

- [33] 健康中国行动(2019—2030年):总体要求、重大行动及主要指标[J]. 中国循环杂志, 2019, 34(09): 846-858.
- [34] 严慧深, 卜平, 熊彦. 非医学专业人群使用 AED 的可行性和需求分析[J]. 医学理论与实践, 2017, 30(23): 3578-3579.
- [35] 李志杨. 便携式心脏除颤器的设计及开发[D]. 辽宁工业大学, 2018.
- [36] 邱正. “救命神器”何时遍地开花[N]. 青岛日报, 2021-06-30(017).
- [37] Hideo Mitamura, Taku Iwami, Yoshihide Mitani, Satoshi Takeda, Seiji Takatsuki. Aiming for Zero Deaths: Prevention of Sudden Cardiac Death in Schools - Statement From the AED Committee of the Japanese Circulation Society - [J]. Circulation Journal, 2015, 79(7):
- [38] 曹若湘, 耳玉亮, 陶莹. 北京市 549 名中学生参与式急救知识技能培训效果评估[J]. 中国学校卫生, 2010, 31(04): 415-416+418.
- [39] 陈文颖, 张香玉, 袁微. 高中生心肺复苏知识认知及需求情况调查[J]. 全科护理, 2011, 9(28): 2543-2544.
- [40] 楼婷, 柏晓玲, 江智霞. 我国中、小学生救护知识普及与培训现状的文献分析及对策研究[J]. 重庆医学, 2013, 42(06): 671-673.
- [41] 陈建华, 刘有为, 程瑞玲. 公众急救知识普及性培训方法调查[J]. 中国误诊学杂志, 2005(14): 2785-2786.
- [42] 朱水莲. 高校灾害应急教育现状、问题与对策分析[D]. 南昌大学, 2012.
- [43] 刘静馨. 护理高仿真模拟教学中学生行为表现自评量表的研制[D]. 广州医学院, 2011.
- [44] 何新. 我国高校应急管理协同机制研究[D]. 电子科技大学, 2010.
- [45] 高晓麟, 常芸. 我国大众健身人群运动猝死的调查研究[J]. 中国体育科技, 2009, 45(02): 83-87.
- [46] 赵瑜. 打造高质量民心“通道”——全国政协十三届四次会议委员通道综述[J]. 中国政协, 2021(05): 59-61.
- [47] 成都市社会急救医疗管理条例[N]. 成都日报, 2021-08-09(007).
- [48] 黄文松. 关于交通安全宣传教育工作的思考[J]. 江苏警官学院学报, 2007(01): 16-19.
- [49] 田宁. 高校公共安全教育实践研究[J]. 民族教育研究, 2011, 22(02): 36-39.

## sEMG 用于评估神经肌肉疲劳的研究综述

王文昭<sup>1</sup> 张彦龙<sup>1</sup> 宋成龙<sup>1</sup>

(1. 牡丹江师范学院 体育与健康科学学院 黑龙江省牡丹江市 157011)

**摘要:** 本文采用了文献资料研究法, 对各 sEMG 分析方法针对神经肌肉疲劳的评估效果进行概观性梳理。传统线性 sEMG 对于不同种类运动中肌肉疲劳评价的适用性、非线性 sEMG 分析方法评估疲劳的可行性, 以及阵列式 sEMG 时空特征与神经肌肉疲劳的关系均得到了国内外学者的广泛研究。

**关键词:** 表面肌电图; 神经肌肉疲劳; 阵列式表面肌电图

在各项运动和体能训练中, 运动员疲劳的评价和恢复都是十分重要的课题。在体育竞赛和训练的全过程中关注运动性神经肌肉疲劳的问题, 不仅有利于提升运动员的训练效果, 还可为运动后恢复提供切实依据, 预防疲劳带来的损伤, 从而提高运动员的竞技水平<sup>[1]</sup>。由于引起运动性神经肌肉疲劳的原因极其复杂, 并

且不同研究方向对于疲劳的评价方法不尽相同,使得运动性神经肌肉疲劳至今并无广泛应用的黄金指标<sup>[2]</sup>。普遍认为导致运动性疲劳的主要原因可分为中枢和外周两种机制,其中中枢神经系统对于运动的控制调节在近年来是研究的热点。而运动性肌肉疲劳作为神经系统调控运动过程中的一大特点较易于检测和量化,并且在体能训练等各项体育活动中,肌肉通过持续或连续收缩产生力来维持人体姿势或产生动力性的环节运动是一项基本的共同特点,因此肌肉疲劳的评价在一个世纪以来都是学界关注的重点课题<sup>[3]</sup>。而在所有肌肉疲劳的评价方法中,被认为比较可靠和几乎不受运动方式特异性影响的评价方法是表面肌电图(Surface Electromyography, sEMG)<sup>[4]</sup>。由于运动性肌肉疲劳成因的复杂性和肌电图监测手段的条件选择性,学界对于肌电图评价运动性肌肉疲劳的多方实证研究非常值得探讨和总结。本文旨在通过对于国内外利用 sEMG 评价运动性肌肉疲劳相关研究的总结和分析,提出使用 sEMG 评价运动性肌肉疲劳的基本认识,阐述 sEMG 使用的要点,比较各项 EMG 指标用于疲劳评价的优劣以及展望 sEMG 评价肌肉疲劳的前沿方向等,以帮助研究者更好地深化此方向下肌肉疲劳评价的研究工作。

## 1 运动性疲劳的定义与分类

运动性疲劳是指由于运动过度而引发身体工作能力下降的现象,是运动到达一定阶段人体出现的一种正常生理现象。运动性疲劳的分类方法多样:依据疲劳发生的系统可分为骨骼肌疲劳、心血管疲劳及呼吸系统疲劳等;依据疲劳的速度依赖性可分为快速疲劳和耐力疲劳;依据疲劳的发生范围可分为整体疲劳和局部疲劳;而依据疲劳的程度又可分为轻度疲劳、中度疲劳、重度疲劳等<sup>[5]</sup>。值得注意的是,不同类型的运动所产生的疲劳的特点不尽相同,因此在进行运动性疲劳的评定时要充分考虑作为评定目标的运动的特异性,以精确地选取评定方法、评定指标以及指标的敏感范围。

## 2 神经疲劳对肌肉工作的影响

有研究认为,长时间运动产生疲劳后,大脑皮质细胞中各生化指标的变化会影响脑细胞内 ATP 再合成的速率、大脑皮质细胞的兴奋性以及发放神经冲动的频率等,从而影响神经系统对于运动系统的支配能力,进而导致运动表现的下降。而运动中代谢产物的堆积也会对  $\alpha$  运动神经元发放神经冲动的能力产生抑制,从而降低肌肉的工作能力。在神经-肌肉接头处的神经递质也会随运动的进展出现释放障碍的现象,导致肌细胞膜去极化过程减弱,收缩能力下降。但由于影响神经疲劳的因素过于复杂,除进行生化指标的监控外,较为易行的方式是对于神经疲劳的特征性影响——肌肉疲劳的直接监测。而有研究表明,在进行次最大随意收缩(Sub-maximal Voluntary Contraction)的情况下,不仅中枢和外周性疲劳的进展相较于最大随意收缩(Maximal Voluntary Contraction, MVC)更为缓慢,且在次最大随意收缩的情况下自觉用力程度和肌肉的力量输出之间产生了明显的不匹配现象。因此在直接测量肌肉疲劳的方式中 sEMG 方案的客观性与优势便凸显出来了<sup>[6-8]</sup>。

## 3 sEMG 概述

不同于需要侵入肌肉内部的针式电极, sEMG 监测方法中所使用的表面电极不会为受试者带来任何创伤,并且随着技术的进步,无线式的 sEMG 监测设备也为肌肉电信号的监测带来了极大的便利性,让受试者从设备的桎梏中解放出来,

从而展现出完备的、满足实验分析需要的技术动作。

表面肌电图是运动单位在发生收缩时,动作电位在一个特定电极位点处总和形成的信号。由于表面肌电采集技术的特性,sEMG 原始信号需要经过滤波、整流、标准化等基本处理后方可进行分析。sEMG 的分析手段主要有线性和非线性两种:前者主要包括以积分肌电值(Integrated EMG, iEMG)、肌电均方根值(Root Mean Square, RMS)等为主的时域分析和以中位频率(Median Frequency, MF)、平均功率频率(Mean Power Frequency, MPF)等为主的频域分析;后者主要包括 sEMG 信号关联维度、Lyapunov 指数等。对于以上一个或多个、单独或联合的分析指标的妥善运用,是进行 sEMG 信号分析的基础。

## 4 肌电疲劳指数 (Electromyography Fatigue Index)

有研究表明,肌肉的等长收缩持续的时间越长,肌电的频域分析指标倾向于越小,并且这些频域指标的下降均与 MVC 的下降成基本的正相关关系。这种肌电频域指标在运动负荷与时间的影响下的变化被研究者使用斜率(Slope)来表示,作为通过肌电来评价疲劳的“指数”,更有研究者直接指出肌电疲劳指数可以通过肌电指标和运动特征之间的回归系数来精确表示<sup>[9-10]</sup>。事实上,不仅是 MF 等肌电频域指标,运动神经的传导速度(Conduction Velocity, CV)等指标也和运动负荷与时间之间存在着类似的关系——证明还有许多指标具有采取斜率分析的潜力。因此肌电疲劳指数实际上为我们进行肌肉疲劳评价提供了一种计算范式。

## 5 sEMG 评价神经肌肉疲劳的基本范式

### 5.1 时频域分析指标评价肌肉疲劳

与上述肌电疲劳指数的概念相似,许多研究者主要通过研究肌电时频域分析的指标来确定肌肉的疲劳状态。针对不同的运动的肌肉工作特征,许多研究者希望寻找到评价不同运动模式的最适肌电指标。王乐军等<sup>[11-12]</sup>认为,肌肉的疲劳特点在较低频率和较高频率的动态收缩运动之间是不同的、在动力性收缩运动和静力性收缩运动之间是不同的,并且其特别指出,重复或持续的低负荷运动所导致的疲劳不同于极量负荷所导致的疲劳,且前者更不易通过肌肉的输出功率来判断疲劳的存在,故此类应用场景便为 sEMG 的优势提供了支持。他们发现,在持续的低负荷等长屈肘运动中<sup>[11]</sup>,屈肘肌群(肱二头肌,肱桡肌)sEMG 的 RMS 随运动持续增长时间的增长表现出逐渐增加的趋势,而 MF、MPF 等随运动持续增长时间的增长表现出逐渐减小的趋势,并且 RMS 指标在评价疲劳的敏感性和稳定性方面表现良好,因此 RMS 不失为用于评价等长收缩下肌肉疲劳状态的优秀指标。

在频域分析中,快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)一直以来都是被广泛应用的一种计算方式,它可用于得到信号的频谱信息,从而更方便地对信号的频域特征进行分析。但是 FFT 不能反映信号的局部特性,基于这项考虑,小波分析(Wavelet Analysis)便被引入肌电信号的频域分析工作中,它可以从一段肌电信号中提取出几段带宽相等的信号,提取出信号后可以选取一个较小频率范围内的信号用来研究,它既可以提供信号的整体信息,又可以提供局部时段内信号变化程度的信息<sup>[13]</sup>。与 Soo 等<sup>[14]</sup>的预测结果相似,王乐军等<sup>[15]</sup>发现在某些运动后,sEMG 经小波分析后的频率谱向低频方向转移,这可能是由于神经肌肉传导速度的减慢等缩放比例因素变化所引起的。在王乐军等针对快速速点

击鼠标这类低负荷、高频率、小幅度的动态收缩运动中<sup>[12]</sup>，经小波分析得出的 MPF 指标针对此类运动表现出了最好的敏感性、稳定性和可重复性。综上所述，依据不同类型运动的特征，研究者可以选择不同的肌电指标来评价肌肉的神经肌肉疲劳状态。

## 5.2 非线性分析指标评价肌肉疲劳

基于运动神经系统的非线性本质考虑，传统的线性时频域分析方式并不能为 sEMG 的分析提供最优解，而非线性的肌电分析可以较好揭示 sEMG 信号的本质，从而提高对神经肌肉疲劳的评估效果。

复杂度是常用以评估肌肉疲劳的一种非线性分析指标，其中 Lempel-Ziv 复杂度  $C(n)$  是最常用的指标之一。当肌肉收缩的模式具有非线性和非稳态等特点时，采用对以上运动特点不敏感的 Lempel-Ziv 复杂度分析是一种相对更符合运动特征的做法<sup>[12]</sup>。根据蔡立羽等<sup>[16]</sup>的研究，Lempel-Ziv 复杂度  $C(n)$  的大小反映了肌电信号随时间序列的进展出现新模式的速率，反映了此时间序列中信号接近随机运行的程度。王健等<sup>[17-18]</sup>通过研究发现，Lempel-Ziv 复杂度  $C(n)$  会随着时间序列的进展呈单调递减型变化，并且具有良好的负荷强度依赖性，但在王乐军等<sup>[12]</sup>的研究中，复杂度  $C(n)$  在快速点击鼠标的运动中并未表现出较好的稳定性与敏感性。

其他处于非线性肌电分析研究前沿方法还有通过定量递归分析 (Recurrence Quantification Analysis, RQA) 方法计算出的确定线段百分比 (% Determinism, %DET) 和 Lyapunov 指数等。

## 5.3 阵列式 sEMG 评价肌肉疲劳

由于 sEMG 是各运动单位 (Motor Units, MU) 发放的动作电位序列 (Action Potential Train, APT) 在体表的电极置放处相叠加而形成的一种信号，故传统的表面电极并不能反映各运动单位相对准确的活动信息；且神经支配区 (Innervation Zone, IZ) 与表面电极之间的位置关系会对肌电信号产生较明显的影响<sup>[19-20]</sup>。阵列式表面电极不同于传统表面电极的简单线性排布方式，在形态上采用行列相间的矩阵排布形式，对于目标肌肉运动单位的探测具有较高的分辨率，这种特性除可以使表面电极对运动单位复杂的电活动产生较好的整体性探测，还可以有效确定 IZ 的位置，从而为电极的放置提供科学的参考依据。

在阵列式表面电极各项优势的基础上，研究者充分利用其相对较高的时空分辨率的特性探索了使用阵列式 sEMG 分析评价肌肉疲劳的基本范式。Tucker 等<sup>[21]</sup>通过 RMS 指标进行了地形图 (Topographical Maps) 的构建，并在肌肉的疲劳实验中观测 RMS 地形图中质心 (Centroid)，即在阵列式电极总探测范围内的 RMS 活动中心 (Center of Activity) 的空间变化，最终发现其目标肌肉 (竖脊肌) 的 RMS 地形图的活动中心会随着动作时间而发生移动，因此确定了阵列式 sEMG 信号相对于肌肉疲劳所产生的时空变化特征。此外通过阵列式 sEMG 信号得到的肌肉激活的时空特征可以用于解释肌肉在疲劳之后所采用的不同适应策略。

## 6 小结

关于 sEMG 评价神经肌肉疲劳的相关研究仍有待查阅，大量针对评价神经肌肉疲劳的 sEMG 指标可靠性的研究可以为今后研究者将此类方法应用于实践打下

坚实理论基础。通过对 sEMG 监测技术和 sEMG 信号分析方式的深入研究,可以让研究者进一步掌握通过 sEMG 评价神经肌肉疲劳的理论与方法。

#### 参考文献:

- [1] AMENT W, VERKERKE GJ. Exercise and fatigue[J]. Sports medicine, 2009, 39(5):389-422.
- [2] 夏锐, 张希妮, 等. 运动性疲劳的生物力学评价及其与损伤关系研究进展[J]. 医用生物力学, 2020, 35(1):6.
- [3] GIBSON H, Edwards RHT. Muscular exercise and fatigue[J]. Sports medicine, 1985, 2(2):120-132.
- [4] 李建华, 王健. 表面肌电图诊断技术临床应用[M]. 浙江大学出版社, 2015.
- [5] 王瑞元, 运动生理学[M]. 人民体育出版社, 2002.
- [6] MEEUSEN R, et al. Central fatigue[J]. Sports Medicine, 2006, 36(10):881-909.
- [7] ALLMAN BL, RICE CL. Neuromuscular fatigue and aging: central and peripheral factors[J]. Muscle&nerve, 2002, 25(6):785-796.
- [8] TAYLOR JL, GANDEVIA SC. A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and maximal voluntary contractions[J]. Journal of applied physiology, 2008, 104(2): 542-550.
- [9] LINDSTROM L, et al. An electromyographic index for localized muscle fatigue[J]. Journal of applied physiology, 1977, 43(4): 750-754.
- [10] KANKAANPAA M, et al. Lumbar paraspinal muscle fatigability in repetitive isoinertial loading: EMG spectral indices, Borg scale and endurance time[J]. European journal of applied physiology and occupational physiology, 1997, 76(3):236-242.
- [11] 王乐军, 陆爱云等. 表面肌电信号指标评价低负荷等长收缩诱发屈肘肌疲劳的敏感性和稳定性分析[J]. 中国运动医学杂志, 2013, 32(2):117-123.
- [12] 王乐军, 陆爱云, 等. sEMG 指标监测快速点击鼠标致指伸肌疲劳的适用性评价研究[J]. 体育科学, 2013, 33(1):62-71.
- [13] CANAL M R. Comparison of wavelet and short time Fourier transform methods in the analysis of EMG signals[J]. J Med Syst, 2010, 34(1):91-94.
- [14] Soo Y, et al. Simultaneous measurement of force and muscle fatigue using frequency-band wavelet analysis. 30th Annual International IEEE EMBS Conference, 2008: 5045-5048.
- [15] 王乐军, 黄勇等. 小波包分析与人工神经网络相结合探索运动性肌肉疲劳过程中 sEMG 变化特征[J]. 体育科学, 2009, 29(12):51-55.
- [16] 蔡立羽, 王志中等. 基于复杂性度量的表面肌电信号分类方法. 生物物理学报, 2000, 16(1):119-124.
- [17] 王健, 方红光等. 运动性肌肉疲劳的表面肌电非线性信号特征. 体育科学 2005, 25(5):39-43.
- [18] 刘加海, 王健等. 局部肌肉疲劳的表面肌电信号复杂度和熵变化. 生物物理学报 2004, 20(3):198-202.
- [19] BARBERO M, et al. Reliability of surface EMG matrix in locating the innervation zone of upper trapezius muscle. Journal of electromyography and kinesiology, 2011, 21(5):827-833.
- [20] MESIN L, et al. Surface EMG: the issue of electrode location. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2009, 19(5):719-726.
- [21] TUCKER K, et al. Electromyographic mapping of the erector spinae muscle with varying load and during sustained contraction. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2009, 19(3):373-379.