

上海市教委第五期重点学科建设项目资助
上海市第四期教育高地实验教学项目资助
上海体育学院“085工程”建设项目资助

李玉章 编著

表面肌电 在体育中的应用

BIAOMIAN JIDIAN ZAI TIYU ZHONG DE YINGYONG



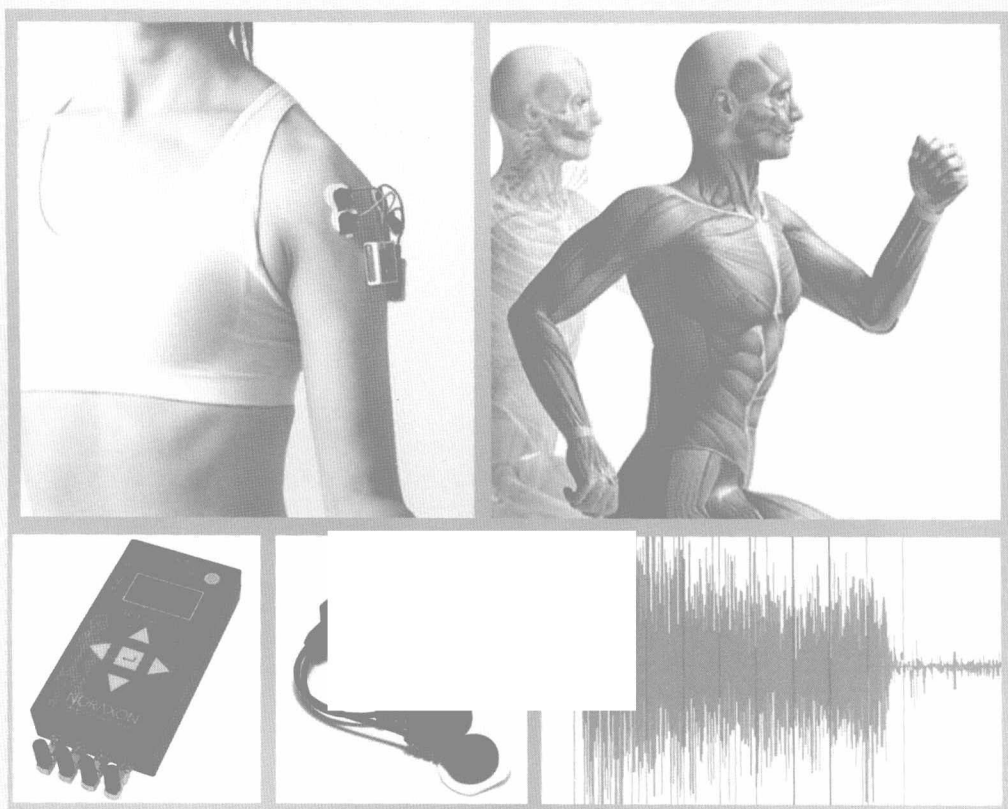
复旦大学出版社

上海市教委第五期重点学科建设项目资助
上海市第四期教育高地实验教学项目资助
上海体育学院“085工程”建设项目资助

李玉章 编著

表面肌电 在体育中的应用

BIAOMIAN JIDIAN ZAI TIYU ZHONG DE YINGYONG



 复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

表面肌电在体育中的应用/李玉章编著. —上海:复旦大学出版社,2015.5
ISBN 978-7-309-11225-2

I. 表… II. 李… III. 肌电图-应用-运动性疾病-肌肉损伤-诊断-研究
IV. ①R873.04②R741.044

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第021283号

表面肌电在体育中的应用

李玉章 编著

责任编辑/肖 芬

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路579号 邮编:200433

网址:fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

门市零售:86-21-65642857 团体订购:86-21-65118853

外埠邮购:86-21-65109143

当纳利(上海)信息技术有限公司

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 399 千

2015年5月第1版第1次印刷

ISBN 978-7-309-11225-2/R·1435

定价:65.00元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社有限公司发行部调换。

版权所有 侵权必究

前言 |

近年来,表面肌电测试作为无创性诊断肌肉工作特性的手段被广泛地应用到体育科研领域。例如,在完成某一动作时,肌肉的激活和失活顺序、持续工作时间、贡献率、放电量、疲劳度等,表面肌电测试为科学认识完成体育动作的主要肌肉的工作特性提供了可能。本书从表面肌电的基础理论知识和 Noraxon 表面肌电的测试及应用出发,对收集整理的近年来在体育科研领域运用表面肌电图等手段解决技术动作内在机制的相关研究文献进行介绍,较系统地归纳了大量的研究成果,以期今后的科学训练、体育科研和动作技术的发展提供参考。

需要特别说明的是,本书的编写主要参考 Noraxon 公司推荐的 *The ABC of EMG* 和欧盟推荐的 SENIAM 测试和分析标准,这些案例标准为我们进行测试和肌电数据分析提供了理论支撑。本书引用了大量的论文和文献作为案例进行展示,在此对这些作者表示感谢!另外,本书在编写过程中保留了部分专业术语的英文,主要是为了方便读者今后在仪器操作使用和阅读英文文献时对照参考,以及为某些读者撰写英文文章提供部分专业术语的中英文对照。

本书适用于拟采用表面肌电测试进行研究的科研人员、教师及学生等,也适用于对体育感兴趣的医疗工作者;同时,也可作为运动训练科学监控的实验教材。希望本书能为对表面肌电感兴趣的读者提供帮助。

由于本书的编写涉及面较广且编写时间仓促,不足之处敬请读者批评指正,以便再版时修改,在此表示感谢!

李玉章

2015 年 4 月于上海

第一篇 基础知识篇

第一章 表面肌电基础知识概述	003
第一节 表面肌电的产生过程	004
第二节 表面肌电的影响因素及解决方案	009
第三节 表面肌电在体育应用中的优势与不足	014
第二章 表面肌电仪及其运用	016
第一节 常用表面肌电仪介绍	016
第二节 无线表面肌电仪介绍	017
一、Noraxon TeleMyo System	017
二、BTS FREE EMG 肌电仪	021
三、Mega 表面肌电仪系列	022
第三节 表面肌电解析软件介绍	024
一、Chart TM 5 和 LabChart [®] 7 软件	024
二、DASYLab [®] 10 软件	025
三、MyoResearch XP 软件	027
四、Biometrics 分析软件	033
五、EMGworks [®] 软件系统	033
第四节 电极的种类及安放	034
一、电极的种类	034
二、电极安放位置的选择	035
三、安放电极的基本流程	052
第五节 信号检查程序	054
第三章 表面肌电信号的处理与分析	059
第一节 表面肌电信号的一般处理与分析	059
一、时域分析	059
二、频域分析	081
第二节 表面肌电信号的小波分析	083
第三节 表面肌电信号的非线性分析	086



第四节 表面肌电信号的其他处理与分析	090
一、对称性分析	090
二、时间分析	093
三、神经传导速度测量	096
四、包络线	096

第二篇 应用篇

第四章 表面肌电在体育科学领域的应用概述	101
第五章 肌力与表面肌电	106
第一节 肌肉力量与力量训练概述	106
一、肌肉力量	106
二、力量训练	108
三、神经系统的适应	109
第二节 不同肌肉收缩中的肌电表现	111
一、肌电与肌力的关系	111
二、肌肉运动过程中肌电变化的一般规律	114
第六章 运动疲劳与表面肌电	117
第一节 运动性疲劳概述	117
第二节 骨骼肌疲劳的表面肌电诊断与运用	118
一、表面肌电诊断肌肉疲劳的常用参数	118
二、不同收缩形式的肌肉运动与肌肉疲劳	121
第七章 运动中的表面肌电	125
第一节 运动中肌肉的收缩强度和贡献率	125
一、多种身体训练法的表面肌电特征	125
二、振动训练与肌肉激活	146
三、等速运动训练与肌肉激活	150
第二节 参与运动肌肉间的协调性与时序性	152
一、同步激活或共同收缩	152
二、点火时序(激活顺序)	160
三、定性分析	161
第三节 表面肌电在动作技术诊断中的运用	163
一、田径运动	163
二、体操运动	190
三、网球运动	192
四、羽毛球运动	206
五、乒乓球运动	207
六、足球运动	208
七、篮球运动	208

八、排球运动	209
九、举重运动	213
十、摔跤运动	214
十一、柔道运动	218
十二、游泳运动	219
十三、赛艇运动	220
十四、击剑运动	221
十五、散打运动	222
十六、拳击运动	225
十七、太极拳运动	225
十八、蹦床运动	228
十九、棒球运动	229
二十、速滑运动	230
二十一、射箭运动	232
二十二、射击运动	233
二十三、自行车运动	236
二十四、武术运动	242
二十五、高尔夫运动	243
第八章 表面肌电在生理学功能测试中的应用	246
第一节 预测肌纤维的类型	246
第二节 神经传导速度测试	247
第三节 表面肌电与肌肉组织代谢	248
第四节 动作学习与生物反馈	254
第九章 表面肌电在运动康复与功能诊断中的应用	256
一、水中康复训练与指导	256
二、膝关节功能诊断	258
三、偏瘫患者功能诊断	258
四、髌骨软化症	258
第十章 表面肌电综合应用案例指南	260
一、等速肌力与肌电同步测试实验设计	260
二、跳远起跳动作的生物力学分析	261
三、不同频率振动刺激和负重条件下半蹲运动中下肢肌群表面肌电 活动特征研究	264
四、斜坡助跑训练对提高跳远运动员专项力量的机制研究	265
五、网球中上手发侧旋球与平击球技术动作的生物力学分析	266

第一篇 基础知识篇

内容提要:本篇主要介绍表面肌电的生成过程、影响因素、测试仪器以及信号处理方法等基础知识,为初步认识表面肌电图和应用表面肌电测试法进行研究奠定理论基础。

学习目的:通过对本篇的学习,能够正确认识表面肌电图,并科学地运用表面肌电测试法进行相关研究和数据分析。

第一章 表面肌电基础知识概述

有关表面肌电图的起源可以追溯到 17 世纪中叶。1773 年, Walsh 发现鳗鱼的肌肉收缩可以产生电火花。但直到 18 世纪 90 年代, Galvani 才证明了肌肉收缩与电活动之间的关系。19 世纪初期, 电流计的发明为进一步测量肌肉的电活动提供了可能。DuBois-Reymond 在 1849 年首先证实了人体的肌肉在主动收缩时存在肌肉电活动。至 19 世纪 60 年代, Duchelme GB 利用电生理学方法系统地研究了肌肉的功能和动力学, 成为这一领域工作的真正开始。1922 年, Gasse 和 Neweomer 利用阴极射线示波器代替传统的电流计显示出肌肉活动的电信号, 并因此获得 1944 年生理或医学诺贝尔奖。最早记录人体的肌电图 (electromyography, EMG) 是 Piper 于 1912 年开始应用于临床医学的。肌电图最开始仅用于生物反馈治疗, 而后逐渐用于其他领域, 如康复科、神经科、泌尿科等。1944 年, Inrna 等利用肌电图研究了人体肩部肌肉活动, 成为最早利用肌电技术研究人体动力学的典范。1961 年, 国际肌电图学会成立, 并且出版了《肌电图杂志》, 此为在世界范围内推进肌电图的研究和学术交流开辟了有效途径。Elsevier Ltd 组织于 1991 年开始出版发行的 *Journal of Electromyography and Kinesiology* (《运动功能和肌电图学杂志》)^①, 至 2014 年已刊出 24 卷, 说明肌电图测试法已经在世界范围内被广泛关注和使用。

随着 20 世纪 30~50 年代针式肌电图的迅速发展, 出现了表面肌电图 (surface electromyography, sEMG)。sEMG, 即从肌肉表面通过电极引导、记录下来的神经-肌肉系统活动时的生物电信号。它是电极所触及的多个运动单位活动时所产生的电位变化在时间和空间上叠加的结果, 与肌肉的活动状态和功能状态之间存在着不同程度的关联性。英文文献中也指出: “Electromyography (EMG) is an experimental technique concerned with the development, recording and analysis of myoelectric signals. Myoelectric signals are formed by physiological variations in the state of muscle fiber membranes. So as electromyography is the study of muscle function through the inquiry of the electrical signal the muscles emanate”^②。

为了与临床医学肌电图相区分, Johnson 在 1973 年提出“肌电图运动学”的概念。“肌电图运动学”是对健康个体在进行各种活动 (主动、被动) 或处于不同姿势时, 记录到的肌肉活动单位所发放的单个或复合的电位变化, 并在各种条件下对神经-肌肉的功能及整体活动的协调进行研究。英文文献中也指出: “Kinesiological EMG can be defined as the study of the function and coordination of muscles in different movements and postures with

① <http://www.jelectromyographykinesiology.com/home>.

② Konrad P. A practical introduction to kinesiological electromyography [J]. The ABC of EMG, 2005, 4: 4.

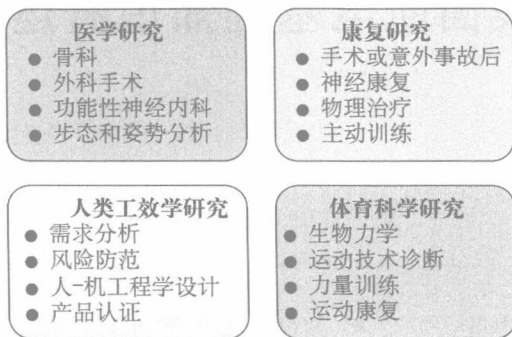


图 1-1 表面肌电测试手段的应用领域

varying subjects bases and experimental conditions”^①。

表面肌电测试技术作为一种研究手段,目前已经较为广泛地应用在临床医学的神经-肌肉疾病诊断、人类工程学的工效分析、康复医学领域的肌肉功能评价及体育科研中(图 1-1)。仅 2011~2012 两年间被中国知网(CNKI)收录的运用表面肌电测试的体育类文章达 114 篇,其中在学位论文中采用该方法的达到 30 篇,由此可见该方法在人才培养和科研中的重要地位。并且,表面肌电测试由基础

研究逐渐转向了结合不同运动项目中技术动作的应用研究,如高尔夫挥杆、铅球出手、太极拳野马分鬃式、网球发球、自行车蹬踏、短跑、赛艇划桨、排球扣球等。

第一节 表面肌电的产生过程

人体的运动是由骨骼肌收缩通过肌腱牵动骨骼产生的,肌肉收缩是人体运动的动力源泉。肌肉是由许多肌束聚集在一起形成的,外面包以结缔组织膜;许多肌纤维排列成束,即肌束,表面被肌束膜包绕,是肌肉的基本结构和功能单位(又称肌细胞)(图 1-1-1)。骨骼肌的基本功能是兴奋和收缩,这是肌电图形成的基础。

一个 α 运动神经元及其所支配的全部肌纤维所组成的功能单位称为运动单位(motor unit, MU),是最基本的肌肉收缩单位。神经与肌纤维接头处叫运动终板(motor endplate)(图 1-1-2)。每个运动单位包括数条至数百条肌纤维,肌肉包括数十万条肌纤维。因此,每块肌肉由数个至数百个运动单位组成。不同骨骼肌纤维由大小不同的 α 运动神经元所支配,大 α 运动神经元支配 II 型肌纤维,其轴突较粗,神经冲动传导速度快(>90 m/s);小 α 运动神经元支配 I 型肌纤维,其轴突较细,神经冲动传导速度较慢($50\sim80$ m/s)。一个大 α 运动神经元连同其所支配的快或 II 型肌纤维,称为快运动

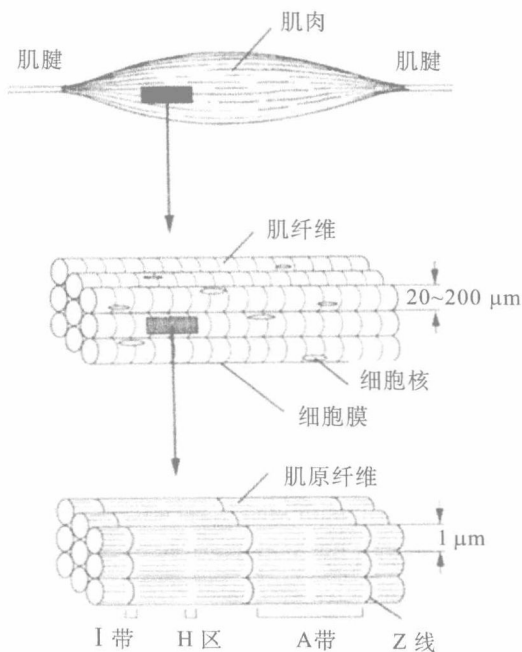


图 1-1-1 肌肉解剖结构模型^②

① Desmedt JE. New developments in electromyography and clinical neurophysiology [J]. S. Karger AG, 1974,1:498-501.

② 科米著,马铁,高东明译审.体育运动中的力量与快速力量[M].北京:人民体育出版社,2004.



单位；一个小 α 运动神经元连同其所支配的慢或 I 型肌纤维又称为慢运动单位。为使主动肌产生最大可能的力，肌肉中所有运动单位都必须被激活（动员）。

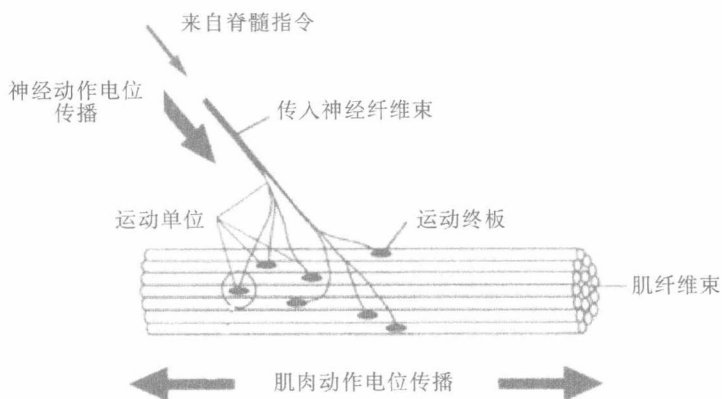


图 1-1-2 传入神经对肌纤维的作用过程示意图

肌肉活动受神经支配，运动神经元的轴突至肌肉表面时，发生许多分支，终止于运动终板。运动终板将神经兴奋冲动传递至肌肉，使肌肉兴奋，产生电活动和收缩。

图 1-1-3^① 示意了离子流学说，即细胞膜的去极化(depolarization)和复极化(repolarization)过程。由于筋膜为半透膜(semi-permeable membrane)结构，在离子泵(ion pump)的作用下，膜外 Na^+ 浓度高于膜内，形成膜外为正、膜内为负的极化状态，存在静息电位(resting potential)差($-80 \sim -90 \text{ mV}$)。细胞膜受到刺激，细胞膜的通透性发生改变，更多 Na^+ 通道打开， Na^+ 大量内流，膜去极化(0 mV)至超极化($+30 \text{ mV}$)； Na^+ 平衡电位，通道关闭， K^+ 通道打开， K^+ 快速外流，至静息状态，为复极化。这就是肌电信号源(signal origin)。

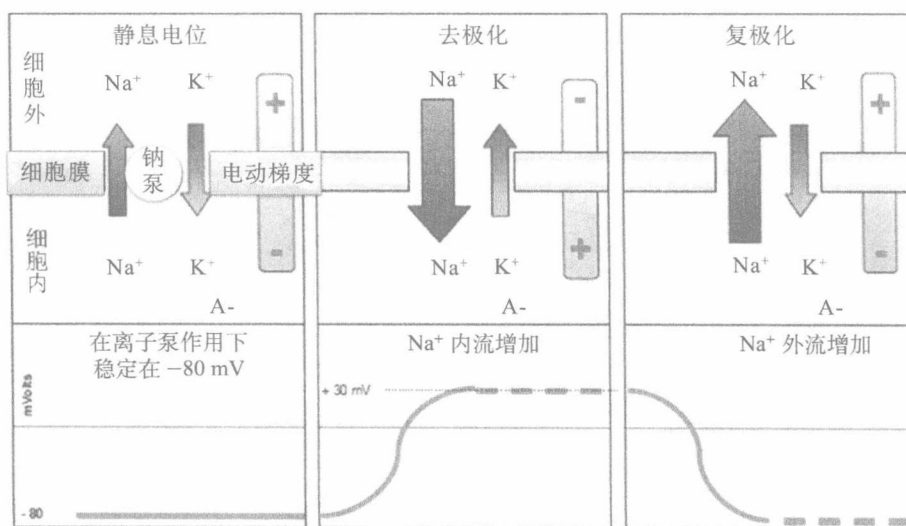


图 1-1-3 动作电位形成过程示意图

^① Konrad P. A practical introduction to kinesiological electromyography [J]. The ABC of EMG, 2005, 4:6.



肌电的产生源于人体细胞对体内各种离子的选择性吸收能力不同,形成了人体内环境中细胞内外离子浓度的不平衡性。在静息状态下,由于浓度梯度、电位梯度和细胞膜的选择通透性作用,使 K^+ 外流速度远大于 Na^+ 的内流速度,形成细胞外正离子浓度高于细胞内正离子浓度,从而引起静息时细胞内负外正的跨膜电位,称为静息电位。当肌细胞受到刺激或接受了神经冲动的传导,会引起细胞膜对 Na^+ 的通透性突然增大, Na^+ 急速内流,使静息电位发生去极化,肌细胞膜突变为内正外负,这一电位称为动作电位。动作电位能够沿着肌纤维膜迅速传导,以引起整个肌纤维的兴奋,最后引发肌肉收缩(图 1-1-4)。可见肌肉收缩与肌肉的动作电位之间有十分密切的偶联关系。当中枢神经系统动员一个运动单位时,它能使运动单位以不同的频率“放电”。中枢神经系统运动神经元的兴奋性水平越高,运动单位的放电速率越快(图 1-1-5)。骨骼肌在兴奋时,可因肌纤维动作电位的传导和扩布而发生电位变化,这种电位变化称为肌电。用适当的方法将骨骼肌兴奋时发生的电位变化引导、放大并记录所得到的图形,称为肌电图。被记录下来的数据就是表面肌电的原始数据。

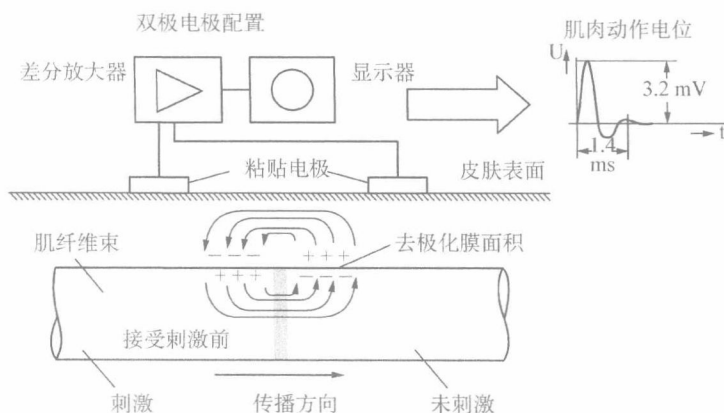


图 1-1-4 表面肌电信号形成过程示意图^①

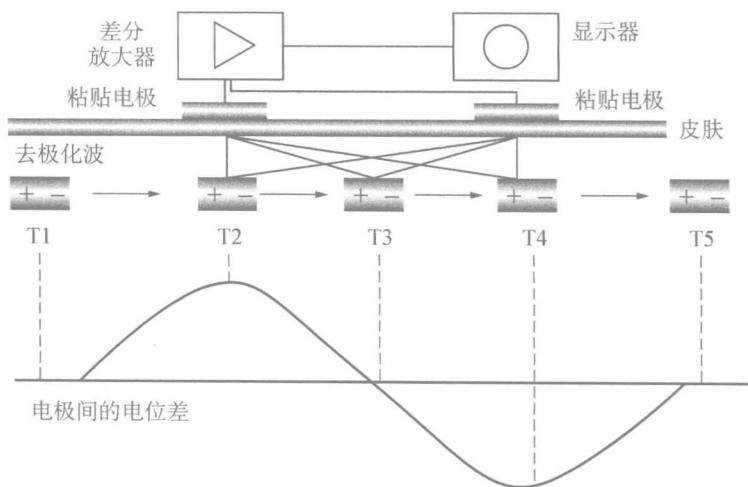


图 1-1-5 不同电极间的电位差(势差)^①

^① Konrad P. A practical introduction to kinesiological electromyography [J]. The ABC of EMG, 2005,4:8.



通过肌电图仪所获得的肌电信号是较弱的一维时间序列信号,它是表面电极所触及的多个运动单位活动时产生的电变化在时间和空间上叠加的结果,其变化与参加活动的运动单位数量、类型、单个运动单位的放电频率和动作电位的传导速度、运动单位活动同步化程度、运动单位募集方式以及电极放置位置、皮下脂肪厚度、体温变化等因素有关^①。表面肌电信号实质上是多个运动单位活动电位差的总和,是受中枢神经系统所控制的,因而能在一定程度上直观反映神经-肌肉系统的功能变化特性等(图 1-1-6,图 1-1-7)。由于肌肉收

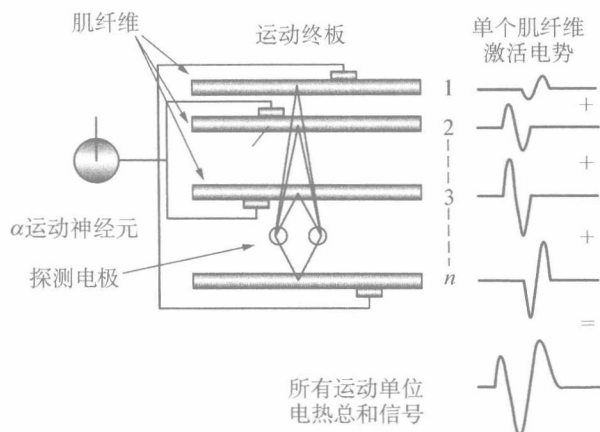


图 1-1-6 单个肌纤维的动作电位及其动作电位的叠加效应^②

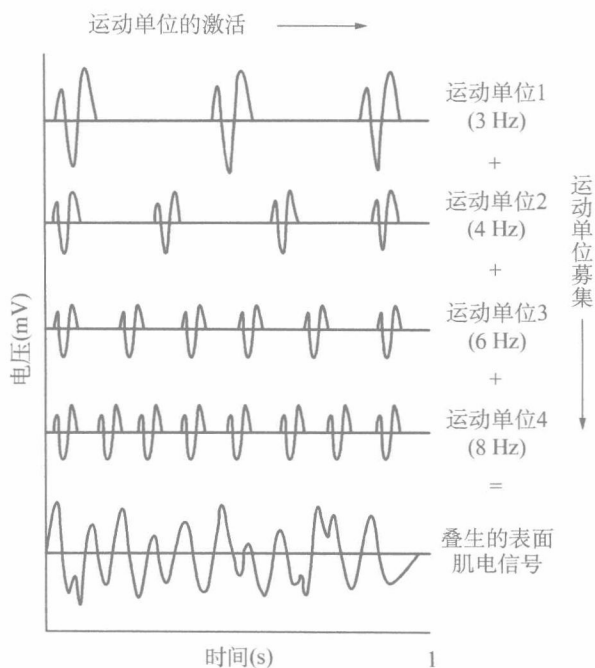


图 1-1-7 不同放电频率的多个运动单位的叠加效果形成的肌电信号

① 王健. SEMG 信号分析及其应用的研究进展[J]. 体育科学, 2000, 20(4): 56-60.

② Konrad P. A practical introduction to kinesiological electromyography [J]. The ABC of EMG, 2005, 4: 8.



缩产生的电流非常小,只能以微伏(μV)计算,需要用敏感的放大器将其放大后才能直接观察。也有文献指出,表面肌电图仪事实上就是一个非常敏感的电流放大器。早期的表面肌电图仪记录电流时常常受周围电场的干扰,需要在镀铜的屏蔽罩内进行工作。随着生物医学工程的发展,表面肌电图仪被不断改进,开始应用于临床,并逐渐普及。

参与活动的运动单位数目与兴奋频率的结合,称为运动单位动员(motor unit involvement, MUI),又称为运动单位募集(motor unit recruitment)。运动单位募集指的是运动过程中不同类型运动单位参与活动的次序和程度。运动时,人体骨骼肌运动单位的募集具有以下几个特征:就募集的运动单位数目而言,肌肉收缩产生的张力小,募集的运动单位数量少,产生的张力大,募集的运动单位数量多,此乃运动单位募集的大小原则(size principle)。就不同类型的肌纤维募集顺序而言,低强度运动如走路和慢跑时,Ⅰ类肌纤维被优先募集;运动强度增大如快跑时,Ⅱa类肌纤维被动员参加活动;最大强度运动如短跑时,Ⅱb类肌纤维成为主要纤维。以上不同类型纤维随运动强度增加而表现出来的募集模式称为肌纤维类型的选择募集(selective recruitment)或顺序性原则(orderly recruitment)。此外,就长时间大强度运动而言,运动初期,以Ⅰ和Ⅱa类纤维的活动为主,随着运动时间的延长以及肌糖原消耗的增加,Ⅱb纤维也被动员参加活动。图1-1-8说明了4类代表性运动单位的结构与功能间的关系。

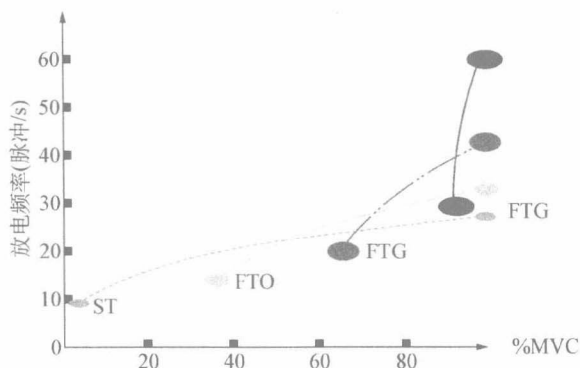


图 1-1-8 4 种代表性运动单位的动员阈值和放电频率范围

图 1-1-9 是肌肉收缩时的原始肌电图。可以直观地看出,在积极收缩时(active contraction burst)表面肌电的振幅明显增大,即肌肉放电电量增加;当肌肉处于放松状态时

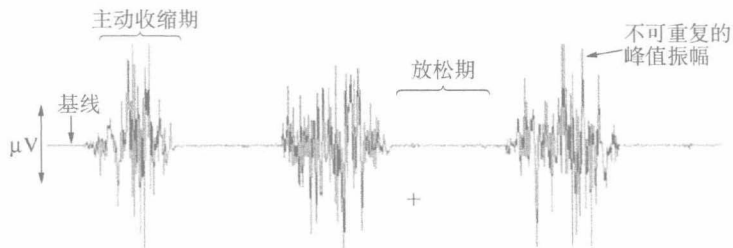


图 1-1-9 股二头肌长头 3 次收缩和放松状态下的原始肌电图^①

^① Konrad P. A practical introduction to kinesiological electromyography [J]. The ABC of EMG, 2005, 4:10.



(rest period)表面肌电振幅值非常小,接近基线(base line)水平。由此可以看出,肌肉的表面肌电输出与肌肉收缩(肌力)间存在着密切的相关关系。

第二节 表面肌电的影响因素及解决方案

生物电信号是一种相当复杂的信号,其特点是随机性和背景噪声都较强。因此,对原始信号的正确处理与否直接影响了研究的可靠性。但随着科技的发展,现代的表面肌电测量技术一般都具有高输入阻抗($>100\text{ M}\Omega$)和高共模抑制比($>100\text{ dB}$)的专用生物电前置放大器(能够从各种共模干扰信号中提取出肌电信号)和滤波器(放大滤波电路的作用除对信号进行常规的放大滤波外,还含有一个抑制 50 Hz 工频干扰的带阻滤波功能)以及相应的软件系统构成,并已形成了一些相对成熟的方法。

影响原始表面肌电信号振幅的因素有很多,如外界环境噪声干扰、放大器的性能、适当的皮肤处理等。一般要求肌肉在完全放松状态时的平均基线噪声不应 $>5\text{ }\mu\text{V}$,以 $1\sim 2\text{ }\mu\text{V}$ 为佳。通常在显示器上看到振幅波动值 $<10\text{ }\mu\text{V}$ 即可实施测试,否则需要进行基线检查。通常影响基线噪声的因素及解决方案主要包括以下几个方面。

1. 电极放置位置

表面肌电测试中电极放置位置(electrode site)的选择非常关键,是影响测试结果的主要因素之一。电极的安放位置不同所产生的表面肌电振幅差异较大。如从图 1-2-1 中可以看出,电极放置在移动点上会产生较高的放电频率,但放电量(振幅)较小;放置在肌肉中部,但是偏离了肌腹,仍会出现较小的振幅和频率;放置在肌腱结合部处信号会非常弱,这些信号均不能反映肌肉工作的真实特征,只有安放在肌腹中部才会达到最佳采集效果。

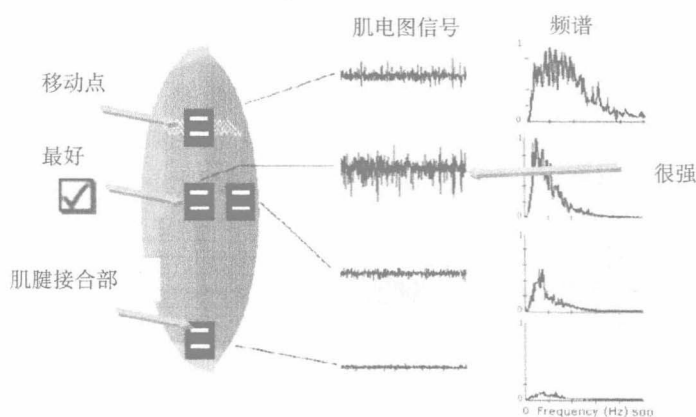


图 1-2-1 电极放置位置不同所产生的表面肌电振幅差异比较图^①

解决方案:位置的选择通常遵守 3 点: ①电极安放在所测肌肉的肌腹中部位置,以免邻近肌肉的溢流活动; ②电极的走向与所测肌肉肌纤维的走向一致,即平行于肌肉收缩走向; ③两电极间的距离一般为 $2\sim 3\text{ cm}$ 。

^① Carlo J. De Luca. The use of surface electromyography in biomechanics [J]. J Appl Biom, 1997, 13: 135~163.



2. 皮下脂肪厚度

由于生物电本身的电流非常微弱,因此,不同类型的生理组织及其厚度都对其传导速率有一定的影响,常见的是皮下脂肪组织的厚度(tissue thickness)对生物电的传导影响较大,脂肪层越薄产生的振幅越大,脂肪层越厚阻抗就越大,显示器显示的振幅就越小。如图 1-2-2 所示,上图为脂肪层较厚受试者的肌电振幅,下图为脂肪层较薄受试者的肌电振幅,尽管电极的位置一致,但抵达皮肤表面电极的动作电位值差异较大。因此,上图的原始肌电振幅小于下图的原始肌电振幅。

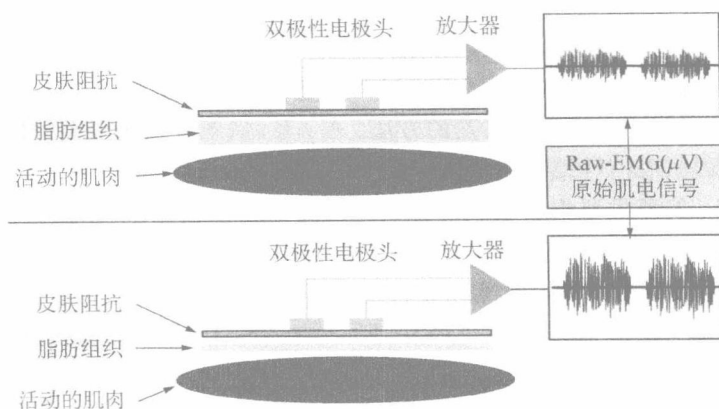


图 1-2-2 不同的脂肪层对肌电振幅影响的示意图

解决方案:此情况主要对肌电的定量研究有影响,对定性研究影响不大。通常根据研究需要有两种途径:一种是个体自身对照研究,此时影响不大,可以进行实验前后的比较研究;另一种是个体间横向对照,此时通常采用振幅标准化的方法进行统计分析。

3. 外部环境噪声

尽管外部环境噪声(external noise)的干扰是不可避免的,但是应该尽可能减少其干扰。外部环境噪声主要分布在交流电源的工频干扰、外部设备的接地不良、插座的接触不牢、电池线圈的电流、白炽灯的整流器、各种移动通信设备等(图 1-2-3,图 1-2-4)。因此,以前

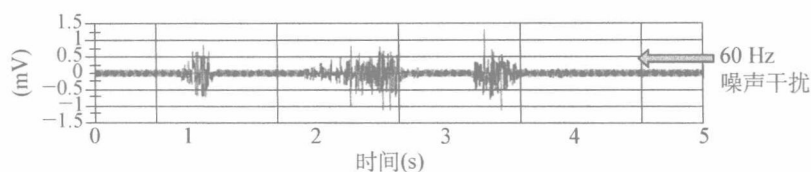


图 1-2-3 伴有噪声干扰的表面肌电测试结果示意图

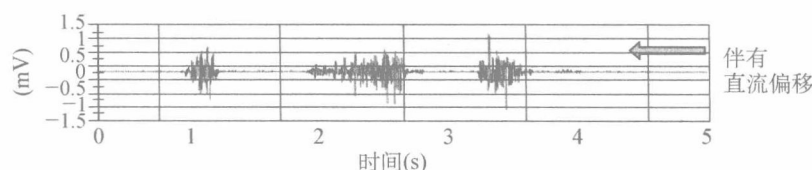


图 1-2-4 伴有干扰导致基线偏移的表面肌电测试结果示意图