

高温作业专用服装优化设计

摘要

高温作业专用服装通常由三层织物材料构成，从外到内记为 I、II、III 层，将 III 层与皮肤之间的空隙记为 IV 层，将体内温度控制在 37°C 的假人放置在实验室的高温环境中进行实验，在这一背景下，本文给出了求解温度分布正问题和边界温度决定的材料厚度设计反问题的方法。

首先，我们将这一问题合理地抽象为一维、无热源、非稳态的多层连续介质材料传热问题，热传导是这一实验中热量主要的传递方式。

针对问题一（求解温度分布正问题），为求得温度在时间和一维空间上的分布，首先，我们将一维非稳态热传导偏微分方程进行有限差分逼近，即在满足显式有限差分方程稳定性（傅里叶数小于 0.5）的条件下，将时间和一维空间网格化处理。然后，将环境温度 75°C ，皮肤外侧温度随时间分布（附件二）作为边界条件，代入之前导出的有限差分方程，即得到温度在时间和空间网格上的分布。最后，将一维空间节点、时间节点还原为离服装外表层的距离、放入高温环境的时间即得到具体的温度分布（problem1.xlsx）。

针对问题二（第 II 层材料最优厚度求解反问题），首先，新增皮肤层作为第 V 层材料，由于不要求解皮肤层的温度分布，该层厚度及导温系数等热学参数对我们意义并不大，我们只关心该层空间节点数（由导温系数及厚度决定），将其作为单一参数，通过问题一中的模型求得皮肤外侧温度分布，与附件二中的数据进行最小二乘拟合，得到假人模型皮肤层的理论空间节点数。然后，我们可以在所给厚度范围 (0.6, 25) 内采用二分法搜索满足给定边界温度条件且最小的厚度，这样我们便把一个求解最优厚度的设计反问题归结为了一个求解温度分布的正问题，最终求得第 II 层最优厚度为 7.65mm。

针对问题三（第 II、IV 层材料最优厚度求解反问题），类似于问题二，优化目标增加为两个：最优空气层厚度、第 II 层厚度，我们在所给第 II 层厚度范围内采用二分法得到一系列第 II 层厚度，对于每一个第 II 层厚度，求得此时最优空气层厚度。搜索满足题设温度条件且最小的第 II 层厚度，此时的第 II 层厚度、空气层厚度即为最优。

关键词： 一维非稳态热传导方程 有限差分逼近 最小二乘拟合 二分法

1 问题重述

1.1 问题背景

在高温环境下工作时，人们需要穿着专用服装以避免灼伤。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 层与皮肤之间还存在空隙，将此空隙记为 IV 层。

为设计专用服装，将体内温度控制在 37°C 的假人放置在实验室的高温环境中，进行实验。

1.2 相关数据

附件 1. 专用服装材料的参数值

附件 2. 假人皮肤外侧的测量温度

1.2 需要解决的问题

(1) 专用服装材料的某些参数值由附件 1 给出，对环境温度为 75°C 、II 层厚度为 6 mm、IV 层厚度为 5 mm、工作时间为 90 分钟的情形开展实验，测量得到假人皮肤外侧的温度（见附件 2）。建立数学模型，计算温度分布，并生成温度分布的 Excel 文件（文件名为 problem1.xlsx）。

(2) 当环境温度为 65°C 、IV 层的厚度为 5.5 mm 时，确定 II 层的最优厚度，确保工作 60 分钟时，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 分钟。

(3) 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 分钟时，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 分钟。

2 问题分析

在这一实验中，将体内温度控制在 37°C 的假人放置在实验室的稳定高温环境中，已知服装材料的参数值并测得皮肤外侧的温度情况。为简化处理，我们只在垂直服装表面的方向上研究传热情况，这样就把一个三维传热问题抽象成一维传热问题，由于假人处于一个稳定的环境温度中，这样的简化也是合理的。构成服装的织物材料一般被认为是多孔介质，在此问题中并未给出孔隙率、有效曲折系数等相关参数，而直接给出各材

料的热传导率，我们认为这是将多孔介质材料视为连续介质材料所得测得的平均导热系数，因此这些材料都可以按照连续材料处理。在垂直于材料表面的方向上温度的分布随时间的推移趋于稳定。综上所述，这是一个一维、无热源、非稳态的多层连续介质材料传热问题。

物体的传热过程分为三种基本传热模式，即：热传导、热对流和热辐射^[1]。热传导指在物质在无相对位移的情况下，物体内部具有不同温度、或者不同温度的物体直接接触时所发生的热能传递现象。热对流是指由于流体的宏观运动而引起的流体各部分之间发生相对位移，冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程。在这一实验中只有第 IV 层的传热介质是流体，其厚度范围为 $0.6-6.4mm$ ，一般认为当空气层厚度小于 $8mm$ 时，由于空气层间隙太小，从而无法形成对流运动，这时空气层的热传递以热传导为主^[2]。热辐射是一种物体用电磁辐射的形式把热能向外散发的传热方式，一般物体辐射的能量公式为 $E = \beta \sigma T^4$ ，其中 $\beta (0 < \beta < 1)$ 为辐射率， $\sigma = 1.38064852 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ 为玻尔兹曼常数，此处环境温度仅不到 $400K$ ，通过辐射传递的热量的数量级为 10^{-12} ，相对于热传导来说可以忽略。因此热传导是这一实验中热量主要的传递方式，而计算热传导过程的傅里叶定律就成了我们求解此问题的主要工具。

对于问题一，为求得温度在时间和一维空间上的分布，需将一维非稳态热传导偏微分方程进行有限差分逼近，即在满足显式有限差分方程稳定性（傅里叶数小于 0.5）的条件下，将时间和一维空间网格化处理，将已给定的边界温度条件 $75^{\circ}C$ 、 $37^{\circ}C$ 代入差分方程即可得到温度分布。但这样做的结果是在皮肤外表层温度不断趋近于 $37^{\circ}C$ ，并在 $37^{\circ}C$ 左右稳定，这显然是与附件二中的数据矛盾的，产生这一矛盾的原因在于忽略了皮肤作为传热介质的影响。这里我们考虑可以将附件二中的皮肤外层温度随时间的变化作为代替皮肤内侧温度作为边界条件代入差分方程，可以得到较为精确的结果。

对于问题二，这是一个在给定边界温度条件下的第 II 层材料厚度设计反问题。直接应用一维非稳态热传导方程求解满足题设条件下的不等式是极端困难的，仍然要采用问题一的有限差分逼近的方法，但问题二并没有给定皮肤外层的温度变化，因此我们新增皮肤层作为第 V 层传热介质材料，但假人皮肤层的相关热学参数未给定，需要用附件二的数据求解。考虑到在温度分布具体求解过程中只用到了节点数这一参数，在傅里叶数和时间步长确定的情况下，节点数这一指标又由导温系数和材料厚度，由于皮肤层温度的具体分布我们并不关心，因此节点数这一指标在这一问题中就反映了皮肤层的热学性

能。我们可以以皮肤层节点数为变量，求解温度分布，将皮肤外侧温度分布与附件二中的数据进行最小二乘拟合，当拟合误差达到最小时，我们认为此时的皮肤层节点数即为此模型下反映皮肤热学性能的参数。

材料越厚，皮肤外侧稳定温度越低，因此只要材料足够厚，就一定能满足所给条件。但材料越厚，成本越高，在高温环境下工作的人行动也越不便，因此最优厚度应为在满足所给温度条件下的最小厚度。第 II 层厚度范围已给出，可以利用问题一的五层材料热传导模型，并用二分法在厚度范围内对最优厚度进行搜索。

对于问题三，类似于问题二，优化目标增加为两个：最优空气层厚度、第 II 层厚度，我们查询相关文献知，由于空气层的特殊性，空气层的最优厚度是可以不通过一维热传导方程。因此我们可以在所给第 II 层厚度范围内采用二分法得到一系列第 II 层厚度，对于每一个第 II 层厚度，求得此时最优空气层厚度。搜索满足题设温度条件且最小的第 II 层厚度，此时的第 II 层厚度、空气层厚度即为最优。

3 模型假设

- (1) 假设构成此高温作业专用服装的三层材料都是连续、均质、干燥的；
- (2) 假设三层材料之间没有空隙；
- (3) 忽略传热过程中的辐射和对流；

4 名词解释与符号说明

4.1 名词解释

- 节点：在求解一维无热源热传导方程时，需将一维空间和时间离散化处理，我们称连续的时间或一维空间被划分为一个个节点。
- 格点：在将一维空间和时间离散化处理后，以一维空间为横坐标，时间为总坐标，即在该区域内建立了网格，网格线的交点成为格点。

4.2 符号说明

符号	说明
----	----

ρ_i	第 i 层材料密度 ($kg \cdot m^3$)
c_i	第 i 层材料比热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
λ_i	第 i 层材料热传导率 ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
D_i^r	第 r 题中第 i 层材料厚度 (m)
α_i	第 i 层材料导温系数 ($m^2 \cdot s^{-1}$)
F_{oi}	第 i 层材料傅里叶数
x	各空间节点的一维空间坐标 (mm)
t	将假人置于高温环境中中的时间 (s)
$u(x, t)$	材料温度关于位置和时间的分布 ($^\circ C$)
U_m^n	第 m 个空间节点, 第 n 个时间节点的温 ($^\circ C$)
Δx_i	第 i 层材料空间步长 (m)
Δt	时间步长 (s)
w_i	第 i 层材料空间节点数

5 问题一：求温度分布正问题

5.1 一维无热源热传导方程

由于这是一个一维、无热源、非稳态的多层连续介质材料传热问题，一维无热源热传导方程^[2]便成了我们的主要研究工具之一。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

其中温度 $u = u(x, t)$, α 为该层材料的导温系数。

5.2 模型 A：将皮肤外层温度作为边界温度的服装材料温度分布求解模型

5.2.1 建立一维热传导方程

材料上各点的温度可以看作关于时间和材料纵向位置的函数，以材料外表面为原点，

以垂直于材料外表面向外的方向为正方向，建立一维坐标系，则 $u = u(x, t)$ 。对于不同层材料，这一问题的一维无热源的热传导方程如下

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

5.2.2 各层导温系数的确定

导温系数是物体中某一点的温度的扰动传递到另一点的速率的量度^[4]，由该层材料的密度、比热、导热系数决定。

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_i}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

在后续模型中，只需用到导温系数，而不需要用到密度、比热、导热系数等物理量，因此我们在这里将各层导温系数给出：

表一 各层导温系数

单位：($\times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$)

α_1	α_2	α_3	α_4
1.98499	2.04397	3.5137	236.1

5.2.3 热传导的有限差分方程

(3) 式是一个二维二阶偏微分方程，一方面，这个求解难度是极大的，而求得在连续时间、连续空间下的温度分布函数对于研发意义也并不大，另一方面，采用有限差分方程求解已经能够达到足够的精度。为此，我们以把假人放置于 75°C 环境的瞬间 ($t = 0$) 为第一个时间节点，以 Δt 为步长将时间离散化。以坐标原点 ($x = 0$) 为第一个位置节点，以 Δx_i 为步长将一维空间位置离散化（节点的具体确定方法将在 5.2.3 中讨论），得到格点 (m, n)，其温度为 U_m^n ，用差分代替微分，(3) 式可转化为

$$\frac{U_{m-1}^n - 2U_m^n + U_{m+1}^n}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{U_m^{n+1} - U_m^n}{\Delta t} \right) \quad (4)$$

由上式可得

$$U_{m-1}^n + U_{m+1}^n - \left(2 - \frac{1}{F_o}\right) U_m^n = \frac{1}{F_o} U_m^{n+1} \quad (5)$$

式中傅里叶数

$$F_o = \alpha_i \frac{\Delta t}{(\Delta x_i)^2} \quad (6)$$

5.2.4 傅里叶数约束下的网格化处理

在一维热传导情形下，应用（5）式进行温度分布的计算需满足显式有限差分方程稳定性的充分条件^[5]

$$F_o \leq 0.5 \quad (7)$$

在满足（7）式的情况下，有限差分方程才能收敛，节点划分得越精细，求解精度越高。

因此，在将空间位置和时间离散化的过程中，时间节点步长和空间节点步长的确定并不是相互独立的。对前四层材料，为使求得的温度分布能在同一张表中体现，需取时间步长 Δt 一致。在同一 Δt 及同一 F_o 条件下，不同材料取得的 Δx_i 难以使得该材料厚度被完全分配，由于（1）式严格来说只适用于同一介质中的热传导，这样在不同材料边界处的空间节点的温度变化就存在一定的误差。由（6）式导出 $\Delta x_i = \sqrt{\frac{\alpha_i \Delta t}{F_o}}$ ，我们减小 Δt ，使得 Δx_i 尽可能将第 i 层材料完全分配，但 Δx_i 过小会导致计算量急剧增大，经过多次尝试，我们认为 $\Delta t = 0.05s$ 是合适的，此时未被某层材料完全分配的厚度极小，可以忽略，得到空间节点划分表如下

表二 空间节点划分

	第 i 层 空 间 步 长 Δx_i ($\times 10^{-4}m$)	第 i 层节点数 w_i
第 I 层	1	6
第 II 层	1.43	42
第 III 层	1.87	19
第 IV 层	15	3

划分的总节点数为 $w_s = \sum_i w_i = 71$ 。

5.2.5 模型的求解

以环境温度 $U_0^0 = 75^\circ\text{C}$ 、皮肤外表层温度（附件二）为边界温度，以 $U_m^0 = 37^\circ\text{C}, m = 1, 2, \dots$ 为初始中间各空间节点温度，代入式（5），不断迭代即可得到温度在时间节点、空间节点上的分布。还需要将温度在网格上的分布转化为具体时间、空间点坐标的分布，第 m 个时间节点转换为具体时间的公式如下

$$t_m = m\Delta t \quad (8)$$

第 n 个空间节点转换为一维坐标的公式如下

$$x_n = \begin{cases} n\Delta x_1, n < w_1 \\ D_1^1 + (n - w_1)\Delta x_2, w_1 < n < w_2 \\ D_1^1 + D_2^1 + (n - w_1 - w_2)\Delta x_3, w_2 < n < w_3 \\ D_1^1 + D_2^1 + D_3^1 + (n - w_1 - w_2 - w_3)\Delta x_4, w_3 < n < w_4 \end{cases} \quad (9)$$

所求得温度分布结果见 problem1.xlsx

5.3 模型的分析

在这一模型中，将附件二作为温度边界条件，在热传导的有限差分方程（4）收敛的前提下，采用尽量小时间步长，将空间节点尽量完整分配每层材料厚度，由此将温度分布结果的精度提高。但是，这一模型的缺点也是显然的，需要已知皮肤外侧温度随时间变化情况作为边界温度条件，才能求解中间各节点温度分布，因此不能推广到缺少皮肤温度随时间分布数据的情况。模型 B 将对其进行改进。

6 问题二：第 II 层最优厚度求解反问题

在这一问题中，没有给定皮肤外侧温度随时间的分布，温度的分布已不能采用模型 A 求解，为此，我们新增皮肤层作为第 V 层建立模型 B。

6.1 模型 B：将皮肤外层温度作为边界温度的服装材料温度分布求解模型

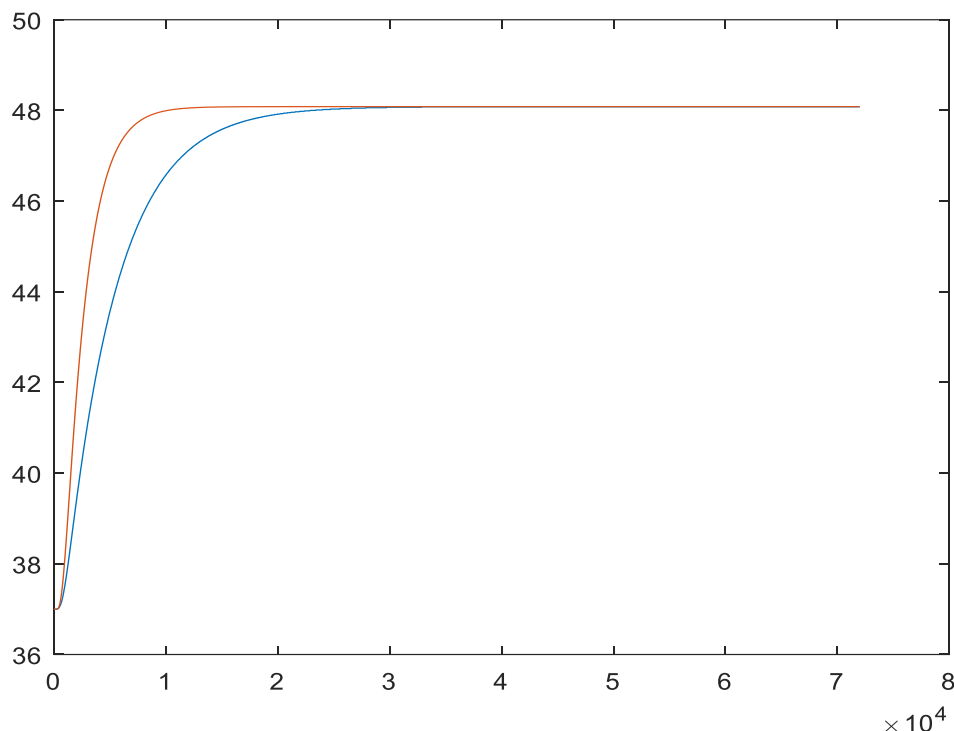
6.1.1 最小二乘优化识别皮肤层空间节点数 w_5

我们将皮肤层作为第 V 层材料，建立五层材料的热传导模型。作为用于科研的假人，其皮肤材料应与真实人体皮肤材料热学参数相似，经过查阅人体真实皮肤热学参数^[4]并经过模型 A 中网格化处理后，我们发现人体各个部位皮肤空间节点数都在 (20,150) 内，因此，以 w_5 为变量，遍历 (20,150) 范围内的整数，代入模型 A，得到皮肤外侧温度随时

间的分布，将其与附件二的数据进行最小二乘拟合，当 $\sum_n (U_{w_s}^n - U_{w_s}^n)^2$ 取最小时，说明此时皮肤层的空间节点数最符合实际情况。

经过 Matlab 求解发现 $w_5 = 28$ 时，拟合效果最好，我们可以把 w_5 作为皮肤层的热血参数。

拟合效果图：



图一 皮肤外层温度拟合

6.1.2 五层材料热传导模型

在这一问题中，要求在满足下列约束条件下

$$\begin{cases} u(\sum_{i=1}^4 D_i^{(2)}, 3600) \leq 47^\circ C \\ u(\sum_{i=1}^4 D_i^{(2)}, 3000) \leq 44^\circ C \end{cases} \quad (10)$$

确定第 II 层的最优厚度，即最小厚度，我们可以在所给厚度范围 ($0.6 \leq D_2^{(2)} \leq 25$) 内采用二分法搜索满足 (10) 式且最小的厚度，这样我们便把一个求解最优厚度的设计反问题转化为了一个求解温度分布的正问题。

但 (10) 式仅是题设条件的表达，其中 $u(x, t)$ 来源于二维二阶偏微分方程 (2)，求

解难度是极大的，我们仍考虑用模型 A 求解，将（10）式采用有限差分方程逼近得到

$$\begin{cases} U_{w_s}^{\frac{3600}{\Delta t}} \leq 47^\circ C \\ U_{w_s}^{\frac{3000}{\Delta t}} \leq 44^\circ C \end{cases} \quad (11)$$

仍取 $\Delta t = 0.05s$, $F_o = 0.5$, 各层空间节点步长及第 I、III、IV 层空间节点数同表二，始终取 $w_3 = 28$, 边界温度 $U_0^0 = 65^\circ C, U_{w_s+w_3}^0 = 37^\circ C$, 求解算法如下：

Step1: 令 $a = 0.6mm, b = 25mm$, 取 $D_2^2 = \frac{a+b}{2}$, 则 $w_2 = \frac{D_2^2}{\Delta x_2}$;

Step2: 判断 (a, b) 区间长度是否达到精度要求，是，此时的第 II 层厚度即为最优；否则进入 Step3。

Step3: 将 w_2 代入（11）式判断是否成立，若成立， a 不变，将 $\frac{D_2^2+b}{2}$ 赋给 b ; 若不成立， b 不变，将 $\frac{D_2^2+a}{2}$ 赋给 a ; 回到 Step1。

求解结果如下表所示：

表三 第 II 层厚度求解结果

第 II 层厚度 (D_2^2 / mm)	稳定时间 (s)	皮肤外层最高温 度 ($^\circ C$)	达到 $44^\circ C$ 时间 (s)
12.8	2435.40	42.44	未达到
6.70	1220.65	44.48	342.05
9.75	1795.25	43.42	未达到
8.23	1577.00	43.75	未达到
7.46	1494.25	44.13	521.80
7.84	1558.00	43.93	未达到
7.65	1469.00	44.00	1469.00

从上表可以看出，至少在厚度大于 7.46mm 的情况下，皮肤外层始终达不到 $47^\circ C$, 在 $D_2^2 = 7.65mm$ 时，皮肤外层温度刚好等于 $44^\circ C$, 此时再寻求更小的 D_2^2 , 势必造成稳定温度大于 $44^\circ C$, 不满足（11）式，因此第二层的最优厚度为 7.65mm。

7 问题三：求解第 II、IV 层最优厚度

7.1 模型 C 最优空气层厚度决定模型

查阅相关文献^[5]得知,高温作业服装空气层厚度对热防护性能的影响并不是越厚越好,持续高温时间随着空气层厚度的增加呈现先增加后减少的趋势,如果进一步增加空气层厚度,持续高温时间将进一步增加。我们将决定空气层厚度反问题的一般求解方式^[6]陈述如下,并在模型中直接应用。

Arrhenius 比例方程可以用来定量地估计皮肤的热损伤率:

$$\frac{d\Omega(x,t)}{dt} = P \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{R(T(x,t) + 273)}\right) \quad (12)$$

积分得

$$\Omega(x, \tau) = \Omega(x, 0) + \int_0^\tau P \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{R(T(x,t) + 273)}\right) dt \quad (13)$$

P 和 ΔE 的值我们可以从 Stoll, Greene 和 Takata^[7]中获取。

在确定空气层厚度时,我们只需规划目标函数

$$J(l) = \int_0^t \left| \Omega(L_2, t) - \Omega^* \right|^2 dt \quad (14)$$

使得

$$\Omega(L_2, t_i) \leq \Omega^* \quad (15)$$

由此,我们可以得到对任意固定的第 II 层厚度,相对应的最优空气层厚度。

7.2 模型 D 第 II、IV 层厚度决定的规划模型

在这一问题中,要求在满足下列约束条件下

$$\begin{cases} u(\sum_{i=1}^4 D_i^{(3)}, 1800) \leq 47^\circ C \\ u(\sum_{i=1}^4 D_i^{(3)}, 1500) \leq 44^\circ C \end{cases} \quad (16)$$

确定第 II、IV 层的最优厚度,我们可以在所给第 II 层厚度范围 ($0.6 \leq D_2^{(3)} \leq 25$) 内采用二分法得到一系列第 II 层厚度,对于每一个 $D_2^{(3)}$,代入模型 C,求得此时最优空气层厚度。搜索满足 (16) 式且最小的第 II 层厚度,求解算法同问题二,不再赘述,得到第 II、IV 层厚度求解结果如下

表四 第Ⅱ、Ⅳ层厚度求解结果

第Ⅱ层厚度 (mm)	相应第四层最优 厚度(mm)	达到稳定状态所 费时间(s)	最高温度(°C)	达到 44 °C 所费 时间(s)
12.80	7.68	未达到	45.059	559.1
18.90	5.10	未达到	43.134	未达到
15.80	5.43	未达到	43.547	1631.1
14.30	6.56	未达到	44.248	820.0
15.05	5.98	未达到	43.655	1034.7
14.68	6.12	未达到	43.897	892.0
14.49	6.39	未达到	44.020	854.7

8 模型检验与模型评价

9.1 模型的稳定性分析

- 误差分析：在该问题我们所建立的模型中，主要产生的误差为用有限差分代替微分的计算所造成的截断误差，这类误差取决于初始给定的温度分布，边界条件，有限差分格式的选择以及傅里叶数 FO 的选择。对于该题，第一问中我们把附件二中的皮肤表层温度作为边界条件，引入了一定的误差，而有限差分格式，在 Δt 取值不够小时，也会存在较大误差。另一方面，还存在数值误差，即舍入误差，由在运算过程中对有效数字的限制所引起，
- 敏感性分析：模型中的参数的误差主要包括皮肤层节点数的误差，而该层是利用最小二乘法拟合求出的最优参数，所以本身误差较小，而皮肤层距离外界高温区较远，所以该误差对皮肤外表皮的温度影响也较小，灵敏性较弱。

9.2 模型的评价

9.2.1 模型的优点

- 通过运用有限差分方程对偏微分方程进行数值求解，代替了因缺少初值条件而无法求得的解析解，极大的降低了问题的复杂度。
- 利用最小二乘法进行拟合得到参数，减小系统误差，提高模型的准确度。
- 运用二分法求解，有目标地寻找最优解，降低了计算负担。
- 在第三问中，首先求得每一个二层厚度相对应的最优空气层厚度，建立一一对应关系，将多目标优化问题转换为第二问中的单目标优化问题，从局部优化推广到了全局优化。

9.2.2 模型的缺点

- 将人体简单地抽象为一维无限大平壁模型，未能考虑到热扩散在三维中的情况。
- 将空气层简单平均化，未能考虑到人体运动对空气层厚度大小变化的影响以及人体之中不同部位空气厚度的分布情况。

9.2.3 模型的改进与推广

模型的改进：

- 引入三维无热源热传导方程，如柱状，锥状等几何模型，在三维空间之中进行数值求解，得到温度分布，进而进行最优化分析
- 运用仿真软件，根据人体运动的概率密度进行模拟，考虑人体在工作时运动而导致空气层厚度改变的情况

模型推广：

上述模型不仅可以运用在高温作业的隔热服之中，在精度要求不高的条件下，也可运用在建造时建筑物的保暖等问题之中。

参考文献

- [1]余跃. 纺织材料热湿传递数学建模及其设计反问题[D]. 浙江理工大学, 2016.
- [2]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.
- [3]姜启源, 谢金星, 叶俊.数学模型.北京: 高等教育出版社, 2011.

附录

导入电子表格中的数据.....	14
导入数据	14
将非数值元胞替换为 NaN	14
创建输出变量	14
清除临时变量	15

```
%%二分法求皮肤层最佳参数
```

```
clc,clear;
```

```
dt=0.05;
```

导入电子表格中的数据

用于从以下电子表格导入数据的脚本:

工作簿: F:\2018-A-Chinese\CUMCM-2018-Problem-A-Chinese-Appendix.xlsx

工作表: 附件 2

要扩展代码以供其他选定数据或其他电子表格使用, 请生成函数来代替脚本。

```
% 由 MATLAB 自动生成于 2018/09/15 09:23:32
```

导入数据

```
[~, ~, raw] = xlsread('F:\2018-A-Chinese\CUMCM-2018-Problem-A-Chinese-Appendix.xlsx','附件  
2','B3:B5403');  
raw(cellfun(@(x) ~isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x),raw)) = {''};
```

将非数值元胞替换为 NaN

```
R = cellfun(@(x) ~isnumeric(x) && ~islogical(x),raw); % 查找非数值元胞  
raw(R) = {NaN}; % 替换非数值元胞
```

创建输出变量

```
tp = reshape([raw{:}],size(raw));
```

清除临时变量

```
clearvars raw R;
tp=tp';
tx=0:5400;
xi=0:dt:3600;
yi=interp1(tx,tp,xi,'linear');
yi=yi';
F0=0.5;
%%该程序以求出最佳皮肤参数 nn2 的值为 28 ;
arf=[1.98499*10^(-7) 2.04397*10^(-7) 3.5137*10^(-7) 2.361*10^(-5)];
dx=sqrt(arf.*dt/F0);
x=[0.0006 0.006 0.0036 0.005];
n=x./dx;%6.0 59.35 27.16 4.6
nn=round(sum(n));
chaMin=9999999999;
%nn2=round(sum(n2));
T(1,1)=(75+37)/2;
for nn2=20:10:150

    for i=2:nn+nn2
        T(1,i)=37;
    end

    for i=1:3600/dt
        T(i+1,1)=75;
    end
    for j=1:nn+nn2-2
        T(i+1,j+1)=(T(i,j)+T(i,j+2))/2;
    end
    T(i+1,nn+nn2)=37;
    %time=i*dt;
    end%此时， T(:,nn+1)为表层温度
    cha=sum((T(:,nn+1)-yi).^2);
    if (cha<chaMin)
        chaMin=cha;
        nn2min=nn2;
    end
end
for nn2m=nn2min-10:2:nn2min+10
```

```

for i=2:nn+nn2m
    T(1,i)=37;
end

for i=1:3600/dt
    T(i+1,1) =75;
for j=1:nn+nn2m-2
    T(i+1,j+1)=(T(i,j)+T(i,j+2))/2;
end
T(i+1,nn+nn2m)=37;
%time=i*dt;
end%此时, T(:,nn+1)为表层温度
cham=sum((T(:,nn+1)-yi).^2);
if (cham<chaMin)

for x = 1:10
    disp(x)
end

```

```

    chaMin=cham;
    nn2minm=nn2m;
end
end

```

Published with MATLAB® R2017a

导入电子表格中的数据.....	16
导入数据	17
将非数值元胞替换为 NaN	17
创建输出变量	17
清除临时变量	17

```

%%第一问
clc,clear;
dt=0.05;

```

导入电子表格中的数据

用于从以下电子表格导入数据的脚本:

工作簿: F:\2018-A-Chinese\CUMCM-2018-Problem-A-Chinese-Appendix.xlsx

工作表: 附件 2

要扩展代码以供其他选定数据或其他电子表格使用, 请生成函数来代替脚本。

% 由 MATLAB 自动生成于 2018/09/15 09:23:32

导入数据

```
[~, ~, raw] = xlsread('F:\2018-A-Chinese\CUMCM-2018-Problem-A-Chinese-Appendix.xlsx','附件2','B3:B5403');  
raw(cellfun(@(x) ~isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x),raw)) = {''};
```

将非数值元胞替换为 NaN

```
R = cellfun(@(x) ~isnumeric(x) && ~islogical(x),raw); % 查找非数值元胞  
raw(R) = {NaN}; % 替换非数值元胞
```

创建输出变量

```
tp = reshape([raw{:}],size(raw));
```

清除临时变量

```
clearvars raw R;  
tp=tp';  
tx=0:5400;  
xi=0:dt:3000;  
yi=interp1(tx,tp,xi,'linear');  
  
F0=0.5;  
  
arf=[1.98499*10^(-7) 2.04397*10^(-7) 3.5137*10^(-7) 2.361*10^(-5)];  
dx=sqrt(arf.*dt/F0);  
x=[0.0006 0.006 0.0036 0.005];  
n=x./dx;  
nn=round(sum(n));  
  
T(1,1)=(75+37)/2;  
for i=2:round(n(1))  
    T(1,i)=37;  
    hd(i)=(i-1)*dx(1);  
end  
for i=round(n(1))+1:round(n(1)+n(2))  
    T(1,i)=37;  
    hd(i)=x(1)+(i-round(n(1)))*dx(2);
```

```

end
for i=round(n(2)+n(1))+1:round(n(3)+n(2)+n(1))
    T(1,i)=37;
    hd(i)=x(1)+x(2)+(i-round(n(2)+n(1)))*dx(3);
end
for i=round(n(3)+n(2)+n(1))+1:round(n(4)+n(3)+n(2)+n(1))
    T(1,i)=37;
    hd(i)=x(1)+x(2)+x(3)+(i-round(n(3)+n(2)+n(1)))*dx(4);
end

for i=1:3000/dt
    T(i+1,1)=75;
for j=1:nn-2
    T(i+1,j+1)=(T(i,j)+T(i,j+2))/2;
end
T(i+1,nn)=yi(i+1);
time=i*dt;
end

```

```
xxx=1:40001;
```

```
%%%第二问程序
```

```
clc,clear;
```

```
dt=0.05;
```

```
F0=0.5;
```

```
arf=[1.98499*10^(-7) 2.04397*10^(-7) 3.5137*10^(-7) 2.361*10^(-5)];
```

```
dx=sqrt(arf.*dt/F0);
```

```
x=[0.0006 0.00765 0.0036 0.0055];
```

```
n=x./dx;%6.0 59.35 27.16 4.6
```

```
nn=round(sum(n));
```

```
nn2=28;
```

```
T(1,1)=(65+37)/2;
```

```

for i=2:nn+nn2
    T(1,i)=37;
end

for i=1:3600/dt
    T(i+1,1) =65;
    for j=1:nn+nn2-2
        T(i+1,j+1)=(T(i,j)+T(i,j+2))/2;
    end
    T(i+1,nn+nn2)=37;
    %time=i*dt;
end

```

```

%%第三问
clc,clear;
dt=0.05;

F0=0.5;

arf=[1.98499*10^(-7) 2.04397*10^(-7) 3.5137*10^(-7) 2.361*10^(-5)];
dx=sqrt(arf.*dt/F0);
x=[0.0006 0.006 0.0036 0.0064];
n=x./dx;
nn=round(sum(n));

T(1,1)=(80+37)/2;

for i=1:1800/dt

```

```
T(i+1,1) =80;  
for j=1:nn-2  
T(i+1,j+1)=(T(i,j)+T(i,j+2))/2;  
end  
T(i+1,nn)=yi(i+1);  
time(i)=i*dt;  
end
```