Pure Mathematics 理论数学, 2020, 10(9), 897-905
Published Online September 2020 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/pm
https://doi.org/10.12677/pm.2020.109104

基于遗传算法的多层热防护服装的热传递模型

包　煦，朱　源，邢海燕，王志刚*

海南大学理学院，海南 海口
Email: runlasiarun@outlook.com, *wzhigang@hainanu.edu.cn

收稿日期：2020年8月29日；录用日期：2020年9月18日；发布日期：2020年9月25日

摘　要

本文以2018年全国大学生数学建模A题为例，利用热传导方程建立数学规划模型，研究了不同温度约束下的最佳防护服厚度问题。首先，用遗传算法求解得防护服温度空间分布表。其次，利用最小二乘法求第II层最优厚度d_2 = 10.6 mm。目标函数为服装质量时d_2 = 11.4 mm，d_4 = 1.6 mm；目标函数为服装体积时d_2 = 9.8 mm，d_4 = 5.8 mm；目标函数为服装厚度时d_2 = 10.7 mm，d_4 = 20 mm。该模型在战场、消防、石油化工、金属冶炼等环境中均能得到较好的推广，保护工作人员免受高温高辐射危害，为处于特定环境下的人体提供保护屏障。

关键词

热传导方程，最小二乘法，最优厚度，数学规划，遗传算法

Thermal Transfer Model of Multilayer Thermal Protective Clothing Based on Genetic Algorithm

Xu Bao, Yuan Zhu, Haiyan Xing, Zhigang Wang*

School of Science, Hainan University, Haikou Hainan
Email: runlasiarun@outlook.com, *wzhigang@hainanu.edu.cn

Received: Aug. 29th, 2020; accepted: Sep. 18th, 2020; published: Sep. 25th, 2020

Abstract

In this paper, we used the heat conduction equation to establish a mathematical programming model and studied the optimal protective clothing thickness model under different temperature

*通讯作者。

文章引用: 包煦, 朱源, 邢海燕, 王志刚. 基于遗传算法的多层热防护服装的热传递模型[J]. 理论数学, 2020, 10(9): 897-905. DOI: 10.12677/pm.2020.109104

constraints by taking the problem A in the Contemporary Undergraduate Mathematical Contest (CUMCM) in 2018 as an example. Firstly, we used the genetic algorithm to obtain the temperature spatial distribution table of the protective clothing. Secondly, we used the least-squares method to find the optimal thickness of the second layer of the clothing, d_2 = 10.6 mm. When the optimization goal is the weight of the clothing, d_2 = 11.4 mm, d_4 = 1.6 mm; when the optimization goal is the volume of the clothing, d_2 = 9.8 mm, d_4 = 5.8 mm; when the optimization goal is the thickness of the clothing, d_2 = 10.7 mm, d_4 = 20 mm. The model can be better promoted in the battlefield, fire, petrochemical, metal smelting and other environments to protect the staff from high temperature. High radiation hazard provides a protective barrier for the human body in a specific environment.

Keywords

Heat Conduction Equation, Least Squares Method, Optimal Thickness, Mathematical Programming, Genetic Algorithm

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

当前，大量以高温作业环境为基础的实验无法重复且耗费成本巨大，造成资源浪费，因此建立高温环境下的热防护服装的设计模型，给热防护服装的设计提供理论依据十分必要。卢琳珍等[1]建立了热防服装－空气层－皮肤系统中的热传递模型，研究了在闪火条件下多层热防护服装，空气层和皮肤的热传递过程，并与已验证的模型进行比较，说明模型的可靠性。Santos 等[2]研究了衣下空气层厚度带来的对流散热的影响，发现衣下空气厚度对热传递的影响比较大。李紫含等[3]对热防护服降温效果评价的重要指标进行探讨，构建了高温高湿环境下热防护服降温效果评价指标体系，为防护服降温效果综合评价提供了依据。黄旭清等[4]利用差分法对一维热传导问题进行分析，给出向后差分格式。潘斌等[5]运用数学或科学的方法研究热防护服装，旨在揭示热防护织物内部的热传递规律，为热防护服装的研发提供科学参考。

针对热防护服的温度分布问题，张烨等[6]建立了多层平壁模型对热防护服的温度分布进行求解；宋银银等[7]通过偏微分方程建立热传导模型，利用差分迭代数值模拟算法得到专用服装温度分布。高温作业专用服装主要由耐高温层，保温层和空气层组成，在设计时需要考虑其耐热性与便携性，姚沃成等[8]利用 Flourier 定理与有限元差分法研究了高温防护服材料厚度设计的最优问题。崔荣升等[9]选用有限差分法分别求得三层固体模型和空气－织物模型的热传导方程的数值解，给出专用服装的面料有削弱外界高温作用的能力的结论，对热防护服面料的生产以及防高温的研究有指导意义。魏延等[10]结合四层织物物理性质建立四层热传导模型，采用有限差分法，通过逐次迭代得到其温度分布图。

数学规划将必须满足的既定目标的要求称为约束条件，将衡量指标称为目标函数，用数学语言来描述即为：求目标函数在一定约束条件下的极值问题。张学锋等[11]用线性规划的方法建立炼铁配料的数学模型，利用单纯形法求解达到成本最优；张永强等[12]提出基于线性规划法的成本优化方案，构建适宜的成本优化模型，降低了电子商务运输成本。张晓彤等[13]对多周期订单、机床、员工、单元布局信息进行了数学建模，并设计了单元构建问题的优化变量，采用数学规划法建立了分阶段的单元构建优化模型并用遗传算法求解。龚艺等[14]针对外卖配送服务的车辆调度问题，根据外卖配送服务建立了路径最短的带时间窗约束的车辆路径模型，利用遗传算法对模型进行求解并验证了算法的合理性和有效性。

本文结构安排如下，第一部分，依据织物边界条件建立各层织物的热量传递模型，引入补偿函数平衡观测值差异，用遗传算法求解得人体外侧温度空间分布规律。第二部分限定温度与时间条件，其余约束条件仍满足热平衡协调方程，改进模型约束条件求满足问题二的最优解。第三部分确定了第 II 层与第 IV 层织物最优厚度，化多目标规划为单目标规划改进模型，求优化目标分别为衣物质量、衣物体积、衣物厚度时的厚度最优解。最后，总结本文的主要工作并对该领域研究作出进一步展望。

2. 热量传导模型

2.1. 模型建立

本文将温度分布理解分为时间分布与空间分布，各层织物对热量的吸收，传递能力不同，温度在厚度坐标轴上呈空间分布。热交换通过热传导，热辐射与热对流三种方式进行。I 层织物与外界环境间三种方式均存在，IV 层与皮肤表层(记作 V 层)间存在热辐射与热传导，IV 层缝隙足够小，认为其热对流可忽略不计。其他各层间热辐射相抵，仅计算热传导对温度的改变。规定热量传递方向始终垂直于人体皮肤外侧，简化为一维模型，为着重观察人体皮肤温度的变化，不考虑同层织物间差异。建立以 I 层与空气交接面为原点的 x 坐标轴，以织物厚度增加的方向为正向。

根据能量守恒定律，t 时刻体积元 ΔV 内的热量 $\Delta Q = c\rho u \Delta V$，其中 c 是比热，ρ 是密度，u 是温度. 不考虑织物传热的层内差异，温度 u 可视作仅与厚度 x 和时间 t 有关的函数，体积元 $\Delta V = S\Delta x$，则 $\Delta Q = c\rho u \Delta V$ 可变形为：

$$\Delta Q = c\rho u(x,t) S \Delta x \tag{1}$$

其中，$\Delta x(a < x < b)$ 为足够小区域，随时间变化动态表示其热量，t 时刻该区域的热量 $Q(t)$ 为：

$$Q(t) = \int_a^b c\rho u(x,t) S \mathrm{d}x \tag{2}$$

为探讨热量随时间的变化率，对热量 $Q(t)$ 关于时间进行求导得：

$$\frac{\mathrm{d}Q(t)}{\mathrm{d}t} = S\int_a^b c\rho \frac{\partial u}{\partial t} \mathrm{d}x \tag{3}$$

其中 a,b 分别为 Δx 在厚度坐标轴上的左右坐标。热量从温度较高侧传递向温度较低侧，传递速度与区域长度成反比，与横截面积成正比，上式可表为：

$$Q(t) = \int_a^b -k \frac{u(b,t) - u(a,t)}{\Delta x} S \mathrm{d}x \tag{4}$$

其中，k 为有效导热传导率，热量随时间变化率还可表示为：

$$\frac{\mathrm{d}Q(t)}{\mathrm{d}t} = k\left[\frac{\partial u}{\partial x}(b,t) - \frac{\partial u}{\partial x}(a,t)\right] S \tag{5}$$

为处理热量变化率的两种表示方法，将式(5)化为积分处理的方式：

$$\frac{\mathrm{d}Q(t)}{\mathrm{d}t} = k\int_a^b \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \mathrm{d}x S \tag{6}$$

联立式(5)与式(6)后可消去热量变化率 $\frac{\mathrm{d}Q(t)}{\mathrm{d}t}$：

$$k\int_a^b \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\mathrm{d}xS = S\int_a^b c\rho\frac{\partial u}{\partial t}\mathrm{d}x \tag{7}$$

假设各层织物的温度为$u_i(x,t)$，第 IV 层空气温度为$u_{air}(x,t)$，T_i为各层左侧温度。I 层织物与外界环境直接接触，而空气层与其之间的热对流无法忽视，即该层三种热传导方式均存在。已知环境温度T_{air}，人体体表温度T_{phy}，各层织物热传导率$k_i,(i=1,2,3)$，建立各层热传递协调方程。针对于第 I 层织物，由能量守恒定律得：

$$c\rho\frac{\partial u_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_1\frac{\partial u_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial q_{r1}}{\partial x} \tag{8}$$

由辐射换热表达式对上式进行变形，可描述为：

$$q_{r1} = \alpha_{R|air}\left[\left(\frac{T_{air}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right]S_1 \tag{9}$$

其中q_{r1}是在单位时间内第 I 层织物辐射换热的热量，$\alpha_{R|air}$为空气辐射系数，S_1为第 I 层交界面表面积；T_{air}为外界环境温度；T_1为第 I 层左侧温度。

为获得方程所求问题的解，需确定定解条件，其中织物的初始条件为：

$$(x,0) = U_1(x), x\in(0,L_1) \tag{10}$$

织物左边界条件为：

$$-k_1\frac{\partial u_1}{\partial x}\bigg|_{x=0} = (q_c)_{x=0} \tag{11}$$

$$q_c = h_c(T_{air} - T_1)S_1 \tag{12}$$

其中q_c为在单位时间内外界环境对流换热的热量，T_{air}为外界环境温度，T_1为第 I 层织物左侧的温度，h_c为对流换热系数。织物右边界条件为：

$$u_1(L_1,t) = U_2(t), t\in(0,T_1) \tag{13}$$

第 II，III 层织物层间热辐射相抵，仅考虑热传导对温度的改变。由能量守恒定律得第 II 层织物热传递方程：

$$c\rho\frac{\partial u_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_2\frac{\partial u_2}{\partial x}\right) \tag{14}$$

第 II，III 层织物边界条件为：

$$u_2(L_1,t) = U_2(t), t\in(0,T_2) \tag{15}$$

$$u_2(L_2,t) = U_3(t), t\in(0,T_3) \tag{16}$$

第 III 层织物和人体皮肤表层实则并未直接接触，期间存在第 IV 层空气层，所以要考虑和空气层之间的热辐射，由能量守恒定律得第 III 层织物热传递方程为：

$$c\rho\frac{\partial u_3}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_3\frac{\partial u_3}{\partial x}\right) \tag{17}$$

第 III 层织物边界条件为：

$$u_3\left(L_2,t\right)=U_3\left(t\right),t\in\left(0,T_4\right) \tag{18}$$

$$-k_3\frac{\partial u_3}{\partial x}\bigg|_{x=L_3}=\left(q_{r3}\right)_{x=L_3} \tag{19}$$

$$q_{r3}=\alpha_{R|air}\left[\left(\frac{T'_{air}}{100}\right)^4-\left(\frac{T_4}{100}\right)^4\right]S_3 \tag{20}$$

式(20)中，q_{r3} 是在单位时间内第 III 层辐射换热的热量，$\alpha_{R|air}$ 为空气辐射系数，S_3 为第 III 层交界面表面积；T'_{air} 为第 IV 层空气温度，T_4 为第 IV 层左侧温度。考虑第 IV 层与人体间的热量传递，IV 层与皮肤表层(记作 V 层)间存在热辐射与热传导，因为 IV 层缝隙足够小，我们认为其热对流可忽略不计。当外界

温度 T_{air} 小于 37°时，人体向外界发出热辐射，此时 $Q=\alpha_{R|phy}\left(\frac{T_{phy}}{100}\right)^4 S$，其中 Q 为辐射热量，$\alpha_{R|phy}$ 为人体辐射系数，S 为人体表面积，T_{phy} 为人体温度。当外界温度 T_{air} 大于 37°时，外界向人体发出热辐射：

$$Q=\alpha_{R|air}\left[\left(\frac{T_4}{100}\right)^4-\left(\frac{T_{phy}}{100}\right)^4\right]S \tag{21}$$

其中 T_4 为 IV 层织物左侧温度，$\alpha_{R|air}$ 为空气辐射系数，S 为 IV 层交界面表面积。第 IV 层热量传递方程为：

$$c\rho\frac{\partial u_4}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_4\frac{\partial u_4}{\partial x}\right) \tag{22}$$

$$q_{r4}=\alpha_{R|air}\left[\left(\frac{T_4}{100}\right)^4-\left(\frac{T_{phy}}{100}\right)^4\right]S_4 \tag{23}$$

式(22)中，q_{r4} 是在单位时间内第 IV 层辐射换热的热量，$\alpha_{R|air}$ 为空气辐射系数，S_4 为第 IV 层交界面表面积；T_{phy} 为人体体表温度；T_4 为第 IV 层左侧温度。

第 IV 层织物初始条件为：

$$u_4\left(x,0\right)=U_4\left(x\right),x\in\left(L_3,L_4\right) \tag{24}$$

第 IV 层织物边界条件为：

$$u_4\left(L_3,t\right)=U_4\left(t\right),t\in\left(0,T_4\right) \tag{25}$$

$$u_4\left(L_4,t\right)=U_{phy}\left(t\right),t\in\left(0,T_5\right) \tag{26}$$

2.2. 模型优化

为平衡计算得到的皮肤外侧温度值与实际皮肤外侧温度值的差异，引入补偿函数 $H=\xi\frac{\partial u}{\partial x}$。前期空

间上温差较大时温度上升速度较快，经过足够长时间后温度趋于稳定，不存在能量传递。温度上升速度递减，即传热量递减，温差递减，假设传热量与温差成正比参数 ξ 取值与温度 u 的变化量有关，引入补偿系数 a，令 $\xi = a\frac{\partial u}{\partial t}$，更新补偿函数 $H = a\frac{\partial u}{\partial t}\frac{\partial u}{\partial x}$，优化热传导模型得：

$$T_{new} = c\rho\frac{\partial u}{\partial t} = k\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a\frac{\partial u}{\partial t}\frac{\partial u}{\partial x} \tag{27}$$

其中，T_{new} 为优化后的皮肤外侧温度，c 是比热，ρ 是密度，u 是第 IV 层温度。为估计补偿系数 a 值，将同一时间内附件所给皮肤外侧温度与计算得到的皮肤外侧温度值作一组观测值，对 5401 组观测值作最小二乘拟合。

2.3. 模型求解

第 I 层厚度 0.6 mm，第 II 层厚度 6 mm，第 III 层厚度 3.6 mm，第 IV 层厚度 5 mm，总厚度为 15.2 mm，将其分割为 152 个单位元(厚度为 0.1 mm)，对应 x 坐标为 0-151。以第 I 层织物与外界环境的接触处作为 x 轴的原点，外界环境温度 $T_{air} = 75^\circ\text{C}$，所得温度空间分布表部分摘录如表 1。

Table 1. Temperature distribution table of protective clothing in the first second
表 1. 第 1 秒内防护服温度空分布表

体积元序号	温度/℃
1	75
2	71.39608565
3	64.1887333
4	60.58529681
…	…
151	37
152	37

3. 温度及时间限定下的改进模型

以第 II 层织物厚度为优化目标，其在厚度坐标轴上左边界坐标为 L_1，右边界坐标为 L_2，目标函数：$\min L_2 - L_1$。用 0-1 变量对温度统计超过 44 度的秒数记录：

$$t_i = \begin{cases} 0, T_4 - \frac{\partial u}{\partial t} \le 44 \\ 1, T_4 - \frac{\partial u}{\partial t} > 44 \end{cases} \tag{28}$$

其中，T_4 表示第 IV 层最左侧温度。超过 44°C 的时间不超过 5 分钟，即 $\sum_{i=1}^{3600} t_i \le 300$；工作 60 分钟内假人皮肤外侧最高温度不超过 47℃，即 $T_4 - \frac{\partial u}{\partial t} \le 47$；同时各层仍然满足热传递协调方程与边界条件。单目标规划模型为：

$$\min L_1 - L_2$$

$$
\text{s.t.}\begin{cases}
c\rho\dfrac{\partial u_i}{\partial t}=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(k_i\dfrac{\partial u_i}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial q_{ri}}{\partial x},i=1,4\\
c\rho\dfrac{\partial u_i}{\partial t}=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(k_i\dfrac{\partial u_i}{\partial x}\right),i=2,3\\
-k_1\dfrac{\partial u_1}{\partial x}\bigg|_{x=0}=\left(q_c\right)_{x=0}\\
q_c=h_c\left(T_{air}-T_1\right)S_1\\
-k_3\dfrac{\partial u_3}{\partial x}\bigg|_{x=L_3}=\left(q_{r3}\right)_{x=L_3}\\
q_{ri}=\alpha_{R|air}\left[\left(\dfrac{T_i}{100}\right)^4-\left(\dfrac{T_{i+1}}{100}\right)^4\right]S_i,i=1,2,4\\
u_i\left(x,0\right)=U_i\left(x\right),x\in\left(L_{i-1},L_i\right),i=1,4\\
u_i\left(L_i,t\right)=U_{i+1}\left(t\right),t\in\left(0,T_2\right)\\
u_i\left(L_{i-1},t\right)=U_i\left(t\right),t\in\left(0,T_3\right)\\
T_4-\dfrac{\partial u}{\partial t}\le 47\\
\sum_{i=1}^{3600}t_i\le 300
\end{cases}
\tag{29}
$$

其中，c 是比热，ρ 是密度，u_i 是第 i 层的温度，T_i 是第 i 层左侧温度.规定 $L_0=0$，$T_5=T_{phy}$，$U_5=U_{phy}$。

该问题为一维模型，选用二分法解得第 II 层织物最优厚度为 10.6 mm，假人皮肤外侧温度超过 44℃的总时 $t=287$ s，假人皮肤外侧温度时间分布表部分摘录如表 2。

Table 2. Temperature-time distribution table outside the skin
表 2. 假人皮肤外侧温度时间分布表

时刻/s	温度/℃
1	37
2	37
…	…
3599	44.69391
3600	44.69634

4. 最优厚度的确定

4.1. 模型建立

专用服装质量应尽可能轻，织物用料尽可能少，优先选取质量较小方案。第 II 层织物左边界坐标为 L_1，右边界坐标为 L_2；第 IV 层织物左边界坐标为 L_3，右边界坐标为 L_4。目标函数为 $\min\omega_2\left(L_2-L_1\right)+\omega_4\left(L_4-L_3\right)$，其中 ω_2,ω_4 为第 II 层织物与第 IV 层缝隙质量的权重。考虑质量时，要保证两层的厚度和以及体积和为定值，设为 C_1,C_2；考虑体积时，设两层的厚度和以及质量和为定值 C_3,C_4；考虑厚度时，保证两层的体积和以及质量和为定值，设为 C_5,C_6；在模型中增加约束条件如下：1) 体积约束条件：$S\left(L_2-L_1\right)+S\left(L_4-L_3\right)=C_1$，$S$ 为两层相同的表面积；2) 厚度约束条件：$L_2-L_1+L_4-L_3=C_2$，

$L_2-L_1+L_4-L_3=C_3$。3) 质量约束条件：$\rho_1 S(L_2-L_1)+\rho_2 S(L_4-L_3)=C_4$，其中 S 为两层相同的表面积；4) 厚度约束条件：$\rho_2 S(L_2-L_1)+\rho_4 S(L_4-L_3)=C_6$。5) 环境为 80℃时，人体外侧皮肤温度不超过 47℃：$T_4-\partial_u/\partial_t\le 47$；6) 超过 44℃的时间不超过 5 分钟：$\sum_{i=1}^{1800} t_i\le 300$。为使服装所占空间尽可能小，优先选取体积较小方案。此时 ω_2,ω_4 为第 II 层织物与第 IV 层缝隙体积的权重。为使皮肤表面温度尽可能快的达到稳定，在其他条件同等的情况下下优先选取厚度较小方案。此时 ω_2,ω_4 为第 II 层织物与第 IV 层缝隙厚度的权重。

4.2. 模型求解

4.2.1. 着重考虑服装质量因素

在满足体积及厚度等约束条件下要保证两层织物的总质量 M 最小，质量为密度与体积的乘积，体积为织物表面积与厚度的乘积，建立如下质量表达式：

$$M=m_2+m_4=\rho_2 SV_2+\lambda\rho_4 S(C_1-V_2)=(\rho_2-\rho_4)SV_2+\rho_4 SC_1 \tag{30}$$

其中 V_i 为第 i 层体积，m_i 为第 i 层质量，M 为第 II 层和第 IV 层的总质量，ρ_i 为第 i 层密度，代入数据得：$M=860.82SV_2+1.18SC_1$，V_2 越小越好，同时 $V_2=S(L_2-L_1)$，第 II 层权重应较小，即：

$$\frac{m_2}{m_4}=\frac{\rho_2 V_2}{\rho_4(C_1-V_2)}=\frac{862V_2}{1.18(C_1-V_2)} \tag{31}$$

4.2.2. 着重考虑服装体积因素

考虑体积因素同样需要满足总质量和总厚度为定值等约束条件，利用质量与体积的关系建立总体积表达式：

$$V=V_2+V_4=\frac{m_2}{\rho_2}+\frac{C_4-m_2}{\rho_4}=\frac{m_1(\rho_4-\rho_2)+C_4\rho_2}{\rho_2\rho_4} \tag{32}$$

其中 V 为第 II 层和第 IV 层的总体积，依附件一所给数据 $\rho_2=862\ \mathrm{kg/m_3}$，$\rho_4=1.18\ \mathrm{kg/m_3}$，将其代入上式得 $V=\dfrac{-860.82m_2+862C_4}{1017.16}$，$m_2$ 较大，同时 $m_2=\rho_2 S(L_2-L_1)$，第 II 层权重较大，确定 $\omega_2:\omega_4=0.65:0.35$，将该权重代入目标函数：

$$\min 0.65(L_2-L_1)+0.35(L_4-L_3) \tag{33}$$

4.2.3. 着重考虑服装厚度因素

此种情况下优化目标为服装厚度，在保证总质量和总体积为定值的情况下使服装厚度 D 尽量小，利用织物体积与织物表面积之间的关系建立如下厚度表达式：

$$D=L_2-L_1+L_4-L_3=\frac{V_2}{S}+\frac{C_5-V_2}{S}=\frac{C_5-2V_2}{S} \tag{34}$$

其中 S 为每一层表面积，同时 $V_2=S(L_2-L_1)$，即 $\omega_2:\omega_4=0.5:0.5$。

本题属函数优化问题，随问题规模的增大组合优化问题的搜索空间剧增，在目前的计算上用枚举法或二分法很难求出最优解。对这类复杂的问题应把主要精力放在寻求满意解上，而遗传算法是寻求这种满意解的最佳工具之一。侧重服装质量时 $d_2=11.4\ \mathrm{mm}, d_4=1.6\ \mathrm{mm}, t=245\ \mathrm{s}$；侧重服装体积时 $d_2=9.8\ \mathrm{mm}, d_4=5.8\ \mathrm{mm}, t=266\ \mathrm{s}$；侧重服装厚度时 $d_2=10.7\ \mathrm{mm}, d_4=20\ \mathrm{mm}, t=263\ \mathrm{s}$。

5. 结论

本文的主要工作在于，首先，根据热传导的三种方式及能量守恒定律建立各层织物间热传导模型。在实际情况中，服装内部空气流动及人体汗液蒸发等都会对热传递产生影响，因此，本文定义了补偿函数 H，使仿真结果尽可能贴近测量值。将有限差分的思想对热传导模型进行求解，并用最小二乘拟合使仿真所得人体表面温度与附件 2 测量数据的均方误差尽可能小。其次，以第 II 层织物厚度最小作优化目标，通过调整厚度，控制人体表面温度不超过 47℃，且超过 44℃的时间不超过 5 分钟，以此建立不等式约束，同时根据修正后的一维热传导方程建立非完整约束。并以第 II 层织物厚度为决策变量构建非线性规划模型。最后，分别从服装总厚度，总质量和总体积出发，确定目标函数，寻找不同目标下的最优厚度并用遗传算法进行求解。

基金项目

海南省自然科学基金高层次人才项目(2019RC168)和海南大学理学院教改项目(LXJG202002)资助。

参考文献

[1] 卢琳珍. 多层热防护服装的热传递模型及参数最优决定[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.

[2] Santos, M.S., Oliveira, D., Campos, J.B.L.M. and Mayor, T.S. (2018) Numerical Analysis of the Flow and Heat Transfer in Cylindrical Clothing Microclimates—Influence of the Microclimate Thickness Ratio. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.102

[3] 李紫含, 王世杰, 徐伯乐, 谢恬, 张英. 热防护服降温效果评价体系研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2018, 40(1): 16-20.

[4] 张旭清, 黄文竹.一维热传导方程的差分法[J]. 科技视界, 2019(7): 118-120.

[5] 潘斌. 热防护服装热传递数学建模及参数决定反问题[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.

[6] 张烨, 张晓, 惠欢欢, 慕涛涛. 基于热防护服温度分布的数学模型建立[J]. 科技风, 2019(8): 59+61.

[7] 宋银银, 梁琪均, 赵欣琦. 高温作业专用服装设计[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(11): 53-54.

[8] 姚沃成, 傅宇辉, 江俊贤. 高温作业专用服装设计的数学模型[J]. 电子测试, 2019(Z1): 63-65.

[9] 崔荣升, 马晨光, 宋思博, 王冰琦. 基于热传导的高温作业专用服装设计[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(7): 40-42.

[10] 魏延, 吴焱, 陈航. 基于多层热防护服的温度分布研究[J]. 科学技术创新, 2019(1): 38-39.

[11] 张学锋, 濮程, 汤亚玲. 基于线性规划的智能炼铁配料系统[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(4): 83-89.

[12] 张永强, 李思凡, 张玉莹. 基于线性规划模型的公路运输企业成本优化研究[J]. 物流工程与管理, 2019, 41(4): 38-40.

[13] 张晓彤. 基于改进遗传算法面向多周期订单的动态制造单元构建[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.

[14] 龚艺, 冉金超, 侯明明. 基于遗传算法的多目标外卖路径规划[J]. 电子技术与软件工程, 2019(10): 157-159.