

Thickness Selection of Thermal Insulation Clothing Based On Variable Coefficient Heat Conduction Model

Wentao Gao Bailing Chen Zongting Jia

Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui, 230601, China

Abstract

Under the assumption that the temperature transmission method in the thermal insulation clothing is only heat conduction, this paper uses the law of temperature conduction in the thermal insulation clothing to establish a variable coefficient heat conduction equation to solve the thermal insulation clothing design problem under the specific environmental temperature and working time requirements. The thermal clothing consists of three layers of storage and a layer of air. We simplified the conduction of temperature from the outside to the one-dimensional heat conduction model. Because the heat conduction law in each layer is the same, the only difference is the heat conduction parameter. Therefore, we establish a variable coefficient heat conduction model to describe the temperature transmission law in the thermal insulation clothing. In practical applications, the thickness of the II and IV layers has a clearly defined value range. In order to design thermal insulation clothing according to the requirements of ambient temperature and working time, In this paper, through the dichotomy method to traverse the thickness combination of the II and IV layers, to find the optimal thickness of insulation clothing that meets the requirements.

Keywords

variable coefficient of heat conduction; dichotomy; Matlab

基于变系数热传导模型的隔热服厚度选择

高文韬 陈柏龄 贾宗婷

安徽建筑大学, 中国·安徽 合肥 230601

摘要

在隔热服中温度的传递方式仅为热传导的假设下, 本文借助隔热服中温度传导的规律, 建立变系数热传导方程, 以解决特定环境温度和工作时间要求下的隔热服设计问题。隔热服由三层置物 and 一层空气组成。我们将温度由外而内的传导, 简化为一维的热传导模型。由于各层内热传导规律相同, 不同的仅为热传导参数, 因此, 我们建立变系数热传导模型, 描述温度在隔热服中的传递规律。实际应用中, II、IV层的厚度有明确规定的取值范围, 为了根据环境温度和工作时间的要求设计隔热服, 本文通过二分法遍历 II、IV层的厚度组合, 找到符合要求的最佳隔热服厚度。

关键词

变系数热传导; 二分法; Matlab

1 研究的问题及分析

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, 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, 测量假人皮肤外侧的温度。

我们主要研究, 给定外界高温温度, 确定第二层和空气间隙层的最优厚度, 确保在规定的工作时间内, 皮肤表面温度在一定数值以内。

2 模型的假设

假设专用服装通常由三层织物材料构成, 记为 I、II、III 层, 第三层与皮肤之间的空气间隙即为 IV 层。^[1]

热传导过程中, 假设不考虑热对流, 热辐射等热传递方式; 假设外侧皮肤组织层的热传导系数, 比热容和密度是接近人体皮肤组织, 根据人体皮肤组织参数近似用作假人皮肤组织的参数;

假设在开始计时之前, 隔热服各处的初始温度为人体温度 37°C ;

隔热服外表面各处温度相同，均为环境温度；人体表面各处温度相同，均为 $\varphi(t)$ 。

3 变系数热传导模型

热传导模型引入：

由于不考虑热辐射和热对流，将四层材料的热量传递方式都视为热传导即可。

利用 MATLAB 我们能够得到温度随时间空间变化的趋势图，如图 1 所示。由于温度通过四层不同材料传到人体表面，传递的规律相同但传递温度的能力不同，在此基础上，我们建立变系数的热传导模型。^[2]

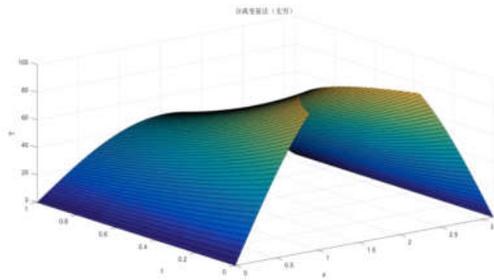


图 1 温度随时间空间变化趋势模型

变系数热传导边界条件：

由于人体表面温度受到环境和人体温度的双重影响，考虑起来较为复杂，因此我们忽略人体对于皮肤表面温度的影响，认为其仅与环境有关。将人体表面温度设为随时变化的函数 $\psi(t)$ 这样一个恒定边界和一个动态边界就能够确定：

$$\begin{cases} u(0,0) = T_{\text{外界}} \\ u(l,0) = \psi(0) \end{cases} \quad (1)$$

其中，某点温度 u 为关于所在位置 x 和时间 t 的函数，且 x 的值即为从隔热服表面到计算温度点的距离；表示隔热服的厚度。上式表示的是在隔热服表面 $x = 0$ 且 $t = 0$ 的初始时刻，隔热服温度为外界温度 $T_{\text{外界}}$ ；在隔热服最内侧（包含第 IV 层） $x = l$ 且 $t = 0$ 的初始时刻的温度为 $\varphi(0)$ 。

变系数热传导模型：

取隔热服最外层某面元 $d\vec{s}$ 的法向量 \vec{n} 的正方向垂直指向皮肤表面，令 x 轴正方向与 \vec{n} 相同，所有计算温度的点均在 x 轴上等距取得。II、IV 层厚度在生产标准中有明确的范围，一般情况下 II 层厚度在 0.6–25 毫米、IV 层厚度在 0.6–6.4 毫米范围之内。在 x 轴上所取的点的坐标记为 x_j ，总时间为 t 秒钟。

热量的传导满足方程：

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\tau} - \frac{\mu}{h^2} (u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n) = 0 \quad (2)$$

其中 μ 为一维热传导方程中的热传导系数。

上式表明，只要知道初始时刻各点的温度，通过迭代就能够知道利用某一点的前、后两个点和自身第 n 秒测得的温度能够求出这一点在第 $n + 1$ 秒时的温度，即每一点的温度都能够由上一秒、上一点迭代求得。

由于隔热服由四层不同材料构成，热传导系数 μ 会随着传播介质的变化而变化，因此我们在模拟温度的传播时，需要根据传播长度及时更改系数。

4 模型的求解

热传导方式确定后，需要适当的组合第 II、IV 层厚度进行温度传导的模拟，以满足工作中，“人体皮肤表面最高温度须在多少度之内”或者“超过某一温度的时间需控制在多长时间之内”等要求。^[3]

二分法确定步长：

隔热服第 II 层、第 IV 层的厚度，由步长和厚度的取值范围确定，利用二分法设定步长，将 II、IV 层的取值区间长度不断取二分之一作为步长，每个 II 层的厚度都需遍历 IV 层厚度的可能取值，根据计算得出每种厚度组合对应的人体皮肤表面的温度情况。假设要求工作时间为 90 分钟、环境温度为 80°C，根据变系数热传导模型计算 II、IV 层最优厚度，确保工作 30 分钟时，人体皮肤外侧温度不超过 47°C，且超过 44°C 的时间不超过 5 分钟。

5 结语

通过变系数热传导方程我们能够得到温度在不同材料之间传递的计算方法，通过二分法确定步长能够有效的用最少的计算量快速向最优解靠近，直至取到符合条件的隔热服厚度。

参考文献

[1] 卢琳珍,徐定华,徐映红.应用三层热防护服热传递改进模型的皮肤烧伤度预测.纺织学报,2018,39(1):111.
 [2] 陆耀庆.使用供热空调设计手册.北京:中国建筑工业出版社,1993.
 [3] 单寄平.空调负荷使用算法.北京:中国建筑工业出版社,1989.