

基于粒子群算法的高温防护服设计

摘 要

本文通过研究高温作业服装系统的热传递规律,建立数学模型根据不同环境、不同材料厚度下假人皮肤外侧的温度变化情况,进而确定防护服的温度分布及最优设计。

问题一:我们通过对防护服结构的热传递方式进行分析,建立了多层材料间的热传递模型。首先分析防护服每层的热传递方式,建立导热微分方程,列出初始条件和边界条件。由于每层材料的边界可能不同,则其边界条件也不同。最终得到的微分方程直接求解难度很大,因此我们使用有限差分法对时间和厚度方向分别进行离散化处理,我们得到显式格式的差分方程,再对所得的差分方程进行求解。我们最终得到防护服在任意时刻任意位置的温度,即题目所要求的温度分布。其中关于热传导方程的参数 λ 分别为 0.0496、0.0511、0.0878、0.0378,部分温度分布结果见附件 1,温度详细分布见支撑材料中的 problem.xlsx。

问题二:我们通过对题目所设条件的分析,建立了单目标优化模型。首先联立约束条件及方程建立方程组,然后代入 *matlab* 测试版软件求解,由于直接精确遍历求最优结果太浪费时间,又多做无用功,因此我们使用多重搜索法,先设置大步长以确定最优厚度所在的大致范围,再在其范围附近缩小步长以提高求解精度。最终我们求得满足题设条件的 II 层材料最优厚度为 9.4mm。

问题三:通过对题设条件的分析,我们建立了多目标优化模型,同问题二一样,我们先联立方程及约束条件建立方程组,但是不同的是本题有两个规划目标,即同时求取两个目标的最优解。我们采用了粒子群算法来进行求解,将目标初始化为一组随机解,通过位置向量和速度向量以及一个由目标函数决定的适应度使其在搜索空间飞行迭代,通过与差分方程结合找到最优解。我们最终得到结果为第 II 层材料的最优厚度为 18.3mm,IV 层的最优厚度为 6.4mm。

关键词: 导热微分方程、有限差分法、多目标优化、粒子群算法

一、 问题重述

1.1 问题的背景

热防护服装是目前应用最为广泛的特种防护服装,因此其热防护性能也就成了人们高度关注的问题。好的热防护服装能够起到促进人体热量散发、防止高温灼伤及热中暑等危害。目前,对热防护服装的性能测试主要通过大量的热防护性能测试来实现,造成浪费污染而耗资巨大。

1.2 问题的提出

问题一:在防护服的材料参数已知的情况下,建立数学模型,确定合理的热传导方程,求解出在一维坐标系下防护服从外界环境到皮肤表层不同空间和时间下的温度分布情况,并生成温度分布的 Excel 文件。

问题二: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。

问题三:环境温度 80°C 时,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,确定 II 层和 IV 层的最优厚度。

二、 模型假设

- 1、根据实际情况,假人与防护服之间的间隙大小不超过 8mm,无法形成空气对流运动,因此不考虑假人与防护服之间空气的对流热量散失问题。
- 2、传热过程中,三种材料的结构特性不会发生改变。不考虑材料在高温下性能的改变。
- 3、不考虑假人材料性能对于表皮温度的影响。
- 4、不考虑假人的皮下组织系统,将空气层传导到皮肤表层的温度视作最终的皮肤温度。
- 5、防护服三层材料是各项同性的连续介质。
- 6、假设环境干燥,系统热传递只考虑热传导、热传递等,不考虑水汽引起的湿传递影响。

三、 符号说明

变量名称	含义
ρ_i	第 i 层材料密度 (kg/m^3)
i	防护服层数
c_i	第 i 层材料的比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)
k_i	第 i 层材料的热传导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)
d_i	第 i 层材料的厚度(mm)
$T(x,t)$	x 位置 t 时刻的温度 ($^\circ\text{C}$)
t	时间 (s)
T_∞	外界环境的温度 ($^\circ\text{C}$)
T_{cai}	防护服材料的温度
h	外界气体对材料的对流传热系数 ($\text{W}/\text{m}^2\text{k}$)
q_x''	通过位置 x 的热流 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
ε	防护服材料的孔隙率

四、 问题分析

问题一：首先确认高温作业专业服装导热系统的结构，应用热学定律、导热微分方程和傅里叶定律建立高温环境下热防护服装的热传递模型，列出初始条件及边界条件。微分方程组求解难度极大，因此将其转化为差分方程，离散化时间方向及厚度，进行求解。

问题二：本问题实际上是一个条件约束模型。通过题目给定的条件划定第II层材料的可行域，再考虑经济耗费及舒适性，则厚度越小越好。通过联立约束条件及方程建立目标规划方程组，对第II层材料厚度设置步长进行迭代求解，最后在结果中找到厚度最小的可行解，此解即为题目的最优解。

问题三：本问题可以认为是一个多目标规划模型，规划目标为第II层材料厚度及第III层材料厚度同时达到最小，因为双方互相影响，即一方出现最小厚度是另一方可能没有达到最优，因此最优解是两个目标共同达到最优。

直接迭代求解的话时间复杂度是 $O(n^2)$ 级别， n 为一个条件的迭代次数，效率太低。因此可以使用粒子群算法，初始化为一组随机可行解，通过其所处位置向量、速度向量及状态方程在搜索空间逼近最优解。

五、模型的建立和求解

5.1 问题一

5.1.1 模型的建立

本题要求求出高温环境下从防护服到皮肤表面的温度分布。因此我们需要求出防护服夹层在任意时刻任意位置的温度。

不考虑防护服的形状,则任意时刻时任意温度相同的所有点可以构成一个等温面,结构图如图 5-1 所示。因此我们选择防火服表面的任意一点,将这点的切平面的沿温度梯度的方向的法线建立一个一维坐标系(如图 5-2),则此一维坐标系可以描述出任意时刻任意位置的温度情况。

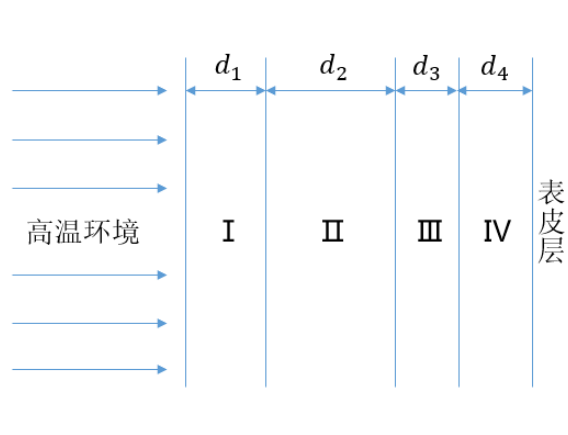


图 5-1 防火服夹层结构图

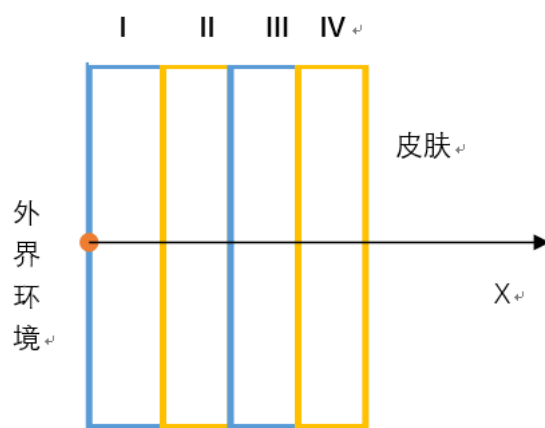


图 5-2 防火服的一维坐标系

通过查阅资料^[1]可知,高温状态下,热的传递有三种方式。为热传导、热辐射和热对流。根据实际情况,当假人与防护服之间的间隙大小不超过 8mm,无法形成空气对流运动,因此不考虑假人与防护服之间空气的热对流引起的热量散失问题。由于本题中外界高温环境和表皮温度之间温差较大,因此主要考虑热传导

的情况。

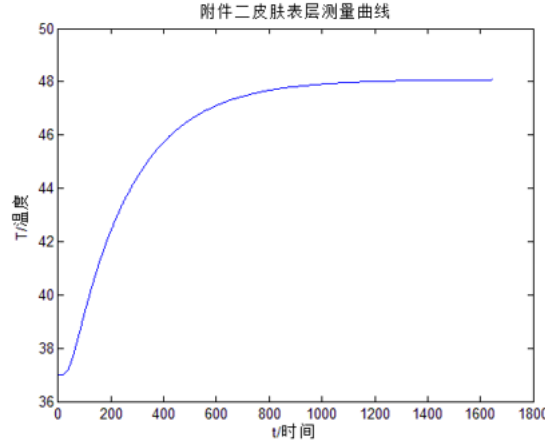


图 5-3 皮肤表层温度变化曲线

如图 5-2，拟合附件二中的皮肤表层测量数据可以发现，表层皮肤在高温环境下前期随着时间的改变而改变，后期温度不再变化维持稳定。因此我们可以认为高温作业专业服装导热系统中前期温度场为非稳态温度场，后期温度场为稳态温度场，其表达式为：

$$\text{稳态温度场: } T = f(x, t), \quad t \in (0, t_m) \quad (5-1)$$

$$\text{非稳态温度场: } T = f(x), \quad t \in (t_m, t_n) \quad (5-2)$$

式中， t 为时间， T 为温度， t_m 为稳态与非稳态交界时刻， t_n 为总时间。

稳态温度场中温度不随时间变化而变化，因此当前只考虑前期的一维非稳态温度场的模型建立即可，而后期为稳态温度场，其任意时刻温度相同，因此任意时刻的任意位置的温度等于前期非稳态场中 t_m 时刻相应位置的温度。假设假人和防护服被放入高温时的时刻温度都是 37°C 。

根据能量守恒定律和傅里叶定律，分别对每一层的材料夹层建立导热微分方程：

对 I 层材料建立导热微分方程^[2]：

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad x \in (0, d_1), \quad t \in (0, t_m) \quad (5-3)$$

其初始条件为：

$$T(x, 0) = 37^\circ\text{C} \quad x \in (0, d_1) \quad (5-4)$$

边界条件为：

$$x = 0, \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{\infty}) \quad (5-5)$$

$$x = d_1, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (5-6)$$

其中, ρ_1 为第一层材料密度, c_1 为第一层材料比热容, k_1 为第一层材料的比热容, h 为外界气体对第一层材料的对流交换系数。

将 (5-3)、(5-4)、(5-5)、(5-6) 式子联立, 并用有限差分法将其化为差分方程组^[3]为

$$\begin{cases} T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\ T(d_1, t+1) = T(d_1-1, t+1) \\ T(1, t+1) = \frac{1}{\frac{h \Delta x}{k_1} + 1} (T(2, t+1) + \frac{h \Delta x}{k_1} T_{\infty}) \end{cases} \quad (5-7)$$

其中 $h = C(G_r P_r)^n KL$

查阅资料^[4]得知, C 的取值为 0.59, n 的取值为 0.25, G_r 为格拉晓夫数, 取值为 $10^4 \sim 3 \times 10^9$ 。

其余材料夹层的方程建立与第 I 层类似, 只是导热微分方程式右边可能有一点变化以及边界条件不同。

对 II 层材料建立导热微分方程组 (5-8):

$$\begin{cases} \rho_2 c_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_2 \frac{\partial T}{\partial x} \right], x \in (d_1, d_1 + d_2), t \in (0, t_m) \\ T(x, 0) = 37^\circ\text{C} \quad x \in (d_1, d_1 + d_2) \\ x = d_2, \quad -k_2 \frac{\partial T}{\partial x} = -q''_{d_2} \\ x = d_1, \quad -k_2 \frac{\partial T}{\partial x} = -q''_{d_1} \end{cases} \quad (5-8)$$

转化为微分方程组为式 (5-9):

$$\begin{cases} T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\ T(d_1, t+1) = 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} T(d_1-1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2}\right) T(d_1, t) + \frac{\frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} q''_{d_1} \Delta x}{k_2} \\ T(d_2, t+1) = 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} T(d_2-1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2}\right) T(d_2, t) + \frac{\frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} q''_{d_2} \Delta x}{k_2} \end{cases} \quad (5-9)$$

对 III 层材料建立导热微分方程组 (5-10):

$$\begin{cases} \rho_3 c_3 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_3 \frac{\partial T}{\partial x} \right], x \in (d_2, d_1 + d_2 + d_3), t \in (0, t_m) \\ T(x, 0) = 37^\circ\text{C} \quad x \in (d_2, d_1 + d_2 + d_3) \\ x = d_2, \quad -k_3 \frac{\partial T}{\partial x} = -q''_{d_2} \\ x = d_3, \quad -k_3 \frac{\partial T}{\partial x} = -q''_{d_3} \end{cases} \quad (5-10)$$

转化为微分方程组为式(5-11)：

$$\begin{cases} T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\ T(d_2, t+1) = 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} T(d_2-1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2}\right) T(d_2, t) + \frac{\frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} q''_{d_2} \Delta x}{k_3} \\ T(d_3, t+1) = 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} T(d_3-1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2}\right) T(d_3, t) + \frac{\frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} q''_{d_3} \Delta x}{k_3} \end{cases} \quad (5-11)$$

对IV层材料建立导热微分方程组(5-12)：

$$\begin{cases} \rho_4 c_4 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_4 \frac{\partial T}{\partial x} \right], x \in (d_3, d_1 + d_2 + d_3 + d_4), t \in (0, t_m) \\ T(x, 0) = 37^\circ\text{C} \quad x \in (d_3, d_1 + d_2 + d_3 + d_4) \\ x = d_3, \quad -k_4 \frac{\partial T}{\partial x} = -q''_{d_3} \\ x = d_4, \quad -k_4 \frac{\partial T}{\partial x} = -q''_{d_4} \end{cases} \quad (5-12)$$

转化为微分方程组为式(5-13)：

$$\begin{cases} T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\ T(d_3, t+1) = 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} T(d_3-1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2}\right) T(d_3, t) + \frac{\frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} q''_{d_3} \Delta x}{k_4} \\ T(d_4, t+1) = 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} T(d_4-1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2}\right) T(d_4, t) + \frac{\frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} q''_{d_4} \Delta x}{k_4} \end{cases} \quad (5-13)$$

将式(5-7)、式(5-9)、式(5-11)、式(5-13)分别求解，即可得到每层材料上任意时刻任意位置的温度情况，将结果进行合并，即可得到防护服从外界环境到皮肤表层不同空间和时间下的温度分布情况。

5.1.2 模型的求解

由上模型的建立可以很清楚的观察到，一开始我们建立的关于热传导的微分方程，但是微分方程具有连续性，然而这种连续性计算机很难解出结果，但是如果基于微元法的思想，使热传导方程做某种近似，将其分成若干个小微元，使之转换成差分方程，利用差分方程的离散性质，给定其初始条件，利用计算机迭代模拟出其求解过程，最后利用 MATLAB 测试版的画图功能画出离散点，连接成折线图，当其微元足够小的时候，就可以把折线图近似成真实的曲线图。

式(5-7)、式(5-9)、式(5-11)、式(5-13)为其相应的差分方程，其中时间 t 为微元量，总时间为 5400s，为了精确的描绘曲线的特性，我们取时间步长为 0.01，所以可以将它分成 540000 份进行求解。

代入初始条件：

$$\begin{aligned} T(d_0, t) &= 75^\circ\text{C} \\ T(x, t_0) &= 37^\circ\text{C} \end{aligned}$$

其中 d_0 为与外界环境接触的初始位置, x 为除了 d_0 外的任意位置, t_0 为初始时刻, t 为任一时刻。

根据以上所述, 即可根据迭代法进行仿真, 我们对仿真结果与所给数据进行对比(如图 5-3)。

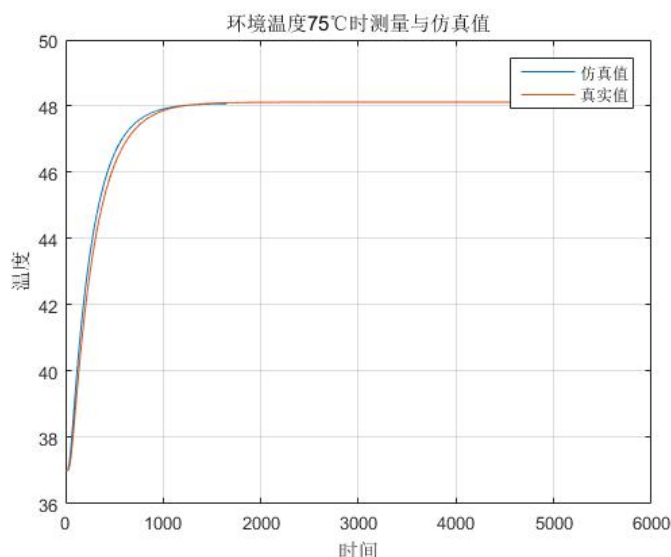


图 5-3 环境温度 75℃ 时测量与仿真对比图

观察图 5-3 可以看出, 利用计算机仿真结果与其真实测量值之间近似重合, 由此可以得出模型假设成立。其中 $\lambda = \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2}$, λ 的值分别为 0.0496、0.0511、0.0878、0.0378。

利用 MATLAB 测试版绘制 $T(x, t)$ (即温度随时间和位置变换的函数) 的三维立体图, 运行结果如下(图 5-4)所示。

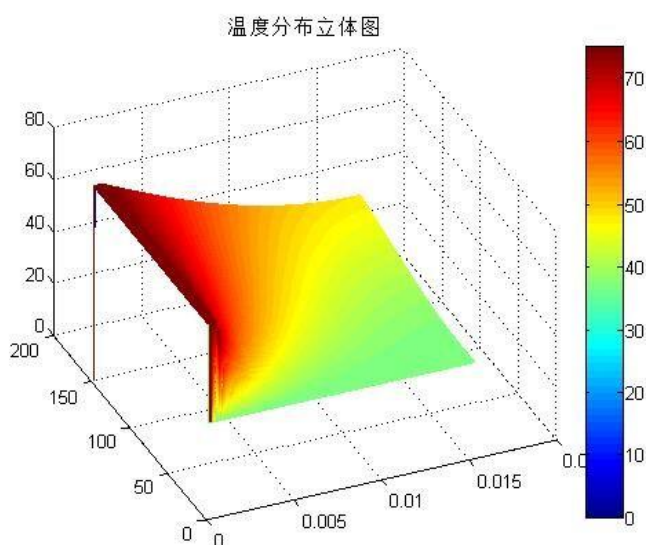


图 5-4 外界环境 75℃ 情况下温度分布图

观察图 5-4 可知, Z 轴为温度, X 轴为时间, Y 轴为位置。观察整个图的趋势, 斜率逐渐变缓, 由此可知, 温度传导速率逐渐降低, 在某一时间的不同位置温度分布呈现近似反函数的分布。

将迭代结果输出至 problem1.xlsx 中, 因为数据庞大, 因此展示部分数据如表 5-1 和表 5-2, 表中给出早期四个边界位置和后期相同位置的部分温度分布, 根据两表可知在初试时间热防护服处于非稳态状态, 温度由空间和时间共同决定, 到传热后期, 防护服吸收能量和释放能量达到平衡, 温度只受空间位置影响, 因此可以断定在导热后期热防护服达到稳态。热防护服的温度分布详细请见支撑材料 problem1.xlsx。

表 5-1 非稳态部分温度分布

时间/s 位置	1	50	100	150	200
I	50.05251	70.95734	72.20803	72.73273	73.00160
II	37.00000	42.92999	49.20424	52.50216	54.39745
III	37.00000	38.19677	41.17207	43.44385	45.08169
IV	37.00000	37.0079	37.04756	37.24558	37.55687

表 5-2 稳态部分温度分布

时间/s 位置	1400	2400	3400	4400	5400
I	73.60564	73.60969	73.60975	73.60976	73.60976
II	59.66810	59.70669	59.70730	59.70732	59.70732
III	51.31500	51.36504	51.36584	51.36585	51.36585
IV	40.68092	40.70690	40.70731	40.70732	40.70732

注: I、II、III、IV 为高温作业服装系统之间边界位置。

5.1.3 模型的优化

由导热微分方程及其边界条件可知, 我们在求解时将高温作业工作服的材料表面当做没有缝隙的固体表面处理, 因此也就不用考虑热辐射这种传递方式, 但是在实际中这种材料是不可能存在的, 因此需要考虑材料表面的缝隙处的热辐射。

I、II、III 层的材料是固体, 因此考虑他们的空隙, 而第 IV 层的传热物质为流体空气, 因此不需要考虑其空隙。

上网查阅资料可知, 衣服表面织物的孔隙率在 1%~15% 不等, 而高温作业工作服的作用是防止高温灼伤等, 因此其孔隙率应该较小, 透过的热辐射才会较少,

因此我们假定这三层材料的孔隙率都为 5%。

一般物体的辐射能量公式为

$$E = \beta \sigma T^4 \quad (5-14)$$

其中 β 为吸收能力，其值小于 1， σ 为单位时间的辐射，单位为 $\text{W} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

根据 Chitrphiomsri 的高温作业工作服模型^[5]，可知边界由辐射产生的热通量为

$$q'' = h(T - T_{cai}) \quad (5-15)$$

将上式分别代入 I、II、III 层材料的导热微分方程及边界条件中，再次进行差分化求解得到结果与未优化之前的结果与测量值的比较图 5-5。

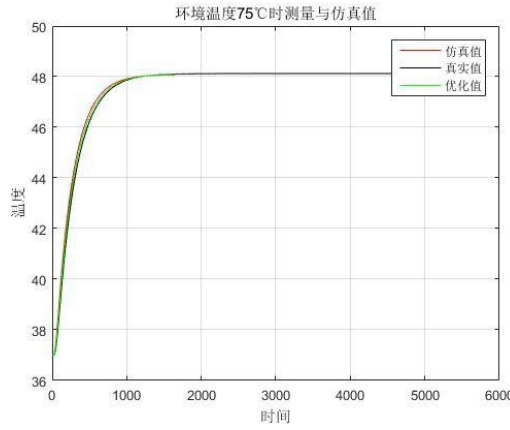


图 5-5 差分结果优化图

通过对比图我们发现增加材料孔隙率之后的优化结果相比于不优化时更接近于测量结果。

5.2 问题二

5.2.1 模型的建立

本题要求给定条件下 II 层材料的最优厚度，因此认为这是一个目标规划问题。同时考虑高温作业工作服的舒适性和经济性，我们可以认为其最优厚度就是满足规划条件下的最小厚度。

第一个条件是工作 60 分钟时，假人皮肤外侧温度不超过 47℃，列出式子 (5-16)

$$T(d_1 + d_2 + d_3 + d_4, 3600) \leq 47 \quad (5-16)$$

第二个条件工作 60 分钟时，假人皮肤外侧温度超过 44℃ 的时间不超过 5 分

钟，假设 t_1 为假人皮肤第一次出现 44°C 的时刻， t_2 为假人皮肤最后一次出现 44°C 的时刻，列出式子（5-17）

$$t_2 - t_1 \leq 5 \times 60 = 300 \quad (5-17)$$

因此，可以上面式子与（5-7）、（5-9）、（5-11）、（5-13）联立列出目标规划方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(x) = d_2 \\ t = 60 \times 60 = 3600 \\ T(d_1 + d_2 + d_3 + d_4, 3600) \leq 47 \\ t_2 - t_1 \leq 5 \times 60 = 300 \\ T_{\infty} = 65 \\ T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\ T(d_1, t+1) = T(d_1 - 1, t+1) \\ T(1, t+1) = \frac{1}{\frac{h \Delta x}{k_1} + 1} (T(2, t+1) + \frac{h \Delta x}{k_1} T_{\infty}) \\ T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\ T(d_1, t+1) = 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} T(d_1 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2}\right) T(d_1, t) + \frac{\frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} q''_{d_1} \Delta x}{k_2} \\ T(d_2, t+1) = 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} T(d_2 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2}\right) T(d_2, t) + \frac{\frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} q''_{d_2} \Delta x}{k_2} \\ T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\ T(d_2, t+1) = 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} T(d_2 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2}\right) T(d_2, t) + \frac{\frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} q''_{d_2} \Delta x}{k_3} \\ T(d_3, t+1) = 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} T(d_3 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2}\right) T(d_3, t) + \frac{\frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} q''_{d_3} \Delta x}{k_3} \\ T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\ T(d_3, t+1) = 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} T(d_3 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2}\right) T(d_3, t) + \frac{\frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} q''_{d_3} \Delta x}{k_4} \\ T(d_4, t+1) = 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} T(d_4 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2}\right) T(d_4, t) + \frac{\frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} q''_{d_4} \Delta x}{k_4} \end{array} \right. \quad (5-18)$$

通过求解上述方程组，可以找到满足以上两个条件的最优解，亦即最优厚度。

5.2.2 模型的求解

本题是在环境温度为 65°C 等给定条件下求解 II 层的最优厚度。根据附件 2 所给数据以及结合第一问，可以观察出在环境温度为 75°C 下，当 1647 秒时假人皮肤温度已经达到了稳定的 48.08°C ，即出现了温度饱和，此后温度不在发生改

变。类比可知，在问题二中的某一时刻存在温度饱和现象，那么题目要求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，也就是说温度最多在最后的 5 分钟为 $44\text{--}47^{\circ}\text{C}$ 范围。

根据式 5-17 可知，其中包括单目标规划问题求解与差分方程问题求解，因为它们都是通过迭代收敛方法求解，从而在很大程度上增加了算法的空间复杂度，所以我们决定使用多重搜索算法进行求解，从很大程度上减小了空间复杂度。

由此通过计算，部分数据列表如下(表 5-3)所示：

表 5-3 不同 II 层厚度下部分数据

II 层厚度(mm)	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6
超过 44°C 时间(s)	304	302	301	297	295	294
假人表面最高温度($^{\circ}\text{C}$)	47.54	47.01	45.97	45.06	44.89	44.01

5.2.3 稳定性分析

根据以上建立模型中的 (5-7)、(5-9)、(5-11)、(5-13) 差分方程，令自变量为 II 层织物材料厚度 d_2 ，选取步长为 0.0001，利用循环遍历的方法在最优解周围寻找几个点，借助 MATLAB 测试版进行求解，假设定义 ΔT 为假人表皮温度的变化。根据求解情况得到如下表(表 5-3)：

表 5-3 II 层材料厚度稳定性分析

$d_2(\text{m})$	0.0092	0.0093	0.0094	0.0095	0.0096
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	0.0032	0.0045	0.0060	0.0062	0.0064

可见自变量每改变 0.0001 对待求结果的影响都不大。模型稳定性很高，模型受一定范围内厚度的影响不大，从而验证了模型求解的稳定性。

5.2.4 灵敏度分析

根据以上模型中的 (5-7)、(5-9)、(5-11)、(5-13) 差分方程，可以求得厚度每增加 0.05mm 范围内，温度的变化百分比，具体结果如表(5-4)所示：

表 5-4 II 层材料厚度灵敏度分析

$\Delta d_2(\text{m})$	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
$b(\%)$	0.3	0.28	0.23	0.19	0.17

注： Δd_2 为 II 层厚度变化量， b 为变化占原来的百分比。

根据上表可以看出，当厚度变化为 0.05 时，温度变化百分比为 0.3%，其在误差允许范围内，所以 II 层织物材料灵敏度低，具有很好的安全性。

综合来说，II 层织物材料的稳定性足够高，灵敏度低，这两方面保证了 II 层织物材料的厚度在小范围内变化时，具有较高的安全性。

5.3 问题三

5.3.1 模型的建立

本题依旧是要要求给定条件下材料的最优厚度，与问题二不同的是多了一个材料厚度求解，问题变为多目标规划问题。

这时给定外界温度 $T_{\infty} = 80^{\circ}\text{C}$ 。

最终的目标应该是

$$\begin{cases} \min f(x_1) = d_2 \\ \min f(x_2) = d_4 \end{cases} \quad (5-19)$$

第一个条件是工作 30 分钟时，假人皮肤外侧温度不超过 47°C ，列出式子 (5-20)

$$T(d_1 + d_2 + d_3 + d_4, 1800) \leq 47 \quad (5-20)$$

第二个条件是工作 30 分钟时，假人皮肤外侧温度超过 44°C 的时间不超过 5 分钟，假设 t_1 为假人皮肤第一次出现 44°C 的时刻， t_2 为假人皮肤最后一次出现 44°C 的时刻，列出式子 (5-21)

$$t_2 - t_1 \leq 5 \times 60 = 300 \quad (5-21)$$

列出多目标规划方程组

$$\left\{ \begin{array}{l}
\min f(x_1) = d_2 \\
\min f(x_2) = d_4 \\
t = 60 \times 60 = 3600 \\
T(d_1 + d_2 + d_3 + d_4, 1800) \leq 47 \\
t_2 - t_1 \leq 5 \times 60 = 300 \\
T_\infty = 80 \\
T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\
T(d_1, t+1) = T(d_1 - 1, t+1) \\
T(1, t+1) = \frac{1}{\frac{h \Delta x}{k_1} + 1} (T(2, t+1) + \frac{h \Delta x}{k_1} T_\infty) \\
T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\
T(d_1, t+1) = 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} T(d_1 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2}\right) T(d_1, t) + \frac{\frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} q''_{d_1} \Delta x}{k_2} \\
T(d_2, t+1) = 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} T(d_2 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2}\right) T(d_2, t) + \frac{\frac{k_2 \Delta t}{\rho_2 c_2 \Delta x^2} q''_{d_2} \Delta x}{k_2} \\
T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\
T(d_2, t+1) = 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} T(d_2 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2}\right) T(d_2, t) + \frac{\frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} q''_{d_2} \Delta x}{k_3} \\
T(d_3, t+1) = 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} T(d_3 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2}\right) T(d_3, t) + \frac{\frac{k_3 \Delta t}{\rho_3 c_3 \Delta x^2} q''_{d_3} \Delta x}{k_3} \\
T(x, t+1) = \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x+1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2}\right) T(x, t) + \frac{k_1 \Delta t}{\rho_1 c_1 \Delta x^2} T(x-1, t) \\
T(d_3, t+1) = 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} T(d_3 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2}\right) T(d_3, t) + \frac{\frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} q''_{d_3} \Delta x}{k_4} \\
T(d_4, t+1) = 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} T(d_4 - 1, t) + \left(1 - 2 \frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2}\right) T(d_4, t) + \frac{\frac{k_4 \Delta t}{\rho_4 c_4 \Delta x^2} q''_{d_4} \Delta x}{k_4}
\end{array} \right. \quad (5-22)$$

5.3.2 模型的求解

本题和上一问相比，空间复杂度更加复杂，所以我们打算采用具有随机初始值的粒子群算法^[5]，把粒子群算法与差分方程相互结合，利用粒子群算法求出其最优解，再利用所求出的最优解代入差分方程求得全局最优解。具体步骤如下：
Step1: 设置初始化参数，设置如最大迭代次数为 1000，群体个体数目为 100 等。

差分方程得边界条件及初始条件。

Step2: 粒子群算法随机生成可行解，带入差分方程进行计算。

Step3: 通过题目所给限制条件即工作 30 分钟时假人皮肤外侧温度不超过 47℃，且超过 44℃ 的时间不超过 5 分钟筛选满足条件的解。将其与 *best* (当前最优解) 进行比较，若其为最优则跳转 *Step4*，否则返回 *Step2*。

Step4:将当前最优解赋给 best，返回 Step2。

Step5:迭代次数满足所设定的最大值，则跳出循环，得到最优解 best。

通过以上步骤所求的得最优解为：材料 II 厚度为 18.3mm，空气层 IV 厚度为 6.4mm。

5.3.3 稳定性分析

根据以上建立模型中的式(5-22)中的方程，因为此问题涉及到两个自变量，所以对其中一个自变量进行分析的时候，另一个自变量保持不变。选取步长为 0.0001，其余方法与 5.2.3 的稳定性析类似，不再赘述。 d_2 、 d_4 分别为 II 材料层、空气层的厚度。 ΔT_1 、 ΔT_2 分别为 II 层、空气层厚度变化时假人表皮温度的变化。根据求解情况得到如下表(表 5-5)：

表 5-5 II 层、空气层材料厚度稳定性分析

$d_2(\text{m})$	0.0181	0.0182	0.0183	0.0184	0.0185
$\Delta T_1(^{\circ}\text{C})$	0.0038	0.0040	0.0041	0.0043	0.0045
$d_4(\text{m})$	0.0062	0.0063	0.0064	0.0065	0.0066
$\Delta T_2(^{\circ}\text{C})$	0.0055	0.0057	0.0059	0.0060	0.0062

可见自变量每改变 0.0001 对待求结果的影响都很大。模型灵敏度很高，从而验证了模型求解的精确性。

5.3.4 灵敏度分析

根据以上模型中的 (5-7)、(5-9)、(5-11)、(5-13) 差分方程，可以求得厚度每增加 0.05mm 范围内, 温度的变化百分比，具体结果如表(5-6)所示：

表 5-6 II 层、空气层材料厚度灵敏度分析

$\Delta d_2(\text{m})$	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
$b_1(\%)$	0.3	0.28	0.23	0.19	0.17
$\Delta d_4(\text{m})$	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
$b_2(\%)$	0.29	0.24	0.22	0.21	0.19

注： Δd_2 、 Δd_4 分别为 II、空气层厚度变化量， b_1 、 b_2 分别为 II 层、空气层材料变化占原来的百分比。

因为上述已经说明了 II 层的灵敏度分析，所以在此就不在赘述了。根据上表可以看出，当厚度变化为 0.05 时，温度变化百分比为 0.29%，其在误差允许范围内，所以空气层灵敏度低，具有很好的安全性。

综合来说,空气层的稳定性足够高,灵敏度低,这两方面保证了空气层的厚度在小范围内变化时,具有较高的安全性。

六、模型的优缺点及推广

6.1 模型的优缺点

模型的优点:

建立了动态热传导微分方程,在结合实际的情况下尽可能多的考虑影响热防护服的热传导影响因素,为求解此类问题提供了初始模型。采用差分离散的方法对偏导模型进行求解,降低求解的复杂度并且使模型更加合理准确。

利用多重搜索算法,通过大范围内搜索确定最优解的大致范围,再在精确范围内进行精确结果的确定,大大减少时间。

利用粒子群算法,初始化为一组随机解,在其位置向量、方向向量及当前目标函数确定的适应度在搜索空间迭代逼近,从而提高了求解的效率。

应用导热微分方程后,在优化阶段引入了防护服材料孔隙率,从而引入了热辐射对热初代的影响,从而使模型更贴近实际。

模型的缺点:

因为考虑到外界环境温度较低的情况,忽略了热辐射在热传递过程中的影响,不利于模型在高温情况下的使用。

对于稳态和非稳态温度场的边界问题未能完全求解,使计算结果存在一定得误差。

6.2 模型的推广

该模型是建立在热量传导情况下的热防护材料规划问题,更多热防护问题可以在此模型的基础上进行拓展,例如在真人环境下的高温作业服装的设计和研究可以在此模型的基础上进行求解;保暖设备的研究与分析也可在此原理上进行研究。

参考文献

- [1] 余昌铭. 热传导及其数值分析. 清华大学出版社. 1982. 4
- [2] 卢琳珍 徐定华 徐映红. 应用三层热防护传递改进模型的皮肤烧伤度预测. 浙江理工大学理学院 上海财经大学数学学院. 2008. 01
- [3] 杨能彪. 一维非稳态导热问题的数值计算. 青海师范大学. 2006

- [4] 浪子飞扬鱼儿. 各种对流换热过程的特征及其计算公式. <https://wenku.baidu.com/view/877e70f54693daef5ef73ddf.html>. 2012. 6. 5
- [5] 张庆科. 粒子群优化算法及差分进行计算研究. 山东大学. 2006

附件 1

表 5-1 非稳态部分温度分布

时间/s 位置	1	50	100	150	200
I	50.05251	70.95734	72.20803	72.73273	73.00160
II	37.00000	42.92999	49.20424	52.50216	54.39745
III	37.00000	38.19677	41.17207	43.44385	45.08169
IV	37.00000	37.0079	37.04756	37.24558	37.55687

表 5-2 稳态部分温度分布

时间/s 位置	1400	2400	3400	4400	5400
I	73.60564	73.60969	73.60975	73.60976	73.60976
II	59.66810	59.70669	59.70730	59.70732	59.70732
III	51.31500	51.36504	51.36584	51.36585	51.36585
IV	40.68092	40.70690	40.70731	40.70732	40.70732

注：I、II、III、IV为高温作业服装系统之间边界位置。

附件 2

问题一：

```
function [ ] = diyiwencaice( )
clear;
clc;
k=[0.082 0.37 0.045 0.028];%热传导率
p=[300 862 74.2 1.18];%密度
c=[1377 2100 1726 1005];%比热容
% l=0.0001;
% nu=0.073*2^(1/3)*1000000^(1/3)*(0.001/0.0001)^(-1/9)
% h=nu.*k*1;%对流传热系数 改
h=9.2551e-6;
a=k./(p.*c);%导温系数
b1=6e-4;b2=6e-3;b3=3.6e-3;b4=5e-3;%厚度
N1=2e-4;%空间不长
N2=2.5e-3;%第四块不长
tao=1e-2;%时间步长 待调整
t=5400;%总时长 AQWQ
M=b1+b2+b3;%长度
i=int32(M/N1);k=int32(t/tao);
```

```

% lamda=[0.2385 0.2914 0.3472 0.3637];
lamda=a.*tao/(N1*N1);
lamda(4)=a(4)*tao/(N2*N2);
disp(lamda);
T=zeros(83,k);%T(i,k)i 为空间, k 为时间
%初始条件
T(1,1:540000)=75;
T(2:83,1:540000)=37;
T(2:83,1)=37;
% T(b1,k)=
% T(b2,k)=
% T(b3,k)=
for m=1:k-1    %不确定
    q=2;
    while q<=int32(b1/N1)+1
        T(q,m+1)=lamda(1)*(T(q+1,m)+T(q-1,m))+(1-2*lamda(1))*T(q,m);
        q=q+1;
    end
    % T(q,m+1)=T(q-1,m+1);
    q=2;
    temp=int32(b1/N1);
    while q<=int32(b2/N1)+1
        T(q+temp,m+1)=lamda(2)*(T(q+1+temp,m)+T(q-1+temp,m))+(1-2*lamda(2))*T(q+temp,m);
        q=q+1;
    end
    % T(q+temp,m+1)=T(q+temp-1,m+1);
    q=2;
    temp=int32(b1/N1+b2/N1);
    while q<=int32(b3/N1)+1
        T(q+temp,m+1)=lamda(3)*(T(q+1+temp,m)+T(q-1+temp,m))+(1-2*lamda(3))*T(q+temp,m);
        q=q+1;
    end
    % T(q+temp,m+1)=(T(q+temp-1,m+1)+beita*75)/(beita+1);
    q=2;
    temp=int32(b1/N1)+int32(b2/N1)+int32(b3/N1);
    while q<=int32(b4/N2)+5
        T(q+temp,m+1)=lamda(4)*(T(q+1+temp,m)+T(q+temp-1,m))+(1-2*lamda(4))*T(q+temp,m);

```

```

mp,m);
    q=q+1;
end
%    T(q+temp,m+1)=T(q+temp-1,m+1);
    q=1;
    temp=58;
    while q<=24

T(q+temp,m+1)=0.0093*(T(q+1+temp,m)+T(q+temp-1,m))+(1-2*0.0093)*T(q+temp,
m);
        q=q+1;
    end
end
%读入 xlsx 文件
fileID='C:\Users\logan\Desktop\2018-A-Chinese\CUMCM-2018-Problem-A-Chinese-
Appendix.xlsx';
xlRange = 'B3:B1652';
[A,B] = xlsread(fileID, '附件 2', xlRange);%A 是数值 B 是字符串
plot(A);
hold on
pic=T(59,1:100:540000);
plot(pic);
title('环境温度 75℃时测量与仿真值');
grid on
legend('仿真值','真实值');
xlabel('时间');
ylabel('温度');
%设置立体网格
figure
X=1:83;
Y=1:100:540000;
[xx,yy]=meshgrid(X,Y);
mesh(xx,yy,T(:,1:100:540000));
title('温度分布立体图');
xlswrite('C:\Users\logan\Desktop\problem1.xlsx',T(:,1:100:540000));
'wancheng'
end

```

问题二：

```

function [ ] = dierwenzuizhong( )
clear;
clc;
k=[0.082 0.37 0.045 0.028];%热传导率
p=[300 862 74.2 1.18];%密度

```

```

c=[1377 2100 1726 1005];%比热容
cha=100;%与 44 的差值
% l=0.0001;
% nu=0.073*2^(1/3)*1000000^(1/3)*(0.001/0.0001)^(-1/9)
% h=nu.*k*1;%对流传热系数 改
h=9.2551e-6;
a=k./(p.*c);%导温系数
for b2=0.6e-3:0.1e-3:2.6e-3
b1=6e-4;b3=3.6e-3;b4=5.5e-3;%厚度
N1=2e-4;%空间不长
N2=2.5e-3;%第四块不长
tao=1e-2;%时间步长 待调整
t=3600;%总时长 AQWQ
M=b1+b2+b3;%长度
i=int32(M/N1);k=int32(t/tao);
% lamda=[0.2385 0.2914 0.3472 0.3637];
lamda=a.*tao/(N1*N1);
lamda(4)=a(4)*tao/(N2*N2);
% disp(lamda);
num=int32(M/N1)+int32(b4/N2)+24;
T=zeros(num+1,k);%T(i,k)i 为空间, k 为时间
%初始条件
T(1,1:360000)=65;
T(2:num,1:360000)=37;
T(2:num,1)=37;
% T(b1,k)=
% T(b2,k)=
% T(b3,k)=
for m=1:k-1 %不确定
    q=2;
    while q<=int32(b1/N1)+1
        T(q,m+1)=lamda(1)*(T(q+1,m)+T(q-1,m))+(1-2*lamda(1))*T(q,m);
        q=q+1;
    end
    % T(q,m+1)=T(q-1,m+1);
    q=2;
    temp=int32(b1/N1);
    while q<=int32(b2/N1)+1
        T(q+temp,m+1)=lamda(2)*(T(q+1+temp,m)+T(q-1+temp,m))+(1-2*lamda(2))*T(q+temp,m);
        q=q+1;
    end
    % T(q+temp,m+1)=T(q+temp-1,m+1);

```

```

    q=2;
    temp=int32(b1/N1+b2/N1);
    while q<=int32(b3/N1)+1

T(q+temp,m+1)=lamda(3)*(T(q+1+temp,m)+T(q-1+temp,m))+(1-2*lamda(3))*T(q+te
mp,m);
        q=q+1;
    end
%    T(q+temp,m+1)=(T(q+temp-1,m+1)+beita*75)/(beita+1);
    q=2;
    temp=int32(b1/N1)+int32(b2/N1)+int32(b3/N1);
    while q<=int32(b4/N2)+1

T(q+temp,m+1)=lamda(4)*(T(q+1+temp,m)+T(q+temp-1,m))+(1-2*lamda(4))*T(q+te
mp,m);
        q=q+1;
    end
%    T(q+temp,m+1)=T(q+temp-1,m+1);
    temp=int32(b1/N1)+int32(b2/N1)+int32(b3/N1)+int32(b4/N2);
    while q<=24

T(q+temp,m+1)=0.0093*(T(q+1+temp,m)+T(q+temp-1,m))+(1-2*0.0093)*T(q+temp,
m);
        q=q+1;
    end
end
% 判断条件
if cha>abs(T(num-28,k)-44)
    cha=abs(T(num-28,k)-44)
    bestb2=b2;
end
end
% xlswrite('C:\Users\logan\Desktop\problem1.xlsx',T(:,1:100:360000));
'wancheng'
end

```

问题三：

```

function [ ] = disanwen( )
clear;
clc;
k=[0.082 0.37 0.045 0.028];%热传导率
p=[300 862 74.2 1.18];%密度
c=[1377 2100 1726 1005];%比热容
cha=100;%与 44 的差值

```

```

% l=0.0001;
% nu=0.073*2^(1/3)*100000^(1/3)*(0.001/0.0001)^(-1/9)
% h=nu.*k*1;%对流传热系数 改
h=9.2551e-6;
a=k./(p.*c);%导温系数
for b2=0.6e-3:0.1e-3:26e-3
    for b4=0.6e-3:0.1e-3:6.4e-3
        b1=6e-4;b3=3.6e-3;b4=5.5e-3;%厚度
        N1=2e-4;%空间不长
        N2=2.5e-3;%第四块不长
        tao=1e-2;%时间步长 待调整
        t=1800;%总时长 AQWQ
        M=b1+b2+b3;%长度
        i=int32(M/N1);k=int32(t/tao);
        % lamda=[0.2385 0.2914 0.3472 0.3637];
        lamda=a.*tao/(N1*N1);
        lamda(4)=a(4)*tao/(N2*N2);
        % disp(lamda);
        num=int32(M/N1)+int32(b4/N2)+24;
        T=zeros(num+1,k);%T(i,k)i 为空间, k 为时间

%初始条件
T(1,1:180000)=80;
T(2:num,1:180000)=37;
T(2:num,1)=37;
% T(b1,k)=
% T(b2,k)=
% T(b3,k)=

for m=1:k-1 %不确定
    q=2;
    while q<=int32(b1/N1)+1
        T(q,m+1)=lamda(1)*(T(q+1,m)+T(q-1,m))+(1-2*lamda(1))*T(q,m);
        q=q+1;
    end
    % T(q,m+1)=T(q-1,m+1);
    q=2;
    temp=int32(b1/N1);
    while q<=int32(b2/N1)+1

T(q+temp,m+1)=lamda(2)*(T(q+1+temp,m)+T(q-1+temp,m))+(1-2*lamda(2))*T(q+te
mp,m);

```

```

        q=q+1;
    end

%      T(q+temp,m+1)=T(q+temp-1,m+1);
    q=2;
    temp=int32(b1/N1+b2/N1);
    while q<=int32(b3/N1)+1

T(q+temp,m+1)=lamda(3)*(T(q+1+temp,m)+T(q-1+temp,m))+(1-2*lamda(3))*T(q+te
mp,m);
        q=q+1;
    end

%      T(q+temp,m+1)=(T(q+temp-1,m+1)+beita*75)/(beita+1);
    q=2;
    temp=int32(b1/N1)+int32(b2/N1)+int32(b3/N1);
    while q<=int32(b4/N2)+1

T(q+temp,m+1)=lamda(4)*(T(q+1+temp,m)+T(q+temp-1,m))+(1-2*lamda(4))*T(q+te
mp,m);
        q=q+1;
    end

%      T(q+temp,m+1)=T(q+temp-1,m+1);
    temp=int32(b1/N1)+int32(b2/N1)+int32(b3/N1)+int32(b4/N2);
    while q<=24

T(q+temp,m+1)=0.0093*(T(q+1+temp,m)+T(q+temp-1,m))+(1-2*0.0093)*T(q+temp,
m);
        q=q+1;
    end
end
end
end
% 判断条件
if cha>abs(T(num-28,k)-44)
    cha=abs(T(num-28,k)-44)
    bestb2=b2;
    bestb4=b4;
end
end
% xlswrite('C:\Users\logan\Desktop\problem1.xlsx',T(:,1:100:360000));
'wancheng'
end

```