

三层防热服的传热模型与最优化设计

摘要

本文利用多层热传递模型来研究具有三层织物厚度的防热服的设计问题，目的是提高防热服在高温作业下的防热性能。首先，研究不同材料之间的传热规律，建立传热模型，然后针对第一个问题，根据给定的Ⅱ、Ⅳ层的厚度，找出防热服内部的温度分布情况。利用傅里叶传热定律用单层平面传热推出多层平面传热的方法，建立了四层锅壁传热模型，根据附件一中每一层材料的参数，将各个数据依次带入公式，通过 Excel 的函数计算出温度分布状况。

针对第二个问题，我们对模型进行修改后建立了随某一层材料厚度变化的四层锅壁传热模型。以第Ⅱ层材料的厚度为自变量，采用傅里叶定理、比热容定理，研究自变量变化后单位时间单位厚度的热量传导和每层材料每时每刻的温度变化。利用 Matlab 软件穷举得到每秒每一个接触面的温度，最终经过筛选得到在指定温度条件时的厚度取值范围，然后结合考虑成本和研发周期因素选出第Ⅱ层材料的最优厚度为 14.3mm。

针对第三个问题，我们在探讨第二问的基础上新增一个自变量：第Ⅳ层的厚度。参照第二问的模型以及穷举法，用 Matlab 列举所有情况，并筛选出所有符合条件的第Ⅱ、Ⅳ层的厚度组合，最后选出最优的厚度组合——第Ⅱ层为 4.8mm，第Ⅳ层为 5.6mm。

本文对所建立的模型，采用数值模拟检验法来验证其合理性。随后增加考虑织物与热源之间的热交换边界的热量传递和热辐射的热量传递等因素，对模型进行了优化。略显不足的是，将不同材质的每一层中的温度变化看成了线性变化且忽略了防热服内部织物的空隙。若将防热服-空气-人系统细化分割，考虑上整个系统连续的传热性，再算上空气与防热服外层对流的热量和各层之间的空隙对传热的影响，仍可以对模型进一步优化。

关键词：防热服、傅里叶定律、热传递公式、热辐射、穷举法

一、问题重述

问题背景:

随着工业的发展,高温工作需要越来越多的劳动力,而长期的高温作业不仅会伤害人体皮肤,更会对人体的健康造成一定的影响。而防热服的设计不仅要考虑材料成本,更要考虑方便性和合理性,所以合理的设计不仅可以保护高温作业的劳动者,更是可以提高工作效率。

需要解决的问题:

问题(1):根据附件1中专用服饰的材料参数和在知道专用服饰第I层为0.6mm、II层厚度为6mm、III层为3.6mm、IV为5mm的情况下,让工作者穿着专用服饰在温度为75℃下工作90min,根据此高温下假人皮肤外侧的温度建立模型,从而计算出这90分钟内每一层的温度分布情况。

问题(2):根据模型一中的专用服饰的各层温度分布情况,在IV的厚度变为5.5mm时,在工作时间为55分钟时,温度不得大于44℃,在工作时间为60分钟时,温度不得大于47℃的情况下II层有最优解。

问题(3):根据问题(2)中的结果进一步分析的专用服饰在外界环境温度80℃时,在工作时间为25℃时,温度不得大于44℃,工作时间为30分钟时,温度不得大于47℃情况下有II、IV层的最优厚度。

二、问题分析

针对问题(1),在给定了防热服四层的确切厚度,又给定了稳定的热源温度75℃,从前提条件中知道假人的温度控制在37℃的情况下,相当于给了一个降温装置,使得假人内部的温度保持不变,也默认了这里的防热服的起始温度为37℃,那么根据附件一中各层的材料比热容、热传导率、密度和厚度,再利用傅里叶公式就可以算出此情况下各层之间的温度差,最后计算出每一层的温度情况,得出温度分布。

针对问题(2),此时的IV层厚度为5.5mm时,第I层、第III层是固定的0.6mm和3.6mm厚度,求一定条件下的第II层最优厚度,我们可以结合傅里叶传热定律和热力学

公式，同样运用问题（1）中的锅炉传热模型，只是此时温度改为了 65°C ，我们可以利用二分法，将第 II 层的范围进行压缩逼近条件，从而找到最优厚度。

针对问题（3），本题是问题（2）的升级，是将原本的一个变量变为了两个变量，参照第（2）题中推举出来的公式以及穷举法，该题的所有变化情况仍然可以用 matlab 软件把所有情况列举出来，接着依照题目的要求筛选出所有符合条件的第 II、IV 层的厚度组合，然后选出最优的厚度组合。

问题（2）和问题（3）中都有默认的最优条件，刚好达到隔热效果时候对应的厚度，为了降低成本，一定会有的尽可能的轻薄。

三、模型假设

- （1）假设热传递过程中，隔热服的结构不变。
- （2）假设专用服饰的每一层的初始温度都是 37°C 。
- （3）系统热传递过程中只考虑热传递，忽略水汽、汗液的影响，即不考虑湿传递。
- （4）空气层的厚度值不超过 6.4mm ，热对流影响小，因而不考虑热对流。

四、符号说明

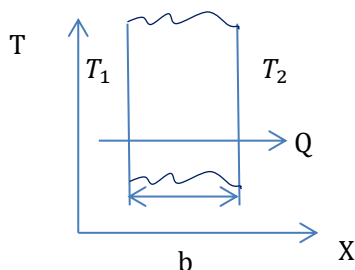
符号	定义	单位
A	传热面积	m^2
Φ	导热速率	J/s
b_i	各类材料厚度	m
t_e	暴露 在 高 温 环 时 间	s
T_i	每层的温度	$^{\circ}\text{C}$
R_i	导热热阻	K/W
C_i^A	各层的显热容	$\text{KJ}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$
c_i	不同材料的比热	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$
k_i	各类材料的热传导率	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$

五、四层锅炉传热模型建立

5.1.问题一的解决

5.1.1.建立模型前期准备¹

在稳定导热时，导热速率 Q 不随时间变化，传热面积 A 和导热系数 k 也是常数，当衣服一层厚度是 b 时，衣服内每一层的温度只沿着垂直于每一层的横向变化，如图一：



图一

则傅立叶公式可以简化为：

$$\Phi = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

将式子（1）积分，当 $x = 0$ ， $T = T_1$ ； $x = b$ 时， $T = T_2$ ，积分结果为：

$$\Phi = kA \frac{T_1 - T_2}{b} \quad (2)$$

再将式子（2）改写成热传速率方程的一般形式，则有：

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{b}{kA}} = \frac{\Delta T}{R} \quad (3)$$

$$(R = \frac{b}{kA} \text{---导热热阻, K/W})$$

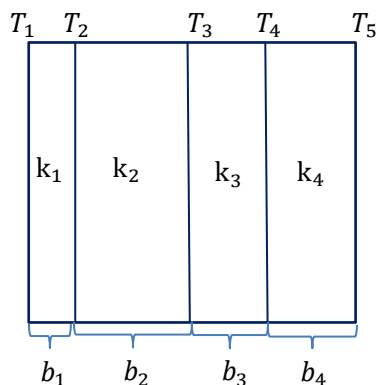
还可以利用式子（3）求出每小时每平方米壁面所传递的热量：

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{k(T_1 - T_2)}{b} \quad (4)$$

¹ 参考文献[3]

5.1.2 四层锅壁传热模型

根据单层的热传递原理和公式，再根据假设中的当空气厚度小于 6.5mm 时，不考虑空气热对流可以得出，三层的专用服饰与人体之间可以组成一个专用服饰—空气层—人体的四层系统的热传递，可以近似的看成为一个四层的锅炉模型，如图二所示：



图二

$$\Phi_1 = \frac{k_1}{b_1} A(T_1 - T_2) = \frac{\Delta T_1}{R_1} \quad \text{即} \Delta T_1 = \Phi_1 R_1 \quad (5)$$

$$\Phi_2 = \frac{k_2}{b_2} A(T_2 - T_3) = \frac{\Delta T_2}{R_2} \quad \text{即} \Delta T_2 = \Phi_2 R_2 \quad (6)$$

$$\Phi_3 = \frac{k_3}{b_3} A(T_3 - T_4) = \frac{\Delta T_3}{R_3} \quad \text{即} \Delta T_3 = \Phi_3 R_3 \quad (7)$$

$$\Phi_4 = \frac{k_4}{b_4} A(T_4 - T_5) = \frac{\Delta T_4}{R_4} \quad \text{即} \Delta T_4 = \Phi_4 R_4 \quad (8)$$

$$(5) + (6) + (7) + (8) \text{有: } \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 = \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 + \Phi_3 R_3 + \Phi_4 R_4$$

稳定热传导时: $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 = \Phi$, 故:

$$\Phi = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{\sum \Delta T}{\sum R} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总阻力}} \quad (9)$$

将 (9) 推广到一个层数为 n 的多层情况, 有:

$$\Phi = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{k_i A}} \quad (10)$$

已知专用服饰三种材料的热传导和厚度 (见附件一):

第 I 层 $k_1 = 0.082 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$, $b_1 = 0.6\text{mm} = 6.0 \times 10^{-4}\text{m}$

第 II 层 $k_2 = 0.370 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$, $b_2 = 6.0\text{mm} = 6.0 \times 10^{-3}\text{m}$

第 III 层 $k_3 = 0.045 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$, $b_3 = 3.6\text{mm} = 3.6 \times 10^{-3}\text{m}$

第 IV 层 $k_4 = 0.028 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$, $b_4 = 5.0\text{mm} = 5.0 \times 10^{-4}\text{m}$

则根据公式 (10), 可以得出:

$$\Phi = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4}{\frac{b_1}{k_1 A} + \frac{b_2}{k_2 A} + \frac{b_3}{k_3 A} + \frac{b_4}{k_4 A}} \quad (11)$$

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{T_1 - T_5}{\frac{6.0 \times 10^{-4}}{0.082} + \frac{6.0 \times 10^{-3}}{0.370} + \frac{3.6 \times 10^{-3}}{0.045} + \frac{5.0 \times 10^{-4}}{0.028}}$$

$T_1 = 75^\circ\text{C}$ 、 T_5 是皮肤的温度，皮肤的温度在 90 分钟内随时间在变化（见附件二），

由式（1）、（2）、（3）、（4）得：

$$\Delta T_1 = \Phi R_1, \Delta T_1 = T_1 - T_2 \text{ 故 } \Delta T_2 = T_1 - \Delta T_1$$

同理：

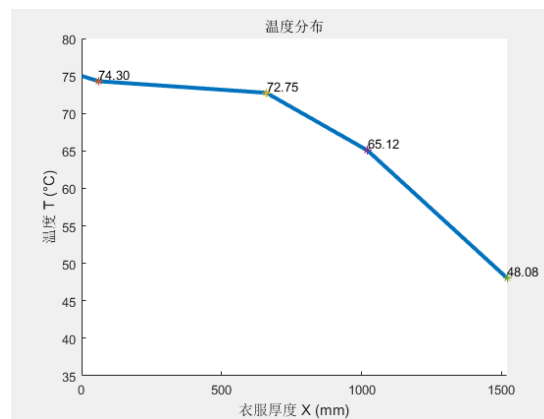
$$\Delta T_2 = \Phi R_2, \Delta T_2 = T_2 - T_3 \text{ 故 } \Delta T_3 = T_2 - \Delta T_2$$

最后：

$$\Delta T_3 = \Phi R_3$$

5.1.3. 模型结果

依照上面的推算，最终推出了三层专用服做稳定热传递时，在 75°C 的环境下工作 90 分钟的每一秒钟中每一层的温度分布情况，如图三所示，见附件 Excel 文件 problem1.xlsx。



图三

图三中显示在第 I 层中温度较高，第 II 层的时候也较高，到第 III 层和第 IV 层，温度明显达不到这么高，说明防热服防热效果较好。

5.2.问题二的解决

5.2.1.模型的建立

(1) 从外到内的热传递

对各层单位时间内同一单位面积 A 的材料利用傅里叶定律 $\Phi = -\lambda A dT/db$, 即公式

(5)、(6)、(7)、(8), 此时, $T_1 = 65^\circ\text{C}$, $T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = 37^\circ\text{C}$, 根据每一层的热传导率可以算出对应的 Q_i ($i=1,2,3,4,5$) 再根据热量的计算公式:

$$Q_i = c_i m_i \Delta T_i, \text{ 即得到 } \Delta T_i = \frac{Q_i}{c_i m_i}$$

且知

$$T_i' = T_i + \Delta T_i$$

根据附录 1, 我们将各项材料参数带入公式中, 其中

$$\lambda_1 = 0.082, \lambda_2 = 0.37, \lambda_3 = 0.045, \lambda_4 = 0.028, \lambda_5 = 0.255$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= 0.082 \cdot \frac{65 - T_1}{0.000006} \cdot 1 \cdot 1; T_1' = T_1 + \frac{Q_1}{1377 \cdot 300}; \\ Q_2 &= 0.37 \cdot \frac{T_1 - T_2}{0.0001 \cdot T} \cdot 1 \cdot 1; T_2' = T_2 + \frac{Q_2}{2100 \cdot 862}; \\ Q_3 &= 0.045 \cdot \frac{T_2 - T_3}{0.000036} \cdot 1 \cdot 1; T_3' = T_3 + \frac{Q_3}{1726 \cdot 74.2}; \\ Q_4 &= 0.028 \cdot \frac{T_3 - T_4}{0.000055} \cdot 1 \cdot 1; T_4' = T_4 + \frac{Q_4}{1005 \cdot 1.18}; \\ Q_5 &= 0.255 \cdot \frac{T_4 - T_5}{0.00008} \cdot 1 \cdot 1; T_5' = T_5 + \frac{Q_5}{3600 \cdot 1200}; \end{aligned}$$

通过这五对公式就可以求解单位时间单位面积内每一层之间传递的热量, 求得每一层在单位时间内温度变化的差值, 进而知道该层在下一秒的初始温度。

(2) 假人的散热机制

由于假人的内部有控制温度的装置, 使得假人内部无论在何时都保持在 37°C , 故当假人表皮外侧温度上升之后便会与体内产生温度差, 热量会从皮表向体内传递, 所以在防护服的所有条件确定后, 我们才可以用 matlab 推算出在规定时间内皮肤外侧达到的温度。

$$Q_5 = 0.255 \cdot \frac{37 - T_5}{0.00008} \cdot 1 \cdot 1; T_5' = T_5 + \frac{Q_5}{3600 \cdot 1200};$$

$$Q_4 = 0.028 \cdot \frac{T_5 - T_4}{0.000055} \cdot 1 \cdot 1; T_4' = T_4 + \frac{Q_4}{1005 \cdot 1.18};$$

$$Q_3 = 0.045 \cdot \frac{T_4 - T_3}{0.000036} \cdot 1 \cdot 1; T_3' = T_3 + \frac{Q}{1726 \cdot 74.2};$$

$$Q_2 = 0.37 \cdot \frac{T_3 - T_2}{0.0001 \cdot T} \cdot 1 \cdot 1; T_2' = T_2 + \frac{Q_2}{2100 \cdot 862};$$

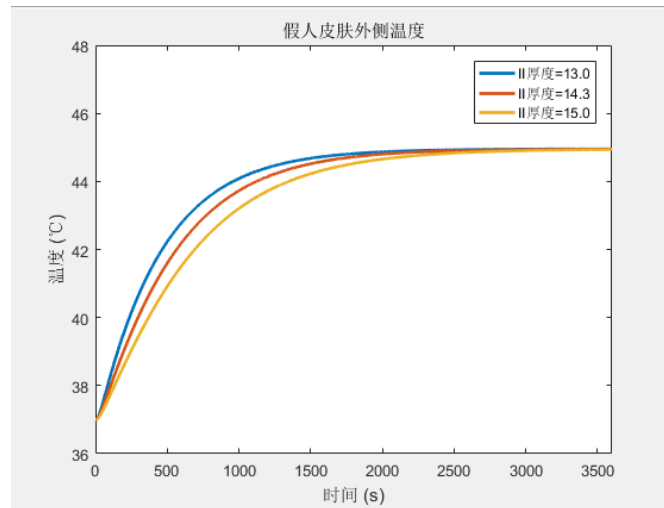
$$Q_1 = 0.082 \cdot \frac{T_2 - T_1}{0.000006} \cdot 1 \cdot 1; T_1' = T_2 + \frac{Q_1}{1377 \cdot 300};$$

在 matlab 列出以上公式后（见附件 2），可以借助 matlab 联立所有相关公式，最终运用计算机强大的计算能力把单位时间，即每一秒时刻每一层的温度一一列举出来。

5.2.2.模型的求解

通过 matlab 计算后得到不同厚度下不同时刻对应的材料温度，具体数据已附在附录。由数据显示，当三层材料的厚度介于 14.3mm~25mm 这个范围时，隔热服都可以满足题目给出对隔热服的要求。考虑到若隔热服只需要刚好满足需求便可，而且材料越多隔热服的成本可能越高、研发周期也越长，因此可知 14.3mm 是最优厚度。

为了让数据的差别显而易见地表现出来，我们采纳了三种厚度（包括最有厚度 14.3mm）所对应的数据组在 matlab 绘画出三条曲线。



图四

三种不同厚度的二层材料对应的曲线从相同的温度值开始，随着时间的增加，三条曲线的走向渐渐趋于相同，曲线逐渐发生重叠，代表的温度极值是相等的。但是在开始到趋于相同期间，三条曲线对应的温度值有一定差异。在图像中可清晰得出厚度

越薄的二层材料在 0s 到大约 2500s 时温度就越高，越厚的则越低。

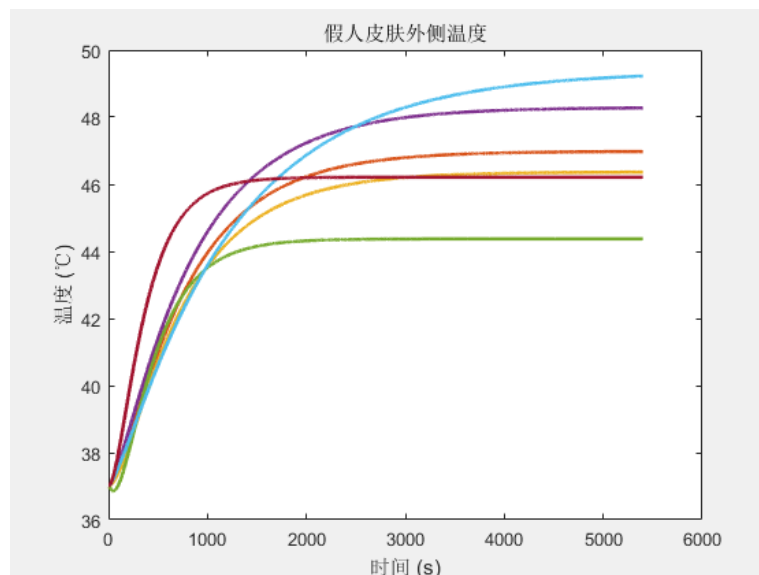
5.3.问题三的解决

5.3.1 模型的改进

相比于问题二，问题三的自变量由一个变为了两个。因此，需要对问题二中的模型进行优化，即不仅仅是解出单一材料层不同厚度在单位时间单位面积里在某一时刻对应的温度，而是要得到某一材料层不同厚度在单位时间单位面积里另一个材料层所有厚度所一一对应的温度。即同样运用傅里叶定律 $\Phi = -\lambda A dT/db$ 和公式 $\Delta T_i = \frac{Q_i}{c_i m_i}$ ，在 matlab 计算中添加一个内循环，最终得到众多个两个材料厚度的数值组合。（见附件二）

5.3.2 模型的求解

同样，通过 matlab 计算后得到两种材料不同厚度下不同时刻对应的材料温度，具体数据已附在附录。由数据显示，有多种两种材料厚度的数值组合都能让隔热服都满足题目给出对隔热服的要求。但是若考虑到隔热服只需要刚好满足需求便可，而且材料越多隔热服的成本可能越高、研发周期也越长，因此我们在所有数据组合中找出厚度和最小的那一组，即（4.8，5.6）是最优厚度的组合，可知第二层材料的最优厚度为 4.8mm，同时第四层材料的最优厚度为 5.6mm。



图五

选取了几组相连的数据组在 matlab 绘制后得此图。可见即使是同一材料厚度相同，另一材料的厚度不同的曲线的变化颇显混乱无序，即说明这种情况下两者的厚度既会相互影响，但是又非线性关系。

5.4.问题一方法优化:

第一问中我们只是考虑了热传导中的热传递,忽略了接触面之间的边界,此处可以利用微分考虑上边界上的热量传递,得出优化的方法:²

$$C_I^A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_I \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial F_L}{\partial x} - \frac{\partial F_R}{\partial x}, (x, t) \in \Omega_1 \times (0, t_e) \quad (a)$$

$$C_{II}^A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{II} \frac{\partial T}{\partial x} \right), (x, t) \in \Omega_2 \times (0, t_e) \quad (b)$$

$$C_{III}^A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{III} \frac{\partial T}{\partial x} \right), (x, t) \in \Omega_3 \times (0, t_e) \quad (c)$$

$$C_{IV}^A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{IV} \frac{\partial T}{\partial x} \right), (x, t) \in \Omega_4 \times (0, t_e) \quad (d)$$

其中, C_I^A 、 C_{II}^A 、 C_{III}^A 、 C_{IV}^A 分别为 I、II、III和IV层的显热容, $\text{KJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; T 为温度, K ; t 为时间, s ; x 为水平坐标, k_I 、 k_{II} 、 k_{III} 、 k_{IV} 分别为 I、II、III和IV层的热传导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; F_L 、 F_R 分别为向左和向右的辐射量, W ; t_e 为暴露在高温环境的时间, s ; Ω_i 表示关于 x 的取值范围 ($i=1,2,3,4,5$)

$$\Omega_1 = (0, L_I)$$

$$\Omega_2 = (b_I, b_I + b_{II})$$

$$\Omega_3 = (b_I + b_{II}, b_I + b_{II} + b_{III})$$

$$\Omega_4 = (b_I + b_{II} + b_{III}, b_I + b_{II} + b_{III} + b_{IV})$$

其中, b_I 、 b_{II} 、 b_{III} 、 b_{IV} 分别为第 I、II、III和IV层的厚度, m 。

热辐射满足:

$$\frac{\partial F_L}{\partial x} = \beta(F_L - \sigma T^4), (x, t) \in \Omega_1 \times (0, t_e)$$

$$\frac{\partial F_R}{\partial x} = \beta(F_R - \sigma T^4), (x, t) \in \Omega_1 \times (0, t_e)$$

β 是辐射吸收常数, K^{-1} ; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, $5.670 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^4)$ 。

第一层的初始条件:

$$T(x, 0) = T_1(x), x \in (0, b_I + b_{II} + b_{III} + b_{IV})$$

² 参考文献[1]

第一层左右两边的边界条件分别是：

$$\begin{aligned} -k_I \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= (q_c - q_r)|_{x=0} \\ -k_{III} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_I+b_{II}+b_{III}+b_{IV}} &= (q_a - k_a \frac{\partial T}{\partial x}) \Big|_{x=b_I+b_{II}+b_{III}+b_{IV}} \\ (1 - \xi_1)F_L(0, t) + \xi_1\sigma T^4(0, t) &= F_R(0, t) \end{aligned}$$

ξ_1 为第 I 层左侧的辐射率， $W/(s \cdot m^2)$ ； q_a 为来自隔热层背面的热辐射热流密度， W/m^2 ； k_a 为空气的热传导率， $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

第 I 层与第 II 层之间的接触面满足：

$$\begin{aligned} T_{II} \Big|_{x=b_I} &= T_I \Big|_{x=b_I} \\ -k_{II} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_I} &= -k_I \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_I} \\ (1 - \xi_2)F_L(b_I, t) + \xi_2\sigma T^4(b_I, t) &= F_R(b_I, t) \end{aligned}$$

ξ_2 为第 I 层右侧的辐射率， $W/(s \cdot m^2)$ 。

第 II 层与第 III 层接触面满足：

$$\begin{aligned} T_{III} \Big|_{x=b_I+b_{II}} &= T_{II} \Big|_{x=b_I+b_{II}} \\ -k_{III} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_I+b_{II}} &= -k_{II} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_I+b_{II}} \end{aligned}$$

第 III 层与第 IV 层接触面满足：

$$\begin{aligned} T_{IV} \Big|_{x=b_I+b_{II}+b_{III}} &= T_{III} \Big|_{x=b_I+b_{II}+b_{III}} \\ -k_{IV} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_I+b_{II}+b_{III}} &= -k_{III} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b_I+b_{II}+b_{III}} \end{aligned}$$

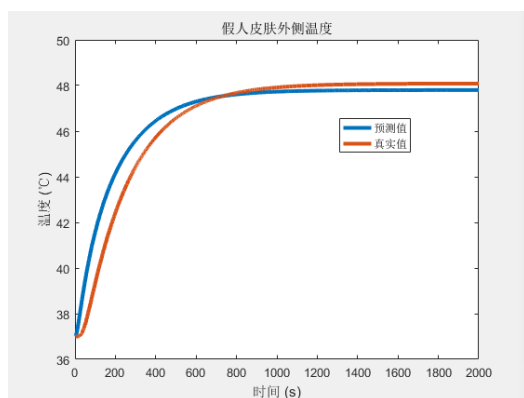
当环境温度变化幅度不大时，抛物线(a)、(b)、(c)、(d)的显热容 C^A 和热传导 k 均近似看成常量。在多层专用隔热服的热传递模型中，采用了显热容法来描述织物的比变化，显热容的计算公式为：

$$C^A = \rho c_i$$

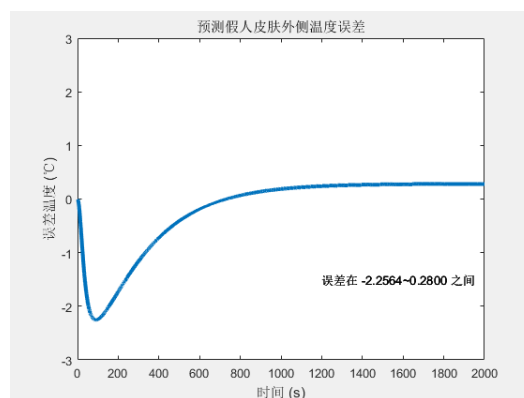
ρ 为对应的织物密度， kg/m^3 ； c_i 为相应织物的比热， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。（见附件一）

六、模型检验

我们将模型中最后一层的温度 T_5 设为假人体皮肤的温度，如上图中的图二所示，在同样的温度环境和同一设计的防热服下，利用多层锅炉传热模型算出最后一层假人皮肤的温度，并将得出来假人皮肤在 90min 内每一秒温度与附件二中给定的假人皮肤的温度进行对比，并将每一分钟之间的差值利用 matlab 合成下面图六图七的评估图：



图六



图七

图六中可以很显然的看出假人皮肤的利用模型计算出的温度值和附件所给的测量的真实值关于时间的曲线非常接近，也就说明了两个数值之间比较相似，图七是利用这两个数值的差值利用 matlab 进行的误差值分析，算出两个数值在 90min 的高温工作下数值误差是-2.2564~0.2800，这说明模型准确率和合理性较高。

七、模型评价

（一）优点：

- ①利用穷举法，在给定的条件下，找到合适的各层的厚度。
- ②巧妙合理的利用了 Excel、Matlab 软件的计算功能，利用代码简化计算过程。
- ③建立的模型在给定了想要达到的防热效果和条件时，可以得到相对应的不同材料厚度。
- ④利用简单的傅里叶热传递公式建立多层的锅炉传热模型，算出了每一层的分界处温度，得出了专用防热服饰的大致温度分布。

（二）缺点：

- ①我们的模型建立忽略了刚开始高温空气与第 I 层之间的对流传递。
- ②模型在建立过程中忽略了织物的空隙，所以传热模型存在一定的误差。
- ③在讨论模型时，我们对整个系统进行了分割，并进行了每一个分层的独立分析和计算，这里在计算后面层数的时候忽略了同一时间段前面几层的动态传递。
- ④在解决问题一的时候，我们只是考虑了热传递的平稳传递，将不同材质的每一层中的温度变化近似的看成了线性变化，但是实际上，即使是同一材质，它们内部的温度是非线性的。

（三）改进方法：

可以将隔热服-空气-人系统进行更加细的分割，利用偏微分方程，将时间，空间，热量三个结合起来，考虑上整个系统连续的传热性，再算上空气与隔热服外层对流的热量和各层之间的空隙对传热的影响。

八、模型推广

我国的工业生产中，机械化、自动化程度较低，有的技术类的工作甚至停留在手工操作状态，因此，高温作业范围及高温对工人健康的影响就更大。现在社会里面的隔热服的类别已经不需要单纯的从隔热服的厚度来解决了，例如一些调节隔热服可以通过良好的外壳反射减小热辐射和非调节的隔热服通过干冰的反应吸热降低温度，经过对各类隔热服的分析：铝膜隔热服虽然对强辐射热有较好的反射隔热作用，但由于它透气性差，对传导热、对流热的防护效果不好，而压气通风服在使用时要拖很长的风管，所以行动不方便，干冰降温虽然轻但是价格昂贵，并且对直接的接触也会造成皮肤损伤，并且会产生大量二氧化碳，不符合低碳的可持续发展要求。³

我们所研究出三层隔热服的隔热效果和厚度的关系的模型可以将这种经济耐用的隔热服推广开来，不仅可以使得隔热服隔热性能提高，更是可以大大提高此类隔热服的生产速率从而满足市场的需求。利用模型更是可以设计不同层数的隔热服。此外，利用

³ 参考文献[6]

该模型除了可以研究防热服，也可以应用于保暖外套的层数和每层的厚度设计，甚至可以用到平时的建筑建设，还可以运用于一些玻璃的防爆设计等等。

九、参考文献

- [1]卢琳珍，应用三层热防服热传递改进模型的皮肤烧伤度预测，1 -4
- [2]潘斌，热防护服装热传递数学建模及参数决定反问题，1 -27
- [3]作者，热传导公式整理 <http://www.docin.com/p-1150589670.html>。
- [4]李昂，王岳，陶然，傅里叶热传导方程和牛顿冷却定律在流体热学研究中的数学模型应用，1-5
- [5] 董永明，屈强，辛健强，陈景茂，许小静，洪文虎,基于等效热传导的金属热防护结构尺寸优化设计，5-8
- [6] 施无右，高温作业防护展望——介绍几种防热服及“室温冰”（下），1-5

十、附件清单

附件一：见附件 Excel 文件 problem1.xlsx

附件二：有关热传递的 matlab 源程序

附件二：

```
编辑器 - C:\Users\luo\Desktop\Untitled.m
Untitled.m
1 -   clc
2 -   clear
3 -   d = 1;
4 -   q=1;
5
6 -   for T=0.6:0.1:25
7 -       t1=37;
8 -       t2=37;
9 -       t3=37;
10 -      t4=37;
11 -      t5=37;
12
13 -      for t=1:5400*6
14 -
15 -          Q=0.082*(65-t1)/0.000006;
16 -          t1=t1+Q/(1377*300);
17
18 -          Q=0.37*(t1-t2)/(0.0001*T);
19 -          t2=t2+Q/(2100*862);
20
21 -          Q=0.045*(t2-t3)/0.000036;
22 -          t3=t3+Q/(1726*74.2);
23
24 -          Q=0.028*(t3-t4)/0.000055;
25 -          t4=t4+Q/(1005*1.18);
26
27 -          Q=0.255*(t4-t5)/0.00008;
28 -          t5=t5+Q/(3600*1200);
29
30 -          %%sub
31
32 -          Q=0.255*(37-t5)/0.00008;
33 -          t5=t5+Q/(3600*1200);
34
35 -          Q=0.028*(t5-t4)/0.000055;
36 -          t4=t4+Q/(1005*1.18);
37
38 -          Q=0.045*(t4-t3)/0.000036;
39 -          t3=t3+Q/(1726*74.2);
40
41 -          Q=0.37*(t3-t2)/(0.0001*T);
42 -          t2=t2+Q/(2100*862);
43
44 -          Q=0.082*(t2-t1)/0.000006;
45 -          t1=t1+Q/(1377*300);
46 -          if mod(t,6)==0
47 -              tt=t/6;
48 -              temp(tt)=t4;
49 -              d=d+1;
50 -          end
51 -      end
52 -  end
53 -      if temp(3300) <= 44 && temp(3600) < 47
54 -          f(q)=T;
55 -          tx(:,q)=temp;
56 -          q=q+1;
57 -      end
58 -  end
59
```

```
Untitled.m x +
1 - q=1;
2 - for T=0.6:0.1:25
3 -     t1=37;
4 -     t2=37;
5 -     t3=37;
6 -     t4=37;
7 -     t5=37;
8
9 -     for t=1:5400*6
10 -         Q=0.082*(65-t1)/0.000006;
11 -         t1=t1+Q/(1377*300);
12
13 -         Q=0.37*(t1-t2)/(0.0001*T);
14 -         t2=t2+Q/(2100*862);
15
16 -         Q=0.045*(t2-t3)/0.000036;
17 -         t3=t3+Q/(1726*74.2);
18
19 -         Q=0.028*(t3-t4)/0.000055;
20 -         t4=t4+Q/(1005*1.18);
21
22 -         Q=0.255*(t4-t5)/0.00008;
23 -         t5=t5+Q/(3600*1200);
24
25         %%sub
26 -         Q=0.255*(37-t5)/0.00008;
27 -         t5=t5+Q/(3600*1200);
28
29 -         Q=0.028*(t5-t4)/0.000055;
30 -         t4=t4+Q/(1005*1.18);
31
32 -         Q=0.045*(t4-t3)/0.000036;
33 -         t3=t3+Q/(1726*74.2);
34
35 -         Q=0.37*(t3-t2)/(0.0001*T);
36 -         t2=t2+Q/(2100*862);
37
38 -         Q=0.082*(t2-t1)/0.000006;
39 -         t1=t1+Q/(1377*300);
40
41 -         if mod(t,6)==0
42 -             tt=t/6;
43 -             temp(tt)=t4;
```