

“十二五”国家重点图书出版规划项目
国际医药研究前沿优秀专译著

Applications of sEMG in
Clinical Diagnosis and Evaluations

表面肌电图 诊断技术临床应用

主 编◎李建华 王 健



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

国际医药研究前沿优秀专译著

表面肌电图诊断技术临床应用

李建华 王 健 主编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

表面肌电图诊断技术临床应用 / 李建华, 王健主编.
—杭州: 浙江大学出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-308-15378-2

I. ①表… II. ①李… ②王… III. ①肌电图—诊断
IV. ①R741.044

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 286254 号

表面肌电图诊断技术临床应用

李建华 王 健 主编

责任编辑 冯其华 张 鸽 奚莱蕾

责任校对 张凌静 林允照 潘晶晶

封面设计 黄晓意

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州星云光电图文制作有限公司

印 刷 浙江海虹彩色印务有限公司

开 本 889mm×1194mm 1/16

印 张 21

字 数 505 千

版 印 次 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-15378-2

定 价 150.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

《表面肌电图诊断技术临床应用》

编委名单

主 编

- 李建华 浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学中心
王 健 浙江大学体育科学与技术研究所

副主编

- 郭铁成 华中科技大学同济医学院附属同济医院康复医学科
叶学松 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院
王红星 江苏省人民医院康复医学中心
王楚怀 中山大学附属第一医院康复医学科

编 委(以姓氏笔画为序)

- 马利中 台州医院康复医学科
王红波 宁波市第一医院康复医学科
石瑜瑜 宁波市第一医院康复医学科
卢爱兰 金华市中心医院康复医学科
叶 晔 浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学中心
冯 玲 绍兴市人民医院康复医学科
冯 珍 南昌大学第一附属医院康复医学科
冯晓东 河南中医药大学第一附属医院康复医学科
朱玉连 复旦大学附属华山医院康复医学科
刘宏亮 第三军医大学西南医院康复中心
刘玲玲 南昌大学第一附属医院康复医学科
刘雅丽 华中科技大学同济医学院附属同济医院康复医学科
许光旭 江苏省人民医院康复医学中心
牟 翔 第四军医大学西京医院物理医学与康复科

纪 晴	浙江大学生物医学工程与仪器科学学院
李 琳	浙江医院康复医学科
李水琴	延安大学附属医院心脑血管医院康复医学科
吴方超	浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学中心
吴夏澍	浙江大学体育科学与技术研究所
邹朝君	浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学中心
宋 林	厦门大学附属福州第二医院康复医学科
宋红云	浙江大学医学院附属第二医院康复医学科
宋海新	浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学中心
林 坚	浙江医院康复医学科
林建强	解放军 128 医院康复医学科
郁正红	浙江省中山医院康复科
周谋望	北京大学第三医院康复医学科
项 翼	江西中医药大学附属医院康复医学科
郝增明	浙江大学体育科学与技术研究所
胡小珍	浙江中医药大学第三临床医学院
袁立伟	浙江大学心理与行为科学学院
贾子善	中国人民解放军总医院康复医学中心
顾旭东	嘉兴学院附属第二医院康复医学中心
倪朝民	安徽省立医院康复医学科
郭 旭	宁波市第二医院康复医学科
黄国志	南方医科大学珠江医院康复医学科
龚剑秋	绍兴市人民医院康复医学科
谢 琳	浙江大学心理与行为科学学院
廖志平	浙江中医药大学第二临床医学院
穆景颂	安徽省立医院康复医学科

主编简介



李建华,主任医师,硕士生导师,现任浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学中心主任,从事康复临床工作 20 余年,在运动创伤、脑卒中、脊髓损伤康复治疗上积累了较为丰富的临床经验,擅长表面肌电图评价技术的临床应用和成人肢体肌肉痉挛的肉毒毒素注射治疗,先后获得省部级课题 10 余项,获得发明专利 4 项,发表学术论文 30 余篇,参编康复医学教材 4 本,主编 2 本。社会兼职:中华医学会物理医学与康复学分会委员,中华医学会运动医疗分会运动康复学组委员,中国医师协会康复医师分会理事,中国康复医学会运动疗法专业委员会副主任委员,中国康复医学会电诊断专业委员会常委,中国康复医学会脑血管病康复专业委员会常委,中国体育科学学会运动医学专业委员会委员,浙江省医学会物理医学与康复分会候任主任委员,浙江省体育科学学会运动医学专业委员会副主任委员,浙江省康复医师协会副会长,浙江省康复医学会理事。

王健,工学博士,教授,体育学一级学科博士生导师,应用心理学博士生导师。现任浙江大学体育学系系主任,浙江大学体育科学与技术研究所所长,浙江大学体育学一级学科负责人,九三学社浙江省委员会委员兼浙江大学委员会副主委。主要从事神经肌肉运动生理学和表面肌电技术研究,参与研制国内首台 128 通道无线阵列式肌电图机并开展手语手势模式识别技术研究等。近 10 年来,承担国家“863”、国家科技支撑计划、国家自然科学基金和中国工程院重大科技咨询项目等多项国家级科研项目研究工作,主持承担“神十”和“空间站”任务航天员运动束缚系统研制任务,主编出版《高级运动生理学》等著作 10 部,发表学术论文 100 余篇,获得专利 40 余项。社会兼职:担任教育部全国机器人体育联盟副主席,中国保健协会专家委员会委员,中国人类工效学学会理事兼生物力学专业委员会副主任,中国医疗保健国际交流促进会健康产业专业委员会副主任委员,中国康复医学会康复工程专业委员会委员,中国生理学会运动生理学专业委员会委员,浙江省生理学会原副理事长兼健康生理学专业委员会主任。



序

随着康复医学在全球的迅速发展,我国的康复医学事业正在进入快速发展阶段,国家和地方均对康复医学给予了足够的重视。随着老龄化社会的到来,我国的康复医学事业将会是一个巨大的朝阳产业。康复医学的范畴也在不断地扩大,我们一直在不断地引进和吸收国外先进的康复医学理念和技术,与我国康复实际情况相结合,不断推动康复医学事业的进步和发展。

表面肌电图作为康复评估和临床评价的一个重要手段,越来越受到国内康复医学领域的重视。表面肌电图是一种从肌肉表面获取肌肉收缩时产生的电信号,并对其进行分析以反映相应肌肉的生理学信息的评估手段,主要用于分析评估整体肌肉的功能、执行动作时肌肉的触发时序以及步态分析时不同肌群的激活情况等,且具有实时、无创等优点。既往的评估手段大多数能反映肌肉收缩时的物理信息,但是表面肌电图可以实时反映肌肉的生理学信息,是康复评价、训练方案制订、康复效果监测的有力工具。然而,国内目前尚没有一本完整介绍表面肌电图原理、信号分析和临床应用的学术专著,国外关于表面肌电图的书籍也屈指可数,且大多数内容集中在操作过程和信号分析上。

由浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学科李建华主任和浙江大学王健教授主编的《表面肌电图诊断技术临床应用》不仅是国内第一部关于表面肌电图方面的专著,也将是我国表面肌电图发展史上重要的一页。

本书的特点在于内容丰富,涵盖了表面肌电图的发展历史、信号来源、信号分析方法、不同疾病的表面肌电图国内外研究情况以及临床应用方法。对于希望从事表面肌电图领域研究的同道们是一本难得的参考书籍。此外,表面肌电图是一种评估手段,传统的针极肌电图是一种诊断技术,两者的原理和应用范围有着一定的差别,但一定程度上,两者相互补充,构成了完整的肌电图诊断和评价体系。

真诚希望表面肌电图作为康复评估的一种手段,可以为康复医学事业的发展提供有力的支持,也希望本书能为各位读者理解和应用表面肌电图提供一定的帮助。



2015年10月30日

前 言

随着康复医学和临床医学的科学化发展,表面肌电技术已逐渐成为神经肌肉功能障碍检测与评价的一种重要手段和方法,在慢性腰痛、颈椎病、小儿脑瘫、帕金森病和脑卒中等疾病诊断和功能评价中有着广泛的应用。但是,与该现实极不相称的是我国至今还缺少一部能够系统介绍表面肌电生理学原理、检测技术、分析方法和实践应用的学术著作。2014年,在国家新闻出版广电总局的支持下,《表面肌电图检测技术临床应用》正式被列入“十二五”国家重点出版物规划项目,由浙江大学组织国内专家学者历时一年完成了本著作的编写工作,实现了我们多年的夙愿。

表面肌电图(Surface electromyography, sEMG)是肌电图(Electromyography, EMG)的一个分支领域,形成于20世纪40年代。它是将表面电极贴布在活动肌肉所在的皮肤表面以采集肌肉活动的生物电信号,然后经放大和显示所记录到的电压的时间序列信号,具有良好的实时性、局部性和功能性。sEMG作为一种能客观反映神经肌肉系统生物电活动的检测手段和方法,其最大的特点在于非损伤性、多靶点检测以及信号特征变化与内在生理、病理改变的一致性上。肌力测试、肌电评价与运动分析一起被誉为当代康复医学神经肌肉功能在机体检测与评价的“三驾马车”。

sEMG在康复医学、临床医学、体育科学和人机工程等领域有着广泛且重要的应用。在神经肌肉功能评价方面,sEMG能够精确地描述局部肌肉激活时间、激活水平、功能状态以及与人体环节和整体运动的相互关系,能够定量描述被检肌群活动的时间序列关系,从而进行神经肌肉协同分析;在神经肌肉系统疾病诊断中,sEMG信号和图像分析技术被广泛地运用于包括慢性腰痛、颈部疼痛、帕金森病、小儿脑瘫、脊髓损伤等疾病的运动障碍评价与相关疾病的辅助诊断,例如通过对慢性非特异性腰痛疑似患者腰椎稳定肌“屈放松消失”和“前馈控制弱化”现象的检测,为慢性非特异性腰痛的诊断提供临床辅助证据等。此外,sEMG还可与其他物理检测技术(如脑电图、影像、力量检测等)相结合,进一步应用于中枢激活与控制、外周神经传导速度、脊髓运动控制、肌肉痉挛等功能评价,从而在疾病诊断和功能评价中发挥重要作用。

我国的 sEMG 研究虽然起步较晚,但在某些基础和应用研究方面具有较好的基础并取得了较好的成果。在基础理论研究方面,围绕着神经肌肉活动的中枢运动控制、局部肌肉疲劳、神经肌肉疾病诊断等重大科学理论问题,sEMG 信号分析从生物电变化的角度为我们提供了重要的研究证据;在应用研究方面,我国学者在肌电生物反馈检测与治疗、阵列式表面肌电检测与信息处理、慢性非特异性腰痛表面肌电评价、肌电义肢运动模式识别、肌电手语手势识别等方面完成了多项具有国际影响力的工作,从而为该技术在康复医学等领域的应用奠定了坚实的科学基础。

为我国科学工作者们编写表面肌电图方面的学术著作是一种新的尝试。表面肌电方面可供参考的同类著作较少,可资借鉴的经验也不多,加之编写时间仓促和能力水平有限,难免有不妥和错误之处,真诚希望广大读者提出宝贵意见。此外,本书在编写过程中得到了各位作者以及浙江大学出版社的大力支持,他们为本书编写和出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示深深的感谢。

李建华 王 健
于浙江大学紫金文苑
2015 年 10 月 30 日

目 录

第一篇 表面肌电图概述

第一章 表面肌电图的历史、现状与发展趋势	(3)
第一节 肌电图的发展历史	(3)
第二节 表面肌电图检测技术研究现状	(6)
第二章 表面肌电的神经肌肉电生理学基础	(13)
第一节 神经肌肉的电生理学	(13)
第二节 神经肌肉的运动控制	(20)
第三章 神经肌肉功能的评价	(30)
第一节 肌肉收缩功能的评价	(30)
第二节 康复医学中常见的运动控制检测技术	(38)

第二篇 表面肌电信号采集与分析

第四章 表面肌电信号采集技术	(47)
第一节 常用表面肌电图设备介绍	(47)
第二节 表面肌电图设备的基本原理	(52)
第三节 影响表面肌电信号的因素	(56)
第四节 临床使用中电极体表定位的方法	(58)
第五节 阵列式表面肌电采集技术及相关设备介绍	(60)
第五章 表面肌电信号的分析与处理	(65)
第一节 表面肌电信号的产生及其评价的标准化	(65)
第二节 表面肌电信号的线性分析	(72)
第三节 表面肌电信号的非线性分析	(79)
第四节 阵列式表面肌电信号的分析和应用	(83)
第五节 肌纤维传导速度和临床评价	(95)

第三篇 表面肌电检查技术应用研究

第六章 神经系统疾病	(101)
第一节 脑卒中	(101)
第二节 脊髓损伤	(114)
第三节 面肌痉挛	(127)
第四节 周围性面瘫	(139)
第五节 吞咽障碍	(146)
第六节 痉挛性斜颈	(158)
第七节 帕金森病	(166)
第七章 骨与关节损伤	(176)
第一节 慢性腰痛	(176)
第二节 颈椎病	(188)
第三节 脊柱侧弯	(199)
第四节 膝关节交叉韧带损伤	(211)
第五节 膝关节置换	(220)
第六节 膝关节骨性关节炎	(228)
第七节 肩袖损伤	(240)
第八节 肩周炎	(249)
第八章 盆底功能障碍	(260)
第一节 概 述	(260)
第二节 表面肌电图在盆底功能障碍中的应用	(266)
第三节 临床常用表面肌电图检测方法	(269)
第九章 步态分析	(271)
第一节 步态分析相关介绍	(271)
第二节 步态障碍的表面肌电研究现状	(273)
第三节 临床常用的 sEMG 检测方法	(282)
第十章 肌电生物反馈康复治疗	(286)
第一节 肌电生物反馈临床研究进展	(286)
第二节 临床常用肌电生物反馈治疗的方法	(290)
第十一章 肌肉疲劳分析	(297)
第一节 概 述	(297)
第二节 肌肉疲劳表面肌电研究现状	(299)
第三节 临床常用表面肌电检测方法	(306)
附件一 常用表面肌电电极体表定位(表)	(308)
附件二 常用表面肌电电极体表定位(图)	(310)
索 引	(321)

第一篇

表面肌电图概述



第一章

表面肌电图的历史、现状与发展趋势

肌电图(Electromyography, EMG)是指将单个和多个肌细胞或者部分肌肉组织活动时产生的生物电变化,经电极引导、放大、记录和显示所获得的电压变化的一维时间序列信号图形^[1]。根据电极引导方法的不同,EMG 进一步可分为针电极肌电图(Needle electromyography, nEMG, 简称“针式肌电图”)和表面电极肌电图(Surface electromyography, sEMG, 简称“表面肌电图”)两种基本类型。其中,针式肌电图又可分为单针电极、单级同芯针电极、双极同芯针电极、多道针电极和单肌纤维电极等多种类型;sEMG 又分为常规电极 sEMG 和阵列式电极 sEMG(Array electromyography)等类型^[2]。作为一种电诊断检测手段和方法,肌电评价与肌力测试、运动分析共同构成了人体神经肌肉功能在体检测与评价的“三驾马车”,广泛应用于康复医学、临床医学、体育科学等领域。然而,与其他两种物理诊断技术不同的是,EMG 评价还具有以下三个明显的特点:首先, nEMG 和 sEMG 的表现形式虽然是物理性的,但其变化却具有深刻的生理学和病理学基础,其振幅、频率、复杂度、有序性、等线性和非线性信号特征的变化携带着多种生理病理改变的信息,因此被越来越多地作为神经肌肉系统疾病的诊断技术加以研究和应用。其次,EMG(尤其是 sEMG)可以多靶点针对被检肌肉进行非损伤性采样,且能够精确地反映不同肌肉在活动时序、活动强度、疲劳状态等方面的信息,因而也常被用来对人体整体神经肌肉活动进行“系统分析”,为包括脑卒中患者步态分析、帕金森病患者非自主性震颤分析等在内的多种神经肌肉协调控制评价提供了重要的生物医学信息。最后,新近建立和发展起来的阵列式表面肌电信号检测与处理技术,将 sEMG 的“点探测”发展为“面探测”,将“信号分析”延伸到“图像分析”,信号采集与处理方法的改进极大地拓宽了传统 sEMG 的观察视野,为基础医学、临床医学和康复医学等领域的研究提供了更为重要的检测手段和方法^[3]。

第一节 肌电图的发展历史

肌电图的发现源自肌肉生物电的研究,具有悠久的历史。17 世纪中叶,意大利物理

学家 Francesco Redi 研究发现,电鱼(Electric ray fish)的电来自一种高度特化的肌肉组织。1791年,意大利解剖学家 Luigi Galvani 通过一系列的研究获得了肌肉收缩与电变化关系的直接证据,并且通过改变静电电荷实现了肌肉收缩的诱发(见图 1-1),为此,其被后人称为“电生理学之父”。但是,由于受到实验设备的限制,当时有不少学者质疑这一发现。例如电池的发明者意大利物理学家 Alessandro Volta 就曾质疑 Luigi Galvani 所使用的不同金属在电解液中本身就会产生电流,所以 Luigi Galvani 的发现在 40 多年后才为意大利物理学家 Carlo Matteucci 做的进一步实验所验证而被广为肯定。1842年,Carlo Matteucci 证实蛙肌肉收缩时存在动作电位。与此同时,Alessandro Volta 发明了第一个能够产生电流的装置用以刺激肌肉收缩,这一技术引起了人们的广泛关注。1860年,Duchenne 等采用该方法对完整肌肉开展了大量的研究,从而获得了关于肌肉收缩和动力学特性的系统性认识。

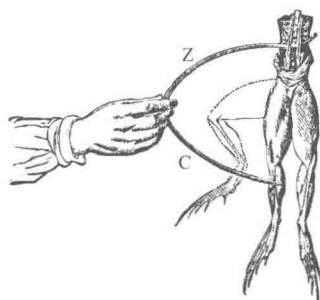


图 1-1 Luigi Galvani 实验示意图

(资料来源: [http://butler.cc.tut.](http://butler.cc.tut.fi/malmivuo/bem/bembook/01/01.htm)

[fi/malmivuo/bem/bembook/01/01.htm](http://butler.cc.tut.fi/malmivuo/bem/bembook/01/01.htm))

19 世纪早期,人类发明了检流计(Galvanometer)。1838年,Carlo Matteucci 首先使用这一装置在活动的蛙神经纤维和损伤的肌肉上检测到电压的变化。1849年,德国学者 Emild du Bois-Reymond 首次在随意收缩的人类肌肉上观察到生物电的变化(见图 1-2)。20 世纪初,Pratt 研究表明,肌肉收缩所产生的能量并不取决于神经电脉冲的大小,而是与肌纤维的募集有关。1920年,美国学者 Alexander Forbes 和 Catherine Thacher 利用 1897 年 Braun 发明的阴极射线真空管将记录到的肌肉动作电位放大。1922 年美国神经生理学家

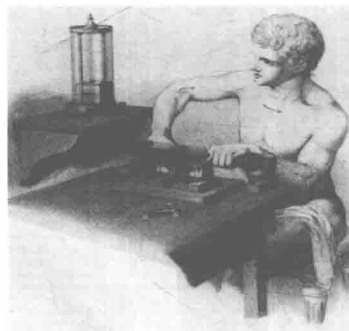


图 1-2 Du Bois-Reymond 实验示意图

(资料来源: Muscle alive-their functions revealed by EMG)

Herber S. Gasser 和 Joseph Enlanger 采用新发明的阴极射线示波器代替传统的检流计,在肌肉活动中观察到了生物电信号的变化,这一发现使他们赢得了 1944 年的诺贝尔奖^[4]。

经过 1930—1950 年的持续性改进,科学家们开始广泛应用 EMG 技术研究正常和异常的肌肉活动情况^[5]。1930 年,“放松”研究之父美国医生 Edmund Jacobson 采用 EMG 技术研究冥想和情绪对肌肉活动的影响,他还大量应用 EMG 技术评估放松训练对肌肉活动的影响。1940 年,科学家们尝试采用 EMG 技术研究动态性肌肉活动,如 Price JP 等采用 EMG 技术研究腰痛患者腰背肌的活动模式,开启了慢性腰痛 sEMG 研究的先河。1942—1944 年,加拿大生理学家 Herbert H. Jasper 在 McGill 大学设计和研制了第一台肌电图机。1950 年,Floyd W 和 Silver P 采用 sEMG 信号分析技术研究发现,慢性腰痛患者在躯干处于完全前屈位由韧带维系稳定的情况下,背部肌肉活动处于完全关闭状态。1960 年,生物反馈技术诞生了,著名肌电图学者加拿大著名生理学家 John Bas-majian 采用针式 EMG 对单个运动单位开展研究,证明了生物反馈技术对单个运动单位

的作用。1960年,苏联工程学家 Kobrinsky 领导的团队利用所检测到的肌电信号控制手部假肢,开创了肌电假肢的研究。之后,大量的研究采用该方法对生物反馈的生物学效应开展研究和实践,奠定了生物反馈临床治疗的科学基础。与此同时,EMG 的研究越来越引起基础医学和临床医学界的关注。1965年,国际电生理运动学学会(International Society of Electrophysiological Kinesiology, ISEK)成立了,并出版了唯一的官方学术期刊 *The Journal of Electromyography and Kinesiology*。

在 EMG 电极的发展史上,1929年 Edgar Adrian 和 Detlev Bronk 建立了针电极,使得小肌肉或者肌纤维的生物电信号得以被观察;而针电极后续的发展则归功于德国学者 Fritz Buchthal 团队在 1950—1960 年间的贡献。1960年,Ag-AgCl 表面电极的发明促进了 EMG 的长足进步。1979年,美国著名肌电图学者 De Luca 围绕表面肌电形成的原因和机制开展了系列的实验研究^[6]。

1980年以来,EMG 的研究取得了快速的发展^[7]。在检测技术研究领域,sEMG 检测从传统的有线信号传输发展到无线传输,从以“点探测”为特征的传统 sEMG 信号采集发展到以“面探测”为特征的阵列式表面肌电;在信号分析领域,从传统的时域、频域分析,发展到时频联合分析和今天广为使用的线性、非线性和图像分析等;在基础生理学研究领域,围绕肌肉活动 EMG 特征变化的生理和病理生理机制的研究不断深入;在应用研究方面,EMG 特别是 sEMG 技术已被广泛运用于临床医学、康复医学、体育科学、人机工程等领域,单独的 sEMG 信息或者与其他检测技术共同揭示的神经肌肉系统活动信息,为多种状态下神经肌肉系统活动提供了精确可靠的信息,成为神经肌肉功能评价研究的客观依据。

我国对 sEMG 研究起步虽然较晚,但在某些基础和应用研究方面取得了较好的成果。在基础研究方面,上海交通大学王志中教授等围绕肌电假肢运动模式识别和假肢控制等开展了研究^[8],中国科技大学陈香和杨基海开展了关于中枢“共驱动”问题和肌电手语手势模式识别技术的研究^[9],浙江大学王健教授等开展了关于局部肌肉疲劳非线性信号特征以及前馈运动控制理论研究^[10],清华大学金德闻和王人成教授等在关于肌肉运动模式识别的研究等方面均取得了较大的进展^[11]。在应用研究方面,浙江大学耿卫东教授等研制的 128 通道无线穿戴式阵列肌电图设备、浙江大学叶学松教授等研制的肌电生物反馈治疗系统等填补了我国在该研究领域的空白;北京大学王生教授等关于腰椎稳定性肌电评价的研究,浙江大学王健教授等关于慢性非特异性腰痛的研究^[12],第三军医大学李青青和吴宗耀教授等关于神经肌肉康复的肌电评价研究^[13]等,为该技术在康复医学等领域的应用奠定了较好的基础。

参考文献

- [1] Jeffrey R C, Glenn S K. Introduction to surface electromyography[M]. Maryland: An Aspen Publication, 1998.
- [2] Eleanor C. Electromyography[M]. Massachusetts: Jones and Bartlett Publishers, 2011.
- [3] 王健. sEMG 信号分析及其应用研究进展[J]. 体育科学, 2000, 20(4): 56-60.
- [4] Gasser H S, Erlanger J. The compound nature of the action current of nerve as dis-

- closed by the cathode ray oscillograph[J]. Am J Physiol, 1924, 70: 624-666.
- [5] Barber M, Merletti R, Rainoldi A. Atlas of muscle innervation zones[M]. Springer, 2012.
- [6] De Luca C J. Physiology and mathematics of myoelectric signals[J]. IEEE Trans BME, 1979, 26(8): 313-325.
- [7] 崔丽英, 汤晓芙. 肌电图的临床应用进展[J]. 临床神经电生理, 2004, 13(3): 175-177.
- [8] 雷敏, 王志中. 肌电假肢控制中的表面肌电信号的研究进展与展望[J]. 中国医疗器械杂志, 2001, 25(3): 156-160.
- [9] 陈香, 杨基海. 拮抗肌对运动单位平均发放率的变化关系研究[J]. 生物医学工程杂志, 2002, 19(3): 463-466.
- [10] 谢琳, 王健. 姿势干扰强度的心理预期效应[J]. 心理学报, 2014, 46(7): 951-959.
- [11] 张瑞红, 王人成, 金德闻, 等. 人体下肢表面肌电信号检测与分析[J]. 清华大学学报, 2000, 40(8): 73-76.
- [12] 王健, 方红光, Kankaanpää M. 基于腰部肌电信号变化的慢性下腰痛诊断与康复疗效评价[J]. 航天医学与医学工程, 2005, 18(6): 287-292.
- [13] 李青青, 吴宗耀. 步行中胫前后肌群的表面肌电图[J]. 神经损伤与功能重建, 2007, 2(2): 116-119.

第二节 表面肌电图检测技术研究现状

sEMG 作为一种客观反映神经肌肉系统生物电活动的检测手段和方法, 其最大的特点在于非损伤性、多靶点检测以及肌电信号特征变化与内在生理病理改变的一致性。其中, 后者是 EMG 技术在临床医学、康复医学以及人机工程领域应用的科学基础。

一、肌电信号分析

sEMG 信号是将单个、多个肌细胞或者部分肌肉组织活动时所产生的生物电变化, 经电极引导、放大、记录和显示所获得的电压变化的一维时间序列信号, 它由神经肌肉系统活动时产生的原始生物电信号和干扰噪声信号组成。其中, 干扰噪声信号主要来自检测仪器、环境电磁的干扰及界面运动干扰等, 主要的干扰频率介于 0~60Hz 低频部分。一般的 sEMG 信号峰值介于 0~6000 μ V, 信号频率为 0~500Hz, 主频介于 50~150Hz, 具有正的最大 Lyapunov 指数, 是一种类似于噪声的准随机信号^[1]。

sEMG 的信号分析和特征提取主要集中在线性时域和频域两个方面^[2]。近年来, 随着人们对 sEMG 信号非线性性质认识的深入, 美国学者 Webber 等开始尝试将非线性数学方法引入 sEMG 信号分析, 从而将 sEMG 信号分析手段和方法发展到一个崭新的阶段^[3]。sEMG 信号的时域分析是将其视为一种随机信号, 相应的分析指标包括积分肌电值(Integrated electromyography, iEMG)、均方根值(Root mean square, RMS)、方差值等, 这些参数的变化主要反映外周运动单位参与活动的数量和同步化等。sEMG 信号的频域分析主要应用快速傅立叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)获得肌电信号的频谱或者功率谱, 然后计算获取频谱或者功率谱的特征参数中位频率(Media frequency,