

基于 GA-BP 算法的着装时男性下体 热湿舒适性预测

程朋朋, 陈道玲

(闽江学院 a. 现代服装技术协同创新中心; b. 服装与艺术工程学院 福州 350108)

摘要: 为探究着装时男性下体热湿舒适性的影响因子,而这些因子之间又存在高度非线性的、复杂的关系,文章提出采用具有全局搜索寻优的遗传算法优化 BP 神经网络(即 GA-BP),分析男性下体热湿舒适性指标及建立 SVM 模型进行预测,并与灰色关联度法、线性回归分析、模糊数学及 BP 算法的预测结果作对比。结果表明:影响男性下体热湿舒适性的主要因素是内裤面料的成分及纤维含量、回潮率、保温率、传热系数及衣下空气层;所建立的模型具有较高的精确度和可操作性,可以有效地预测主观舒适性,较优于其他算法。

关键词: 热湿舒适性; 影响因素; GA-BP; 男性; 下体

中图分类号: TS941.17 文献标志码: A 文章编号: 1001-7003(2019)01-0038-07 引用页码: 011107

Heat-moisture comfort prediction of male lower body in dressing based on GA-BP algorithm

CHENG Pengpeng, CHEN Daoling

(a. Collaborative Innovation Center of Modern Clothing Technology; b. Clothing and Design Faculty, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to explore the influencing factors on the heat-moisture comfort of male lower body in dressing, whereas there is a highly nonlinear and complex relationship among these factors, genetic algorithm and BP neural network (GA-BP) with global optimization were adopted to analyze heat-moisture comfort indicators of male lower body and establish SVM model for prediction. Besides, the prediction result was compared with that of gray correlation method, Regression Analysis, Fuzzy mathematics and BP algorithm. The results showed that the main factors influencing the heat-moisture comfort of the male lower body were the composition of the underpants, the fiber content, the moisture regain, the heat preservation rate, the heat transfer coefficient and the air layer beneath the clothes. In addition, the established model with high accuracy and operability could effectively predict the subjective comfort, and it is better than other algorithms.

Key words: the heat-moisture comfort; influencing factors; GA-BP; male; lower body

热湿舒适性一直以来就是服装领域中的研究热点之一,热湿对于人体机能或健康而言,也是不可忽略的关键因素。高温高湿均不利于机体的热平衡,

如果不及时散热,高温易造成人体肌肉机能下降,导致疲劳感;湿度增高会阻止汗液蒸发,破坏热平衡。而热湿体现在服装中,两者是不可分割的,是共存的现象。即热湿舒适性的影响因子之间存在着微妙的关系,相互影响且成非线性关系。例如透湿的过程中也会带走一些热量,服装在导热的过程中也会带走一些蒸汽,故针对热湿舒适性的研究,就不能单地去研究热舒适性或者湿舒适性。针对这种现象,本文采用 GA-BP 算法对男性着装时的下体热湿舒适性进行系统研究。

收稿日期: 2018-03-29; 修回日期: 2018-11-19

基金项目: 福建省自然科学基金青年基金项目(2015J05105); 现代服装技术协同创新中心(闽江学院)开放基金资助(MJKFFZ201708); 福州市科技计划项目(2017-G-112); 福建省中青年教育科研项目(JAT170446)

作者简介: 程朋朋(1986—),男,实验师,主要从事服装人体工程、服装结构与数字化服装技术的研究。

应用于内衣或内衣用面料舒适性评价的算法各式各样,其中 BP 算法应用较广。孔令剑等^[1]通过灰色理论评价了麻织物的热湿舒适性,得出厚度和总紧度对织物透湿性能产生的影响是不同的;WANG 等^[2]采用线性回归分析对女性上衣进行了热舒适性的评价;王林玉等^[3]利用神经网络对服装的热湿舒适性进行预测;黄淑平等^[4]采用灰色关联度法将织物热湿舒适性的主、客观评价结果进行综合处理,未对选取特征指标进行优化,得出评价模型;王美丽^[5]尝试用神经网络中的反向传播学习算法神经网络(BP 神经网络)来预测运动胸衣的舒适性;景晓宁等^[6]通过 BP 神经网络对织物的热舒适性与湿舒适性分开单独预测,建立了新型再生纤维针织内衣面料的热、湿舒适性预测模型;陈香云等^[7]通过灰色理论分析织物的热湿舒适性能与纤维、纱线的性能及结构参数之间的关系,最终建立织物热湿舒适性指标的预测模型;王飞^[8]通过模糊数学对混纺针织面料内衣的热湿舒适性、接触舒适性和其他相关性指

标进行综合评判;崔丹丹^[9]用模糊数学综合评价方法分析了组织结构对混纺内裤服用性能的影响。

通过对上述算法关于研究服装热湿舒适性的总结发现,只局限于对面料或者仅穿内裤进行实验测试,没有对穿着状态下进行具体测试;灰色关联度法、模糊数学及 BP 算法等对于这种多因素耦合的研究结果准确性及适用性不高,存在一定的局限性。本文提出为优化测试数据及反映实验的真实性,通过设计新的实验方案,利用遗传算法优化 BP 神经网络来提高热湿舒适性研究的适应能力与预测准确度。其中,GA(Genetic Algorithm 遗传算法)算法有很强的全局搜索能力,BP(Back Propagation 反向传播算法)神经网络有很强的非线性模糊逼近能力,希望通过二者算法的结合评价热湿舒适性,得到较可靠且可信的结果。

1 实验

1.1 人员选取

挑选 5 名在校且体型相近的健康大学生(表 1)。

表 1 实验人员体型数据

Tab. 1 Body data of experimenters

序号	年龄/岁	身高/cm	胸围/cm	腰围/cm	臀围/cm	大腿围/cm	臀高/cm	腰臀高度差/cm	臀腹厚度/cm	臀部矢径比
1	23	177.0	93.5	85.0	110.0	54.0	89.5	22.0	32.0	1.47
2	24	176.0	88.0	79.0	109.0	55.5	88.0	21.0	31.0	1.50
3	24	173.0	85.0	82.5	107.0	48.0	86.0	22.5	31.0	1.45
4	25	172.0	88.0	85.0	106.0	44.0	89.0	23.0	33.0	1.45
5	25	178.0	90.0	82.0	105.0	48.0	85.0	21.0	35.0	1.42
平均值	24	175.2	88.9	82.7	107.4	49.9	87.5	21.9	32.4	1.46

1.2 环境及要求

1) 本次所有实验均在恒温恒湿的人工气候室进行,环境温度为(25±2)℃,相对湿度(65±5)%,风

速≤0.1 m/s。

2) 选取 50 件型号为 L 且款式相同,面料不同的男性内裤(图 1、表 2)。

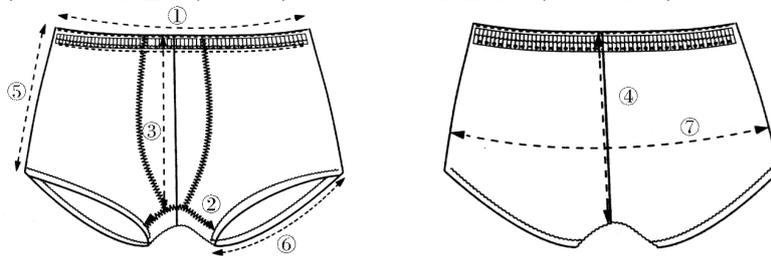


图 1 男性平角裤款式

Fig. 1 The style of male boxer underwear

表 2 平角裤内裤规格

Tab. 2 The size of male boxer underwear

序号	部位	尺寸/cm	序号	部位	尺寸/cm
①	腰围/2	34.0	⑤	侧缝长	25.0
②	裆宽	13.5	⑥	脚口/2	21.0
③	前中长	20.5	⑦	臀围/2	42.0
④	后中长	21.5			

3) 进行每个实验前,保证所有实验用内裤恢复原来状态且在人工气候室放置 24 h。

4) 测试人员在不被告知内裤面料的情况下随机挑选并依次试穿每条内裤进行实验。

5) 测量时测试者上半身裸露,每个环节均测量 3 次,且在下一次测量时都需先脱下再重新穿上后进

行测量。

1.3 内裤的热湿性能测试

1.3.1 仪器与设备

VITUS Smart 三维人体扫描仪(北京力泰友联科技有限公司),出汗热平板仪(美国西北测试技术公司),YG(B)606D 型平板式保温仪、YG(B)461D-II 型数字式织物透气量仪、YG(B)216-II 型织物透湿仪、YG(B)141D 型数字式织物厚度仪、Y(B)802G

型八篮恒温烘箱(温州市大荣纺织仪器有限公司)等相关仪器、设备。

1.3.2 性能测试

通过出汗热平板仪、YG(B)606D 型平板式保温仪、YG(B)461D-II 型数字式织物透气量仪、YG(B)216-II 型织物透湿仪等相关仪器对内裤面料进行了热湿舒适性能测试,见表 3(因数据较多,本文则随机选取 10 条内裤以作示例)。

表 3 内裤面料热湿指标

Tab.3 The heat-moisture comfort index of underwear fabric

内裤编号	成分	厚度/ mm	平方米质量/ ($g \cdot m^{-2}$)	纵密/ (线圈数· (5 cm^{-1}))	横密/ (线圈数· (5 cm^{-1}))	克罗 值/clo	回潮 率%	透气量/ ($L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	透湿 量/g	湿阻/ ($^{\circ}\text{C} \cdot m^2 \cdot W^{-1}$)	热阻/ ($^{\circ}\text{C} \cdot m^2 \cdot W^{-1}$)	保温 率/%	传热系数/ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
3 [#]	竹纤维/55% 棉/45%	0.320	104.600	56.000	42.000	0.275	7.709	2 087.200	2.522	3.033	0.056	28.763	26.529
7 [#]	棉/95% 氨纶/5%	0.730	168.500	97.000	59.000	0.355	4.051	1 331.000	2.475	3.430	0.214	30.868	18.143
13 [#]	棉/60% 竹纤维/40%	0.420	201.500	133.000	91.000	0.217	6.694	943.200	1.846	2.409	0.223	26.663	24.934
15 [#]	珍珠/33% 莫代尔/30% 大豆纤维/90%	0.380	193.000	110.000	82.000	0.308	7.176	2 238.600	2.071	1.917	0.143	18.529	19.337
20 [#]	氨纶/10%	0.550	174.800	100.000	63.500	0.235	3.533	1 249.000	2.669	3.985	0.150	22.808	22.968
22 [#]	棉/100% 棉/60%	0.520	121.200	44.500	30.500	0.381	4.041	1 351.400	2.670	3.589	0.221	31.410	18.803
27 [#]	莫代尔/33% 氨纶/7% 竹纤维/60%	0.480	165.700	91.000	72.000	0.347	7.889	798.400	1.957	3.655	0.179	23.235	25.672
28 [#]	棉/30% 氨纶/10%	0.690	152.600	130.000	88.000	0.156	7.557	962.100	2.669	1.876	0.077	19.264	29.388
32 [#]	莫代尔/81% 氨纶/19% 天丝/45%	0.720	173.100	73.000	60.000	0.125	6.351	1 426.300	1.464	3.205	0.205	33.171	16.890
46 [#]	棉/30% 莫代尔/25%	0.610	183.400	112.000	84.000	0.223	7.302	1 051.700	2.869	2.793	0.136	21.718	24.756

1.4 衣下空气层的确定

内裤作为紧贴人体的衣物而言,其与人体的空间可以忽略^[10-11],即空气层记为 0。本实验涉及穿着时的空气层,实际为内裤与裤子的空气层。利用 VITUS Smart 三维人体扫描仪分别对只穿内裤(裸露上半身)、着装(均穿着同一条号型为 175/86A 的纯棉休闲裤)的测试者进行扫描(图 2、表 4)然后通过逆向工程软件 Geomagic Qualify 对获取的只穿内裤和着装云数据进行优化,得出腰部至脚踝处的衣下空气层体积,即 $V_{\text{空气}} = V_{\text{着装}} - V_{\text{内裤}}$ 。其中, $V_{\text{空气}}$ 表示内裤与外穿裤子的空气层体积 cm^3 ; $V_{\text{着装}}$ 表示穿着外裤的人体体积 cm^3 ; $V_{\text{内裤}}$ 表示只穿内裤的人体体积 cm^3 。

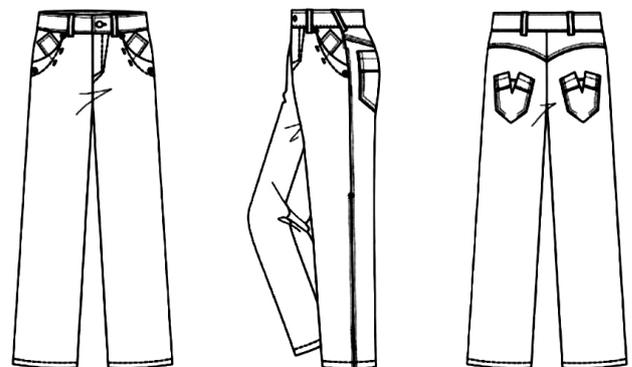


图 2 男性休闲裤款式

Fig.2 Style of male casual pants

表 4 男士休闲裤规格

Tab.4 Size of male casual pants

部位	尺寸/cm
腰围	90
裤长	102
臀围	108
脚口围	44
横裆	63
膝围	47

为了提高测试的准确性,要求 5 名测试者分别穿着所有的内裤进行扫描,衣下空气层体积为扫描 5 人后所获取数据的平均值,见表 5。

表 5 衣下空气体积

Tab.5 Under-garment air volume

内裤编号	空气体积/mm ³	内裤编号	空气体积/mm ³
3 [#]	9 914	22 [#]	9 833
7 [#]	11 625	27 [#]	9 714
13 [#]	13 471	28 [#]	12 879
15 [#]	14 098	32 [#]	13 382
20 [#]	13 563	46 [#]	10 320

1.5 主观舒适性评价

5 名测试人员分别在不同天的同一时间进入人工气候室,按照实验要求进行准备。整个测试过程为:准备(20 min,目的为适应测试环境)→静坐(15 min)→肢体活动(10 min)→休息(5 min)→跑步机上慢跑(5 min,速度控制在 4.6 km/h)→休息(15 min)。每个测试人员依次穿着所有实验用内裤,按照以上测试过程进行测试。同时,工作人员都要记录每个环节中测试者的主观舒适性评价,最后计算平均值,作为最终主观评价。

依照 ENISO 10551—2001《热环境人类工效学主观评价热环境影响》进行主观评价,见图 3 及表 6。

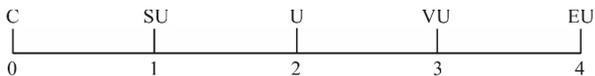


图 3 主观标尺

Fig.3 Subjective scale

表 6 穿着状态下的热湿舒适性主观评价

Tab.6 Subjective evaluation of the heat-moisture comfort in wearing state

内裤编号	主观评价	内裤编号	主观评价
3 [#]	1.5	22 [#]	0.6
7 [#]	1.6	27 [#]	1.8
13 [#]	1.2	28 [#]	1.1
15 [#]	1.2	32 [#]	0.9
20 [#]	0.8	46 [#]	1.3

2 GA-BP 分析热湿舒适性数据及建立模型

2.1 GA-BP 算法的模式设计

在 BP 神经网络的基础上,利用遗传算法(GA)优化 BP 算法的权值和阈值,提高 BP 算法的精度,最终建立 SVM 回归模型,其流程如图 4 所示。综合文献[14-9,12-20]研究,将织物的 13 个特征变量(成分及纤维含量、厚度、平方米质量、纵密、横密、克罗值、回潮率、透气量、透湿量、湿阻、热阻、保温率和传热系数)及衣下空气层体积作为人工神经网络的输入层。其中,文献[21-25]对衣下空气层体积影响热舒适性进行了实验性研究,表明其状态很大程度上决定了人体是否舒适;同时空气层也决定着服装内部的热湿传递过程,说明衣下空气层是研究人体热湿舒适性的关键因子,故本文也将衣下空气层体积作为输入值。

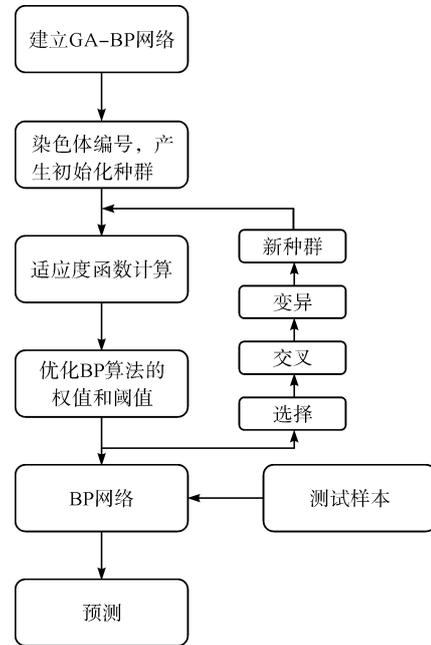


图 4 GA-BP 预测结构

Fig.4 Diagram of GA-BP predicted structure

隐含层为 $l = \sqrt{m+n} + a$,其中 m 为输入层变量个数(即输入层节点数或神经元数量), n 为输出层变量个数(即输出层节点数或神经元数量), a 为 1~10 的常数。根据一些研究显示^[3,12-13] 隐含层一般为 2~15,所以本次项目选取为 10。输出层为主观舒适性值,那么,此次的网络结构为 14-10-1。另外,设定本次训练最大次数为 1000,学习率为 0.1,最小学习误差为 0.0001。

将染色体长度设置为 14,染色体的每一位对应一个特征变量,每个染色体的基因用 1 或 0 表示,1 表示

该特征变量参与建模 0 表示该特征变量不参与建模。

2.2 适应度函数计算

将 10 个长度为 14 的染色体作为 GA 算法的初始种群,迭代次数为 100。将表 2、表 3、表 4 汇总为一个表格 L 作为 BP 的训练集,其所用的适应度函数:

$$F = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 (C'_i - C_i)^2} \quad (1)$$

式中: C'_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 表示 BP 算法的拟合值; C_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 表示热湿舒适性主观评价实际值。

由于输入层及输出层参数值的数量级不一致,故在训练前,要将数据归一化处理(除成分之外),将各参数值规范并介于 $[-1, 1]$:

$$Z = \frac{2 \times (X - X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} - 1 \quad (2)$$

式中: X 、 Z 分别为归一化前后变量, X_{\max} 、 X_{\min} 分别为 X 变量(将表 3、表 5、表 6 用 X_i 表示)中的最大值、最小值。

各参数规范后的值,见表 7。

表 7 规范后数据

Tab. 7 Post-specification data

内裤编号	厚度/mm	平方米质量/($g \cdot m^{-2}$)	纵密/(线圈数 $\cdot 5cm^{-1}$)	横密/(线圈数 $\cdot 5cm^{-1}$)	克罗值/clo	回潮率/%	透气量/($L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	透湿量/g	湿阻/($^{\circ}C \cdot m^2 \cdot W^{-1}$)	热阻/($^{\circ}C \cdot m^2 \cdot W^{-1}$)	保温率/%	传热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	衣下空气层体积/ mm^3	主观评价价值
3 [#]	-1.000 0	-1.000 0	-0.740 1	-0.619 8	0.171 9	0.917 4	0.789 8	0.505 4	0.097 2	-1.000 0	0.397 9	0.542 4	-0.908 8	0.500 0
7 [#]	1.000 0	0.318 9	0.186 4	-0.057 9	0.796 9	-0.761 5	-0.260 4	0.439 5	0.473 7	0.892 2	0.685 4	-0.800 0	-0.128 2	0.666 7
13 [#]	-0.512 2	1.000 0	1.000 0	1.000 0	-0.281 3	0.449 5	-0.798 9	-0.457 1	-0.494 5	1.000 0	0.111 1	0.286 4	0.714 0	0.000 0
15 [#]	-0.707 3	0.824 6	0.480 2	0.702 5	0.429 7	0.674 3	1.000 0	-0.135 9	-0.961 1	0.041 9	-1.000 0	-0.608 0	1.000 0	0.000 0
20 [#]	0.122 0	0.448 9	0.254 2	0.090 9	-0.140 6	-1.000 0	-0.374 3	0.715 1	1.000 0	0.125 7	-0.415 5	-0.027 2	0.755 9	-0.666 7
22 [#]	-0.024 4	-0.657 4	-1.000 0	-1.000 0	1.000 0	-0.766 1	-0.232 1	0.716 7	0.624 5	0.976 0	0.759 5	-0.694 4	-0.945 7	-1.000 0
27 [#]	-0.219 5	0.261 1	0.050 8	0.371 9	0.734 4	1.000 0	-1.000 0	-0.298 1	0.687 1	0.473 1	-0.357 2	0.404 8	-1.000 0	1.000 0
28 [#]	0.804 9	-0.009 3	0.932 2	0.900 8	-0.757 8	0.848 6	-0.772 7	0.715 7	-1.000 0	-0.748 5	-0.899 6	1.000 0	0.443 9	-0.166 7
32 [#]	0.951 2	0.413 8	-0.355 9	-0.024 8	-1.000 0	0.293 6	-0.128 0	-1.000 0	0.260 3	0.784 4	1.000 0	-1.000 0	0.673 4	-0.500 0
46 [#]	0.414 6	0.626 4	0.525 4	0.768 6	-0.234 4	0.729 4	-0.648 2	1.000 0	-0.130 4	-0.041 9	-0.564 4	0.259 2	-0.723 5	0.166 7

从表 7 数据中,通过 Matlab 软件随机选取 7[#]、15[#]、22[#]、28[#]、32[#] 作为检验样本,其余的 45 组数(包括未列举出的数据)据作为训练样本。

2.3 优化 BP 算法的权值和阈值

通过遗传算法对热湿舒适性指标进行优化,得出最能代表热湿舒适性评价因子为 $X = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$,即这些染色体编号所对应的指标分别为:成分及纤维含量、回潮率、保温率、传热系数和衣下空气层体积。同时,经过大量的研究表明^[4, 6-9, 14-18] 织物成分本身就是热湿舒适性的最关键因子,故可不进行筛选,成分及纤维含量可以直接作为输入因子。因此,成分及纤维含量、回潮率、保温率、传热系数及衣下空气层是影响男性下体主观评价热湿舒适性的主要指标。

3 建立 SVM 模型

将选取的训练样本构成 SVM 的训练集。用 x 表示输入层变量(成分及纤维含量、回潮率、保温率、传热系数、衣下空气层); y 表示输出层变量(主观评价价值)。由于特征变量及衣下空气层体积与主观热舒适性评价的关系呈非线性关系,所以通过一些函数的运算进行线性回归,即 $K(x_i, y_i) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(y_i)$,其中 x

$\in R^5$ 。最终构建的 SVM 回归模型^[26-28]为:

$$\begin{cases} f(x) = \sum_{i=1}^5 (\alpha_i - \beta_i) K(x, x_i) + m \\ K(x_i, x_j) = \exp \frac{|x_i - x_j|^2}{\sigma^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: α_i 、 β_i 均为 Lagrange 因子, m 为常数。

通过 SVM 回归模型公式(3)对新训练集中的主观评价价值进行拟合,拟合效果显著,均方误差 $mes = 8.967 7$,拟合优度值 $R^2 = 0.998 9$ 。为验证模型的效果,特将检验样本用来测试,预测值几乎接近主观评价价值,见图 5;同时,表 3、表 5、表 6 或表 7 数据按照文献[1-2, 4, 6-9, 12]中灰色理论、线性回归分析、模

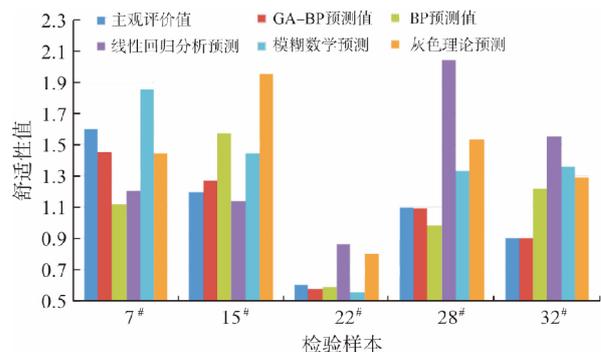


图 5 主观舒适性评价与各类算法预测值

Fig. 5 Subjective comfort evaluation and prediction value of various algorithms

糊数学及 BP 算法进行预测 ,与本文采取基于 GA-BP 算法的 SVM 预测进行对比 ,见表 8。

表 8 热湿舒适性值预测与精度分析

Tab.8 Prediction and accuracy analysis of heat-moisture comfort value

序号	主观评价价值	GA-BP 算法的 SVM 预测值	BP 预测值	线性回归分析预测	模糊数学预测	灰色理论预测
7 [#]	1.600 0	1.453 10	1.119 1	1.206 60	1.856 70	1.448 60
15 [#]	1.200 0	1.274 40	1.575 4	1.135 80	1.447 30	1.955 40
22 [#]	0.600 0	0.575 50	0.591 9	0.860 90	0.555 80	0.804 70
28 [#]	1.100 0	1.092 30	0.986 7	2.044 00	1.333 20	1.531 00
32 [#]	0.900 0	0.900 60	1.218 8	1.554 70	1.357 50	1.291 30
最大绝对误差		0.146 90	0.480 9	0.654 70	0.457 50	0.755 40
平均绝对误差		0.050 82	0.259 3	0.463 44	0.247 78	0.386 76

由图 5 和表 8 结果显示 ,基于 GA-BP 指标筛选的 SVM 模型在舒适性预测中误差较小 ,BP 神经网络、线性回归分析、模糊数学算法、灰色理论等预测值与主观评价价值的误差较大。造成这种现象的主要原因是这些算法容易陷入局部最优解或不能很好地解决影响因素之间的相关性及非线性 ,最终造成影响因素缺失或冗余造成预测值的偏离 ,而 GA-BP 算法能较好地处理各影响因子之间的相关性和线性问题 ,同时 GA-BP 的结合拥有较强的鲁棒性且可准确获取全局最优解。故结果表明 GA-BP 指标筛选的 SVM 对热湿舒适性的主观评价价值预测是合理可靠的。

4 结 论

1) 对于研究人体热湿舒适性的研究已有很多 ,但是由于各种原因存在一定的局限性 ,本文设计新的实验方案 ,进行预测。结果表明 ,在预测热舒适性指标方面 ,基于 GA-BP 神经网络性能要优于其他算法 ,具有更高的精度和适应能力 ,能够较好地满足将其应用于以织物物理指标预测主观舒适性 ,并筛选出影响男性下体主观评价热湿舒适性的主要指标。

2) 热湿舒适性影响因素较多且它们之间的关系是高度非线性的、复杂的关系 ,用普通的算法处理效果与主观评价存在一定的偏差。基于 GA-BP 算法建立的支持向量机模型能较好地处理这种关系 ,其模型的拟合与主观评价效果较为接近 ,SVM 预测热湿舒适性是合理可靠的 ,使其具有普遍性 ,以便得以推广。

参考文献:

[1]孔令剑,晏雄. 灰色理论在麻织物热湿舒适性研究中的应用[J]. 纺织学报, 2007 28(4): 41-44.
KONG Lingjian, YAN Xiong. Application of gray system theory in evaluation of thermal and moisture comfort of bast

fiber fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2007, 28 (4): 41-44.
[2]WANG Yunyi, PAN Jinhuan, LIU Suyan. Study on the relation between the air gap size under clothing and the comfort sensations [J]. Journal of Donghua University, 2006 (5): 101-107.
[3]王林玉,王厉冰. 神经网络在预测服装及面料舒适性方面的探讨[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2006, 21(1): 82-85, 91.
WANG Linyu, WANG Libing. Discussion about artificial neural network predicting clothing and fabrics comfort [J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2006 21(1): 82-85, 91.
[4]黄淑平,马崇启,周衡书. 竹原纤维织物热湿舒适性的灰色关联评价模型[J]. 纺织学报, 2009, 30(9): 33-36.
HUANG Shuping, MA Chongqi, ZHOU Hengshu. Model of thermal and moisture comfort evaluation of bamboo fiber fabric based on grey correlation degree [J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(9): 33-36.
[5]王美丽. 基于神经网络休闲运动胸衣舒适性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
WANG Meili. Study on Comfort of Leisure Sports Bra Based on Artificial Neural Network [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
[6]景晓宁,李亚滨. 织物热湿舒适性评价指标的灰色理论研究[J]. 国际纺织导报, 2011, 39(4): 70-72, 74-75.
JING Xiaoning, LI Yabin. Study on heat-moisture comfort evaluation index of fabrics with grey theory [J]. Mellianid China, 2011, 39(4): 70-72, 74-75.
[7]陈香云,班媛,吴薇. 灰色理论在织物热湿舒适性预测中的应用[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 150-154.
CHEN Xiangyun, BAN Yuan, WU Wei. Gray theory applied to forecasting comfortableness of fabrics against heat and moisture [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science), 2011, 30(2): 150-154.
[8]王飞. 内衣用 PTT 混纺针织面料的舒适性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
WANG Fei. Study on Comfort of PTT Blended Knitted Fabric for Underwear [D]. Suzhou: Soochow University, 2012.

- [9] 崔丹丹. 牛奶纤维混纺针织内裤面料开发及其舒适性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
CUI Dandan. Development and Comfort Properties of Milk Fiber Blended Knitted Underwear Fabric [D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [10] TORVI D A. Heat Transfer in Thin Fibrous Materials under High Heat Flux Conditions [D]. Edmonton: University of Alberta, 1997.
- [11] SONG Guowen. Clothing air gap layers and thermal protective performance in single layer garment [J]. Journal of Industrial Textiles, 2007, 36(3): 193-205.
- [12] 孔令剑, 晏雄. 织物透湿性能测试与 MATLAB 应用研究 [J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2005, 15(2): 84-87.
KONG Lingjian, YAN Xiong. Study on test of moisture permeability of fabric and application of MATLAB [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2005, 15(2): 84-87.
- [13] 景晓宁. 基于 BP 人工神经网络的新型面料热湿舒适性研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2010.
JING Xiaoning. Study on Thermal and Moisture Comfort of New Fabric Based on BP Artificial Neural Network [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2010.
- [14] 何春燕, 周永凯, 张华. 不同面料的男士内裤热湿舒适性研究 [J]. 天津纺织科技, 2013(1): 40-43, 49.
HE Chunyan, ZHOU Yongkai, ZHANG Hua. Study on thermal and moisture comfort of men's underwear with different fabrics [J]. Tianjin Textile Science & Technology, 2013(1): 40-43, 49.
- [15] 刘丽英, 刘林. 服装舒适性主观评价及主客观指标间的相关性研究 [J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2013, 28(3): 60-63, 68.
LIU Liying, LIU Lin. Subjective evaluation of clothing comfort and their correlation with laboratory test [J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2013, 28(3): 60-63, 68.
- [16] 李敏. 基于新型功能针织面料的舒适性评价及湿传递性能预测 [D]. 上海: 东华大学, 2010.
LI Min. Comfort Evaluation and Moisture Transfer Performance Prediction of Knitted Fabrics Based on New Function [D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [17] 柯宝珠. 新型运动面料的开发及织物主观热湿舒适性智能预测模型的建立 [D]. 上海: 东华大学, 2006.
KE Baozhu. Development of New Sports Fabrics and Establishment of Intelligent Prediction Model for Subjective Thermal and Moisture Comfort of Fabrics [D]. Shanghai: Donghua University, 2006.
- [18] 段杏元. 新型热湿舒适性内衣面料的开发及应用 [J]. 江苏纺织, 2008(3): 50-52.
DUAN Xingyuan. Development and application of new thermal and moisture comfort underwear fabric [J]. Jiangsu Textile, 2008(3): 50-52.
- [19] 孙菲菲, 李俊, 韩嘉琳. 基于织物物理性能的服装舒适感觉的评价与预测 [J]. 纺织学报, 2006, 27(11): 82-85.
SUN Feifei, LI Jun, HAN Jiashen. Evaluation and prediction of clothing comfort based on fabric physical properties [J]. Journal of Textile Research, 2006, 27(11): 82-85.
- [20] 张昭华, 翟世瑾, 尹思源. 衣下间隙对织物系统热湿阻的影响 [J]. 纺织学报, 2016, 37(6): 101-106, 111.
ZHANG Zhaohua, ZHAI Shijin, YIN Siyuan. Influence of air gaps on thermal and evaporative resistances of fabric system [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(6): 101-106, 111.
- [21] 苏云, 王云仪, 李俊. 消防服衣下空气层热传递机制研究进展 [J]. 纺织学报, 2016, 37(1): 167-172.
SU Yun, WANG Yunyi, LI Jun. Research progress of heat transfer mechanism of air gap under firefighter protective clothing [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(1): 167-172.
- [22] 张昭华, 王云仪, 李俊. 衣下空气层厚度对着装人体热传递的影响 [J]. 纺织学报, 2010, 31(12): 103-107.
ZHANG Zhaohua, WANG Yunyi, LI Jun. Effect of thickness of air layer under clothing on heat transmission of wearer [J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(12): 103-107.
- [23] 王敏, 李俊. 衣下空间作用机制与防护服舒适性 [J]. 中国个体防护装备, 2009(5): 18-21.
WANG Min, LI Jun. The effect mechanism of the space under clothes and the comfort of protective clothes [J]. China Personal Protective Equipment, 2009(5): 18-21.
- [24] 赖军, 张梦莹, 张华, 等. 消防服衣下空气层的作用与测定方法研究进展 [J]. 纺织学报, 2017, 38(6): 151-156.
LAI Jun, ZHANG Mengying, ZHANG Hua, et al. Research progress on air gap entrapped in firefighters' protective clothing and its measurement methods [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(6): 151-156.
- [25] 段杏元, 胡源盛. 男士针织内衣热性能的测量与分析 [J]. 纺织学报, 2016, 37(12): 92-96.
DUAN Xingyuan, HU Yuansheng. Measurement and analysis on thermal properties of men's knitted underwears [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(12): 92-96.
- [26] 孙斌, 蒋能飞. 人工神经网络在预测热舒适性指标中的应用 [J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(S1): 130-133.
SUN Bin, JIANG Nengfei. Application of thermal comfort index based on artificial neural network [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(S1): 130-133.
- [27] 管爱红, 张红梅, 杨铁军, 等. MATLAB 基础与应用教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
GUAN Aihong, ZHANG Hongmei, YANG Tiejun, et al. MATLAB Basics and Applications Tutorial [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [28] 许国根, 贾瑛. 模式识别与智能计算的 MATLAB 实现 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
XU Guogen, JIA Ying. MATLAB Implementation of Pattern Error and Intelligent Calculation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012.