

文章编号:1000-582X(2004)09-0096-03

# 基于互 Wigner-Ville 分布的表面肌电信号瞬时频率估计\*

牟永阁,彭承琳,郑小林

(重庆大学生物工程学院生物力学与组织工程教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘要:**当一块肌肉完成持续的收缩时,所记录的表面肌电信号的分析是一个用于评价局部疲劳进行性的有用的工具。在肌肉静态收缩期间,表面肌电信号功率谱的平均频率和中值频率常被用作肌肉疲劳的指示器。为了评价周期性动态收缩期间的局部肌肉疲劳,针对肌肉动态收缩时表面肌电信号的特点,提出了基于互 Wigner-Ville 分布的瞬时频率检测方法。通过一个类似于表面肌电信号统计性质的模拟的随机过程,评价了这一算法的估计误差。理论和实验证明,瞬时频率可以在较低的信噪比下很好地适合跟踪由于肌肉疲劳引起的频谱变化。

**关键词:**表面肌电信号;瞬时频率;互 Wigner-Ville 分布

**中图分类号:**Q 811.3

**文献标识码:**A

在肌肉持续的收缩期间,表面肌电信号(Surface myoelectric signal, SMES)是所募集的运动单元动作电位序列在时间和空间上的迭加。运动单元动作电位的形状和运动单元发放率的改变,将导致 SMES 功率谱密度函数发生变化。在恒力、等长这一收缩样式中,SMES 功率谱变化的主要现象是肌肉内生化学副产品的积聚,代谢物的积聚引起一个进行性的组织间隙液体 pH 值的改变,依次引起沿着肌肉纤维动作电位传播方向的传导速度的下降。这一复杂的电生理现象被称为局部肌肉疲劳<sup>[1]</sup>,可以通过 SMES 频谱的变化来量化评价。

在恒力、等长收缩期间检测到的 SMES 可被认为是具有高斯幅度分布的随机过程,可用相关图和周期图法估计信号的功率谱。提取信号的中值频率或平均频率跟踪由于肌肉疲劳导致的功率谱的变化。然而,当肌肉不再维持等长或恒力收缩,即肌肉进行动态收缩时,平稳性假定不再成立。此时 SMES 呈现出很强烈的非平稳性,不能采用基于经典的频谱分析方法来分析 SMES,必须采用适当的处理非平稳信号的方法。Cohen 类时频分析就是处理非平稳信号常用的方法之一。Bonato 等人<sup>[2]</sup>定义了周期性动态收缩期间评价肌肉疲劳的 SMES 的瞬时频谱参数,它们是瞬时中值频率和平均频率,是基于 Cohen 类时频变换的 Wigner-Ville 分布(WVD)等得出的。但是,WVD 只在信噪比较高的情况下才具有较好的性能。

文中提出的基于互 Wigner-Ville 分布(XWVD)<sup>[3-4]</sup>的瞬时频率(Instantaneous frequency, IF)检测应用于肌肉疲劳的跟踪可在更低的信噪比情况下实现。

## 1 瞬时频率的估计

### 1.1 WVD 与 XWVD

由于以 Wigner-Ville 分布为代表的 Cohen 类时频分析技术,不要求所分析信号是平稳的,且这类分布具有时间和频率移不变的性质,当目的是使信号的时频表示与潜在的生理现象相关联时,这一特性非常重要。所以,它们很适合于研究动态肌肉收缩期间的非平稳 SMES。

Wigner-Ville 分布定义为:

$$\text{WVD}_{x,x}(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (1)$$

其中, $t$  为时间, $f$  为频率, $\tau$  为辅助变量(时延)。WVD 的主要优点之一是有非常好的时间和频率分辨率。但对于多分量信号,它也有不可避免的交叉项的出现。用于实际信号的研究,须将实际信号进行 Hilbert 变换成解析信号后,才能进行 WVD 运算。为了抑制交叉项,可

\* 收稿日期:2004-04-14

作者简介:牟永阁(1963-),男,吉林市人,重庆大学博士研究生,主要从事生物医学信号处理研究。

以用平滑方法或者加核函数的方法,但 WVD 的时频聚集性也随之降低<sup>[5]</sup>。

信号  $x(t)$  与  $y(t)$  的互 Wigner - Ville 分布定义为:

$$\text{WVD}_{x,y}(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) y^*(t - \frac{\tau}{2}) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (2)$$

XWVD 对线性调频信号具有良好的估计性能。

### 1.2 瞬时频率与时频分布

设信号为  $s(t)$ , 与其相关联的解析信号为:

$$z_s(t) = a(t) e^{j\varphi(t)} \quad (3)$$

则瞬时频率定义为:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (4)$$

当 Cohen 类时频分布满足一定的条件时,可定义 IF 为时频分布的一阶矩,即信号谱的平均频率:

$$f(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f C(t,f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(t,f) df} = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (5)$$

其中  $C(t,f)$  为 Cohen 类时频频谱。

满足这一条件的典型是 WVD,如果用 WVD,那么式(5)中的时频分布的一阶条件矩就是 IF 的一个无偏估计量。与定义一样,应用基于 WVD 的 IF 的估计在有噪声时估计方差很大。

### 1.3 基于 XWVD 的 IF 估计

由于大多数双线性时频分布强调了噪声的影响,限制其在较低信噪比(SNR)条件下的应用。为此,采用基于 XWVD 的 IF 估计方法。按照 Boashash 等人提出的 IF 估计算法,在某一个 SNR 阈值之上,估计有很低的方差,满足 Cramer - Rao(CR) 界。

基于 XWVD 的 IF 估计算法步骤如下:

- 1) 获取一个 IF 估计,并由其构成一个单位幅度信号;
- 2) 用当前的信号估计作为参考,构成 XWVD,并将分布的谱峰的出现看作是 IF 的一个估计;
- 3) 当用最后计算的 IF 的估计作为参考时,重复上述过程(步骤 2),直到 IF 的估计与前一个估计相差小于一个给定的阈值。

## 2 仿真试验及结果

考虑一个 SMES 被假设为一个高斯随机过程的肌电信号模型<sup>[6]</sup>,是将高斯白噪声序列通过一个带通滤波器来获得的。调节带通滤波器的截止频率可以模拟不同的信号特性。然后得出 IF 理论值,并与应用算法得到的值进行比较。在研究动态收缩的许多应用中,

SMES 的持续时间常常是在 500 ms 或更短的时间范围。生成不同类型的脉冲串以研究 IF 估计的特性。通过不同的时间和频率范围产生这些脉冲串。采样频率为 1 024 Hz。

为了研究估计对附加噪声的灵敏度,采用了不同的 SNR 合成模拟信号,即给信号加上高斯白噪声。基于 XWVD 估计算法的收敛阈值,即计算算法在持续的 2 个步骤之间所估计的 IF 的差值取为 500<sup>[3]</sup>。为了模拟非平稳情况,调节带通滤波器的截止频率以产生一个 IF 具有非线性变化过程的非平稳 SMES。

图 1 给出了通过模拟的非平稳 SMES 的 100 次实现得出的平均 IF 估计。模拟了 IF 的二次型减幅过程。图中粗黑线为理论值,可见估计量具有正确地跟踪 SMES 的频率内容迅速变化的能力。图 2 和图 3 分别说明了标准差和偏差对于大于 20 dB 的 SNR 值都是足够低的。对于较低的 SNR,估计的偏差增大而标准差几乎保持恒定。表明了估计的标准差几乎不依赖于 SNR。改变带通滤波器的特性,估计的偏差和标准差没有显著变化<sup>[7]</sup>。

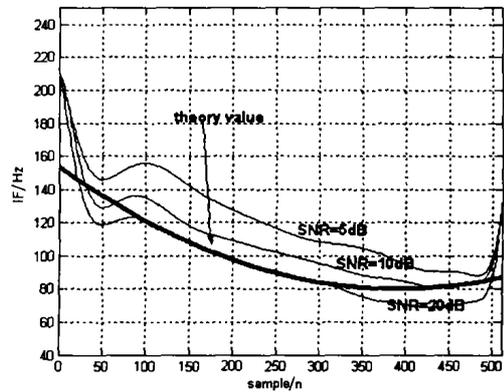


图 1 模拟的瞬时频率和理论值的比较

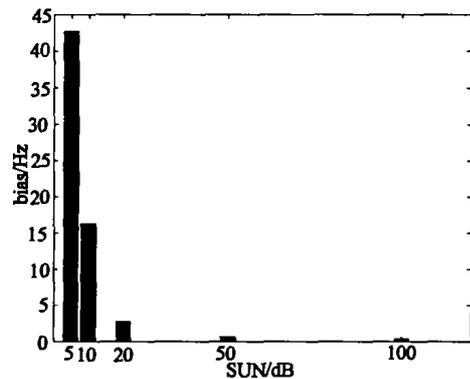


图 2 瞬时频率估计的偏差

## 3 实际 SMES 的应用

实际取自于从股外侧肌上记录的 SMES。受试者进行反复的膝关节弯曲和伸展运动,50% MVC。测试期间,受试者自由选择周期运动的频率,尽可能平稳运动。

SMES 为一系列的脉冲串组成,通过 XWVD 方法得出的 IF 在不同脉冲串内的时间过程显示出随着时

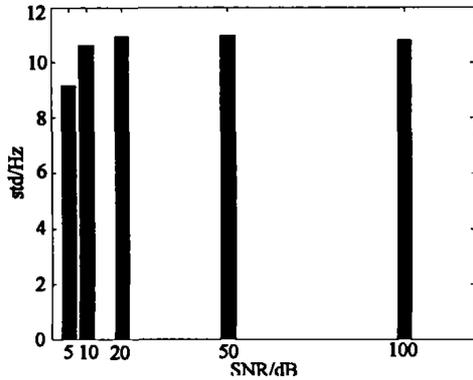


图3 瞬时频率估计的标准差

间的推移下降的趋势,与所预期的肌肉疲劳的电表现是一致的。同时在同一脉冲串内 IF 的时间过程没有规律性的变化。

因为在周期性动态收缩期间,SMES 显示出两种非平稳性:“慢”的和“快”的非平稳性。“慢”的非平稳性当比较一连串的脉冲串的时候,它们是显而易见的。慢的非平稳性通常与肌肉组织内化学副产品的积累有关,因此反映了局部肌肉疲劳。“快”的非平稳过程归咎于很多现象,一些与中枢神经系统的控制策略有关,另外一些与运动的生物力学相关联。受试者进行反复的膝关节弯曲和伸展运动这种特定的收缩样式中的“快”的非平稳性是由于肌肉纤维长度的变化、肌肉纤维与检测电极之间的相对位移、肌肉形状的变化等因素,所以呈现不规则的变化。

#### 4 结 论

当作业的生物力学条件可能发生突然变化时,一些因素可引起 SMES 的频率内容发生突然变化。因此用于估计动态收缩期间 SMES 频谱内容变化的估计量必须对 SNR 的变化不敏感。事实上,当肌肉所施加的

力变化时,SNR 也发生变化,所以估计量对 SNR 不敏感对于动态收缩条件下的 SMES 的分析是一个很必要的前提条件。

常用的基于 WVD 的 IF 估计对信噪比要求较高,且对于多分量信号存在着交叉项影响,不利于估计 IF。基于 XWVD 的算法可应用于统计特性与动态收缩条件下 SMES 特性相类似的随机过程。理论和实验证明,基于 XWVD 的 IF 估计,可应用于在周期性动态肌肉收缩期间局部肌肉疲劳的电表现的定量评价。

#### 参考文献:

- [1] DE LUCA C J. Myoelectrical Manifestation of Localized Muscular Fatigue in Humans[J]. CRC Rev. in Biomed. Eng., 1985, 11(4):253-279.
- [2] BONATO P, ROY S H, KNAFLITZ M, et al. Time-frequency parameters of the surface myoelectric signal for assessing muscle fatigue during cyclic dynamic contractions[J]. IEEE Trans. Biomed. Eng., 2001, 48(7):745-753.
- [3] BOASHASH B, O'Shea P. Use of the cross Wigner-Ville distribution for estimation of instantaneous frequency[J]. IEEE Trans. on SP., 1993, 41(3):1439-1445.
- [4] RISTIC B, BOASHASH B. Instantaneous Frequency Estimation of Quadratic and Cubic FM Signals Using the Cross Polynomial Wigner-Ville Distribution[J]. IEEE Trans. On SP, 1996, 44(3):1549-1553.
- [5] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [6] STULEN F, DE LUCA C J. Frequency Parameters of Myoelectric Signal as a Measure of Muscle Conduction Velocity[J]. IEEE Trans. Biomed. Eng. 1981, 28:515-523.
- [7] HOF AT L. Errors in Frequency Parameters of EMG Power Spectra[J]. IEEE Trans. On Biomed. Eng., 1991, 38: 1077-1088.

## Instantaneous Frequency Estimation of the Surface Myoelectric Signal Wigner-Ville Distribution Based Technique

MU Yong-ge, PENG Cheng-lin, ZHENG Xiao-lin

(College of Bioengineering, Key Laboratory of Biomechanics & Tissue Engineering Under the State, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The analysis of the surface myoelectric signal is a valuable and the signal is recorded while a muscle is performing a sustained contraction tool for assessing the progression of localized fatigue. Mean and median frequencies of an electromyogram power spectrum are often used as indicators of muscular fatigue during static contraction. To evaluate muscle fatigue during cyclic dynamic contraction, according to the features of surface myoelectric signal during dynamic contraction, an instantaneous frequency detection technique based on cross Wigner-Ville distribution is proposed. The estimation error of the algorithm by means of a simulated stochastic process with statistical properties similar to the those of surface myoelectric signal. The theoretical and experiment validates that the instantaneous frequency suites well to tracking spectral changes due to muscle fatigue with very low SNR.

**Key words:** surface myoelectric signal; instantaneous frequency; cross wigner-ville distribution

(编辑 陈移峰)