

电
测
技
术

电测技术

[西德] E. Schröder 著

陈明 赵跃 丁永键 译

裘华徠 审校

华中工学院出版社

TM93-631

出
版
社

电 测 技 术

——电量及非电量的测量

[西德] E.Schrüfer 著

陈 明 赵 跃 丁永健 译

袁华徕 审校

华中工学院出版社

内 容 提 要

本书内容包括：检测学基础，电压、电流、电感、电容、电阻的测量及输出为上述电量的传感器，时间、频率的测量及输出为时间、频率的传感器，数字测量技术。书中以电信号的测量为线索，从输出信号形式的角度对传感器进行了分类。对各类信号的性质作了详尽的阐述，并简洁地描述了处理这些信号的方法。

无论从教学或从工程应用角度来说，本书都是一本很有价值的参考书。

电 测 技 术

[西德] E. Schröder 著

陈 明 赵 跃 丁永健 译

袁华徕 审校

责任编辑 常 江 南

*

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所发行

华中工学院出版社印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：17 字数：377,000

1985年9月第1版 1985年9月第1次印刷

印数：1—5,000

统一书号：15255—040 定价：3.70元

前 言

本书中电测技术的阐述是按照电工技术的观点来进行章节安排的。这样，就不会在描述最重要的测量仪器和测量方法时发生交叉和重复现象。

第一章关于测量技术的基础理论，读者不必首先全部阅读。因为要理解这些理论，需要有一定的测量技术基本知识。而这些知识在后续各章节中才逐一加以介绍。这些章节的内容是：电流和电压的测量，电阻的测量，电感的测量，电容的测量，相位角和频率的测量。其中，首先讨论幅值模拟信号，然后讨论数字信号，最后讨论时间和频率模拟信号。

在内容的选择方面，尽量不列举太多的测量电路和方法，以减少读者了解概况的困难。但是，对选入的电路和测量方法，我们则通过文字、公式和图表进行较详细的讨论。数学推导都是从最一般的前提条件出发的。通过这样处理，可以减轻读者记忆的负担，并且可以很容易地举一反三。

与本书内容安排相对应，非电量电测的各种方法，并不是直接对应工程中的被测量，而是按照由其所产生或受影响的电量来讨论的。这样对信号处理有着重要意义的电特性就更加明显，并且可以有机地联系起来加以讨论。同时，对传感器和其他的敏感元件以及它们所依据的物理效应，也进行了较详细的介绍。

总之，本书的内容已超出了入门讲座范围。它不仅面向大学生，而且也面向已在测量技术领域从事工作的自然科学家和工程师。本书的目的是向读者介绍现有的测量方法，以便读者在实践中加以选择。

本书编写过程中，在教研室工作的助教们提出了许多有益的建议。他们对选入书中的许多电路进行了组装和测试。V.Wyss 女士抄写了手稿的大部分，A.Koppe 女士绘制了大部分的图。Hanser 出版社的 Weberbeck 先生和 Niclas 先生进行了友好的合作。他们的丰富经验，使本书字迹十分清晰，印刷质量很高。我衷心地感谢他们的支持和合作。

E. Schröfer

一九八三．三，于慕尼黑

中文版前言

我与中华人民共和国科学工作者的合作还要追溯到1979年。在那一年，第一个中国客人来到我们教研室工作。去年九~十月间，我有机会亲自去中国，到华中工学院讲授《电测技术》这门课，当时，我与中国朋友进行了充分的友好的讨论。华中工学院提出，要把《电测技术》这本书译成中文，并在中国出版发行。慕尼黑 HANSER 出版社和我都非常高兴地接受了这一建议。翻译工作是由陈明先生（西北工业大学，译第一、二章）负责，与赵跃（译第三、四章）、丁永键（译第五、六章）二位先生共同完成的。这几位先生目前都在联邦德国进修和学习，他们付出了极大的努力，在相当短的时间内完成了这项工作。译文由裘华徕先生（华中工学院）进行了校对。我对上述先生们表示十分感谢。如果这本书能对中国的工程技术人员有所帮助的话，我将感到十分荣幸。

E. Schröder

1984年1月，于慕尼黑

目 录

第一章 理论基础..... (1)

1.1 电测技术的范围和意义..... (1)

1.2 测量单位..... (3)

1.2.1 国际单位制, SI单位..... (3)

1.2.2 单位及自然常数..... (6)

1.2.3 描述基本单位时的测量不确定度..... (7)

1.2.4 量值及数值方程..... (8)

1.2.5 单位的换算..... (9)

1.3 测量仪器的静态特性..... (9)

1.4 测量仪器的动态特性..... (11)

1.5 测量误差和测量不确定度..... (13)

1.5.1 无误差测量的前提..... (13)

1.5.2 测量的系统误差..... (13)

1.5.3 测量的偶然误差..... (15)

1.5.4 在保证误差极限为定值时的测量的不确定度..... (21)

1.6 测量设备的结构..... (23)

1.6.1 链式结构..... (23)

1.6.2 并联结构..... (24)

1.6.3 环形结构..... (25)

1.7 测量信号的信息传递参数..... (26)

第二章 电流和电压的测量; 输出为电压和电流信号的传感器..... (28)

2.1 机电测量仪器及其应用..... (28)

2.1.1 测量机构..... (28)

2.1.2 直流电流与直流电压的测量..... (32)

2.1.3 交流电流与交流电压的测量..... (38)

2.1.4 功率的测量..... (43)

2.1.5 电功的测量..... (48)

2.2 补偿器..... (49)

2.2.1 直流电压补偿器..... (49)

2.2.2 直流电流补偿器..... (50)

2.2.3 伺服乘法器和除法器..... (51)

2.3 测量机构式和补偿式记录装置..... (51)

2.3.1 结构特点..... (52)

2.3.2 结构形式..... (53)

2.3.3 不同系统的应用范围..... (55)

2.4 电子射线示波器..... (55)

2.4.1	电子射线管	(56)
2.4.2	标准组件	(57)
2.4.3	专用示波器	(61)
2.4.4	电子射线示波器的工作方式	(62)
2.5	测量放大器	(64)
2.5.1	引言	(64)
2.5.2	同相电压放大器	(68)
2.5.3	倒相电流放大器	(74)
2.5.4	电压放大器的应用	(78)
2.5.5	电流放大器的应用	(79)
2.5.6	实际运算放大器的零点误差	(84)
2.5.7	调制放大器	(88)
2.5.8	放大器噪声	(92)
2.6	输出为电压的传感器	(92)
2.6.1	用于位移和角度测量的差动变压器	(93)
2.6.2	感应式转速传感器	(94)
2.6.3	磁电式振动传感器	(94)
2.6.4	电感式振动传感器	(95)
2.6.5	Wiegand 传感器	(95)
2.6.6	磁致伸缩式振动传感器	(96)
2.6.7	霍尔探测器	(96)
2.6.8	感应式流量计	(99)
2.6.9	热电偶	(101)
2.6.10	p-n 结集成温度传感器	(105)
2.6.11	pH 值测量链	(106)
2.7	输出为电流和电荷的传感器	(107)
2.7.1	压电式力传感器	(107)
2.7.2	光电池和光电二极管	(111)
2.7.3	光电管	(115)
2.7.4	光电倍增器	(115)
2.7.5	电离室	(115)
2.7.6	电离计数管	(118)
2.7.7	闪烁计数器	(120)
2.7.8	半导体辐射检测器	(121)
第三章	电阻的测量; 电阻式传感器	(123)
3.1	电流和电压的测量	(123)
3.1.1	电流和电压的同时测量	(123)
3.1.2	用参比电阻作比较	(124)
3.1.3	恒流源供电和电压降的测量	(124)
3.1.4	分压器	(126)
3.2	平衡式电阻测量电桥	(126)

3.3	不平衡式电阻测量电桥	(128)
3.3.1	工作原理	(128)
3.3.2	恒压源电桥	(129)
3.3.3	恒流源电桥	(130)
3.3.4	带负载的电桥的等效电路	(130)
3.3.5	引线电阻的补偿	(131)
3.3.6	测试点的转换	(132)
3.3.7	零点抑制和对干扰进行补偿	(133)
3.4	电桥电路放大器	(133)
3.4.1	倒相减法放大器	(133)
3.4.2	在反馈环节内带有电阻传感器的差分放大器	(134)
3.4.3	带静电放大器的减法器	(135)
3.4.4	载频电桥和载频测量放大器	(137)
3.5	测量位移和角度的电阻式传感器	(138)
3.6	电阻式温度传感器	(139)
3.6.1	金属丝电阻温度计	(139)
3.6.2	负温度系数热敏电阻	(141)
3.6.3	正温度系数热敏电阻	(142)
3.6.4	硅电阻温度敏感元件	(144)
3.6.5	接触式测温计使用中的误差分析	(145)
3.7	LiCl 湿度传感器	(145)
3.8	用测温法进行气体分析	(147)
3.8.1	利用热传导原理进行气体分析	(147)
3.8.2	热效应气体分析仪	(148)
3.8.3	热磁氧分析仪	(149)
3.9	热丝型气流计	(149)
3.10	光敏电阻	(151)
3.11	磁控电阻	(151)
3.12	电阻应变片	(153)
3.12.1	作用原理和结构	(153)
3.12.2	电阻应变片在应力分析中的作用	(155)
3.12.3	电阻应变片在测量设备中的应用	(157)
3.13	电阻式传感器特性曲线的线性化	(159)
3.13.1	用串联或并联电阻进行线性化	(159)
3.13.2	差分式电阻传感器上的电压降测量	(162)
3.13.3	半桥双臂电路中的差分式电阻传感器	(162)
第四章	电抗的测量; 电感式和电容式传感器	(163)
4.1	通过电流、电压或功率测量确定电抗	(163)
4.1.1	电压和电流的同时测量	(163)
4.1.2	与基准元件作比较	(164)

4.1.3	功率的测量	(165)
4.1.4	相位角的测量	(166)
4.1.5	强迫振荡电路中的电流测量	(167)
4.2	交流平衡式电桥	(168)
4.2.1	原理	(168)
4.2.2	维恩电容测量电桥	(169)
4.2.3	麦克斯韦电感测量电桥	(170)
4.2.4	麦克斯韦-维恩电感测量电桥	(170)
4.2.5	移相电桥	(170)
4.3	交流不平衡式电桥	(171)
4.4	电感式传感器	(172)
4.4.1	用于位移和角度测量的轴向衔铁式电感变换元件	(172)
4.4.2	用于位移和角度测量的横向衔铁式电感变换元件	(174)
4.4.3	短路环式电感传感器	(175)
4.4.4	电感式位移和角度传感器的应用	(176)
4.4.5	用电感式环线探测装置检测车辆	(177)
4.4.6	磁弹性测力计	(177)
4.5	电容式传感器	(178)
4.5.1	改变极板间距离	(178)
4.5.2	改变极板的面积	(179)
4.5.3	改变电介质的几何形状	(180)
4.5.4	湿度或温度的变化引起的相对介电常数的变化	(181)
4.6	电感式和电容式位移传感器的比较	(181)
4.6.1	磁场和电场的能量	(182)
4.6.2	电桥电路最大输出功率	(183)
4.6.3	对传感器的控制功率	(184)
第五章	数字测量技术; 编码式传感器和计数式传感器	(185)
5.1	二值信号及其逻辑运算	(185)
5.1.1	二值信号	(185)
5.1.2	二值信号的逻辑运算	(185)
5.1.3	门电路	(188)
5.2	测量数据的表达、显示和输出	(189)
5.2.1	二进制数	(189)
5.2.2	十进制数的二进制代码	(190)
5.2.3	代码转换器	(191)
5.2.4	数字显示	(192)
5.2.5	数字显示和刻度显示的比较	(193)
5.2.6	数字信号转换为电压; D/A转换器	(193)
5.3	双稳态触发器	(194)
5.3.1	异步 RS 触发器	(195)
5.3.2	时钟脉冲控制的 RS 触发器	(196)

5.3.3	脉冲沿控制的D触发器	(196)
5.3.4	脉冲沿控制的JK触发器	(197)
5.3.5	脉冲沿控制的T触发器	(197)
5.4	计数器	(198)
5.4.1	二进异步正向计数器	(198)
5.4.2	二进异步反向计数器	(199)
5.4.3	计数方向的转换	(199)
5.4.4	二进同步正向计数器	(200)
5.4.5	BCD同步正向计数器	(200)
5.4.6	同步环形计数器	(201)
5.4.7	计数结果的显示	(202)
5.5	寄存器	(203)
5.5.1	并行寄存器	(203)
5.5.2	并行/串行转换移位寄存器	(203)
5.5.3	串行/并行转换移位寄存器	(204)
5.6	转换开关	(205)
5.6.1	二值信号多路转换器	(206)
5.6.2	模拟信号继电器转换开关	(206)
5.6.3	模拟信号场效应管转换开关	(206)
5.6.4	采样和保持电路	(207)
5.7	直接比较式电压A/D转换器	(208)
5.7.1	比较器	(208)
5.7.2	带回差电压的比较器	(208)
5.7.3	比较器式并行A/D转换器	(209)
5.7.4	阶梯式逐位比较A/D转换器	(211)
5.7.5	跟踪式逐位比较A/D转换器	(211)
5.7.6	逐位逼近式A/D转换器	(211)
5.7.7	数字万用表	(213)
5.8	机械量A/D转换器; 编码式和计数式位移和角度传感器	(214)
5.8.1	限位开关	(214)
5.8.2	编码式位移传感器和角度传感器	(215)
5.8.3	计数式位移传感器和角度传感器	(216)
5.8.4	编码式位移传感器和计数式位移传感器的比较	(218)
第六章	时间和频率的测量; 频率模拟传感器和转换器	(219)
6.1	时间测量	(219)
6.1.1	时间间隔的数字测量	(219)
6.1.2	周期的数字测量	(220)
6.1.3	相位角的数字测量	(220)
6.1.4	时间间隔的模拟测量; t/u 转换	(221)
6.2	频率测量	(222)

6.2.1	频率或脉冲率的数字测量	(222)
6.2.2	频率比或转速比的数字测量	(222)
6.2.3	通用计数器	(222)
6.2.4	两频率或转速之差的数字测量	(224)
6.2.5	频率或脉冲率的模拟测量; f/u 转换	(224)
6.3	电压/时间转换器和电压/频率转换器	(225)
6.3.1	u/t 脉冲宽度转换器	(226)
6.3.2	u/t 双积分转换器	(228)
6.3.3	脉冲调宽乘法器	(229)
6.3.4	u/f 锯齿波转换器	(230)
6.3.5	电荷守恒法 u/f 转换器	(231)
6.3.6	电荷守恒法同步 u/f 转换器	(233)
6.4	用多谐振荡器作频率转换器	(223)
6.4.1	由R/C电路和比较器组成的多谐振荡器	(234)
6.4.2	由积分放大器和比较器组成的多谐振荡器	(235)
6.4.3	电阻电桥多谐振荡器	(237)
6.4.4	带辅助稳压源的多谐振荡器	(238)
6.4.5	小信号 u/f 转换器	(239)
6.5	用谐波振荡器作频率转换器	(240)
6.5.1	无阻尼振荡的产生	(240)
6.5.2	LC 振荡器	(241)
6.5.3	RC 振荡器	(242)
6.5.4	谐波振荡器的微分方程	(243)
6.6	输出频率或脉冲率的传感器	(244)
6.6.1	石英振荡器	(245)
6.6.2	振弦频率转换器	(250)
6.6.3	音叉频率转换器	(251)
6.6.4	转速传感器	(252)
6.6.5	涡街流量计	(253)
	附录 电流和电压等式的写法	(254)
	参考文献	(256)

第一章 理论基础

测量就是定量地获得一个量。测量仪器可以在一个几乎无法想象的范围内开扩我们的眼界。它为我们开拓了这样的领域，在这些领域中我们是瞎子和聋子。例如对于电磁振荡，我们的眼睛只能看见波长为 0.38 到 $0.78\mu\text{m}$ 的射线，而测量仪器可测的波长范围却超过 10^{18} 次方。许多量我们虽然不能直接感觉，但仍是可测量和计算的，如原子核的直径或宇宙的大小。

客观的定量的观察与逻辑思维是研究自然科学的主要方法¹⁾。这个由伽俐略一贯所使用的方法导致了自然科学的发展，而自然科学则是技术发展的理论基础。这本书所说的测量，在工业上对于研究、发展、制造和检验，在贸易方面对于等价交换以及对于运输系统的安全、可靠性都是很重要的。此外，在环境保护和医疗卫生领域，测量技术帮助人们改善了生活条件。测量的广泛使用导致了这样的结果，即不仅从事测量仪器研究、生产和销售工程师，而且实际上从事自然科学研究或技术工作的有可能应用测量技术的所有的人，都需要掌握相应的测量知识。

1.1 电测技术的范围和意义

电测技术的内容首先是电量的测量，例如：

- 电压，
- 电荷，电流，
- 电阻，电感，电容，
- 相位角，
- 频率。

然而这些待测的量只有个别的能够直接在仪器上显示出来。人们常常首先必须对这些测量信号进行电信号分离、去耦、传递，然后加以“处理”，如放大、补偿、变换、转换、滤波、储存、换算、线性化等，这样测量结果才能

- 在刻度盘上、数字显示器上或荧光屏上显示出来，
- 借助记录仪或打印机保存下来和形成文件，或者直接应用到对某个过程的监视、控制或调节。

测量仪器是处于信号流中的一个装置，它们对测量结果的质量，例如精度和指示速度有影响^{[1,2], [2,2]}。它们并不一定要象图1.1那样以串联方式构成，也可以以其他结构形式构

1) 柏拉图(公元前427—347): “避免感官幻觉的最好方法是测量、计算和称重。通过这些方法可以排除感觉器官对我们的统治。我们不再是按照主观的印象来判断一个物体的大小、数量和重量，而是对它进行计算、测量和称重。这就是我们的思维力和才智的活动。”

[引自: Der Staat, Kröner Stuttgart 1973]

成。测量仪器之间交换的信号包含着被测量的信息。这些信息可包含在一个电量的幅值或频率之中或者被量化，以一种编码信号的形式存在。

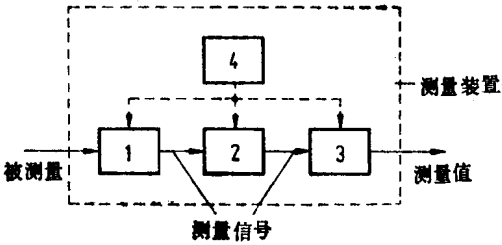


图1.1 测量装置(由测量仪器 1、2、3 和一个提供辅助能量的辅助仪器 4^{[1], [2]}组成)

由于通过各种不同的物理效应非电量转换成电量，因此电测就有了另外的意义。例如，热电偶可提供一个正比于它的两个焊接点温度差的电压；金属丝在温度升高时其电阻会增大。即热电偶和电阻丝这类传感器可输出与非电的输入量成比例的电量。对许多要测量的量都可以使用这些传感器、敏感元件和检测器来进行测量(图 1.2)，以至于实际上每个物理量都可以作为电量来加以描述，然后用电信号处理方法进一步加以处理。物理效应在许多不同领域中的应用，使电测技术变成了一门很有趣的专业。

受影响的电量 →	u	Q	i	R	L	C	φ	f
非 电 量 ↓								
磁 感 应	×							
机 械 量	×	×		×	×	×	×	×
温 度	×			×				×
化 学 量	×			×		×		
声 学 量	×	×						
光 学 量	×		×	×				
放射性质量		×	×					

图1.2 把非电量变为电量的传感器(×)

电测技术作为一门学科，主要研究下列内容：

- 电测信号的获得，
- 测量装置的结构，
- 信号形式的特点，
- 测量信号的传输和处理。

对于一个给定的测量任务必须要选择合适的传感器，合理地设计结构和正确确定信号形式，以便能兼顾到测量精度、抗干扰性和经济性这三个方面的要求。

电测比其他方法有以下一些优越性：

- 从被测值上吸收很少以至于不吸收功率，

- 分辨率高,
- 动态性能良好,
- 测量程序固定,
- 远距离传输特性好,
- 容易处理测量数据.

目前电测技术已被广泛地应用。

1.2 测量单位

一个物理量是一个物体状态的或过程的可测特性。物理量的测量是通过与一个测量单位相比较而实现的。表示在被测的量之内包含有多少个单位的数被称为物理量的数值:

$$\text{物理量} = \text{数值} \cdot \text{单位}.$$

为了能够测量,必须先定义单位。单位最初是以人体的某个部位(肘,足)或地球的尺寸以及旋转时间(英里,平均太阳日)来确定的。而有些单位却因地而异,因此不仅使得日常生活必需品的交换发生困难,而且也使科学的交流发生困难。所以,几百年以来,人们为了准确地定义大家能共同遵守的和能经得起时间考验的单位作出了很大的努力。J. C. 麦克斯韦(1831—1879)也进行了这方面的探讨,并早在可能付诸实现之前,就已建议采用量子单位,他说:“如果我们想取得长度、时间和质量的绝对不变的单位,我们不能在我们星球的大小、运动和质量中寻找,而只能在永久的、不变的、完全同种的原子的波长、频率和质量中寻找。”

现在,这个目的已部分地通过国际单位制达到了。

1.2.1 国际单位制, SI单位

1960年,关于尺寸和重量的国际专业会议推荐,在世界范围内使用国际制单位,联邦德国还以法律形式把它规定下来^{[1.3],[1.4]}。国际制首先定义了极少数的基本量及所属的基本单位(表1.1)。通过这些基本单位相乘和(或)相除,推导出其他物理量的单位,例如:速度单位 m/s 或加速度单位 m/s²。如果推导换算时,只出现数值因子1,那么这样建立起来的单位也称为主单位。它们与基本单位共同构成一个主单位体制,有些导出的 SI 单位可以有自己独立名称(表1.3)以及缩写符号。

SI 单位中,在某些情况下为了避免出现一些很不方便的数值,可通过某些附加的十进制词头构成新的扩大了或缩小了的单位(表1.2)。这样建立起来的单位,如 MW, cm, mV, μ A, 称为倍数或分数单位。

温度测量值也可以以℃单位来加以表示。我们把任意的热力学温度 T (以开氏表示)和温度 $T_0 = 273.15\text{K}$ 之间的“特殊差”作为摄氏温度 θ , 即

$$\theta = (T - T_0) = (T - 273.15\text{K}).$$

对于两个摄氏温度的差 $\Delta\theta$,

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = (T_1 - T_0) - (T_2 - T_0) = T_1 - T_2 = \Delta T,$$

尽管其定义与温度 T_0 无关, 我们仍可取其单位为 K 或 $^{\circ}\text{C}$ 。

表1.1 基本量及基本单位

领 域	基本量	公式符号	基本单位	单位符号
力 学	长 度	l	米	m
	质 量	m	千 克	kg
	时 间	t	秒	s
电 工 学	电流强度	I	安 培	A
热 力 学	热力学温度	T	绝对温度	K
光 学	光 强	I_L	烛 光	cd
化 学	物质量		克分子	mol

1 米是光在 $1/299792458$ 秒时间内, 于真空中所通过的距离(1983)。

1 千克是国际千克原型的质量(1889)。

1 秒是同位素 Cs^{133} 原子基本状态的两个超精细结构之间能级的跃变相对应的放射周期的 9192631770 倍(1967)。

1 安培电流是指在两根无限长的、在真空中平行间隔为一米的、截面可忽略不计的圆形导线中所流过的直流电流强度。该电流强度能使每米长的两根导线之间产生 $0.2 \times 10^{-6} \text{N}$ 的洛伦兹力(1948)。

1 绝对温度单位是水的三态点的热动态温度的 273.16 分之一(1967)。

1 烛光是这样的光强, 即一个面积为 $(1/600000) \text{m}^2$ 的辐射黑体表面在压强为 101325N/m^2 和使铂凝固的温度下, 在垂直该表面的方向上所发出来的光(1967)。

1 摩尔是指由确定成分组成的系统的质量, 它所含有的粒子的数量, 在数值上等于 12 克同位素 C^{12} 所含有的原子的个数。在使用摩尔单位时, 必须对粒子加以详细说明, 因为这些粒子可能是原子、分子、离子、电子等, 也可能是由这些精确给出成分的粒子所组成的化学基团(1971)。

表1.2 用于构成十进倍数和分数单位的词头

词头	记号	数值	词头	记号	数值
Exa-	E	10^{18}	Dezi-	d	10^{-1}
Peta-	P	10^{15}	Zenti-	c	10^{-2}
Tera-	T	10^{12}	Milli-	m	10^{-3}
Giga-	G	10^9	Mikro-	μ	10^{-6}
Mega-	M	10^6	Nano-	n	10^{-9}
Kilo-	k	10^3	Piko-	p	10^{-12}
Hekto-	h	10^2	Femto-	f	10^{-15}
Deka-	da	10	Atto-	a	10^{-18}

表1.3 具有专门名称的导出单位(括号内是旧单位)

物理量 及符号	SI 单位	关系式	其余单位及部分 旧单位
平面角 α	弧度 rad	$1\text{rad} = 1\text{m/m}$	度: $1^\circ = \pi/180 \text{ rad}$
空间角 Ω	空间弧度 sr	$1\text{sr} = 1\text{m}^2/\text{m}^2$	
频率 f, ν	赫兹 Hz	$1\text{Hz} = 1/\text{s}$	
力 F	牛顿 N	$1\text{N} = 1\text{kgm}/\text{s}^2$	($1\text{kp} \approx 9.81\text{N}$) ($1\text{dyn} = 10^{-5}\text{N}$)
压力 p	帕斯卡 Pa	$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$	巴: $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ ($1\text{kp}/\text{cm}^2 \approx 0.98\text{bar}$)
能量 E	焦耳 J	$1\text{J} = 1\text{Nm}$ $= 1\text{Ws}$ $= 1\text{kgm}^2/\text{s}^2$	$1\text{kWh} = 3.6 \times 10^6\text{J}$ $1\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\text{J}$ ($1\text{cal} \approx 4.19\text{J}$) ($1\text{erg} = 10^{-7}\text{J}$)
功率 P	瓦特 W	$1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$ $= 1\text{Nm}/\text{s}$ $= 1\text{kgm}^2/\text{s}^3$	
电荷 Q	库伦 C	$1\text{C} = 1\text{As}$	
电压 U	伏特 V	$1\text{V} = 1\text{W}/\text{A}$	
电场强 E_v	V/m		
电阻 R	欧姆 Ω		
电导值 G	西 S	$1\text{S} = 1/\Omega$	
电感 L	亨 H	$1\text{H} = 1\text{Wb}/\text{A}$ $= 1\text{Vs}/\text{A}$	
电容 C	法拉 F	$1\text{F} = 1\text{C}/\text{V}$ $= 1\text{As}/\text{V}$	
磁场强度 H	A/m		(奥斯特 Oe; $1\text{Oe} \approx 80\text{A}/\text{m}$)
磁通量 Φ	韦伯 Wb	$1\text{Wb} = 1\text{Vs}$	(麦克斯韦尔 M; $1\text{M} = 10^{-8}\text{Vs}$)
磁通密度 B	忒斯拉 T	$1\text{T} = 1\text{Vs}/\text{m}^2$	(高斯 G; $1\text{G} = 10^{-4}\text{Vs}/\text{m}^2$)
光通量 Φ	流明 lm	$1\text{lm} = 1\text{cdsr}$	
光照度 E_v	勒克斯 lx	$1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$	
放射性活度 A	贝克勒尔 Bq	$1\text{Bq} = 1/\text{s}$	(居里 Ci; $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{s}^{-1}$ $= 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$)
吸收剂量 D	格雷 Gy	$1\text{Gy} = 1\text{J}/\text{kg}$	(拉德 rd; $1\text{rd} = 10^{-2}\text{J}/\text{kg}$)
离子剂量 J	C/kg		(伦琴 R; $1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{C}/\text{kg}$)
剂量当量	西温特 Sv	$1\text{Sv} = 1\text{J}/\text{kg}$	(雷姆 rem; $1\text{rem} = 10^{-2}\text{J}/\text{kg}$)

表1.4 自然常数

	符号	数值	单位
阿伏加德罗常数	N_A	6.022×10^{23}	mol^{-1}
玻尔兹曼常数	k	1.3806×10^{-23}	JK^{-1}
电的基本电荷	e_0	1.6022×10^{-19}	As
电场常数	ϵ_0	8.8542×10^{-12}	$\text{AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$
重力加速度	g	9.806	ms^{-2}
真空中的光速	c_0	2.99792458×10^8	ms^{-1}
磁场常数	μ_0	1.2566×10^{-6}	$\text{VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$
电子质量	m_0	9.1085×10^{-31}	kg
普朗克作用数	h	6.6256×10^{-34}	Js
通用气体常数	$R = kN_A$	8.314	$\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

1.2.2 单位及自然常数

一个自然常数的数值和单位取决于所选择的单位制(表1.4)。作为例子,我们将看到,磁场常数 μ_0 是通过安培的定义来确定的(图1.3)。导线1中流动的电流 I_1 在距离 a 处建立起一个磁场,其磁场强度 H_1 和磁感应 B_1 分别为:

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi a}; \quad B_1 = \mu_0 H_1.$$

在这个磁场作用下,在与第一根导线平行放置、通过电流为 I_2 且长度为 l 的导线上产生一个力,其大小为

$$F = I_2 l B_1 = \mu_0 I_2 l \frac{I_1}{2\pi a}.$$

安培的定义指出,当 $a = l = 1\text{m}$ 、力 $F = 2 \times 10^{-7}\text{N}$ 时,如果 $I_1 = I_2 = I$,则通过导线流动的电流恰好为1安培。把这些数值代入上面最后一个方程,可得出磁场常数

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} = 1.2566 \times 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}. \quad (1.1)$$

μ_0 不再是通过实验来确定,而是通过安培的定义来确定。无理因子 π 已被计算在磁场常数之内。

关系式

$$C_0^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \quad (1.2)$$

把光在真空中的速度、磁场常数以及电场常数联系在一起了。国际单位制确定了光速(由米的定义)和磁场常数(由安培的定义),而通过方程(1.2)也就把电场常数确定下来了。因此, $\epsilon_0 = 8.85418781 \times 10^{-12} \text{As/Vm}$ 。

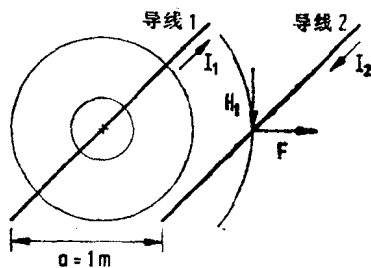


图1.3 定义单位安培时的导线布置