

Clinical Electrophysiology
Electrotherapy and Electrophysiologic Testing

临床 电生理治疗学

原 著 Andrew J. Robinson Lynn Snyder-Mackler
主 译 张 翼 燕铁斌 庄甲举

·第3版·

第3版

临床电生理治疗学

Clinical Electrophysiology

Electrotherapy and electrophysiologic testing



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

北 京

图书在版编目(CIP)数据

临床电生理治疗学:3版/(美)罗宾逊(Robinson, A. J.), (美)马克勒(Mackler, L. S.)著;
张翼, 燕铁斌, 庄甲举译. —北京:人民军医出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-5091-3932-5

I. ①临…… II. ①罗…②马…③张…④燕…⑤庄… III. ①电生理学—电疗法 IV. ①R454. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 205619 号

策划编辑:秦速励 陈 娟 孟凡辉 文字编辑:陈 娟 刘慧铭 责任编辑:黄栩兵

出 版 人:石 虹

出版发行:人民军医出版社

经销:新华书店

通信地址:北京市 100036 信箱 188 分箱

邮编:100036

质量反馈电话:(010)51927290;(010)51927283

邮购电话:(010)51927252

策划编辑电话:(010)51927300—8032

网址:www.pmmmp.com.cn

印刷:潮河印业有限公司 装订:恒兴印装有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:24.5 字数:595千字

版、印次:2011年1月第3版第1次印刷

印数:0001~3000

定价:125.00元

版权所有 侵权必究

购买本社图书,凡有缺、倒、脱页者,本社负责调换



内容提要

本书是一部介绍临床电疗法和电生理学实验的专著。在前两版的基础上,不断增添电疗法和临床电生理学应用的内容,反映本领域的最新进展。全书共分为 12 章,前 3 章分别介绍电疗法的一般概念、电疗仪器、神经及肌肉电生理学。中间 8 章分别介绍电刺激和生物反馈在临床的应用,分别阐述电刺激镇痛、电刺激肌肉控制运动和姿势、电刺激促进慢性伤口愈合、电刺激和生物反馈治疗泌尿生殖功能障碍、肌电生物反馈改善随意运动以及电离子透入疗法用于药物的传递。最后一章介绍临床电生理学检查与评估,阐述其原理、操作和结果判读。本书内容丰富、图文并茂,应用章节中配有病例分析,每章附以自我测试题及参考答案,有助于读者练习用。本书适合临床理疗、康复、外科、电生理学等相关学科专业医生及技术人员,医学院校专、本科生及研究生阅读。

by Lippincott Williams & Wilkins
a Wolters Kluwer business
530 Walnut Street
Philadelphia, PA 19106 USA
LWW.com

All rights reserved. This book is protected by copyright. No part of this book may be reproduced in any form or by any means, including photocopying, or utilized by any information storage and retrieval system without written permission from the copyright owner, except for brief quotations embodied in critical articles and reviews. Materials appearing in this book prepared by individuals as part of their official duties as U. S. government employees are not covered by the above-mentioned copyright.

This is a translation of CLINICAL ELECTROPHYSIOLOGY—3rd published by arrangement with Lippincott Williams & Wilkins/Wolters Kluwer Health Inc., USA. This book may not be sold outside the People's Republic of China.

《临床电生理治疗学》由美国 Lippincott Williams & Wilkins/Wolters Kluwer Health Inc 公司授权人民军医出版社在中国境内出版中文简体版。

书中提及的药物的适应证、不良反应以及用药剂量可能因各种原因而有所变化。读者在用药之前需要重新查看生产厂家关于药品的相关信息。本书作者、编辑、出版商、发行商对书中出现的信息差错、遗漏、或临床应用所导致的结果不负任何责任。本书作者、编辑、出版商、发行商对由本书所引起的人身伤害或财产损失不承担任何责任。

著作权合同登记号：图字：军-2009-067 号

EDITION 3

Clinical Electrophysiology

Electrotherapy and Electrophysiologic Testing

ANDREW J. ROBINSON

*Professor
Department of Physical Therapy
Ithaca College
Ithaca, New York*

LYNN SNYDER-MACKLER

*Assistant Professor
Department of Physical Therapy
Ithaca College
Ithaca, New York*



Wolters Kluwer | Lippincott Williams & Wilkins

Health

Philadelphia • Baltimore • New York • London
Buenos Aires • Hong Kong • Sydney • Tokyo

Contributors

Andrew J. Robinson, PT, PhD

Professor
Department of Physical Therapy
School of Health Sciences and Human
Performance
Ithaca College
Ithaca, New York

Kathleen A. Sluka, PT, PhD

Associate Professor
Graduate Program in Physical Therapy
and Rehabilitation Science
University of Iowa
Iowa City, Iowa

Tara Jo Manal, PT, MPT,

OCS, SCS

Clinic Director/Orthopedic Residency
Director
Department of Physical Therapy
University of Delaware
Newark, Delaware

Lynn Snyder-Mackler, PT, ScD, SCS,

FAPTA

Professor
University of Delaware
Department of Physical Therapy
Newark, Delaware

Stuart A. Binder-Macleod, PT, PhD,

FAPTA

Professor
Department of Physical Therapy
University of Delaware
Newark, Delaware

Captain Robert Kellogg, PT, PhD

Commanding Officer
United States Navy Hospital
Guam

Sara Farquhar, MPT

Department of Physical Therapy
University of Delaware
Newark, Delaware

Scott Stackhouse, PT, PhD

Assistant Professor
Department of Physical Therapy
Arcadia University
Glenside, Pennsylvania

Rebecca G. Stephenson, PT, DPT, MS

Coordinator of Women's Health Physical
Therapy
Brigham and Women's Hospital
Boston, Massachusetts

Elizabeth R. Shelly, PT, BCIA-PMDB

Women's Health Specialist
Quad City Physical Therapy and Spine
Davenport, Iowa

Charles D. Ciccone, PT, PhD

Professor
Department of Physical Therapy
School of Health Sciences and Human
Performance
Ithaca College
Ithaca, New York

Jennifer A. Bushey, PT, OCS

Physical Therapist
Towson Sports Medicine
Towson, Maryland

序

读过本书后,我觉得包括学生、教师、临床医师以及第三方支付者在内的所有人,都会为把电刺激和生物反馈用作临床的治疗手段而振奋。毫无疑问,我对这种方法情有独钟。有证据表明,这种方法可用于治疗多种损伤,并能够显示治疗后功能的改变,这样其应用便成为了一种乐趣。由于我对这些仪器及其临床应用有着特殊的偏爱,所以我不明白为何这种被文献称作“最好”,至少也是“较好”的方法,在实际中却并未能成为常规的治疗手段。依我看来,已有足够的证据支持将其作为常规治疗手段。

本书每章都对相关文献进行了详尽的回顾,并用这些研究成果对具体方法的效能进行了支持或反驳。文献的数量还在不断增加,这包括随机对照研究和系统综述。例如,与第2版相比,本版第5章有关电刺激在疼痛调节中应用的文献就由48篇增至118篇;第6章有关肌肉电刺激的参考文献也由67篇增至106篇。很明显,Andrew Robinson缩小了组织愈合的范畴,将电刺激的应用集中在慢性创伤愈合上,并且在这一点上,其效用已得到证明。我很高兴看到用电刺激或肌电反馈治疗泌尿生殖功能障碍这一章,这是一个还需要进一步研究的领域,但其编写构思合理,我希望它能够为以后相关研究的开展提供借鉴。

为物理治疗专业学生上完神经学之后,我阅读了本书,再次感到书中所描述的电刺激模式实际上可能会促进神经的重组。众所周知,肌纤维具有随活动增强或减弱而产生不同反应的能力(即易变性)。而且,有研究表明一定程度的电刺激可改变骨骼肌的特性,但神经可塑性的发现却还是最近的事情。当前文献中所报道的通过干预以产生“有益的”重构,这点格外引人注目。对卒中后的慢性上肢损伤患者给予束缚诱导训练,以及用减重平板步行训练机对不完全脊髓损伤患者进行运动训练,其目的都是为了恢复损伤部位的功能,而不是采用新的办法对其进行修补。这些研究均假定训练能使神经系统发生重构。也有证据表明,训练有素的运动员、音乐家,以及慢性疼痛或经历截肢、创伤性脑损伤及脑中风的患者均可发生脑重构,但前提是必须进行长期、足够的、有针对性训练。这也正是本书所要呈现的,起码我是这样认为的。

感谢作者对促进电刺激和生物反馈在临床治疗和诊断应用上所做的不懈努力。在探讨这些方法潜在的机制及应用原则方面,他们做出了优异的成绩。书中的病例分析和自我测试可帮助读者清楚地了解自己对每章的理解程度。但愿所有人都会和我一样从阅读本书中得到乐趣。

Rebecca L. Craik, PT, PhD, FAPTA (理疗师、理学博士、美国物理治疗协会会员)
Department of Physical Therapy (物理疗法教研室)
Arcadia University (Formerly Beaver College) 阿卡迪亚大学 以前叫比弗学院
Glenside, Pennsylvania (宾夕法尼亚·格伦赛德)

前言

临床电生理学第3版的作者有的是该领域公认的、经验丰富的权威专家,有的是该领域新一代实践和研究者中的杰出代表,其中包括了在本版中作出卓越贡献的理疗师 Kathleen A. Sluka、Rebecca Stephenson 和 Beth Shelly 三位博士。Sluka 博士是一位受人爱戴、多产的研究者和教育家,她将自己对有关疼痛机制和治疗的研究与数年教学经验结合起来,撰写了疼痛生理学及疼痛电疗学这样全新的一章,临床医师和学生都会发现本章可使得他们能够将电刺激治疗疼痛的办法直接应用到临床上。

本书的新版本增添了有关电刺激和肌电生物反馈治疗泌尿生殖疾病一章。本章由2位经验丰富的临床医师 Rebecca Stephenson 和 Beth Shelly 共同撰写,文中明确地描述了泌尿生殖损伤的一般情况,概要介绍了医治这些损伤的各种刺激和生物反馈技术。本章大部分内容集中在诸如尿失禁和骨盆疼痛等一些临床疾病的治疗上。

几位新增的年轻作者为本书增添了一些全新的内容。Scott Stackhouse 博士为本书撰写了有关治疗姿势和运动障碍的神经肌肉电刺激这一新的章节,该章内容从用神经肌肉电刺激(NMES)来治疗盂肱关节半脱位,到植入 NMES 系统以控制中枢神经功能障碍患者的运动,范围广阔;Tara Jo Manal 与 Lynn Snyder-Mackler 共同修订了通过电刺激治疗疼痛这一章,其重点集中在应用电刺激治疗疼痛的决策过程以及有关治疗效果的临床试验证据方面。Sara Farquhar 与 Snyder-Mackler 共同修订了有关 NMES 增强肌肉收缩力量这一章。Jennifer Bushey 和 Stuart Binder-Macleod 重新撰写了有关肌电反馈控制运动这一章,其中 Stuart Binder-Macleod 为本书第2版该章的作者。

通常,每位撰写临床应用章节的作者都有一个目的,就是对进行临床治疗的证据,尤其是随机、对照试验产生的结果给予简明扼要的讨论。

我们保留了该书第2版中读者所喜闻乐见的特色,并且在第2版的基础上,对每章结尾处的自我测试进行了修订和更新,同时将参考答案附于附录B。我们还为所有关于治疗的章节介绍了病例研究,并且在现有临床证据的基础上,举例说明如何安全、有效地使用电疗仪器,同时也增加了实验练习。此外,全书插图的数量和质量都有所提高。

从本书的作者和内容而言,本版的确做到了新旧结合。我们衷心期望本书能够促进电疗临床实践的发展,从而最终使接受电疗的患者改善症状,提高生活质量。

目 录

第 1 章 电学基本概念和电疗法的现代术语	(1)
一、电学基本概念	(2)
二、电疗法的电流术语	(6)
第 2 章 电疗仪器	(22)
一、电疗刺激器的设计特点	(24)
二、调节电刺激特征和模式的控件	(26)
三、电疗的电极系统	(36)
四、刺激器的类型	(44)
五、电疗的安全问题	(52)
第 3 章 肌肉和神经生理学	(59)
一、肌肉和神经的兴奋性	(61)
二、动作电位的传导	(64)
三、外周神经的组成	(65)
四、骨骼肌的结构	(67)
五、肌肉收缩生理学	(71)
六、骨骼肌的异质性特征	(76)
七、随意收缩力产生的控制	(77)
八、临床神经和肌肉电刺激	(78)
第 4 章 疼痛的神经生物学和电刺激控制疼痛的基础	(87)
一、何谓疼痛	(89)
二、临床疼痛综合征	(89)
三、痛觉信息传递通路的基本神经解剖概念	(92)
四、初级痛觉传入纤维及其在外周组织的激活	(93)
五、脊髓的痛觉传递神经元	(96)
六、痛觉上行传入通路:痛觉信号向脊髓上中枢的传递	(100)
七、丘脑和大脑皮质在痛觉信息传递和加工处理中的作用	(102)
八、疼痛抑制的内源性机制	(102)
九、经皮电刺激神经控制疼痛的机制	(106)
十、经皮电刺激神经治疗的电极安放	(110)
十一、经皮电刺激神经治疗期间的适应	(110)
十二、经皮电刺激神经激活的传入纤维	(110)
十三、药物与经皮电刺激神经的联合应用	(110)

第5章 电刺激镇痛	(114)
一、临床疼痛的测定	(116)
二、疼痛控制的刺激模式	(121)
三、有关电刺激镇痛效果的文献	(127)
四、经皮电刺激神经控制疼痛的注意事项、禁忌证和副作用	(133)
五、临床病例研究	(134)
第6章 肌肉电刺激技术及其应用	(144)
一、骨骼肌对电刺激的反应性改变	(146)
二、随意肌肌力、激活和耐力的评估	(146)
三、神经肌肉电刺激诱发的肌肉收缩	(150)
四、强化骨骼肌收缩所需的刺激	(151)
五、神经肌肉电刺激强化肌肉过程中决定患者舒适性的因素	(152)
六、神经肌肉电刺激强化骨骼肌的证据	(153)
七、便携式和临床电刺激器强化作用的比较	(158)
八、神经肌肉电刺激强化对肌肉耐力和疲劳的效果	(161)
九、电刺激对恢复失神经肌肉肌力的作用	(161)
十、神经肌肉电刺激强化的结论	(163)
十一、神经肌肉电刺激强化的研究方法	(164)
十二、神经肌肉电刺激强化的临床指南	(164)
十三、神经肌肉电刺激的注意事项和禁忌证	(167)
十四、临床病例研究	(168)
第7章 控制运动和姿势的肌肉电刺激	(173)
一、控制运动和姿势的电刺激应用原理	(174)
二、应用电刺激控制运动的作用	(175)
三、临床病例研究	(190)
第8章 电刺激促进慢性伤口的愈合	(196)
一、伤口愈合过程的概述	(198)
二、慢性伤口的评定	(200)
三、电刺激对伤口愈合的生理作用	(202)
四、电刺激促进伤口愈合的原理和步骤	(204)
五、电刺激促进慢性伤口愈合的效能	(206)
六、电刺激促进慢性伤口愈合治疗的注意事项和禁忌证	(209)
七、临床病例研究	(210)
第9章 泌尿生殖功能障碍的电刺激和生物反馈	(213)
一、泌尿生殖系统解剖学结构和生理学特点	(215)
二、排尿功能异常	(222)
三、盆底肌肉损伤	(223)
四、电刺激对泌尿生殖功能障碍的作用	(225)
五、泌尿生殖系统疾病的生物反馈	(234)

六、临床病例研究	(241)
第 10 章 用于药物传递的电刺激:电离子透入疗法	(246)
一、电离子透入疗法的基本原则	(248)
二、电离子透入疗法的仪器	(253)
三、电离子透入疗法的应用原则	(255)
四、电离子透入疗法的临床应用	(256)
五、电离子透入疗法的临床适应证	(257)
六、临床病例研究	(265)
第 11 章 肌电生物反馈改善随意运动控制	(271)
一、肌电图与肌肉活动	(272)
二、技术问题	(273)
三、肌电生物反馈的优点	(275)
四、目前的临床应用	(276)
五、适宜患者入选指南	(277)
六、制定培训策略	(278)
七、临床病例研究	(280)
第 12 章 临床电生理学检查与评估:原理、操作过程和结果解读	(284)
一、细胞外与细胞内记录技术	(286)
二、电生理学检查与评估的仪器	(289)
三、电生理学检查的操作	(295)
四、临床肌电图检查	(326)
五、经典的电生理学测试	(337)
六、电生理学测试的禁忌证及注意事项	(339)
七、神经肌肉功能的常规临床检查	(340)
八、问题处理和神经肌电图检查	(342)
九、临床病例研究	(346)
附录 A 上下肢的外周神经解剖学	(355)
附录 B 自我测试题答案	(364)

第 1 章

电学基本概念和电疗法的现代术语

一、电学基本概念

- (一) 电荷
- (二) 电场
- (三) 电压
- (四) 导体和绝缘体
- (五) 电流
- (六) 电阻和电导
- (七) 欧姆定律
- (八) 电容和阻抗

二、电疗法的电流术语

传统的和商业化的电流命名

小结

自我测试题

参考文献

电作为一种能量,可对生物组织产生明显作用。本章简要归纳电学与电磁学的基本概念,以便更好地理解治疗性电刺激。对电现象的描述,尽可能少地应用公式,而常使用类推法,使读者想象应用电刺激导致的人体组织变化。本章侧重对相关电现象的概念化,而不是简单记忆。该章通过术语对临床应用的电流进行定性和定量描述,以保证全书能够清晰、一致地描述刺激过程。具有物理电学基础的读者可跳过“电学基本概念”,直接学习“电疗法的电流术语”。

一、电学基本概念

(一)电荷

如同质量和时间,电荷是一种基本的物理特性。可通过实验方法了解电荷,即一个人从未见过电荷,但可通过实验看到电荷的表现。例如,物理老师可演示用布摩擦琥珀(一种黄色的化石树脂)就可使琥珀吸引像小纸片那样轻的物质。最初科学家们将琥珀的这种特性描述为静电,静电是琥珀内带电粒子的电磁吸引力的表现。琥珀通过与布原子进行电子交换而带有电荷,结果布和琥珀显示出吸引或排斥多种其他带电物质的能力。

电荷作为物质的特性,为产生电磁力的基础。实验证实存在两种类型电荷,即正电荷和负电荷。简言之,原子的电子(负电荷)和质子(正电荷)携带电荷。同性电荷相斥,异性相吸。电荷不能产生也不能消亡,可由一种物体转移至其他物体(电荷可分离)。电荷并不仅限于物质的亚原子水平。某种电中性原子带有等量的电子和质子。如果某元素的原子失去电子,而核中质子不变,则其带有正电荷;如果原子得到电子,则带有负电荷。得到或失去电子的原子被称为离子,带正电荷的原子为阳离子,带负电荷的原子为阴离子。

物体或物质也可带有电荷。以干电池两端电荷为例,由于电池内发生的化学反应,金属一端(阴极)获得电子而带有负电荷,而另一端(阳极)失去电子而带有正电荷。电池的阴极和阳极有时称为电池极性。极性是指一个电路的两端或两极在某一瞬间的相对电荷(正或负)。

两电荷间的力可通过实验测定,以库仑(C)为单位表示。两个静止电荷(q_1 和 q_2)间的库仑力(F),与两个电荷的电量的乘积呈正比,与电荷间距离的平方呈反比,可由库仑定律表达为:

$$F \propto (q_1 \times q_2) / r^2$$

库仑定律可简单归纳为电荷量越大或两个电荷越近,相互间的吸引力或排斥力越大。电子和质子的库仑力大小相等,而极性相反。单个电子的库仑力为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。因此,一个能产生1库仑力的电荷需要 6.24×10^{18} 电子。

(二)电场

带电粒子的电力通过其产生的电场(E)传给其他带电粒子,这种传递方式类似于地球重力通过重力场的传送。图1-1显示两个异性电荷物质和两个同性电荷物质产生电场的特征。

(三)电压

通过图1-2可理解电压的概念。如图所示,如果大的带电体A靠近同性的小带电体B,当两个带电体靠近时,通过电场传输的A物体的库仑力被B所感知,提高B物体的电势能(PE)。如果能够自由移动,B物体将由其原位置移动一定距离(d)到新的位置。A物体所做的功(W)等于作用于B物体的平均库仑力和B物体移动距离的乘积,即: $W = F \times d$ 。

由于物体B移动,最初与A相互作用所获得的势能消失,用于做功。因此: $W = \Delta PE$ 。

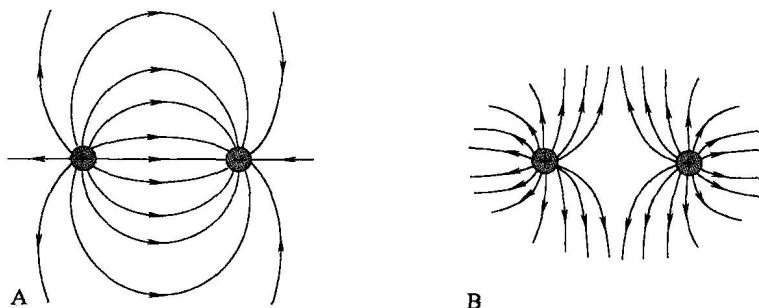


图 1-1 异性电荷(A)和同性电荷(B)周围的电场线
电场线的形状反映异性电荷间的引力和同性电荷间的斥力

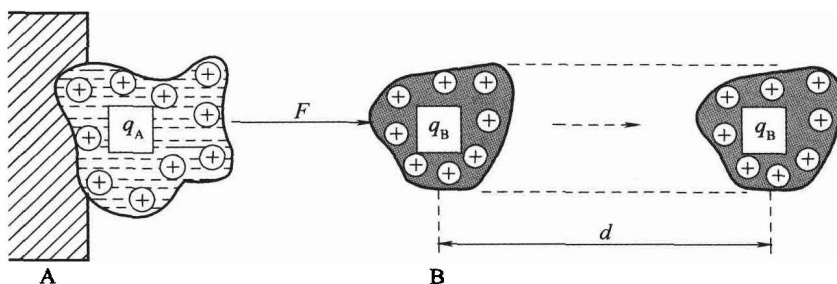


图 1-2 两个同性带电体靠近的作用(电荷 q_A 和 q_B)
A. 固定位置; B. 两物体间排斥的库仑力(F)将使物体分开一定距离(d)

因为所做的功与 B 的电荷呈正比,势能的变化也与 B 的电荷呈正比,所以电压(V)可表达为: $V = \Delta PE/q_B$ 。

电压是指单位电荷在电场中两点间电势能的改变,可作为电势差的同位语。从更实用的角度出发,电压代表移动电粒子的驱动力,常作为电动力(e f m)。使带异性电荷的物体分开,或带同性电荷的物体靠近,或一个系统中带电粒子不均匀分布时则产生电压。电压的标准单位为伏特(V)。1 伏特等于每库仑电荷 1 焦耳能量的改变,即: $1V = 1J/1C$ 。

电疗学中应用的电压范围可以小到毫伏级(mV , $10^{-3}V$, 伏特的千分之一),大到数百伏(应用于非常短的时间)。

(四)导体和绝缘体

带电粒子,例如金属中的电子或溶液中的离子,当与其他带电粒子相互作用时,则倾向于运动或改变位置。换言之,当电势差存在时,物质中的带电粒子将发生自由移动。当某物质的带电粒子在电场中稳定地移动,这种物质被称为导体。金属如铜是良导体。在电场中,金属原子可从其外轨道稳定地丢失电子。如果带负电荷的物体靠近一条长金属线的一端,与物体最近的电子将沿金属线移动,远离该带同性电荷的物体。

生物组织体液中带电粒子以离子形式存在,例如钠离子(Na^+)、钾离子(K^+)和氯离子(Cl^-)。由于组织在电场力下,体液中的离子可自由流动,所以人体组织是导体。人体不同组织中的离子移动能力不同,肌肉和神经是良导体,而皮肤和脂肪是不良导体。

与导体相反,绝缘体为不允许离子或电子自由运动的物质。橡皮和多种塑料制品是良绝缘体。

(五) 电流

对理解治疗性电刺激,运动的电荷性质比静止电荷性质更重要。在一定电场下带电粒子通过导体的运动称为电流(I)。电荷从物体一点传导到另一点为一种能量的转移,临床电刺激的这种能量可引起生理性改变。

产生电流需要:①物质中存在自由运动的带电粒子;②导致粒子移动的驱动力。金属回路中可移动的带电粒子是电子,在生物系统中是体液中的电解质离子。在生物溶液中产生电流的力是所应用的电压。导电介质中,电流强度与施加的电压呈正比,即:

$$\text{电流} \propto \text{电压} (I \propto V)$$

电流定义为单位时间(t)通过导体截面的电荷量(q),即: $I = \Delta q / \Delta t$ 。

测量电流的标准单位为安培(A)。1A 等于每秒钟通过某一点 1C 电荷。电疗中应用的电流非常小,通常为毫安(mA, 10^{-3} A,千分之一安培)或微安(μ A, 10^{-6} A,百万分之一安培)。

(六) 电阻和电导

电流的大小不仅决定于驱动力(V)的大小,同样决定于电子或离子通过导体的相对难易程度。导体的这种特性可用两种方式即电阻(R)和电导(G)来描述。电阻特性描述对导体中电粒子移动的阻碍程度,而电导特性描述对介质中电粒子移动的传导程度。对于金属,电阻决定于导体的横截面积(A)、长度(L)和电阻率(ρ),可用公式表达为:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

电阻的标准单位是欧姆(Ω)。导体产生的电流大小与导体的电阻呈反比,即:

$$I \propto 1/R$$

电导用于描述带电粒子通过导体的能力,与电阻呈反比,即:

$$R = 1/G$$

电导的标准单位是西门子(S;这里不再使用欧姆)。

电阻类似于水压系统中阻止液体流动的力。就像对液体流动的阻力随管道直径减小(或管道长度增加)而增加一样,对电流的阻力随导体直径的减少(或导体长度增加)而增加。

(七) 欧姆定律

电压和电阻间的关系决定电流的大小,可用欧姆定律表示,即:

$$I = V/R \quad \text{或} \quad V = I \times R$$

根据欧姆定律,当加的驱动力(V)增加,或对抗电荷移动的阻力减小时,通过导体的电流增加。同样,欧姆定律可用电导表示为:

$$I = V G \quad \text{或} \quad V = I/G$$

(八) 电容和阻抗

对于理解生物组织的电流,还需了解另外两个电学概念,即电容和电阻。电容是导体和绝缘体系统储存电荷的特性。生物组织中产生的电流既受组织电阻,也受组织电容的影响。

电容器,作为一种电路设备,由两块被绝缘体(电解质)隔开的金属板构成(图 1-3A)。当一固定电压加于电容器时,由于绝缘物质的存在,所以没有电流通过电容器。然而,位于电容器两块金属间的电位差提高了绝缘体中分子的势能(图 1-3B)。当电压被去除后,储存的能量(电容器的电势差)仍可保留,直至电容器通过某种电路完成放电。

电容器储存电能的方式类似于水力系统中的非通透弹性膜。如图 1-3C 所示,一个薄的橡皮膜置于非弹性管的底部,利用活塞产生对液体的驱动力,并没有使液体通过膜(无电流通过),但引起膜膨胀(图 1-3D),储存能量。如果管中阀门是关闭的,且活塞压力被释放,膜可保持于膨胀的能量储存位置,直到阀门重新打开(图 1-3E)。如果阀门重新打开,膜的弹性将使液体(电流)流出,一直持续到膜回到最初的静止位置。因此,水力回路中弹性膜储存的导致水流的能量就像电容器储存的导致电流的电能一样。可见,当施加稳定、单向的活塞压力时,管中膜可阻止液体通过管流动,就像施加稳定的电压时,电容器阻止直流电一样。虽然电容器具有阻断直流电作用,但它允许交流电通过。对于具有特殊电容的系统,交流电的频率越高,电流就越容易通过此系统。

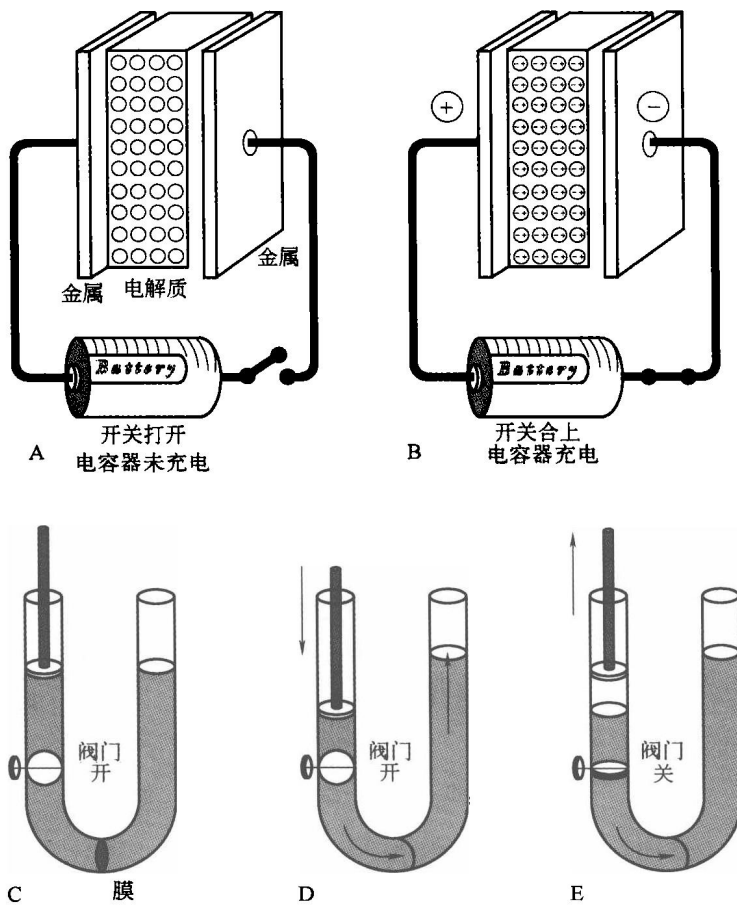


图 1-3 单一电路中电容的模式图

A. 未充电状态;B. 充电状态下,电容器通过电解质分子变构储存电能;C. 水力系统中类似的未充电电容器;D. 充电电容器;E. 去除外力的充电电容器,通过非通透弹性膜的变形储存能量

电容器或相似系统的效能以法拉第(F)为单位表示。1F 为 1V 电位差下储存的 1C 电荷。

阻抗(Z)用以描述对交流电的阻碍,就像电阻用来描述对直流电的阻碍一样。阻抗可用于描述电容和电阻阻碍带电粒子的运动。对于临床电刺激而言,因为人体组织为一理想化的复杂电阻-电容(R-C)网络模型,阻抗更适于表达对电流的对抗。由于阻抗取决于生物组织的