

基于非稳态导热的最优热防护服参数研究

胡 坤*, 马宏伟, 刘雯静, 李 宁, 朱芙蓉, 王钰雯

云南大学信息学院, 云南 昆明
Email: *2432814941@qq.com

收稿日期: 2021年4月21日; 录用日期: 2021年5月17日; 发布日期: 2021年5月25日

摘 要

本文针对多层高温热防护服的设计, 以热力学定律构造有内热源的多层圆筒壁非稳态导热过程, 利用一维导热微分方程和第三边界条件建立基于Logistic的非稳态导热模型, 结合有限差分法求解出各层间时间和空间维度的温度分布。同时将热传导非稳态特性类比电路暂态特性, 利用基尔霍夫方程演化至等效电路模型, 根据实际环境与防护服参数约束条件, 建立非线性规划模型, 结合Mathematica、Multisim等软件进行求解和验证, 得到了热防护服最优厚度的设计方案。

关键词

热防护服, 非稳态导热模型, 有限差分法, 非线性规划, 暂态电路等效法

Research on Optimal Thermal Protective Parameters Based on Unsteady Thermal Conduction

Kun Hu*, Hongwei Ma, Wenjing Liu, Ning Li, Fugeng Zhu, Zhengwen Wang

Department of Information, Yunnan University, Kunming Yunnan
Email: *2432814941@qq.com

Received: Apr. 21st, 2021; accepted: May 17th, 2021; published: May 25th, 2021

Abstract

Aiming at the design of multilayer high-temperature thermal protective clothing, this thesis constructs a non-steady-state heat conduction process of a multilayer cylinder wall with an internal

*通讯作者。

heat source based on the laws of thermodynamics. A one-dimensional thermal differential equation and a third boundary condition are used to establish a non-steady-state thermal conduction model. In combination with the finite difference method, the temperature distribution in the time and space dimensions of each layer is solved. At the same time, the transient characteristics of the analog circuit of thermal conduction and non-steady-state characteristics are evolved to the equivalent circuit model by using Kirchhoff's equation, and a nonlinear programming model is established based on the actual environment and protective clothing parameter constraints. Combined with Mathematica, Multisim and other software to solve and verify, the design scheme of the optimal thickness of heat protection suit is obtained.

Keywords

Thermal Protective Clothing, Non-Steady-State Heat Conduction Model, Finite Difference Method, Nonlinear Programming, Transient Circuit Equivalent Method

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

十九大以来, 随着全球信息化工能产业的飞速发展, 大量从事在冶金、机械制造工业一线的工作人员长期面临着高温环境的损害。高温带来的热危害会威胁其生命安全和身心健康, 因此设计专用的服装已成为各国进行高温防护的重要手段, 同时也是我国经济发展过程中保障生产人员生命财产安全, 提高产能效力的重要举措[1]。

热防护服能够在高温环境下促进人体热量散发, 防止热中暑、烧伤和灼伤等, 长期以来, 对于热防护的导热过程和热传导下厚度的研究一直是一个热门问题。早期的研究通过 Pdepe 算法的皮肤表层热传导推演较为准确地表达了空气层和单层的固态热传导模型[2]; Torvi 课题组在考虑不同辐射场强的影响下, 结合空气层厚度的变换情况, 建立了基于冷却时差的外层皮肤灼伤和内部热导模型[3]; 部分研究从应用数学角度考虑分数阶偏微分方程的优化求解, 推导出了多层非稳态热传递的温度分布精确表达式[4]; 同时, 优化反演模型的提出进一步验证了热对流的单值性分析的有效性[5]。纵观现有研究成果, 在热防护服导热模型的构建上已取得丰硕结论, 但不足之处在于未充分考虑不同层之间边界条件对热传导的影响偏差, 同时现代算法的模拟预测在特定工作环境中的最优厚度设计和分析等方面仍有提升空间。

因此本文主要考虑了多层热防护服层间的导热微分关系和边界条件影响, 利用热力学定律将热防护服导热场量化为有内热源的多层圆筒壁非稳态导热过程, 建立基于 Logistic 的非稳态导热模型, 求解出各层间时间维度的温度分布; 进一步利用有限差分法求出空间维度上各层间的温度分布。之后根据实际设计中特定工作环境和外界温度条件要求, 创新地提出暂态电路等效法, 结合基尔霍夫方程[6], 建立非线性规划, 得到了最优热防护服厚度设计数值, 同时结合 Multisim 进行仿真检验, 进一步证明了算法模型的有效性。

2. 基于 Logistic 非稳态导热模型的温度分布

2.1. 热传导定性分析

通过实验研究已知热防护服每层材料的参数值以及实验假人表面外层温度 5400 s 内的变化情况如图 1,

结合文献[7],明确了初始温度为 37°C 的假人人体始终受到来自外界环境温度热量交换,同时热防护服有三层不同的织物层,因此本文中将其合理的量化为通过多层圆筒壁导热的有内热源模型分析。

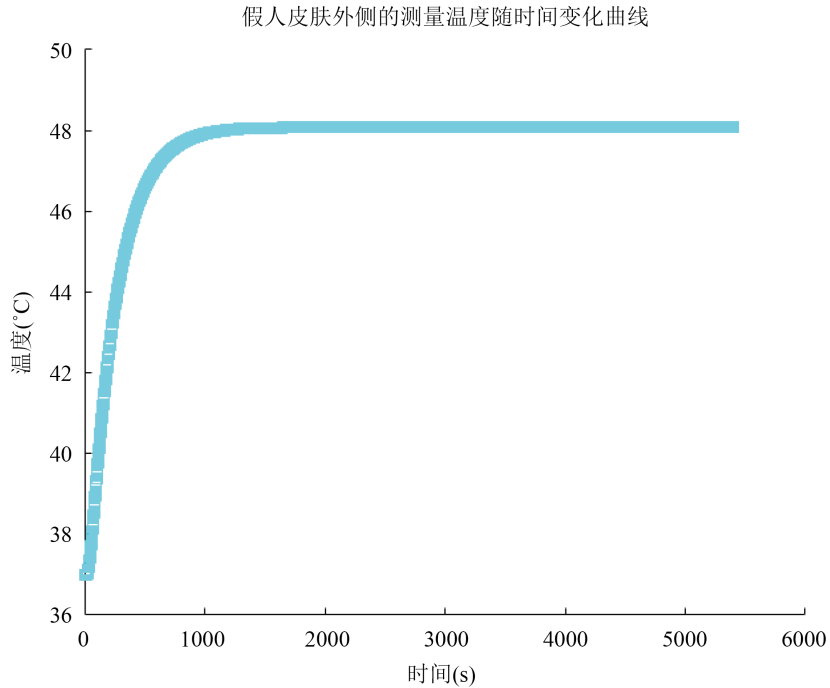


Figure 1. Temperature change outside the skin of dummy
图 1. 假人皮肤外侧温度变化

基于微分思想,将织物层的物料微元化处理,根据能量守恒定律单位时间净导入微元体热量 $\Delta\phi_d$ 加上微元体内热源生成的热量 $\Delta\phi_i$ 应等于微元体焓的增加量 ΔH ,得到 $d\tau$ 时间内,沿厚度 x 轴方向,经 $x + dx$ 表面导出的热量和微元体净热量表示为:

$$d\phi_{x+dx} = q_{x+dx} d\tau = \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) d\tau \tag{1}$$

$$d\phi_x - d\phi_{x+dx} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx d\tau \tag{2}$$

根据傅里叶变换,上式代入能量守恒方程式可得一维导热的微分方程:

$$\begin{cases} \Delta\phi_d = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) \right] dx d\tau \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \end{cases} \tag{3}$$

2.2. 边界条件对导热系统温度分布影响

在非稳态导热过程中,由于各层热量传递不均匀,即环境(边界条件)对系统温度分布一直起作用,将导热过程表示为图 2。为此合理假设热量在织物层 I、II、III、空气层 IV 层之间传递时没有热对流和热辐射现象发生,且热对流和热辐射只发生在空气流体与 I 层的接触边界上。

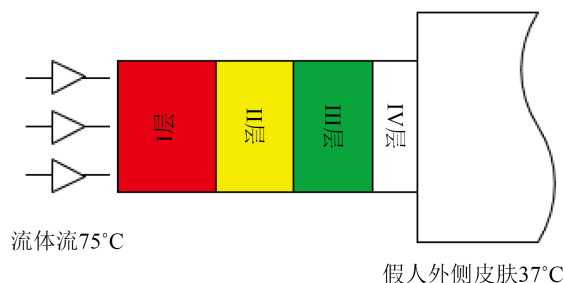


Figure 2. Thermal protective clothing heat transfer simulation diagram

图 2. 热防护服导热模拟图

由于 I 层接触面上单位面积与周围流体之间产生对流换热，采用相似原则对传热过程的参数进行归类处理，引入无量纲数，即准数。无量纲温度： $\Theta = \frac{\theta}{\theta_0}$ ，无量纲坐标： $X = \frac{x}{\delta}$ ，将导热方程和边界条件无量纲化处理表达式如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta}{\partial \left(\frac{\alpha \tau}{\delta^2} \right)} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} \\ \tau = 0, \Theta = \Theta_0 = 1 \\ X = 0, \frac{\partial \Theta}{\partial X} = 0 \\ X = 1, \frac{\partial \Theta}{\partial X} = -\frac{h\delta}{\lambda} \Theta \end{cases} \quad (4)$$

流体力学中，根据动能守恒定律，转化得到相似准数傅里叶准数 Fo 和毕渥数 Bi ，其模型表达为：

$$\Theta = f(Fo, Bi, X) \quad (5)$$

其中 Fo 表征了题中假设的多层圆筒壁导热的有内热源系统的导热性能和储热性能的对比关系，是给定系统的动态特征量， Bi 是 Bi 织物层内部导热热阻与物体表面对流换热热阻的比值， Θ 是 $\frac{\alpha \tau}{\delta^2}, \frac{h\delta}{\lambda}, X$ 三个参数的函数。

2.3. 模型构建和温度分布求解

根据图 1 拟合假人表层温度变化走势，通过多层圆筒壁的非稳态导热过程中，由于热量的转移和各层的物理参数影响，进程随着时间的推进，温度达到蓄热饱和后，趋于稳定值，结合文献[8]引入 Logistic 曲线作为非稳态导热的模型基础，考虑到各层热阻越大则最终温度越低，反之热阻越小最终温度越高，而毕渥数是衡量热阻大小的量，结合公式(4) (5)，得到非稳态导热模型表达式为：

$$\Theta(i) = f(Bo, x, \tau) = \frac{1}{C(i) + \left(1 - H(i) * \left(1 - \frac{48.8}{75} \right) \right) * e^{-\tau}} \quad (6)$$

结合非稳态导热变换规律，模型中需要给予时间 τ 一个衡量标准，根据传热学引入与非稳态相关的相似准数——傅里叶准数作为时间(τ)的载体，改进模型。考虑到不同介质之间的热传递的边界条件，会产生能量的损耗，为此引入衰减指数 π ，对热能的损耗进行限定。得到改进后的模型表达式为：

$$\Theta(n) = f(Fi, Bo, x) = \frac{\frac{Fo(n)}{x^n}}{C(n) + e^{\frac{Fo(n)}{x^n}} * \left(1 - H(n) * \left(1 - \frac{48.8}{75}\right)\right)} \quad (7)$$

多层圆筒壁存在内热源的导热模型反映的是各层在非稳态条件下的温度变化率，所以 $\Theta(n) \in [0,1]$ ，得到最终温度表达式为 $T(n) = 75 * \Theta(n)$ 。

i) 时间维度的温度分布

将假人外侧环境温度代入模型，利用 matlab 软件绘制得到各层材料中心温度，即随时间变化的各层温度分布情况如图 3。

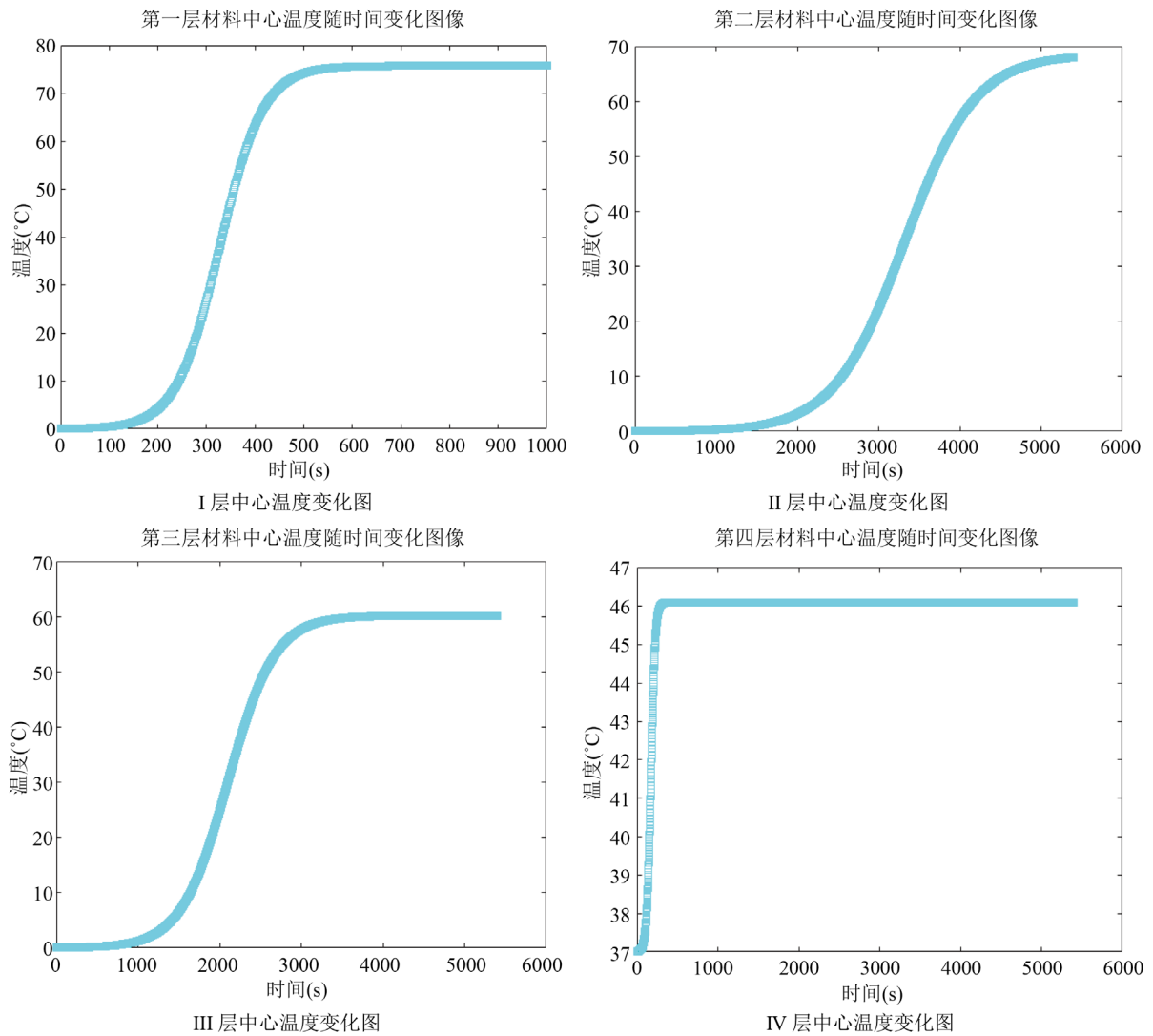


Figure 3. Temperature distribution of each layer
 图 3. 各层温度分布图

ii) 空间维度的温度分布

当该模型中沿厚度 x 的方向上有一定的温度差时，在厚度 x 方向就会有一定的热量传递。从宏观上

看, 单位时间内通过垂直 x 方向的单位面积的热量 q 与温度的空间变化率成正比[9]。此时考虑时空维度上的非稳态导热过程的温度分布, 通过有限差分法并结合 matlab 绘制时空维度温度分布图如图 4。

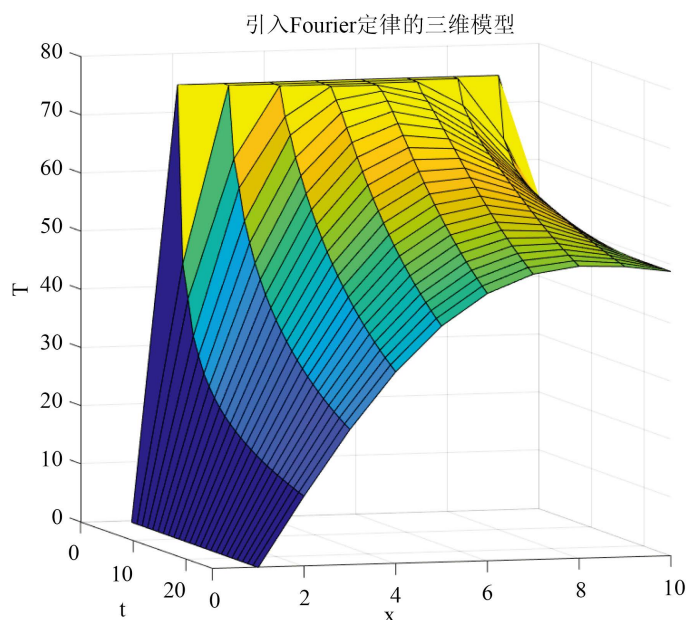


Figure 4. Space-time temperature distribution
图 4. 时空维度温度分布图

结论: 1) 通过有限差分法求得的时间维度的各层温度分布走势与基于 Logistic 的非稳态导热模型求得的结果相一致, 说明基于 Logistic 的非稳态导热模型对温度随时间规律的处理是合理的; 2) 通过基于 Logistic 的非稳态导热模型求得的同一时刻各层中心点的温度与有限差分法求得的空间维度的各层温度分布相符, 并且符合热力学中对服装材料参数特性的评估, 进一步说明了模型的合理性和可靠性。

3. 基于基尔霍夫的等效暂态电路模型

3.1. 多层圆筒壁下电路类比分析

非稳态导热模型在热动力学层面考虑到实际情况中不同层表面情况的不稳定性和热学变量的复杂性, 为更精确的解决问题, 将一维导热与电路模型进行类比分析。对于多层圆筒壁模型如图 5, 设织物层的单位横截面积为 s , 单位体积的内热源为 q , 微元厚度在时间 τ 的温度 t , 织物层与流体的换热系数为 h , 热流量为 Q 。

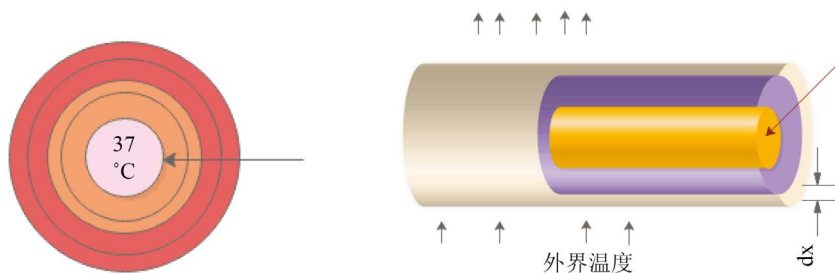


Figure 5. Multilayer cylindrical wall model
图 5. 多层圆筒壁模型图

当环境温度为 t_0 ，在任一时刻 τ ，对织物层任一截面出的微元厚度 dx 列出能量平衡式：

$$s \cdot dx \cdot \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{\partial Q}{\partial x} dx + q \cdot s dx - h(t - t_0) dx \quad (8)$$

按傅里叶导热定律得到 $Q = -\lambda \cdot s \cdot \frac{\partial t}{\partial x}$ ，令 $\theta = t - t_0$ ， $h = \frac{\lambda}{\rho c}$ ， $m^2 = \frac{h}{\lambda s}$ ， $b = hm^2$ 结合公式(8)求得等效织物层微分方程和定解条件为：

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = h \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - b\theta + c; \tau > 0, L > x > 0 \\ \text{初始条件: } \theta(x, 0) = 0; L \geq x \geq 0 \\ \text{边界条件: } \tau > 0 \begin{cases} -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 [\theta_{f1} - \theta(0, \tau)] \\ \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_2 [\theta_{f2} - \theta(L, \tau)] \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

3.2. 非稳态热传递等效电路模型建立

常见的 R, L, C 电路中，当外接电压源为恒定的直流电源时，电路存在暂稳态特性[10]；故将传热学中热量传递过程中热量与温度差的关系转换为电学中欧姆定律形式，类比为具有电流源，无电感的均匀传输线路，设单位长度传输线下电容 c_0 ，电阻 r_0 ，漏电导 g_0 ，电流源 i ，外加电势源(理想恒压源) E_1, E_2 ，外电源电阻 r_1, r_2 ，距起点 x 处传输线的电位 u ，在 x 截面的电流 i 。由电路的基尔霍夫定律(KCL)建立方程：

$$i_0 = i + Idx - \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) = Idx - \frac{\partial i}{\partial x} dx \quad (10)$$

$$i = \frac{u - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right)}{r_0 dx} = -\frac{1}{r_0} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (11)$$

$$i_0 = C_0 dx \frac{\partial \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right)}{\partial \tau} + \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) g_0 dx \approx C_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} dx + g_0 u dx \quad (12)$$

将(11)、(12)二式代入(10)有：

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{1}{C_0 r_0} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{g_0}{C_0} u + \frac{I}{C_0}; \tau > 0, L > x > 0 \\ \text{初始条件: } u(x, 0) = 0; L \geq x \geq 0 \\ \text{边界条件: } \tau > 0 \begin{cases} \frac{1}{r_0} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{1}{r_1} [E_1 - u(0, \tau)] \\ \frac{1}{r_0} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{1}{r_2} [E_2 - u(L, \tau)] \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

对于偏微分方程组(13)，利用 Wolfram Mathematica 进行精确解的计算，得到结果如下：

$$\theta(x, \tau) = \frac{sq_1}{hU} (1 - e^{-om^2\tau}) + \frac{\left(\theta_{f,1} - \frac{sq_v}{hU}\right) \left[Shm(L-x) + \frac{mL}{Bi_2} Chm(L-x) \right] + \left(\theta_{f,2} - \frac{sq_v}{hU}\right) \left(Shmx + \frac{mL}{Bi_1} Chmx \right)}{\left(1 + \frac{m^2 L^2}{Bi_1 \cdot Bi_2}\right) ShmL + \left(\frac{mL}{Bi_1} + \frac{mL}{Bi_2}\right) ChmL}$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\theta_{f,1} + \frac{L^2 q_v}{\lambda \mu_n^2}\right) \left[\sin \mu_n \left(1 - \frac{x}{L}\right) \right] + \frac{\mu_2}{Bi_2} \cos \mu_n \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\left(1 + \frac{m^2 L^2}{\mu_n^2}\right) (A_n \sin \mu_n + B_n \cos \mu_n)}$$

$$+ \frac{\left(\theta_{f,2} + \frac{L^2 q_v}{\lambda \mu_n^2}\right) \left(\sin \frac{\mu_n x}{L} + \frac{\mu_n}{Bi_1} \cos \frac{\mu_n x}{L} \right)}{\left(1 + \frac{m^2 L^2}{\mu_n^2}\right) (A_n \sin \mu_n + B_n \cos \mu_n)} \times \exp \left[- \left(am^2 + \frac{a \mu_n^2}{L^2} \right) \tau \right]$$

且 $Bi_1 = \frac{h_1 L}{\lambda}, \dots, Bi_4 = \frac{h_4 L}{\lambda}$ 为毕渥准数, 则由 $A_n = 1 - \mu^2 \left[\frac{2}{Bi_1 \cdot Bi_2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} \right) \right]$ 和

$B_n = \frac{\mu}{2} \left[1 + 3 \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} \right) - \frac{\mu_n^2}{Bi_1 \cdot Bi_2} \right]$ 得到特征方程如下:

$$ctg \mu = \frac{\mu}{Bi_1 + Bi_2} - \frac{1}{\frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2}} * \frac{1}{\mu}$$

4. 基于非线性规划的最优厚度研究

4.1. 第三边界条件下单层最优厚度求解

结合热防护服层间关系, 单 II 层材料厚度的研究可看做是第三边界条件和类比电路模型约束下的非线性规划问题。考虑实际生产情况下[11], 当环境温度为 65°C、III 层的厚度为 3.6 mm、IV 层的厚度为 5.5 mm 时, 确保工作 60 分钟时, 人体皮肤外侧温度不超过 47°C, 且超过 44°C 的时间不超 5 分钟。确定 II 层的最优厚度。

当织物层厚度增大, 其热阻增大, 相对导热能力变差, 热防护服织物系统的防热能力增强, 寻找满足约束条件下的最小厚度值即为最优厚度, 由此建立导热模型的约束条件 S.T [12], 非线性规划函数如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min x_2 = c_2 R_{\text{热}} \\ \theta(x_0, \tau_0) = 65^\circ\text{C} \\ \theta_{\lambda}(x_{\text{总}}, \tau) \leq 47^\circ\text{C} \\ \text{S.T } \theta_{\lambda}(x_{\text{总}}, \tau_{44}) > 44^\circ\text{C} \\ 5 + \tau_{44} < \tau \\ \tau \geq 60, x_4 = 5.5 \end{array} \right. \tag{16}$$

此时, 相对应的类比电路的等效模型中 $q_r = 0, m = 0$, 则(14)式变形为:

$$\theta(x, \tau) = \frac{\theta_{f,1} \left[(L-x) + \frac{L}{Bi_2} \right] + \theta_{f,2} \left(x + \frac{L}{Bi_1} \right)}{L + \left(\frac{L}{Bi_1} + \frac{L}{Bi_2} \right)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[\sin \mu_n \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{\mu_n}{Bi_2} \cos \mu_n \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \theta_{f,2} \left(\sin \frac{\mu_n x}{L} + \frac{\mu_n}{Bi_1} \cos \frac{\mu_n x}{L} \right) \right]}{A_n \sin \mu_n + B \cos \mu_n} \cdot \exp \left(-\frac{a\mu^2 \tau}{L^2} \right) \quad (17)$$

这即是多层圆筒壁存在内热源模型在第三边界条件下的受热解[13]，其类比电路为图中电流源 $I = 0$ 及漏电导开路(即 $g_0 = 0$)，利用电学软件 Multisim 仿真如图 6:

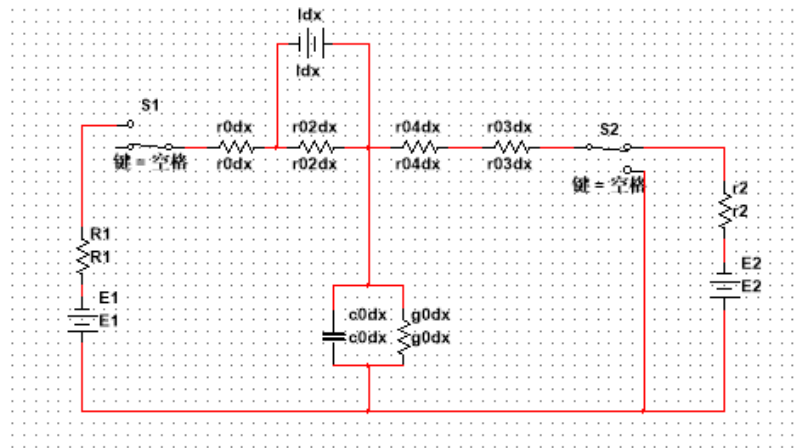


Figure 6. Multisim simulation diagram
图 6. Multisim 仿真图

将导热模型的复杂非线性规划转换至类比电路模型中，结合公式(14)和上述基尔霍夫方程，求得 $x_2 \geq 8.7 \text{ mm}$ 。即当专用防护服材料参数第 IV 层材料参数厚度和环境温度等约束条件确定的情况下，为带来长久工作的持续保护，确保工作 60 分钟时，满足约束条件 $\tau \geq 60$ ， $x_4 = 5.5$ 、 $\theta_{\text{人}}(x_{\text{总}}, \tau_{44}) > 44^\circ\text{C}$ 、 $\theta_{\text{人}}(x_{\text{总}}, \tau) \leq 47^\circ\text{C}$ 下，第 II 层最优厚度为 8.7 mm 尚可。

4.2. 第一、三边界条件下多层最优厚度求解

考虑满足当环境温度为 80°C 时、III 层的厚度为 3.6 mm，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。由于空气层和织物层的层间密度与热传导率相差甚远[14]，且第 IV 层空气层与相邻的第 III 层织物层以及皮肤表层之间无热对流现象，在织物层未知的基础上需要考虑第 IV 层与相邻层之间的第一边界条件，为此建立新的非线性规划如下：

$$\begin{cases} \min x_2 = c_2 R_{\text{热}}, x_4 = c_4 R_{\text{热}} \\ \theta(x_0, \tau_0) = 80^\circ\text{C} \\ \theta_{\text{人}}(x_{\text{总}}, \tau) \leq 47^\circ\text{C} \\ \text{S.T. } \theta_{\text{人}}(x_{\text{总}}, \tau_{44}) > 44^\circ\text{C} \\ 5 + \tau_{44} < \tau \\ \tau \geq 30, x_1 + x_3 = 4.2 \end{cases} \quad (18)$$

此时, $Bi \rightarrow \infty$, 由(15)可知 $ctg \mu = -\infty$, 得到 $\mu_n = n\pi (n=1, 2, \dots)$ 、 $A_n = 1$ 、 $B_n = \frac{\mu_n}{2} = \frac{n\pi}{2}$, 由此可将(14)式改为:

$$\theta(x, \tau) = \theta_1 - (\theta_1 - \theta_2) \frac{x}{L} - \frac{2(\theta_1 - \theta_2)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\sin \frac{(2n-1)\pi x}{L}}{2n-1} \cdot \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 x}{L^2} a\tau\right) \quad (19)$$

这即是多层圆筒壁存在内热源模型在第一类边界条件下非对称受热解, 根据假设已知, 假人处在环境温度中时, 应该为对称受热, 此时将模型进行修改, 令 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0$ 。则(14)式变为:

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 - \frac{4\theta_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\sin \frac{(2n-1)\pi x}{L}}{2n-1} \cdot \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 x}{L^2} a\tau\right) \quad (20)$$

此时类比电路时令理想电势源 $E_1 = E_2$, 利用电学软件 Multisim 仿真如图 7。将导热模型的复杂非线性规划转换至类比电路模型中, 结合公式(14)和基尔霍夫方程, 求得 $x_2 \geq 11.6 \text{ mm}$, $x_4 \geq 4.5 \text{ mm}$ 。即当热防护服设计中的决策变量增加时, 充分考虑人体温度的物理条件和空气层产生的单值性条件约束下, 保证环境温度为 80°C 时, 确保工作 30 分钟时, 满足约束条件 $\tau \geq 30$, $x_1 + x_3 = 4.2$ 、 $\theta_{\text{人}}(x_{\text{总}}, \tau_{44}) > 44^\circ\text{C}$ 、 $\theta_{\text{人}}(x_{\text{总}}, \tau) \leq 47^\circ\text{C}$ 下 II 层最优厚度为 11.6 mm, IV 层的最优厚度为 4.5 mm。

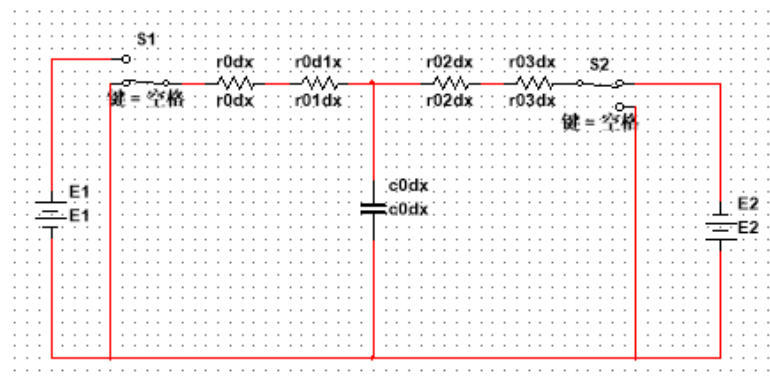


Figure 7. Multisim simulation diagram
图 7. Multisim 仿真图

5. 总结

在以人为本的热能源高新产业安全发展背景下, 热防护服表层温度分布和有效防护厚度的研究成为了保护人员生命安全和推动突破复杂热传导难题的关键。本文依据热传导定律巧妙地将多层热防护服结构抽象为多层圆筒壁模型以此研究非稳态导热过程, 通过实验数据充分考虑边界条件的影响建立了基于 Logistic 的非稳态导热模型, 结合有限差分法准确求得了时空维度下的不同结构层的温度分布。之后摒弃传统算法求解, 类比 R, L, C 电路暂态特性与非稳态导热过程之间的相似性, 巧妙地转换为基尔霍夫方程下的等效电路模型, 结合外在约束条件建立非线性规划模型, 得到了热防护服厚度的最优解, 模型的良好迁移性与有效性为企业的生产研发提供了新思路。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(60362001); 云南省自然科学基金资助项目(61461053)。

参考文献

- [1] Guan, M. and Li, J. (2020) Garment Size Effect of Thermal Protective Clothing on Global and Local Evaporative Cooling of Walking Manikin in a Hot Environment. *International Journal of Biometeorology*, **64**, 485-499. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01836-5>
- [2] 王志强, 朱家明. 基于Pdepe算法的高温作业防护服厚度设计[J]. 淮阴师范学院学报(自然科学版), 2019, 18(3): 200-205.
- [3] Torii, S. and Yang, W. (2004) Heat Transfer Mechanisms in Thin Film with Laser Heat Source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **48**, 537-544.
- [4] 王宝, 朱家明. 分数阶偏微分方程求解与优化模型对高温防护服设计的计量分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2019, 32(4): 86-93.
- [5] 朱瑞超, 黄亚群, 覃亮. 系泊系统状态参数优化设计[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(2): 46-50.
- [6] Zhou, Y. and Liu, S. (2019) Improved Finite Difference Analysis of Dynamic Responses of Concrete Members Reinforced with FRP Bars under Explosion. *Composite Structures*, **230**, Article ID: 111518. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111518>
- [7] 蒋俊林. 高温作业专用服装设计[J]. 艺术科技, 2019, 32(13): 108.
- [8] Xu, C. (2020) Phenomenological Bifurcation in a Stochastic Logistic Model with Correlated Colored Noises. *Applied Mathematics Letters*, **101**, Article ID: 106064. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2019.106064>
- [9] 姜培学, 柯道友, 任泽霁. 有内部热源的非稳态导热与自然对流换热及辐射换热耦合问题研究[J]. 计算物理, 1999, 16(3): 302-308.
- [10] Huang, Y. and Chen, M. (2020) Development and Analysis of Both Finite Element and Fourth-Order in Space Finite Difference Methods for an Equivalent Berenger's PML Model. *Journal of Computational Physics*, **405**, Article ID: 109154. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.109154>
- [11] Lapka, P., Furmanski, P. and Wisniewski, T. (2017) Assessment of Thermal Performance of Protective Garments. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, **27**, 1078-1097. <https://doi.org/10.1108/HFF-03-2016-0101>
- [12] 李荣. 三层一维非金属薄膜材料热传导效应的研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2012, 47(7): 39-43.
- [13] 李矗东, 魏强, 李玉中, 黄宏虎. 基于有限差分法的大线能量焊接热模拟试件的温度分布[J]. 工业加热, 2020, 49(1): 1-4+8.
- [14] Shitzer, A., Chato, J.C. and Hertig, B.A. (1973) Thermal Protective Garment Using Independent Regional Control of Coolant Temperature. *Aerospace Medicine*, **44**, 49-59.