



高温环境下热防护服的温度分布研究

孙浩然¹, 吴宏聪¹, 张嘉墀¹, 李明奇²

(1. 电子科技大学 信息与通信工程学院, 成都 611731; 2. 电子科技大学 数学科学学院, 成都 611731)

摘要: 针对高温环境下热防护服的温度分布及各层厚度优化问题, 利用热传导规律及逐步优化方法, 建立了多层介质中的一维热传递模型和优化搜索模型。首先, 根据防护服不同层前后分界面的温度连续性和热传递速率相等的特点, 结合一维热传导方程, 建立了各层介质中热传递的偏微分方程以及相应的初始条件和边界条件。为了确定所建模型的参数, 该文建立了逐步优化模型, 采用变步长搜索算法进行搜索。然后应用基于 C-N 格式的有限差分法对定解问题模型进行数值求解, 得到从衣服外层一点到人体皮肤的温度分布。为确定满足温度条件的各防护层的厚度, 该文建立了基于防护层厚度的优化模型, 并应用变步长搜索算法进行求解, 得到最优厚度值。最后对模型进行灵敏度分析, 验证了模型的稳定性及可行性。

关键词: 热防护服温度分布模型; 热量传递模型; 变步长搜索算法; C-N 格式

中图分类号: O141.4

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20190136

Research on Temperature Distribution of Thermal Protective Clothing in High Temperature Environment

SUN Haoran¹, WU Hongcong¹, ZHANG Jiachi¹, LI Mingqi²

(1. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. School of Mathematical Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Given that the law of heat conduction and technique of stepwise refinement are utilized to tackle the problems of thermal protective clothing, for instance, temperature distribution and the thickness of each layer in high temperature environment, hence one-dimensional heat transfer model and optimization search models in multilayered medium are established. Firstly, in accordance with the characteristics such as the continuity of temperature and equal heat transfer rate between front and back interfaces of different layers of protective clothing, this paper has set up the partial differential equation of heat transfer in multilayered medium and the corresponding initial and boundary conditions after a combination of one-dimensional heat transfer equation. In order to determine the parameters in proposed models, this paper has established a stepwise refinement model by adopting the variable step search algorithm. Secondly, the finite difference method based on C-N scheme is applied to numerically solve the definite problem model and obtain the temperature distribution from the outer layer of clothing to human skin. In order to determine the thickness of each protective layer that meets the temperature conditions, this paper has established the optimization model based on the thickness of the protective layer, and obtains the optimal thickness by applying the variable step search algorithm in numerical solution. Finally, sensitivity analysis of the model is carried out to verify the stability and feasibility of the model.

Key words: temperature distribution model of thermal protective clothing; heat transfer model; variable step search algorithm; C-N scheme

在高温环境下工作时, 人们需要穿着专用服装^[1]以避免灼伤。专用服装通常由三层织物材料

构成, 记为 I、II、III 层, 其中 I 层与外界环境接触, III 层与皮肤之间存在空隙, 将此空隙记为

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-11-12

基金项目: 四川省 2018—2020 年高等教育人才培养质量和教学改革项目。

作者简介: 孙浩然(1998-), 男, 本科生, 通信工程专业。

通信作者: 李明奇(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事应用数学和算法设计方面的研究。E-mail: lmqi2000@126.com

IV 层^[2]。2018 年全国大学生数学建模竞赛 A 题, 需要建立在给定数据下热防护服各层内温度分布模型^[3], 并结合成本及热防护服的性能需求确定其最优厚度。为此, 需要如下基本假设:

- 1) 假设热传递方向垂直皮肤;
- 2) 假设热防护服装的织物材料各项同性;
- 3) 假设题中所给的数据均真实可靠;
- 4) 假设热传递过程中织物结构不发生改变。

1 多层介质中的一维热量传递模型

1.1 热对流模型

热量从外界环境向防护服传递时, 传递方式包含热传导、热对流和热辐射。建立如图 1 所示的坐标系, $L_I, L_{II}, L_{III}, L_{IV}$ 分别为 I~IV 层的介质区域厚度。外界的热量向 I 层传递时, 传热的介质为空气, 故热量从外界环境传递到 I 层织物与外界的分界面时是以热对流的方式传递, 在 I 层织物中热量的传递方式为热传导。由于 IV 层空气层的厚度值不超过 6.4 mm, 热对流影响小, 因而不考虑热对流; 故在 II、III、IV 层中热量的传递方式只有热传导^[4]。各层织物的初始温度应为室温 37℃: $T(x, 0)=37$ 。

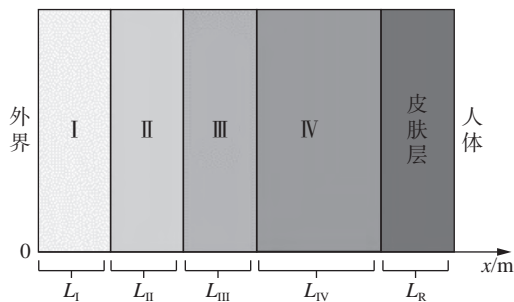


图 1 坐标系的建立

对于外界环境与 I 层介质的分界面而言, 热量从外界以热对流的方式传递到分界面。对流传热常用对流传热速率这一物理量描述。对流传热速率为 $\phi=\alpha S(T_w-T_{|x=0})$ 瓦特^[5]。其中 T_w 为外界环境温度 75℃, $T_{|x=0}$ 为分界面处的温度, α 为对流传热系数, S 为传热面积。

外界通过热对流传的热量与分界面吸收的热量相等:

$$Q = \phi \Delta t = \alpha S (T_w - T_{|x=0}) \Delta t = c_I \rho_I S d \Delta T_0(t) \quad (1)$$

1.2 一维热传导方程

在服装系统的 I~IV 层中, 热量是以热传导的

方式进行传递。其热传导模型^[6]为:

$$T_t = a_i T_{xx} \quad (2)$$

I~IV 层以及皮肤层的系数分别为:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{k_I}{c_I \rho_I} \\ a_2 = \frac{k_{II}}{c_{II} \rho_{II}} \\ a_3 = \frac{k_{III}}{c_{III} \rho_{III}} \\ a_4 = \frac{k_{IV}}{c_{IV} \rho_{IV}} \\ a_5 = \frac{k_R}{c_R \rho_R} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_I, k_{II}, k_{III}, k_{IV}$ 分别为 I~IV 层的热传导率; $\rho_I, \rho_{II}, \rho_{III}, \rho_{IV}$ 分别为 I~IV 层织物的密度; $c_I, c_{II}, c_{III}, c_{IV}$ 分别为 I~IV 层织物的比热容; T 为温度; t 为时间, $t \in (0, t_{\max}]$, t_{\max} 为处于在高温环境中的时间; k_R, c_R 和 ρ_R 分别代表假人皮肤的热传导率、比热容和密度; L_R 代表假人皮肤的厚度。

由于不同介质之间的边界满足温度连续性和热传导速度相等^[7], 可以得到各层介质分界面的边界条件, 如 I 层与 II 层介质分界面的边界条件为:

$$T|_{x=L_I} = T|_{x=L_I}, -k_I T_x|_{x=L_I} = -k_{II} T_x|_{x=L_I} \quad (4)$$

1.3 初始条件与边界条件

在各层介质中, 热量传递过程满足相同的热传导式(2), 其初始条件与边界条件分别描述如下。

I 层:

$$\begin{cases} T(0, t) = T_0(t), \\ -k_I T_x|_{x=L_I} = -k_{II} T_x|_{x=L_I} \\ T(x, 0) = 37 \end{cases} \quad (5)$$

II 层:

$$\begin{cases} T(x, 0) = 37, \\ -k_I T_x|_{x=L_I} = -k_{II} T_x|_{x=L_I} \\ -k_{II} T_x|_{x=L_I+L_{II}} = -k_{III} T_x|_{x=L_I+L_{II}} \end{cases} \quad (6)$$

III 层:

$$\begin{cases} T(x, 0) = 37, \\ -k_{II} T_x|_{x=L_I+L_{II}} = -k_{III} T_x|_{x=L_I+L_{II}} \\ -k_{III} T_x|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}} = -k_{IV} T_x|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}} \end{cases} \quad (7)$$

IV 层:

$$\begin{cases} T(x, 0) = 37, \\ -k_{III} T_x|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}} = -k_{IV} T_x|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}} \\ -k_{IV} T_x|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}+L_{IV}} = -k_R T_x|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}+L_{IV}} \end{cases} \quad (8)$$

假人皮肤层:

$$\begin{cases} T(x, 0) = 37, \\ -k_{IV} T_x|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}+L_{IV}} = -k_R T_x|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}+L_{IV}} \\ T(x, t)|_{x=L_I+L_{II}+L_{III}+L_{IV}+L_R} = 39 \end{cases} \quad (9)$$

综上,各段的热传导模型可以由一维热传导式(2)与各段对应的初始边界条件式(5)~式(9)形成的定解问题建立。

2 C-N 格式的有限差分算法

为了降低截断误差,本文采用改进的隐式差分算法即 C-N 格式有限差分算法求解各段的热

传导定解问题^[8]。对热传导式(2)的横坐标 x 和时间 t 进行离散化:分别均匀离散成 m 和 n 段。相邻位置间的距离记为 h , 相邻时间差记为 τ : $x=ih$, $t=j\tau$ 。

用一阶中心差商代替 $t=(j+1)/2$ 时刻、位置 i 处温度对时间的偏导数 T_t , 用二阶中心差商代替 $t=j$ 时刻和 $t=j+1$ 时刻、位置 i 处温度对位置的二阶偏导数 T_{xx} 。令 $r=k\tau/(cph^2)$, 得:

$$-rT_{i-1}^{j+1} + 2(1+r)T_i^{j+1} - rT_{i+1}^{j+1} = rT_{i-1}^j + 2(1-r)T_i^j + rT_{i+1}^j \quad (10)$$

令 T_i^j 表示 j 时刻、位置 i 处的温度值, 建立一维热传导方程的数值解算法:

$$\begin{cases} 2(1+r)T_1^{j+1} - rT_2^{j+1} = rT_0^j + 2(1-r)T_1^j + rT_2^j + rT_0^{j+1} \\ rT_1^{j+1} + 2(1+r)T_2^{j+1} - rT_3^{j+1} = rT_1^j + 2(1-r)T_2^j + rT_3^j \\ rT_2^{j+1} + 2(1+r)T_3^{j+1} - rT_4^{j+1} = rT_2^j + 2(1-r)T_3^j + rT_4^j \\ \vdots \\ rT_{m-3}^{j+1} + 2(1+r)T_{m-2}^{j+1} - rT_{m-1}^{j+1} = rT_{m-3}^j + 2(1-r)T_{m-2}^j + rT_{m-1}^j \\ rT_{m-2}^{j+1} + 2(1+r)T_{m-1}^{j+1} = rT_{m-2}^j + 2(1-r)T_{m-1}^j + rT_m^j + rT_m^{j+1} \end{cases}$$

各离散位置温度的求解转化为求解 $AT=b$:

$$A = \begin{pmatrix} 2(1+r) & -r & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -r & 2(1+r) & -r & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 2(1+r) & -r & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -r & 2(1+r) & -r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -r & 2(1+r) \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} rT_0^j + 2(1-r)T_1^j + rT_2^j + rT_0^{j+1} \\ rT_1^j + 2(1-r)T_2^j + rT_3^j \\ \vdots \\ rT_{m-2}^j + 2(1-r)T_{m-1}^j + rT_m^j + rT_m^{j+1} \end{pmatrix}$$

$$T = [T_1^{j+1} \quad T_2^{j+1} \quad T_3^{j+1} \quad \cdots \quad T_{m-2}^{j+1} \quad T_{m-1}^{j+1}]^T$$

其中,系数矩阵 A 是三对角矩阵。由于该热传导体由多种介质组成,因此两种介质交界处的边界条件也需要进行离散化,即:

$$k_a \Delta T|_{x=L_a} = k_{a+1} \Delta T|_{x=L_{a+1}} \quad (11)$$

式中, k_a 代表第 a 层介质的热传导率, L_a 代表第

a 层介质右边界的坐标值。

利用 C-N 格式的有限差分算法对模型进行以下 6 步求解。

1) 将热传导偏微分方程进行离散化处理。考虑偏微分方程收敛条件^[9]以及计算的复杂度,将热防护衣物与假人组成的系统的厚度离散为 216 点,相邻距离点之间距离间隔为 0.1 mm,时间离散为 54 000 000 点,相邻时间点之间的时间间隔为 0.000 1 s。

2) 利用已知的介质参数等数据计算得到 r 的值,进而得到 A 、 T 和 b 三个矩阵。

3) 计算当前时间层下第 i ($2 \leq i \leq 215$) 层介质的温度分布数据并计算第 $i+1$ 层介质的左边界条件。

4) 循环步骤 3), 直至当前时间层所有位置温度分布数据全部求出。

5) 利用当前时间层数据, 代入执行步骤 2)~步骤 4) 即可得到下一时间层数据。

6) 如上依次迭代计算, 即可最终得到所有时刻所有位置的温度值。

3 未知参数的确定

本文引入了外界环境的对流传热系数 α 、假人皮肤的热传导率 k_R 、比热容 c_R 、密度 ρ_R 和厚度 L_R 等未知参量。在求解偏微分方程定解问题时, 需要确定的参量有: 外界环境的对流传热系数 α 、假人皮肤中热传导方程的系数 $R=k_R/c_R\rho_R$ 和假人皮肤的厚度 L_R 。为此, 本文建立如下优化搜索^[10]模型。

1) 首先对 R 进行搜索。选取 $L_R=5\text{ mm}$, $\alpha=0.2$, 以 0.01 mm 为步长对 R 进行搜索。优化目标函数为:

$$\min\{\text{sum}[(T_{C\text{balance}} - T_{A\text{balance}})^2]\} \quad (12)$$

约束条件为 $L_R=5\text{ mm}$, $\alpha=0.2$ 。遍历区间为 $[0.1, 0.17]$, 以 0.01 mm 为步长, 搜索得到 R 最优解为 $R=0.15$ 。

2) 变步长逐步逼近法搜索 L_R 。选取 $\alpha=0.2$, 步长为 1 mm , 对 L_R 进行搜索。优化目标函数为:

$$\min(T_{C\text{balance}} - T_{A\text{balance}}) \quad (13)$$

约束条件为 $L_R \in [0, 10]$ 。搜索得到最佳解的范围为 $[5, 7]$ 。再设置步长为 0.1 mm 进一步搜索, 优化目标函数不变, 得到 x 的最优解为 6.3 mm 。

3) 变步长逐步逼近法搜索 α 。选取 $L_R=6.3\text{ mm}$, $R=0.15$, 以步长 0.1 , 对 α 进行搜索。优化目标函数为:

$$\min(t_{C\text{balance}} - t_{A\text{balance}}) \quad (14)$$

约束条件为 $L_R=6.3\text{ mm}$, $\alpha \in [0, 0.7]$, 搜索后, 得到最优解 $\alpha=0.4$ 。

4 结果分析和灵敏度分析

4.1 结果分析

在求解出未知参量后, 本文应用 C-N 格式的有限差分法对热量的传递模型进行求解, 得到不同位置在不同时刻的温度值, 部分结果如表 1 所示。温度的分布图像如图 2 所示, 随着横坐标的增加, 温度从 75°C 开始逐渐降低, 在假

人皮肤外侧处达到 37°C 。为了检验结果的准确性, 本文取计算得到的假人皮肤外侧的温度分布, 与题目中所给的原始数据进行对比, 结果如图 3 所示。

表 1 部分温度数值

| 时间/s | I层 | | | II层 | | | ... |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | 温度/°C | | | 温度/°C | | | |
| 1.00 | 37.00 | 37.00 | 37.00 | 37.00 | 37.00 | 37.00 | ... |
| 2.00 | 49.55 | 40.44 | 39.60 | 38.93 | 37.00 | 37.00 | ... |
| | | | ... | | | | |

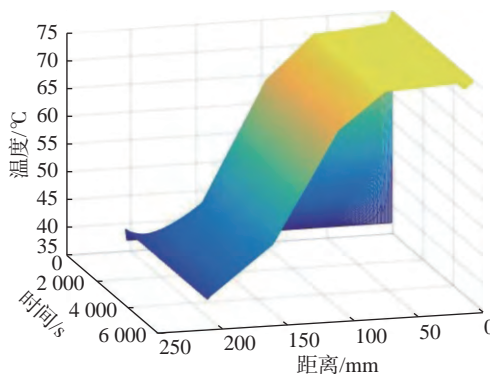


图 2 温度分布图

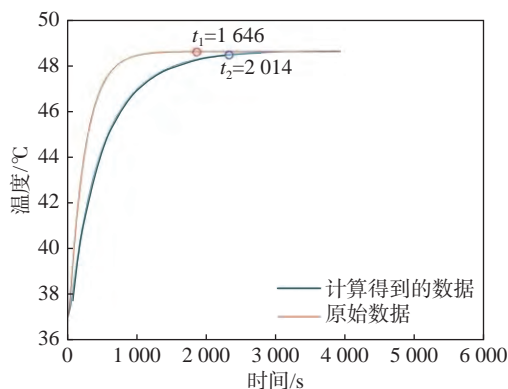


图 3 通过计算得到的数据与题目中所给原始数据的对比

从图 3 中可以看出, 计算得到的数据与原始数据的变化趋势是一致的, 达到平衡时的最终温度也是一致的。不同的是达到平衡所需要的时间: 计算得到的数据达到平衡所用时间比原始数据的要长。这说明, 本文的模型具有一定的误差, 但误差不大, 在可接受范围内。

4.2 灵敏度分析

本文对模型的稳定性^[11]进行分析, 将外界环境的对流传热系数 α 微调 20% , 分别得到在同一时刻温度与距离的关系图像以及同一位置温度与时间的关系图像, 如图 4 和图 5 所示。与微调参

数前的数据进行比对, 计算残差值如表 2 所示。从图中可以看出, 微调前后图像的差别很小。相应地, 从表 2 中得出微调前后的残差值较小。因此, 本文建立的模型具有很好的稳定性。

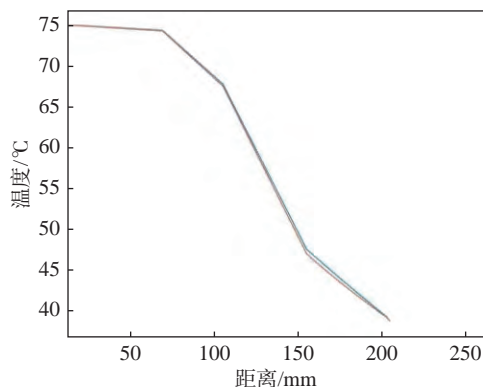


图4 微调前后温度与距离的关系

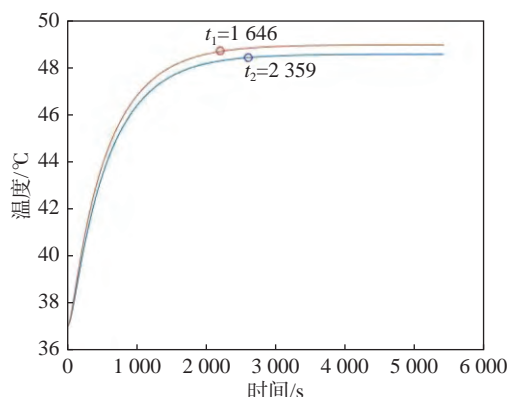


图5 微调前后温度与时间的关系

表2 残差值

| | | | |
|--------------------|------------|-----|------------|
| 微调 α 同一时刻不同 | 0.000 034 | ... | 0.023 789 |
| 距离温度值残差 | 0.248 072 | ... | 0.000 000 |
| 微调 α 同一距离不同 | 0.000 000 | ... | 0.000 015 |
| 时刻温度值残差 | -0.395 244 | ... | -0.395 245 |

5 模型应用

5.1 单目标优化模型

考虑服装公司的成本和防护服的性能要求两方面因素, 本文建立单目标优化模型对满足性能要求情况下 II 层织物的最优厚度进行求解。

本文的目标是使得 II 层织物的厚度最小, 故目标函数为:

$$\min\{L_{II}\} \quad (15)$$

关于约束条件, 需要考虑以下几点。

1) II 层织物厚度的范围为 [0.6, 25], 即:

$$0.6 \text{ mm} \leq L_{II} \leq 25 \text{ mm} \quad (16)$$

2) 工作 60 min 时, 假人皮肤外侧温度不超过 47°C。对问题一进行分析, 可以得到结论: 随着在高温环境中工作时间的增加, 假人皮肤外侧温度先逐渐上升, 再慢慢达到平衡。故工作时间的最大值一定对应这段时间内假人皮肤外侧温度的最大值。即:

$$T|_{t=3600 \text{ s}} \leq 47^\circ\text{C} \quad (17)$$

3) 工作的 60 min 里, 超过 44°C 的时间不超过 5 min, 即:

$$\Delta t|_{T>44^\circ\text{C}} \leq 300 \text{ s} \quad (18)$$

式中, Δt 代表一个时间段, $\Delta t|_{T>44^\circ\text{C}}$ 代表假人皮肤外侧温度超过 44°C 的时间。

综上所述, 本文建立的单目标优化模型为:

$$\begin{aligned} & \min\{L_{II}\} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} 0.6 \text{ mm} \leq L_{II} \leq 25 \text{ mm} \\ T|_{t=3600 \text{ s}} \leq 47^\circ\text{C} \\ \Delta t|_{T>44^\circ\text{C}} \leq 300 \text{ s} \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

为了对上述单目标优化模型进行求解, 采用变步长搜索算法, 在 II 层织物厚度的范围 [0.6, 25] 内进行搜索。

1) 在 II 层织物厚度的范围 [0.6, 25] 内, 使用爬山设置步长为 1 mm 进行初步搜索, 得到 II 层织物厚度最优解的粗略解范围为 [9, 10]。

2) 由于初步搜索结果比较粗略, 为了得到更精确的结果, 在步骤 1) 粗略解的范围内进行搜索, 以 0.05 mm 为步长, 采用模拟退火法^[12]进行精细搜索, 得到 II 层织物厚度最优解为 9.55 mm。

5.2 多目标优化模型

当环境温度为 80°C 时, 确定 II 层和 IV 层的最优厚度, 确保工作 30 min 时, 假人皮肤外侧温度不超过 47°C, 且超过 44°C 的时间不超过 5 min。

针对上述问题, 本文需要解决的问题是在满足防护要求的前提下求解 II 层和 IV 层织物厚度的最小值。因此本文建立了多目标优化模型。

本文的目标是使得 II 层和 IV 层织物的厚度最小, 即目标函数为:

$$\begin{cases} \min\{L_{II}\} \\ \min\{L_{IV}\} \end{cases} \quad (20)$$

关于约束条件, 需要考虑以下几点。

1) II 层和 IV 层织物的厚度范围分别为 [0.6,

25] 和 [0.6, 6.4], 即:

$$0.6 \text{ mm} \leq L_{II} \leq 25 \text{ mm} \quad (21)$$

$$0.6 \text{ mm} \leq L_{IV} \leq 6.4 \text{ mm} \quad (22)$$

2) 工作 30 min 时, 假人皮肤外侧温度不超过 47℃, 即:

$$T|_{t=1800 \text{ s}} \leq 47^\circ\text{C} \quad (23)$$

3) 工作的 30 min 里, 超过 44℃ 的时间不超过 5 min, 即:

$$\Delta t|_{T>44^\circ\text{C}} \leq 300 \text{ s} \quad (24)$$

式中, $\Delta t|_{T>44^\circ\text{C}}$ 代表假人皮肤外侧温度超过 44℃ 的时间。

综上, 建立多目标优化模型:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \min\{L_{II}\} \\ \min\{L_{IV}\} \\ 0.6 \text{ mm} \leq L_{II} \leq 25 \text{ mm} \\ 0.6 \text{ mm} \leq L_{IV} \leq 6.4 \text{ mm} \\ T|_{t=1800 \text{ s}} \leq 47^\circ\text{C} \\ \Delta t|_{T>44^\circ\text{C}} \leq 300 \text{ s} \end{cases} \quad (25)$$

在对上述多目标优化模型进行求解时, 本文依然采用变步长搜索算法。由于需要求解 II 层和 IV 层织物的厚度, 所以在二维空间中进行搜索。

1) 在 L_{II} 和 L_{IV} 构成的二维空间中进行初步搜索, 搜索的范围为:

$$\{(L_{II}, L_{IV}) | 0.6 \leq L_{II} \leq 25, 0.6 \leq L_{IV} \leq 6.4\}$$

以 1 mm 为步长, 应用爬山法得到最优解的粗略值为:

$$L_{II} = 20 \text{ mm}, L_{IV} = 6 \text{ mm}$$

2) 为了得到更加精确的最优解, 在求得的最优解附近的一个区域内应用模拟退火算法进行精细搜索。搜索的区域为:

$$\{(L_{II}, L_{IV}) | 18 \leq L_{II} \leq 22, 5 \leq L_{IV} \leq 6.4\}$$

以步长 0.05 mm 在上述区域内进行搜索, 最终得到精度较高的 II 层和 IV 层织物厚度的最优解为:

$$L_{II} = 19.95 \text{ mm}, L_{IV} = 6.35 \text{ mm}$$

6 未来工作方向

1) 考虑各介质间隙中可能出现的温度跳变现象, 同时引入间隙中的空气介质热传导模型, 使

系统更加贴合实际。

2) 在确定假人皮肤层相关参数时, 考虑使用遗传算法对 3 个参量联合求解, 以获得精度更高的结果。

3) 针对多目标优化模型, 考虑结合实际情况将目标进行加权组合, 从而得到更合理的解。

7 结束语

本文对多层介质中热传导规律进行了深入研究, 建立了基于多层防护服的热传导求解问题模型。应用 C-N 格式的有限差分算法对所建立模型进行了求解, 所得结果与原始数据具有高度一致性。对模型参数的灵敏度分析显示, 模型具有稳定性。所得结果可以为热防护设计提供参考。

参考文献

- [1] 张英, 胡琴, 李紫含, 等. 热防护服降温效果评价指标与方法研究进展[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(3): 46-49.
- [2] 卢琳珍, 徐定华, 徐映红. 应用三层热防护服热传递改进模型的皮肤烧伤度预测[J]. 纺织学报, 2018, 39(1): 111-118.
- [3] 杨杰. 基于人体-服装-环境的高温人体热反应模拟与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [4] TORVI D A, ENG P, THRELFALL T G. Heat transfer model of flame resistant fabrics during cooling after exposure to fire[J]. Fire Technology, 2005, 42(1): 27-48.
- [5] 孙跃. 二维方腔内空气对流数值研究[D]. 辽宁: 工程技术大学, 2013.
- [6] 卢琳珍. 多层热防护服装的热传递模型及参数最优决定[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
- [7] 潘斌. 热防护服装热传递数学建模及参数决定反问题[D]. 浙江理工大学, 2017.
- [8] 任丽丽, 朱少红, 赵凤柱. 热传导方程基于C-N格式的并行差分方法及其数值分析[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2010, 30(4): 12-16.
- [9] 许亚瑞, 董晓芬, 庞明勇. 一种热传导过程的计算机仿真及可视化方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 1064-1070.
- [10] 丁文春, 张杭. 优化搜索方向的自然梯度盲分离算法[J]. 军事通信技术, 2017, 38(2): 12-16.
- [11] 张权, 史治宇. 加权方法在基于灵敏度分析的模型修正中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(6): 85-88.
- [12] 司守奎, 孙兆亮. 数学建模算法与应用[M]. 2版, 北京: 国防工业出版社, 2017: 323-329.

编辑 张俊