



国际信息工程先进技术译丛



电生理学 方法与仪器入门

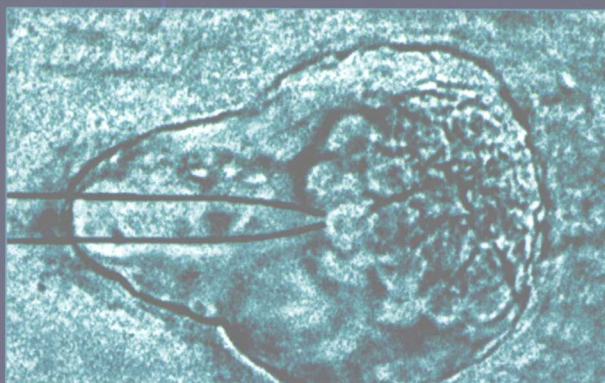
**Introduction to
Electrophysiological
Methods and Instrumentation**

(荷) Franklin Bretschneider

(法) Jan R. de Weille

著

封洲燕 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

电生理学方法与仪器入门

**Introduction to Electrophysiological
Methods and Instrumentation**

(荷) Franklin Bretschneider

(法) Jan R. de Weille 著

封洲燕 译



机械工业出版社

本书介绍电生理仪器的基本原理、使用方法以及注意事项,分为电学、电子学、电化学和信号分析4个部分。内容主要包括:用于电生理仪器设备的无源元件和有源电子器件、半导体器件、电路、放大器、显示器和计算机等的基本原理;电生理学研究的各种技术方法和仪器设备及其优缺点;电化学反应、电极的制作和使用;以及处理和分析各种电生理信号的方法。

读者对象包括:电生理学、生物医学工程以及仪器仪表专业的学生;从事基础或临床电生理学研究的科研人员,特别是那些缺乏电子学、信号处理和电化学等方面正规培训的人员;从事电子仪器设备(特别是电生理仪器)设计开发和经销的工程师和代理商等。另外,对于电生理学研究领域及其仪器和方法感兴趣的其他人员,本书也是一本很有用的参考书。

Translation from the English language edition:

Introduction to Electrophysiological Methods and Instrumentation

By Franklin Bretschneider and Jan R. de Wille

Copyright©2006, Elsevier Inc. All Rights Reserved.

本书原版由 Elsevier 公司出版,并授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书版权登记号:图字 01-2008-2077

图书在版编目(CIP)数据

电生理学方法与仪器入门/(荷)布雷特奇德(Bretschneider, F.), (法)威尔(Weille, J. R. de)著;封洲燕译. —北京:机械工业出版社, 2008. 9

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文: Introduction to Electrophysiological Methods and Instrumentation
ISBN 978-7-111-25078-4

I. 电… II. ①布…②威…③封… III. ①电生理学—基本知识
②电生理学—仪器—基本知识 IV. Q424

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第137824号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:牛新国 朱林 版式设计:霍永明

责任校对:申春香 封面设计:马精明 责任印制:邓博

北京四季青印刷厂印刷(三河市兴旺装订厂装订)

2009年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·15.75印张·301千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-25078-4

定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379178

封面防伪标均为盗版

译者的话

《电生理学方法与仪器入门》一书结合电子技术以及各种电生理仪器的发展历史,介绍了电子元器件、电路和电生理仪器的基本原理,并且介绍了电生理检测记录的各种技术和方法,以及内容广泛的电生理信号分析方法。本书深入浅出、简捷明了,实用性很强,可以作为辅助教材、参考书或者仪器使用维护的参考手册。鉴于目前国内缺乏相同类型的中文版著作,译者将此书翻译出来,希望对电生理学研究感兴趣的初学者有所帮助。特别是对于那些对电子仪器缺乏深入了解的生物学、医学等专业的学生和研究人员,本书可以帮助他们了解电生理学研究的各种技术及基本原理,更好地掌握实验操作方法。

原书中某些明显的笔误或印刷错误已作了更正,没有加以特别标注。

本书的翻译得到了国家自然科学基金项目的资助(项目编号为30570585和30770548)。翻译过程中,杨彭举、吴丹、汪洋、王静、邢昊昱、田聪等同学做了大量工作,在此深表谢意。另外,特别感谢我丈夫徐政的长期支持和鼓励,以及对部分译稿的校读和修正。

需要说明的是,本书是译者在尽量忠实原书的基础上翻译的,书中所述并不代表译者的观点。另外,为尽量保持原书特色,书中部分图形和文字符号并未按国家标准做修改,这点请读者注意。

由于译者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。译者联系方式:电话:0571-87952131,电子信箱:hmfzy@yahoo.com.cn。

封洲燕

于浙江大学玉泉校区

2008年6月

前 言

广义上，电生理学是研究植物和动物生命活动中具有重要作用的电现象的一门学科。这些电现象包括活细胞中无处不在的膜电位及其变化，膜电位的变化构成了生物体的生理信号，这些信号可以是某种化学物质浓度变化引起的缓慢变化，也可以是神经元等细胞的细胞膜通道快速开放引起的动作电位的快速瞬间变化。

电生理信号是生命体中最快速的信号，例如听觉定向中，左右耳声音信号之间的时间差只有 $20\mu\text{s}$ 。除了快速传递信号之外，生物体的电反应也是对于周围环境微弱信号非常灵敏的检测。例如，鱼身上具有的电敏感器官可以对其身体皮肤上 $1\mu\text{V}$ 那么低的电压产生响应。另外，神经编码是一种经得起长距离神经纤维传输的强健的编码信号，正是由于这种特性，长颈鹿的大脑对于爬在它脚趾上的蚊子产生的感觉可以像对于爬在它脑袋上的蚊子的感觉一样精确。人体肌肉的活动被了解得最清楚了，它主要是由电化学反应控制和放大的。另外，有些电鱼甚至可以发出电压超过 500V 的强大电脉冲，足以击昏它们的捕猎的动物，并且震慑敌人。虽然植物通常比较安静，但是电反应在其新陈代谢中也具有很重要的作用，尤其是光合作用。某些植物甚至会产生动作电位脉冲，例如含羞草等的快速退缩反应就是由电扩散反应调节的。虽然支持整个生命体系的各种化学反应很重要，但是无论对于基础研究，还是对于医学应用，快速电反应机制的研究都是生命科学的一个引人入胜的学科分支。

对于大众而言，心电图 (electrocardiogram, ECG) 和脑电图 (electroencephalogram, EEG) 是报纸和电视节目中常见的众所周知的电生理学方法。除了这些熟悉的临床应用以外，还有肌电图 (electromyogram, EMG)、视网膜电图 (electroretinogram, ERG)、测量眼活动的眼震电图 (electronystagmogram)、神经电活动记录、单细胞电活动记录以及应用诺贝尔奖获得者 Neher 和 Sakmann 发明的膜片钳技术记录的各种细胞膜上的微小单离子通道的电活动等，这些都是电生理学所检测的信号。

研究电生理学不仅需要掌握这些电现象的基本知识，而且还要能够很好地操作仪器设备。在早期的电生理记录中，生理学家经常自己制作放大器等工具。现在，许多公司都能提供近乎完美的用于记录、处理和刺激的各种仪器设备。但是，用户必须能够正确地维护和使用这些仪器设备，如果对所用的工具没有足够的了解，就可能导致错误的结果，浪费时间、经费和精力。

因此, 尽管有现代化的操作规程, 并且有各种电子仪器和计算机算法可用于信号的滤波、后处理以及数据的显示, 但是从事电生理学研究的必须对所用工具, 尤其是对于前置放大器和电极等关键器件的基本工作原理有一定的了解, 由于它们直接与所要研究的生物活体标本相连接, 因此更要了解清楚。在制订实验计划和配备仪器时, 要了解各种可能的选择, 以及它们是否能够得到正确的测量结果。

虽然本书并不是一本电学理论的书, 但也免不了要在第 1 章介绍几个最基本的电量和电路概念, 例如电荷、电压、流过电阻和电容等无源元件的电流, 以及电压源电路和滤波电路等。由于电生理仪器一般在很大程度上都依赖于电子电路, 第 2 章介绍的电子学是本书的主要内容之一。第 3 章花费了一定的篇幅介绍电化学反应, 内容涉及电极、盐桥等的应用, 以及生物体内部的电化学反应。电生理信号的复杂性以及信息提取的需求, 导致了各种各样的信号处理和数据处理方法的产生, 本书第 4 章将全面介绍这些方法, 从可以目测判断的简单 ECG 记录信号到要用专门软件进行处理的离子单通道开放时间的统计数据, 从计算机屏幕上的神经元脉冲信号的点图显示到随机点过程的分析等。对于每一种方法都适当地讲述了相关的数学基础和算法, 以便于读者能够较好地了解这些方法的基本原理, 减少实际应用中的失误。

本书的读者对象是从事电生理学研究的, 尤其是对于那些没有接受过电子学、信号处理和电化学方面正规培训的读者。希望本书能够引导读者学习各种电生理学研究的方法, 从基本原理的认识, 到方法的掌握, 直到常规的应用。本书内容全面丰富、深入浅出、容易理解。为了达到这个目标, 本书使用通俗的语言进行定性说明, 同时也使用了足够的数学公式使读者能够掌握一定的定量分析方法。对于本领域的常用术语, 书中都给出了适当的介绍。本书简明扼要, 可以指导实际工作, 是一本实用的工具书。

由于本书详细地介绍了电子学的基本原理, 并且也讲述了数字仪器, 包括计算机算法及其数学基础, 因此希望本书对于电生理学领域之外的其他人员也是一本普遍适用的入门书。有关电生理装置的电气安全问题和 CRT 监视器的使用等内容放在附录中。

本书虽然由我们两位作者完成, 但它是我们与许多同事和学生常年实践和合作的成果。首先, 要感谢我们的老师和同事 R. C. Peters 博士, 是他奠定了本书的基础, 并在多年的合作中鼓励作者之一 (F. Bretschneider) 对本书进行拓展、改进并发表, 他给予我们很多建议, 对本书作出了很大贡献。附录 D 有关 CRT 显示技术的内容是 R. J. A van Wezel 建议编写的, 并经过了他和 J. Duijnhouwer 先生的审阅, K. Britten 热情地提供了图 D-5。P. F. M. Teunis 博士提出了宝贵的意见并热情地提供了有关伽玛分布的统计数据。A. C. Laan 博士、W. J. G. Loos 先

生、R. J. Loots 先生、A. A. C. Schönhage 先生、R. van Weerden 先生、T. Sanderson 博士以及另外几位不具名的审阅人，对初稿提出了宝贵的意见。我们还要感谢 A. V. van den Berg 教授和 W. A. van de Grind 教授的鼓励。同时，我们也感谢 Elsevier 出版社 J. Menzel 博士和 M. Twaig 女士等人的友好合作。最后，我们要感谢直接或间接对本书作出贡献的所有学生，感谢他们在本书定稿过程中对多次修改的宽容和耐心。

F. Bretschneider

J. R. de Weille

2005 年 9 月 15 日于 Utrecht

目 录

译者的话

前言

第1章 电学	1
1.1 电量	1
1.1.1 电荷、电流和电压	1
1.1.2 电阻	2
1.1.3 电容	3
1.1.4 电磁学	5
1.1.5 自感应	5
1.1.6 直流、交流和频率	6
1.1.7 电抗	8
1.1.8 电流源和电压源	9
1.2 元件及其非理想特性	9
1.2.1 非理想特性——阻抗	12
1.2.2 电缆线	16
1.3 电路、原理图、基尔霍夫定律	17
1.4 同类元件的组合——分压器	19
1.5 电压和电流的测量	22
1.6 不同元件的组合——滤波器	24
1.6.1 积分和微分	29
1.6.2 LC滤波器	31
第2章 电子学	33
2.1 有源元器件	33
2.2 电子管和半导体	33
2.3 半导体器件	35
2.4 二极管和晶体管	35
2.5 其他半导体器件	38
2.6 放大器、增益、分贝数和饱和	41
2.6.1 增益	41

2.6.2 带宽	42
2.6.3 输入阻抗和输出阻抗	44
2.6.4 最大信号幅值和失真	45
2.7 噪声、工频干扰和接地	46
2.8 差分放大器和电路框图	53
2.9 运算放大器和反馈	56
2.10 电子滤波器	61
2.11 电生理前置放大器	63
2.11.1 胞外记录放大器	64
2.11.2 胞内记录放大器	65
2.11.3 膜片钳放大器	66
2.11.4 双电极电压钳放大器	69
2.11.5 利用电压钳测量膜电容	70
2.11.6 细胞分泌活动的记录	70
2.12 电源和信号发生器	72
2.13 电子电压表	76
2.14 阴极射线示波器	78
2.14.1 液晶显示示波器	80
2.14.2 示波器的重要特性	80
2.15 数字电子学和逻辑电路	83
2.16 模/数转换和数/模转换	90
2.17 计算机	93
第3章 电化学	100
3.1 引言——电解质的特性	100
3.2 金属与电解质之间的界面	106
3.2.1 极化电极的电容	106
3.2.2 法拉第反应	107
3.2.3 实用电极	109
3.2.4 电化学电池和测量电极	110
3.2.5 Ag/AgCl 电极	111
3.2.6 非法拉第反应	111
3.3 电动力学效应	112
3.4 液接电位	112
3.5 膜电位	114
3.5.1 平衡电位的推导	114

3.5.2 反转电位	115
3.5.3 离子选择性	117
3.5.4 pH 电极和其他离子选择性电极	118
3.6 电极的使用	119
3.6.1 玻璃微电极	119
3.6.2 膜片钳微电极	121
3.6.3 半通透膜片	122
3.6.4 接地电极	123
3.7 容积导体——电解质溶液中的电场	123
3.7.1 匀强电场	124
3.7.2 单极电场	125
3.7.3 偶极电场	125
第4章 信号分析	127
4.1 引言	127
4.2 模拟电位分析	128
4.2.1 系统分析	128
4.2.2 卷积	130
4.2.3 拉普拉斯变换	132
4.2.4 傅里叶变换	134
4.2.5 奇函数和偶函数	138
4.2.6 线性性	138
4.2.7 模/数转换和数/模转换	140
4.2.8 信号窗	141
4.2.9 数字信号处理	143
4.2.10 数字滤波器	150
4.2.11 傅里叶滤波器和非因果滤波器	152
4.2.12 非线性系统分析	156
4.2.13 非线性系统的重要性	161
4.3 动作电位信号分析	162
4.3.1 群峰电位和总体电活动	163
4.3.2 皮肤表面的电信号记录	164
4.3.3 单元电活动	168
4.3.4 锋电位脉冲序列的不确定性	169
4.3.5 时间间隔直方图	171
4.3.6 泊松过程	173

4.3.7 伽玛分布	175
4.3.8 随机点过程的数学基础	175
4.3.9 马尔可夫链	176
4.3.10 时间序列分析——锋电位脉冲发生率、时间间隔和即时频率	177
4.3.11 点图显示	180
4.3.12 刺激响应特性分析——刺激后时间直方图	180
4.4 神经细胞膜数据分析	182
4.4.1 Hodgkin-Huxley 离子通道	182
4.4.2 宏观电流分析	183
4.4.3 电流-电压曲线	184
4.4.4 线性外插法消除漏电流	185
4.4.5 P/N 法消除漏电流	186
4.4.6 噪声分析——从全细胞记录或者大膜片记录中估计单通道电导	187
4.5 噪声分析——通道动力学估计	188
4.5.1 单通道电流分析	189
4.5.2 由马尔可夫链计算驻留时间直方图	197
4.5.3 初始潜伏期分布	197
4.5.4 关闭状态驻留时间分布	199
4.5.5 开放状态驻留时间分布	201
4.5.6 宏观电流	201
附录	203
附录 A 符号、缩略语和编码	203
A.1 符号	203
A.2 缩略语	204
A.3 十进制倍数	205
A.4 电阻的彩色色环编码	205
附录 B 电路图图形符号	206
附录 C 电生理装置的电气安全	208
C.1 普通仪器	208
C.2 医学仪器	211
附录 D CRT 监视器在视觉实验中的应用	212
D.1 CRT 监视器的图像生成	212
D.2 帧频与隔行扫描	213
D.3 视频信号	214
D.4 CRT 监视器在电生理学中的应用	216

D. 5 对比度、灰度和其他亮度参数	216
D. 6 色彩编码	218
D. 7 图像的几何形状	219
D. 8 定时问题	219
D. 9 空间分辨率和亮度分辨率	220
附录 E 复数和复频率	221
附录 F 马尔可夫链的数学基础	223
附录 G 递归滤波器（非因果滤波器）	229
附录 H 由转移矩阵计算宏观电流和驻留时间分布的伪代码	230
附录 I 参考文献	234
I. 1 电学和电子学	234
I. 2 电化学	235
I. 3 神经生理学	235
I. 4 记录方法	235
I. 5 信号分析	236
I. 6 数学	237

第 1 章 电 学

1.1 电量

电学理论所包含的内容非常多，其中的大部分内容不在本书的范围之内。为了便于读者了解仪器的功能以及电化学反应和神经电生理过程，下面我们只介绍在电生理学中具有重要作用的几个电学参量。

1.1.1 电荷、电流和电压

电荷是电的一个基本参量，原子核内部的电荷为正电荷，原子核外围电子的电荷为负电荷。18 世纪建立的电路理论把电荷 Q 的单位定义为库仑 (C)。

此后，在 1909 年由 R. Millikan 确定了电荷的基本常数 $1.6021 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，也就是一个电子的电荷量。由于这个量子化的“电量”很小，因此，大多数电现象可以看作连续变化的量，而不是离散的量。

根据原子的性质，大多数物质，即一般日常使用的材料，都是中性的。显然，这不是指它们不带电，而是因为：(1) 正电荷数目等于负电荷数目；(2) 异性电荷靠得非常近，在宏观上体现不出正负电荷。这意味着许多物质通过摩擦等作用可以“解离”出电荷。实际上，在古代，电就是由摩擦发现的。18 世纪以后，电现象得到了系统的发展，很多科学博物馆珍藏有 van Marum 和 Wimshurst 等人发明的大型静电发生器，这种装置可以产生相当高的电压（大约 50 000V），但是电流很小，只有 $1\mu\text{A}$ ，因此没什么实际用途。

现在，大多数电能是由机电转换得到的，比如发电厂的发电机，以及汽车和摩托车上的发电机等。另外，电池和蓄电池使用的是最初由 Galvani 和 Volta 发现的电化学方法，这两种电源提供的电压较低，如 12V 左右，但电流可以很大，如汽车电池的电流可以达到数百安。

描述电现象的最重要的两个电量就是电压（单位为 V）和电流（单位为 A）。注意，这些单位名称的正确拼写方法是，全称用小写字母，缩写则用单个大写字母。英联邦国家常将电压称为“伏特”。这两个单位都与实际使用量很接近，也就是说，使用 1V 电压或 1A 电流的电路在实验室或者在家中随处可见。其中，电荷和电流的定义可以从其他基本物理量中推导得到，即

电荷 (Q): 1C (库仑) 电荷定义为 $6.241\,460 \times 10^{18}$ 个电子的电荷。

电流 (I): 每秒通过 1C 电荷的电流被定义为 1A。

附录 A 给出了各种电量及其单位和表示符号。

电压 (即电位差) 定义的推导比较复杂。作用于电荷 (或带电物体) 的电场力不仅与电场强度有关, 还与距离有关。因此, 电位 (U) 被定义为电荷从电场中的某一点移动到无穷远处 (即电场力为 0 的地方) 所需要的能量, 也就是所做的功 (W)。如果电荷不被移动到无穷远处, 只是从电场中的一点移动到另一点, 那么所需的能量就要小一些, 这就是两点之间的电位差。这两点的位置由实际应用情况决定。

例如, 电生理学家用一根插入细胞的电极测量膜电位。理论上, 这时的参考电极应该放在无穷远处, 即电位被定义为 0 的地方。但是, 实际操作中, 参考电极只是放在细胞外邻近处, 所以, 测量的是细胞膜内和膜外之间的电位差。由于细胞膜电阻比细胞内液和细胞外液的电阻要大好几个数量级, 因此, 可以认为细胞膜外的电位已经足够接近于 0。于是, 电生理学常规就将细胞膜内外的电位差称为膜电位。

但是, 其他许多测量情况并非如此。很多电生理数据完全在细胞外测量得到, 比如, 心电图、脑电图以及其他神经电信号和肌电信号等。这时, 细胞外电位不能认为是 0! 细胞外两点之间的电位差就是所记录的信号。

电压 (即电位差) 的单位是伏特 (V), 其定义为:

电位 (U): 如果将 1C 的电荷从电场中的某一点移动到另一点 “用到” 1J (焦耳) 的功 (W), 那么, 这两点之间的电压被定义为 1V。

注意, 这里 “用到” 一词表示电荷移动可能是消耗能量, 也可能是释放能量, 取决于电荷移动的方向。

1.1.2 电阻

电阻的概念直接由基本电量来定义: 在电压的作用下, 如果有一定量的电流流过物体, 这就是电阻特性的表现。电阻被定义为电压与电流的比值, 即:

电阻 (R): 1Ω (欧姆) 等于 $1V/1A$ 。

下列公式形式表示的这种关系更易于记忆:

$$I = Q/t \quad \text{即 安培} = \text{库仑/秒: } 1A = 1C/s$$

$$U = W/Q \quad \text{即 伏特} = \text{焦耳/库仑: } 1V = 1J/C$$

$$R = U/I \quad \text{即 欧姆} = \text{伏特/安培: } 1\Omega = 1V/A$$

最后这个公式就是著名的欧姆定律, 从事电气技术的人们都非常熟悉。根据未知量的不同, 它还有另外两种表示形式, 即:

$$U = IR \quad \text{和} \quad I = U/R$$

可见, 已知其中的任意两个量, 利用欧姆定律就可以求得第三个量, 这种方

法很常用。例如，电生理学研究中，在电极上施加恒定的电流，由测得的电极两端的电压降，就可以计算出电极的电阻；膜电阻则可以通过测量钳位电压下的膜电流来求得。

电阻是物体的性质，电极或细胞膜、铜之类的固体以及水之类的液体都有电阻。电阻的大小取决于固体或液体柱的尺寸。单位物质的电阻被称为“电阻率”，其单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ （欧姆·米）。在电化学中，经常使用较小的厘米-克-秒单位制，相应的电阻率单位就是 $\Omega \cdot \text{cm}$ （欧姆·厘米）。根据经验，纯净水的电阻率约为 $1\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ （即 $10\Omega \cdot \text{m}$ ），海水的电阻率大约是 $25\Omega \cdot \text{cm}$ （即 $0.25\Omega \cdot \text{m}$ ）。显然，金属是比较好的导体，电阻率要低得多，在 $10^{-5}\Omega \cdot \text{cm}$ 数量级。

“ $\Omega \cdot \text{cm}$ ”这个电阻率单位初看有点怪，但并不难理解。因为，电阻与柱体的长度成正比，与截面积（宽 $\times$ 高，或半径的平方）成反比，因此，“ $\Omega \cdot \text{cm}$ ”这个电阻率单位实际上是由 $\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$ 得来的。

我们已经提到的其他电量还有功率和能量（也就是功）。能量（ W ）的单位是 J 。单位时间的能量称为功率（ P ），其单位是 W （瓦）。扬声器、汽车发动机、电炉等的性能都用功率来衡量。这些电器的使用时间越长，消耗的能量就越多。显然，开销的大小由所消耗的能量决定，但是，功率是表征电器的最佳指标。电的功率取决于电压和电流，通过欧姆定律的关联，也取决于电阻，即： $P = UI$ ；或者 $P = I^2 R$ ；或者 $P = U^2/R$ （ $1\text{W} = 1\text{VA}$ 或者 $1\text{W} = 1\text{V}^2/\Omega$ ）等。功等于功率乘以时间，即

$$W = Pt \quad \text{或者} \quad W = I^2 R t$$

后一公式就是焦耳定律。

1.1.3 电容

下一个要说的电量是电容，就是物体在一定电压下贮存电荷的能力。那么，“贮存电荷”是什么意思呢？两根导线，或者两个一般的物体，不管需要还是不需要，当它们相互靠近时，都会发生“电荷贮存”现象。一个带正电荷，另一个则带负电荷，两者之间就会有电压。当距离靠得很近时，两者的电场互相影响，电场的作用会被部分中和。如果正负电荷相等，或者两种电荷的重心重合，那么，物体的净电荷为0，成为中性。这就是为什么原子从整体上说是中性的。换言之，将两个导体之间的距离拉近，电压就会下降。此时，电荷被部分“隐藏”，也就是贮存了。两个物体之间距离越近，表面积越大，可以贮存的电荷就越多。

注意，这里的前提是两个导体之间必须有很好的绝缘，比如真空或者干燥的空气。否则，电流的流动会将电荷中和掉。玻璃、各种陶瓷和塑料都是很好的绝缘体。还要注意，电容上的电荷贮存与电阻不同。对于电阻，只有当电流通过

时，它的两端才有电压；一旦电流停止，电压就为0。而电容不是这样，这里可以用一个水力系统来解释。电容好比是水桶，所装的水就像是电荷，水流就像电流，水位则对应于电压。如果向水桶中注入水，水位就会慢慢上升，最终能够达到的水位取决于注入的水的总量。如果水桶较小，那么少量的水就可以达到一定的水位；如果水桶较大，其容量很大，就需要很多水才能达到一定的水位。

同理，电容是贮存电荷的“水桶”，“电容”名称的由来就是与这个类比有关。电容（ C ）的单位是F（法拉），以物理学家法拉第的名字命名。电容的定义为：

电容（ C ）：如果在电容的两个极板之间转移1C电荷引起1V的电压变化，那么该电容的贮电能力就是1F，即

$$C = Q/V$$

由此公式派生的其他公式还有

$$C = It/V; C = t/R; \text{以及 } Q = CV$$

两个导体之间的电容取决于两者的距离，也就是物体的结构。导线、球体和不规则形状的物体会有一部分距离较近的表面，以及一部分距离较远的表面，其电容的计算较复杂。对于两个平行板，电容的计算就比较容易，即

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A/d$$

式中 A ——表面积，对于长方形是 $l \times w$ ，对于圆形则是 πr^2 ；

d ——平行板之间的距离；

ε_0 ——真空介电常数，其值为 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ；

ε_r ——“相对介电常数”，常简称为介电常数，它由电容两平行板之间的材料决定。

根据定义，真空的介电常数为1，空气的介电常数稍高，为1.000 58。其他绝缘体的介电常数变化比较大，对电容的影响比较显著。下面列出了部分绝缘材料的大概介电常数值（介电常数与温度有关，也与频率有关）：

玻璃	约 3.8 ~ 6.7
云母	6.0
纸	3.7
聚乙烯	2.35
PVC	约 4.5
陶瓷	约 6 ~ 8
水	约 81

显然，绝缘介质对于两个平行板之间的电场有影响。水的介电常数较高，这是由水分子的偶极子性质决定的，也与水分子在液态中的流动性有关，外加电场的很大一部分“消失”在水分子的重定向中了。

1.1.4 电磁学

与电现象一样,人们从古代就已经开始认识磁现象。但是,电和磁两者之间的紧密联系很晚才被发现,距今大约只有200年的时间。

电和磁之间主要的关系是:电流能感应出磁场,但是反之不成立,磁场不一定能感应出电流,只有变化的磁场才能产生电流。实际上,这就是电力线路等都使用交流电的主要原因。

由于存在这种电和磁的关系,描述磁的参量经常用电的单位来表示。例如,衡量磁现象的一个有用的参量是磁通密度,也称为磁感应强度,其单位是特斯拉。磁感应强度的定义为:

垂直于磁场方向的1m长的导线,通过1A的电流,受到磁场的作用力(F)为1N(牛顿)时,通电导线所在处的磁感应强度就是1T(特斯拉)。

也就是 $1\text{T}=1\text{N}/(\text{A}\cdot\text{m})$ (即“牛顿每安培米”)

“磁感应强度”也可以用以下关系来定义:

$$1\text{T}=1\text{J}/(\text{A}\cdot\text{m}^2) \text{ (即“焦耳每安培平方米”)}$$

此公式表示 1m^2 的面积上磁感应所对应的能量。

1.1.5 自感应

电流和磁场的相互作用会产生自感应现象,即变化的电流产生变化的磁场,而变化的磁场又感应产生电流。由于感应电流方向相反,最后使得总电流小于无自感应时的电流。自感(L)的单位是亨利(H)。自感是由变化的电流产生的,涉及时间变量,遵循以下关系:

$$U = -L\text{d}I/\text{d}t$$

也就是,感应电压与电流的变化成正比,也与自感(L)的大小成正比,但极性相反。因此,其定义是:

如果电流每秒变化1A(负的)可以感应产生1V的电压,则其自感的大小为1H。

显然,自感是所有带电流导体的基本性质。但是,当长导线绕成线圈时,其自感最强,这种线圈称为电感或电磁线圈。如果将导线绕成许多圈,那么导线中流过的同样大小的电流在每一圈线圈中所产生的磁场就可以叠加起来,如果再加上一个铁心或其他铁磁体就可以进一步增强磁感应。铁的磁性可以用类似于介电常数这样的量来表示,这个量称为“相对磁导率”,记为 μ_r 。真空等许多物质的磁导率几乎都等于1;磁导率稍小一点物质被称为抗磁性物质(μ_r 约为0.999 99);磁导率稍大一点物质(μ_r 约为1.01)被称为顺磁性物质。实际上,所有的物质都具有一定程度的抗磁性,对于顺磁性物质,只是其顺磁性超过了抗