

电磁学单位和标准

[英] P. 维古鲁 著

科学出版社

电磁学单位和标准

科学出版社

1978

内 容 简 介

本书着重介绍米、千克、秒、安培、欧姆、伏特等物理学基本单位和导出单位,并介绍了这些单位的实现、保存和标准比较的方法,以及某些最新科技成就(核磁共振、计算电容、约瑟夫森效应、激光等)在电磁学单位中的应用。全书共分六章:测量的物理性质,单位制,基本单位的实现,导出单位的实现,实物标准,标准的比较。

本书适合于大专院校师生、中学教师、计量工作者及一般科技人员参考。

P. Vigoureux (NPL)

UNITS AND STANDARDS FOR ELECTROMAGNETISM

Wykeham, 1971

电磁学单位和标准

[英] P. 维古鲁 著

张振声 高声荣 何绍汾 译

姜友陆 校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1978年4月第一次印刷 印张:3

印数:0001—48,100 字数:64,000

统一书号:13031·706

本社书号:1016·13—3

定价: 0.26 元

原 序 节 译

利用基本原子常数来实现和保存长度、时间和电磁学单位,现已得到确认。这本小册子就是专门介绍这方面知识的。

本书讨论的单位有米、千克、秒、安培、欧姆和伏特,涉及到的基本常数有光速、质子迴转磁比和由超导体约瑟夫森效应推得的比值 $2e/h$ 。讨论实现电学单位,如果不同时说明保存这些单位的方法,就会既不实际,也不合乎需要。所以,在最后两章中叙述了标准电阻器、韦斯顿电池和有关的测量仪器,但仅限于说明它们在前面所讨论的设备中的用途。

由于著者长期与英国物理研究所联系,所以往往难免在叙述中选择英国物理研究所所用的方法和仪器多于其它地方所用的。这并不是说,著者认为它们比其它研究所的设备和测量方法优越,虽然我认为该所的方法和仪器总的说来是优越的,或至少同其它研究机构相比是一样好的。在本书的每一部分,著者的目的始终放在阐明原理上,而无意去介绍仪器设备的细节。

符 号 表

国际制 (SI) 词冠的名称和代号见表 2.4.

<i>A</i>	安培
<i>B</i>	磁通密度
<i>C</i>	库仑
<i>C</i>	电容
<i>c</i>	光速
<i>D</i>	电通密度
<i>E</i>	电场强度、电动势
<i>e</i>	电子电荷
<i>F</i>	法拉
<i>F</i>	力
<i>f</i>	力
<i>g</i>	克
<i>g</i>	重力加速度
<i>H</i>	亨利
<i>H</i>	磁场强度
<i>h</i>	普朗克常数
Hz	赫兹
<i>I</i>	电流
<i>J</i>	焦耳
<i>J</i>	电流密度
<i>j</i>	旋转 90° 的算符 (见第 vii 页说明)
<i>K</i>	开尔文
<i>k</i>	玻耳兹曼常数
kg	千克

L	自感、角动量、长度
l	长度、距离
M	质量、互感、磁矩
m	米
m	质量
N	牛顿
n	转速
Pa	帕斯卡
Q	电荷
R	电阻
r	距离、电阻
rad	弧度
S	西门子
s	秒
T	特斯拉
t	时间、厚度
T	热力学温度
V	伏特
V	电压、电位差、电动势
v	速度
W	瓦特
W	能量
Wb	韦伯
Z	阻抗
γ	电导率、迴转磁比
ϵ	介质的电容率
ϵ_0	电常数(真空电容率)
λ	波长
μ	介质的磁导率、介质的折射系数、质量

μ_0 磁常数(真空磁导率)

ρ 电荷的体密度

Φ 磁通量、磁极强度

Ω 欧姆

ω 角频率

∇ 算符(读作 'del' 或 'nabla')

$\nabla \cdot \mathbf{V}$ 向量 $\mathbf{V}$ 的散度 $\left(= \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right)$

$\nabla \times \mathbf{V}$ 向量 $\mathbf{V}$ 的旋度(分量为 $\frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z}$, $\dots$, $\dots$ 的量)

$\mathbf{P} \times \mathbf{Q}$ 向量 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 的向量积(分量为 $P_y Q_z - P_z Q_y$, $\dots$, $\dots$, 的向量)

$\dot{x}$ dx/dt

$|x|$ x 的模

关于算符 j 的说明

向量的加法可以利用算符 j 使一向量从某一参考方向旋转 90° 而加以简化。算符 j^2 表示旋转 180° , 因此, 它等于 -1 。 $a \cos \theta + j a \sin \theta$ 所表示的向量, 幅度为 a , 在参考方向的分量为 $a \cos \theta$, 垂直方向的分量为 $a \sin \theta$; 进一步简化写成 $a e^{j\theta}$ 。

向量 $a_1 e^{j\theta_1}$ 、 $a_2 e^{j\theta_2}$ 、 $\dots$ 的合向量是 $A e^{j\theta}$, 其中 $A \cos \theta$ 等于 $a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2 + \dots$, 而 $A \sin \theta$ 为 $a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin \theta_2 + \dots$ 。有意义的往往不是合向量的方向 θ , 而只是幅度 A 的平方。 A^2 这个量是由合向量乘以其共轭向量, 即乘以 $a_1 e^{-j\theta_1} + a_2 e^{-j\theta_2} + \dots$ 向量而得到, 它是一实数。

也可以用算符 j 来表示相位。因此, 当角频率为 $\omega (= 2\pi f)$ 时, 区分感性电抗和容性电抗与电阻的 $\pm 90^\circ$ 相位差, 可以通过写成 $j\omega L$ 和 $1/j\omega C$ (或 $-j/\omega C$) 来表明。

更普遍地, 阻抗 $Z e^{j\phi}$ 的大小为 Z , 相位角为 ϕ 。

目 录

原序节译	iii
符号表	iv
关于算符 i 的说明	vi
第一章 测量的性质	1
1. 目的和范围	1
2. 误差和不定度	2
第二章 单位制	6
第三章 基本单位的实现	15
1. 米	15
2. 千克	25
3. 秒	30
4. 安培	36
第四章 导出单位的实现	43
1. 伏特	43
2. 欧姆	44
3. 计算互感器	44
4. 计算电容器	47
5. 洛伦兹方法	53
第五章 实物标准	56
1. 实物标准	56
2. 实物标准的漂移	61
3. 用原子常数进行监视	61
4. 约瑟夫森效应; 伏特	62
5. 质子迴转磁比; 安培	66

6. 计算电容器;欧姆	74
7. 光速;米和秒	74
第六章 标准的比较	78
1. 电阻器和韦斯顿电池	78
2. 惠斯登电桥	78
3. 组配	79
4. 开尔文双电桥	80
5. 电位差计	81
6. 感应分压器	82
7. 直流比较仪	84
8. 交直流变换	85
9. 国际比较	86
基本常数	88

第一章 测量的性质

1. 目的和范围

测量是将所要测的量与另一个同类量或可借以推算出另一个量的异类量相比较的过程。例如，物体的质量可通过与国家千克标准复制品的质量相比较而得到。另一方面，光速的测量可以包含两项分开的测量：一是时间或频率的测量，另一是长度的测量，其中每一个量都是和适当标准进行比较，例如说，时间是同一台时钟相比较，而长度是同一根米尺或一指定光的波长相比较。

所有情况下都需要标准。但是，它们的品质以及比较过程的难易，则随要求的精度而不同。当要求的精度为 $(1\sim 2)\times 10^{-8}$ 而不是 1×10^{-3} 时，商店和市场上使用的米尺或码尺及砝码和天平就不适用了，必须分别换用光波干涉仪以及准确砝码和精密天平。

用 A. H. 库克 (Cook) 的话说，“测量是技术生命的神经系统。我们通过测量认识我们周围的物质世界，通过测量把这些知识变成数字语言，然后用数学方法把它整理成合乎逻辑的系统；通过测量，可使这种系统性知识借助于工程技术用来改造物质世界。精密的测量是精确的知识和经济的设计所必需的；方便的测量是敏捷的通讯和有效的组织所必需的。”

测量实践的历史几乎和人类的历史一样悠久。但是，对它的要求日益增长，而且随着科学技术的进步，增长得越来越快。科学技术不仅要求越来越高的测量准确度，而且也创造

出满足这种要求所需要的一些条件。

测量的结果表示为被测量(例如长度)的量值与称之为该量的单位的量值之比。因此,说一根横梁的长度是6米,即等于说,这根横梁长为长度单位米的六倍。

单位往往是但不总是以标准来体现的。质量的千克原器以及时间的铯原子的某一特定跃迁的周期,就是其例子。但是有些量,象能量,其单位不是用某一个标准来体现,它们的量值是通过测量其它几个量而得到的。

根据要求,测量包括从很粗糙到很高准确度的范围。但是,本书着重论述为实现各种量值的单位而进行的准确测量,以及用来保存它们的标准。

麦克斯韦当时就十分了解测量在科学工作中的重要性,他在《电磁理论》一书的前言中写道:“从数学观点看来,任何一种现象的最重要方面是可测量的问题。因此,我主要从测量它们的观点来研究电的现象,叙述测量方法,并定义它们所依据的标准。”

2. 误差和不定度

本书大部分篇幅是讨论单位的实现、保存以及标准的比较,它们要涉及到准确度或误差,因此这里对误差和不定度问题作一个初步介绍。

在述及测量的文献中,准确度是指对真值接近的程度,精度*是指检测微小变化的能力,重复性是指读数的恒定性。不定度是指偏离真值的程度;虽然它的含义和准确度相反,却采用了同样的表示法,即千分之几($\times 10^{-3}$)、百万分之几($\times 10^{-6}$)等,并且表示相同的概念。不定度也许是一个更合

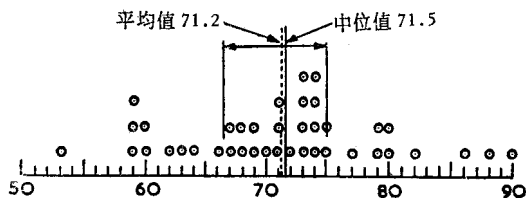
* 原文为“precision”,有时译为“精密度”。(译注)

乎逻辑的术语,因为按照通常的用法,表示它的数字越大,不定度就越大,而准确度却随这个数字的增加而减小。

准确测量的报告应当提供充分的资料,以便读者能够严格地检查关于测量结果准确度的论断。单纯写出被测量的一些独立读数的平均值,并不能给出测量结果可靠性的概念。写出平均值连同概率不定度或标准不定度,才比较有用。但是,更有价值的还是许多个别测量结果的表。不过,表又不如图形便于研究,其中最有用的图形是每一个结果都用图上一个点来代表。

处理观测误差(常被称为“随机误差”)的一种满意方法如图 1.1 所示,图中标出了测定质子迴转磁比过程中所得到的 40 个独立测量结果。这张图是易于绘制的。我们首先确定测量的精度;在这种情况下,第七位数字上定为 1。因此,横座标即被规定了,从实验记录中读出各个结果,并于相应的横坐标处在第一条水平线上标出诸点。若同一结果出现两次,则第二点标在上一条线上,依此类推。最后得到一种直方图,对于大多数实验,如果点数很多,它近似于“高斯”形,即 y 正比于 $\exp(-x^2)$ 。若要得到一个较好的“高斯”图形,看来此处需要 400 个点,而不是 40 个点,不过,为了研究,40 个点也就足够了。

从此图中求出被测量的“最佳”值及其应有的置信度的最



四分位数区间: $8.5/2.675000$ 或 3×10^{-6}

图 1.1 质子迴转磁比的 40 次测量的图示

简便方法是,找出一条其两侧的点数相等(这里是 20)的竖直线,这一步只要通过数数即可完成,其结果称为中位数(也称中位值),这里是 71.5;用比较慢一些的算术方法求得的平均值为 71.2. 从现在需要确定的置信限可以看出,在两者之间进行选择没有什么意义.在中位数两侧划两条竖直线,使每一竖线与中位数之间的点数为总点数的四分之一.这两条竖线中间形成一个区间,称为四分位数区间,或者有时称为“50%区域”,因为单次测量这个量有 50% 的机会落在这一区域.四分位数区间之半是单次测量的概率不定度.若总点数为 n ,则平均值的概率误差或者概率不定度是四分位数区间之半除以 n 的平方根,在这种情况下为 0.5×10^{-6} *. 当 n 增大,平均值与无限次读数的平均值之差小于平均值概率误差的机会趋近于 50%.

有些作者愿意用基于 68.3% 概率的标准偏差和标准误差,虽然计算它们需要多得多的算术运算,但对数学工作还是比较方便的.它们分别近似地等于单次测量概率不定度和平均值概率不定度的 1.5 倍.对于类似此例的测量,系统误差(下面讨论)比随机误差大很多,用简捷的方法就够了.

系统误差是那些对每次测量影响程度都相同的误差,因此不会由于大量读数而减小.然而由于使随机误差比系统误差小而应该采取的次数,取决于系统误差的大小,因此在设计实验时,估计一下系统误差是值得的.这种估计比起通过实验确定的观测误差的估计,具有较大的不确定性.而且由于有些系统误差可能从未被考虑到,尽管其中有些可以通过尽可能多地改变测量程序而予消除,估计它们要巧妙和周密,不过这里把过程的细节给读者讲一下还是很重要的.

* 原文如此,疑系 0.25×10^{-6} 之误.(译注)

一旦这些误差被估计出来，就必须进行合成。自然科学中的测量通常受到很多往往是相互独立的因素引起的系统误差。一些部件的温度、重力加速度、某些砝码的质量、大气压力、露点、电阻器的电阻、韦斯顿电池的电动势、线圈的直径和长度、线圈架的磁化率，都可能出现于研究结果中，而每一项都可能引起系统误差。但是这些误差一般是互不相关的；例如，温度计的校准就和线圈架的磁化率无关。因此，为了合成这些误差，我们有理由象处理随机误差那样来处理它们。因而将它们的平方同观测误差的平方相加，并取其和的平方根作为这一研究的总概率不定度。

第二章 单 位 制

普遍使用一种唯一的电学单位制,无疑曾大大有助于电科学和技术的发展,但是它的缺点是它不是一贯性的. 一种单位制,如果导出单位不用非 1 的比例因数而由基本单位得出,它就是一贯性的. 例如,速度是以厘米每秒为单位,力的单位达因是克厘米每秒每秒,即 gcm s^{-2} (克·厘米·秒⁻²)*,而能量单位尔格是达因·厘米. 厘米·克·秒 (CGS) 电磁制的单位形成一个力学、电学和磁学单位的一贯制,但是,这个单位制中的电学单位却具有不便应用的数值: 虽然电流单位是现行单位的十倍而完全可用,但电动势和电阻单位却小得十分不合理. 然而,1881 年达成国际协议,把电动势的实用单位伏特定为 10^8 CGS 单位,它同原电池的电动势是同一数量级,而把电阻单位欧姆定为 10^9 CGS 单位,它与长 1 米截面 1 毫米² 的水银圆柱体的电阻同一数量级. 电流单位安培被定为 CGS 单位的十分之一,以保证实用电学单位的一贯制.

虽然当时选择这些数值是为了适应电报学 (是当时电气工程师们最重要的工作) 的需要,不过也适用于大功率电力工业和电子工业.

磁学单位仍保留其 CGS 值也许不会使人感到意外,因为后来称为“高斯”的 CGS 单位与地磁场的磁通密度为同一数量级,而当时地磁学是磁学的一个重要领域,看来没有必要将此单位改为大 10^4 倍的单位. 这样一来,电磁学中就失去了单

* 单位名称和符号,见下文各表. (译注)

位的一贯性,正如包括力学单位和实用电学单位的单位制,一贯性已经丧失了。

按 1881 年协议,电学单位被选得适应日常使用的大小,厘米和秒也是适用的长度和时间单位,但是克总的来说对人们通常的需要还嫌太小,而与磅或千克大小相近的单位比较适用。此外,CGS 制中的力的单位达因太小了,以致于人不借助仪器无法感觉到,而能量单位尔格就小得太多了。不过,由实用电单位导出的能量单位焦耳(即是伏特·安培·秒或瓦特·秒)等于 10^7 尔格,其大小是合于实用的。

以上这些考虑、一贯性的优点以及基于米和千克(公斤)的力学单位制的能量单位恰好同实用电单位导出的能量单位相等的偶然情况,使 G. 乔吉(G. Giorgi)于 1902 年提出一种以米、千克(公斤)、秒和一个实用电单位为基础的单位制。并且,乔吉还指出,如果将磁场强度表示为安培/米,代替 4π 安培/米(这是与 CGS 制单位相对应的定义),则在大多数关于直线几何图形的电学和磁学公式中数 π 将消失,而在那些关于圆形或球形的公式中则会自然地出现。

选择米和千克(公斤)作为基本单位不仅便于得出适当大小的力和能量单位,而且也是合乎逻辑的,因为作为米制基础的原器,就是(或者说当时是)米和千克(公斤)原器。

国际电工委员会终于选定安培作为这个 MKSA 制或乔吉制的第四个基本单位,并于 1948 年在第九届计量大会上将它推荐给科技界和工商界。

对于所有这些用途的计量单位和标准,现在大部分国家大都是一致的。这种一致的基础是米制公约(1875 年),按这公约,参加的国家承认了米制,不过它们当时并没有都立刻采用它而废除其它单位制。为了促进米制的使用和保持标准的一致性,创立了国际计量大会(CGPM),大约每四年召开

一次。国际计量委员会 (CIPM) 由几个“谘询委员会”为顾问拟定建议提交国际计量大会审定，并执行国际计量大会的决定和监督国际计量局 (BIPM) 的工作。国际计量局是为进行标准国际比较的一个中心研究所，设在巴黎附近的塞弗尔 (Sèvres)。

在乔吉单位制中，在自由空间内电荷之间的作用力以及磁极之间的作用力由下式给出，

$$f = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (2.1)$$

$$f = \frac{\phi\phi'}{4\pi\mu_0 r^2}, \quad (2.2)$$

式中 ϵ_0 称为电常数， μ_0 称为磁常数， f 代表力， r 表示距离， Q 表示电荷， ϕ 表示磁极强度。下面的安培的定义，相当于令 μ_0 的值为 $4\pi \times 10^{-7}$ 亨利每米，电常数和磁常数不是相互独立的，根据麦克斯韦电磁理论，它们由下列方程式联系起来：

$$\mu_0\epsilon_0 c^2 = 1 \quad (2.3)$$

式中 c 是自由空间中的光速，是一个普适常数。

虽然我们用不到麦克斯韦电磁方程，但为了完备起见这里还是将其列出来。

在不存在电荷与电流的自由空间中，

$$\nabla \times \mathbf{H} = \dot{\mathbf{D}}, \quad (2.4)$$

$$-\nabla \times \mathbf{E} = \dot{\mathbf{B}} \quad (2.5)$$

式中圆点表示对时间的微分，向量 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{E}$ 是磁场强度和电场强度，电通密度和磁通密度 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别是 $\epsilon_0\mathbf{E}$ 和 $\mu_0\mathbf{H}$ 的简略号，并满足条件

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.7)$$