



基于稳态热湿传递模型的单层织物 孔隙率最优决定反问题

薛钊显^a, 徐映红^b

(浙江理工大学, a. 信息科学与工程学院; b. 理学院, 杭州 310018)

摘要: 在稳态热湿传递模型的基础上, 提出了一个单层织物的孔隙率最优决定反问题, 通过优化织物的孔隙率参数以提高服装的热湿舒适性。使用蝙蝠算法求解单层织物的稳态热湿传递模型, 得到温度和水汽浓度的分布; 在此基础上, 以高温天气下单层织物的散热性和透湿性最佳为目标, 提出了单层织物孔隙率最优决定反问题; 使用热阻和湿阻衡量织物的散热性和透湿性, 将该反问题描述为一个热阻和湿阻最小优化问题, 对热阻和湿阻设置不同的权重, 将其转化为单目标优化问题, 并使用蝙蝠算法求解。使用棉、羊毛、涤纶等 3 种常见的织物进行数值实验, 结果表明: 该反问题存在最优解, 求解该反问题可得到使单层织物散热透湿性能达到最佳的孔隙率最优值; 蝙蝠算法求解热湿传递模型正问题和反问题的效率高于常用的粒子群优化算法。该研究拓展了通过优化织物参数提高服装热湿舒适性的研究内容, 可为高温天气下服装热湿舒适性优化设计提供一定的理论支持。

关键词: 织物; 热湿传递模型; 热湿舒适性; 蝙蝠算法; 孔隙率

中图分类号: TS101

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2024) 03-0195-07

引文格式: 薛钊显, 徐映红. 基于稳态热湿传递模型的单层织物孔隙率最优决定反问题[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(2): 195-201.

Reference Format: XUE Zhaoxian, XU Yinghong. An inverse problem of a steady-state model of heat and moisture transfer for determining the optimal porosity of single-layer fabrics [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(2): 195-201.

An inverse problem of a steady-state model of heat and moisture transfer for determining the optimal porosity of single-layer fabrics

XUE Zhaoxian^a, XU Yinghong^b

(a. School of Information Science and Engineering; b. School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on a model of thermal and moisture transfer, the inverse problem for determining the optimal porosity of single-layer fabrics was proposed to improve the thermal and moisture comfort of the garment by optimizing the porosity parameters of fabrics. A steady-state thermal and moisture transfer model of a single-layer fabric was solved by the bat algorithm to obtain the distributions of temperature and water vapor concentration, based on which the inverse problem of the optimal determination of porosity was proposed with the goal of the best thermal dissipation and moisture permeability in hot weather. With thermal and moisture resistance to measure the thermal dissipation and moisture permeability of the fabric, the inverse problem was presented as a thermal and moisture resistance minimization optimization problem, which was transformed into a single-objective optimization problem by setting different weights for thermal and moisture resistance and solved by the bat algorithm. The

收稿日期: 2023-04-19 网络出版日期: 2023-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11501513, 11471287); 浙江省自然科学基金项目(LY18A010030)

作者简介: 薛钊显(1997-), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事反问题理论与应用方面的研究。

通信作者: 徐映红, E-mail: xyh7913@163.com

numerical experiments were carried out by using three the common fabrics of cotton, wool and polyester. The results show that the inverse problem has an optimal solution and the optimal value of porosity that optimizes the thermal and moisture transfer performance of the single-layer fabric can be obtained by solving this inverse problem. It is also concluded that the bat algorithm is more efficiently than the particle swarm optimization algorithm for the forward and inverse problems of the thermal and moisture transfer model. This study expands the research content of improving thermal and moisture comfort of garments by optimizing fabric parameters, which can provide some theoretical guidance for the optimal design of thermal and moisture comfort of garments in hot weather.

Key words: fabric; heat and moisture transfer model; heat and moisture comfort; bat algorithm; porosity

0 引言

服装是人们的生活必需品;除了要满足蔽体、防寒、保暖等基本需求,消费者对其舒适性的要求也越来越高,因此有关服装舒适性的问题成为近年来的研究热点^[1]。服装的舒适性可细分为热湿舒适性、压力舒适性、接触舒适性等,其中热湿舒适性起主要作用^[2]。目前有关服装热湿舒适性的研究方法主要有两种:一种是实验研究,另一种是数值模拟研究。实验研究主要使用暖体假人法、人体生理实验法、主观评价法等服装舒适性评估方法,评估各类织物制成的服装的热湿舒适性^[3]。实验研究可以定量评估服装的性能,但存在实验操作复杂、耗时长以及测量仪器昂贵等局限。数值模拟研究通过建立织物热湿传递模型研究人体、服装和环境中的热湿传递的规律,在此基础上提出织物的参数最优决定反问题,预测各种环境下满足人体舒适性要求的织物参数^[4]。与实验研究相比,数值模拟研究可以减少研发费用,缩短研发周期。

有关织物热湿传递模型的研究始于20世纪30年代,之后国内外研究者对此进行了不断发展和完善。近些年来,为更好地研究织物中热湿传递的规律,织物热湿传递模型从只考虑织物中热传导、热辐射、水汽扩散等简单现象,发展到考虑水汽吸附引起的纤维膨胀、水汽冷凝释放热量等复杂现象;模型中热湿传递的方式从一维(沿织物厚度方向)传递,拓展到多维(沿织物厚度和平面方向)传递。Su等^[5]建立了一个热湿传递模型,用于模拟织物暴露在热蒸汽环境中的情形,该模型考虑了水汽在传递过程中的相变以及纤维对水汽的吸附和解吸附。Shen等^[6]开发了一个人体躯干的三维模型,用于研究热量和水分在防寒服中传递的规律。Huang等^[7]建立了一个极寒环境下电热衣的热湿传递模型,通过数值模拟优化加热元件的参数。Su等^[8]开发了极

热环境下预测消防员最短暴露时间的热湿传递模型,该模型考虑了水汽相变对热量传递的影响。

对于已建立的织物热湿传递模型,给定模型中各参数的值,并利用数值算法求得服装内部热量、水汽等的时空分布情况,这个过程通常称为热湿传递模型的正问题。基于该正问题可提出织物的参数最优决定反问题,反推出织物的性能特征参数(导热系数、水汽扩散系数、含水率等)和结构特征参数(厚度、孔隙率、曲折率等),进而通过优化织物参数来提高服装的热湿舒适性^[9]。不少研究者提出了织物的参数最优决定反问题,并采用数值算法求解。Ge等^[10]基于一个动态的热湿传递模型提出了织物孔隙率最优决定反问题,将反问题表示为一个优化问题,对该优化问题进行正则化处理,并使用遗传算法和改进的遗传算法进行求解。Li等^[11]提出了极热环境下满足皮肤热安全要求的三层织物厚度最优决定反问题,将该问题表示为一个具有非线性约束的最优化问题,并使用粒子群优化算法(Particle swarm optimization, PSO)求解。Wang等^[12]提出了一个多层织物的厚度和孔隙率多参数最优决定反问题,以不同环境下微气候层中温度和湿度保持在人体舒适性指标区间内的概率最大为目标,将该反问题表示为一个概率最大优化问题,并使用PSO算法求解。

本文在Min等^[13]建立的织物热湿传递模型的基础上,考虑高温天气下人体对服装热湿舒适性的要求,以织物的散热性和透湿性最佳为目标,提出了一个单层织物孔隙率最优决定反问题,并采用数值算法求解。为了提高求解效率,使用收敛速度更快的蝙蝠算法(Bat algorithm, BA)求解热湿传递模型的正问题和反问题。本文提出的单层织物孔隙率最优决定反问题,拓展了提高服装热湿舒适性的研究内容,可为高温天气下服装热湿舒适性优化设计提供一定的理论支持。

1 热湿传递模型

1.1 正问题模型

本文采用由 Min 等^[13]提出的热湿传递模型。该模型是一个单层织物的稳态模型,描述了日常生活环境下热量和水汽在人体—服装—环境系统中的传递过程,如图 1 所示。图 1 中: L_M 和 L_F 分别为微气候层和织物层的厚度,mm; x 表示到人体皮肤的距离,mm。

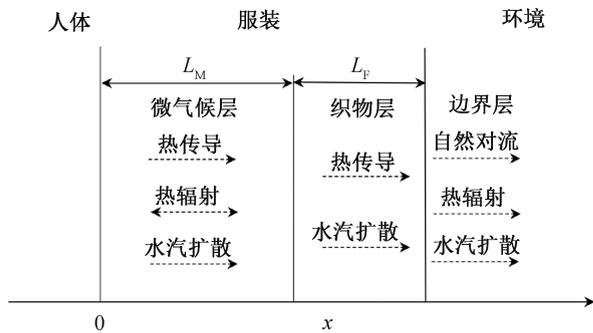


图 1 人体—服装—环境系统热湿传递过程示意图

微气候层是织物层与人体皮肤表面之间的空气间隙,织物层由单层的织物组成,边界层是环境与织物层交界处的过渡区域。人体从皮肤散发的热量和水汽依次经过微气候层和织物层传递到边界层,再通过自然对流、热辐射和水汽扩散传递到环境中。

该模型作如下假设:a)热量和水汽只进行一维(沿织物厚度方向)传递;b)皮肤和环境的温度与水汽浓度是常数,保持不变;c)微气候层不存在自然对流;d)微气候层与织物层之间以及织物层与边界层之间的温度与水汽浓度的变化是连续的;e)织物层的孔隙率不受水汽浓度的影响;f)织物层中水汽的吸附和解吸附处于局部平衡状态。

微气候层热通量和水汽的质量通量为

$$\begin{cases} q_M = -k_M \frac{dT}{dx} + \frac{\sigma(T_S^4 - T_M^4)}{1/e_S + 1/e_F - 1} + j_M \Delta H_{\text{vap}}, \\ j_M = -\rho_M D_{\text{vap}} \frac{dw}{dx} \end{cases} \quad (1)$$

其中: q_M 为微气候层的热通量, W/m^2 ; j_M 为微气候层水汽的质量通量, $kg/(m^2 \cdot s)$; k_M 为微气候层的导热系数, $W/(m \cdot K)$; T_S 和 T_M 分别为皮肤和微气候层与织物层交界处的温度, K ; e_S 和 e_F 分别为皮肤和织物的发射率; σ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$; ρ_M 为微气候层空气的密度, kg/m^3 ; ΔH_{vap} 为水的汽化焓变, J/kg ; D_{vap} 为水汽在空气中的扩散系数, m^2/s 。

皮肤与微气候层交界处的边界条件为

$$\begin{cases} T(0) = T_S, \\ w(0) = w_S \end{cases} \quad (2)$$

其中: w_S 为皮肤处的水汽浓度, kg/m^3 。

在稳定状态下,温度和水汽浓度满足以下方程:

$$\begin{cases} k_M \frac{d^2 T}{dx^2} = 0, \\ D_{\text{vap}} \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

织物层热通量和水汽的质量通量为

$$\begin{cases} q_F = -k_{\text{Feff}} \frac{dT}{dx} + j_F \Delta H_{\text{vap}}, \\ j_F = -D_{\text{Feff}} \frac{dw}{dx} \end{cases} \quad (4)$$

其中: q_F 为织物层的热通量, W/m^2 ; j_F 为织物层水汽的质量通量, $kg/(m^2 \cdot s)$; k_{Feff} 为织物层的平均导热系数, $W/(m \cdot K)$; D_{Feff} 为水汽在织物层中的有效扩散系数, m^2/s 。 k_{Feff} 和 D_{Feff} 可用以下公式计算:

$$k_{\text{Feff}} = (1 - \epsilon) k_F + \epsilon k_{\text{air}},$$

$$D_{\text{Feff}} = D_{\text{vap}} \frac{\epsilon}{\tau} + D_{\text{sur}},$$

其中: ϵ 和 τ 分别为织物的孔隙率和曲折率; k_{air} 为空气的导热系数, $W/(m \cdot K)$; D_{sur} 为水汽在纤维表面的扩散系数, m^2/s 。

在稳定状态下,温度和水汽浓度满足以下方程:

$$\begin{cases} k_{\text{Feff}} \frac{d^2 T}{dx^2} = 0, \\ D_{\text{Feff}} \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

边界层热通量和水汽的质量通量为

$$\begin{cases} q_E = h(T_{\text{FE}} - T_E) + \sigma e_F (T_{\text{FE}}^4 - T_E^4) + j_E \Delta H_{\text{vap}}, \\ j_E = K_W (w_{\text{FE}} - w_E) \end{cases} \quad (6)$$

其中: q_E 为边界层的热通量, W/m^2 ; j_E 为边界层水汽的质量通量, $kg/(m^2 \cdot s)$; T_E 和 T_{FE} 分别为外界环境和织物层与边界层交界处的温度, K ; w_E 和 w_{FE} 分别为外界环境和织物层与边界层交界处的水汽浓度, kg/m^3 ; h 和 K_W 分别为传热系数和传质系数。 h 和 K_W 可用以下公式计算:

$$h = 0.1 \left[\frac{C_P k^2 \rho^2 g \beta (T_{\text{FE}} - T_E)}{\mu} + \frac{C_P k^2 \rho^2 g \zeta (w_{\text{FE}} - w_E)}{\mu} \right]^{1/3},$$

$$K_W = 0.1 \left[\frac{\rho^4 D_{\text{vap}}^2 g \beta (T_{\text{FE}} - T_{\text{E}})}{\mu} + \frac{\rho^4 D_{\text{vap}}^2 g \zeta (\omega_{\text{FE}} - \omega_{\text{E}})}{\mu} \right]^{1/3},$$

其中: C_p 为恒压热容, J/K; g 表示重力加速度, m/s^2 ; β 为热体积膨胀系数, K^{-1} ; ρ 为织物的密度, kg/m^3 ; μ 为黏度系数, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; ζ 表示浓度体积膨胀系数, K^{-1} 。

当整个系统处于稳定状态时满足以下方程:

$$\begin{cases} q_M = q_F = q_E, \\ j_M = j_F = j_E \end{cases} \quad (7)$$

利用待定系数法可以将该模型转化为非线性方程^[14]。根据式(3)和式(5), 可将温度分布函数 $T(x)$ 和水汽浓度分布函数 $\omega(x)$ 表示为如下分段函数:

$$T(x) = \begin{cases} u_1 x + u_2, & 0 \leq x \leq L_M; \\ u_3 x + u_4, & L_M < x \leq L_M + L_F \end{cases} \quad (8)$$

$$\omega(x) = \begin{cases} v_1 x + v_2, & 0 \leq x \leq L_M; \\ v_3 x + v_4, & L_M < x \leq L_M + L_F \end{cases} \quad (9)$$

其中: $u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3$ 和 v_4 为未知系数。根据式(2)求出 u_2 和 v_2 的值, u_3, u_4, v_3 和 v_4 的值可以用 u_1 和 v_1 表示:

$$\begin{cases} u_2 = T_S, \\ u_3 = \frac{a_1 u_1 + a_2 [T_S^4 - (L_M u_1 + T_S)^4]}{b_1}, \\ u_4 = L_M (u_1 - u_3) + T, \\ v_2 = \omega_S, \\ v_3 = \frac{a_3}{b_2} v_1, \\ v_4 = L_M (v_1 - v_3) + \omega_S \end{cases} \quad (10)$$

其中: $a_1 = -k_M$, $a_2 = \frac{\sigma}{(1/e_S + 1/e_M - 1)}$, $a_3 = -\rho_M D_{\text{vap}} \Delta H_{\text{vap}}$, $b_1 = -[(1 - \epsilon) k_F + \epsilon k_{\text{air}}]$, $b_2 = -(D_{\text{vap}} \frac{\epsilon}{\tau} + D_{\text{sur}}) \Delta H_{\text{vap}}$ 。

将式(8)–(10)代入式(1)–(7), 用 u_1 表示 v_1 , 得到一个关于 u_1 的方程:

$$F(u_1) = 0.1 G (c_3 B + c_4 G)^{1/3} - \frac{a_3}{\Delta H_{\text{vap}}} v_1 = 0 \quad (11)$$

其中: $v_1 = \frac{G - \omega_S + \omega_E}{(a_3/b_2)L_F + L_M}$, $G = \frac{[(10A - c_5 H)/B]^3 - c_1 B}{c_2}$,

$$H = (B + T_E)^4 - T_E^4, B = \frac{A L_F}{b_1} + T_S + L_M u_1 - T_E, A = a_1 u_1 + a_2 [T_S^4 - (L_M u_1 + T_S)^4], c_1 = \frac{C_p k^2 \rho^2 \beta}{\mu}, c_2 = \frac{C_p k^2 \rho^2 \zeta}{\mu}, c_3 = \frac{\rho^4 D_{\text{vap}}^2 g \beta}{\mu}, c_4 = \frac{\rho^4 D_{\text{vap}}^2 g \zeta}{\mu}, c_5 = \sigma e_F。$$

求解式(11), 可得 u_1 的值, 然后通过式(10)–(11)确定 $u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3$ 和 v_4 的值, 从而得到温度的分布函数 $T(x)$ 和水汽浓度分布函数 $\omega(x)$ 。

1.2 蝙蝠算法

前人求解热湿传递模型正问题和反问题较常用的算法是 PSO 算法, 它不要求目标函数具有连续、可微、可导等性质, 适用于目标函数求导困难的优化问题, 但在实际求解织物热湿传递正问题和反问题时, 其收敛速度较慢, 因此需进一步提高计算效率。为提高本文正问题和反问题的计算效率, 本文使用 BA 算法。BA 算法是由 Yang^[15] 提出的一种元启发式算法, 其思路来源于微型蝙蝠通过回声定位来捕猎和规避障碍的行为, 具有鲁棒性强、实现简单、收敛速度快等优点。BA 算法计算步骤如下:

- 确定目标函数, 定义蝙蝠种群, 初始化蝙蝠参数;
- 计算每个蝙蝠的目标函数值并排序, 找出最优蝙蝠;
- 根据蝙蝠位置更新公式更新蝙蝠的位置;
- 生成一个 $[0, 1]$ 之间的随机数, 如果大于蝙蝠的脉冲发射速率, 在最优蝙蝠附近生成一个新蝙蝠;
- 生成一个 $[0, 1]$ 之间的随机数, 如果小于蝙蝠的脉冲强度并且新蝙蝠目标函数值更小, 接受该位置并更新蝙蝠的脉冲发射速率和脉冲强度;
- 对种群中所有蝙蝠的目标函数值排序, 找出最优蝙蝠;
- 重复步骤 c)–f), 直到满足算法停止条件, 输出当前最优蝙蝠。

本文中 BA 算法的参数设置为: 蝙蝠种群大小为 30, 蝙蝠个体的初始脉冲发射速率和脉冲强度分别为 $[1, 2]$ 之间的随机数和 $[0, 1]$ 之间的随机数, 控制脉冲发射速率和脉冲强度更新的参数分别设置为 0.50 和 0.95, 最大迭代次数为 200。

1.3 正问题数值实验

式(11)是一个非线性方程, 将 $F(u_1)$ 的平方作为 BA 算法和 PSO 算法的目标函数, 可求解得到 u_1

的值。对棉、羊毛、涤纶等 3 种不同的织物进行数值模拟,计算温度和水汽浓度的分布。这 3 种织物的参数见表 1,热湿传递模型中相关参数的取值见表 2。BA 算法和 PSO 算法计算的结果见表 3。表 3 记录了当误差精度要求为 5×10^{-12} 时,BA 算法和 PSO 算法分别对 3 种织物计算 50 次后 u_1 的均值、 u_1 的标准差和运行时间。从表 3 可以看出,BA 算法在相同的误差精度下计算所需时间少于 PSO 算法。

表 1 3 种织物的参数

物理特性	棉	羊毛	涤纶
曲折率	2.21	2.35	1.5
孔隙率/%	59.1	69.1	70.7
导热系数/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0.072	0.053	0.084
恒压热容/($J \cdot K^{-1}$)	1380	1338	1255
发射率	0.95	0.95	0.8
密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1350	1310	1220

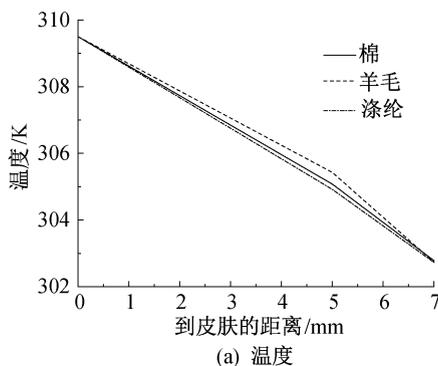
表 2 模型中相关参数的取值

参数	参数取值	参数	参数取值
微气候层的导热系数/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	2.38×10^{-2}	空气的导热系数/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	2.40×10^{-2}
皮肤处的温度/K	309.5	外界环境的温度/K	298.0
皮肤的发射率	0.98	水的汽化焓变/($J \cdot kg^{-1}$)	2.54×10^6
皮肤处的水汽浓度/($kg \cdot m^{-3}$)	3.50×10^{-2}	外界环境的水汽浓度/($kg \cdot m^{-3}$)	1.73×10^{-2}
微气候层的厚度/mm	5	织物层的厚度/mm	2
水汽在空气中的扩散系数/($m \cdot s^{-1}$)	2.50×10^{-5}	水汽在纤维表面的扩散系数/($m \cdot s^{-1}$)	1.00×10^{-6}
浓度体积膨胀系数/ K^{-1}	3.68×10^{-3}	热体积膨胀系数/ K^{-1}	3.36×10^{-3}
斯蒂芬-玻尔兹曼常数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)	5.67×10^{-8}	微气候层空气的密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1.179
黏度系数/($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	1.85×10^{-5}	重力加速度/($m \cdot s^{-2}$)	9.8

表 3 BA 算法和 PSO 算法的计算结果

织物种类	BA 算法			PSO 算法		
	u_1 的均值	u_1 的标准差	运行时间/s	u_1 的均值	u_1 的标准差	运行时间/s
棉	-897.5	0.0025	8.96	-897.5	0.0024	33.82
羊毛	-814.5	0.0027	9.14	-814.5	0.0029	25.04
涤纶	-916.4	0.0031	10.24	-916.4	0.0031	24.30

3 种织物对应的人体—服装—环境系统中温度和水汽浓度的分布见图 2。从图 2 中可以看出,当环境的温度和水汽浓度低于人体皮肤的温度和水汽浓度时,3 种织物对应系统中温度与水汽浓度由皮肤区域向环境区域递减。此外,织物种类和不同的热湿传递区域,均对温度和水汽浓度的变化有影响。



从图 2(a)中可看出:在微气候层中,涤纶的温度下降最快,羊毛的温度下降最慢;在织物层中,羊毛的温度下降最快,涤纶的温度下降最慢。从图 2(b)中可看出:在微气候层中,涤纶的水汽浓度下降最快,棉的水汽浓度下降最慢;在织物层中,棉的水汽浓度下降最快,涤纶的水汽浓度下降最慢。

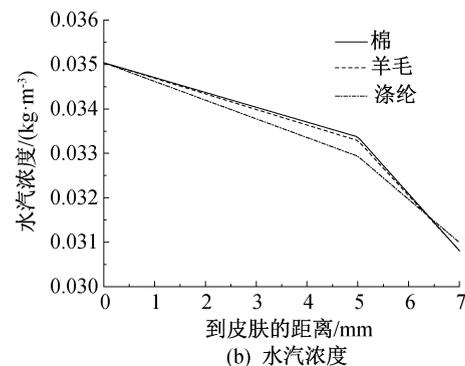


图 2 3 种织物的温度和水汽浓度分布图

2 孔隙率最优决定反问题

服装的热湿舒适性与其织物的热湿传递性能有

密切的关系,而孔隙率是影响织物热湿传递性能的一个主要因素。因此确定合适的孔隙率,使织物的热湿传递性能达到最佳是提高服装热湿舒适性的主

要方法之一。本文以织物的散热性和透湿性最佳为目标,提出了一个单层织物孔隙率最优决定反问题。

2.1 反问题的数学描述

在高温天气下,一般希望服装可以透过更多的热量和水汽,让人体产生的热量和汗液更快地扩散到外界环境中,使人体保持较舒适的温度和湿度。本文分别使用热阻和湿阻衡量织物的散热性和透湿性。热阻与湿阻可通过以下公式计算得到:

$$\begin{cases} I = \frac{T_S - T_E}{-k_{\text{Feff}} \frac{dT}{dx}}, \\ E = \frac{R_W(\omega_S T_S - \omega_E T_E)}{-D_{\text{Feff}} \frac{d\omega}{dx} \Delta H_{\text{vap}} \cdot 133.32} \end{cases} \quad (12)$$

其中: I 和 E 分别为热阻和湿阻; R_W 是水的气体常数,取 $461.52 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

热阻和湿阻的值越小,表明织物的散热性和透湿性越好,单位时间散发的热量和透过的水汽越多,越满足高温天气下对服装热湿舒适性的要求。以孔隙率为变量,以热阻最小和湿阻最小为目标,根据式(12)建立多目标优化问题:

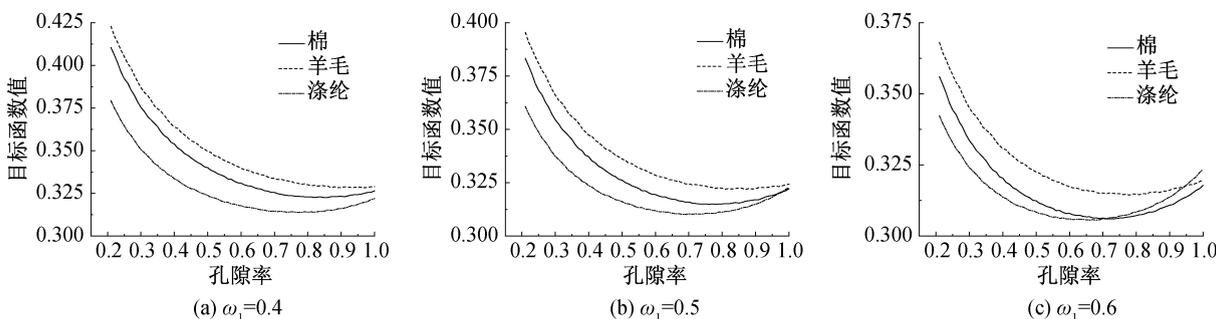


图3 3种织物对应的目标函数值随孔隙率变化的曲线

将式(14)作为BA算法和PSO算法的目标函数,外界环境及热湿传递模型中其他参数保持不变。计算 ω_1 取不同值时3种织物的最佳孔隙率,以及最

$$\begin{cases} \min I, \\ \min E \end{cases} \quad (13)$$

考虑到不同使用场景的服装对散热性和透湿性有不同需求,如运动时穿着的服装需要更好的透湿性,因此为热阻和湿阻设置不同的权重,将式(13)转化为单目标优化问题:

$$\min_{\epsilon} J(\epsilon) = \omega_1 I + \omega_2 E \quad (14)$$

其中: ω_1 和 ω_2 分别为热阻和湿阻的权重, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。目标函数 J 的值越小,表明织物的热湿传递性能越好。

2.2 反问题数值实验

为验证式(14)是否存在最优解以及计算结果的正确性,本文首先绘制目标函数 J 随孔隙率变化的曲线。在外界环境温度为 305 K 、水汽浓度为 $0.017 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的情况下,绘制 ω_1 取不同值时棉、羊毛和涤纶对应目标函数 J 随孔隙率变化的曲线,结果如图3所示。从图3可以看出,3种织物对应的目标函数 J 均随孔隙率增大呈现先减后增的趋势,存在最小值,说明通过式(14)可求得最优孔隙率,同时也表明本文所提的反问题是合理的。

佳孔隙率与图3中曲线最低点所在孔隙率之间的差值,并将3种织物的差值汇总,结果见表4。

表4 ω_1 取不同值时3种织物的最优孔隙率

算法名称	热阻权重 ω_1	最优孔隙率/%			孔隙率总差值/%
		棉	羊毛	涤纶	
BA 算法	0.4	84.94	98.83	77.11	2.78
	0.5	77.20	86.69	70.17	2.68
	0.6	71.68	79.40	64.14	4.58
PSO 算法	0.4	86.81	96.25	76.39	4.17
	0.5	74.57	88.66	70.84	4.93
	0.6	74.29	77.57	66.62	2.34

从表4中可以看出:BA算法和PSO算法计算得到的棉、羊毛和涤纶的最优孔隙率随热阻权重变

化的趋势与图3中的结果一致;BA算法计算得到的最优孔隙率总差值更小,表明使用BA算法求解

反问题的结果更准确。从图 3 和表 4 可以看出,随着热阻权重的增加,3 种织物的最优孔隙率逐渐减小。这表明在该热湿传递模型中,孔隙率减小有利于热量的散发,孔隙率增大有利于水气的扩散。这主要是因为织物中空气间隙和纤维的导热系数与水汽扩散速度不同,孔隙率的变化改变了织物层的平均导热系数和有效扩散系数。

3 结 论

本文为提高服装的热湿舒适性,以织物的散热性和透湿性最佳为目标,提出了高温天气下单层织物的孔隙率最优决定反问题,通过数值实验验证了反问题存在最优解,并计算出使织物散热透湿性能达到最佳的孔隙率。为提高计算效率,使用 BA 算法计算热湿传递模型的正问题和反问题,数值实验结果表明 BA 算法计算速度更快,计算结果更准确,可减少数值模拟所需时间。本文拓展了通过数值模拟研究服装热湿舒适性的内容,研究结果可为高温天气下服装的热湿舒适性优化设计提供一定的理论支持。

本文提出的反问题是以一个单层织物的稳态热湿传递模型为基础,后续可以推广到其他单层或多层织物的热湿传递模型。根据服装热湿舒适性要求,针对每层织物的性能特征参数和结构特征参数提出相应的单参数或多参数反问题,可以从理论上研究提出反问题的存在唯一性,以及数值求解的稳定性和收敛性等。

参考文献:

- [1] 孙继锋, 吴东利, 赵利端. 以人为本视域下服装舒适性的重要性及功能评价探究: 评《服装舒适性与功能》[J]. 毛纺科技, 2022, 50(3):135-136.
- [2] Wong A S W, Li Y, Yeung P K W. Predicting clothing sensory comfort with artificial intelligence hybrid models [J]. Textile Research Journal, 2004, 74(1):13-19.
- [3] 代玲静, 刘皓. 服装的热湿舒适性研究进展[J]. 西部皮革, 2023, 45(3):111-113.
- [4] 徐定华, 葛美宝, 陈瑞林. 基于服装舒适性的纺织材料设计反问题[J]. 应用数学与计算数学学报, 2012, 26(3):332-341.
- [5] Su Y, Li R, Song G W, et al. Modeling steam heat transfer in thermal protective clothing under hot steam exposure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120:818-829.
- [6] Shen H, An Y Y, Zhang H M, et al. 3D numerical investigation of the heat and flow transfer through cold protective clothing based on CFD [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 175:121305.
- [7] Huang Q J, Xing G Y, Yang F, et al. Modelling and experimental study on electrically heating garment to enhance personal thermal comfort[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 696(1): 012046.
- [8] Su Y, Tian M A, Li J, et al. Development of heat and moisture transfer model for predicting skin burn of firefighter in fire environments[J]. The Journal of the Textile Institute, 2022, 113(8):1658-1665.
- [9] 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, 2014:3-9.
- [10] Ge M B, Yu Y E, Xu D H. Textile porosity determination based on a nonlinear heat and moisture transfer model [J]. Applicable Analysis, 2017, 96(10):1681-1697.
- [11] Li T Y, Kabanikhin S, Nakamura G, et al. An inverse problem of triple-thickness parameters determination for thermal protective clothing with Stephan-Boltzmann interface conditions [J]. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems, 2020, 28(3): 411-424.
- [12] Wang Y R, Xu Y H, Xu D H, et al. Optimization of multilayer clothing assemblies for thermal comfort in cold climate [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 179:107586.
- [13] Min K, Son Y, Kim C, et al. Heat and moisture transfer from skin to environment through fabrics: A mathematical model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(25/26):5292-5304.
- [14] Xu D H, Cui P. Simultaneous determination of thickness, thermal conductivity and porosity in textile material design[J]. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems, 2016, 24(1):59-66.
- [15] Yang X S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm [C] // Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 65-74.