

高温作业服设计

刘 强, 段晨光, 余 昊

指导教师: 指导教师组

(武汉大学, 武汉 430072)

编者按: 该论文建立了一维热传导方程模型来研究高温作业热量传递问题, 给出了相应的初边值条件以及各层之间交界面条件, 采用非线性最小二乘法确定了边界条件中的两个未知参数. 在此基础上, 建立了优化模型给出了作业服厚度的最优设计, 得到了较好的结果. 论文的不足之处是在求解热传导定解问题时, 采用了显式差分格式, 虽然注意到了显式格式的稳定性条件, 但为了满足稳定性条件, 时间步长取得较小, 空间步长取得较大, 从而降低了计算精度, 增加了计算时间.

摘 要: 本文研究了高温作业服的一维非稳态传热过程, 建立基于能量守恒定律的偏微分控制方程组, 确定初边值条件及交界面连续条件, 利用有限差分法求解方程组, 并建立基于最小二乘原理的参数估计模型. 求解得到两端换热系数的参数估计值分别为: $113 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 和 $8.344 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$. 根据参数估计结果分别建立以第二层厚度最小为目标的单变量优化模型和综合考虑舒适性、节约性、性能稳定性和研发效率等因素的多目标优化模型, 得到满足约束条件的最优高温作业服设计.

关键词: 非稳态一维传热过程; 有限差分法; 优化模型

分类号: AMS(2010) 80A23

中图分类号: O29

文献标识码: A

1 模型假设及符号说明

高温作业服由三层不同织物和一层空气层组成, 在不同环境温度和设计要求下, 求解作业服的优化设计方案. 本文建立的高温作业服非稳态一维传热过程的数学描述, 主要考虑如下基本假设:

- 假设 1** 不考虑作业服水汽、汗液蒸发等传热传质过程;
假设 2 以第四层(空气层)底层温度表示人体皮肤外侧温度;
假设 3 不考虑接触面之间的接触热阻, 认为接触面界面连续;
假设 4 简化为一维传热问题, 不考虑其他不均匀热源和传热过程.
变量及符号说明, 如表 1 所示.

表 1: 符号说明

变量	说明	量纲
$\lambda_j (j = 1, 2, 3, 4)$	第 j 层材料的导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
$\rho_j (j = 1, 2, 3, 4)$	第 j 层材料的材料密度	kg/m^3
$C_j (j = 1, 2, 3, 4)$	第 j 层材料的比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
h_1	第一层材料与外界的对流换热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
h_2	第四层材料与人体对流换热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
q	热流密度	$\text{W}/(\text{m}^2)$

续表 1: 符号说明

变量	说明	量纲
T	作业服温度	$^{\circ}\text{C}$
T_{ren}	人体温度 (37°C)	$^{\circ}\text{C}$
T_{en}	环境温度	$^{\circ}\text{C}$
$d_j (j = 1, 2, 3, 4)$	第 j 层材料的厚度	mm

2 问题 1: 非稳态传热模型

建立高温作业服一维非稳态传热问题的数学刻画, 并基于最小二乘原理求解两端换热系数的最优参数估计.

2.1 模型建立: 非稳态传热模型

2.1.1 传热控制方程

依据能量守恒定律建立非稳态偏微分控制方程, 即: 对任一微元体, 其热力学能的变化 (表现为温度变化) 等于流入流出微元体热流量的差值^[1]. 控制方程为

$$\rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (1)$$

2.1.2 边界条件及初值条件

作业服两端定解条件均为第三类边界条件, 作业服温度分布的初始条件为假人温度 37°C .

$$\begin{cases} -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_1 (T_{en} - T(0, t)), \\ -\lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_2 (T(L, t) - T_{ren}), \\ T(x, 0) = T_{ren}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 h_1 和 h_2 分别表示两端的对流传热系数, $T(0, t)$ 和 $T(L, t)$ 分别表示作业服两端界面温度, $T(x, 0)$ 为作业服初始条件, T_{en} 表示环境温度, T_{ren} 表示人体温度.

2.1.3 材料接触面连续条件

对于不均匀材料导热问题, 忽略接触热阻, 满足界面连续条件, 即满足界面上温度与热流密度连续条件

$$\begin{cases} T(x_i^-, t) = T(x_i^+, t), \\ \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} (x_i^-, t) = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial x} (x_i^+, t), \quad i = 1, 2, 3, 4. \end{cases} \quad (3)$$

2.1.4 换热系数参数估计

在非稳态一维传热模型中, 两端换热系数为未知量, 通过非线性最小二乘法建立参数估计模型

$$(\hat{h}_1, \hat{h}_2) = \arg \min_{h_1, h_2} \sum_{i=1}^N [T(L, t; h_1, h_2) - T_i^*]^2, \quad (4)$$

其中 \hat{h}_1, \hat{h}_2 为 h_1 和 h_2 的最小二乘估计值, T_i^* 为附件 2 中皮肤外侧温度测量值.

2.1.5 模型综合

参数估计

$$(\hat{h}_1, \hat{h}_2) = \arg \min_{h_1, h_2} \sum_{i=1}^N [T(L, t; h_1, h_2) - T_i^*]^2.$$

控制方程

$$\rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad j = 1, 2, 3, 4.$$

边界条件

$$\begin{cases} -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \big|_{x=0} = h_1 (T_{en} - T(0, t)), \\ -\lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x} \big|_{x=L} = h_2 (T(L, t) - T_{ren}). \end{cases}$$

界面条件

$$\begin{cases} T(x_i^-, t) = T(x_i^+, t), \\ \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x}(x_i^-, t) = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial x}(x_i^+, t), \quad i = 1, 2, 3, 4. \end{cases}$$

初始条件

$$T(x, 0) = T_{ren}.$$

2.2 模型求解

2.2.1 有限差分法

传热问题数值求解的基本思想是用有限差分法将时间、空间上的连续物理量离散在各个节点上，进而求解物理量的数值解^[2]。

1) 差分格式

差分格式有显式和隐式两种。对于显式格式，求解计算量更小，但精度及稳定性不如隐式格式；隐式差分必须求解线性方程组，稳定性和精度较高但计算量较大。由于本问题离散后数据量较大，故采用显式差分格式。本文采用显式差分格式对传热模型进行离散。求解第 $n+1$ 层时间上温度时，依赖于第 n 层时间温度信息。控制方程的离散格式中仅有一个未知量 T_i^{n+1} 。

控制方程

$$\Delta x_j \rho_j c_j \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \lambda_j \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x_j}.$$

边界条件

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \Delta x_1 \rho_1 c_1 \frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\Delta t} = -h_1 (T_1^n - T_{en}) - \lambda_1 \frac{T_1^n - T_2^n}{\Delta x_1}, \\ \frac{1}{2} \Delta x_4 \rho_4 c_4 \frac{T_{end}^{n+1} - T_{end}^n}{\Delta t} = -h_2 (T_{end}^n - T_{ren}) + \lambda_4 \frac{T_{end}^n - T_{end-1}^n}{\Delta x_4}. \end{cases}$$

接触界面

$$\frac{1}{2} (\Delta x_j \rho_j c_j + \Delta x_{j+1} \rho_{j+1} c_{j+1}) \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \lambda_j \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{\Delta x_j} + \lambda_{j+1} \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x_{j+1}}.$$

2) 稳定限制条件

对于显式差分格式，非稳态传热过程的离散求解需要考虑求解的稳定性条件。上述显式差分格式表明，空间节点 i 上时间节点 $n+1$ 时刻的温度受到左右两侧邻点的影响，需要满足稳定性限制条件（傅里叶网格数限制），否则会出现不合理的振荡的解^[3]。

内节点限制条件

$$Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2}.$$

边界限制条件

$$Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2(1 + \frac{h\Delta x}{\lambda})},$$

其中

$$Fo_{\Delta} = \frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2}$$

为傅里叶网格数.

2.2.2 求解步骤

对非稳态传热模型进行时间-空间离散化后, 在时间节点和空间节点上逐层进行求解. 进而搜索求解未知系数 h_1 与 h_2 , 得到对实测温度数据的最优拟合. 具体求解步骤如下:

步骤1 代入 h_1 和 h_2 初始值, 通过非稳态传热模型离散方程逐层求解, 得到假人皮肤外侧温度值;

步骤2 计算上一步求得的温度值与实测值的误差平方和;

步骤3 更新 h_1 与 h_2 值, 再次带入离散方程进行求解, 得到新的温度值;

步骤4 重复步骤1与步骤3, 搜索寻优找到拟合程度最佳的对流传热系数, 并应用于后续作业服设计;

步骤5 根据搜索得到的对流传热系数估计值, 计算作业服温度分布.

2.3 结果展示及分析

根据上述求解步骤进行求解, 搜索得到对流传热系数的最小二乘估计

$$h_1 = 113 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}), \quad h_2 = 8.344 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}).$$

非稳态传热模型计算得到的皮肤外侧温度值与实测温度值的对比, 如图1所示.

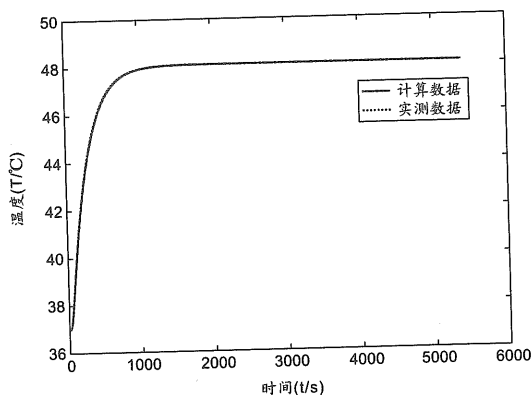


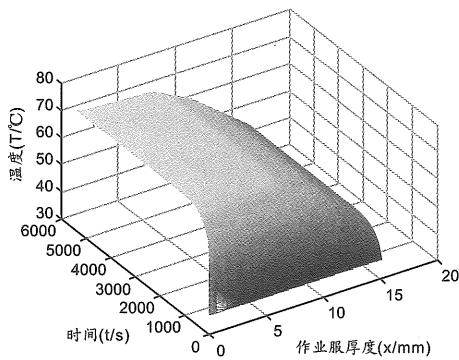
图1: 模拟计算数据与实测数据拟合图

在该复合传热系数下, 计算值与实测值拟合的残差平方和为3.6552; 误差极差为0.0061, 拟合结果较好. 此时显式差分的傅里叶网格数最大值为 $Fo_{\Delta \max} = 0.0472$; 满足限制条件, 不会出现解的不合理振荡. 拟合情况如表2所示.

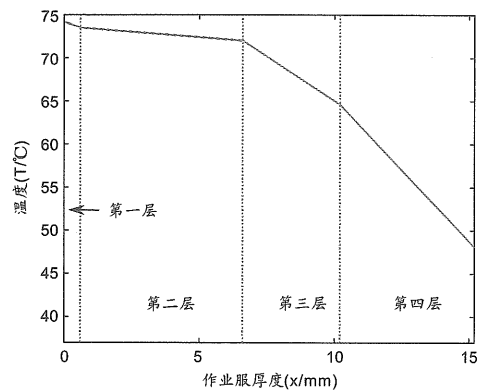
表 2: 拟合情况

h_1 (W/(m \cdot °C))	h_2 (W/(m \cdot °C))	误差平方和 ((°C) 2)	极差 (°C)
113.000	8.344	3.6552	0.0061

根据所求得的两端换热系数, 运用非稳态传热模型, 计算温度分布, 得到皮肤温度与时间-空间的三维温度分布和稳态温度的空间分布, 如图 2 所示.



(a) 作业服时间-空间温度分布



(b) 稳态作业服温度分布

图 2: 皮肤温度与时间-空间的三维温度分布和稳态温度的空间分布

其中温度分布数据 (节选), 如表 3 所示.

表 3: 温度分布

t/min	$x = 0.0 \text{ mm}$	$x = 0.6 \text{ mm}$	$x = 6.6 \text{ mm}$	$x = 10.2 \text{ mm}$	$x = 15.2 \text{ mm}$
5	70.1897	66.2322	59.8908	55.2576	44.3273
10	73.0906	71.5173	67.7980	62.0502	47.0590
15	73.8808	72.9568	69.9517	63.9004	47.8030
...
80	74.1814	73.5046	72.0045	64.3007	48.0861
85	74.1814	73.5046	72.0045	64.3007	48.0861
90	74.1814	73.5046	72.0045	64.3007	48.0861

3 问题 2: 单变量优化模型

以最小厚度为优化目标, 以第二层厚度为优化参数, 以稳态外侧温度和超过 44°C 为约束条件, 建立单变量优化模型并求解.

3.1 模型建立

记函数 $T(x, t; d_2)$ 为第二层厚度为 d_2 时的温度分布函数.

3.1.1 优化目标

在作业服设计过程中, 应尽可能降低研发成本, 节省材料. 故优化目标为第二层厚度最小

$$\min d_2. \quad (5)$$

3.1.2 约束条件

根据题目信息, 主要有两个约束条件: 稳态外侧皮肤温度小于 47°C ; 超过 44°C 时间小于 5 分钟. 所以第二层厚度应满足

$$\begin{cases} \max_{0 \text{ min} \leq t \leq 60 \text{ min}} T(L, t; d_2) \leq 47^\circ\text{C}, \\ \min \{t : T(L, t; d_2) \geq 44^\circ\text{C}\} \geq 55 \text{ min}, \\ 0.6 \text{ mm} \leq d_2 \leq 25 \text{ mm}. \end{cases} \quad (6)$$

3.1.3 模型综合

综上所述, 建立作业服第二层材料厚度的优化问题模型

$$\begin{aligned} & \min d_2 \\ & \text{s.t.} \quad \begin{cases} \max_{0 \text{ min} \leq t \leq 60 \text{ min}} T(L, t; d_2) \leq 47^\circ\text{C}, \\ \min \{t : T(L, t; d_2) \geq 44^\circ\text{C}\} \geq 55 \text{ min}, \\ 0.6 \text{ mm} \leq d_2 \leq 25 \text{ mm}. \end{cases} \end{aligned}$$

3.2 模型求解

根据理论分析及问题 1 结果可知, 在固定其他参数时, 皮肤外侧温度是关于传热时间的单调不减函数; 稳态皮肤温度时关于第二层厚度的单调递减函数. 因而上述单参数单目标优化问题转换为求解满足约束条件临界值的问题.

1) 确定临界值 D_1

对于非稳态传热问题, 皮肤外侧最大温度应为稳态温度或时间末点温度. 因而可将第一约束条件转换为

$$\max_{0 \text{ min} \leq t \leq 60 \text{ min}} T(L, t; d_2) \leq 47^\circ\text{C} \iff T(L, 60 \text{ min}; d_2) \leq 47^\circ\text{C}, \quad (7)$$

故只需求解临界厚度 D_1 , 进而确定厚度范围, 即

$$\begin{cases} T(L, 60 \text{ min}; D_1) = 47^\circ\text{C}, \\ d_2 \geq D_1, \\ 0.6 \text{ mm} \leq d_2 \leq 25 \text{ mm}. \end{cases} \quad (8)$$

2) 确定临界值 D_2

与约束条件一求解方式类似, 先计算满足约束条件的临界值 D_2 , 进而确定厚度的范围

$$\begin{cases} T(L, 55 \text{ min}; D_2) = 44^\circ\text{C}, \\ d_2 \geq D_2, \\ 0.6 \text{ mm} \leq d_2 \leq 25 \text{ mm}. \end{cases} \quad (9)$$

最终满足约束的区间为两个约束条件解的范围集合的交集, 其中最小厚度即为所求解的第二层厚度设计.

对上述约束临界值问题使用搜索寻优算法进行求解.

3.3 结果展示及分析

3.3.1 结果展示

分别对约束条件求解临界值, 得到结果如表 4 所示.

表 4: 约束条件临界值

	厚度	温度 ($t = 60 \text{ min}$)	温度 ($t = 55 \text{ min}$)	厚度范围
第一约束条件	0.6 mm	45.0832°C	45.0832°C	$d_2 \geq 0.6 \text{ mm}$
第二约束条件	17.5 mm	44.0799°C	43.9998°C	$d_2 \geq 17.5 \text{ mm}$
最终设计方案	17.5 mm	44.0799°C	43.9998°C	—

作业服第二层材料的最优厚度为

$$d_2 = 17.5 \text{ mm}.$$

在 $t = 55 \text{ min}$ 时, 皮肤表面温度为 43.9998°C, 接近于临界温度 44°C; 最高温度为 44°C, 满足约束条件. 由于傅里叶网格数条件的限制以及离散数值求解的精度限制, 为确保不出现解的振荡和精度损失, 求解精度仅能精确到十分位.

当第二层厚度选取最优值时, 皮肤外侧温度随时间变化, 如图 3 所示.

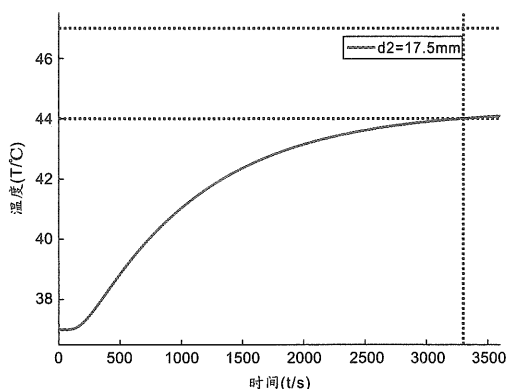


图 3: 皮肤温度随时间变化

3.3.2 结果分析

对上述求解结果进行分析发现, 对于第一约束条件, 所有可行厚度均能满足. 本文认为主要有以下两方面原因:

1) 从理论分析

根据传热学理论, 稳态时皮肤外侧温度应主要与外界热源温度和作业服导热率大小相关. 对于问题 2, 外界温度降低为 65°C ; 第二层厚度可有变化. 但是由于第二层材料导热率为四种材料中最大, 故第二层材料厚度的变化对整个作业服导热率大小的影响较小, 不能抵消外界热源温度变化的影响. 故最大温度始终低于 47°C .

2) 从结果分析

根据问题 1 稳态作业服温度分布, 第二层温度梯度最小, 两端温差最小, 第二层厚度的变化对最大温度的影响占次要因素, 第二层主要起延缓传热等作用. 所以温度始终低于 47°C 是合理的.

不同材料厚度下, 皮肤外层温度与时间的变化关系, 如图 4 所示.

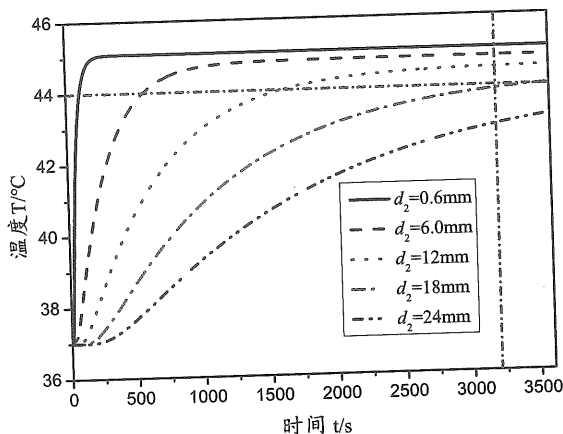


图 4: 不同厚度皮肤外层温度与时间的关系

可见皮肤外层温度随厚度 d_2 的增大单调递减, 但厚度对最大温度的影响不大; 第二层厚度的调节对达到稳态的收敛时间影响较大, 因为厚度的增加必然导致传热过程的缓慢.

4 问题 3: 多目标优化模型

考虑关于研发制作成本、作业服灵活程度、人体舒适程度等因素建立优化目标. 同样考虑最大温度、高温时间和厚度范围作为约束条件, 建立多目标优化模型.

4.1 模型建立

4.1.1 优化目标

对于作业服厚度的设计, 结合实际情况, 最优厚度设计应尽量实现以下目的.

1) 舒适性目标

在达到相同隔热性能的同时, 衣服厚度应尽可能小, 重量应尽可能低, 使得作业服灵活性更高, 便于穿着作业.

2) 节约性目标

尽可能减少制作成本, 由于第四层为空气层, 不耗费成本, 故第二层厚度应尽可能小.

3) 性能稳定性目标

考虑两个方面对作业服性能稳定的影响: 其一是空气层为流体, 若空气层过厚, 可能会造成厚度不均匀, 出现局部过热造成灼伤. 并且空气物化性质容易受到汗液、水汽等因素的影响, 故第四层厚度不能过厚^[4]. 其二是第二层导热率最大, 对热辐射的隔绝性能最好, 故第二层材料不能过薄^[5].

4) 研发效率目标

为了缩短研发周期, 应尽可能的使作业服设计厚度满足更多实际情况下的使用.

依据目标 1) 和目标 2), 建立优化目标

$$\begin{cases} \min & d_2 + d_4, \\ \min & d_2. \end{cases} \quad (10)$$

对于目标 3), 将性能稳定性目标转换为约束条件, 限制第二层材料厚度不应低于 6 mm, 即

$$d_2 \geq 6 \text{ mm}. \quad (11)$$

对于目标 4), 在模型扩展部分, 深入研究讨论相关因素与传热过程的规律, 研究各层材料在隔热设计中的主要作用, 使得模型能够简单的推广到更多应用情况, 缩短研发周期.

4.1.2 约束条件

记函数 $T(x, t; d_2, d_4)$ 为当第二层厚度为 d_2 , 第四层厚度为 d_4 时的温度分布函数.

综合考虑皮肤外侧温度不超过 47°C 、超过 44°C 时间少于 5 分钟、题目给定厚度范围以及性能稳定性等约束条件

$$\begin{cases} \max_{0 \leq t \leq 60 \text{ min}} T(L, t; d_2, d_4) \leq 47^\circ\text{C}, \\ \min \{t : T(L, t; d_2, d_4) \geq 44^\circ\text{C}\} \geq 25 \text{ min}, \\ 0.6 \text{ mm} \leq d_2 \leq 25 \text{ mm}, \\ 0.6 \text{ mm} \leq d_4 \leq 6.4 \text{ mm}, \\ d_2 \geq 6 \text{ mm}. \end{cases} \quad (12)$$

4.1.3 模型综合

综合上述分析, 建立多目标优化模型

$$\begin{aligned} & \min & d_2 + d_4, \\ & \min & d_2, \\ & \text{s.t.} & \begin{cases} \max_{0 \leq t \leq 60 \text{ min}} T(L, t; d_2, d_4) \leq 47^\circ\text{C}, \\ \min \{t : T(L, t; d_2, d_4) \geq 44^\circ\text{C}\} \geq 25 \text{ min}, \\ 0.6 \text{ mm} \leq d_2 \leq 25 \text{ mm}, \\ 0.6 \text{ mm} \leq d_4 \leq 6.4 \text{ mm}, \\ d_2 \geq 6 \text{ mm}. \end{cases} \end{aligned}$$

4.2 模型求解

1) 多目标转化为单目标

将多目标优化问题转化为单目标优化问题。对优化目标一，由于第四层材料导热系数远小于第二层材料，故在相同外界环境温度下， d_4 的增大对隔热性能的提升更为明显。对优化目标二，在满足相同隔热性能的条件下， d_4 越厚制作成本越小。故优化目标转化为最小化第二层厚度

$$\min d_2. \quad (13)$$

2) 模型求解

在上述模型下，依照问题2的模型解法，求解约束条件临界值问题，进一步求解得到最优厚度。

4.3 结果展示

分别对约束条件求解临界值，得到结果如表5所示。

表5: 约束条件临界值, $d_4 = 6.4 \text{ mm}$

	厚度	温度 ($t = 60 \text{ min}$)	温度 ($t = 55 \text{ min}$)	厚度范围
第一约束条件	12.9 mm	46.9813°C	46.5134°C	$d_2 \geq 12.9 \text{ mm}$
第二约束条件	19.2 mm	44.7721°C	43.9650°C	$d_2 \geq 19.2 \text{ mm}$
最终设计方案	19.2 mm	44.0799°C	43.9650°C	—

对模型求解得到最优厚度设计

$$d_2 = 19.2 \text{ mm}, \quad d_4 = 6.4 \text{ mm}.$$

满足约束条件。

4.4 模型拓展

进一步研究非稳态传热模型。基于上述计算结果，对第二层和第四层材料对传热过程和皮肤温度的影响关系，提出以下猜想：第四层材料导热率最小，故隔热性能最佳，适用于高温环境；第二层材料导热率最大，隔热性能较差，厚度变化对传热过程速率影响最为明显，适用于长时间作业环境。下面对上述猜想进行数值验证。

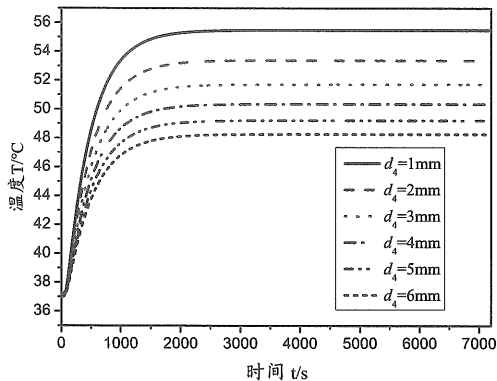
4.4.1 验证各层材料作用

选定环境温度为 80°C ，工作时间为 120 分钟。

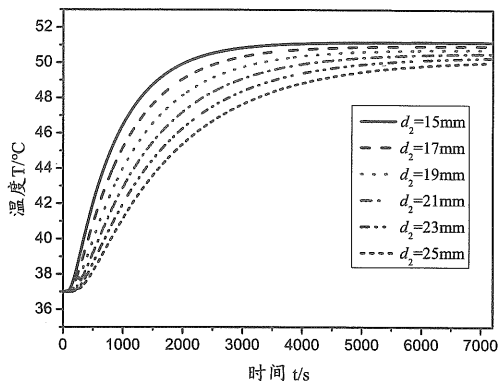
1) 固定 $d_2 = 10 \text{ mm}$ ，分别取 $d_4 = 1, 2, \dots, 6 \text{ mm}$ ，得到第四层厚度变化对到达稳态时间和稳态温度的影响，如图 5(a) 所示；

2) 固定 $d_4 = 3 \text{ mm}$ ，分别取 $d_2 = 15, 17, 19, 21, 23, 25 \text{ mm}$ ，得到第二层厚度变化对到达稳态时间和稳态温度的影响，如图 5(b) 所示。

由图 5 可以得到，在第二层厚度固定时， d_4 的变化对稳态的温度大小有明显的影 响，而达到稳态的时间基本没有变化；固定第四层厚度时， d_2 的变化对达到稳态的时间，以及非稳态传热的具体过程影响较大，而稳态的温度基本相近，受到影响较小。



(a) 固定第二层厚度



(b) 固定第四层厚度

图 5: 不同材料的作用效果

4.4.2 材料厚度组合-作业环境

根据上述结论, 可确定在以下四类作业环境中作业服厚度设计的简单原则, 指导高温作业服实际设计。

1) 高温短时间作业环境

在高温环境下, 需要使得作业服隔热性能更好, 稳态温度更低, 则第四层材料厚度应该更大; 而短时间作业时, 过程传热速度快慢对作业过程影响不大, 故第二层可以更薄以节省成本。

2) 高温长时间作业环境

高温环境中作业服第四层应当更厚以增强隔热性能; 而长时间作业需使得传热过程更为缓慢, 需增大第二层厚度。

3) 低温短时间作业环境

低温短时间作业环境要求最为宽松, 作业服的设计过程中第二层和第四层厚度均可以减小以节省成本和研发难度。

4) 低温长时间作业环境

低温环境对隔热性能要求不高, 第四层厚度可减小; 长时间作业对传热速度有一定要求, 可适当增大第二层厚度。

5 模型推广与分析

本文综合考虑各种传热方式和边界条件, 建立非稳态一维传热模型, 并应用于作业服设计的优化问题。本文所建立模型考虑到了非稳态情形, 充分利用所给数据信息, 并且讨论了不同材料厚度对作业服性能的影响, 为实践生产提供指导参考。

本文模型在以下方面可以进一步改进:

1) 对热传导方程求解使用了显式差分格式, 但是为了确保数值稳定性而增大了运算复杂性, 损失了精度。可使用隐式差分格式, 利用追赶法直接求解或者 Gauss-Seidel 算法迭代求解;

2) 本文没有对问题的不适定性作出说明, 可使用数值方法讨论模型及求解对初始条件的稳定性。

参考文献:

- [1] 李灿, 高彦栋, 黄素逸. 热传导问题的 Matlab 数值计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, (09): 91-93
Li C, Gao Y D, Huang S Y. Numerical simulation of problems in heat conduction by Matlab[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2002, (09): 91-93
- [2] 杨世铭, 陶文栓. 传热学(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
Yang S M, Tao W Q. Heat Transfer (4th Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006
- [3] 李新春, 王中伟. 一维热电模块的瞬态传热过程研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(07): 1826-1831
Li X C, Wang Z W. Transient heat-transfer of one-dimensional thermoelectric generator[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2016, 37(07): 1826-1831
- [4] 潘斌. 热防护服热传递数学建模及参数决定反问题[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017
Pan B. Inverse problems of heat transfer and parameter determination for thermal transfer clothing[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017
- [5] 赵玲, 吕国志, 任克亮, 等. 再入飞行器多层隔热结构优化分析[J]. 航空学报, 2007, (06): 1345-1350
Zhao L, Lv G Z, Ren K L, et al. Structural optimization of multilayer insulation for reentry vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, (06): 1345-1350

Design of Work Clothing for High Temperature

LIU Qiang, DUAN Chen-guang, YU Hao
Advisor: Instructor Group

(Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract: In this paper, the one-dimensional unsteady heat transfer process of high temperature work clothes is studied. The partial differential equations based on energy balance law are established with the initial conditions, boundary conditions and the interface continuous conditions. The finite difference method is applied to solve the equations. And the parameter estimation model based on the principle of least squares is established. The heat transfer coefficients at both ends are calculated as: $113 \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{k})$ and $8.344 \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{k})$. According to the parameter estimation results, the univariate optimization model with the minimum thickness of the second layer and the multi-objective optimization model considering factors such as comfort, economy, performance stability and R&D efficiency are derived. With the optimization models, the optimal design of high temperature work clothes is obtained.

Keywords: one-dimensional unsteady heat transfer process; finite difference method; optimization model