

文章编号: 1000-6893(2001) 05-0406-05

舱外航天服手套加热方案探讨

丁 立, 袁修干

(北京航空航天大学 505 教研室, 北京 100083)

RESEARCH OF EMU GLOVE ACTIVE HEATING SYSTEM

DING Li, YUAN Xiu-gan

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

摘 要: 针对舱外作业中航天员常常因手冷而不得不提前回舱的情况, 提出了主动加热的方法。利用边界元法以边界点上未知函数满足积分方程为基础进行近似计算的特点, 建立了手部和舱外航天服手套温度场三维计算模型, 通过模拟试验验证了模型。模型针对航天员处于太阳和地球辐射阴面时提出了舱外航天服手套主动加热的优化方案, 并通过模拟试验验证加热方法合理。

关键词: 边界元法; 手指; 温度场; 加热器

中图分类号: V 444.3⁺6 文献标识码: A

Abstract: An active heated gloves method was brought forward to develop space suit assembly(SSA) gloves of astronauts who often have to come back to the vehicle for the chilled hand during an extravehicular activity (EVA). The boundary element method(BEM) was utilized to make calculation simple and to get a three-dimensional temperature field easily, since it has one characteristic that the approximate calculation is only based on unknown functions on the dots of the boundary fulfilling integral calculus equations. The temperature field model of finger and EVA spacesuit glove was proved through experiment. An optimal heated scheme, which was proved by the experiment of a heated stimulant glove, was supplied to deal with the chilled hand during EVA shadowed from the sun and the earth.

Key words: boundary element method; finger; temperature field; electrical heater

舱外航天服手套是航天员出舱活动装备的重要组成部分, 由于手套须保证手动作业工效要求, 且具有抗打击、气密、抗辐射等功能, 使得其保温效果始终得不到满意的解决。近年来出舱作业航天员有时因手/足太冷而不得不提前回舱^[1,2]。通过对手套某些部位主动温控加热是解决航天员关于手指过冷问题的有效方法之一^[1~3]。

舱外航天服手套一般分 3 层, 从里到外是: 气密层、限制层和 TMG(Thermal Micrometeoroid Garment) 层。气密层主要是防止服内气体泄露, 服内是纯氧。加热器不能放在气密层内, 因为一旦加热器出现火花或短路, 易于引起火灾。限制层的作用是有效约束手套内的气压膨胀, 保持手套适体和灵活性。加热器放在气密层与限制层之间, 摩擦较大, 易损坏加热器。TMG 层又由防热层和防护层构成, 防热层主要是防止热量散失或过多热量流入, 防护层起到耐磨和防微陨石等作用。加热

器放在限制层和防热层之间危险最小, 同样能对航天员提供较好的加热, 且易于更换。由于不能影响航天员的触觉和手动作业^[2]及在生理上脂肪组织多在手掌^[4], 故加热器应安放在手套指背部。

航天员出舱活动可长达 8h, 因航天员携带的电源供加热的能量有限, 需尽可能地有效利用。为此可从如下两方面来考虑。

(1) 手和手套的温度模型 人体手部温度场采用 Pennes 方程^[5]描述。

$$\rho c \partial T^* / \partial \tau = k \nabla^2 T^* + Q_m + W_{bc}(T_a^* - T^*) \quad (1)$$

式中: T^* 为组织温度, 单位 K; W 为血液灌流率, 单位为 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; Q_m 为生物体内单位体积产热, 单位为 W/m^3 ; c 为比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k 为导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ 为密度, 单位为 kg/m^3 ; τ 为时间, 单位为 s; 下标 a 为动脉、b 为血管。由于人体组织极其复杂, 造成边界极难处理, 故现在所计算的温度场通常简化到二维温度场, 这与真实人体有较大差别, 需要对其进行三维研究。手指是典型的多层结构, 中心只有一

根指骨, 便于简化和数值模拟计算, 但其边界仍很复杂。边界元法是将问题的能量方程降低一阶, 即从二阶降为一阶, 这大大减少了数据准备工作量和求解自由度, 是处理边界问题的好方法。本文将采用边界元法来计算方程。

(2) 低温对手动作业的影响 出舱活动时, 有许多作业需借助于人的手指感觉完成。当手指麻木时, 只能依靠视觉的观察来确定物体安放位置, 这一方法只能起到部分的补偿作用, 效率很低。手套本身就会影响手的作业, 如果再加上低温影响, 航天员执行任务的成功率会进一步下降。当手套的保温性能不足时, 手部皮温会从正常 28 左右逐渐下降。据报道^[6], 当手指皮温降至大约 15 ~ 20 时, 手的技巧性活动便会降低; 在皮温降至 8 以下时, 手的灵敏度会严重减弱, 事故发生率便会增加; 当手指皮温低于 4.4 时, 手的精细作业能力几乎完全丧失。鉴于手指皮温与其麻木程度有显著关系^[7], 因此可以用手指皮温作为感觉灵敏度的原始参数来估算手的精细作业的效率。当手指的皮温高于 15 时, 手动作业能力的下降无明显统计学意义。故人们一般把手指皮温 15 定为手动作业工效不受影响的最低限值, 而 12.8 ~ 15 这一温度区被看作临界温度区。

1 用边界元法求解方程

将方程(1)取稳态, 整理得

$$\nabla^2 T - PT = 0 \quad (2)$$

式中: $T = T^* - (W_{bc}T_a + O_m) / W_{bc}$, $P = W_{bc} / k$ 。对于只有导热的手套部分, $P = 0$ 。在封闭曲面 Γ 上对方程(2)边界元处理得曲面内或曲面上任意一点 i 对封闭曲面 Γ 积分方程是

$$C_i T_i - \int_{\Gamma} k T \nabla G^* d\Gamma = - \int_{\Gamma} G^* k \nabla T d\Gamma \quad (3)$$

式中: $\nabla^2 G^* - PG^* = \delta(r - r_i)$; $G^* = e^{-\omega r} / (4\pi r)$; ($\omega = \sqrt{P}$); C_i 为 T_i 的系数; r 为点 i 到封闭曲面 Γ 任意一点的距离。如点 i 是曲面内一点,

$-\int_{\Gamma} k T \nabla T^* d\Gamma$ 和 $-\int_{\Gamma} T^* k \nabla T d\Gamma$ 在 $r \rightarrow 0$ 时, 分别为

$$C_i T_i = \lim_{r \rightarrow 0} - \int_{\Gamma} k T \nabla T^* d\Gamma = - k T_i \lim_{r \rightarrow 0} - \frac{e^{-r\omega}(-r\omega - 1)}{4r^2\pi} \frac{\partial}{\partial n} d\Gamma k T_i = k T_i$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} - \int_{\Gamma} k \nabla T T^* d\Gamma = q_i \lim_{r \rightarrow 0} \frac{e^{-r\omega}}{4r^2\pi} d\Gamma = 0 \quad (5)$$

如点 i 是光滑曲面上一点的话, $C_i = k/2$, 在方程中取

$$T = \sum_{i=1}^n \Phi T_i, \quad q = \sum_{i=1}^n \Phi q_i (q = -k \nabla T) \quad (6)$$

$$x = \sum_{i=1}^n \Phi x_i, \quad y = \sum_{i=1}^n \Phi y_i, \quad z = \sum_{i=1}^n \Phi z_i \quad (7)$$

如图 1 所示, 采用三结点三角形单元插值法的插值函数为

$$\Phi = \eta_1, \quad \Phi = \eta_2, \quad \Phi = 1 - \eta_1 - \eta_2 \quad (8)$$

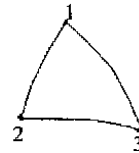


图 1 三结点三角形插值

Fig. 1 Triangular interpolation method of three nodes

如图 2 所示, 采用六结点三角形插值法的插值函数为

$$\begin{aligned} \Phi &= \eta_1(2\eta_1 - 1), \quad \Phi = \eta_2(2\eta_2 - 1), \\ \Phi &= \eta_3(2\eta_3 - 1), \quad \Phi = 4\eta_1\eta_2 \\ \Phi &= 4\eta_2\eta_3, \quad \Phi = 4\eta_3\eta_1 \end{aligned} \quad (9)$$

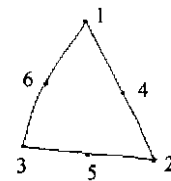


图 2 六结点三角形插值

式(8)和式(9)中 $\eta_3 = 1 - \eta_1 - \eta_2$ 。采用三结点三角形单元插值法的插值函数, 方程(3)就变为

$$C_i T_i - \int_{j=1}^n \int_0^1 \frac{1-\eta_1}{n} d\eta_1 \int_0^{1-\eta_1} \frac{3}{n} \Phi T_i |J| d\eta_2 = \int_{j=1}^n \int_0^1 \frac{1-\eta_1}{n} d\eta_1 \int_0^{1-\eta_1} \frac{3}{n} \Phi q_i |J| d\eta_2 \quad (10)$$

2 实验方法

由于在地面很难达到太空中的实验条件, 本实验主要以验证计算模型和模拟加热舱外航天服手套为实验目的。为给手套提供一个恒定的低温环境(图 3), 小桶内通入低流量冷空气, 手伸入小桶内进行实验。小桶放在中桶内, 小桶和中桶之间有一层厚为 60mm 的脱脂棉花, 用于保温; 中桶

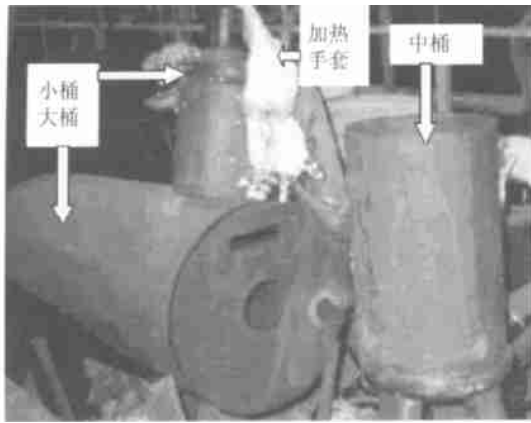


图3 实验设备

Fig. 3 Experiment device

入口小桶风温度和流量, 通过出入口小桶风温度和流量就能计算出手的散热量。

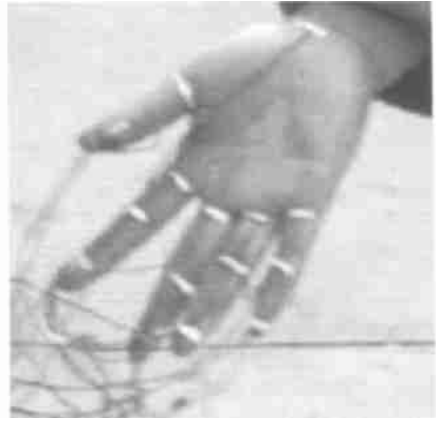


图4 实验测试点

Fig. 4 Test point

又放在大桶内, 大桶内是与小桶内温度相近的低温空气, 这利于减少小桶与外界的换热量。手套是模拟舱外航天服手套厚度制作的实验手套, 导热系数为 $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 里层厚度为 2 mm , 外层手套为 4 mm , 粘于里层手套外表面上的为电阻丝加热片, 它们的电阻都是 20Ω , 通过改变其并联电阻的阻值来改变加热量, 所提供电压都为 3 V 。图4所示为测试时手掌的测试点, 在手背也有相应测点。本实验主要分3步进行, 先对7位实验者做手低温时散热量测定, 然后做戴上手套后手的低温散热量测定, 最后做加热手套后手的低温散热量测定。过程如下:

(1) 首先测量并计算实验者的手掌和手指面积^[8], 然后将实验者手放入小桶内, 并通风(风温度在 5°C 左右), 风流量为 $0.22 \text{ L}/\text{s}$, 这时桶内气体近似于静止, 待手指温度在 15°C 左右稳定后, 如图4所示测量手指各指尖, 指根, 手腕温度点, 出

(2) 实验者戴上手套, 通入低温空气, 空气流量根据(1)所确定的手散热量制定, 降低入口温度。待手温度在 15°C 左右稳定后(约 $1 \sim 2 \text{ h}$), 测量手指各指尖, 指根和手掌温度, 手套里层和外层各指尖, 指根和手腕部位温度, 出入风温度和流量。

(3) 根据测量值和计算值制定在手套里层加热的加热量和加热方法。降低入口风温和调节各处加热量, 待手指温度在 15°C 左右稳定后(约 $1 \sim 2 \text{ h}$), 测量相应温度及相关参数。

3 结果及分析

本文参考文献[9, 10]的数据, 各组织和血的参数如表1, 舱外航天服手套材料参数如表2所示。

表1 组织的参数

Table 1 Property values of tissue

	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	新陈代谢率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)	高灌注率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	低灌注率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
骨	1.064	2.102	1401	144.9	4.404	0.1470
肌腱	0.418	3.136	1057	51.01	1.552	0.0518
结缔组织	0.203	2.520	900	800	24.315	0.8815
皮肤	0.293	3.780	1057	11.6	0.3527	0.0118
血	0.450	3.899	1060			

表2 舱外航天服手套材料参数

Table 2 Thermal conductivity of EVA glove layers

组织	皮肤- 限制层导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	皮肤- 限制层厚度 /mm	限制层- 保护层表面导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	限制层- 保护层表面厚度 /mm
指尖	0.0042	2.324	0.0028	3.683
手指	0.005	2.07	0.0078	4.064
手掌	0.0048	2.07	0.0107	4.064

图 5 是手戴上手套在 -5°C 静止空气条件下, 手指表面、里层手套和外层手套温度情况。可以看出指尖温度降到了 12°C 左右, 手指的活动将受到影响。图中指长是沿着手指由指根起到指尖的长度, 手指表面温度是皮肤表面的截面平均温度。同时从图可看出计算结果和实验结果基本吻合。图 6 是戴上舱外航天服手套时, 手指表面、里层手套和外层手套温度情况。在处于太阳或地球辐射阴面时, 只有手套向外辐射散热时, 指尖的温度降到了 10°C , 此时手动作业将会受到严重影响, 航天员将有可能因此不得不提前回到舱内。图 7 是两层模拟手套之间加入外热源, 手套在 -12°C 的静止空气中, 各层的温度情况。指背是加热处(图 8 为截面加热点, 图 9 为加热热流密度示意图, 深色为大热流加热, 浅色小热流加热, 表 3 为加热量), 故手指皮温、手套外表面的背面温度都比相应的正面温度高, 在实验中可很明显看出这一点。加热量为 2.48W 时, 可以保证手套外层温度在 -5°C 时, 手指局部温度最小在 15°C 左右。

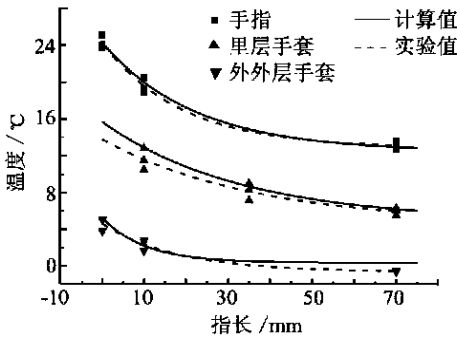


图 5 -5°C 静止空气, 手指和模拟手套实验与计算值比较

Fig. 5 Comparison of experimental and numerical finger and simulant glove temperature (-5°C , still air)

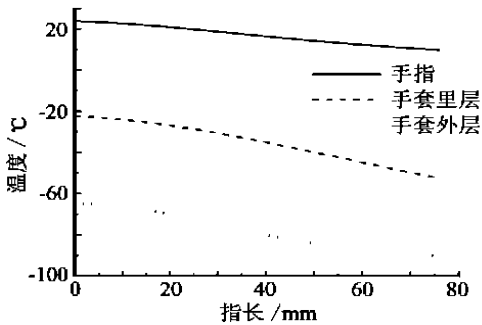


图 6 辐射阴面未加热时, 舱外航天服手套各层温度
Fig. 6 Temperature profile of EVA spacesuit glove without heat (shadowed from the sun and the

从图 10 可以看出采用优化加热方法后, 每手指加热量为 0.495W 时, 手套就能保证手指局部温度最低在 15°C 左右, 且加热处温度不因加热而太高。在手套两侧和指尖加热量最大有利于加热量的充分利用, 从图 11 可以明显地看到这一点。加热处是以加热热流密度记。

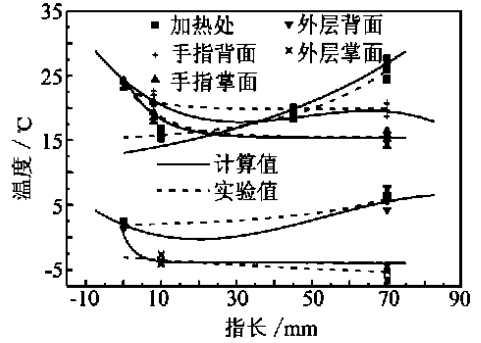


图 7 -12°C 静止空气中, 加热的模拟手套各层温度
Fig. 7 Temperature profile of simulant glove with optimal heated scheme (-12°C , still air)

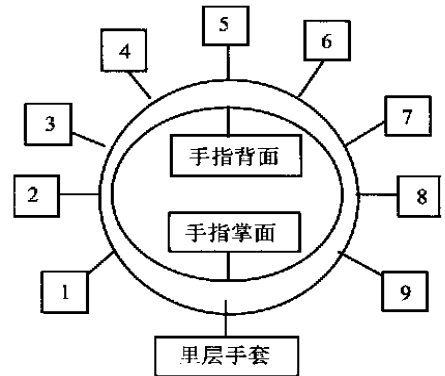


图 8 手套截面加热点分布

Fig. 8 Heated distribution of glove section

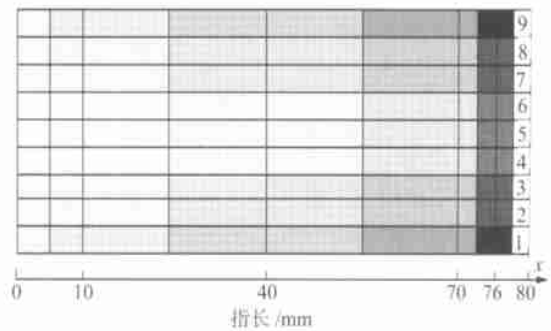


图 9 舱外航天服手套加热示意图(深色是高加热流, 浅色是低加热流)

Fig. 9 Heated distribution of EVA glove (the dark color is high heat current; the light is low)

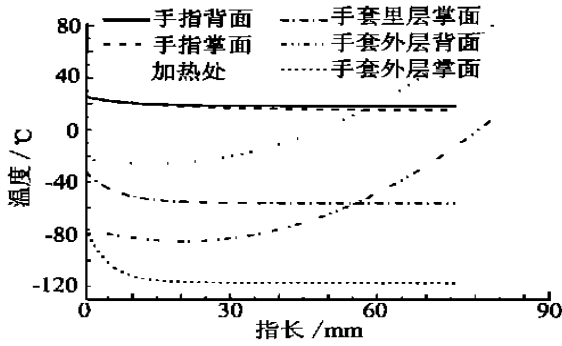


图10 辐射阴面加热时,手指及舱外航天服手套各层温度

Fig. 10 Temperature profile of finger and EVA spacesuit glove with optimal heated scheme (-5 °C, still air)

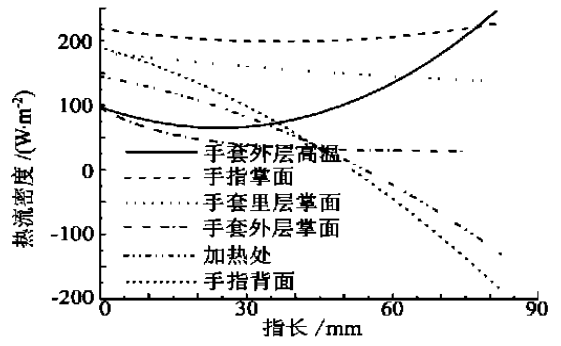


图11 辐射阴面加热时,手指及舱外航天服手套各层热流密度

Fig. 11 Heat current of finger and EVA spacesuit glove (shadowed from the sun and the earth)

表3 手套加热分配

Table 3 Heated distribution of EVA spacesuit glove

长度/mm	模拟手套	舱外航天服手套		
		指背(4, 5, 6)/(W·m ⁻²)	指侧(2, 3, 7, 8)/(W·m ⁻²)	指侧下(1, 9)/(W·m ⁻²)
0	25	25	30	50
10	50	40	50	90
40	150	90	110	160
70	400	150	180	260

4 结论

在航天员出舱活动中,当处于低代谢水平,处于太阳或地球辐射阴面时,靠被动加热不能保证手指最低温为15 °C时,对舱外航天手套进行主动局部加热是必要的。计算和实验表明:通过对目前所用手套每支加热2.5W,并合理分配加热量,即指尖和手指两测加热较多、指根和手指背面加热较少、手指掌面不加热,就能够不影响航天员手动作业和其它感觉,避免因手指冷而不得不提前回舱。

参 考 文 献

[1] David C, David G. Recent advances in the development of spacesuit glove[R]. SAE 96142, 1996.
 [2] Grahne M S, Graziosi DA, Pauly RL. Benefits of an EMU glove active heating system[R]. SAE 951549, 1995.
 [3] Nick A M, Anatoly Y S. EVA space suit glove: experiences and main design problem[R]. SAE 981532, 1998.
 [4] 庞诚,陈景山. 舱外航天服温度医学工程问题[M]. 北京: 航天医学工程研究, 1999.
 [5] Pennes H H. Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting forearm [J]. J App Physiol, 1948, 1(1): 93- 122.

[6] Fox W F. Human performance in the cold [J]. Human factors, 1967, 9(3): 203- 220.
 [7] 陈信,袁修干. 人-机-环境系统工程学基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
 [8] Mignano B P, Konz S. The surface area and volume of the hand[A]. In: Proceedings of the Humane Factors and Ergonomics Society 38th Annual Meeting[C]. 1994. 507- 610.
 [9] Bue G C, Conger B C. Shuttle EMU 4000 series and 4750 series glove thermal performance[R]. SAE 951548, 1995.
 [10] Shitzer A, Stroschein L A, Vital P. Numerical analysis of an extremity in a cold environment including countercurrent arterio-venous heat exchange[J]. J Biomechanical Engineering, 1997, 119(2): 179- 186.

作者简介:



丁立(1971—) 男,云南永善人,北京航空航天大学人机与环境工程专业,博士,主要从事人体温度场和工效研究,现在昆明理工大学交通学院工作,电子邮件:dingli-lei@chinaren.com

袁修干(1934—) 男,浙江嵊县人,北京航空航天大学人机与环境工程专业,博士生导师。

(责任编辑:吴小勇)