

室内人体表面红外辐射探测模型

熊宗龙^{1,2} 杨坤涛¹ 张南洋生¹

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; ² 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要 室内人体红外辐射理论对于人的红外探测、医学治疗、侦探、灾后搜救等领域的应用具有重要作用,而目前对室内人体目标的红外热辐射还缺乏系统、整体描述的探测模型。为提高红外系统对人体的探测和识别能力,从生物传热方程出发,利用红外物理和传理学理论,给出室内人体表面温度场和红外辐射量的理论计算方法,建立了室内着装人体探测模型。在介绍人体组成和体温调节系统的基础上,对室内人体表面温度场进行了系统讨论,分析了影响室内人体红外热辐射的主要因素。实验结果表明,模型所计算的理论值误差在允许范围内。

关键词 红外光学; 人体红外探测模型; 红外热辐射; 生物热方程; 有限元方法

中图分类号 O434 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3379

Detecting Model of Infrared Radiation of Human Body Indoors

Xiong Zonglong^{1,2} Yang Kuntao¹ Zhang Nanyangsheng¹

(¹ School of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract The theory of human body infrared radiation indoors plays an important role in the fields of infrared detecting, disease diagnostics, medical treatment, scout and rescuing work after disaster occurring. Presently, the systematic and comprehensive model for detecting infrared radiation of human body indoors has not been studied. To improve the detecting and recognizing abilities of infrared system, a method of calculating the temperature field and the radiant flux intensity of human body is proposed to build the detection model by using infrared physics and heat transfer theory on the basis of bio-heat equation. The temperature field of human body in indoor environment is systematically discussed according to the physical structure and thermoregulation system. The main factors influencing body temperature are analyzed. The experimental results indicated that the main theoretical value is within the error range.

Key words infrared optics; detection model of infrared radiation of human body; infrared radiation; bio-heat equation; finite elemental method

1 引 言

人体红外探测日益广泛地应用于军事、民用领域的搜索、跟踪、医疗等各个方面^[1~3],现代武器探测系统通过人体目标所产生的红外辐射来探测、识别、攻击目标,灾害现场,红外搜救系统能探测到是否存在幸存者,从而挽救生命,其共同特点就是人体目标从复杂的背景中识别出来。人体作为一个辐

射源,遵守红外辐射定律,但人体作为一个高等恒温生物体,具有生命活动的基本特征,实际情况下,人的活动地点主要在室内,其温度场受背景辐射、着装等的影响^[1]。因此,为提高探测和识别的效率和准确度,必须建立适当的室内背景和着装人体红外辐射探测模型。就国内目前的研究看,对人体目标红外热辐射研究主要为测量和特征分析^[4],还缺乏系

收稿日期: 2008-12-31; 收到修改稿日期: 2009-03-16

基金项目: “十五”科技攻关课题(2001BA601B05)资助项目。

作者简介: 熊宗龙(1972—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事红外探测与信息处理等方面的研究。

E-mail: longxz1@163.com

导师简介: 杨坤涛(1946—),教授,博士生导师,主要从事红外光学、光电检测与光电信息处理等方面的研究。

E-mail: yangkuntao@mail.hust.edu.cn

统、整体描述的探测模型和理论分析。1948年 Pennes^[1,5]将人前臂简化成圆柱体而写出了微分形式的“生物传热方程”，为计算生物体温度分布和传热分析奠定了基础。1963年 Wissler 建立了全身人体热调节系统数据模型，并于1985年建立了可用于冷热环境中的人体15节段模型，此模型依据人体解剖学数据，同时考虑到了人体不同部位的传热特点。北京航空航天大学^[6~8]将模型应用于舱外航天液冷服和手套热设计等航空航天领域，对人体红外辐射与机体的能量代谢、体热平衡、体温调节及组织结构的内在联系等进行了有益探讨，但主要基于研究人体在某一环境条件下的舒适性，评价航天服对人体的影响。

本文针对室内人体红外探测缺少模型的实际需求，基于人体生理学和几何特征，将15节段模型用于计算人体温度分布，分析着装条件下人、服装与环境之间热平衡后所形成的人体表面温度场，利用传热学和红外物理理论建立了室内着装人体红外辐射模型，并设计实验对仿真结果进行验证。

2 人体表面温度场的分析

为分析人体表面温度场，将人体表面划分为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），每个节段都抽象成圆柱体，分成4个同心层：核心层、肌肉层、脂肪层、皮肤层。在此基础上，用生物传热方程描述各节段以及各节段之间的热传输，利用人体的几何参数、热物理参数和热生理参数进行温度场计算与分析。

2.1 人体皮肤表面温度场模型

根据人体热生理学研究与实验，人体皮肤表面

温度由人体自身新陈代谢、血液循环，以及皮肤与环境的热交换决定^[6]。若采用二维直角坐标系，假定在人体某一层组织中，其热物性参数不随空间坐标而改变，相应的人体生物热方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_m + q_{eb} + \dot{B}C_b(T_b - T), \quad (1)$$

式中 ρ 为人体组织的密度； c 为人体组织的比热； T 为人体组织的温度； λ 为人体组织的导热系数； τ 为时间坐标； x, y 为空间坐标； q_m 为单位体积组织内的代谢产热率； q_{eb} 为单位体积组织内由于呼吸产生的热交换，仅限于头部和躯干节段； \dot{B} 为单位组织内的血流量； C_b 为血液的比热； T_b 为节段动脉血液的温度。为研究室内一般着装条件下人体温度场，求解上述方程，应给出边界条件。

人体着装条件下，服装为人体与环境间对流、辐射换热的障碍物，干扰热辐射等换热过程。人体表面温度影响因素主要有皮肤表面温度通过服装向服装内表面的热传导、热蒸发，服装外表面与室内环境的热对流和热辐射^[9,10]。所吸收的热辐射主要是房间周围墙壁、顶棚、地面、窗玻璃等各表面的热辐射，若室内还有火墙、壁炉、辐射采暖板之类的热辐射源，还需要考虑这些热辐射源对人体表面温度的影响。服装热平衡可描述为

$$S_c = (q_s^k + q_s^e + q_{mrt}^r + q_{source}^r) - (q_{cl}^i + q_{cl}^e + q_{cl}^e), \quad (2)$$

式中服装的热积 S_c 为服装净吸收的热量；人体皮肤与服装的热交换 q_s 主要包括热传导 q_s^k 和热蒸发 q_s^e ；周围室壁向服装的热辐射包括平均热辐射 q_{mrt}^r 和其他热辐射源对服装的热辐射 q_{source}^r ；服装向室内散发的热量为热辐射 q_{cl}^i 、热对流 q_{cl}^e 和热蒸发 q_{cl}^e 。

人体皮肤表面温度场的边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \begin{cases} q_c + q_r + q_e & \text{covered region} \\ s_c - (q_{mrt}^r + q_{source}^r) + (q_{cl}^i + q_{cl}^e + q_{cl}^e) & \text{uncovered region} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{n} 为人体表面的法向矢量； q_c 为皮肤表面与外界的对流换热； q_r 皮肤表面与外界的热辐射换热； q_e 皮肤表面与外界的热蒸发换热。

人体生物热方程初始条件为

$$T|_{\tau=0} = \varphi(x, y), \quad (4)$$

式中 $\varphi(x, y)$ 为人体初始温度场。一种是热中性温度场，即温度场的推进以热中性状态为初始状态；另

一种为前一段计算时段终止温度场，即将前一时段的终了状态作为当前环境的初始状态，继续进行时间推进。

根据边界条件及方程(1)，使用人体几何参数、热物理参数和热物性参数，采用有限元方法^[8]进行求解。求人体生物热方程的泛函，再对泛函进行变分计算，体表有服装覆盖和没服装覆盖时，(1)式的

泛函分别如(5)式、(6)式所示：

$$J = \iint_D \left\{ \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] - q_m T - q_{eb} T - \dot{BC}_b T_b T + \frac{\dot{BC}_b}{2} T^2 + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} T \right\} dx dy + \oint_{\Gamma} q_s T ds, \quad (5)$$

$$J = \iint_D \left\{ \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] - q_m T - q_{eb} T - \dot{BC}_b T_b T + \frac{\dot{BC}_b}{2} T^2 + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} T \right\} dx dy + \oint_{\Gamma} (q_c + q_r + q_e) T ds, \quad (6)$$

式中 D 为节段上面积分域, Γ 为节段上线积分边界。

通过对泛函进行变分计算, 计算时将人体分为 15 个节段圆柱体, 按圆周方向 8 等份, 每 1/8 圆周分别用 6 节点三角形等参单元和 8 节点单元表示, 对每个节段进行有限元网格划分, 即可求出室内着装人体皮肤表面温度场, 在此基础上考虑着装条件, 推算服装表面温度场。

2.2 室内着装人体服装表面温度场的分析

根据上述着装情况下人体皮肤表面热边界条件分析, 影响服装表面温度的因素主要为服装热阻、室内环境辐射温度等。人体皮肤通过服装向环境传热达到热平衡时, 人体周围温度场有三个等温面: 人体各节段皮肤温度 t_s , 衣服外表面温度 t_{cl} , 环境空气温度 t_a 。利用上节求出的皮肤表面温度和已知的环境空气温度和辐射温度可求出服装表面温度。各节段

换热模型如图 1 所示。

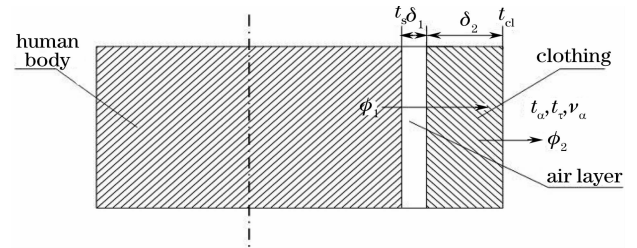


图 1 着装人体与环境传热示意图

Fig. 1 Heat transfer between human body with clothing and environment

考虑到人体与服装内侧面空气夹层引起的温度降很小, 假定人体穿的服装贴合性好, 则 δ_1 趋于零, 即服装内表面与皮肤温度趋于一致。在常温状态下, 人体皮肤表面没有汗液, 没有蒸发换热产生。人体表面到服装外表面热流量为

$$q_s^k = A_s h_{cl} (t_s - t_{cl}), \quad h_{cl} = 1 / (0.155 R_{cl}), \quad (7)$$

式中 A_s 为服装对应的人体皮肤表面积, h_{cl} 为服装层传热系数, t_{cl} 为服装热阻, 不同服装热阻值可通过相关资料查得。

在没有其他辐射源情况下, 服装外表面与环境之间的换热为

$$q_{cl}^c + q_{cl}^r - q_{mrt}^r = A_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) + A_{cl} h_r (t_{cl} - t_{mrt}), \quad (8)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.05(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{natural convection, } (v_a < 0.1 \text{ m/s}) \\ 10.4\sqrt{v_a} & \text{forced convection, } (v_a \geq 0.1 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (9)$$

$$h_r = 4\epsilon\sigma f_{cl} \left(273.2 + \frac{t_{cl} + t_{mrt}}{2} \right)^3, \quad (10)$$

式中 h_c 为对流换热系数^[6], h_r 为辐射换热系数, t_a 为室内空气温度, t_r 为室内环境辐射温度, A_{cl} 为服装面积, ϵ 为服装外表面黑度, σ 为“斯蒂芬-玻尔兹曼”常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; $f_{cl} = A_s/A_{cl}$, 为人穿衣时与裸体时面积比值, 平均值为 1.1^[11]。

室内四壁平均环境辐射温度 t_{mrt} 可用黑球温度 t_g 换算出来。黑球温度是将温度计, 放在直径为 150 mm 黑色空心球中心测出的反映热辐射影响的温度。平均环境辐射温度计算式为

$$t_{mrt} = t_g + 0.25(v_a)^{0.5}(t_g - t_a). \quad (11)$$

对流换热系数 h_c 和辐射换热系数 h_r 的影响因素较多, 计算较为复杂, 工程计算常用实验基础上的经验公式^[12]。

热平衡时, $q_s^k = q_{cl}^c + q_{cl}^r - q_{mrt}^r$, 从而服装表面温度

$$t_{cl} = \frac{f_{cl} h_{cl} t_s + h_c t_a + h_r t_r}{h_c + h_r + f_{cl} h_{cl}}. \quad (12)$$

至此, 得到了人体表面, 包括皮肤和服装表面的温度场, 利用红外热辐射理论即可求出人体不同部位, 包括裸露部分和着装部分的红外热辐射。

3 室内着装人体红外辐射模型

人体红外辐射理论建模需要得到的是室内着装人体在红外波段(一般为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$)范围内的辐射出射度,对于人体任一节段表面,该辐射出射度包括自身辐射和反射辐射^[13]。

3.1 自身辐射

探测人体温度场得到的是其辐射能量,着装部分基于(12)式得到的温度场,依据 2.1 节人体皮肤表面温度得到裸露部分温度场,利用普朗克公式,在红外波段范围内积分,可得到人体自身辐射:

$$E_{\text{self}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda, t) \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda t) - 1]} d\lambda, \quad (13)$$

式中 c_1 和 c_2 为第一、二辐射常数; λ_1 和 λ_2 为红外波段范围的下限和上限; t 为节段表面温度,当节段为裸露部分时为皮肤表面温度,着装时,该值为服装表面温度; $\epsilon(\lambda, t)$ 为表面发射率,与波长 λ 和温度 t 有关,当节段为人体裸露部分时为皮肤发射率,着装时,该值为服装表面发射率。

3.2 节段表面的反射辐射

人体辐射出射度的反射部分包括各节段表面对房屋 4 个墙壁、顶棚、地面和其它辐射源入射辐射的反射,计算公式如下:

$$E_{\text{reflect}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \left\{ \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda t_{\text{mrt}}) - 1]} + \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda t_{\text{source}}) - 1]} \right\} d\lambda, \quad (14)$$

式中第一部分表示单位表面接收的红外波段范围内室内周围环境辐射能量,其平均辐射温度为 t_{mrt} ; 第二部分表示单位表面接收到的室内其它辐射源的辐射能量,其辐射温度为 t_{source} ; $\rho(\lambda)$ 为单位表面红外波段范围的反射率,当节段为人体裸露部分时为皮肤反射率,着装时,为服装表面反射率。

将(13)式、(14)式得到的辐射量相加,得到人体表面辐射能量,作为下面仿真分析的依据。

4 仿真结果与分析

4.1 理论计算与分析

利用第 2 节得到的人体表面温度场和第 3 节得到的辐射模型,可以进行理论计算。通常情况下,室内温度较为稳定,气流小于 $0.1\ \text{m/s}$,在没有其它辐射源的情况下,对不同着装及不同的室内温度环境下人体表面温度(各着装节段温度平均值)进行了计

算,计算特征参数如表 1 所示,温度变化结果如图 2~图 6 所示。选取服装表面发射率为 0.8 ^[12],皮肤表面发射率为 0.98 ,计算的头部、手部以及着装部分的人体表面红外光谱辐射出射度如图 7 所示。

表 1 算例的特征参数

Table 1 The characteristic parameter of typical cases

Age	Height /cm	Weight /kg	Fat content /%	Surface area /m ²
23.0	189.0	98.7	26.6	2.20
24.0	167.9	75.3	17.8	1.87
22.5	172.0	68.8	10.2	1.85

由图 2、图 3 可知,在室内环境温度一定,着装热阻值不同时,体表温度呈指数下降,室内温度越低,体表温度下降越明显,50 min 后趋于稳定。人体没有着装($R_{\text{cl}}=0$)情况下,人体表面温度下降最明显、变化量最大。服装仿碍皮肤表面热量向外传播作用明显,热阻值较大时($R_{\text{cl}}=2.0$),服装表面温度比热阻较低($R_{\text{cl}}=1.0$)时低。

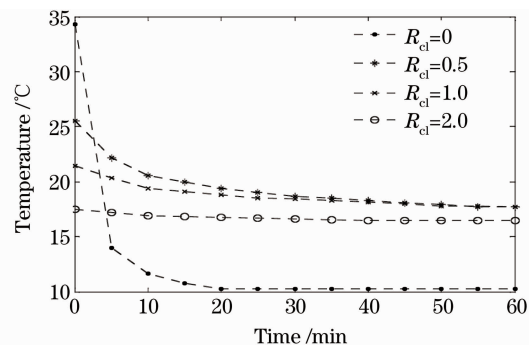


图 2 室内温度 $10\ \text{°C}$ 时人体表面温度

Fig. 2 Variation of the surface temperature of human body when the indoor temperature is $10\ \text{°C}$

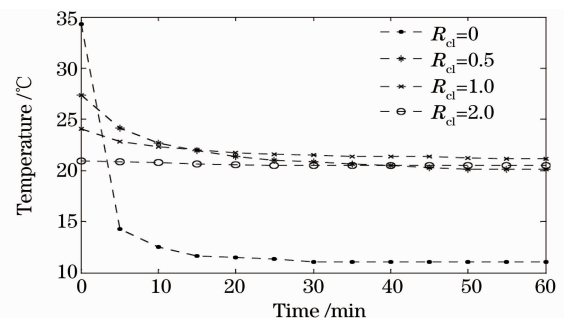


图 3 室内温度 $15\ \text{°C}$ 时人体表面温度

Fig. 3 Variation of the surface temperature of human body when the indoor temperature is $15\ \text{°C}$

由图 4、图 5 可知,着装热阻值一定,室内环境温度不同时,人体表面温度同样出现指数下降趋势,服装热阻值相同情况下,对不同的环境温度,其变化

曲线呈现近似平行状态。在相同着装条件下,室内环境温度越高,服装表面温度越高,识别越容易。由图 6 可见,头部、手部由于温度偏高,且皮肤表面发射率高于服装表面发射率,其红外光谱辐射出射度明显大于服装表面出射度。

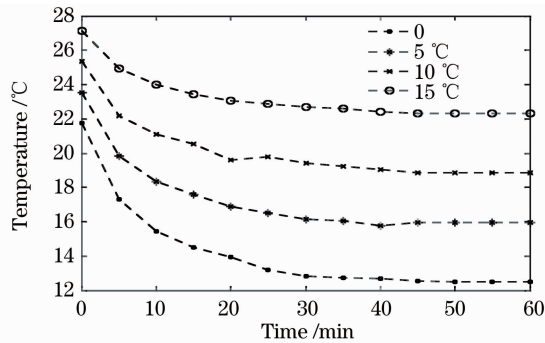


图 4 服装热阻为 0.5 时人体表面温度

Fig. 4 Variation of the surface temperature of human body when the clothing thermal resistance is 0.5

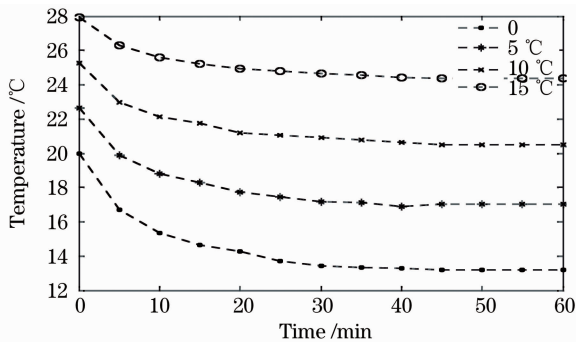


图 5 服装热阻为 1.0 时人体表面温度

Fig. 5 Variation of the surface temperature of human body when the clothing thermal resistance is 1.0

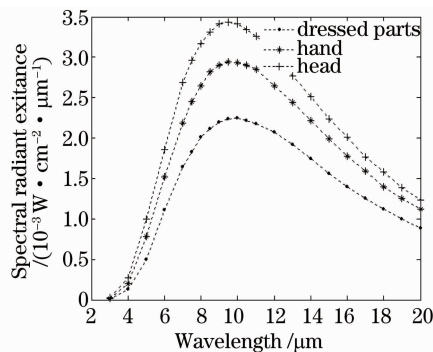


图 6 头部、手部和服装表面红外光谱辐射出射度对比

Fig. 6 Spectral radiant exitance of human body

4.2 实验结果及分析

对室温 15 °C, 着装热阻为 1.0, 即相当于普通职员套装着装情况下的人体进行热像仪成像测温, 并同时用热电偶进行温度测量校正, 热像仪最小可分辨温差为 0.1 °C, 热电偶测温精度为 0.1 °C, 其中

一个受试者人体表面温度场如图 7 所示。

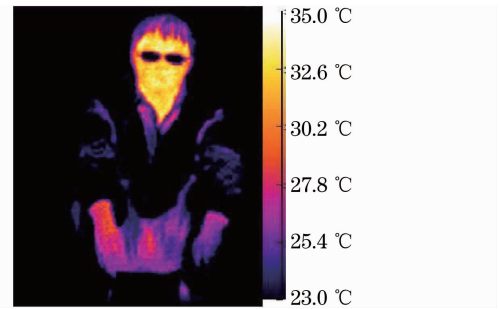


图 7 人体探测温度场

Fig. 7 Detected temperature field of human body

对无衣服覆盖的面部、颈部、手部, 以及着装部分进行温度测量和理论计算结果对比分析。计算结果为面部、颈部、手部温度值分别为 33.25 °C, 35.25 °C, 30.10 °C, 着装部分温度值为 20.39 °C; 实验结果为面部、颈部、手部温度平均测量值分别为 32.50 °C, 33.6 °C, 28.90 °C, 着装部分平均测量值为 21.88 °C; 误差值分别为: -0.75, -1.65, -1.2, 1.49。

误差原因主要来源于人体参数的不均匀性、着装发射率和热阻的影响。由(1)式可知, 人体几何形状、热物理和生理参数是求解人体皮肤表面温度场的关键因素, 在本文模型的建立过程中, 使用有限元方法提高了计算的精度, 使人体各部分更符合实际情况, 但由于人的自身热调节机制十分复杂, 这些参数存在不均匀性, 导致误差; 作为传热物体, 服装的发射率和热阻的理论值与实际值、服装与人体间的空隙使理论计算与实际温度出现误差, 如图 7 所示, 当人体下蹲时, 大腿部分服装与皮肤完全接触后, 其温度略高于其它部分。但从仿真和实际测量的结果来看, 实验结果与模型所计算的理论值基本吻合, 误差值与人体与环境背景之间的温差相比, 量值很小, 不影响探测与识别^[14~16], 验证了本模型的正确性。

5 结 论

利用人体 15 节段模型和生物传热方程, 依据人体热调节系统和传热学理论并结合室内环境, 研究了室内着装人体表面热边界条件, 分析了人体表面温度与着装、环境温度之间的关系, 建立了室内着装人体红外探测模型。研究分析结果表明, 人体核心温度较为稳定, 但人体表面温度受环境和着装影响较大, 日常探测的人体由裸露部分和着装部分组成; 由于服装织物红外光谱发射率明显低于皮肤表面发射率以及生理因素, 一般情况下, 裸露部分红外发射要高于着装部分。依据现有的人体不同着装的热阻

值,利用工程中的换热系数计算方法,本文提出了室内着装人体红外辐射模型。利用该模型可以预估人体在不同室内温度、不同着装条件下的温度场和红外热辐射能量,为人的红外探测、医学治疗、侦探、灾后搜救等领域提供较好的理论值以及识别先验值,具有重要的应用价值。利用神经网络和模糊逻辑等人工智能技术,建立更加符合实际生理过程的温度场模型,充分考虑人体各类参数的准确性,进行更精确的温度场计算,是今后研究的一个方向。

参 考 文 献

- Zhongshan Deng, Jing Liu. Mathematical modeling of temperature mapping over skin surface and its implementation in thermal disease diagnostics[J]. *Comput. Biol. Med.*, 2004, **34**(6): 495~521
- E. F. J. Ring. The historical development of temperature measurement in medicine [J]. *Infrared Phys. & Technol.*, 2007, **49**(3): 297~301
- Zhou Zhenyu, Yang Hongyu, Gong Hui *et al.*. Brain signal analysis of functional near-infrared imaging based on Hilbert-Huang transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 307~312
周振宇,杨宏宇,龚 辉等. 基于希尔伯特-黄变换的近红外脑功能成像信号分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 307~312
- Zhang Dong, Wang Shuyou, Wang Yuanchao *et al.*. Temperature measurement of deep parts under regions of different temperature of the body surface [J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2001, **20**(4): 288~291
张 栋,王淑友,王援朝等. 体表不同温度区下深部温度的测定 [J]. *北京生物医学工程*, 2001, **20**(4): 288~291
- Tzu-Ching Shih, Ping Yuan, Win-Li Lin *et al.*. Analytical analysis of the Pennes bioheat transfer equation with sinusoidal heat flux condition on skin surface[J]. *Med. Eng. Phys.*, 2007, **29**(9): 946~953
- Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Cao Zuo *et al.*. Numerical simulation to aircraft cabin temperature physiological identification[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, **21**(2): 108~112
邱义芬,袁修干,操 作等. 飞机座舱温度生理鉴定数值模拟 [J]. *航空学报*, 2000, **21**(2): 108~112
- Ciu Man, Wu Jianmin, Gu Dingliang *et al.*. Effects of head-down bedrest on surface temperature distribution and non-evaporative heat dissipation [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2002, **15**(2): 93~97
邱 曼,武建民,顾鼎良等. 模拟失重对人体皮肤温度分布和不同部位非蒸发散热的影响[J]. *航天医学与医学工程*, 2002, **15**(2): 93~97
- Cao Zuo, Lin Guiping, Yuan Xiugan. Finite elemental analysis of human thermal regulating system[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1997, **23**(5): 551~554
操 作,林贵平,袁修干. 人体热调节的有限元分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 1997, **23**(5): 551~554
- E. D. Yildirim, B. Ozerdemb. A numerical simulation study for the human passive thermal system[J]. *Energy and Buildings*, 2008, **40**(7): 1117~1123
- Xianfu Wan, Jintu Fan. A transient thermal model of the human body-clothing-environment system[J]. *J. Therm. Biol.*, 2008, **33**(2): 87~97
- Shi Xiaokun, Ni Bo. Mathematical study on coupled heat and moisture transfer through fabrics with the internal heat radiation heat transfer[J]. *Basic Sciences J. Textile Universities*, 2004, **17**(1): 52~58
史晓昆,倪 波. 考虑内部辐射下织物热湿传递现象的数值研究 [J]. *纺织高校基础科学学报*, 2004, **17**(1): 52~58
- Wan Zhiqin, Zhang Weiyuan. Theoretical study and experimental analysis of coefficient radiation of fabric[J]. *J. China Textile University*, 2000, **26**(1): 44~47
万志琴,张渭源. 织物有效辐射系数的理论探讨与实验研究[J]. *中国纺织大学学报*, 2000, **26**(1): 44~47
- Pieter A. Jacobs. Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds[M]. Washington, SPIE Press, 1996
- Baolong Guo, Qiang Zhang, Ye Hou. Region-based fusion of infrared and visible images using nonsubsampling contourlet transform[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 338~341
- Yinghua Zhang, Zhongnan Wan. Target models for range performance prediction of infrared imaging system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8): 454~456
- Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. Infrared target tracking algorithm based on algorithm fusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 860~865
管志强,陈 钱,钱惟贤等. 一种基于算法融合的红外目标跟踪方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 860~865