

基于模拟退火算法的人体热反应模型研究

张美丽, 刘卫丽, 杨悦

海军大连舰艇学院基础部, 辽宁 大连
Email: zhangmeili0121@163.com

收稿日期: 2021年6月15日; 录用日期: 2021年7月5日; 发布日期: 2021年7月20日

摘要

在高温环境下, 随着温度的不同, 人体热反应呈现不同的温度变化。本文利用模拟退火算法、有限元等方法研究高温作业专用服装热传导到假人体皮肤的过程中, 人体的热生理温度变化、服装评估舒适程度等相关问题。研究成果可以预测高温环境下热传导模型。

关键词

热传导模型, 傅里叶变换, 模拟退火算法, 有限元方法

Research on Human Thermal Response Model Based on Simulated Annealing Algorithm

Meili Zhang, Weili Liu, Yue Yang

Department of Basis, Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning
Email: zhangmeili0121@163.com

Received: Jun. 15th, 2021; accepted: Jul. 5th, 2021; published: Jul. 20th, 2021

Abstract

In the high temperature environment, with the different temperature, the thermal response of human body presents different temperature changes. In this paper, simulated annealing algorithm and finite element method are used to study the thermal physiological temperature changes of human body, clothing comfort evaluation and other related issues in the process of heat conduction from high temperature clothing to human skin. The research results can be used to predict the heat conduction model in high temperature environment.

文章引用: 张美丽, 刘卫丽, 杨悦. 基于模拟退火算法的人体热反应模型研究[J]. 应用数学进展, 2021, 10(7): 2391-2398.
DOI: 10.12677/aam.2021.107251

Keywords

Heat Conduction Model, Fourier Transform, Simulated Annealing Algorithm, Finite Element 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

人体的热防护问题是高温作业领域生产安全的一个重要问题[1]。高温环境下,由于人体暴露在高温热辐射环境下,不仅要进行强大的体力劳动,而且热防护服装厚重,热传导的应急反应就会发生。那么,如何对高温作业服装的内部传热数学模型[2]进行根号的理论研究,同时兼顾舒适度就是一个重要的研究课题。本文的研究的结果将为内部传热数学模型的研究提供参考和借鉴。

高温作业服装一般分为单层和多层两种。本文所研究的服装假定是四层,其中第一层是与外部环境直接接触的,第三层是与皮肤之间有空隙的,这个空隙定义为第四层。为了建立模型,设定高温实验室中的假人皮肤温度为 37℃。利用热传导模型,在不同的约束条件之下,分别找到高温作业服的最优厚度以及假人皮肤外侧的温度变化情况。

2. 模型假设

关于模型的建立有几点假设:服装设计只受本文规定条件制约,其他影响忽略不计;规定系数准则的各个系数的规定是针对一般情况,对于其他情况不予研究。

3. 模型建立与求解

3.1. 高温防护服装温度分布

完成高温环境人体热实验。假设在人工气候内设常温 29℃和高温 45℃环境下,假人体分别在不防护和防护两种状态下进行实验[3]。假人体在上述两个温度下穿着不同的防护服,测试假人体的不同皮肤层的温度变化,进而通过实验数据分析不同温度和不同的防护服对假人体皮肤温度的影响,同时将实验数据作为下面进行的热传导模型和 PED 耦合系统的验证数据。

在常温人体热反应矫正基础上,考虑了高温对人体血液流域、代谢产热与及换热系数的影响,建立了高温人体热反应模型.该模型分为三部分:被动系统,模拟人体体内及其与环境的热交换;主动系统,模拟人体热生理调节;服装系统,模拟服装对人体与环境之间热湿传递的影响。为验证模型的鲁棒性[4],将测试的核心温度及皮肤温度与实验测值进行比较。

将人体热反应模型作为人的控制系统设立假人稳定系统,假人耦合系统充分发挥假人较高的准确度和其他人体主动调节的优势,将系统所得核心温度和皮肤温度与人体生理实验的测值比较。结果表明,假人耦合系统不仅可以预测人体温度及皮肤温度,也可用于防护服隔热及湿性能测试。

用 (x, y, z) 表示 I、II、III 层,根据如下的计算方法

$$S' = (S_1, S_2, S_3)^T,$$

$$F' = (F_1, F_2)^T,$$

$$\max Z = \{\max S' + \min F'\}.$$

令 $F'' = -F'$,

将原问题转化为: $\max Z' = \{\max S' + \min F''\}$ 。

得到

$$\begin{aligned} S_1(x, y, z) &= 6f(x_1, t) - 5f(x_2, t) + nf(x, t), \\ S_2(x, y, z) &= 12f(x_1, t) - 5f(x_2, t) + nf(x, t), \\ S_3(x, y, z) &= 6f(x_1, t) - 50f(x_2, t) + nf(x, t). \end{aligned}$$

借助 MATLAB 可以得到如下的优化结果, 如表 1 所示。

Table 1. Optimization results

表 1. 优化结果

优化变量	优化后的结果
E_{F_x}	22.9208
E_{F_y}	113.5736
E_{F_z}	67.9281
D_{F_x}	0.0719
D_{F_y}	0.1661
D_{F_z}	13.4299

利用 MATLAB 仿真得到温度区域分布图, 如图 1 所示。

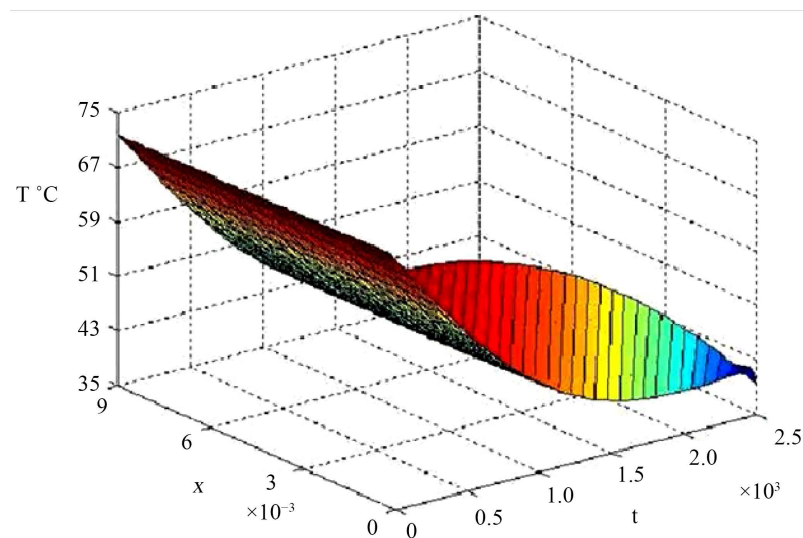


Figure 1. Temperature distribution

图 1. 温度区域分布图

3.2. II 层的最优厚度(65°C)

由上述讨论可知, $\max Z = \{\max S' + \min F'\}$ 。

首先, 考虑确定 II 层的最优厚度的热传导函数[5]

$$K_{110} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2K_{120} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + K_{220} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \beta \left(K_{120} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0.$$

为了对热传导问题中的异性功能梯度材料进行分析, 首先采用傅里叶积分变换函数以及脉冲函数, 其中的热传导系数采用指数模型, 这样可以得到热传导问题的异性功能梯度材料的基本解; 其次, 通过边界条件和上面求出的基本解, 得出热传导模型的边界积分方程[6]; 接着, 将边界积分方程进行离散, 从而得到边界元公式, 综合上述结果, 进而得到内点和边界点上热流计算和温度计算的公式; 最后利用常边界单元方法给出了正方形模型, 说明了各向异性功能梯度材料具有缓解热应力和耐高温的特点。

假设假人体实验的工作时间是 60 分钟, 假人皮肤温度小于等于 47°C , 且大于 44°C 的温度不能超过 5 分钟时间。由傅里叶变换和脉冲函数可知

$$\frac{1}{4\pi^2} \exp(\beta y_0) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{i\left[\xi(x-x_0) + \eta(y-y_0)\right]\right\} / L \, d\xi d\eta.$$

按照之前的思路, 利用常边界单元方法给出了正方形模型解这个 PDE 方程[7]。令

$$-1 \leq \xi \leq 1,$$

$$y(\xi) = \frac{y_{j+1} + y_j}{2} + \frac{y_{j+1} - y_j}{2} \xi,$$

$$x(\xi) = \frac{x_{j+1} + x_j}{2} + \frac{x_{j+1} - x_j}{2} \xi.$$

并且划定积分区域, 为了方便计算, 积分区域采用正方形域[8], 对区域边界进行等单元划分, 节点如图 2 所示。

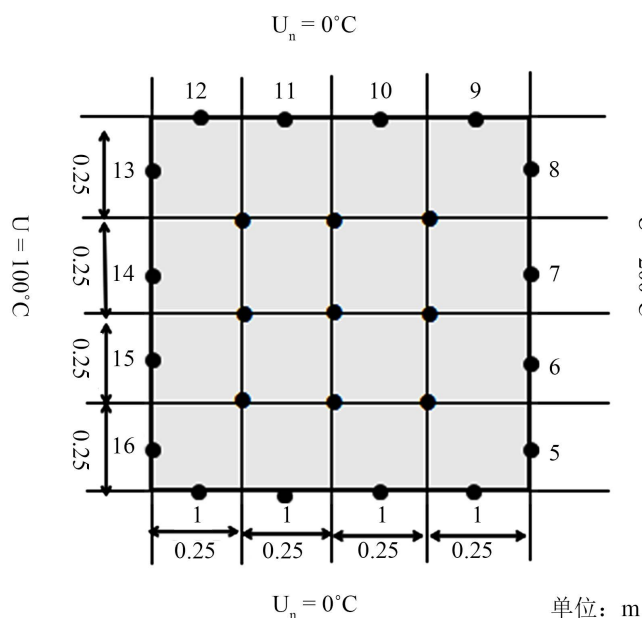


Figure 2. Square boundary division
图 2. 正方形边界划分

热传导流有限元计算可视化, 如图 3 所示。

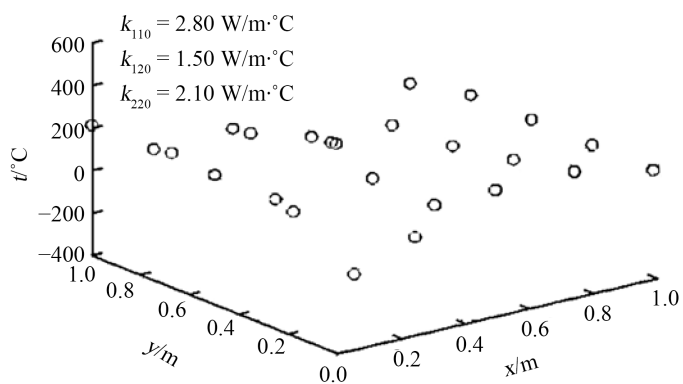


Figure 3. Finite element of heat conduction flow
图 3. 热传导流有限元

由 MATLAB 可以得到以下优化结果，如表 2 所示。

Table 2. Second layer thickness Optimization results
表 2. 第二层厚度优化结果

优化变量	优化后的结果
E_{S_x}	23.0196
E_{S_y}	113.5159
E_{S_z}	69.8199
D_{S_x}	0.0495
D_{S_y}	0.1218
D_{S_z}	23.2132

代入原先的优化函数，可以得到

$$\max Z = \{\max S' + \min F'\} = 6.5$$

通过上述问题的研究，得到的异性功能梯度材料热传导模型的基本解是修正贝塞尔函数，它具有对数奇异性的；所推导的异性功能梯度材料热传导模型的边界积分方程将边界离散得到边界元公式的情况下，计算了内点和结点的温度和热流。以正方形模型和常单元为算例[9]进行了数值计算，从计算结果可以看出，各向异性功能梯度材料有缓解热应力和耐高温等特点，沿着梯度连续变化的方向可以缓解热应力和热流。梯度系数越大，则各离散点的温度越低，说明梯度材料可以阻滞热传导。因此，以上理论结果得出的基本解不仅适用于功能梯度材料热传导问题的边界积分方程，而且也可以退化为各向同性功能梯度材料热传导问题的边界积分方程。以上研究问题的方法可以为高温下功能梯度材料的设计和断裂研究提供理论上支持。利用边界元方法[10]，只需要知道边界上的温度就可以计算出内点的温度和热应力。

3.3. II 层和 IV 层的最优厚度(80°C)

由已知 $\max Z = \{\max S' + \min F'\} = 6.5$ ，

假设后两层的优化函数[11]如下

$$\begin{aligned}\max Z_2 &= \{\max S'_p + \min \partial F'\}, \\ \max Z_3 &= \{\max S'_o + \min F'M\}.\end{aligned}$$

利用高阶拉普拉斯方程

$$\int_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial x} d\Omega = - \int_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial x} d\Omega + \int_{\Gamma} u v n_1 ds.$$

假设环境温度为 80°C 时, 为例确定第二层层和第四层的最优厚度, 假设工作 30 分钟时, 假人皮肤外侧温度小于等于 47°C , 且大于 44°C 的时间不超过 5 分钟, 则边界条件为

$$H_{ij} = \hat{H}_{ij} + \frac{1}{2} \delta_{ij} \exp(\beta y),$$

$$\hat{H}_{ij} = \int_{\Gamma} \nabla G \cdot m ds,$$

$$G_{ij} = \int_{\Gamma} G(1 + \beta(K_{220} - K_{120})) ds$$

并且约定

$$\int_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial y} d\Omega = - \int_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial y} d\Omega + \int_{\Gamma} u v n_2 ds.$$

二层模拟函数如图 4 所示。

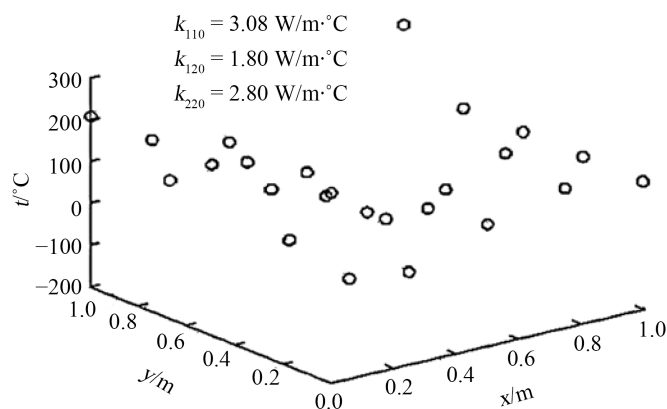


Figure 4. Two-level simulation function

图 4. 二层模拟函数

三层模拟函数如图 5 所示。

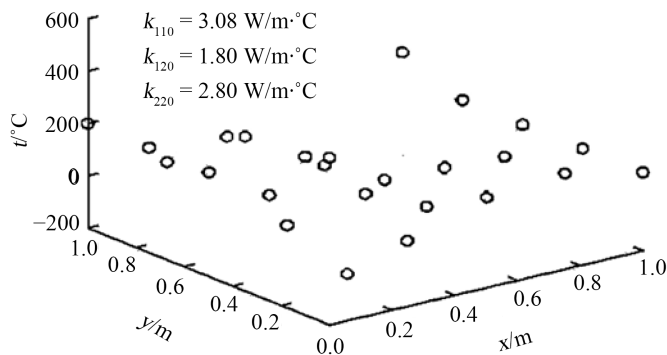


Figure 5. Three-level simulation function

图 5. 三层模拟函数

特别地，考虑这三层之间具有梯度下滑的关系，据此给出梯度下滑的梯度函数，如图 6 所示。

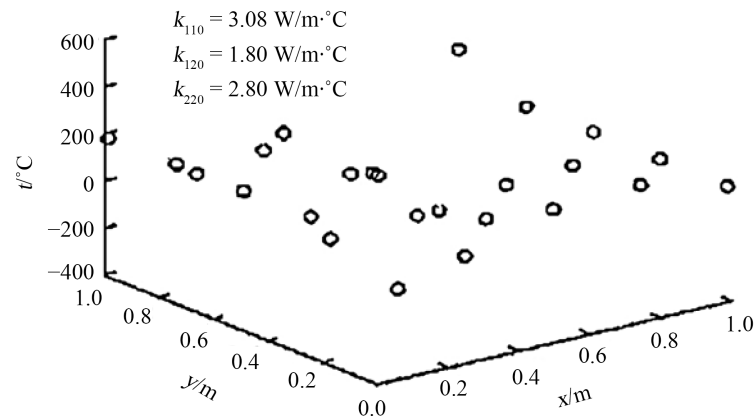


Figure 6. Gradient function
图 6. 梯度函数

根据 MATLAB 模拟，我们给出以下的优化结果，如表 3 所示。

Table 3. Thickness optimization results of two and three layers
表 3. 二层与三层厚度优化结果

优化变量	优化后的结果
$S'(X)$	1.3193
$S'(Y)$	0.1939
$S'(Z)$	1.1052
$F'(X)$	0.6418
$F'(Y)$	-0.5934
$F'(Z)$	1.1118

将优化结果代入优化函数，即得

$$\begin{aligned}\max Z_2 &= \{\max S'_p + \min \partial F'\} = 7.5, \\ \max Z_3 &= \{\max S'_o + \min F'M\} = 6.3.\end{aligned}$$

4. 结论和分析

基于对模型的分析，我们认为本模型的建立是在一般的数学物理方程上建立的，具有适用性；本模型采用模拟退火算法，将问题划分成若干个准则，使得问题的解决具有一定的层次性；在确定解决方案时，我们对若干问题进行“切片化”处理，确保在遵循基本原则的情况下，尽可能多的保证解决方案的普适性。当然，在进行数学物理方程的求解中，我们只是将调查群体进行简单划分之后，采取一般快速办法，没有对边界条件进行更细致的划分，而且所给定的各种解决方案中各个参数只是针对一般情况或者普适情况所给出的，缺少特殊性。基于此，我们可以按照蒙特卡洛方法，对方程进行随机划分，然后再拟定参数，确定方程的全局稳定性。对于其他的防高温设备，我们可以采用相同的方法，可以根据波动方程确定热传递速率，结合本模型可以给出防热材料所具备的基本特征。

基金项目

海军大连舰艇学院科研发展基金资助(2021)。

参考文献

- [1] 付明, 翁文国, 袁宏. 低热辐射强度下防护服热防护性能的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 40(6): 719-723.
- [2] 王正东. 数学软件与数学实验[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 杨桂元, 黄己立. 数学建模[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- [4] 楼顺天, 姚若玉, 沈俊霞. MATLAB7.x 程序设计语言[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [5] 袁梦琦, 蒋锦辉, 杨杰, 钱新明. 基于暖体假人实验的防刺服热阻和湿阻研究[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 569-573.
- [6] 田苗, 王云仪, 张向辉, 张忠彬. 高温防护服的舒适工效性能评价与优化对策[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 754-759.
- [7] 付明, 翁文国, 韩雪峰. 高温下防护服热阻和湿阻的暖体假人实验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(3): 281-285.
- [8] 《运筹学》编写组. 运筹学(修订版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [9] 李红彦, 孙成勋. 夏季高温环境户外作业服的热功能设计方法[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(6): 146-151.
- [10] 朱方龙. 附加相变材料层的热防护服装传热数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(4): 635-643.
- [11] 刘俊俏, 苗福生, 李星. 二维各向异性功能梯度材料热传导的边界元分析[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5): 77-81.