

机械设计与制造

*Machinery Design & Manufacture*

ISSN 1001-3997, CN 21-1140/TH

## 《机械设计与制造》网络首发论文

题目：基于肌电信号的肘关节肌肉疲劳算法性能研究  
作者：孟庆丰，陶庆，来全宝，胡玉舸  
DOI：10.19356/j.cnki.1001-3997.20230217.001  
网络首发日期：2023-02-20  
引用格式：孟庆丰，陶庆，来全宝，胡玉舸．基于肌电信号的肘关节肌肉疲劳算法性能研究[J/OL]．机械设计与制造．  
<https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20230217.001>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于肌电信号的肘关节肌肉疲劳算法性能研究

孟庆丰<sup>1</sup>, 陶庆<sup>1,2</sup>, 来全宝<sup>1</sup>, 胡玉舸<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆大学 机械工程博士后研究中心, 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 旨在量化分析肘关节肌肉疲劳评价算法的性能, 寻找一种高质量的肘关节肌肉疲劳评价算法, 为肘关节屈曲运动提供一种更加有效的肌肉疲劳实时监测方法。通过采集 12 名测试对象在不同负载下肘关节进行屈曲运动的表面肌电信号, 计算平均频率(MNF), 频谱距(SMR), 小波方法 WIRM1551, 模糊近似熵(fApEn)和递归量化分析(RQA%DET)的评价指标, 考虑同一疲劳条件下的抗干扰性与不同疲劳条件下的区分疲劳程度的能力比较分析 5 种疲劳评价算法的性能。疲劳评价算法的抗干扰性由指标的线性回归方程确定系数  $R^2$  进行评价, 区分疲劳程度的能力由线性回归方程斜率  $k$  的最大垂直距离  $L_{max}$  进行评价。统计分析表明, 在抗干扰性方面, 频谱距 SMR 相比其他评价算法具有最大的确定系数  $R^2$  均值, 与 MNF 与 RQA%DET 的差异具有统计学意义( $P<0.05$ ); 在区分疲劳程度的能力方面, 频谱距 SMR 在不同负载下均具有最大的  $L_{max}$  均值, 最大  $L_{max}$  均值分别为 0.883、0.766、0.622。研究结果表明, 频谱距 SMR 在抗干扰与疲劳程度的区分能力上都优于其他算法, 因此在今后进行肘关节肌肉疲劳评价时, 我们建议将频谱距 SMR 作为一个优先考虑的评价算法。

**关键词:** sEMG; 肘关节肌肉疲劳; 疲劳评价算法; 抗干扰性; 区分疲劳程度的能力

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A

## Study On The Performance Of Elbow Muscle Fatigue Assessment Using SEMG

MENG Qing-feng<sup>1</sup>, TAO Qing<sup>1,2</sup>, LAI Quan-bao<sup>1</sup>, HU Yu-ge<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Center for Post-doctoral Studies of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** The purpose of this paper is to quantitatively analyze the performance of the elbow muscle fatigue evaluation algorithm, to find a high-quality elbow muscle fatigue evaluation algorithm, and to provide a more effective real-time muscle fatigue monitoring method for elbow flexion movement. The mean frequency, spectral moment ratio, wavelet method, fuzzy approximate entropy and recursive quantitative analysis were calculated by collecting the surface EMG signals of the elbow joints under different loads. The evaluation index of compares the performance of the five evaluation methods by considering the anti-interference under the same fatigue condition and the ability to distinguish the fatigue degree under different fatigue conditions. The anti-interference of the fatigue evaluation method is evaluated by the linear regression equation of the evaluation index to determine the coefficient  $R^2$ , and the ability to distinguish the degree of fatigue is evaluated by the maximum vertical distance  $L_{max}$  of the slope  $k$  of the linear regression equation. Statistical analysis showed that SMR had the largest  $R^2$  mean value compared with other evaluation methods in terms of anti-interference, and the difference between MNF and RQA%DET was statistically significant ( $P<0.05$ ); SMR in terms of ability to distinguish fatigue degree The maximum  $L_{max}$  average value is obtained under different loads, and the maximum  $L_{max}$  average values are 0.883, 0.766, and 0.622, respectively. The results show that the SMR method is superior to other algorithms in distinguishing between anti-interference and fatigue. Therefore, when evaluating elbow muscle fatigue, we recommend SMR as a priority evaluation method.

**Keywords:** SEMG; Elbow Joint Muscle Fatigue; Fatigue Evaluation Method; Anti-Interference; Ability to Distinguish Fatigue.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51865056); 机械制造系统工程国家重点实验室开放基金(sk1ms2018006)

**作者简介:** 第一作者孟庆丰, (1997—), 男, 山东人, 硕士研究生, 主要研究方向: 人体上肢康复和坐姿舒适性评价研究; 导师陶庆, (1978—), 男, 江苏人, 博士, 教授, 主要研究方向: 先进设计与制造、虚拟现实技术等研究。

# 1 引言

肌肉疲劳是人们日常生活中一种常见的生理现象，一般是指由长时间运动或发力引起的肌无力或酸痛的感觉<sup>[1]</sup>。日常生活中我们或多或少都会遇到肌肉疲劳的现象，但是如果不顾肌肉的疲劳而过度运动或长时间活动的话，很可能会造成肌体的永久性损伤，更甚者会带来生命危险<sup>[2]</sup>，因此对于肌肉疲劳评价的研究足以引起我们的高度重视。对于肌肉疲劳评价方法的研究与分析，无论是在体育训练还是在康复医学、运动医学等领域都具有重要意义。

如今，已知通过记录表面肌电信号计算疲劳指数的方法可以分为两个主要类别<sup>[3]</sup>。第一类由经典的基于信号可量化频谱变化的算法组成。例如经典的平均频率以及频谱矩<sup>[4]</sup>和基于小波的方法<sup>[5]</sup>都属于此类。第二类考虑信号的非线性成分。例如考虑信号重复模式或分形测量的递归量化分析和基于熵的方法的模糊近似熵都属于此类<sup>[6]</sup>。

由于上肢的运动功能远比下肢复杂，上肢在人体日常的工作生活扮演着重要的角色，而肘关节的屈伸动作甚至出现在人体运动的每个瞬间，并且上肢中肘关节的运动减少 50% 将导致上肢运动功能降低近 80%<sup>[7]</sup>，肘关节的正常运动对人体的工作生活是非常重要的，因此探究更有效的肘关节肌肉疲劳评价方法迫在眉睫。为此，国内外学者已经针对肘关节肌肉疲劳评价方法展开了大量的研究，不同方法得出的评价指标获得的肌肉疲劳评价效果不同。张海红<sup>[8]</sup>利用 AEMG 与 MPF 等线性和 Lempel-Ziv 复杂度与 DET 等非线性指标分析不同负载下肱二头肌疲劳过程中表面肌电信号的变化，结果显示疲劳指标的变化具有非疲劳特异性。张肃<sup>[9]</sup>采集不同状态的上肢两侧肌电信号，将时域的积分肌电值、均方根振幅和频域的平均功率频率、中位频率作为疲劳评价指标，研究得出上肢一侧近端肌肉疲劳会使另一侧的运动信号产生伴随性变化，即产生中枢共驱动现象。闫正祥<sup>[10]</sup>分析时域的积分肌电值、均方根振幅和频域的平均功率频率、中位频率等指标随着疲劳程度加深的变化趋势，提出一种肌肉疲劳出现时刻的估计方法。王蒙<sup>[11]</sup>将时域的 iEMG、RMS 与频域的 MPF、Fc 分析评价指标，利用 SPSS 统计分析时域与频域之间的参量关系以及上肢肌肉疲劳间的关系，结果与实际情况更贴合。

以上研究主要是对上肢疲劳时域或频域指标变化规律的探索，缺乏对各疲劳指标的评价效果进行分析。为此，研究了肘关节肌肉疲劳评价方法的评价效果，记录测试对象在不同负载下肘关节做屈曲运动的 sEMG 信号，计算 MNF、SMR、WIRMI1551、fApEn 与 RQA%DET 的指标，并进一步比较 5 种方法对肘关节肌肉疲劳的评价效果，从而获得更有效的肘关节肌肉疲劳评价方法。将从肌肉疲劳评价方法的抗干扰性与区分疲劳程度的能力两个方面对 5 种疲劳评价方法的效果进行比较，分析所得结果，为肘关节肌肉疲劳提供一个更加准确的人因工程定量评价方法。

## 2 研究方法

### 2.1 肌肉疲劳评价方法

#### 2.1.1 平均频率

研究表明，随着肌肉疲劳的累积，sEMG 信号功率谱的主频率由高转向低，平均功率值逐渐变小，并且疲劳程度越大，下降趋势越强。基于对功率谱密度（PSD）的估计，计算了谱疲劳评价方法指标。PSD 是利用 Welch 方法估算的（其中  $k=15$ ），并使用 Hamming 窗函数进行 50% 的重叠<sup>[12]</sup>。基于 PSD 估计的 MNF：

$$MNF = \frac{\int_0^{f_s/2} f \cdot PSD(f) df}{\int_0^{f_s/2} PSD(f) df} \quad (1)$$

式中  $f$  是频率， $f_s$  是采样率。

#### 2.1.2 频谱矩

作为平均频率的替代，频谱矩（SMR）方法被 Dimitrov 等人描述为新的光谱指数，它是对 H/L 比率方法的改进。Dimitrov 等人<sup>[13]</sup>用平滑函数加权 PSD 估计，他们建议使用频率的倒数作为低频带的加权函数，高频带的加权函数是频率平方，立方，四次或五次方。基于阶数  $k$  的谱矩  $M_k$

$$M_k = \int_{f_1}^{f_2} f^k \cdot PSD(f) df \quad (2)$$

频谱矩为：

$$SMR = \ln \frac{M_{-1}}{M_k} \quad (3)$$

式中， $f_1=5\text{Hz}$  和  $f_2=500\text{Hz}$  为积分的上下限，阶数  $k=5$ 。

#### 2.1.3 基于离散小波的方法

量化频率压缩的其他增强疲劳评价方法是 Gonzalez-Izal 等人报道的基于小波的方法<sup>[14]</sup>。它们是基于固定小波变换（SWT）的频谱估计而不是 PSD 估计。WIRMI1551 比值是从 Gonzalez-Izal 等人建议的小波方法的变体中选择的。它被定义为：

$$WIRMI1551 = \ln \frac{\int_{f_1}^{f_2} f^{-1} \cdot D_5(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} f^5 \cdot D_1(f) df} \quad (4)$$

式中， $D_1$  是使用 sym5 小波的 SWT 的第一尺度的功率谱， $D_5$  是 SWT 的第五尺度的功率谱。正如建议的那样， $f_1=8\text{Hz}$  和  $f_2=500\text{Hz}$  为积分的上下限。

#### 2.1.4 模糊近似熵

熵估计是用于疲劳评价的另一种非线性方法。样本熵（SampEn）是一种计算时间序列熵的方法，为条件概率的负自然对数，该条件概率是从一个纪元开始的两个序列在  $m$  维向量相似，而在  $m+1$  维向量仍然相似，当向量的长度  $m=2$ ，阈值  $r=0.3$  为最佳搭配。为了疲劳检测的目的，Sokunbi 等人<sup>[15]</sup>报告了一种改进的算法，称为模糊近似熵（fApEn）。与样本熵相反，如果两个序列相差任意恒定偏移量  $d$ ，则模糊近似熵会将它们视为相似。以  $m=2$ ， $r=0.6$  为最佳组合计算模糊函数来获得模糊近似熵的近似度。模糊函数为：

$$u(d, r) = \exp\left(\frac{-d^2}{r}\right) \quad (5)$$

#### 2.1.5 递归量化分析



递归量化分析 (RQA) 是一种试图量化分析信号中重复模式的非线性疲劳评价方法<sup>[6]</sup>。首先构造距离矩阵, 从时间信号的角度导出长度为  $D$  (嵌入维) 的向量, 其中时间延迟间隔  $\lambda = 5$ , 嵌入尺寸  $D=15$ 。然后矩阵通过其平均值进行归一化处理, 研究表明, 阈值  $r=0.75$  时矩阵会产生仅包含零和一的二进制递归映射。%DET 是用于评估复发图的, 其值为形成一定链长的对角线与矩阵中所有对角线的数量之比。研究发现, 在疲劳任务下, RQA%DET 值的上升与运动单元的更长时标同步非常吻合。

## 2.2 疲劳评价方法的定量化分析

由于疲劳评价方法难以基于测试对象的主观感受来校准, 因此本研究使用定量化分析方法比较疲劳评价方法的差异性。定量化分析方法主要包括同一疲劳条件下评价方法的抗干扰性及不同疲劳条件下区分疲劳程度的能力。相关研究表明, 肌肉疲劳评估指数呈现具有恒定斜率的线<sup>[6]</sup>, 本研究利用最小二乘法对五种疲劳评估方法进行了线性回归分析, 并求解出每个方法的确定系数  $R^2$  与回归方程的斜率  $k$ 。

### 2.2.1 抗干扰性分析

疲劳评价方法预期在疲劳情况下产生平滑变化的疲劳指数。偏离这个平滑过程被认为是干扰。疲劳指数的干扰可以通过确定系数  $R^2$  来量化<sup>[17]</sup>。 $R^2$  表示具有恒定斜率的线反映信号数据的相关性,  $R^2$  的数值范围从 0 到 1。 $R^2$  的值为 0 意味着信号中没有线性趋势。 $R^2$  的值为 1 则意味着信号恰好是具有非零斜率且没有额外干扰的直线。因此  $R^2$  的值越大表明疲劳评估算法的抗干扰性越强。

### 2.2.2 区分疲劳程度能力分析

人体肘关节肌肉在不同负载下会产生不同的肌肉疲劳程度。柯尔莫哥洛夫-斯米洛夫检验 (Kolmogorov-Smirnov test, 即 K-S 检验) 是一种基于概率统计理论的方法, 它能够计算两个数据经验分布函数间的最大垂直距离  $L_{\max}$ ,  $L_{\max}$  越大说明两个数据相似性越小。本研究利用 K-S 检验分析五种评价方法区分疲劳程度的能力<sup>[18]</sup>。即对五种评价方法在不同负载下的线性回归方程斜率  $k$  进行 K-S 检验得到的  $L_{\max}$  值,  $L_{\max}$  越大表明疲劳评估方法对不同负载下区分疲劳程度的能力越强。

## 3 肌电信号采集与处理

### 3.1 测试对象与试验准备

#### 3.1.1 测试对象

为了采集数据分析比较不同疲劳评价方法, 本研究采集了 12 名测试对象 (6 名女性和 6 名男性) 肱二头肌的表面肌电信号。测试对象的年龄在 19 至 26 岁之间, 无皮肤过敏史且肱二头肌皮肤表面无创伤和疤痕, 上肢运动能力处于正常状态。在试验开始之前, 所有测试对象都书面同意志愿参加本次试验。

#### 3.1.2 试验准备

为了施加恒定的力, 要求每个测试对象以同一固定姿势托举哑铃。实验过程中要求测试对象保持直立坐姿, 肘部处于放松状态后抓举哑铃进行实验。有关动作设置见图 1。



图 1. 实验设定

Fig.1 Setup of The Experiment

数据采集过程中, 首先引导测试对象以最大可实现的用力在短时间内抓举哑铃以单独测取每个测试对象的最大自主收缩力 (MVC)。然后在随后的三次试运行期间, 根据每个测试对象的 MVC 调整他们要托举的重量。在三次试验中, 要求测试对象分别托举他们 MVC 的 20%, 40% 和 60% 的重量。在 20% 和 40% MVC 负荷的情况下, 所有测试对象持续 3 分钟的指定时间, 在 60% MVC 负荷水平下持续 135 秒达到疲劳。每次试验后, 测试对象休息 30 分钟。

## 3.2 试验设备与数据采集

### 3.2.1 试验设备

葡萄牙 Plux 公司生产 ErgoPlux 的 8 通道无线表面肌电测量系统、上海励图医疗器材有限公司生产的 LT-7 型理疗电极片。

### 3.2.2 数据采集

测试肌肉位置如图 2 所示, 先用 75% 的医用酒精擦拭测试对象右臂肱二头肌的皮肤表面, 清理皮肤表面污渍与角质, 再使用干燥的棉球擦净皮肤表面残留的酒精后将八组电极片以高度密集的形式放置在肱二头肌上方。即电极以彼此相邻的两列连接, 且彼此之间没有任何间隔。根据其直径, 相邻放置的电极的中心间隔为 26mm。测试电极沿着所测试肌肉的肌纤维方向, 贴在肱二头肌最隆处, 接地电极贴在肘关节处。试验过程中, 每名测试对象依次托举他们最大负载 (MVC) 的 20%、40% 与 60% 重量, 利用 8 通道的表面肌电测量系统同步记录测试对象的 sEMG 信号。



图 2 高密度电极片的贴点位置图

Fig.2 Location of The High-Density Electrode Sheet in The Biceps

### 3.3 数据处理

经多次试验,测试对象在测试结束后均在不同负载下感受到不同程度的肌肉酸痛僵硬,即肌肉处于疲劳状态。为保证所分析的 sEMG 信号数据均在疲劳状态下,研究采用测试过程中最后的 1min 进行数据分析。首先同步采集 8 个通道的 sEMG 会产生基线偏移现象,利用 sgolay 滤波器消除趋势化,然后 sEMG 信号采集过程中会受到 50Hz 工频及其他信号干扰,利用 50Hz 陷波与巴特沃斯带通滤波器对 sEMG 信号去噪<sup>[18]</sup>,最后将处理后的 8 通道信号取平均值。处理后的示例信号如图 3 所示。

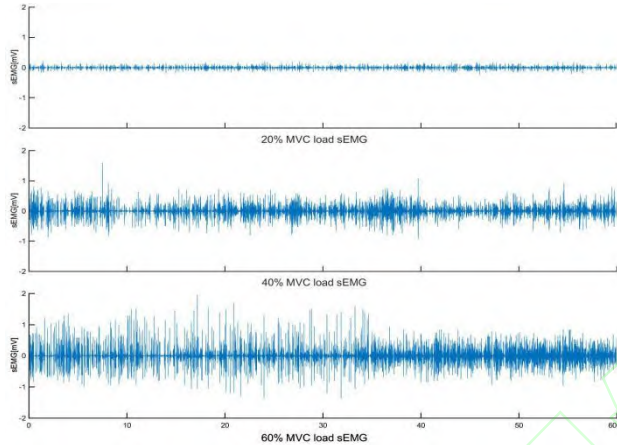


图 3 处理后的示例信号

Fig.3 Exemplary Signals After Processing

根据五种疲劳评价方法的定义,使用 Matlab R2014b 分别编写五种疲劳评价方法的算法,计算出每个测试对象在不同负载下各疲劳评价方法的指标值,然后对各疲劳评价方法进行量化分析。量化分析分为两个部分,一是利用最小二乘法对各方法的指标进行线性回归分析(图 4 展示了 1 名测试对象在不同负载下最后一分钟的 MNF 最小二乘法线性回归分析结果,其他 4 种方法与 MNF 做相同的处理),比较线性回归方程的确定系数  $R^2$  的均值,利用 SPSS 25 对  $R^2$  进行单

因素方差分析,进一步评价疲劳评价方法的抗干扰性;二是对回归方程的斜率  $k$  进行 K-S 检验得到不同负载下的  $L_{\max}$  值,并对  $L_{\max}$  进行单因素方差分析,评价 5 种疲劳评价方法区分疲劳程度的能力。图 4 中  $R^2_{20\%} = 0.167, R^2_{40\%} = 0.356, R^2_{60\%} = 0.792$ ,正如预期的那样,随着负载水平的增加,  $R^2$  值会增加,因为负载水平越高, MNF 的线性趋势越强。

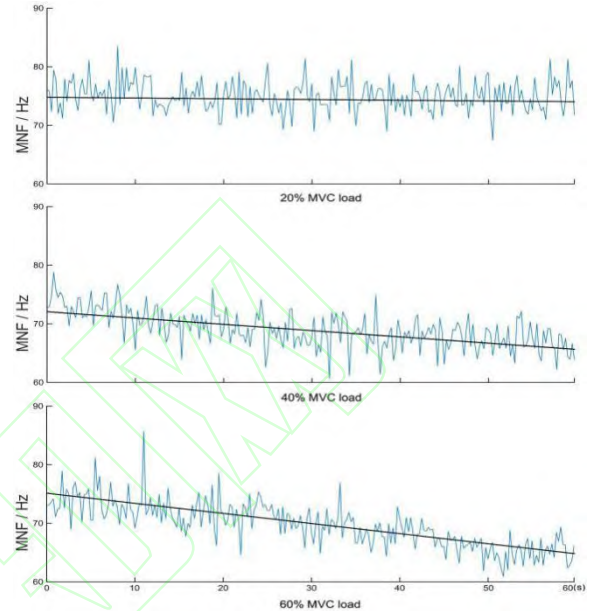


图 4 MNF 的线性回归分析结果

Fig.4 Linear Regression Analysis Results of MNF

## 4 结果

### 4.1 抗干扰评价结果

为量化不同疲劳算法的抗干扰性,本研究计算了 12 个测试对象在不同负载下各疲劳评价方法线性回归方程的确定系数  $R^2$  平均值与标准差,并对  $R^2$  进行单因素方差分析,结果如图 5 所示。

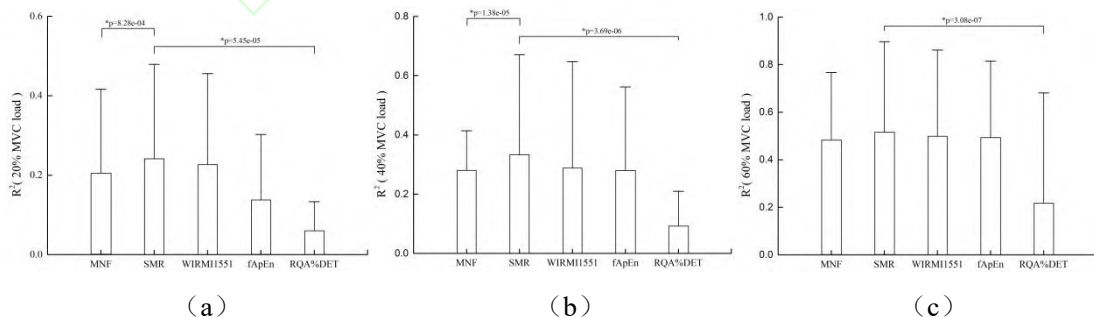


图 5 五种肌肉疲劳评价方法在不同负载下的  $R^2$

Fig.5 Five Muscle Fatigue Detection Methods for  $R^2$  Under Different Loads

图 5 (a) 显示在 20% MVC 情况下, SMR 的  $R^2$  平均值为 5 种疲劳评价方法的最大值,最大平均值  $R^2_{SMR} = 0.237$ ,且与 MNF ( $p=8.28e-04$ ) 和 RQA%DET ( $p=5.45e-05$ ) 方法存在显著性差异。表明 SMR 在 20%MVC 下具有最好的抗干扰性。

WIRM1551 具有较大的  $R^2$  平均值,  $R^2_{WIRM1551} = 0.223$ ,说明 WIRM1551 在 20%MVC 下具有较好的抗干扰能力。RQA%DET 的  $R^2$  平均值最小,表明 RQA%DET 的抗干扰能力最差。

图 5 (b) 显示在 40% MVC 情况下, SMR 的  $R^2$  平均值

仍然最大,  $R_{SMR}^2 = 0.328$ , 且与 MNF ( $p=1.38e-05$ ) 和 RQA%DET ( $p=3.69e-06$ ) 在评价肘关节肌肉疲劳的抗干扰性的差异具有统计学意义。表明 SMR 在 40%MVC 下具有最强的抗干扰能力。MNF、WIRM1551 与 fApEn 的  $R^2$  平均值相差很小, 分别为  $R_{MNF}^2 = 0.289$ ,  $R_{WIRM1551}^2 = 0.293$ ,  $R_{fApEn}^2 = 0.288$ , 说明这 3 种方法在 40%MVC 下具有相同的抗干扰能力。而 RQA%DET 的抗干扰性最差。

图 5 (c) 显示 MNF、WIRM1551 与 fApEn 在 60%MVC 具有较大的  $R^2$  平均值, 但 SMR 仍然为最大值,  $R_{SMR}^2 = 0.528$ , 且与 RQA%DET ( $p=3.08e-07$ ) 的差异具有统计学意义。说明 MNF、WIRM1551 与 fApEn 在 60%MVC 下具有较好的抗干扰性, 但 SMR 的抗干扰能力是最强的。RQA%DET 依旧是 5 种方法中抗干扰性性最差的。

综上所述, SMR 在不同负载下的  $R^2$  平均值均为最大值, 拥有最好的抗干扰性。WIRM1551 在不同负载下的  $R^2$  平均值仅比 SMR 小一些, 同样具有较好的抗干扰性。MNF 与 fApEn 仅在大负载下拥有较大的  $R^2$  平均值, 但是在小负载, 低疲劳情况下的  $R^2$  平均值相比 SMR 还是有较大差距的, 因此, MNF 与 fApEn 仅在大负载下拥有较强的抗干扰能力。而 RQA%DET 在不同负载下的抗干扰能力是最弱的。

#### 4.2 疲劳程度区分能力评价结果

为量化分析 5 种疲劳评价方法区分疲劳程度的能力, 对线性回归方程的斜率  $k$  进行 K-S 检验, 得出不同负载下肘关

节肌肉疲劳指标经验概率分布函数的最大垂直距离  $L_{max}$ , 并对  $L_{max}$  进行单因素方差分析。全局结果如图 6 所示, 局部  $L_{max}$  量化分析结果如图 7 所示。

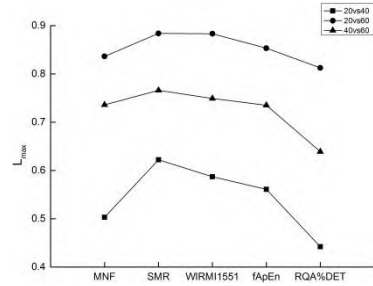


图 6 全局  $L_{max}$  量化分析

Fig.6 Global Quantitative Analysis of  $L_{max}$

图 6 为不同负载下全局  $L_{max}$  量化分析结果。结果显示在疲劳程度较大 (40%vs60%) 的情况下, MNF、WIRM1551 与 fApEn 的  $L_{max}$  平均值较大, SMR 的  $L_{max}$  平均值为最大值; 在疲劳差异大 (20%vs60%) 的情况下, SMR 与 WIRM1551 的  $L_{max}$  平均值为最大值; 在疲劳程度小 (20%vs40%) 的情况下, SMR 的  $L_{max}$  平均值呈现明显的尖点。而 RQA%DET 的  $L_{max}$  平均值在三种情况均为最小值。全局  $L_{max}$  量化分析结果表明在 5 种方法中 SMR 拥有最强的区分肘关节肌肉疲劳程度的能力, 而 RQA%DET 是最弱的。

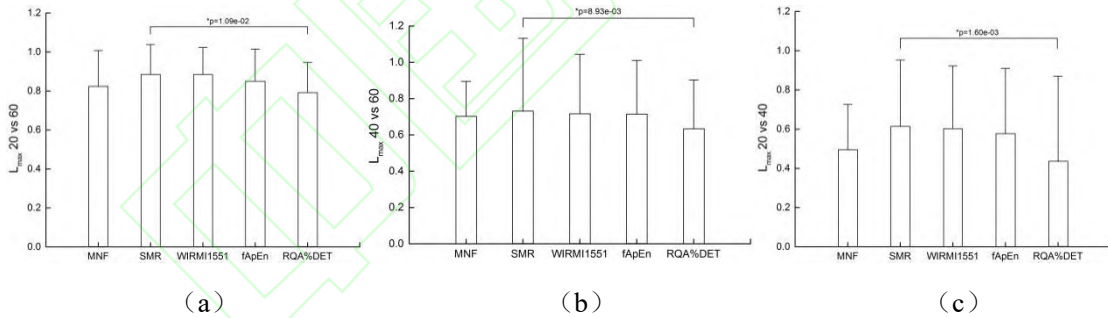


图 7 局部  $L_{max}$  量化分析

Fig.7 Local Quantitative Analysis of  $L_{max}$

图 7 (a) 为 20%与 60%MVC 的  $L_{max}$  量化分析结果。结果显示 SMR 与 WIRM1551 的  $L_{max}$  为最大值, 均为 0.883, 表明 SMR 与 WIRM1551 在区分 20%与 60%MVC 的疲劳程度的能力最出色。而 RQA%DET 是 5 种方法中评价疲劳程度效果最差的。SMR 与 RQA%DET 的差异具有统计学意义 ( $p=1.09e-02$ )。表明 SMR 与 WIRM1551 在疲劳程度差异较大时有最强的区分疲劳程度能力。

图 7 (b) 为 40%与 60%MVC 的  $L_{max}$  量化分析结果。结果表明 MNF、SMR、WIRM1551 与 fApEn 均呈现较大的  $L_{max}$  平均值, 说明 4 种方法在评价大负载引起的疲劳程度均有很出色的能力。其中 SMR 是最出色的,  $L_{max} = 0.766$ , 且与 RQA%DET ( $p=8.93e-03$ ) 存在显著性差异。而 RQA%DET

区分疲劳程度的能力最差。说明在疲劳程度较大时, MNF、SMR、WIRM1551 与 fApEn 均具有较好的区分能力, 且 SMR 是最好的。

图 7 (c) 为 20%vs40%MVC 的  $L_{max}$  量化分析结果。结果表明 SMR 的  $L_{max}$  平均值最大, 最大值  $L_{max} = 0.622$ , 且与 RQA%DET ( $p=1.6e-03$ ) 存在显著性差异。RQA%DET 的  $L_{max}$  平均值仍是最小的。说明在疲劳程度较小的情况下, SMR 仍然拥有最强的区分肌肉疲劳程度的能力。

综上所述, SMR 相较于另外 4 种方法在不同负载下都具有最大的  $L_{max}$  平均值, 说明 SMR 在区分不同负载引起的肘关节肌肉疲劳程度的能力最出色。WIRM1551 虽没有 SMR 那么出色, 但在不同负载下均具有较好的区分疲劳程度的能力。



MNF 与 fApEn 仅在疲劳程度大或疲劳差异较大时具有较好的区分能力。而 RQA%DET 在不同负载下具有最小的  $L_{\max}$  平均值,说明 RQA%DET 在不同负载下引起的肌肉疲劳程度区分性最差。

## 5 结论

通过采集肱二头肌的表面肌电信号计算了 5 种常见肌肉疲劳评价算法,从评价算法的抗干扰性与区分疲劳程度的能力两个方面量化其疲劳评价性能,以  $R^2$  大小体现抗干扰能力的强弱,以  $L_{\max}$  展现区分疲劳程度的能力。实验结果显示,频谱距 SMR 同时拥有最大的  $R^2$  和  $L_{\max}$  值,即频谱距 SMR 在评价肘关节肌肉疲劳时具有最好抗干扰和区分疲劳程度的能力。故频谱距 SMR 能够更加及时有效的检测出肘关节肌肉疲劳状态。因此在今后研究肘关节屈曲运动的肌肉疲劳时,建议使用频谱矩 (SMR) 进行实时监测。

## 参考文献:

- [1] Christos Karagiannopoulos, Jessica Watson, Sarah Kahan, et al. The effect of muscle fatigue on wrist joint position sense in healthy adults[J]. Journal of Hand Therapy, (2019) 1-9
- [2] 张博文, 基于 SEMG 的肌肉疲劳度评估及其在上肢康复产品设计中的应用研究[D]. 浙江理工大学, 2019 年  
(Zhang Bo-wen, Evaluation of muscle fatigue and its application in upper limb rehabilitation products based on sEMG[D]. Zhejiang Sci-Tech University, 2019)
- [3] Alberto Greco, Gaetano Valenza, Antonio Bicchi, et al. Assessment of muscle fatigue during isometric contraction using autonomic nervous system correlates[J]. Biomedical Signal Processing and Control 2019 (51) :42-49
- [4] Lorenz Kahl, Marcus Eger, Ulrich G. Hofmann. Effects of sampling rate on automated fatigue recognition in surface EMG signals[J]. Current Directions in Biomedical Engineering 2015; 1:80-84
- [5] Manuel Schimmack Paolo Mercorelli. Linux-Based Embedded System for Wavelet Denoising and Monitoring of sEMG Signals Using an Axiomatic Seminorm[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(4):278-283
- [6] Xiaozeng Gao, Xiaoyan Yan, Ping Gao, et al. Automatic Detection of Epileptic Seizure Based on Approximate Entropy, Recurrence Quantification Analysis and Convolutional Neural Networks[J]. Journal Pre-proof, 2019
- [7] Jiateng Hou, Yingfei Sun, Lixin Sun, et al. A Pilot Study of Individual Muscle Force Prediction during Elbow Flexion and Extension in the Neurorehabilitation Field[J]. sensors, 2018(16):1-15.
- [8] 张海红, 王健, 杨红春. 肱二头肌离心和向心收缩的肌电信号特征[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2006, 40(11):1937-1941  
(Zhang Hai-hong, Wang Jian, Yang Hong-chun. Surface electromyographic dynamics during biceps brachii eccentric and concentric contractions[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2006, 40(11):1937-1941
- [9] 张肃. 基于表面肌电技术对人体上肢肌肉疲劳过程中中枢共驱动的研究[J]. 中国运动医学杂志, 2017, 36(4):290-295  
(Zhang Su. Study on Neural Co-activation during Human Upper Limb Muscle Fatigue Based on Surface Electromyography[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2017, 36(4):290-295)
- [10] 闫正祥. 基于 sEMG 信号的人体上肢动作识别与肌肉疲劳检测[D]. 北京工业大学, 2018 年  
(Yan Zheng-xiang. Human upper body movement recognition and muscle fatigue detection based on sEMG signal[D]. Beijing University of Technology, 2018)
- [11] 王蒙, 姚海霞. 基于表面肌电的运动员上肢肌疲劳特征分析[J]. 生物医学工程研究, 2018, 37(4):487-491  
(Wang Meng, Yao Hai-xia. Analysis of the characteristics of upper limb muscle fatigue of athletes based on surface electromyography [J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2018, 37(4):487-491)
- [12] 徐文会, 刘开华, 王丽婷. 使用改进 Welch 法估计心率变异功率谱分析人体疲劳程度[J]. 生物医学工程杂志, 2016, 33(1):67-77  
(Xu Wen-hui, Liu Kai-hua, Wang Li-ting. Estimation of the Power Spectrum of Heart Rate Variability Using Improved Welch Method to Analyze the Degree of Fatigue[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2016, 33(1):67-77)
- [13] Dimitrov GV, Arabadzhiev TI, Mileva KN, et al. Muscle fatigue during dynamic contractions assessed by new spectral indices[J]. Med Sci Sports Exerc, 2006;38(11):1971-9
- [14] M. González-Izal, A. Malanda, I. Navarro-Amézqueta, et al. EMG spectral indices and muscle power fatigue during dynamic contractions[J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2010 (20) :233-240
- [15] Moses O. Sokunbi, George G. Cameron, Trevor S. Ahearn, et al. Fuzzy approximate entropy analysis of resting state fMRI signal complexity across the adult life span[J]. Medical Engineering and Physics, 2015(37) :1082-1090
- [16] Miriam González-Izal, Armando Malanda, Esteban Gorostiaga, et al. Electromyographic models to assess muscle fatigue[J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2012 (22) 501-512
- [17] 王荣桥, 刘飞, 胡殿印等. 基于贝叶斯理论的低循环疲劳寿命模型不确定性量化[J]. 航空学报, 2017, 38(9):1-9  
(Wang Rong-qiao, Liu Fei, Hu Dian-yin et al. Uncertainty quantification in low cycle fatigue life model based on Bayesian theory[J]. Acta Aeronautica Sinica, 2017, 38(9):1-9)
- [18] Lorenz Kahl, Ulrich G. Hofmann. Comparison of algorithms to quantify muscle fatigue in upper limb muscles based on sEMG signals[J]. Medical Engineering and Physics, 2016 (38) 1260-1269

[19] Wang Jiachi, Chan R C, Wu Hanlin, et al. Effect of pillow size preference on extensor digitorum communis muscle strength and electromyographic activity during maximal contraction in

healthy individuals: A pilot study. Journal of the Chinese Medical Association, 2015, 78(3): 182-187

