

文章编号:1000-6893(2002)05-0411-05

特异热环境下人体热调节的生物传热学问题

袁修干, 邱义芬

(北京航空航天大学 505 教研室,北京 100083)

BIOLOGICAL HEAT TRANSFER PROBLEMS OF HUMAN THERMAL RETULATION SYSTEM IN EXTREME THERMAL ENVIRONMENT

YUAN Xiur-gan, QIU Yi-fen

(Faculty 505, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 分析了影响人体热调节的航空航天特异热环境因素,着重讨论了该环境下人体热调节仿真的生物传热学问题。文中给出了人体血液换热、热/振动复合环境下的生物热方程、着装主动热控功能的传热边界条件问题等的研究结果,并提出今后应关注微重力环境对人体热调节影响研究的建议。

关键词: 人体热调节;生物传热学;人体血液换热;振动;液冷服;通风;失重环境

中图分类号: V444.3 **文献标识码:** A

Abstract: The factors affecting the performance of human thermal regulation system in extreme thermal environment are analysed. Meanwhile, biological heat transfer problems concerning human thermal regulation simulation are studied. We obtain the results on human blood heat transfer, biological governing equations under the heat/vibration conditions, the heat transfer boundary conditions of clothes with active thermal control and so on. Based on the results, we suggest to focus the effort on the human thermal regulation system under micro-gravity condition in future studies.

Key words: human thermal regulation system; biological heat transfer; human blood heat transfer; vibration; liquid cooling garment; ventilation; micro-gravity condition

1 特异热环境下的人体热调节

人体热调节是复杂负反馈控制系统,如图 1 所示,图中, T_c 为核心温度, T_s 为皮肤温度, T_0 为基准温度(调定点:核心温度 -37.0 ; 皮肤温度 -33.3)。整个系统分为两部分:控制系统和受控对象,前者指参与体温调节的神经系统,主要是调节中枢(控制器)及温度感受器;后者主要是效应器。该系统中,控制量为体温,包括核心温度和皮肤温度,温度感受器将感受到的信号最终集中到体温调节中枢进行处理,然后驱动相应的效应器工作,产生生理性体温调节反应。

在航空航天领域,存在各种特异热环境。例如,冷热宽温度范围的非均匀热环境;热/振动的复合工作环境;微重力环境;具有主动热控着装的复杂传热边界条件问题等。研究上述特异热环境下的人体热调节的生物传热学问题,是改善宇航

空间人体热调节系统仿真效果的关键。

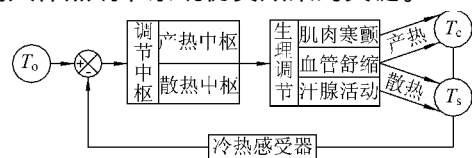


图 1 人体热调节负反馈控制系统

Fig. 1 The negative feedback control system of human thermal regulation

解决非均匀热环境的人体热调节仿真的基本途径是采用多节段二维人体生物热方程。通常将人体划分为 15 个节段,即头、颈、躯干、上臂(左右各 1 个)、前臂(左右各 1 个)、手(左右各 1 个)、大腿(左右各 1 个)、小腿(左右各 1 个)、足(左右各 1 个)。15 个节段都抽象成圆柱体,每一个节段进一步分成 4 个同心层:核心层、肌肉层、脂肪层、皮肤层。圆柱体以二维(周向、径向)建立其热平衡方程,即人体生物热方程为^[1-3]

$$C(\partial T/\partial t) = \nabla(\nabla T) + m_b C_b(T_a - T) + q_m - q_b \quad (1)$$

式中: T 为人体各层组织温度; ρ 为人体各层组织的密度; C 为人体各层组织的比热; m_b 为人体各层

组织的导热系数; m_b 为组织中的血液流量; C_b 为血液的比热; q_m 为组织的新陈代谢产热; q_b 为人体由于呼吸产生的热交换; T_a 为动脉血液温度。

人体生物热方程的边界条件为

$$-\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) = q_c + q_r + q_e \quad (2)$$

式中: n 为皮肤表面的法向矢量; q_c 为皮肤表面与外界的对流换热; q_r 为皮肤表面与外界辐射换热; q_e 为皮肤表面与外界蒸发换热。

人体的热状态由温度感受器、控制器及效应器构成的生物控制系统进行控制。控制系统效应器输出的一般形式可写成^[1-3]

$$F = F(T_c, T_s, T_o, X, K, F_{\min}) \quad (3)$$

式中: F 为效应器输出, 血管生理调节的输出为血量, 汗腺生理调节输出为出汗量, 肌肉寒颤/颤抖生理调节输出为产热量; T_c, T_s 分别为体中心

和皮肤温度; T_o 为调定温度; X 为空间位置; K 为增益系数; F_{\min} 为 F 的生理调节最小值。

本文将特异热环境下人体热调节的生物传热学问题归为以下3个问题进行讨论:(1)人体血液换热问题;(2)热/振动复合环境中控制系统数学模型;(3)着装有关主动热控功能时的传热边界条件。

2 人体血液换热数学模型

由于人体热调节生理机制的复杂性, 使对冷环境或热环境适合的人体特调节数学模型, 分别用于热环境或冷环境时存在较大的计算误差, 如何建立冷热宽温度范围均有满意计算结果的数学模型是人们期待解决的问题。经研究, 人体血液换热模型的正确建立是解决该问题的关键^[3]。图2是以大腿 小腿 足为例的血液换热模型示意图。

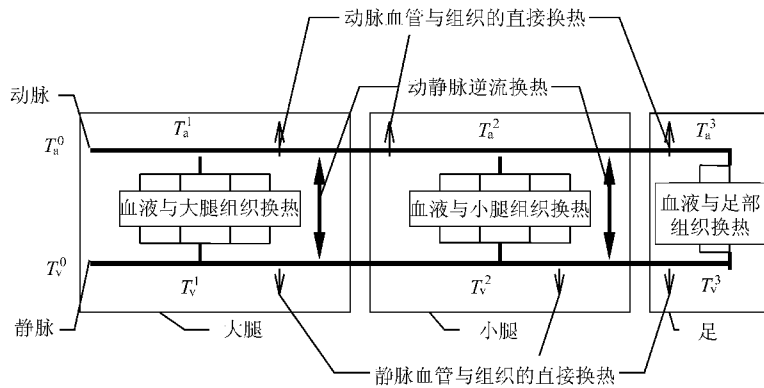


图2 血液换热模型(以大腿 小腿 足为例)

Fig. 2 The model of blood heat exchange(thigh calf foot)

动静脉血管与节段核心组织的换热可用下式表示

$$Q_{vc}^i = h_B \cdot \int_0^{L^i} D^i (T_v^i - T_c^i) J dx \quad (4)$$

$$Q_{ac}^i = h_B \cdot \int_0^{L^i} D^i (T_a^i - T_c^i) J dx \quad (5)$$

式中: Q_{ac}^i 为节段 i 中动脉血管与节段核心组织的直接换热; Q_{vc}^i 为节段 i 中静脉血管与节段核心组织的直接换热; h_B 为动脉或静脉血管与节段核心组织的直接换热系数; D^i 为 i 节段中动脉或静脉血管的直径; L^i 为 i 节段中动脉或静脉血管的长度; T_a^i 为 i 节段中动脉血液温度, 是血管长度方向的空间位置函数; T_v^i 为 i 节段中静脉血液温度, 是血管长度方向的空间位置函数; T_c^i 为 i 节段中核心层组织温度, J 为面积比例系数。

动脉与静脉血管之间的逆流换热表达式为

$$Q_{av}^i = h_{BC} \int_0^{L^i} D^i (1 - \dots) (T_a - T_v) J dx \quad (6)$$

式中: Q_{av}^i 为节段 i 中动脉血管与静脉血管的逆流换热; h_{BC} 为动脉或静脉血管的逆流换热系数; T_a 为动脉血液温度; T_v 为静脉血液温度。

用以上方程建立人体各节段的能量和质量守恒方程, 最终得出的流回中央血液的静脉温度和中央血液能量平衡方程

$$T_v = \frac{\sum_{i=1}^6 (T_{vi} m_i)}{m_b} \quad (7)$$

$$M_b C_b \frac{dT_b}{dt} = m_b C_b (T_a - T_v) \quad (8)$$

式中: T_v 为静脉流回中央血液的温度; T_{vi} ($i = 1 \sim 4$) 为静脉从四肢流回躯干的血液温度; m_i ($i = 1 \sim 4$) 为静脉从四肢流回躯干的血液流量; T_{vi} ($i = 5$) 为静脉从颈部流回躯干的血液温度; m_i ($i =$

5) 为静脉从颈部流回躯干的血液流量; $T_{vi} (i = 6)$ 为静脉从躯干流回中央血液的温度; $m_i (i = 6)$ 为静脉从躯干流回中央血液的血液流量; m_b 为中央血液流向组织血液总的流量; M_b 为人体血液的总质量; T_b 为中央血液的温度; T_a 为中央血液流向组织的动脉血液温度。

用以上方程可改善人体生物热方程的仿真效果和计算精度(见图 3), 使人体热调节数学模型在冷热宽温度范围内均有良好的适应性, 改变以往人体热调节数学模型只能在冷或热单一环境中良好仿真效果的不足^[3]。

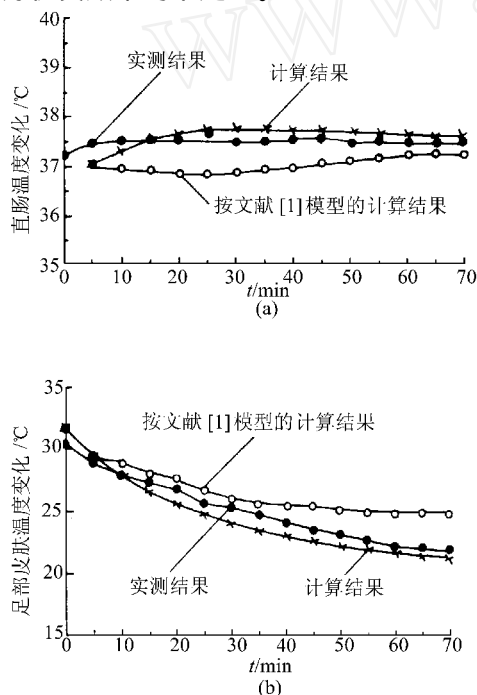


图 3 12 环境温度下 70min 直肠温度、足部皮肤温度变化
Fig. 3 The skin temperature change of rectum and foot in 12 environmental temperature

3 热/ 振动复合环境的生物热控制方程

热/ 振动复合环境对人体热调节有显著的影响^[4,5]。振动引起体表血流量减少, 降低了人体热调节能力; 热/ 振动复合环境与相同单一热环境相比, 其体中心温度偏高, 而皮肤温度偏低。经研究, 考虑热/ 振动复合环境影响后, 适用于与单一热环境的生物热控制方程需加以修改, 控制系统效应器输出方程应变为^[5]

$$F = F(T_c, T_s, T_0, X, K_{vib} K, F_{min}) \quad (9)$$

式中: K_{vib} 为热/ 振动复合环境下考虑振动影响后增益 K 的修正系数^[5]; 对于血管生理活动, 因振动引起血管收缩而减小体表血流量, 有 $K_{vib,b} < 1$; 对于振动引起人体组织颤振的效应器输出则使

代谢热增加, 有 $K_{vib,m} > 1$ 。

图 4 为效应器输出方程修改后热/ 振动复合环境人体温度仿真与实验结果的对比曲线(图(a)), 图中同时给出单一热环境下人体温度的仿真和实验结果(图(b))。

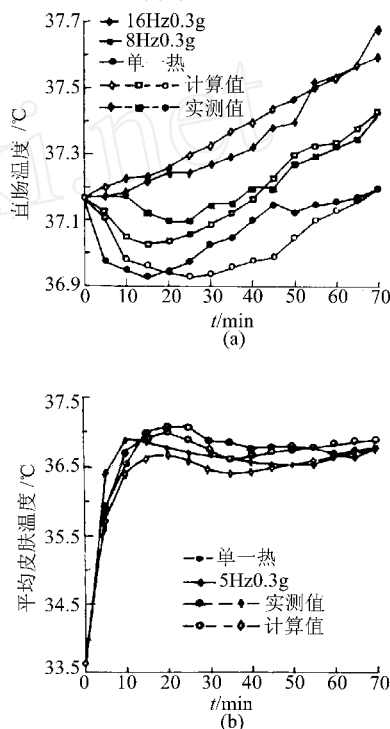


图 4 体中心温度(直肠温度)、平均皮肤温度的计算结果与实验结果的比较^[5]

Fig. 4 The comparison of center and average skin temperature, calculation result and experiment

4 着装具有主动热控功能时的传热边界条件

方程(2)中的 q_c, q_r, q_e , 按计算复杂大小程度排序为: 有主动热控功能的着装、无主动热控功能的一般着装以及裸体人。舱外航天服为一有主动热控功能的着装, 具有复杂传热边界条件, 传热构成: (1) 内衣-液冷服-通风结构-气密层-保温及防微流星层(真空屏蔽层)-外层, 后三者共同构成气密保温层, 通风结构固定在气密保温层上; (2) 人体-液冷通风系统、环境间的热交换是一个传热传质过程, 人体皮肤表面汗液蒸发并向服装织物中渗透, 当液冷服表面温度较低时, 通风气体中的水蒸汽有可能在液冷服表面凝结。以下将其分为三种传热边界情况进行处理^[6]。

(1) 人体皮肤表面无显式出汗, 且基础服装中无液态水凝结。

模型如图 5 所示。图中, I_1 为液冷服基础服装导热热阻; I_2 为通风气体与液冷服基础服装间

的对流换热热阻; I_3 为气密保温层内侧与液冷服基础服装间的辐射换热热阻; J_1 为人体皮肤表面与液冷服基础服装外表面之间的质量流阻; J_2 为液冷服基础服装外表面与通风气体之间的质量流阻; H_c 为水的汽化潜热; ψ_1 为人体皮肤表面水汽的质量流率; ψ_2 为液冷服基础服装外表面水汽的质量流率; ϕ_1 为皮肤表面与液冷服基础服装外表面间的导热热流; ϕ_2 为通风气体与液冷服基础服装间的对流换热热流; ϕ_3 为气密保温层内表面与液冷服基础服装间的辐射换热热流; ϕ_4 为液冷服换热管路传出的热流。

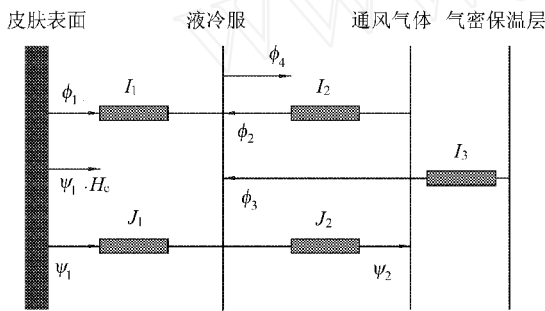


图5 情况(1)下液冷通风系统传热传质过程示意图

Fig. 5 The heat and mass transfer diagrammatic sketch for the liquid and ventilation cooling in condition (1)

(2) 体皮肤表面无显式出汗, 基础服装中有液态水凝结。

模型如图6所示。图中 ϕ_5 为水蒸气在服装中凝结所产生的附加热流, $\phi_5 = \psi_3 H_c$; ψ_3 为水蒸气凝结的质量流。

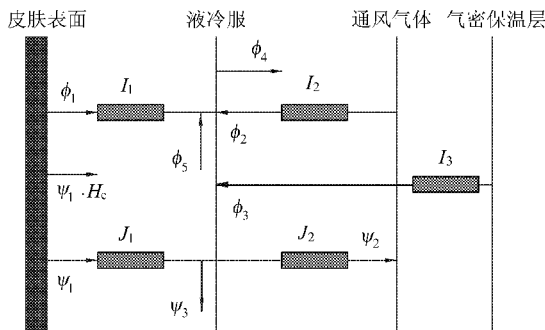


图6 情况(2)下液冷通风系统传热传质过程示意图

Fig. 6 The heat and mass transfer diagrammatic sketch for the liquid and ventilation cooling in condition (2)

(3) 体皮肤表面出现显式出汗。

模型如图7所示。图中 ϕ_v 为液态水从服装向通风服内环境中蒸发所产生的附加热流, $\phi_v = \psi_E H_c$; ψ_E 为人体皮肤出汗的质量流。以液冷服基础服装为研究对象, 求解其热平衡方程及质量平衡方程可求出 ϕ_1 及 ψ_1 , 从而得到人体皮肤表面的总热流 $\phi_{sk} = \phi_1 + \psi_1 H_c$ 。据此与人体热

调节模型相结合建立液冷通风条件下的人体热调节系统数学模型, 以用于航天服的热设计。

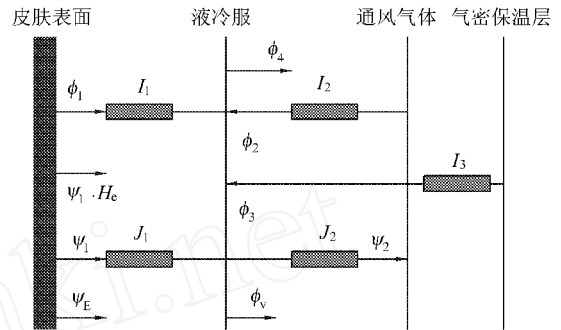


图7 情况(3)下人体、液冷通风系统、环境传热传质过程

Fig. 7 The heat and mass transfer diagrammatic sketch for human, liquid and ventilation cooling and environment in condition (3)

5 讨论

(1) 冷热宽温度范围的非均匀热环境、热/振动的复合工作环境、着装具有主动热控功能时的传热边界条件等人体生物传热学问题得到了较好的解决, 有待今后在实际应用中进一步扩充、完善和发展。

(2) 今后应重视微重力环境对人体热调节影响的研究。现有研究表明, 航天微重力环境对人体热调节系统有着显著的影响, 即: 微重力环境下人的肢体温度降低、躯干温度升高、出汗率降低、血液传递热量功能减少、人体热调节能力降低; 流体静压消失导致体液头向转移、细胞内外液体积及其电解质浓度变化是引起上述变化的主要原因^[7]。将现有研究结果变为实际应用, 尚待人们付出努力。

参考文献

[1] 沙斌. 非均匀热环境中人体温度分布的数值计算及实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1991.
(Sha B. Experimental research and numerical simulation of human temperature distribution in nonuniform hot environment [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1991.)

[2] 徐向东, 袁修干, 杨春信. 冷环境中人体热调节的数学模拟与研究[J]. 航空学报, 1995, 16(1): 1-6.
(Xu X D, Yuan X G, Yang C X. Numerical simulation and investigation of human thermoregulation in cold environment [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1995, 16(1): 1-6.)

[3] 操作, 林贵平, 袁修干. 人体热调节系统中血液换热的数值研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(5): 581-585.
(Cao Z, Lin G P, Yuan X G. Numerical research on blood heat transfer of human thermal regulation system [J]. Journal

of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1997, 23(5):581 - 585.)

- [4] Spaul A W. Physiological effects of simultaneous exposure to heat and vibration [D]. Barkely University of California, 1983.
- [5] 席天笑,沙斌,袁修干. 热和振动复合环境中人体热调节的数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(5):575 - 580.
(Xi T X, Sha B, Yuan X G. Numerical simulation of human thermoregulation simultaneous exposure to heat and vibration [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1997, 23(5):575 - 580.)
- [6] 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 Y F, Yuan X G, Mei Z G, *et al.* Heat transfer analysis of liquid cooling garment used for extravehicular activity [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2001, 14(5):364 - 367.)
- [7] 邱曼. -6°头地位卧床条件下人体皮肤温度分布的研究 [D]. 北京:北京航空航天大学, 2001.
(Qiu M. The human skin temperature distribution study of -6° head down bedrest [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.)

作者简介:



袁修干(1934 -) 男,浙江省嵊县人,工学博士(RWTH Aachen),北京航空航天大学教授、博士生导师、人机与环境工程学科博士点创建者。北航人机环境系统工程/空调制冷技术研究所所长。兼任全军总装备部武器装备人机环境系统工程标准化技术委员会副主任、全军总装备部武器装备人机环境系统工程专家组顾问、中国航空学会理事、中国航空学会人体工程/航医/救生专业分会主任、中国系统工程学会人机环境系统工程专业委员会副主任。研究领域为:航空航天环境控制及生命保障系统、人机环境系统计算机仿真、空调制冷技术等。至今发表论文 120 多篇,出版专著 8 部。曾获科技进步奖国家级一项、省部级 16 项,国家专利二项。享受国家政府特殊津贴。



邱义芬(1969 -) 女,讲师,工学博士。研究兴趣:航空航天环境控制及生命保障系统、航空救生装备、空调制冷技术等。电话:(010)82317505(O)、(010)82315735(H)。

(责任编辑:吴小勇)