

基于服装热舒适性的纺织材料孔隙率最优设计

葛美宝¹,徐定华²

(1. 杭州医学院通识教学部,杭州 310053;2. 浙江理工大学理学院,杭州 310018)

摘 要: 根据服装热舒适性和热传递稳态模型,提出了纺织材料孔隙率决定反问题。把最优孔隙率的求解转化为一个稳定泛函的求极值问题,通过不动点定理证明了织物热传递模型解的存在唯一性。将非线性常微分方程的定解问题离散后得到非线性代数方程组,通过拟牛顿法求解非线性代数方程组;通过斐波那契搜索算法求解函数极小化问题,从而得到孔隙率的最优结果。在数据有扰动的情況下,对于不同环境、不同织物类型和不同织物厚度下的人体着装进行数值模拟,数值结果表明孔隙率反演算法合理、可行。

关键词: 反问题;孔隙率决定;拟牛顿法;数值模拟

中图分类号: TS 101.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2017) 06-0765-06

0 引 言

基于热传递特征的纺织材料设计反问题是以人体热湿舒适性为目标^[1],最优决定纺织材料的结构参数(如单层、多层、厚度和孔隙率)和其他物理参数(如热传导系数、水蒸气扩散系数)。这类问题在数学上属于计算数学和应用数学的新领域,具有重要的应用价值,本文关于纺织材料孔隙率设计问题就是其中一类反问题^[2]。通过反问题的理论建模与数值结果为改性材料与复合材料的研发提供理论依据,同时预测和指导功能性纺织材料设计的实验。

文献表明织物的孔隙率或纤维体积都是影响多孔织物保暖性能的重要因素^[3-5]。尽管多孔织物的其他结构参数如织物的孔径、纤维的半径和热传导系数等,会影响织物的热传递性能,但是织物的孔隙率分布是影响服装保暖性能的最重要因素^[6-7]。Du等^[6]提出的织物保暖性能纤维材料的孔隙率最优设计,利用有限体积法和模拟退火算法最优决定均匀纤维材料的孔隙率分布,实验结果表明,孔隙率与纤维辐射率和纤维的孔半径具有显著关系,而与边界的温度变化影响不大。在此基础上,Du等^[7]进一步

研究了基于非均匀织物保暖性能的孔隙率最优决定。

近年来,纺织材料数学建模研究人员对纺织材料中若干类稳态和动态、常微分和偏微分方程的热湿传递模型进行了系统研究,提出了以人体热湿舒适性为目标对纺织材料热湿传递的厚度和热传导系数等设计的反问题,采用多种最优化方法进行了数值求解,如 Hooke-Jeeves 模式搜索算法^[7]、黄金分割法(0.618法)^[8]、直接搜索算法^[9]、粒子群算法^[10]和遗传算法^[11],数值结果验证了纺织材料设计反问题提法的合理性和求解算法的有效性^[2,8,12-16]。

由于不同的纺织材料的微观结构,特别是孔隙率对织物的保暖性能影响比较大,为了设计保暖的纺织材料,本文基于服装热舒适性的要求,研究最优决定一类稳态耦合热传递模型的孔隙率分布,该模型与本课题之前研究的模型^[8,10]不同。本文通过不动点定理证明了稳态热传导定解问题解的存在性和唯一性;对非线性常微分方程的定解问题进行离散得到非线性代数方程组,用拟牛顿法求解非线性代数方程组,用斐波那契搜索算法求解函数极小化问题,数值模拟结果说明稳定泛函存在最小值,并得到孔隙率的最优结果。

收稿日期: 2017-04-27 网络出版日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11471287);浙江省教育厅科研项目(Y201534157);浙江医学高等专科学校项目(2014XZA001)

作者简介: 葛美宝(1981-),男,江西南昌人,硕士,主要从事数学物理方程反问题和纺织材料设计的数理分析方面的研究。

1 稳态耦合热传导数学模型

在单层人体-服装-环境的着装系统(见图1)中,本文考虑关于一类纺织材料的稳态热传导模型孔隙率的最优决定问题。文献[6]从织物保暖性能角度研究了织物的最优孔隙率分布,不同于文献[6],本文从服装热舒适性的角度,提出织物孔隙率设计的反问题,并通过构造稳定的目标泛函和设计求解算法,最优决定织物的孔隙率分布。

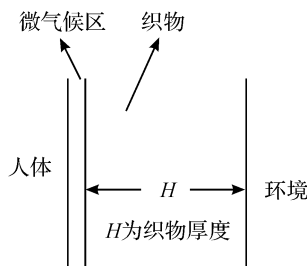


图1 人体-服装-环境着装系统示意图

对单层人体-服装-环境的着装系统给如下假设:

- 在织物内部材料各向同性;
- 忽略织物热流辐射中的散射和对流热传递;
- 织物材料的热传导系数看成常数。

考虑纺织材料中温度 $T(x)$, 热辐射 $F_L(x)$, $F_R(x)$ 满足耦合稳态热传导方程组^[6]

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(k(x) \frac{dT}{dx} \right) = \frac{dF_R(x)}{dx} - \frac{dF_L(x)}{dx} \\ \frac{dF_R(x)}{dx} = -\beta(x)F_R(x) + \beta(x)\sigma T^4(x) \\ \frac{dF_L(x)}{dx} = \beta(x)F_L(x) - \beta(x)\sigma T^4(x) \end{cases} \quad (1)$$

与边界条件

$$\begin{cases} T(0) = T_0 \\ T(H) = T_H \\ (1-e_1)F_L(0) + e_1\sigma T^4(0) = F_R(0) \\ (1-e_2)F_R(H) + e_2\sigma T^4(H) = F_L(H) \end{cases} \quad (2)$$

其中: x 为织物内部的位置, $0 < x < H$; $T(x)$ 为纺织材料的温度, K; $T(0)$ 为织物内侧温度, K; $T(H)$ 为织物外侧温度, K; $\beta(x) = \frac{1-\epsilon(x)}{R}$, 为吸收和辐射系数; e_1, e_2, e 为辐射率; $\epsilon(x)$ 为织物的孔隙率, %, 平均孔隙率(有效孔隙率)记为 $\bar{\epsilon}$, 即 $\bar{\epsilon} = \frac{1}{H} \int_0^H \epsilon(x) dx$;

R 为织物的半径, μm ; $F_L(x)$ 和 $F_R(x)$ 为织物中左侧和右侧的热辐射, W; $F_L(0)$ 和 $F_R(H)$ 分别为织物在左右边界的热辐射, W; $k(x)$ 为织物的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 其中 $k(x) = \epsilon(x)k_a + (1-\epsilon(x))k_f$,

k_a 为空气中的热传导系数; k_f 为织物中的热传导系数, σ 为波尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

耦合常微分方程组的初边值问题(1)–(2)称为正问题(direct problem, DP)。

同时考虑常微分方程组的定解问题:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(k(x) \frac{dT}{dx} \right) = \frac{dF_R(x)}{dx} - \frac{dF_L(x)}{dx} \\ \frac{dF_R(x)}{dx} = -\beta(x)F_R(x) + \beta(x)\sigma T^4(x), \quad 0 < x < H \\ \frac{dF_L(x)}{dx} = \beta(x)F_L(x) - \beta(x)\sigma T^4(x) \end{cases} \quad (3)$$

给定温度边界条件

$$\begin{cases} T(H) = T_H \\ k(x) \frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=H} = \frac{T_e - T(H)}{R_t + \frac{1}{H_t}} \end{cases} \quad (4)$$

和左右辐射边界条件

$$\begin{cases} (1-e_1)F_L(0) + e_1\sigma T^4(0) = F_R(0) \\ (1-e_2)F_R(H) + e_2\sigma T^4(H) = F_L(H) \end{cases} \quad (5)$$

其中: R_t 为织物外边界热传导阻力, $\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$, H_t 为有效热传导系数, $\text{W} \cdot \text{m}^2/\text{K}$ 。根据定解问题(3)–(5)计算织物的左边界温度 $T(x) \Big|_{x=0} = T(0)$, 称为反问题(inverse problem, IP)。

2 孔隙率决定反问题的数学归结

根据文献[1]人体在微气候区的舒适性指标, 可用三个指标环境温度、环境湿度和气流速度的区间表示为: 温度为 $[31^\circ\text{C}, 33^\circ\text{C}]$, 相对湿度为 $[40\%, 60\%]$, 气流速度为 $[0.10 \text{ m/s}, 0.40 \text{ m/s}]$ 。由于本文只考虑微气候区热舒适性, 假设相对湿度和气流速度两个指标已在最佳舒适性区间。

孔隙率决定反问题(inverse problem of textile porosity determination, IPTPD): 给定环境温度 $T_e \in [T_{\min}, T_{\max}]$ (其中 T_{\min}, T_{\max} 分别为某地某时间段的最低日平均温度与最高日平均温度), 微气候区的热舒适性要求(即温度保持为 $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$)以及织物的厚度 H , 构造稳定的目标泛函并设计数值算法求解定解问题, 最优决定织物的平均孔隙率 $\bar{\epsilon}$ 。

求解定解问题(3–5)得到了纺织材料在微气候区的温度 $T(0)$, $T(0)$ 通常不属于温度的舒适区间 $[31^\circ\text{C}, 33^\circ\text{C}]$ 。为此引进稳定泛函:

$$J(\bar{\epsilon}) = (T(0) - T_0^*)^2 \quad (6)$$

其中选取 T_0^* 为人体热舒适性区间的中间值 32°C 。

若 ϵ_0 满足

$$J(\epsilon_0) = \min J(\bar{\epsilon}) \quad (7)$$

则称 ε_0 为 IPTPD 的数值解。

3 正问题(DP)的解耦和解的存在唯一性证明

3.1 正问题(DP)的解耦

对 DP 进行解耦,消去左右热辐射 $F_R(x), F_H(x)$, 同时结合边界条件(2),得到解耦后的常微分方程初边值问题:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(k(x) \frac{dT}{dx} \right) = 2\beta(x)\sigma T^4(x) + H(T(x)), 0 < x < H \\ T(0) = T_0 \\ T(H) = T_H \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} H(T(x)) &= \beta(x)e^{\int_0^x \beta(\tau) d\tau} \left(-\int_0^x \beta(\tau)\sigma T^4(\tau)e^{-\int_0^\tau \beta(\tau) d\tau} d\tau + c_2 \right) - \\ &\quad e^{-\int_0^x \beta(\tau) d\tau} \left(\int_0^x \beta(\tau)\sigma T^4(\tau)e^{\int_0^\tau \beta(\tau) d\tau} d\tau + c_1 \right), \\ c_1 &= e_1\sigma T_0^4 + (1 - e_1)c_2, \\ c_2 &= \frac{(2 - e_2)\int_0^H \beta(x)\sigma T^4(x) dx + e^{-\int_0^H \beta(x) dx} (1 - e_2)e_1\sigma T_0^4 + e_2\sigma T_H^4}{e^{\int_0^H \beta(x) dx} - e^{-\int_0^H \beta(x) dx} (1 - e_1)(1 - e_2)}. \end{aligned}$$

3.2 正问题(DP)解的存在唯一性

定义算子 $U: C^2[0, H] \rightarrow C[0, H]$,

$$U(T(x)) = T(x) + r \left[\frac{d}{dx} \left(k(x) \frac{dT}{dx} \right) - H(T) - 2\beta(x)\sigma T^4(x) \right] \quad (9)$$

其中 $r \in \mathbf{R}$ 为给定的常数。

为了证明存在唯一性结论,先给出一些合理的假设(s1)–(s3):

(s1) $T_H \leq T(x) \leq T_0, 0 \leq x \leq H$.

(s2) $T(x) \in C^2[0, H]$, 存在一个常数 $M > 0$,

使得

$$\|T(x)\|_{C^2[0, H]} \leq M.$$

(s3) 存在常数 N_1, N_2, N_3 , 使得

$$|\beta(x)| \leq N_1, |k(x)| \leq N_2, |k'(x)| \leq N_3, 0 \leq x \leq H.$$

引理 1 对任意的 $T_1, T_2 \in C^2[0, H]$, 有

$$\left| \int_0^x \beta(x)\sigma(T_1^4 - T_2^4)e^{-\int_0^x \beta(x) dx} dx \right| \leq 4HN_1^2e^{N_1H}\sigma T_0^3 \|T_1 - T_2\|_{C[0, H]} \quad (10)$$

证明 引理 1 显然成立。

引理 2 对任意的 $T_1, T_2 \in C^2[0, H]$, 有

$$|H(T_1) - H(T_2)| \leq m_2 \|T_1 - T_2\|_{C[0, H]} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} m_2 &= 8HN_1^2e^{N_1H}\sigma T_0^3 + 4m_1HN_1^2e^{N_1H}\sigma T_0^3(2 - e_2)(2 - e_1), \\ m_1 &= \frac{1}{(1 - e_1)(1 - e_2)e^{-\int_0^H \beta(x) dx} - e^{\int_0^H \beta(x) dx}}. \end{aligned}$$

证明 对任意的 $T_1, T_2 \in C^2[0, H]$, 有

$$\begin{aligned} &|H(T_1) - H(T_2)| \leq \\ &|\beta(x)e^{\int_0^x \beta(x) dx} \int_0^x \beta(x)\sigma(T_1^4 - T_2^4)e^{-\int_0^x \beta(x) dx} dx| + \\ &|\beta(x)e^{-\int_0^x \beta(x) dx} \int_0^x \beta(x)\sigma(T_1^4 - T_2^4)e^{\int_0^x \beta(x) dx} dx| + \\ &|\beta(x)(e^{\int_0^x \beta(x) dx} + e^{-\int_0^x \beta(x) dx}(1 - e_1))(c_2(T_1) - c_2(T_2))|. \end{aligned}$$

上述两个积分可通过引理 1 计算得到,故引理 2 成立。

定理 1 若假设(s1)–(s3)成立,当实数 r 满足

$$|r| \leq \frac{1}{3} \min \left\{ \left| \frac{-m_2}{8N_1\sigma T_0^3} \right|, \frac{1}{N_3}, \frac{1}{N_2} \right\} \quad (12)$$

则存在唯一的解 $T(x) \in C^2[0, H]$, 使得 $U(T(x)) = T(x)$.

证 对任意的 $T_1, T_2 \in C^2[0, H]$, 有

$$\begin{aligned} &|U(T_1) - U(T_2)| \leq |T_1 - T_2 + rk'(T'_1 - T'_2) + \\ &\quad rk(T'_1 - T''_2) - r(H(T_1) - H(T_2)) - \\ &\quad 2r\beta(x)\sigma(T_1^4 - T_2^4)| \leq \\ &|1 - 2r\beta(x)\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)| \|T_1 - T_2\| + \\ &|rk' \|T'_1 - T'_2\| + |rk \|T'_1 - T''_2\| + \\ &|r \|H(T_1) - H(T_2)\|. \end{aligned}$$

由引理 1 和 2, 得到

$$\begin{aligned} &|U(T_1) - U(T_2)| \leq |1 + 8N_1r\sigma T_0^3 + \\ &\quad m_2| \cdot \|T_1 - T_2\|_{C[0, H]} + \\ &|rN_3| \cdot \|T'_1 - T'_2\|_{C[0, H]} + \\ &|rN_2| \cdot \|T''_1 - T''_2\|_{C[0, H]}. \end{aligned}$$

当实数 r 满足(12)时,有

$$\begin{aligned} &|U(T_1) - U(T_2)| \leq \|T_1 - T_2\|_{C[0, H]} + \\ &\|T'_1 - T'_2\|_{C[0, H]} + \|T''_1 - T''_2\|_{C[0, H]} < \\ &\|T_1 - T_2\|_{C^2[0, H]}. \end{aligned}$$

4 反问题(IP)的算法设计思想和求解步骤

IP 可转化为非线性常微分方程的边值问题:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(k(x) \frac{dT}{dx} \right) = 2\beta(x)\sigma T^4(x) + H(T), 0 < x < H \\ T(H) = T_H \\ k(x) \frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=H} = \frac{T_e - T(H)}{R_t + \frac{1}{H_t}} \end{cases} \quad (13)$$

用有限差分和数值积分离散(13),用拟牛顿迭代法对离散后的非线性方程组进行求解^[17],求解步骤如下。

Step 1: 将厚度区间 $[0, H]$ 进行 $n+1$ 等分,步长为 $h = H/(n+1)$ 。

Step 2: 数值微分与积分。令

$$T'(x)|_{x=x_i} \approx \frac{T_i - T_{i-1}}{h}, T''(x)|_{x=x_i} \approx \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{h^2}, \quad i=1, 2, \dots, n,$$

$$k'(x)|_{x=x_i} \approx \frac{k_i - k_{i-1}}{h}.$$

用矩形数值积分公式离散积分,对 c_2 中的积分项进行离散,得到

$$e^{-\int_0^H \beta(x) dx} = e^{-h \sum_{i=0}^{n+1} \beta_i}, e^{\int_0^H \beta(x) dx} = e^{h \sum_{i=0}^{n+1} \beta_i},$$

$$\int_0^H \beta(\tau) \sigma T^4(\tau) d\tau = h \sum_{i=0}^{n+1} \beta_i \sigma T_i^4.$$

对(9)中方程右端的部分项进行离散,得

$$A_i = e^{-\int_0^{x_i} \beta(x) dx} = e^{-h \sum_{j=0}^i \beta_j},$$

$$B_i = \int_0^{x_i} \beta(\tau) \sigma T^4(\tau) e^{\int_0^{x_i} \beta(\tau) d\tau} d\tau$$

$$= h \cdot e^{h \sum_{j=0}^i \beta_j} \cdot \sum_{j=0}^i \beta_j \sigma T_j^4$$

对(13)中的方程离散,

$$\frac{k_i - k_{i-1}}{h} \frac{T_i - T_{i-1}}{h} + k_i \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{h^2} =$$

$$2\beta_i \sigma T_i^4 - \beta_i \left[A_i \left(B_i \frac{1}{A_i} + c_1 \right) + \frac{1}{A_i} (-B_i A_i + c_2) \right] =$$

$$2\beta_i \sigma T_i^4 - \beta_i (c_1 + c_2), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

边界条件离散为

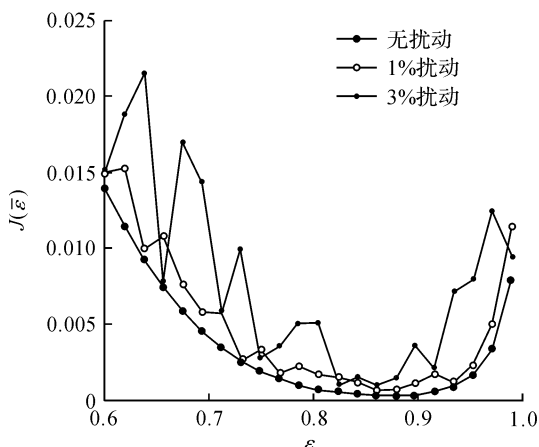
$$T_{n+1} = T_H, k_i \frac{T_{n+1} - T_n}{h} = \frac{T_e - T_H}{R_i + \frac{1}{H_i}}.$$

Step 3:通过离散把定解问题(13)转化为一个关于温度 $T(x)$ 非线性方程组。

对中的方程离散后进行变形,令

$$F(i) = \frac{k_i - k_{i-1}}{h} \frac{T_i - T_{i-1}}{h} + k_i \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{h^2}$$

$$= 2\beta_i \sigma T_i^4 - \beta_i (c_1 + c_2), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (15)$$



(a)情形1

再令

$$\mathbf{Y} = [T_0, T_1, \dots, T_{n-1}]^T \in \mathbf{R}^n,$$

从而(13)转化为

$$F(\mathbf{Y}) = 0 \quad (16)$$

Step 4:用拟牛顿迭代法求解非线性方程组(16),得到纺织材料的温度分布 $T(x)$,可得 $T(x)|_{x=0} = T(0)$ 的数值解。

5 孔隙率决定反问题(IPTPD)的斐波那契算法

5.1 斐波那契算法

由于稳定泛函 $J(\epsilon)$ 的导数不好计算,故可采用不用求导的无约束一维搜索算法求解,如黄金分割法(0.618法)、遗传算法、插值法和直接法(Powell方法、模式搜索方法和单纯形调优法)等。本文用斐波那契搜索算法^[9]求解(7)。斐波那契是一种区间收敛的算法,是一种同时改变搜索区间两端点的双向收缩算法。

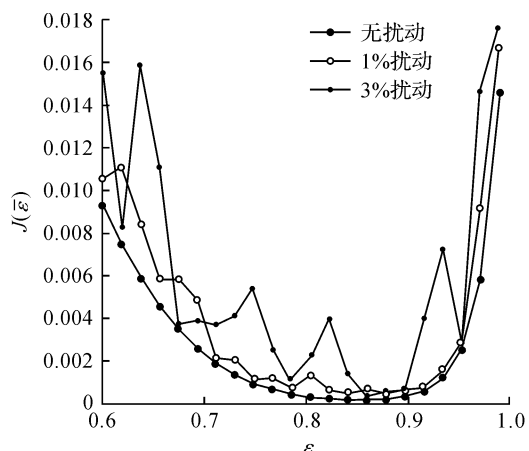
5.2 数值模拟

下面通过两种不同环境下着装的数值算例,来验证孔隙率反演算法的有效性。假定环境温度与织物表明温度相差 0.1°C ,人体舒适温度 $T_0^* = 32^\circ\text{C}$,辐射率 $e_1 = e_2 = 0.1$, $e = 0.1$, $\sigma = 5.672 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$,孔半径 $R = 1.2 \times 10^{-5} \text{ m}$, $k_a = 0.025 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $R_i = 3.15 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$, $H_i = 4.05 \text{ W} \cdot \text{m}^2/\text{K}$ 。

情形1:当环境温度 $T_e \in [0^\circ\text{C}, 15^\circ\text{C}]$ 。

情形2:当环境温度 $T_e \in [-15^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}]$ 。

在两种环境下选取两种织物,羊毛 $k_{f1} = 0.052 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,涤纶 $k_{f2} = 0.084 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,三种厚度 $H_1 = 1 \text{ mm}$, $H_2 = 3 \text{ mm}$, $H_3 = 5 \text{ mm}$ 。图2—图4为羊毛织物在两种环境下三种厚度的泛函 $J(\epsilon)$ 图形。



(b)情形2

图2 两种情形下厚度 H_1 的泛函 $J(\epsilon)$ 曲线

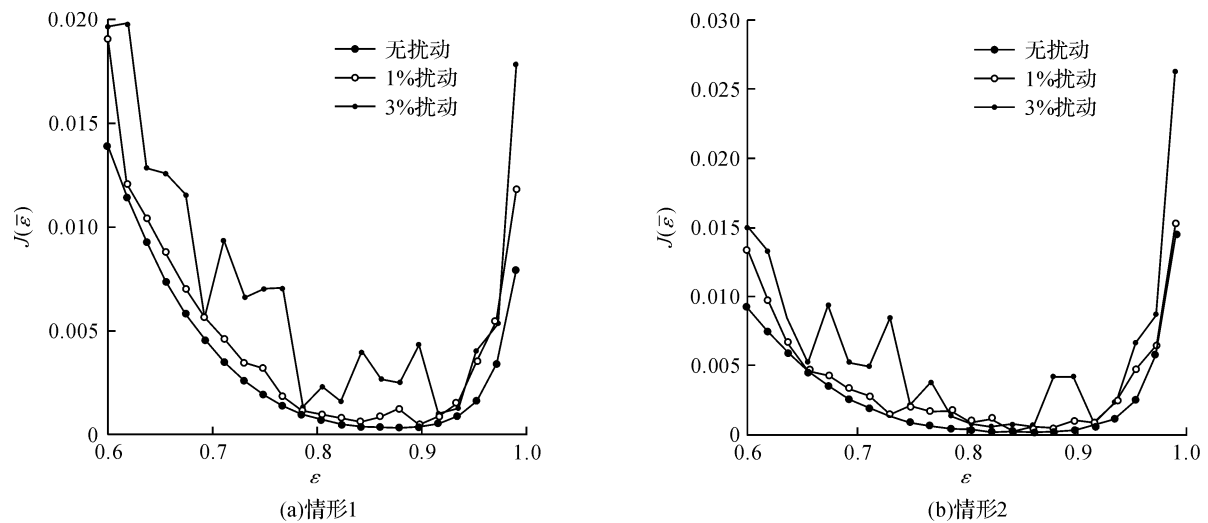


图 3 两种情形下厚度 H_2 的泛函 $J(\epsilon)$ 图形

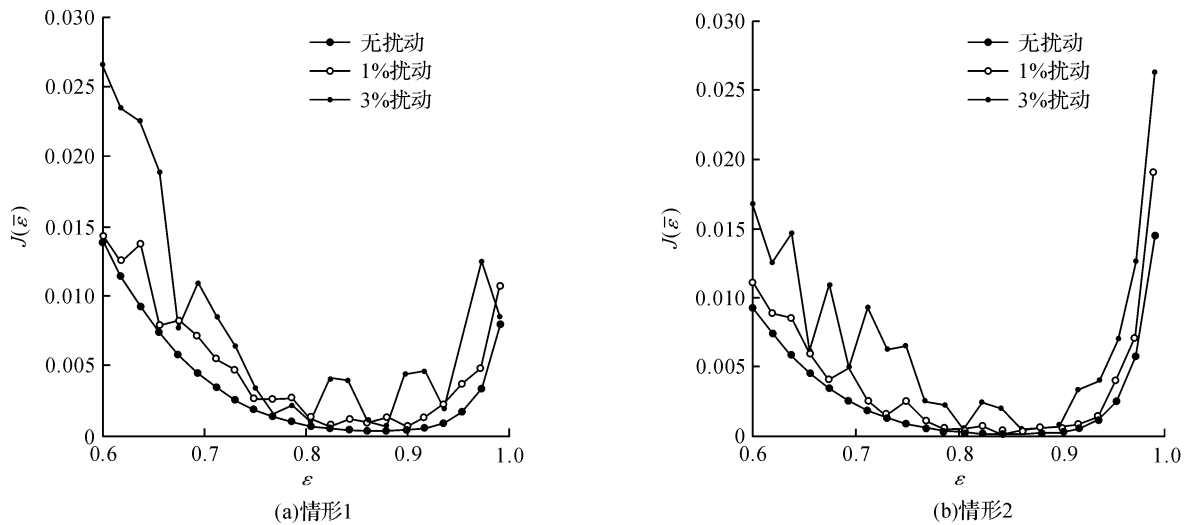


图 4 两种情形下厚度 H_3 的泛函 $J(\epsilon)$ 图形

由图 2—图 4 的泛函曲线可知,泛函存在极值且有、唯一的极小值。当噪音数据扰动为 1% 时,表 1 和表 2 分别给出了在情形 1 和情形 2 中,2 种不同织物和 3 种不同厚度平均孔隙率 ϵ 的数值结果,迭代算法结果与图形所示结果一致。由文献[18]可知,孔隙率与织物的厚度、密度和质量有关,孔隙率随着厚度的变化可以增大,也可以减少,进一步说明表 1 和表 2 中平均孔隙率结果的合理性。

表 1 羊毛平均孔隙率 ϵ 的近似值

织物厚度/mm	情形 1 孔隙率/%	情形 2 孔隙率/%
1.00	84.62	84.23
3.00	83.30	80.38
5.00	86.26	82.38

表 2 涤纶平均孔隙率 ϵ 的近似值

织物厚度/mm	情形 1 孔隙率/%	情形 2 孔隙率/%
1.00	81.45	87.56
3.00	82.56	87.46
5.00	83.98	87.25

6 结 论

基于人体服装的热舒适性,本文提出了一类稳态纺织材料热传递模型的孔隙率最优设计问题,根据数值算例的模拟结果,说明孔隙率设计反问题的提法合理、可行,进一步为改性材料设计提供理论支持与数值结果参考。下一步主要研究多层织物材料和孔隙率作为函数的反演问题,以及数学建模的算法优化和纺织材料设计软件的开发。

参考文献:

- [1] 黄建华. 服装的舒适性[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 20-21.
- [2] 徐定华. 纺织材料热湿传递数学模型及设计反问题[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 23-25.
- [3] FARNWORTH B. Mechanisms of heat flow through clothing insulation[J]. Textile Research Journal, 1983,

- 53(12):717-725.
- [4] FAN J T, WEN X. Modelling heat and moisture transfer through fibrous insulation with phase change and mobile condensates[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(19): 4045-4055.
- [5] FAN J T, CHENG X Y, WEN X H, et al. An improved model of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation and comparison with experimental results[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(10/11): 2343-2352.
- [6] DU N, FAN J T, WU H J. Optimum porosity of fibrous porous materials for thermal insulation[J]. Fibers and Polymers, 2008, 9(1): 27-33.
- [7] DU N, FAN J T, WU H J, et al. Optimal porosity distribution of fibrous insulation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(13): 4350-4357.
- [8] 徐定华, 陈远波, 程建新. 低温环境下纺织材料类型设计反问题[J]. 纺织学报, 2011, 32(9): 24-28.
- [9] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 98-102.
- [10] XU D H, CHENG J X, CHENG Y B, et al. An inverse problem of thickness design for bilayer textile material under low temperature[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 290(1): 1-11.
- [11] GE M B, YU Y, XU D H. Textile porosity determination based on a nonlinear heat and moisture transfer model[J]. Applicable Analysis, 2017, 96(10): 1681-1697.
- [12] XU D H, GE M B. Thickness determination in textile material design: dynamic modeling and numerical algorithms[J]. Inverse Problems, 2012, 28(3): 35011-35032.
- [13] XU D H. Inverse problems of textile material design based on clothing heat-moisture comfort[J]. Applicable Analysis, 2014, 93(11): 2426-2439.
- [14] XU D H, WEN L. An inverse problem of textile porosity determination in dynamic heat and moisture transfer[J]. Chin Ann Math, 2014, 35(2): 129-144.
- [15] YU Y, XU D H. On the inverse problem of thermal conductivity determination in nonlinear heat and moisture transfer model within textiles[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 264(2): 284-299.
- [16] XU Y H, XU D H, ZHANG L P, et al. A new inverse problem for the determination of textile fabrics thickness[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2014, 23(4): 635-650.
- [17] 徐定华, 葛美宝. 一类纺织材料中热湿传递模型的数值解法[J]. 江西科学, 2010, 28(5): 578-582.
- [18] ROBERT G, MARTIN K, MICHEL M, et al. New polyester arterial prostheses from great brain: an in vitro and in vivo evaluation[J]. Annals of Biomedical Engineering, 1986, 14(2): 351-367.

Optimal Determination of Porosity for Textile Materials Based on Thermal Comfort

GE Meibao¹, XU Dinghua²

(1. Department of General Education, Hangzhou Medical College, Hangzhou 310053, China;

2. School of Sciences, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: According to the thermal comfort and heat transfer steady-state modal of clothing, an inverse problem of textile material porosity determination (IPTPD) was put forward. The problem of solving the optimal porosity was transformed into a problem of solving extreme value of a stable extensive function, and the existence and uniqueness of solution to the heat transfer model of fabric were proved via the fixed point theorem. A set of nonlinear algebraic equations were obtained by discretizing the problem for determining solution to nonlinear ordinary differential equations, and the equations were solved with quasi-newton method and minimized with the Fibonacci search algorithm, to obtain the optimal porosity. Numerical simulation of clothing of human body was conducted under different environments and with fabric of different types and thicknesses, which indicates that the inverse algorithm of porosity is reasonable and feasible.

Key words: inverse problem; porosity determination; quasi-newton method; numerical simulation

(责任编辑: 唐志荣)