

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160329

背负式林果采摘机的人机工程学评价

邓 享 阚江明 李文彬

(北京林业大学工学院)

摘要:为了研究背负式林果采摘机的人机工程学特性,通过林果采摘手臂疲劳实验,建立了基于表面肌电信号的上肢肱二头肌疲劳评价模型,并结合心率测试对比分析背负式林果采摘机和手持式采摘机的手臂疲劳特性。结果表明:操作背负式林果采摘机心率增加比小于手持式采摘机;同时手臂疲劳程度也小于手持式采摘机。背负式林果采摘机较手持式采摘机更加省力,能够有效地缓解肌肉疲劳。

关键词:林果采摘机;肌电信号;心率;疲劳特性

中图分类号:S225.93; TB18 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2017)06-0131-06

DENG Xiang; KAN Jiang-ming; LI Wen-bin. **Ergonomics evaluation of knapsack forest-fruit-picking machine.** *Journal of Beijing Forestry University*(2017)39(6) 131-136 [Ch, 14 ref.] School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

Ergonomics evaluation of forest-fruit-picking machine is very important to design harvest machinery. In order to study the ergonomic features of knapsack forest-fruit-picking machine, a fatigue evaluation model of upper limb biceps brachii muscle based on surface electromyography (sEMG) signals was established by arm fatigue test. Combining the heart rate test and the model, the arm fatigue characteristics of the knapsack forest-fruit-picking machine and handheld picking machine were compared. The results showed that increasing ratio of heart rate and fatigue degree with knapsack forest-fruit-picking machine were less than those with handheld picking machine in the same situation. Therefore, the knapsack forest-fruit-picking machine is more labor-saving than the handheld picking machine, and can effectively relieve muscle fatigue.

Key words forest-fruit-picking machine; electromyogram signal; heart rate; fatigue characteristics

近年来,伴随林果经济发展所带来的林果采摘问题日益突出,传统人工采摘方式已经严重制约了林果产业的进一步发展,而我国核桃、板栗和文冠果等林果主要分布在山地、丘陵地带,该地形不适合大型设备作业,因而迫切需要发展小型便携式林果采摘设备^[1-4]。目前,对于山地、丘陵地区的林果采摘主要采用手持式伸缩高枝剪及手持式伸缩摘果器等工具,采摘时需要长时间抬举手臂,这样便会造成肌肉疲劳,容易诱发相关的职业病。同时,这种采摘方式不仅效率低,劳动强度大,收益低,而且还会由于操作不当出现安全事故。背负式林果采摘机可以有效地解决以上问题,林果采摘过程的主要负荷得到

分解,由手臂和肩部共同承担。背负式林果采摘机的重量轻,对肩部造成的疲劳影响小,主要是手臂肌肉疲劳。为此,本研究重点分析采摘过程中操作背负式林果采摘机时手臂疲劳特性,为背负式林果采摘机的进一步优化和人机工程学评价提供一定的参考依据。

在手臂肌肉疲劳分析方面,目前主要通过对操作者的生理和心理指标来间接判断人体疲劳的程度,主要方法有关节施力测试法、动态心率法、表面肌电(surface electromyogram, sEMG)信号法、超声波估计法(利用超声波动态测定肌肉厚度变化来判断作业人员疲劳程度)、两点刺激敏感阀限检测法、反

收稿日期: 2016-10-09 修回日期: 2017-04-18

基金项目: 北京市教委重点学科建设项目(2013)。

第一作者: 邓享。主要研究方向: 森林工程装备及其自动化。Email: dengxiang@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市清华东路35号北京林业大学工学院。

责任作者: 阚江明,博士,教授。主要研究方向: 森林工程装备及其自动化。Email: kanjm@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

应时间及脑电信号测定法^[5]。表面肌电信号分析法是一种基于表面电极来探索并记录表面肌电活动的技术,能够有效地判断肌电信号的活动状态^[6]。使用表面肌电信号评价肌肉疲劳的参数包括平均功率频率 (mean power frequency, MPF) 和中位频率 (median frequency, MF)。当肌肉处于非疲劳状态时,肌肉收缩的 MPF 和 MF 在一定的范围内随负荷强度的增加而增大^[7];当肌肉处于疲劳状态时,肌电信号会出现频谱左移^[8-12]。然而,大多数的频率特征参数,如 MPF 和 MF,获得的是全部信号分析频段的整体评价指标,这就不容易被应用于实际工作。周前祥等^[13]为了评价作业人员在完成施力作业之后上肢肌肉疲劳程度,将计算的表面肌电信号的疲劳能量与 Borg 量表相结合,建立了针对上肢肌肉施力疲劳评价的数学模型。该模型所测试的数据主要集中在较大强度下的肌电信号,对于手持重量较轻情况下的分析可能会存在出入。

针对林果采摘手臂疲劳特性,通过分析上肢肱二头肌的表面肌电信号的疲劳能量,结合 Borg 主观评价表,建立基于表面肌电信号的上肢肱二头肌疲劳评价模型,并结合心率测试^[14]对比分析背负式和手持式林果采摘机手臂受力疲劳特性。

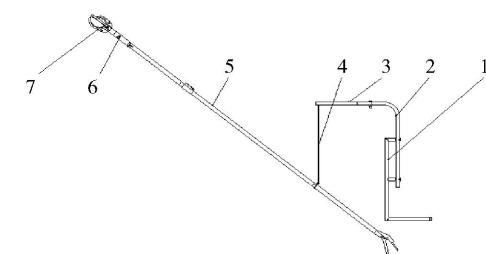
1 背负式林果采摘机的结构和原理

背负式林果采摘机主要由背负和伸缩采摘两部分组成(见图 1)。其中,背负部分包括背架、背部弯管、伸缩调节杆和悬挂弹簧;伸缩采摘部分包括采摘头部、采摘伸缩杆和连接管。

操作者在采摘林果时,将装置背负于两肩,通过调节背负部分的伸缩调节杆来实现对不同距离段的悬挂调节。悬挂点的调节可以改变操作力矩大小,悬挂弹簧则连接伸缩采摘部分,这样不仅能将手臂处的力量分解至背部,而且柔性连接自由度大,作业范围广。在不工作时,杆件可由弹簧悬挂,降低操作者手臂受力,有助于减少手臂疲劳。针对不同高度的林果,调节伸缩采摘部分的采摘伸缩杆,可以实现不同高度的采摘作业;当定位到林果之后,握紧手柄,实现采摘手爪对果实的抓取,随即扭转即可完成对果实的采摘;采摘完成,松开手柄,果实掉入收料网完成果实采收。该装置结构简单,便携轻巧,能够有效地应用在山地、丘陵地区的林果采收作业中,同时可以缓解手臂肌肉疲劳,提高作业效率。

2 研究方法

根据林果采摘作业方式进行林果采摘模拟实验,采集上肢肱二头肌的表面肌电信号,运用 1/3 倍



1. 背架;2. 背部弯管;3. 伸缩调节杆;4. 悬挂弹簧;5. 采摘伸缩杆件;6. 连接管;7. 采摘头部。1, Back frame; 2, Back bend; 3, Telescopic adjusting rod; 4, Suspension spring; 5, Picking telescopic rod; 6, Connecting pipe; 7, Head of picking machine.

图 1 背负式林果采摘机总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of knapsack forest-fruit-picking machine

频程方法计算疲劳能量,并将疲劳能量与 Borg 主观评价表相结合建立基于表面肌电信号的上肢肱二头肌疲劳评价模型。然后将此模型与心率测试相结合,对比分析操作背负式林果采摘机与手持式采摘机对于作业人员的疲劳影响。

2.1 研究对象

受试者均为身体健康且无不良嗜好的青年男性,年龄 26 ± 3 岁,体重 65 ± 10 kg,身高 170 ± 10 cm,实验中精神状态良好,测试前无剧烈运动且无积累疲劳。

2.2 基于表面肌电信号的手臂疲劳实验

为了建立基于表面肌电信号的上肢肱二头肌疲劳模型,需要根据林果采摘作业方式进行林果采摘模拟实验来获取受试者表面肌电信号和主观感受的数据。实验测试前,用砂片对皮肤表面的油污、坏死的角质进行清理,同时用酒精对放置表面电极处的皮肤进行反复擦拭,并将电极片放置在肱二头肌肌腹最凸起处,其中两个用于记录的电极应该沿着肌纤维的纵轴方向放置,与另一个参考电极形成三角形,两个记录电极间的间隔为 2~3 cm。设置表面肌电信号采集设备(RM6240B 肌电采集分析系统)的数据采样频率为 1 000 Hz,灵敏度为 2.5 mV,滤波频率为 1 000 Hz,数字滤波选择带通(低端转折频率为 10 Hz,高端转折频率为 500 Hz),并开启 50 Hz 陷波。

首先,让 17 名受试者处于静止状态,并对肱二头肌的表面肌电信号采集 1~2 min。然后,要求受试者按照林果采摘的特性操作不同伸缩长度的采摘机直至感觉疲劳为止,采集实验过程中受试者的表面肌电信号。测量完成后让受试者休息 3~20 min,并根据自己的主观疲劳感受按照 Borg 量表的分值关系(表 1)填写疲劳问卷,由此得到该受试者的 Borg 主观值。

表1 Borg量表的分值关系

Tab. 1 Borg scale score

Borg 分值	疲劳感觉主述	肌肉收缩程度
Borg score	Fatigue feeling	Measure muscle contraction
0	无感觉 No feeling	0
0.5	极轻 Extremely light	5
1	很轻 Very light	10
2	弱(轻) Weak (light)	20
3	中等 Medium	30
4		40
5	强 Strong	50
6		60
7	很强 Very strong	70
8		80
9		90
10	极强 Extremely strong	100

注: 分值为4时, 感觉在3~5之间; 分值为6时, 感觉在5~7之间; 分值为8和9时, 感觉介于7~10之间, 可线性增长。Notes: score is 4, the feeling is between 3~5; score is 6, the feeling is between 5~7; score is 8 and 9, the feeling is between 7~10 and can linearly grow.

实验完成后, 根据采集到的每名受试者的肌电信号计算其疲劳能量。本研究中表面肌电疲劳能量计算主要运用1/3倍频程法, 具体方法如下:

1) 在一次测量的表面肌电信号中分别截取刚开始施力时和施力疲劳过程中的两段肌电信号, 并进行数字陷波、滤波等相应的预处理;

2) 利用1/3倍频程法, 对经过预处理和傅里叶变换之后的表面肌电信号疲劳能量谱进行计算, 得到疲劳能量的倍频程谱。并依据国际电工委员会(IEC 61620)的相关要求^[13]选择该处理方法的中心频率和上、下限频率, 根据式1可计算其能量:

$$F(f_i) = \int_b^a F(f) df \quad (1)$$

式中: i 为频带号; f_i 为1/3倍频程分析的中心频率, Hz; f 为表面肌电信号经傅里叶变换后的频率, Hz; $F(f)$ 为表面肌电信号经过傅里叶变换后的疲劳能量值, J; a 为1/3倍频程分析的频率上限, Hz; b 为1/3倍频程分析的频率下限, Hz。

3) 肌电信号经过1/3倍频程分析后, 得到能量的倍频程谱。以疲劳前倍频程谱最大值作参考, 并用疲劳过程中的倍频程谱与之相除, 做归一化处理可得相对的1/3倍频程谱 $F'(f_i)$ 。

4) 按照疲劳过程中的相对倍频程谱, 用式2计算基于肌电信号所对应的疲劳能量 $p(J)$:

$$p = \sum g(f_i) F'(f_i) \quad (2)$$

式中: $F'(f_i)$ 为相对的1/3倍频程谱, J; $g(f_i)$ 为频谱

段系数, 由于局部神经肌肉sEMG信号频域范围处于0~400 Hz, 可根据布莱克曼窗计算(式3):

$$g(f_i) = 0.42 + 0.5 \cos(\pi f_i / 400) + 0.08 \cos(2\pi f_i / 400) \quad (3)$$

由此, 疲劳能量可由下式求取:

$$P = \sum \{ [0.42 + 0.5 \cos(\pi f_i / 400) + 0.08 \cos(2\pi f_i / 400)] F'(f_i) \} \quad (4)$$

实验中共得到17组疲劳能量和对应的Borg主观值, 这些实验数据将用于基于表面肌电信号的上肢肱二头肌疲劳评价模型的建立。

2.3 背负式与手持式林果采摘机的疲劳对比实验

为了分析背负式林果采摘机对作业人员疲劳的影响, 并与手持式采摘机进行比较, 需要进行两种采摘机的对比实验。背负式林果采摘机与手持式采摘机作业方式如图2。背负式林果采摘机可以在背负状态下完成不同树高的林果采摘, 而手持式林果采摘机作业时仅依靠手持, 通过采摘杆的伸缩对不同高度的林果进行采摘。



a 手持式林果采摘机
Handheld forest-fruit-picking machine
b 背负式林果采摘机
Knapsack forest-fruit-picking machine

图2 手持式和背负式林果采摘机对比图

Fig. 2 Comparison in handheld and knapsack forest-fruit-picking machines

2.3.1 基于表面肌电信号的手臂疲劳对比实验

表面肌电信号采集的准备工作同2.2中所述。测试开始后, 10名受试者保持静止状态, 并对肱二头肌的表面肌电信号采集1~2 min。然后根据采摘特性, 要求受试者先操作手持式林果采摘机直至感觉疲劳为止, 采集实验过程中表面肌电信号。组间休息3~20 min至无疲劳感, 再要求受试者以相同动作、相同作业时间操作背负式林果采摘机, 采集实验过程中表面肌电信号。对比实验的测试过程中两种采摘机的采摘杆的伸缩长度保持一致。

2.3.2 心率对比实验

首先利用Captiv-L7000人体心率数据采集系统分别测量5名受试者静止状态下心率, 时长1 min, 取其平均值作为静止状态心率; 然后要求5名受试

者按照采摘特性以一定的作业姿势和方式操作采摘机作业 5 min, 作业结束后分别测量各受试者 1 min 的平均作业心率。

3 结果与分析

3.1 基于表面肌电信号的手臂疲劳模型建立

由 2.2 中所述实验方法测量受试者上肢肱二头肌表面肌电信号, 计算其疲劳能量, 并根据受试者的主观疲劳感受按照 Borg 量表的分值关系(表 1)填写疲劳问卷得到 Borg 主观值。实验中所有受试者的疲劳能量及对应 Borg 主观值见表 2。

表 2 疲劳能量与 Borg 主观值对应关系的问卷调查结果

Tab. 2 Results of questionnaire on the relationship between fatigue energy and subjective values of Borg

受试者 Subject	疲劳能量 Fatigue energy/J	Borg 主观值 Borg subjective value
1	0.543 6	1
2	0.660 9	1.5
3	0.776 3	2
4	0.713 5	2
5	0.811 5	2
6	0.647 8	1.8
7	0.436 4	1
8	0.561 9	1.2
9	0.587 3	1.5
10	0.813 9	2
11	0.522 8	1
12	1.019 5	3
13	0.943 3	2.5
14	0.397 0	1
15	0.334 0	1
16	0.436 9	1
17	0.635 5	1.5

将疲劳能量作为自变量 x , Borg 主观值作为因变量 y , 对表 2 中的数据进行二次曲线拟合, 得到 Borg 主观值与疲劳能量间关系, 如式 5 所示:

$$y = -0.435x^2 + 2.569x + 0.732 \quad r = 0.942 \quad (5)$$

根据统计学理论, 曲线进行拟合, 相关系数 $r > 0.85$ 时, 可认为这种关系是成立的。因此, 可将此二次曲线作为基于表面肌电信号的手臂疲劳评价模型。理论上的疲劳感觉可以根据该模型通过采集表面肌电信号计算。

3.2 疲劳对比实验结果分析

由 2.3.1 中对比实验得到受试者在分别操作两种采摘机时的表面肌电信号, 根据表面肌电信号可

计算出对应疲劳能量, 再将疲劳能量代入疲劳评价模型, 可得到每个受试者的 Borg 主观值, 从而绘制出操作两种采摘机下的疲劳对比图, 如图 3 所示。通过图 3 可以看出: 手持状态下的 Borg 主观值大于背负状态。手持状态下, 采摘机的所有重量都需要由手臂承受; 背负状态下, 采摘机的部分重量可以由两肩分担。因为两款采摘机对于手臂的作用力不同, 从而导致手臂肌肉收缩程度不同, 产生的疲劳能量值不同, 导致了在背负式下 Borg 主观值要低于手持式的。

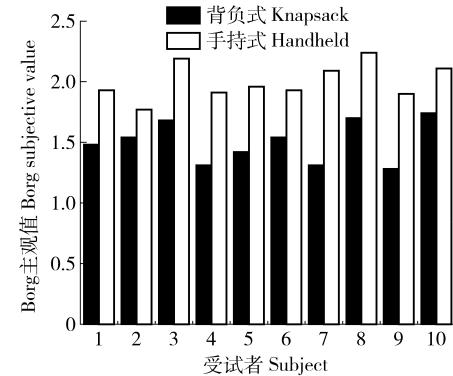


图 3 手持与背负采摘疲劳对比

Fig. 3 Fatigue comparison between handheld and knapsack picking

3.3 表面肌电信号对比分析

表面肌电信号是肌肉收缩过程中伴随的电信号。肌肉开始活动时, 运动单位电位的放电频率开始增加, 力量增大, 募集的运动单位数量就会增多, 从而引起肌电信号幅值增大; 如果再加大用力, 则会出现运动单元电位的重叠, 进一步导致信号幅值增大, 因此信号幅值越大说明其越费力。截取同一受试者两次实验相同时间段内的肌电信号图(图 4), 通过对比可以看出背负状态下的肌电信号较手持状态下的幅值要小。由此可知: 手持状态下更加费力。

3.4 心率对比分析

在人机工程学研究中, 心率能够反映操作人员的生理和心理负荷, 机体心率变动量与机体所承受的劳动强度和疲劳程度成正比。通过对 5 名受试者进行心率测量得到如表 3 所示的结果。

在实际工作中, 工作疲劳程度越大, 机体的心率变化量就会越大。根据测量作业结束后的作业心率, 计算相对于静止状态的心率的增加比可以判断疲劳程度。由表 3 可知: 操作手持式采摘机心率增加比大于背负式林果采摘机, 操作手持式采摘机工作疲劳程度较大。在手持式采摘过程中, 工人需要长时间地抬举采摘机。在背负状态下, 手臂受力要小。因为手臂受力不同, 造成的手臂疲劳程度不

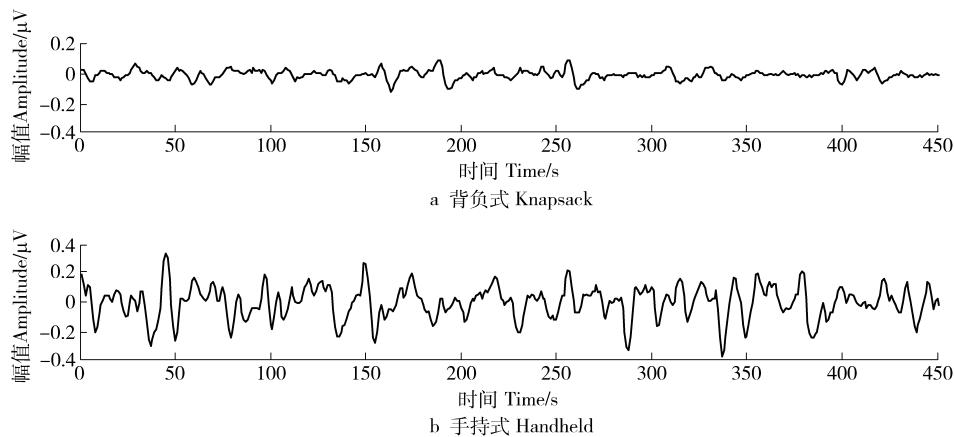


图4 相同时间段背负式和手持式两组肌电信号幅值变化

Fig.4 Knapsack and handheld signal amplitude changes of two groups of electromyographic in the same duration

表3 心率测试结果 次·min⁻¹

Tab. 3 Heart rate testing results

受试者 Subject	beat per minute		
	静止状态 Stationary state	背负式状态 Knapsack state	手持式状态 Handheld state
1	68	69(1.5%)	82(20.6%)
2	63	77(22.2%)	82(30.2%)
3	65	80(23.1%)	88(35.4%)
4	65	67(3.1%)	70(7.7%)
5	60	63(5.0%)	79(31.7%)

注:括号内数值为心率增加比。Note: bracketed value is the increasing ratio of heart rate.

同,这可能是导致心率增加比不同的原因。

4 结 论

针对林果采摘手臂疲劳特性,建立基于表面肌电信号的上肢肱二头肌疲劳评价模型,并结合心率测试对比分析背负式和手持式林果采摘机的疲劳特性,可得出以下结论:

1) 通过林果采摘手臂疲劳实验计算疲劳能量值,并将其与 Borg 量表问卷调查值相结合,建立了二次函数模型,该模型能够通过 Borg 主观值直观地判断在林果采摘过程中上肢肱二头肌的疲劳程度,且该模型不仅可用于手持式林果采摘机的手臂疲劳特性分析,还可以针对背负式林果采摘机手臂疲劳特性的分析判断。

2) 操作手持式采摘机 Borg 主观值和心率增加比均大于背负式林果采摘机,使用背负式较手持式采摘机更有利于减少人体的作业疲劳。

3) 通过基于表面肌电信号上肢肱二头肌疲劳评价模型与心率测试相结合的对比分析,为背负式林果采摘机的进一步优化和人机工程学评价提供了

一定的参考依据。

参 考 文 献

- [1] 金征,张伟,杨光,等. 林果采摘设备发展现状与需求[J]. 木材加工机械,2015,26(1):43-44, 54.
JIN Z, ZHANG W, YANG G, et al. Development status and demand of fruit picking equipment [J]. Wood Processing Machinery, 2015, 26(1):43-44, 54.
- [2] 何海龙,金征,陈东,等. 便携式林果采摘头角度轴的疲劳分析[J]. 木材加工机械,2016,27(3):27-29.
HE H L, JIN Z, CHEN D, et al. Fatigue analysis of angle shaft for portable forest-fruit picking head [J]. Wood Processing Machinery, 2016, 27(3): 27-29.
- [3] 段文婷,何家成,彭铜杰,等. 便携电动式水果采摘机设计[J]. 中国农机化学报,2015,36(1):48-49, 58.
DUAN W T, HE J C, PENG T J, et al. The design of portable electric fruit picking machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(1): 48-49, 58.
- [4] 许小峰,张蔚,徐九华,等. 便携式山核桃动力采摘设备的研究[J]. 木材加工机械,2012,23(5):51-54.
XU X F, ZHANG W, XU J H, et al. Research on picking equipment of portable hickory nuts [J]. Wood Processing Machinery, 2012, 23(5):51-54.
- [5] 周前祥,蔡刚,张本庆,等. 虚拟人上肢拉伸操作疲劳评价的建模研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(15):4823-4826.
ZHOU Q X, CAI G, ZHANG B Q, et al. Study on fatigue model of virtual human upper limb while pulling stretching [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15):4823-4826.
- [6] 李志远,李玉章,黄朋,等. 表面肌电信号(sEMG)分析在生物力学领域中的应用[J]. 南京体育学院学报(自然科学版),2012,11(2):30-33.
LI Z Y, LI Y Z, HUANG P, et al. The applications of signal analysis aspects of surface electromyography in biomechanics [J]. Journal of Nanjing Institute of Physical Education (Natural Science), 2012,11(2):30-33.
- [7] 宋超,王健,方红光,等. 间断递增负荷条件下肌肉活动的力-电关系[J]. 体育科学,2006,26(3):50-52.
SONG C, WANG J, FANG H G, et al. The relationship between

- sEMG parameters and force levels during step contraction of biceps brachii [J]. China Sport Science, 2006, 26(3):50-52.
- [8] 何庆华,吴宝明,彭承琳. 表面肌电信号的分析与应用[J]. 国际生物医学工程,2000,23(5):299-303.
- HE Q H, WU B M, PENG C L. The detection analysis method of surface EMG signal and its application [J]. Foreign Medical Sciences Biomedical Engineering, 2000, 23(5):299-303.
- [9] 陈胜利,张立. 表面肌电信号分析评价肌肉疲劳的有效性和敏感性[J]. 武汉体育学院学报,2011,45(12):71-77.
- CHEN S L, ZHANG L. Efficiency and sensitivity of assessment of muscle fatigue by utilizing sEMG parameters [J]. Journal of Wuhan Institute of Physical Education, 2011, 45(12):71-77.
- [10] 王健,刘加海. 肌肉疲劳的表面肌电信号特征研究与展望[J]. 中国体育科技,2003,29(2):5-8.
- WANG J, LIU J H. The research and prospects on sEMG signal characteristics of muscular fatigue [J]. China Sport Science and Technology, 2003, 29(2):5-8.
- [11] 皮喜田,陈峰,彭承琳. 利用表面肌电信号评价肌肉疲劳的方法[J]. 生物医学工程学杂志,2006,23(1):225-229.
- PI X T, CHEN F, PENG C L. Methods applied to muscle fatigue assessment using surface myoelectric signals [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2006, 23(1):225-229.
- [12] ROBERTO M, LOREDANA L C. Advances in processing of surface myoelectric signals: part 1 [J]. Medical and Biological and Computing, 1995, 33(3):362-372.
- [13] 周前祥,谌玉红,马超,等. 基于sEMG信号的操作者上肢肌肉施力疲劳评价模型研究[J]. 中国科学(生命科学),2011,41(8):608-614.
- ZHOU Q X, CHEN Y H, MA C, et al. Evaluation model for muscle fatigue of upper limb based on sEMG analysis[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2011, 41(8):608-614.
- [14] 王林杰,李文彬,周琪涵,等. 便携式风力灭火机的人机工程学评价[J]. 北京林业大学学报,2015,37(2):148-152.
- WANG L J, LI W B, ZHOU Q H, et al. Ergonomics evaluation of portable pneumatic extinguisher [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(2):148-152.

(责任编辑 吴 娟
责任编委 李文彬)