



电磁测量与仪表丛书

电磁量的单位制和 单位的复现与传递

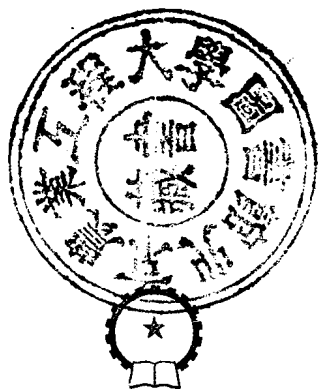
袁楠 沈平子 编

机械工业出版社

电磁测量与仪表丛书

电磁量的单位制和单位的复现与传递

袁楠 沈平子 编



机械工业出版社

电磁测量与仪表丛书
电磁量的单位制和单位
的复现与传递

袁 楠 沈平子 编

责任编辑 秦起佑

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32 • 印张 9 字数 232 千字

1986年4月北京第一版 • 1986年4月北京第一次印刷

印数 0,001-2,550 • 定价2.30元

科技新书目: 115-134

统一书号: 15033·6165

编辑说明

电磁测量技术的应用非常广泛，在工农业生产及科学实验中起着极为重要的作用。用于电磁测量的仪表种类繁多，发展迅速。建国以来，我国各有关部门从事电磁测量和仪表方面工作的科技人员迅速增加。为了总结电磁测量及仪表方面的经验，普及有关电磁测量及仪表知识，中国计量测试学会电磁专业委员会和中国仪器仪表学会电磁测量信息处理仪器学会联合成立了《电磁测量与仪表丛书》编委会，组织编写了这套丛书。编委会成员是：

主编：唐统一

副主编：郭志坚 丁银云 张钟华

编委（以姓氏笔划为序）：

尤德斐 王 镒 叶妙元 陈印琪 何振瀛 李显扬

庞仲予 沈平子 杨华山 余鹤栋 张叔涵 张润康

张德实 林瑞昌 费正生 赵修民 赵新民 秦起佑

翁瑞琪 梅文余 袁 楠 彭时雄 程世镐 雷枫桐

本丛书各分册为：《电磁量的单位制和单位的复现与传递》、《误差理论在电磁测量中的应用》、《电磁测量线路与仪器的屏蔽防护》、《感应分压器与电流比较仪》、《交流电桥》、《测量用互感器》、《大电流测量》、《微处理器在电测技术中的应用》、《运算放大器在电测技术中的应用》、《数字电压表的电气性能测试》、《电磁测量数字化及其应用》、《磁测量基础》、《磁场的产生》、《磁场的测量》、《动态磁性测量》、《硅钢磁性测量》等，将陆续出版。

本丛书为中级科技读物，其内容主要介绍电磁测量与仪表的基本原理，但更侧重介绍实际应用方面的知识，例如实验技术、

仪表的设计计算、仪表的使用及有关的数据、资料等。对国内外最新成就及发展方向也有一定的反映。

本丛书力求深入浅出，通俗易懂。希望能为读者在电磁测量与仪表方面提供有益的知识。但由于水平所限，书中一定存在不少缺点，甚至错误，欢迎读者批评指正。

《电磁测量与仪表丛书》编委会

前 言

本书为《电磁测量与仪表丛书》之一，其内容分为两大部分：第一部分全面介绍了有关单位制的系统知识，包括电磁量及单位的发展简史、各种电磁学单位制简介及它们和国际单位制（SI）的关系，重点就当前国际上推荐的SI作了系统的介绍，为了便于推行，还给出了曾经广泛使用的各种单位制（如CGSE静电制、CGSM电磁制、高斯制、乔吉制、MKSA实用制等）与SI的换算公式，使用SI单位制时应注意的各种事项等。通过这一部分的介绍，希望能使读者对单位制知识有一个较全面的了解，帮助大家过去单位制混乱的局面有所认识，能够正确地使用各种单位制并换算成SI单位。这对广大科技人员及在校师生无疑是有益的。

第二部分介绍了如何由SI单位制出发，根据电磁学基本单位和导出单位的定义来复现、保存单位，并将标准传递到测量现场的整套电磁学单位系统。在复现单位中列举了世界各主要国家的具体实验及分析，尤其对我国所进行的核磁共振法测定电流单位和计算电容法测定阻抗单位作了详细分析；在单位的保存讨论中，重点就标准电阻和标准电池的有关理论、性能、结构以及我国在此领域中的改进，我国电阻和电压单位的实际情况作了论述，并介绍了用基本物理常数监视单位变化的原理；本书最后给出了电磁学单位如何由基本单位导出的系统总表。此外，还列表给出了各个单位本身的传递系统，并讨论了基层测量仪器的质量保证及送检周期的选取等。

总之，本书对电磁学单位做了全面系统的论述，过去有关这方面的资料虽然在不少文献中分别做过介绍，但国内还没有一本对此内容作全面介绍的书籍。同时，在电磁计量领域中，我国已做了很多工作，有些项目并取得了可喜的成果，达到了相当高的水

平。为此，作者希望能把它们总结整理出来，供从事有关方面工作的同志们参考，而对其它领域工作的读者，则想使大家对电磁测量的全过程（即由单位制→单位的复现与保存→单位的传递→现场测试）有一个系统全面的认识。

由于本书的内容牵涉的领域很广、作者的水平有限，肯定有不少缺点甚至错误，诚恳地希望能得到各方面专家和同行们的指教。

本书第二、三、四章由袁楠同志撰写，第五、六、七章由沈平子同志执笔，第一章由两人合写。全书由林瑞昌和罗振之两同志审核。在编写过程中还得到很多同志的热情支持，在此一并表示感谢！

常用符号表

ASMW—东德计量与产量检验局

A —电流线密度；磁矢位(磁矢势)；面积

B —磁通(量)密度(磁感应强度)；电纳

B_i —磁极化强度(内禀磁通密度)

BIPM—国际计量局

c_0 —真空中的光速

D —电通密度(电位移)；扭转系数

d —损耗因数(损耗角正切)

E —电场强度；电动势；能量

ETL—日本电子技术综合研究所

e —电子电荷

F —力；磁通势(磁动势)；法拉第常数；能级数

f —力；频率

G —电导

g —重力加速度；磁荷

H —磁场强度

H_i —磁化强度

h —普朗克常数

I —电流；核自旋

IEN—意大利国家电工研究所

IMM—苏联门捷列夫计量研究院

J —电流密度；磁极化强度(内禀磁通密度)；转动惯量；电子自旋

j —磁偶极矩

K —比值($K \equiv A_{NL}/A_{LLL}$)

L —自感；长度；角动量

L_{12} —互感

LCIE—法国中央电工研究所

l —长度；距离

M —互感；磁化强度；质量；力矩

m —质量；〔面〕磁矩；相数

N —绕组匝数

N_A —阿伏加德罗常数

NBS—美国国家标准局

NIM—中国计量科学研究院

NPL—英国国家物理研究所

NRC—加拿大国家研究委员会

NSL—澳大利亚国家标准研究所

n —匝数比

P —电极化强度；有功功率；功率

PTB—联邦德国技术物理研究院

p —电偶极矩；瞬时功率；极对数

Q —电荷；品质因数；无功功率

q —电荷

R —电阻；阻尼常数

R_m —磁阻

R_∞ —里德堡常数

r —距离；半径；电阻

S —视在功率；坡印廷矢量；面积

T —转矩；周期；时间；热力学温度

t —时间

U —电位差；电势差；电压

U_m —磁势差；磁位差

v —速度

W —能量；功；电能

w —电磁能密度；宽度

X —电抗

Y —导纳

Z —阻抗

α —角度；温度系数；精细结构常数；比例系数

β —角度；相位系数；衰减常数

- γ —角度; 电导率; 回旋磁比
 γ_p —质子回旋磁比
 δ —电流密度; 损耗角
 ε —介电常数(电容率)
 ε_0 —真空介电常数
 ζ —数字 ($\zeta=2.997\ 924\ 580 \times 10^{10}$)
 η —效率
 θ —角度
 κ —耦合系数; 磁化率
 Λ —磁导
 λ —波长; 功率因数
 μ —磁导率; 绝对磁导率; 质量; 磁矩
 μ_r —相对磁导率
 μ_0 —真空磁导率 ($\mu_0=4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$)
 ν —频率
 ρ —电荷体密度; 电阻率; 密度
 σ —漏磁系数; 电导率; 电荷面密度; 标准偏差
 τ —时间常数; 时间
 Φ —磁通[量]
 φ —相位差; 相位移
 χ —电极化率; 磁化率
 Ψ —电通量
 Ω —立体角
 ω —角频率; 角速度

目 录

第一章 结论	1
一、建立单位制的一些基本概念	2
1. 物理量、单位和单位制	2
2. 基本量与基本单位的选取原则	2
3. 单位定义式和一贯性单位制	3
4. 量纲式和量纲	4
5. 电磁学公式的有理化	5
6. 建立电磁学单位制所需的最基本公式	6
二、电磁量和单位的发展史	7
三、有关电磁学单位的一些基本知识	16
1. 绝对测量和标准器	17
2. 基准定值及国际比对	19
3. 电磁单位的改值	19
4. 电单位的新依据	24
四、精密测量中值得注意的问题	27
1. 有关准确度的一些概念	27
2. 不确定度的估计	28
3. 历史的回顾	30
五、单位定义及复现的发展趋势	32
第二章 几种常见的电磁学单位制和它们间的关系	38
一、电磁学单位制种类繁多的原因	38
二、厘米克秒绝对静电单位制	38
三、厘米克秒绝对电磁单位制	41
四、高斯制和变相的高斯制	45
五、乔吉制、MKSA制和国际单位制(SI)	48
六、各种电磁学单位制间的换算	52
七、电磁学单位制总评	60

第三章 国际单位制(SI)简介	64
一、国际单位制的构成原则	64
二、国际单位制的基本单位和辅助单位	65
三、国际单位制的导出单位	72
1. 单位的符号	74
2. 组合式导出单位的中文名称	75
四、SI词头与倍数和分数单位	77
五、国际单位制的优越性	80
第四章 国际单位制的使用	82
一、有关量和单位的一般原则	82
二、磁学中使用国际单位制的注意事项	84
三、使用国际单位制时的注意事项	84
1. 必须改写某些公式	83
2. 必须采用有理化电磁学公式	89
3. 使用国际单位制时的一些常见错误	90
第五章 单位的复现	93
一、基本单位——米、千克、秒的复现	93
1. 长度基本单位——米	93
2. 时间基本单位——秒	96
3. 质量基本单位——千克	100
二、基本单位——安培的复现	105
1. 概述	105
2. 电流天平法	107
3. Pellat电力计法	114
4. 核磁共振法	118
5. 电流绝对测量的动向	135
三、导出单位的复现	138
1. 阻抗单位(欧姆、法拉、亨利)的复现	138
2. 电压单位的复现	151
3. 基本磁学量(磁场强度、磁通、磁矩)单位的复现	157
第六章 单位的保存与监视	162
一、电阻单位的保存	162
1. 电阻实物基准概述	162

2. 标准电阻器的主要特性、工艺结构及考察方法·····	167
3. 我国电阻单位介绍·····	174
二、电压单位的保存·····	175
1. 电压实物基准概述·····	175
2. 标准电池的结构原理及制作·····	177
3. 标准电池的主要性能和质量预测·····	178
4. 标准电池控温箱·····	181
5. 我国电压单位简介·····	183
6. 以齐纳二极管为基础的电压标准·····	185
三、保存单位的监视·····	188
1. 约瑟夫森效应: 伏特·····	189
2. 质子回旋磁比: 安培·····	198
3. 克里青效应: 欧姆·····	200
第七章 单位的传递·····	206
一、电磁学单位传递系统概述·····	206
1. 传递的原则及准确度的考虑·····	207
2. 电磁单位的总传递系统·····	210
二、各电磁单位的具体传递系统·····	212
1. 标准电阻的检定传递系统·····	212
2. 标准电池检定传递系统·····	218
3. 标准电容的检定传递系统·····	222
4. 标准电感的检定传递系统·····	227
5. 功率和电能的传递系统·····	236
6. 磁感应强度和磁场强度的传递系统·····	232
7. 磁通(量具)检定传递系统·····	237
8. 磁矩、磁化率和磁化强度的传递系统·····	243
9. 磁性材料的检定传递系统·····	245
10. 磁带的检定传递系统·····	246
11. 有关交直流仪器的传递系统·····	249
三、基层测量仪器质量的保证·····	255
1. 基层标准量具及测量仪器的环境条件·····	255
2. 送检周期的考虑·····	256

附录.....	258
附录一 三量纲方程和量	258
附录二 一些电磁量SI导出单位的不同形式	262
附录三 电工技术中常用物理量的量纲	263
附录四 各单位制电磁量单位间的换算关系	264
附录五 非有理化和有理化电磁学公式变换时物理量的对应关系	266
附录六 常用的三基本量高斯CGS方程系和四基本 量有理化方程系对照表	267
附录七 常用电磁量的名称和符号	269
附录八 一些量的SI单位和SI单位的倍数单位	270
参考文献.....	272

第一章 绪 论

在工农业生产、科学研究、贸易往来以及日常生活中，随时都会遇到测量问题。所谓测量，是将所要测的量与另一个同类量或可借以推算出第一个量的异类量相比较的过程。而测量的结果，则可以表示为被测量（例如电阻）的量值与称之为该量的单位的量值之比。譬如说，一个标准电阻器的阻值是十欧姆，即等于说，这个电阻器的阻值是电阻单位欧姆的十倍。

随着科学技术和工业生产的发展，对测量的要求也愈来愈高。对于测量结果一定要设法保证其准确可靠和一致，因为只有准确可靠的测量结果，才具有实际应用的意义。

要使测量结果准确可靠和一致，需具备如下几个条件：

1. 统一的计量单位。这些单位应有足够的科学性和公认的定义，并有一定的换算关系。物理学中的CGS制和MKSA制是过去使用最普遍的单位制，目前推行的是国际单位制（SI）。

2. 按照规定的定义，能够复现出所需物理量单位的基准或标准。

3. 具有把基本单位量值和同类量相比较的测量装置，能把基准单位量值按传递系统逐级传递到测量现场。

4. 有正确的测量方法。

研究以上这些问题的科学称为计量学。

在介绍电磁量的单位制、单位复现、保存和传递之前，有必要就建立单位制的一些基本概念、有关电磁学单位的基本知识、精密测量中值得注意的问题以及单位定义及复现的发展趋势、电磁量及其单位的发展史作一简要的论述。

一、建立单位制的一些基本概念

1. 物理量、单位和单位制^{〔42〕〔9〕〔29〕}

任何一种测量，目的都在于对某一量（常称物理量）根据所选定的单位，求出它的数值，以便从数量上把它表示出来。单位是所述物理量的一个标准量，原则上它是可任意选定的。而数值则给出待测的物理量是这个单位的几倍，或是它的几分之几。因此，任何一个物理量都可以看作是它的数值 $\{A\}$ 和所选定的单位 $[A]$ 的乘积，即 $A = \{A\}[A]$ 。如果不是选 $[A]$ 而是以 $[A]'$ 作为单位，那么数值也将随之改变。但物理量 A 本身，是一个物理上的客观实在，与单位的选择无关，因此 $A = \{A'\}[A]' = \{A\}[A]$ ，而 $\{A'\}/\{A\} = [A]/[A]'$ 。这就是说，单位愈大，数值愈小。不论用 $R = 0.5\Omega$ 或是用 $R = 500m\Omega$ 表示某一电阻，此电阻本身将保持一定，不会随之改变。

在各种物理量中，绝大多数可以用少数几个基本量来作出它们的定义（这些绝大多数的量称为导出量）。至于基本量的选定，则完全任意，唯一的限制是必须独立定义（即不能由其它几个通过定义导出）。这些基本量的单位（基本单位）也可根据需要任意选定；然而导出量的单位（导出单位），已为基本单位所定义，因而只能是基本单位的幂的乘积。根据所选定的基本量和它们的单位不同，就建立起不同的单位制。

2. 基本量与基本单位的选取原则^{〔19〕〔20〕〔29〕}

基本量的选取有相当大的任意性。例如选取长度（ l ）和时间（ t ）为基本量，则速度（ v ）根据公式 $v = l/t$ 就是导出量。若选速度和时间为基本量，则长度就是导出量。例如“光年”这一长度单位，即从光速和时间单位“年”导出。

但基本量的选取应符合下列原则：

首先，应该考虑到人们的习惯和认识规律，例如，选取长度（ l ）为基本量，面积就是 $l \times l$ ，这比选取面积为基本量，长度为面积的开方更符合人们的认识规律；

其次，基本量的数目应恰当，过多和过少都不便于和其它物理量建立联系；

第三，基本量应是比较熟悉和常见的量，而基本单位的大小也应适中，以利使用；

第四，基本单位必须选取十分稳定而又不变的量，而且它还必须是可测量的，也就是说能有某种手段与同类量进行比较，并有高准确度进行比较的方法；

最后，基本单位的定义应符合科学原则，应是严密和明确的。

3. 单位定义式和一贯性单位制^{[9][12][1]}

反映导出量和基本量之间的物理关系式称为基本定义式，由它可求得导出单位的定义式。例如，按照速度的定义式 $v=l/t$ ，可得：

$$\{v\}[v]=\{l\}[l]/\{t\}[t] \quad (1-1)$$

整理后，可得到速度单位 $[v]$ 的定义式：

$$[v]=\frac{\{l\}/\{t\}}{\{v\}} \cdot \frac{[l]}{[t]}=k \frac{[l]}{[t]} \quad (1-2)$$

式中 k 为一常数，是一纯数。

式 (1-2) 表示速度单位必然是一个常数乘以距离的单位再除以时间的单位。若取长度、时间和速度的单位为米 (m)、秒 (s) 和米每秒 (m/s)，则 k 等于 1；若取为米、秒和千米每小时 (km/h)，则 k 等于 3.6，即 $1\text{km/h}=3.6\text{m/s}$ 。可见常数 k 实际上是速度单位间的换算系数。

选定基本单位后，利用物理公式，就可求得所有物理量的单位定义式。例如，选定米 (m)、秒 (s)、千克 (kg) 和安 (A) 等基本单位后，就可求得：

$$\text{速度单位}[v]=k_v \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{力的单位}[F]=k_F \cdot \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{能的单位}[E]=k_E \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{电荷量单位}[Q]=k_Q \cdot \text{s} \cdot \text{A}$$