夏季飞行基础着装-座舱环境系统传热传质模型

为皮肤表面至着装外表面的传热热阻;I_a为座舱环境与着装表面间的对流辐射换热热阻[3];J_1为人体皮肤表面与着装外表面的质量流阻;J_2为着装外表面与座舱热环境间的质量流阻;C_{sk}为人体皮肤表面的水蒸汽分压;C_{cl}为着装外表面水蒸汽分压;C_a为座舱环境中的水蒸汽分压.

人体皮肤表面热流为

$$\phi_s = \phi_1 + \psi_1 H_e \quad (13)$$

由式(11)~式(13),结合人体热调节系统数学模型[3],可建立"飞行员-夏季飞行基础着装-座舱环境"热系统模拟方法,分析计算在座舱热环境下人体核心温度、平均皮肤温度、平均体温、S以及S_w等各项热生理指标,由式(1)得到C值,从而预测在夏季不同时期气象条件下战斗机飞行员的热应激水平.

4 C值预测试验验证

本文进行了35℃及45℃试验舱温下的人体实验,采用上述建立的"飞行员-夏季飞行基础着装-座舱环境"热系统模拟方法,分析计算两种试验舱温下人体热生理参数变化过程,并与相应的试验结果进行对比,人体皮肤温度以及核心温度变化情况是预测热应激水平的基础数据,45℃舱温时对比结果如图2所示,两种舱温下C值对比结果如表1所示.

图2中,人体平均皮肤温度及核心温度计算与试验结果量值非常接近,变化趋势一致.表1中,35℃舱温时,核心温度降低了0.06℃,是由于该状态下核心温度变化较小,模型计算误差导致,而平均皮肤温度以及平均体温增值计算与试验对比差值很小,量级相近;在45℃舱温条件下核心温度升高较多,核心温度增值的计算结果与试验结果变化趋势一致,且量值接近,平均皮肤温度及$\Delta\bar{T}_b$计算与试验结果接近,偏差在8%左右.

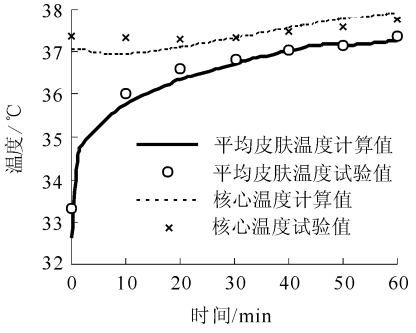


图 2 45℃舱温下人体温度试验验证结果

由于在计算C时,未考虑ΔH_b,计算结果均小于试验结果,但二者相差很小.$C=6.6$为飞行员热应激的安全限[2],未达此限的60%者为轻度热应激,达到该限值60%~95%为中度热应激,超过6.6为重度热应激.表1中两种舱温下热应激预警计算及试验结果均一致.

表 1 C值计算与试验结果对比

60 min 对比结果	35℃舱温		45℃舱温	
	计算结果	试验结果	计算结果	试验结果
平均皮肤温度增值/℃	2.64	3.0±0.4	3.96	4.3±0.2
核心温度增值/℃	-0.06	0.1	0.68	0.5±0.06
$\Delta\bar{T}_b$/℃	1.043	1.2±0.1	1.86	1.72±0.1
S/(kJ·kg^{-1})	3.64	3.99±0.33	6.47	5.96±0.46
S_w/(g·min^{-1})	0.4	4.2±0.78	6.11	10.87±3.6
ΔH_b/(次·min^{-1})		15.8±8.1		39.5±6.5
C	4.72	5.73±0.49	8.96	9.14±0.55
C的对比偏差/%	17.6		1.9	

本文编制了"飞行员-夏季飞行基础着装-座舱环境"热系统计算分析软件,对我国南方某机场夏季某天由早8:00至17:00的战斗机飞行员热应激情况进行预测,C值变化过程如图3.

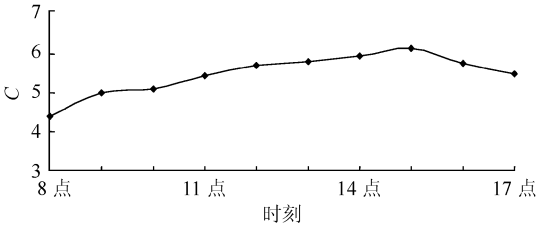


图 3 C值预测曲线

5 结束语

由试验验证可见,计算与试验结果对比偏差均小于20%,本项目预测结果合理可靠,能满足使用要求.本文研究为夏季地面条件下战斗机飞行员的热应激水平提供了方便可靠的预测方法.

(下转第843页)

标的 RCS计算,表明本文方法具有较高的计算速度和准确度.

参考文献 (References)

[1] Volakis J L, Chatteri jee A, Kemple L C. Review of the finite element method for three-dimensional electromaynetic scattering [J]. J Opt Soc A, 1994, 11(4): 1422 - 1433

[2] Rojas R G, AL-hekail Z. Generalized impedance/resistive boundary conditions for electromagnetics scattering problems [J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1988, 36(7): 956 - 970

[3] 阮颖铮. 雷达散射截面与隐身技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 1998: 120 - 125

Ruan Yingzheng. Radar dross section and stealth technique [M]. Beijing: Defence Industry Publication House, 1998: 120 - 125 (in Chinese)

[4] 赵维江. 复杂目标雷达截面计算方法研究 [D]. 西安:电子科技大学电子工程学院, 1999: 49 - 50 (in Chinese)

Zhao Weijiang. Study on prediction techniques of radar cross section of complex targets[D]. Xi'an: School of Electronic and Information Engineering, Xidian University, 1999: 49 - 50 (in Chinese)

[5] Ufimtsev P Y. Method of edge waves in the physical theory of diffraction [M]. Moscow: Soviet Radio Publication House, 1962: 1 - 243

[6] Michaeli A. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation [J]. IEEE Trans Antennas and Propatat, 1984, 32(3): 252 - 258

[7] Youssef N N. Radar cross section of complex targets [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(5): 722 - 732

[8] Mosallaei H, Yahya R S. RCS reduction of canonical targets using genetic algorithm synthesized RAM [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(5): 1594 - 1606

[9] Syed H H, Volakis J L. PTD analysis of impedance structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(7): 983 - 988

(责任编辑:娄　嘉)

(上接第 832页)

参考文献 (References)

[1] 任兆生,薛利豪,石立勇,等. 战斗机地面停放座舱热环境下的热应激测试 [C]//中国航空学会人体工程航医救生专业分会第七届学术交流年会论文集. 北京:中国航空学会人体工程航医救生专业分会, 2006: 219 - 221

Ren Zhaosheng, Xue Lihao, Shi Liyong, et al. Cabin thermal environment heat stress testing when fighter on ground [C]// Proceeding of Seventh Conference on Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering. Beijing: Technical Committee of Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering-CSAA, 2006: 219 - 221 (in Chinese)

[2] 任兆生,石立勇,薛利豪,等. 以冰胶为制冷介质的降温背心冷却效果研究 [C]//中国航空学会人体工程航医救生专业分会第七届学术交流年会论文集. 北京:中国航空学会人体工程航医救生专业分会, 2006: 222 - 227

Ren Zhaosheng, Shi Liyong, Xue Lihao, et al. Study of cooling vest with refrigerant of ice-gum [C]//Proceeding of Seventh Conference on Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering. Beijing: Technical Committee of Human Engineering Aerospace Medicine & Survival Engineering-CSAA, 2006: 222 - 227 (in Chinese)

[3] 邱义芬. 舱外液冷通风服-人体热调节系统的数值模拟与实验研究 [D]. 北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院, 1999

Qiu Yifen. Experimental research and numerical simulation of liquid and ventilation cooling garment and human thermoregulation system for extravehicular activity [D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999 (in Chinese)

[4] 邱义芬,袁修干,梅志光,等. 舱外航天服通风系统传热分析 [J]. 航空学报, 2001, 22(5): 444 - 446

Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Mei Zhiguang, et al. Heat transfer analysis of ventilation system used for EVA [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(5): 444 - 446 (in Chinese)

[5] 邱义芬,袁修干,梅志光,等. 舱外航天液冷服传热分析 [J]. 航天医学与医学工程, 2001, 14(5): 364 - 367

Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Mei Zhiguang, et al. Heat transfer analysis of liquid cooling garment used for extravehicular activity [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2001, 14(5): 364 - 367 (in Chinese)

[6] Lotens W A, Havenith G. Effects of moisture absorption in clothing on the human heat balance [J]. Ergonomics, 1995, 38(6): 1092 - 1113

(责任编辑:刘登敏)