

基于 ISSA-BP 的带电作业绝缘手套舒适性 评估研究^{*}

徐 勇¹ 吴远旭² 姚少广² 何小兵² 章基辉² 吴 田³ 吴 晨³

(1. 国网金华供电公司 金华 321017; 2. 金华送变电工程有限公司三为金东电力分公司 金华 321015;
3. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002)

摘 要: 针对配网带电作业绝缘手套舒适性缺少客观和量化评估方法的问题,提出了一种基于改进麻雀算法(improved sparrow search algorithm,ISSA)优化 BP 神经网络的舒适性评估方法。针对配网带电作业常用的绝缘手套,选取了 3 种类型绝缘手套作为评估对象,搭建了人体上肢表面肌电(sEMG)信号测试平台,采集了典型作业工况下被试者穿戴绝缘手套后右臂肱二头肌的 sEMG 信号,通过 ISSA 对变分模态分解(VMD)和 BP 的关键参数进行优化,构建了基于 ISSA-BP 的带电作业用绝缘手套舒适性评估模型。结果表明,ISSA 较 SSA 有效提升了 BP 预测准确率和 VMD 效果,被试者穿戴不同绝缘手套时 sEMG 特征参数和舒适度差异显著,舒适性评估模型其准确率达到 94.9%,所提出的舒适性量化评估方法为配网绝缘手套的改进以及人员防护提供了依据。

关键词: 带电作业;绝缘手套;表面肌电信号;麻雀搜索算法;变分模态分解

中图分类号: TM84;TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Research on comfortability evaluation of insulating gloves for live work based on ISSA-BP

Xu Yong¹ Wu Yuanxu² Yao Shaoguang² He Xiaopang² Zhang Jihui² Wu Tian³ Wu Chen³

(1. State Grid Jinhua Power Supply Company, Jinhua 321017, China; 2. Jinhua Power Transmission and Transformation Engineering Co. Ltd. Sanwei Jindong Electric Power Branch Company, Jinhua 321015, China; 3. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The work aims to solve the problem that there is no objective and quantitative evaluation method for the comfortability of insulating gloves used in live workings of distribution network,a comfortability evaluation method based on improved sparrow search algorithm(ISSA)optimized BP are proposed. Aiming at the insulation gloves commonly used in live work,three types of insulation gloves were selected as the evaluation objects,and a human upper limb sEMG signal testing platform was built. By collecting the surface electromyography(sEMG) signal of the right biceps brachii after the subjects wear insulating gloves under typical working conditions. ISSA is adopted to optimize the BP and variational mode decomposition(VMD) key parameters,and the comfortability evaluation model of insulating gloves for live workings based on ISSA-BP. Compared with SSA,ISSA effectively improve BP prediction accuracy and VMD effect. sEMG characteristic parameters and comfortability degree of subjects wearing different insulation gloves are significantly different,and the accuracy of comfortability evaluation model reached 94.9%. The quantitative evaluation method of comfort proposed in this paper provides a basis for the improvement of network insulation gloves and personnel protection.

Keywords: live working; insulating gloves; surface electromyography; sparrow search algorithm; variational mode decomposition

收稿日期:2024-09-13

^{*} 基金项目:国网浙江省电力有限公司集体企业科技项目、国家自然科学基金(51807110)项目资助

0 引言

随着我国城市化水平的提高,相对于配网自动化而言,带电作业是一种高效和经济的提高供电可靠性的技术手段^[1-2]。绝缘手套作为配网带电作业中高频使用的防护用具,其选材和结构设计对使用的舒适性具有重要影响^[3],设计不良的绝缘手套会使作业人员上肢肌肉更易进入疲劳状态,长期甚至会诱发相关骨骼肌肉类疾病^[4-5]。随着我国对电力安全和劳动保护的重视,如何量化评估绝缘手套舒适性势必成为配网带电作业不可忽略的一个方面。

舒适性是一个涉及人体生理特性和外界环境因素的复杂问题^[6]。目前,国内外针对舒适性的主要研究手段有主观评价法^[7]和表面肌电(surface electromyography, sEMG)法^[8]。主观评价法是一种被试者自主判断舒适性的方法,受个体差异影响较大^[9]。sEMG法是一种客观评估不同环境下人体舒适度的方法,具有无创性、便携性等特点,但sEMG是一种非线性的弱生理电气信号,易受到多种噪声的干扰。因此,对sEMG信号进行降噪是有必要的。现有研究主要使用数字去噪法,常用小波^[10]和改进的集成经验模态分解(modified ensemble empirical mode decomposition, MEEMD)^[11-12]等。小波是一种基于傅里叶分析发展而来的分析方法,计算速度快,但基函数选取困难。MEEMD有效解决了模态混叠,但该方法降噪效果受白噪声的数目影响。变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)是一种有效处理非线性信号的分解方法^[13],但VMD的关键参数主要凭借经验进行设置,在实际应用中存在一定的局限性^[14-16]。因此,有必要研究针对自适应分解sEMG信号的VMD关键参数设置方法。

BP神经网络作为一种有效识别肌肉状态及预测舒适性的方法,但其准确率受权值和阈值的影响^[17]。现有研究主要使用遗传算法^[18](genetic algorithm, GA)、粒子群算法^[19](particle swarm optimization, PSO)和麻雀算法^[20](sparrow search algorithm, SSA)等进行优化。GA和PSO作为传统的寻优算法,前者易出现局部最优解且耗时较长,后者不易得到精确解。SSA作为一种由麻雀觅食过程和反捕食过程演变而来的算法,较GA和PSO有着较强的全局寻优能力和局部搜索能力,但存在初始种群分布不均匀和速度慢的问题^[21-22]。

针对以上问题,本文通过采集4名男性被试者穿戴3种绝缘手套右臂肱二头肌sEMG信号,引入立方混沌映射和自适应权重优化SSA形成改进麻雀算法(improved sparrow search algorithm, ISSA),分别寻找VMD和BP的最优参数,避免经验设置参数的局限性,利用ISSA-VMD对sEMG信号进行分解,并结合排列熵筛选重构;选取均方根值(root mean square, RMS)和中值频率(median frequency, MF)作为特征参数,构建了基于ISSA-BP

的带电作业用绝缘手套类工器具舒适性评估模型,并对3种绝缘手套在典型作业工况下舒适性进行了评估,为带电作业绝缘手套改进提供参考。

1 基于ISSA-BP的绝缘手套舒适性评估方法

1.1 ISSA

针对BP和VMD的关键参数经验设置的问题,本文引入立方混沌映射和自适应权重对SSA进行优化后形成ISSA,分别对BP和VMD的参数进行优化。ISSA算法优化流程如图1所示,具体步骤如下。

1)根据立方混沌映射产生序列 y_i ,将立方序列映射到麻雀以改善种群分布。

$$\begin{cases} y_{i+1} = 4y_i^3 - 3y_i \\ y_i \in (-1, 1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_i = b_{\min} + 0.5 \cdot (b_{\max} - b_{\min}) \cdot (y_i + 1) \\ X_i \in (b_{\min}, b_{\max}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_i 为立方序列; $i=1, 2, \dots, N, y_0 \neq 0, X_i$ 为种群数; b_{\min} 和 b_{\max} 分别为搜索空间的下限和上限。

2)引入自适应权重,将发现者位置更新为:

$$X_i^{n+1} = \begin{cases} X_i^n + \cos\left(\frac{\pi n}{2T_{\max}}\right) \cdot \gamma_1 \cdot (X_i^n - X_{\text{best}}^n), \\ R_2 < ST \\ X_i^n + \gamma_2 \times L, \quad R_2 \geq ST \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_i^n 为第 n 代的第 i 个麻雀的位置; n 为当前迭代次数; T_{\max} 为最大迭代次数; γ_1 和 γ_2 分别为(0,1)的随机数和服从正态分布的随机数; C_g 为全局最佳适应度; L 为一行多维的全1矩阵; R_2 为一个[0,1]的警戒值; ST 为一个[0.5,1]的安全阈值。当 $R_2 < ST$ 时发现者继续在原地进行搜索食物,引导种群得到更好的适应度;当 $R_2 \geq ST$ 时发现者需立即向安全区域靠拢,防止捕食者的出现。

3)在觅食过程中,如果发现者找到更优的食物源,加入者会立即前往,其位置更新为:

$$X_i^{n+1} = \begin{cases} \beta_2 \times \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^n - X_i^n}{i^2}\right), & i > \frac{N}{2} \\ X_{\text{best}}^n + |X_i^n - X_{\text{best}}^n| \times L \times A^+, & i \leq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: N 为种群数目; X_{best}^n 和 X_{worst}^n 分别为麻雀个体最优和最差的位置。当 $i > N/2$ 时,第 i 个加入者将离开原觅食地,向其他的食物产地进行转移。当 $i \leq N/2$ 时,第 i 个加入者在原地进行觅食。

4)在觅食过程中出现危险时,预警者离开原地向其余安全的食物源或向其余麻雀靠近,其位置更新为:

$$X_i^{n+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^n + \gamma_3 \times |X_i^n - X_{\text{best}}^n|, & C_i < C_g \\ X_i^n + \gamma_4 \times \left(\frac{X_i^n - X_{\text{best}}^n}{(C_i - C_w) + \epsilon}\right), & C_i \geq C_g \end{cases} \quad (5)$$

式中： γ_3 和 γ_4 分别为服从正态分布的随机数和 $[-1,1]$ 的随机数； $\epsilon = 10^{-50}$ ； C_i 为当前麻雀个体的适应度； C_w 为全局最差适应度。

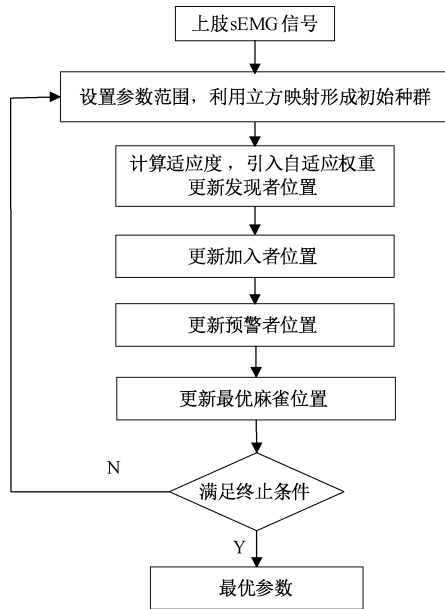


图1 ISSA 流程

Fig. 1 The flow chart of ISSA

1.2 适应度函数

对 VMD 和 BP 进行参数寻优关键在于适应度函数，本文将 VMD 的适应度函数^[15]定义为 C ，其数值越小代表 VMD 寻优效果越好。以准确率作为 BP 参数寻优的适应度函数，评估准确率越高代表 BP 参数寻优效果越好。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N |x - VMF_i|}{\sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2} \quad (6)$$

$$H_i = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \quad (7)$$

式中： x 为原始信号； H 为分解信号 VMF 的信息熵； N 为分解个数； n 为各 VMF 分成的段数； P 为幅值在 i 段的概率。

1.3 特征提取

目前 sEMG 信号特征的提取常用时域、频域特征。时域特征具有计算速度快、易提取等优点，频域特征具有良好的稳定性。由于使用多特征参数进行预测效果更佳^[23]，本文选取时域特征 RMS 和频域特征 MF 组合进行预测，表达式如下：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (8)$$

式中： x_i 为 sEMG 信号采样值； N 为信号段段长。

将时域信号转换为频域信号后，根据频域信号的功率谱或频谱分析肌肉的疲劳程度。同时，按被试者主观感受

将 sEMG 信号数据划分为非疲劳态和疲劳态状态。频域指标 MF 在一定程度上能反映肌肉的疲劳程度，可用于评估绝缘手套舒适性，表达式如下：

$$MF = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} f PSD(f) df \quad (9)$$

式中： f 为 sEMG 信号的频率； $PSD(f)$ 为表面肌电信号的功率谱密度函数。

1.4 基于 ISSA-BP 的绝缘手套舒适性评估模型

针对配网带电作业绝缘手套舒适性缺少客观和量化评估方法的问题，本文提出了基于 ISSA-BP 的绝缘手套舒适性评估模型，并结合绝缘手套类工具试验对 3 种带电作业绝缘手套在典型使用工况下的舒适性进行评估，带电作业绝缘手套舒适性评估流程如图 2 所示，具体步骤如下。

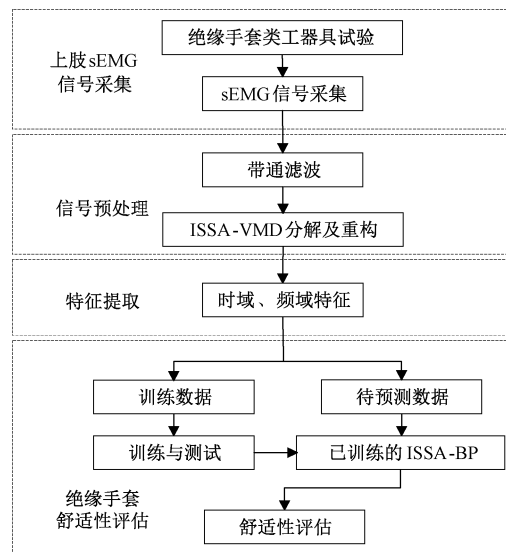


图2 舒适性评估流程

Fig. 2 Flowchart of comfort assessment

1) 在典型作业工况下采集被试者穿戴 3 种绝缘手套后右臂肱二头肌的 sEMG 信号，并对采集的信号进行带通滤波预处理。

2) 对处理后信号进行 ISSA-VMD 分解，并结合排列熵对 VMF 分量进行筛选重构。

3) 对重构信号进行特征提取，按比例(8:2)分成训练组和预测组。以训练组对 ISSA-BP 进行训练和测试，得到已训练的绝缘手套舒适性评估模型。

4) 以预测组进行多次肌肉疲劳预测，并求取平均值，并按绝缘手套舒适性指标进行评估。

由于试验人员身体素质存在差异，其肌肉进入疲劳状态的时间不同。为了消除个体差异，客观评估绝缘手套的舒适性，绝缘手套舒适性^[7]定义为：

$$W = \frac{M - M_1}{M_2 - M_1} \quad (10)$$

式中： M 为被试人员使用绝缘手套时进入疲劳状态的时间； M_1 、 M_2 分别为被试人员使用绝缘手套时进入疲劳状

态的最小时间和最大时间。

2 试验对象、装置及方法

2.1 试验对象及装置

由于配网带电作业的从业人员主要为男性,因而

试验选取了4名上肢肌肉及关节无相关疾病的健康男性作为试验对象,具体信息如表1所示。上肢sEMG信号的采集装置为美国iWorx公司的IX-BIO8八通道电生理数据采集仪,试验数据的显示和导出采用LabScribe软件。

表1 试验对象基本信息

Table 1 Basic information of testing participants

被试者	年龄 /岁	身高 /cm	体重 /kg	性别	手掌尺寸 /cm	臂展 /cm	上臂放松围 /cm	上臂紧张围 /cm	惯用手	BMI 指数
I	23	176	60	男	23.87	168	27	30	右手	19.4
II	24	169	70	男	24.16	171	31	33	右手	24.5
III	25	168	68	男	23.07	165	26	28	右手	24.1
IV	23	172	63	男	23.45	167	26	28	右手	21.3

2.2 试验方法

为了评估不同材质和结构的绝缘手套的使用舒适性,试验选取了目前市场上普遍使用的3种绝缘手套(A~C),绝缘手套样品如图3所示,手套的具体参数如表2所示。



图3 绝缘手套样品

Fig. 3 Insulating glove samples

表2 绝缘手套的具体参数

Table 2 Specific parameters of insulation gloves

手套参数	A	B	C
长度/cm	41	45.5	35.6
最大使用电压/kV	17	17	17
材质	乳胶	橡胶	橡胶

试验前的准备工作如下:1)对被试者采集处的皮肤进行脱毛、清洗、酒精消毒等预处理;2)被试者进行5 min热身运动;3)在被试人员右臂肱二头肌的肌腹部分最隆起处贴上间距为2 cm的电极,参考电极置于两电极中心线距离两电极5 cm处;4)利用绷带对线圈和导联线进行固定。

为了对比和测试3种绝缘手套的sEMG信号和舒适性,首先,被试者分别穿戴3种绝缘手套,手持相同的绝缘操作杆在操作杆前方画圆,使用软件采集被试者右臂肱二头肌的sEMG信号,并用摄像机录像;其次,消除前期和后期不稳定的sEMG信号,并根据EMGFT流程计算出疲劳点P;然后,将疲劳点P前的数据作为肌肉非疲劳

状态的数据,疲劳点P后的数据作为疲劳状态的数据;最后,为避免试验偶然性,被试者休息15 min后按照规定动作进行多次试验,并对数据进行滑动窗1 s和增量0.5 s进行滑动。EMGFT计算流程如图4所示。

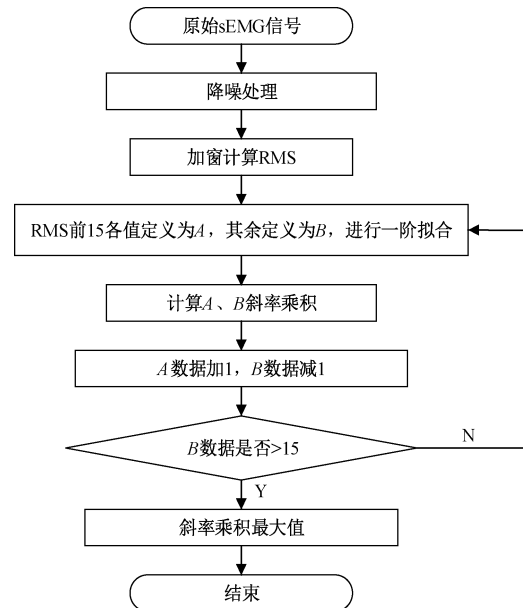


图4 EMGFT计算流程

Fig. 4 EMGFT calculation flowchart

3 结果与分析

3.1 基于ISSA优化的VMD分解

为了验证ISSA-VMD算法对sEMG信号分解的优越性,选取被试者IV穿戴A型手套时采集的sEMG信号作为测试信号,先后使用5~500 Hz的带通滤波和优化VMD对信号进行处理,分解后提取的多个具有不同尺度特征的子信号如图5所示。各方法种群规模设置为50,迭代次数为50, K寻优范围为[100, 2 000], α 寻优范围为[1, 10];ISSA和SSA的安全阈值为0.8,发现者和预警者

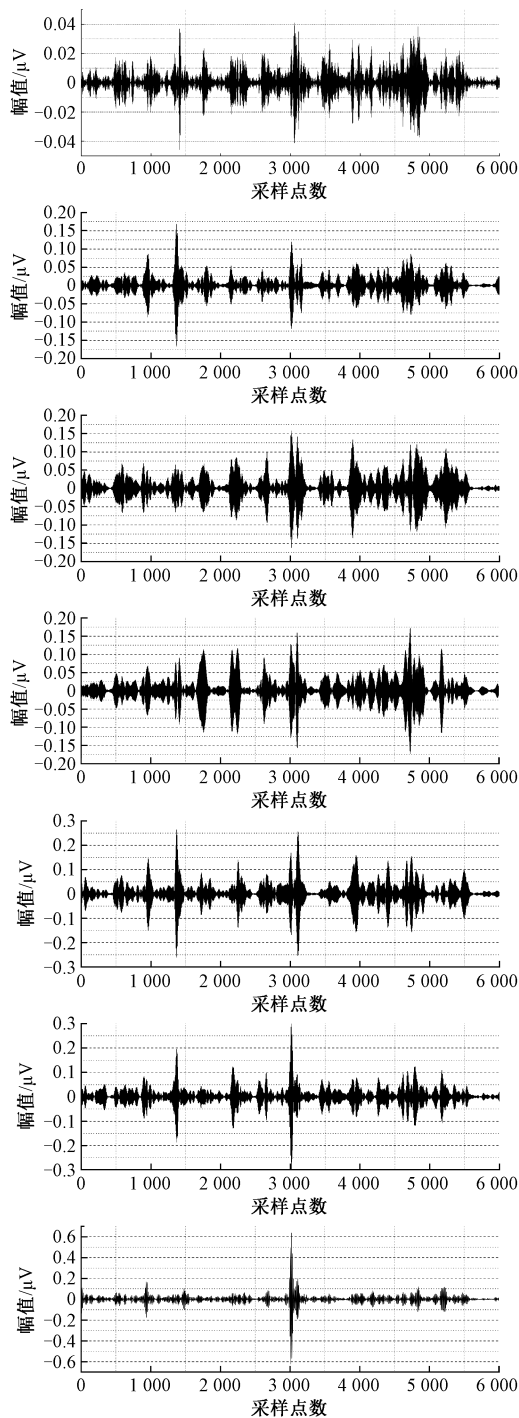


图5 VMD分解的子信号

Fig. 5 Sub-signals of the VMD decomposition

为10;GA交叉和变异概率分别为0.8和0.1;PSO的学习因子 C_1 和 C_2 设置为1.5,开始和结束的惯性权重分别设置为0.9和0.4;各方法适应值变化曲线如图6所示。

由图6可知,GA最优 C 值在迭代12次后稳定于33.0,PSO最优 C 值在迭代15次稳定于34.75,SSA和ISSA最优 C 值分别在迭代9次和4次稳定于14.96。对

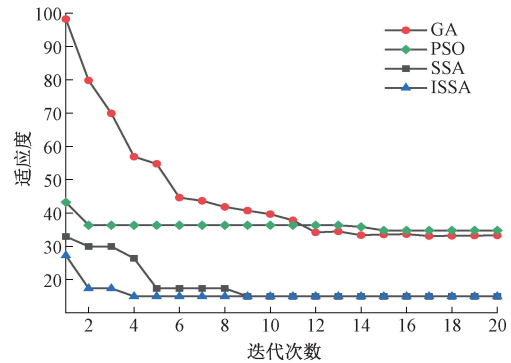


图6 不同寻优算法的适应度值变化曲线

Fig. 6 Fitness value change curve of different algorithms

比不同寻优算法的适应度值和迭代次数可知:GA较其他算法而言收敛速度最慢且最优 C 值最大,可能是由于在进化前期适应度较好的个体控制了选择过程,导致GA陷入局部最优解。SSA在搜索前期能较快搜索整个区间,有着更高的搜索效率,在搜索能力和收敛速度上优于GA和PSO。与SSA对比,ISSA不仅收敛速度更快,而且搜索能力更佳。以上述测试信号为例,对分解后的VMF分量计算排列熵值(表3),设置排列熵嵌入维数 $m=6$,延迟时间 $t=1$ 。然后,选取小于0.6的VMF分量进行重构,原始信号与重构信号如图7所示。

表3 VMF分量的排列熵

Table 3 The permutation entropy of VMF components

VMF分量	VMF ₁	VMF ₂	VMF ₃	IMF ₄
排列熵	0.4317	0.5351	0.5876	0.6528
VMF分量	VMF ₅	VMF ₆	VMF ₇	
排列熵	0.6559	0.7196	0.6072	

3.2 特征提取及舒适性评估结果

为了验证所选特征参数对肌肉状态变化的敏感程度,以被试者I使用3种绝缘手套(A~C)的sEMG数据为例,将数据划分为10个时段,对第1和第10时段的特征参数进行t检验(比较特征前后差异是否显著),结果如表4和5所示,特征参数变化趋势如图8所示。

由图8可知,RMS随着肌力和疲劳程度的增加而增加,但MF随着肌力和疲劳程度的增加而降低。因为在带电作业过程中作业人员需频繁使用肌肉对工器具进行控制来完成作业任务;随着作业时长的增加,肌肉中大量的肌纤维参与收缩产生更大的力量用于维持同一动作,当肌纤维募集程度不断增加,肌肉运动单元的同步化程度和放电频率增加,从而导致RMS值不断升高;而由于在代谢性酸化作用下,肌肉细胞中 H^+ 浓度不断增加,肌纤维动作电位的传导速率下降,导致动作电位波形改变,从而导致MF值下降。同时,由表4和5可知,作业人员使用手套

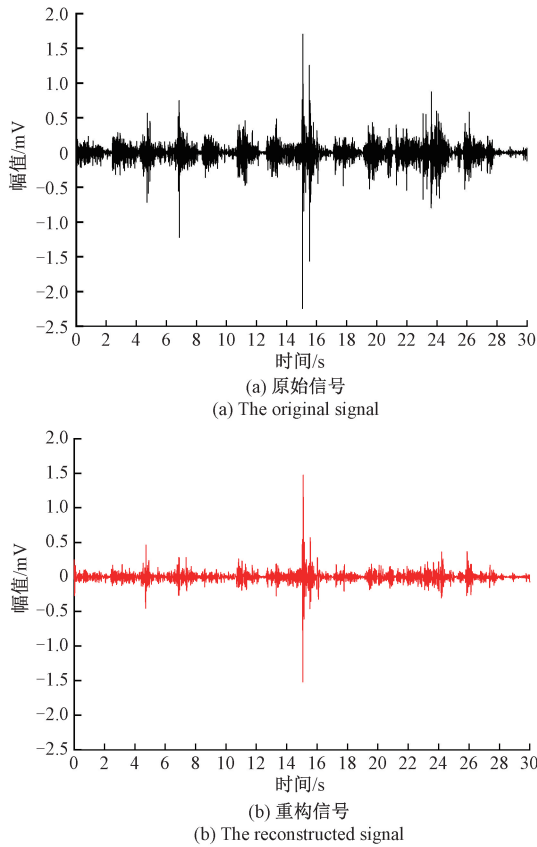


图7 sEMG原始信号与重构信号

Fig.7 sEMG original and reconstructed signal

表4 RMS差异检验结果

Table 4 Comparison of RMS

手套类型	任务前/ μV	任务后/ μV	P
A	88.99±35.27	572.78±9.65	<0.05
B	122.38±28.27	321.88±7.39	<0.05
C	275.60±53.71	605.98±6.91	<0.05

表5 MF差异检验结果

Table 5 Comparison of MF

手套类型	任务前/ μV	任务后/ μV	P
A	86.60±23.6	75±20.4	<0.05
B	72.38±7.27	65.88±7.59	<0.05
C	75.48±9.98	67.94±7.22	<0.05

前后两指标具有显著差异($P<0.05$),说明在作业过程中作业人员肌肉出现疲劳状态。

被试者使用不同绝缘手套作业时,sEMG特征参数的变化速率差异显著;穿戴B型绝缘手套作业时,RMS增加速率和MF下降速率低于其余2种手套。sEMG特征参数变化速率代表肌肉进入疲劳的快慢,变化速率越快,代表肌肉越快进入疲劳,手套舒适性越差,初步表明B型手套舒适性更佳。

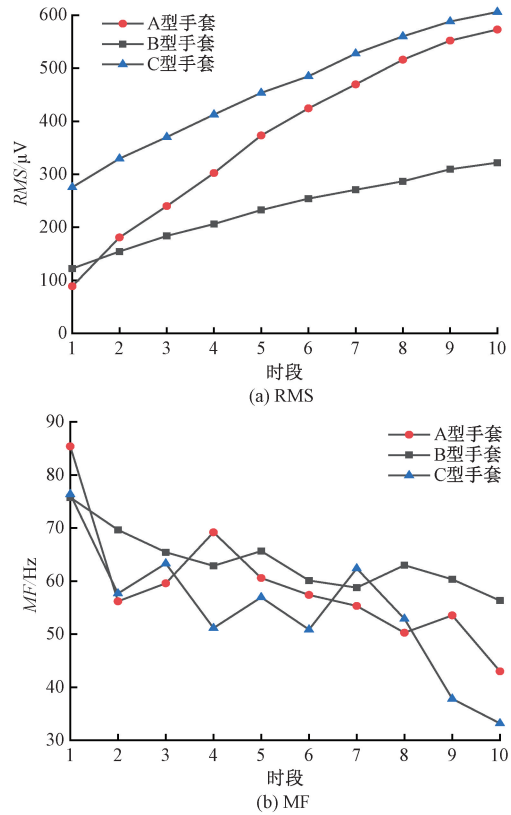


图8 被试者I的RMS和MF变化趋势

Fig.8 RMS and MF variation trend of subject I

为了验证基于ISSA-BP的评估模型的预测效果,分别使用时域特征RMS、频域特征MF、组合参数RMS-MF进行肌肉疲劳预测。同时根据舒适性定义(式(10))计算各绝缘手套的舒适性,结果如表6和7所示。

表6 不同被试者肌肉疲劳预测的准确率

Table 6 The accuracy of muscle fatigue prediction of different testing participants (%)

被试者	RMS	MF	RMS-MF
I	93.9	89.4	95.1
II	92.3	89.8	94.7
III	92.9	87.9	95.3
IV	91.3	88.6	94.5
平均	92.6	88.9	94.9

表7 3种绝缘手套舒适性评估结果

Table 7 Comfortability assessment results of different insulating gloves

绝缘手套	A	B	C
舒适度	0.766	0.925	0.698

由表6可知,以RMS和MF特征参数进行预测的平均准确率达到92.6%和88.9%;以RMS-MF组合特征进行预测的平均准确率达到94.9%,较单一特征参数RMS

和MF预测准确率分别高2.3%和6%。由舒适性定义(式(10))可知,肌肉进入疲劳状态的时间与绝缘手套舒适性是密切相关的,只要有效判断肌肉疲劳状态,就可以有效判断绝缘手套的舒适性。结果表明以RMS-MF为特征参数的预测模型对绝缘手套工器具进行舒适性评估有较好的效果。

由表7可知,B型绝缘手套舒适性更高,分别高于其余2种绝缘手套0.159和0.227。经过对A型、B型和C型3种绝缘手套的结构分析,发现A型和C型手套遵循的是美国和欧洲的标准,他们的设计考虑到了较大的手掌尺寸和较长的手套长度,这与我国人群的手部结构存在差异。这种设计可能导致手套在我国使用时不太贴合,影响操作的灵活性和舒适度。相比之下,B型手套遵循的是日本标准,其设计在我国手掌尺寸的基础上仅增加了最多2.54 cm,这样的尺寸调整使得B型手套更加贴合中国人的手型。因此,B型手套在提供必要的绝缘保护的同时,还能确保使用者在进行相关工作时拥有更好的舒适度和操作便利性。

通过对于3种手套进行硬度测试,发现B型手套最软,C型手套最硬。在带电作业过程中,作业人员穿戴B号绝缘手套进行任务时能更加灵活地控制工器具,避免了不必要的动作,从而降低了肌肉的疲劳程度,提高了绝缘手套舒适性。

4 结论

本文建立了基于ISSA-BP的绝缘手套类工器具舒适性评估模型,评估了3种绝缘手套在典型使用工况下的舒适性,得到如下结论。

1)利用VMD对上肢sEMG信号进行分解时,ISSA较GA、PSO、SSA有着更好的寻优效果。

2)本文提出的基于ISSA-BP的绝缘手套类工器具舒适性评估模型,准确率可达到94.9%,能有效评估绝缘手套舒适性。

3)可通过优化绝缘手套的结构使其符合人的手掌尺寸,采用在满足绝缘性能的条件下柔软性更好的材料,来优化带电作业绝缘手套的设计,提高带电作业人员使用绝缘手套类工器具的舒适性。

参考文献

- [1] 胡毅,刘凯,彭勇,等.带电作业关键技术研究进展与趋势[J].高电压技术,2014,40(7):1921-1931.
HU Y, LIU K, PENG Y, et al. Research status and development trend of live working key technology[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1921-1931.
- [2] 钱忠,刘永奇,叶智群,等.配电网带电作业现状及发展综述[J].电力与能源,2021,42(1):83-86.
QIAN ZH, LIU Y Q, YE ZH Q, et al. Overview of current status and development of live work in distribution network[J]. Power & Energy, 2021, 42(1): 83-86.
- [3] 吴田,刘志华,陈然,等.基于表面肌电信号的绝缘手套法带电作业人员上肢肌肉疲劳分析[J].科学技术与工程,2021,21(8):3407-3413.
WU T, LIU ZH H, CHEN R, et al. Analysis of fatigue characteristics of upper limb muscles in live working by insulating gloves method based on surface electromyography [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(8): 3407-3413.
- [4] GALLAGHER S, SCHALL M C, SESEK R F. Job rotation as a technique for the control of MSDs: A fatigue failure perspective[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2017, 61(1):993-994.
- [5] JOPRI M H, SUTIKNO T, ABDULLAH A R, et al. A review of electromyography signal analysis techniques for musculoskeletal disorders [J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2018, 11(3):1136-1146.
- [6] CARDOSO M, GIROUARD M, CALLAGHAN J P, et al. An ergonomic evaluation of city police officers: An analysis of perceived discomfort within patrol duties [J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2017, 23(2):175-184.
- [7] 丁传锋.基于多属性群决策驾驶室人机工程评价分析[J].机械设计与制造,2020,351(5):189-192, 197.
DING CH F. Human engineering analysis of engineering truck's cab based on multi-attribute group decision-making[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020, 351(5): 189-192, 197.
- [8] VARGHESE A, AKSHAYA K B, PRAKASH S A, et al. Analysis of Motorcycle Rider's Posture Using sEMG Signals[M]. Smart Sensors Measurements and Instrumentation, 2021, 750:471-481.
- [9] 吴田,夏圆,刘志华.基于表面肌电和混合算法优化支持向量机的绝缘杆类工器具舒适度评估方法[J].科学技术与工程,2022,22(1):228-235.
WU T, XIA Y, LIU ZH H. Comfort evaluation method of insulating poles based on sEMG and PSO-GA-SVM[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(1): 228-235.
- [10] SALUD I, BOLINGOT H J, MACARAIG L C, et al. Surface-based electromyography gesture profiling of laparoscopic tools using a wearable sensor [J]. IFMBE Proceedings, 2021, 82:31-37.
- [11] 武壮,王勇,肖飞云.基于MEEMD和二代小波阈值的表面肌电信号去噪处理[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(7):869-874,908.

- WU ZH, WANG Y, XIAO Y F. Surface electromyogram signal denoising based on MEEMD and second-generation wavelet threshold[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2021,44(7): 869-874,908.
- [12] YANG Z S, KONG C Z, WANG Y H, et al. Fault diagnosis of mine asynchronous motor based on MEEMD energy entropy and ANN[J]. Computers and Electrical Engineering, 2021,92(4):107070.
- [13] XIAO F, YANG D, LV Z, et al. Classification of hand movements using variational mode decomposition and composite permutation entropy index with surface electromyogram signals [J]. Future Generation Computer Systems, 2020,110:1023-1036.
- [14] 任学平,李攀,孙百祎,等. 基于改进 VMD 的滚动轴承故障诊断[J]. 机械设计与制造, 2020(1):188-191.
REN X P, LI P, SUN B W, et al. Rolling bearing fault diagnosis based on improved VMD[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(1): 188-191.
- [15] 蔡宇琦,方瑞明,彭长青,等. 基于 ANHGA-VMD 和耦合隐马尔可夫模型的有载分接开关机械故障诊断[J]. 高电压技术, 2021,47(11):3949-3959.
CAI Y Q, FANG R M, PENG CH Q, et al. Mechanical fault diagnosis of on-load tap-changer based on ANHGA-VMD and coupled hidden Markov model[J]. High Voltage Engineering, 2021,47(11): 3949-3959.
- [16] MA F, SONG F, LIU Y, et al. sEMG-based neural network prediction model selection of gesture fatigue and dataset optimization [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2020,2020(1):1-17.
- [17] 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 B, JIANG N F. Application of thermal comfort index based on artificial neural network[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2011, 33(S1): 130-133.
- [18] CHENG P, CHEN D, WANG J. Research on underwear pressure prediction based on improved GA-BP algorithm[J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2021,33(4):619-642.
- [19] YI Z, YW A, JL B. Research on structure optimization and motion characteristics of wearable medical robotics based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Future Generation Computer Systems, 2022,129:187-198.
- [20] OU Y, CHENG T, QIU Y X, et al. A multi-strategy improved sparrow search algorithm [J]. Journal of Physics; Conference Series, 2021,1848(1):012042(9).
- [21] 全卫国,郭超宇,赵如意. 基于改进麻雀算法优化 LSSVM 的再循环箱浆液密度预测模型[J]. 电子测量技术, 2022,45(1):70-76.
TONG W G, GUO CH Y, ZHAO R Y. Prediction model of slurry density in recycling tank based on LSSVM optimized by improved sparrow algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(1): 70-76.
- [22] 马飞燕,李向新. 基于改进麻雀搜索算法-核极限学习机耦合算法的滑坡位移预测模型[J]. 科学技术与工程, 2022,22(5):1786-1793.
MA F Y, LI X X. Landslide displacement prediction model using improved SSA-KELM coupling algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 1786-1793.
- [23] 刘光达,董梦坤,许蓝予,等. 手臂疲劳时表面肌电信号特征 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10690-10696.
LIU G D, DONG M K, XU L Y, et al. Characteristic of surface electromyography signal in arm fatigue[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10690-10696.

作者简介

徐勇, 电力工程师, 主要研究方向为配网不停电作业。

E-mail: 1534289782@qq.com

吴田(通信作者), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为输电线路运行维护和带电作业技术。

E-mail: wutian_08@163.com