

基于TS-SVR的飞行员服装耗能测试与评价方法研究



隋修武¹, 刘启俊¹, 戚晓玲², 杨国甫²

1. 天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387

2. 航空防护救生技术航空科技重点实验室, 湖北 襄阳 441002

摘要:不同特性的服装给飞行员带来不同的体能消耗,进而会影响飞行员的工作状态和工作效率,为了解决飞行服装耗能的测量和评价问题,本文提出了基于禁忌搜索算法(tabu search, TS)优化支持向量机回归(support vector machine regression, SVR)的服装耗能测量与评价方法。首先以模特机器人为核心,再现飞行员在行走与驾机工作模式,搭建了飞行服装耗能测试平台,为减少试验次数,设计正交试验,探讨了不同服装特性参数对耗能的影响,提出了服装耗能率的评价指标,建立了基于禁忌搜索算法改进SVR算法的服装耗能模型。试验结果表明,该模型对服装耗能的预测准确度达95.5%以上。

关键词:服装耗能;支持向量机回归;测试平台;等级评估;禁忌算法

中图分类号:V19

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.08.012

飞行员服装是飞行员进行飞行任务时最重要的防护装备之一,是确保任务有序进行而不受伤害的重要保障^[1]。在保障基本性能和舒适性的前提下,如何减少服装的耗能成为人们关注的热点问题^[2]。在工作时,飞行员需要时刻对服装做大量无用功,主要体现在克服服装的重力、克服服装的摩擦力、克服意外冲击振动等^[3]。这些大量的无用功增加了飞行员的体能消耗,从而极大地降低了工作效率。目前,对服装耗能的研究相对较少,对服装的研究大部分集中在面料和性能上^[4],而在飞行员服装耗能研究上,研究人员大部分从工作人员的主观感受出发,对服装进行尺寸大小等舒适性调节,虽然取得了一定的效果,但是没有考虑到不同服装对人体耗能的客观测量与评价,不能定量地确定服装种类和耗能之间的关系。

目前,对人体服装耗能的研究多集中在以下几种方法:行为观察法、问卷调查法、心率监测法、呼吸热量计测定法、双标记水法,以及采用各种机械或电子式的运动传感器。Meijer^[5]首先检测到心率数据,然后对数据进行回归分析,建立心率和服装能耗之间的线性关系。由于影响心率的因素很多,如情绪、温度等,很难保证试验条件的稳定。采用呼吸热量计测量人体能量的消耗,运用呼吸时气体的交换

进行人体能量消耗的估计,测定结果准确度较高,但是对试验条件要求苛刻,准备复杂,使用不便。Heyman^[6]提出人体运动加速度绝对值对时间的积分与人体运动的能量消耗之间具有良好的线性关系,但是加速度计在测量时存在一定的系统干扰,并且没考虑工作模式下的状况,特别是无法对人体各个部位的局部运动做出总体评价。

以上大多从生理学的角度进行耗能测量,测量过程较为复杂,依赖临床数据,针对上述问题,本文设计了基于模特机器人的服装耗能测试平台,根据模特机器人运动过程中着装前后消耗能量的差异,测量飞行服装在工作状态下的人体能量消耗^[7]。

本文首先设计了行走工况和驾机操作工况的模特机器人的机械结构与数据采集系统,搭建了服装耗能测试平台。提出了一种适用于不同种类、不同规格的飞行服装的耗能预测模型。首先将9种不同规格的服装穿在模特机器人上,模拟人的运动动作,采集模特机器人手臂的摆动速度与转矩,得到运动过程中的耗能值,最后将不同类型服装的参数作为输入,耗能值作为输出,得到禁忌搜索-支持向量机回归(tabu search- support vector machine regression, TS-SVR)数学模型。建立不同规格的服装参数和人体耗能之间的关系。

收稿日期: 2021-05-14; 退修日期: 2021-05-25; 录用日期: 2021-06-15

基金项目: 航空科学基金(201729Q2001)

引用格式: Sui Xiuyu, Liu Qijun, Qi Xiaoling, et al. Experimental study and prediction method of energy consumption of pilot clothing based on SVR[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(08): 73-78. 隋修武, 刘启俊, 戚晓玲, 等. 基于TS-SVR的飞行员服装耗能测试与评价方法研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(08): 73-78.

1 飞行服装耗能测试试验

1.1 飞行服装耗能测试平台

以模特机器人为核心,搭建飞行服装耗能测试平台,开展飞行员个体防护服装耗能测试。飞行员的常规工作模式分为上机前行走模式和驾机飞行模式。所建立的机器人耗能测试平台如图1所示。



(a) 驾机模式服装耗能测试平台



(b) 行走模式服装耗能测试平台

图1 服装耗能测试平台

Fig.1 Clothing energy consumption test platform

以驾机模式服装耗能测试平台为例,说明其工作原理。将机器人控制技术^[8-9]应用于模特机器人头颈部和上肢的运动控制,采用直流电机分别带动上肢前后摆动和头部左右转动,可以实现不同工作模式下上肢与头部的独立运动或组合运动。通过上位机进行运动参数设定,将控制指令传输给STM32微控制器,STM32输出相应的脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)波控制直流电机的转速,实现不同的工况控制。两个电机分别通过减速器带动传动机构,实现上臂的前后摆动和头部的左右摆动。机器人的动作指标主要有转速、转矩。模特机器人的输出功率 P 由转矩 T 和转速 n 得到,通过着装前后,模特机器人的输出能量差即可求得飞行服装的耗能,如式(1)所示:

$$W=(T_1 n_1 - T_0 n_0) t \quad (1)$$

式中: $T_1 n_1$, $T_0 n_0$ 分别为着装后和着装前的负载转矩; n_1 , n_0 分别为着装后和着装前的转速。采用转速转矩传感器,测量得到 T_1 , T_0 , n_1 , n_0 。通过式(1)即可计算出服装的耗能。

模特机器人的运动参数按飞行员实际工作工况设计,手

臂的摆动范围为前后摆角 $-60^\circ \sim 60^\circ$,摆动速度为 1.5 rad/s 。

选用基于ARM内核的STM32F103ZET6单片机作为下位机控制核心,上位机程序通过串口发送控制指令到单片机,单片机程序解析控制命令,根据命令向电机驱动器发送对应动作的PWM信号,驱动器驱动电机完成所需试验动作,上肢和颈部输出轴的转矩与转速信号,通过单片机上的A/D转换器得到对应数字信号,串口将转速扭矩信号发送至上位机,实现在上位机实时显示。通过相应的数据滤波与分析计算,即可实现模特机器人模拟人体运动时的耗能测量^[10]。测量系统结构图如图2所示。

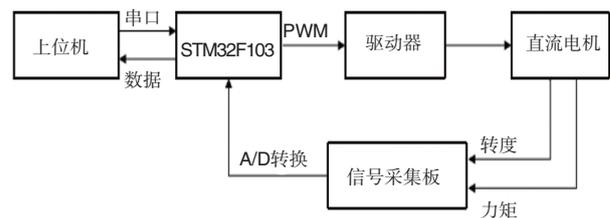


图2 测量系统结构图

Fig.2 Measurement system structure diagram

1.2 服装耗能测试试验

为验证测试平台的试验效果,准备三套典型的不同的服装,分别为棉、丝绸、皮革材料上衣,在驾机模式试验平台进行耗能试验。在试验过程中,根据机器人的输出转矩和转速,计算得到服装耗能数据。绘制功率曲线如图3所示。

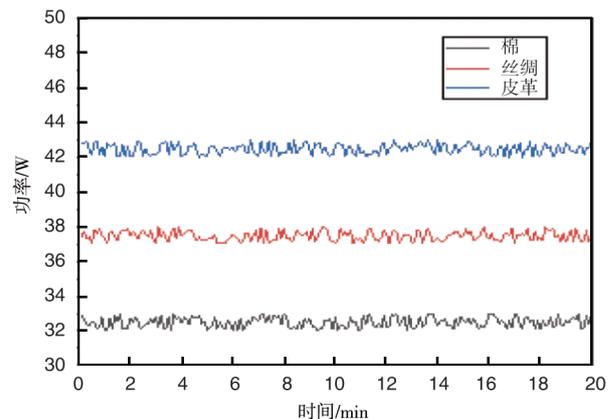


图3 功率曲线图

Fig.3 Power curve

结果表明,服装耗能瞬时功率会随着飞行员不同动作有所波动,耗能试验平台能够有效地区分不同材质服装的耗能功率。棉制服耗能功率最小,约为 32.17 W ,皮革制服消耗的功率最大,约为 42.15 W ,丝绸制服和棉制服装消耗

的功率相差不大。

由于瞬时耗能功率存在一定的波动,本文对20min工作状态下,以上三种服装的耗能进行了累计分析,如图4所示。结果表明随着时间的增加,三种服装的耗能值随时间变化线性增加,且差别逐渐明显,20min时,三种服装的耗能分别为38609.54J、45030.62J、50580.4J。

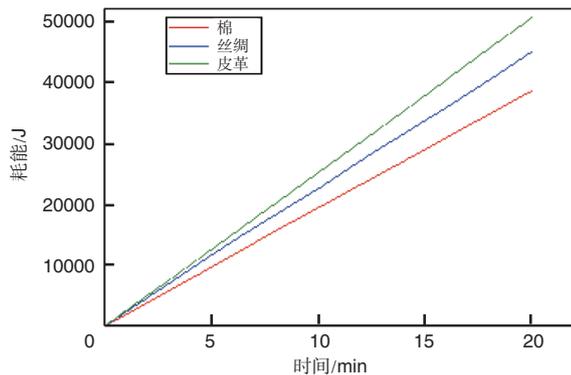


图4 耗能曲线图

Fig. 4 Energy consumption curve

1.3 服装耗能测试正交试验

影响服装耗能的参数很多,如服装的质量、面料、尺码、摩擦因数等,为了确定这些参数对耗能大小的影响情况,需要采用控制变时法,进行单变量的大量的测试试验。为了克服试验数量大、需要的服装种类多的难题,采用正交试验法进行服装耗能试验。

根据研究的需要,准备三套不同质量(1:大;2:中;3:小)、三套不同材质(1:棉;2:丝绸;3:皮革)、三套不同尺码(1:大;2:中;3:小)、三套不同摩擦因数(1:高;2:中;3:低)的服装进行测试试验。其中质量的范围为0.4~1.2kg,摩擦因数范围为0.05~0.3,将每个变量分为三个等级水平,按照正交试验法进行试验,共进行9组试验,减小了试验的复杂度。表1中分别用1~3代表不同因素的三个水平。

将三种不同材料的服装分别进行耗能试验,记录试验数据,对影响服装耗能的主要因素进行测试,进行1min测试的试验数据见表1。其中 k_j 为第 j 列同一水平出现的次数。 I_j 、 II_j 、 III_j 分别为第 j 列1、2、3水平所对应的试验指标的数值之和。

由表1的数据分析可知,在9组试验中,不同参数的服装对人体的耗能影响程度不同,可以通过极值对比进行分析,极差越大,则证明该因素在此条件下对服装耗能影响程度越明显。其中服装质量的耗能比其他因素的影响更高,极差 D_j 为0.89kJ,说明在此取值范围内,服装质量对服装耗

能的影响更为明显,尺码对服装耗能的影响最小,极差为0.13kJ。在进行服装设计时,应着重考虑服装质量的影响。

表1 不同服装正交试验耗能数据

Table 1 Energy consumption data of orthogonal experiment of different clothing

试验号	服装质量	材质	摩擦因数	尺码	功耗/kJ
1	1	1	1	1	2.08
2	1	2	2	2	2.68
3	1	3	3	3	3.18
4	2	1	2	3	2.96
5	2	2	3	1	3.04
6	2	3	1	2	3.12
7	3	1	3	2	3.28
8	3	2	1	3	3.36
9	3	3	2	1	3.98
I_j/k_j	2.65	2.77	2.85	3.03	
II_j/k_j	3.04	3.02	3.20	3.02	
III_j/k_j	3.54	3.42	3.16	3.16	
D_j	0.89	0.65	0.31	0.13	

2 基于TS-SVR的服装耗能模型

2.1 TS-SVR的基本原理

支持向量机(support vector machine, SVM)^[11]是建立在统计学习理论的VC维理论和结构最小原理基础上的,在解决小样本、非线性及高维模式识别中有许多特有的优势^[12],支持向量回归(SVR)是基于SVM的预测算法,其基本原理是将原始样本数据投射到高维的特征空间,再通过线性回归在高维空间中寻求最优的回归超平面,从而实现预测和数据分析的目的。

本文采用经核主成分分析(kernel principal component analysis, KPCA)降维^[13]后的特征值输入到经TS优化的SVR中进行服装耗能的预测^[14]。对于解决服装耗能的预测的问题,SVM回归的目标就是寻找回归函数的问题,回归函数 y 的计算公式为:

$$y = \sum_{i=1}^l \langle \omega_i, x_i \rangle + b \quad (2)$$

式中: ω_i 为权重矢量; b 为偏置量。因此,预测模型训练的实质是以偏差最小为目标的参数矩阵 ω 、 b 的求解过程。

针对非线性数据集的求解,引入不敏感损失函数 ε 和松弛变量 ξ 、 ξ^* ,将求解 ω 、 b 的问题转化为优化问题^[12],即:

$$\min \left\{ \frac{1}{2} |\omega|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \right\} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} y_i - \langle \omega \cdot x_i \rangle - b \leq \varepsilon + \xi_i & i = 1, 2, \dots, l \\ \langle \omega \cdot x_i \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* & i = 1, 2, \dots, l \\ \xi_i \geq 0 & i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (4)$$

式中: C 为惩罚因子, $C > 0$ 且为常数; ξ_i, ξ_i^* 为松弛因子。

拉格朗日乘子法是解决约束条件下求函数极值的理想方法。引入拉格朗日函数求解式(2), 可得到无约束优化问题, 即:

$$L = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^l \alpha_i (\xi_i + \varepsilon - y_i + w \cdot x + b) - \sum_{i=1}^l \alpha_i^* (\xi_i^* + \varepsilon - y_i + w \cdot x + b) - \sum_{i=1}^l (\theta_i - \theta_i^* \xi_i^*) \quad (5)$$

为求式(5)的极值, 对式(5)的 w, b 和 ξ 求偏导, 并令偏导为0, 可得:

$$\sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \quad (6)$$

$$w = \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) x_i \quad (7)$$

$$C = \alpha_i + \theta_i = \alpha_i + \theta_i^* \quad (8)$$

将式(6)~式(8)代入式(5), 可得优化目标为:

$$\max \{W(\alpha, \alpha^*)\} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) \cdot \langle x_i, x_j \rangle + \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i - \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) \quad (9)$$

引入核函数, 求解拉格朗日乘子。其核函数为:

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{|x - x_i|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

式中: $K(x, x_i)$ 为高斯径向基核函数; σ 为高斯径向基核函数参数; 最终可得到SVR的回归函数:

$$y = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x, x_i) + \bar{b} \quad (11)$$

式中: y 为预测结果的输出。

2.2 TS-SVR算法的改进

由于损失函数 ε 和松弛变量 ξ, ξ^* 是影响SVR回归效果的主要因素, 为了达到更好的回归预测效果, 本文选用禁忌搜索算法进行这两个参数的寻优, 提高模型回归的准确性和抗干扰能力。经过禁忌搜索优化的SVR, 在新的特征空间中回归更精确, 模型训练时间更短。算法优化的基本步骤为: (1) 首先根据试验得到耗能试验数据, 并初始化SVR的损失函数和松弛变量, 随机产生初始解 x , 置禁忌表为空。(2) 判断算法终止条件是否满足: 若是, 则结束算法并输出优化结果; 否则, 继续以下步骤。(3) 利用当前解的邻域函数产生其所有(或若干)邻域解, 并从中确定若干候选解。(4) 对候选解判断藐视准则是否满足: 若满足, 则用满足藐视准则的最佳状态 y 替代 x 成为新的当前解, 并用与 y 对应的禁忌对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象, 同时用 y 替换“best so far”状态, 然后转步骤(6); 否则, 继续以下步骤。(5) 判断候选解对应的各对象的禁忌属性, 选择候选解集中非禁忌对象对应的最佳状态为新的当前解, 同时用与之对应的禁忌

对象替换最早进入禁忌表的禁忌对象。(6) 判断算法终止条件是否满足: 若是, 则结束算法并输出优化结果; 否则, 转步骤(3)。(7) 将优化后的惩罚参数 C 与核函数参数写入SVR回归模型, 进行训练。TS-SVR算法流程如图5所示。

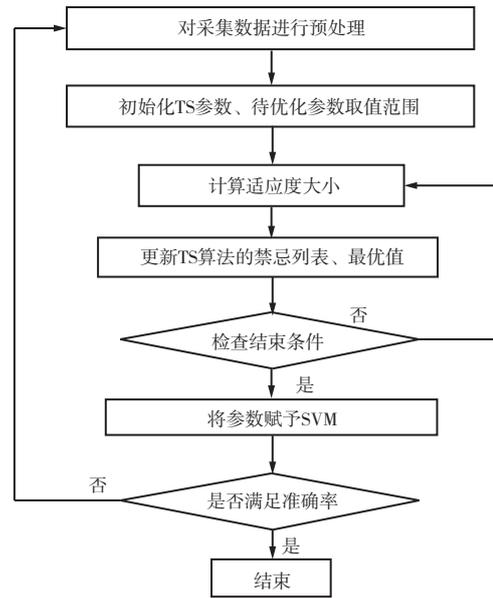


图5 TS-SVR算法流程图

Fig. 5 TS-SVR algorithm flow chart

2.3 基于TS-SVR的服装耗能模型

采用改进的支持向量机回归算法TS-SVR, 建立了服装耗能模型, 以服装的4个参数(质量、材质、摩擦因数、尺码)作为四维输入矢量, 以20min的服装耗能作为输出, 进行非线性回归。

为了验证TS-SVR模型的服装耗能模型的有效性, 以及进行模型分析效率的评估, 根据正交试验中影响服装耗能4种不同影响因素作为输入, 均取20min的服装耗能作为输出, 对不同特性的服装进行耗能回归分析, 将500组试验数据, 按照8:2进行训练集和测试集划分, 进行回归模型训练与测试。模拟预测耗能值与实际测量值对比, 观察拟合曲线的预测性能, 见表2。从表2可以看出, 预测精准

表2 回归预测结果与实际对比

Table 2 Comparison of regression prediction results and actual results

试验号	实际值	预测值	精确度/%
1	2.35	2.45	95.9
2	2.56	2.46	96.1
3	2.68	2.78	96.3
4	2.23	2.33	95.6
5	2.18	2.08	95.5

度平均达到95.5%以上,基于TS-SVR的服装耗能回归模型具有很好的回归预测性能。证明TS-SVR构建算法的可行性。

3 服装能耗率评估

由于服装质量是影响服装耗能的重要因素,众所周知,服装的质量越大,则相同工况下其能耗越大。为了分析服装的面料、款式、摩擦因数以及裁剪方式等对能耗的影响,本文提出单位质量的服装耗能率作为耗能的评价指标。

总结飞行员装备的耗能机理,提出耗能的表征方法,提出耗能率及耗能特征曲线等参数的指标评价方法。其中,耗能率即单位质量服装在单位时间内的耗能量,考虑到量纲的大小,选取的量纲为W/kg;耗能特征曲线即耗能率随工况(飞行员的运动状态)的变化曲线。

根据上述试验得到,耗能率的范围为0.8~4.8W/kg。根据服装耗能率,将耗能分为5个等级,分别对应等级Grade 1~5,以材质、尺码、摩擦因数为空间三坐标,用不同颜色标注服装耗能率,做出服装耗能率三维散点图,如图6所示。其中三个坐标轴对应的数值为影响因素的高低值。为便于分析,材质主要体现在弹性上,用弹性系数表示,范围为0.1~0.8,尺码的范围为1~3,摩擦因数的范围为0.2~0.6。

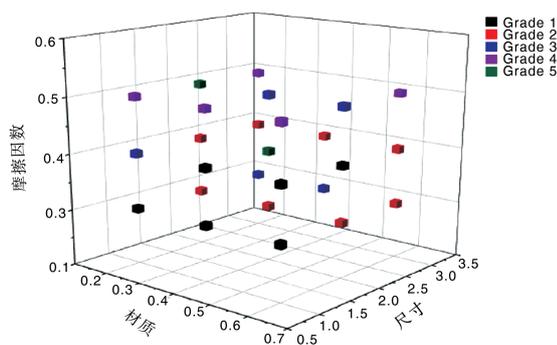


图6 服装耗能等级三维散点图

Fig. 6 Three-dimensional scatter diagram of clothing energy consumption grade

从图6可以看出,基于耗能率的服装耗能等级随着三个不同的影响因素的改变而变化。由左下的等级1的三个黑点可知,摩擦因数和尺码在取值固定不变时,服装材料取值的改变对服装耗能等级几乎没有影响。在摩擦因数取较大值时,服装耗能等级就会变大。因此可以根据上述试验结果,根据不同的服装耗能等级选择最佳的服装设计,为减小不同工况下工作人员的体能消耗提供了依据。

4 结论

通过研究,可以得到以下结论:

(1) 以模特机器人为核心,搭建的飞行服装耗能测试平台,可以完成飞行员个体防护服装耗能的定量测试。

(2) 基于TS-SVR的服装耗能预测算法可较好地预测服装的不同参数耗能大小的影响,预测准确率达95.2%,为飞行员装备耗能研究、功能性设计、质量评定提供指导和依据。

(3) 服装耗能率,即单位质量服装在单位时间内的耗能量,作为服装耗能的评价指标,可以在一定程度上为服装耗能等级划分提供依据。

AST

参考文献

- [1] Murray S L, Simon Y L, Sheng H. The effects of chemical protective suits on human performance[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(6SI): 774-779.
- [2] 张炯, 曾锐. 商用飞机单一飞行员驾驶模式设计及测试[J]. 航空科学技术, 2020, 31(6): 42-49.
Zhang Jiong, Zeng Rui. Design and test of single pilot driving mode of commercial aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(6): 42-49. (in Chinese)
- [3] Dorman L E, Havenith G. The effects of protective clothing on energy consumption during different activities[J]. European Journal of Applied Physiology, 2009, 105(3): 463-470.
- [4] 余瑶, 钱晓明. 服装材料性能测试与分析[J]. 先进材料研究, 2011, 6(3): 2447-2450.
Yu Yao, Qian Xiaoming. Performance test and analysis of clothing materials[J]. Advanced Materials Research, 2011, 6(3): 2447-2450. (in Chinese)
- [5] Meijer G A. Assessment of energy expenditure by recording heart rate and body acceleration[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1989, 7(2): 135-142.
- [6] Heyman M B. Prediction of total energy expenditure using caltrac activity monitor[J]. International Journal of Obesity, 1991, 3(3): 72-78.
- [7] Morgunov V L. Calorimeter energy calibration using the energy conservation law[J]. PRAMANA Journal of Physics, 2007, 69(6): 1097-1100.
- [8] 黄西广. 一种机器人仿真与控制技术[J]. 先进材料研究, 2011, 2(2): 53-58.
Huang Xiguang. A technology of robot simulation and control[J].

- Advanced Materials Research,2011,2(2):53-58.(in Chinese)
- [9] 贾新强,张松,黄飞飞.基于人在回路的直升机着舰控制律设计与仿真[J].航空科学技术,2021,32(1):53-59.
- Jia Xinqiang, Zhang Song, Huang Feifei.Design and simulation of helicopter landing control law based on man-in-loop [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32 (1) : 53-59. (in Chinese)
- [10] 黄光.基于STM32的串行通信研究[J].计算机科学进展,2017,8(3):191-193.
- Huang Guang. Research of serial communication based on STM32[J]. Advances in Computer Science Research, 2017, 8 (3):191-193.(in Chinese)
- [11] Wang H F, Hu D J. Comparison of SVM and LS-SVM for regression[J]. Pramana Journal of Physics, 2015, 3 (2) : 113-120.
- [12] 刘岳锋,李雅,段卓毅,等.基于支持向量机的飞机系统辨识方法研究[J].航空科学技术,2019,30(7):68-72.
- Liu Yuefeng, Li Ya, Duan Zhuoyi, et al. Research on aircraft system identification method based on support vector machine [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30 (7) : 68-72. (in Chinese)
- [13] Xu Y, Zhang D, Song F, A method for speeding up feature extraction based on KPCA[J]. Neuro Computing, 2007, 70 (4-6):1056-1061.
- [14] Paprocka I, Gwiazda A, Baczkowicz M. Robustness of schedules obtained using the tabu search algorithm based on the average slack method[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017, 2(2):426-434.

Experimental Study and Prediction Method of Energy Consumption of Pilot Clothing Based on SVR

Sui Xiuwu¹, Liu Qijun¹, Qi Xiaoling², Yang Guofu²

1. Tianjin Key Laboratory of Modern Electromechanical Equipment Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Life-Support Technology, Xiangyang 441002, China

Abstract: In order to solve the problem of energy consumption caused by different characteristics of pilot clothing, an identification method of human body energy consumption suitable for different types of pilot clothing was proposed. Firstly, the model robot was designed to reproduce the motion state by simulating the human body in the working mode, and the protective energy consumption test platform was built. In order to explore the influence of different characteristics of clothing on the energy consumption of equipment system, orthogonal experiments were carried out on the model robot experimental platform, and a prediction model of clothing energy consumption based on Support Vector machine Regression (SVR) was proposed. The experimental results show that the model based on SVR can well predict the relationship between different characteristics of clothing and physical consumption, and can accurately evaluate the clothing grade of different characteristics of clothing.

Key Words: clothing energy consumption; support vector machine regression; test platform; rating evaluation; prediction

Received: 2021-05-14; Revised: 2021-05-25; Accepted: 2021-06-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(201729Q2001)