基于人体模型的舱外航天服热系统分析与计算

邱义芬 陈拥华 袁修干

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 分析了舱外航天服空间换热的特点,对"空间环境-舱外航天服-人体"热系统进行了传热分析,利用 Visual C++ 6.0 及 OpenGL 技术进行了三维人体模型的构造,对人体体表温度的计算结果进行了三维图形显示. 结合人体热调节模型建立了"空间环境-舱外航天服-人体"热系统仿真技术,分析了航天员在不同代谢模式、被动热防护状态及液冷、通风系统控制情况下的热状态,确定了各代谢活动水平下航天员达到舒适状态时液冷、通风系统的工作条件,利用暖体假人试验结果对系统仿真进行了验证,结果表明二者吻合很好,本项目具有很好的工程应用价值.

关 键 词: 舱外航天服; 仿真技术; 舱外活动; 人体热调节模型; 代谢水平

中图分类号: V 445.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0167-04

Thermal system analysis and calculation for extravehicular spacesuit based on human body model

Qiu Yifen Chen Yonghua Yuan Xiugan

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The characteristic of space heat exchange was introduced for extravehicular spacesuit, the heat transfer process of the thermal system was analyzed among space environment, extravehicular spacesuit and the human body, and with the help of Visual C++ 6.0 and OpenGL a three-dimension human body model was developed in which the computing results about human body surface temperature were displayed. Simulation technique of the thermal system was established with the combination of human body thermal regulation model, it was used to analyze human body thermal state under various metabolic rate, passive thermal protection conditions of spacesuit and the control of liquid-cooling and ventilation system. So the technique was used to determine the work conditions about liquid-cooling and ventilation system to assure the human bodies comfort state. Simulation results were verified by the thermal Manikin test, this issue is of important value in engineering application.

Key words: extravehicular spacesuit; simulation technique; EVA; human body thermal regulation model; metabolic level

航天员出舱活动时,活动水平差别很大,航天服与空间环境的换热也很复杂,舱外航天服热设计应满足在各种代谢条件下,航天员热生理指标在舒适范围内. 首先应合理确定航天服被动热防护性能,将空间热流控制在一定范围内;航天服内热环境主要由主动热防护方式控制,大部分热负荷如航天员代谢产热、空间环境传热等由液冷服带走,在一定空间环境及航天服被动热防护性能条件下,需研究随航天员活动水平变化液冷服的工作状况.

收稿日期: 2005-01-10

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA743033)

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

本文通过建立“空间环境-舱外航天服-人体”热系统仿真技术,研究舱外航天服的被动、主动热防护性能,为舱外航天服的热设计及其热控系统设计提供依据.

1 “空间环境-舱外航天服-人体”热系统分析

1.1 舱外航天服空间换热

舱外活动中,航天服与空间环境间主要是辐射换热,换热过程如图 1 所示. 在近地轨道上,空间外热流[1]主要包括:太阳辐射热流 q_1、地球红外辐射热流 q_{3e}、地球反照热流 q_{2e}、飞船红外辐射热流 q_{3k}以及飞船反照热流 q_{2k};航天服自身向周围环境辐射热流 q_{ck}. 由于航天服、太阳、地球、飞船之间的相对位置经常发生变化,因此航天服所吸收的空间外热流也随之发生变化.

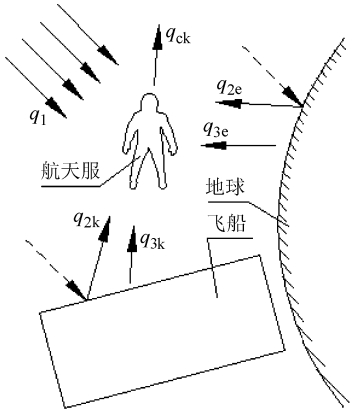


图 1 舱外航天服空间环境辐射换热

舱外航天服空间热流为

$$q_1 + q_{2e} + q_{3e} + q_{2k} + q_{3k} - q_{ck} = \frac{\lambda}{\delta}F_{ck}(T_2 - T_1)$$

方程右项为通过航天服真空屏蔽绝热层传热量,λ 为绝热层导热系数;δ 为绝热层厚度;F_{ck}为航天服表面积;T_1 及 T_2 分别为航天服壳体内、外表面的绝对温度.

1.2 热系统传热模型

针对热系统设计目标,在满足工程实际要求的前提下,取一覆盖有液冷、通风系统的节段为研究对象,其传热过程如图 2 所示[2]. 图中 I_4 为航天服壳体导热热阻,Q_{NPi}为传入 i 节段壳体的空间热流,取航天服壳体吸热时为正值.

1.2.1 航天服壳体外表面温度的计算

空间热流通过航天服真空屏蔽绝热层传入服装内,航天服壳体内表面温度可近似为通风气体进出口温度的平均值,传入航天服的空间热流计

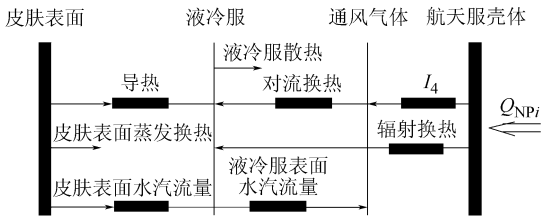


图 2 “空间环境-舱外航天服-人体”热系统传热过程

算如下. 其中 T_{Va}为 i 节段气体进出口平均温度.

$$Q_{NPi} = \frac{T_2 - T_{Va}}{I_4} \tag{1}$$

1.2.2 通风系统传热分析

以通风气体为研究对象,在气体流动截面上取一微元体 dx,导入微元的热量有:基础服装的传热量、液冷服换热管路的传热量以及空间热流. 这里假设冷却液体以进口温度与通风气体进行热交换. 微元热平衡方程[3]为

$$M_V\rho_V c_{pV}dT_V = [\pi(d_i - \eta D_L N_i)\cdot \alpha_V(T_{clL} - T_V) + \pi(1-\eta)D_L N_i\alpha_V(T_{Lin} - T_V)]\cdot dx + \frac{T_2 - T_V}{I_4 + I_{Vo}}dx \tag{2}$$

式中,M_V 为通风气体体积流量;ρ 为通风气体密度;c_{pV}为通风气体比热容;T_V 为通风气体绝对温度;d_i 为通风间隙内壁当量直径;D_L 为冷却管管径;T_{clL}为基础服装外表面绝对温度;T_{Lin}为液冷服冷却液体绝对入口温度;η 为冷却管路与基础服装换热的面积系数;N_i 为节段止液冷服冷却管路数量;I_{Vo}为节段单位长度的热阻;α_V 为平均对流换热系数. 解此微分方程可以求出每一节段出口处气体温度.

对于没有液冷系统,只有通风系统的节段,微元热平衡方程为

$$M_V\rho_V c_{pV}dT_V = \pi d_i\alpha_V(T_{sk} - T_V)dx + \frac{T_2 - T_V}{I_4 + I_{Vo}}dx \tag{3}$$

式中,T_{sk}为皮肤表面温度.

1.2.3 液冷服换热管路网传热分析

液冷服换热管路网缝在基础服装上,并不直接接触人体皮肤,人体与液冷服的换热是通过皮肤→基础服装→换热管路网来实现的. 根据这一结构特点,液冷服换热管路网的换热可分为两部分:与通风气体的换热和与基础服装的换热. 以冷却液体为研究对象,在流通截面上取一微元体 dx,其热平衡方程[4]为

$$M_L\rho_L c_{pL}dT_L = \pi\eta u_{cl}D_L(T_{clL} - T_L)dx + \pi u_V D_L(1-\eta)(T_{Va} - T_L)dx \tag{4}$$

式中,M_L 为节段冷却液体流量;ρ_L 为冷却液体密度;c_{pL}为冷却液体比热容;u_{cl}为冷却液体与基础服装间的换热系数;u_V 为冷却液体与通风气体间的换热系数;T_L 为冷却液体温度. 解此微分方程即可求出冷却液体在节段出口处的温度 T_{Lout}.

通过空间换热、液冷、通风系统传热过程分析,结合人体热调节模型可建立"空间环境-舱外航天服-人体"热系统分析方法. 根据该方法编制了热分析软件,通过各种参数包括人体参数、液冷服工作参数、通风系统参数、舱外航天服空间换热参数以及计算初始状态参数的输入,对人体在这种复杂热边界条件下的热调节过程进行有限元数值求解,模拟人体热调节过程,分析一定代谢模式、被动热防护状态、液冷服控制情况下航天员的热状态,从而对整个热系统进行评价,以建立舱外航天服热仿真技术.

2　仿真结果图形显示

热系统仿真技术设置了空间环境、舱外航天服被动及主动热防护性能的数据接口,并采用图形显示方式分析系统仿真结果,即建立三维人体模型,将人体表面皮肤温度计算结果显示在三维人体图形中,增强热系统仿真技术的人机交互性能,从而使人体热调节模型得到工程化应用.

本文利用 Microsoft Visual C++6.0 软件开发平台,结合 OpenGL,建立三维人体模型[5]. 根据人体热调节过程的模拟将人体划分为 15 节段[2]. 为建模的方便,对于人体的每一节段建立一个局部坐标系. 在建模的过程中,采用了实体建模的方法,将人体的每个基本部分(如头、颈、躯干、大腿等)进行了简化,四肢部分分别用大小不等、长度不同的圆台代替;连接不同部分之间的关节分别用圆球体来表示. 为了增强人体模型的真实感程度,本模型把躯干部分分成 3 段,即:胸部、腰部、臀部,任一截面的形状如图 3 所示,它是由两个半径相等的圆拼接而成,外围实线代表此截面的轮廓线.

采用国家军用标准《GJB4856-2003 中国男性飞行员人体尺寸》中的数据,建立了 50% 三维人体模型. 将热系统温度仿真结果以不同颜色显示于人体各个节段.

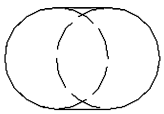


图 3　躯干任一截面的形状

3　计算结果分析与讨论

本文首先对俄罗斯和平号轨道站的舱外航天服(Orlan-DMA)与美国航天飞机舱外航天服(Shuttle EMU)的被动热防护性能进行分析计算. 根据两种航天服的计算参数包括太阳吸收率、表面辐射率和空间热流[6],对两种航天服壳体外表面温度和壳体导热系数分别进行计算,计算时服装内通风气体温度取 20℃.

根据航天服表面热平衡原理,则有

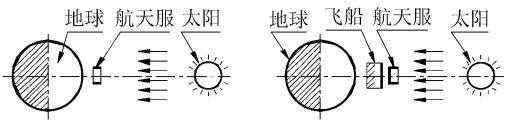
$$q_1 + q_{2e} + q_{2k} + q_{3e} + q_{3k} - \varepsilon\sigma T_2^4 = Q/F_{ck} \quad (5)$$

式中,ε 为航天服表面辐射率;σ 为玻尔兹曼常数;Q 为空间热流;F_{ck}为航天服外表面积. 根据式(5)可以求得航天服外表面温度 T_2,然后再根据式(1)即可求出壳体导热系数 λ. 美国航天飞机舱外航天服的计算结果如表 1 所示,表中"+"表示航天服得热量,"-"表示航天服漏热量. 参照两种航天服计算结果,本文计算时真空屏蔽绝热层当量导热系数取 $\lambda = 300\times10^{-5}$ W/(m·℃).

表 1　美国航天飞机舱外航天服(Shuttle EMU)被动热防护性能参数

太阳热吸收率 α_s	辐射率 ε	空间热流/W	壳体外表面温度/K	壳体导热系数/(10^{-5}W·(m·K)$^{-1}$)
0.18	0.84	+88	321.02	367.71
		-130	187.48	143.2

这里针对舱外航天服最大得热状态进行讨论计算. 空间相对位置关系如图 4 所示. 本文假设飞船表面温度较高(390 K),并且飞船距离航天服很近,在此条件下最大热流应发生在图 4b 位置,本文即针对图 4b 位置进行计算.



a　最大热流可能位置关系 1　b　最大热流可能位置关系 2

图 4　航天服、飞船、地球及太阳的相对位置

由舱外活动情况选取四种人体代谢计算状态:150 W(状态 1)、200 W(状态 2)、250 W(状态 3)及 300 W(状态 4). 根据飞船及舱外航天服表面辐射条件,对图 4 所示情况下"空间环境-舱外航天服-人体"热系统进行仿真,计算在满足人体热生理指标达到舒适条件下,液冷服的工作参数. 通过计算,液冷服冷却液体流量对人体温度等热生理指标的变化影响不明显,而入口温度的影响很大,因此各状态计算时取同一冷却液体流量 80 L/h. 通风系统气体流量取 100 L/min. 液冷通风系统温度计算结果如表 2 所示,人体体表平均皮

肤温度变化如图 5 所示.

表 2 液冷通风系统温度计算结果 ℃

状态	液冷服		通风系统		
序号	入口温度	出口温度	入口温度	上肢出口温度	下肢出口温度
1	21	23.51	26	34.75	36.49
2	19	22.01	24	34.49	36.85
3	15	18.71	20	33.04	36.16
4	11	15.36	10	31.19	36.47

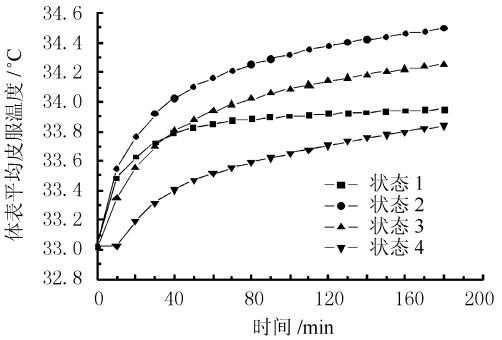


图 5 四种状态下的体表平均皮肤温度

暖体假人穿着液冷服试验结果[7]如表 3 所示. 为将计算与试验结果进行对比,本文计算了对人体只着液冷服时热状态,人体代谢量分别为 324.0 W、273.4 W、227.8 W、175.0 W 以及 127.0 W 五个状态,结果如表 4 所示.

表 3 暖体假人试验结果

状态序号	舱内环境温度/℃	液体流量/(L·h^{-1})	暖体假人代谢率/W	液冷服入口温度/℃	液冷服换热量/W	平均皮肤温度/℃
1	31.8	80	324.0	14.3	286.0	32.31
2	31.9	80	273.4	13.4	270	29.66
3	32.1	80	227.8	17.2	214.6	30.82
4	32.0	80	175.0	15.2	177	27.18
5	32.1	80	127.0	19.4	121	28.80

表 4 只着液冷服计算结果

状态序号	外界环境温度/℃	液体流量/(L·h^{-1})	人体代谢率/W	液冷服入口温度/℃	液冷服换热量/W	平均皮肤温度/℃
1	35.0	80	319.164	12.0	372.970	33.933
2	35.0	80	269.576	15.0	309.242	33.596
3	35.0	80	224.888	18.5	255.461	34.367
4	35.0	80	176.780	23.0	214.723	34.821
5	35.0	80	131.586	25.5	172.654	34.998

对比表 2、表 3 及表 4,计算与暖体假人试验结果中液冷服入口温度随代谢产热的变化趋势一致,且量值比较接近. 代谢产热为 150 W、200 W 及 250 W 时,表 2 计算值比暖体假人试验值偏高,因这几种状态下暖体假人平均皮肤温度很低,在 27.18 ~ 29.66℃左右,而计算时则是按人体皮肤温度 33 ~ 34℃左右考虑;代谢产热为 300 W 时,液冷服入口温度计算结果比暖体假人试验值偏低,这是由于暖体假人试验时环境温度比较接近人体皮肤温度,而本文计算中,空间环境向航天服内传入热流在 100 W 以上,必将增大液冷服的热负荷,要维持人体皮肤温度在舒适范围内,必须降低液冷服入口温度. 可见二者差别的主要原因是:①热系统差异,假人穿着液冷服直接暴露在地面热环境中;②人体平均皮肤温度不同;③液冷服热负荷不同;④系统热平衡状态有差异.

综上可见,所建仿真技术计算精度较高. 分析结果可为舱外航天服热设计提供依据,本项目具有很好的工程应用价值.

参考文献(**References**)

[1] 邱义芬,陈拥华,袁修干,等. 舱外航天服的轨道空间外热流计算方法[J]. 航空学报,2004,25(3):221 ~ 224
Qiu Yifen, Chen Yonghua, Yuan Xiugan, *et al*. A method of calculating external heat flux on spacesuit used for EVA[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(3): 221 ~ 224 (in Chinese)

[2] 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:北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系,1999
Qiu Yifen. Experimental research and numerical simulation of liquid and ventilation cooling garment and human thermoregulation system for extravehicular activity[D]. Beijing: Department of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999 (in Chinese)

[3] 邱义芬,袁修干,梅志光. 舱外航天通风系统传热分析[J]. 航空学报,2001,22(5):444 ~ 446
Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Mei Zhiguang. Heat transfer analysis of ventilation system used for EVA[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(5): 444 ~ 446 (in Chinese)

[4] 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 EVA[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2001, 14(5): 364 ~ 367 (in Chinese)

[5] 顾文艳,宋正河,毛恩荣. 人机界面虚拟设计中三维人体模型的构造[J]. 中国农业大学学报,2001,6(6):85 ~ 88
Gu Wenyan, Song Zhenghe, Mao Enrong. A constructing method of human body 3D model for virtual design of human-machine interface[J]. Journal of Agricultural University, 2001, 6(6): 85 ~ 88 (in Chinese)

[6] Sulzman F M, Genin A M. Space biology and medicine, volume Ⅱ: life support and habitability[M]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994. 279 ~ 298

[7] 张万欣. 舱外航天服液冷服散热特性研究[D]. 北京:北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系,2000.
Zhang Wanxin. Heat transfer research on liquid cooling garments for extravehicular spacesuit[D]. Beijing: Department of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000 (in Chinese)