



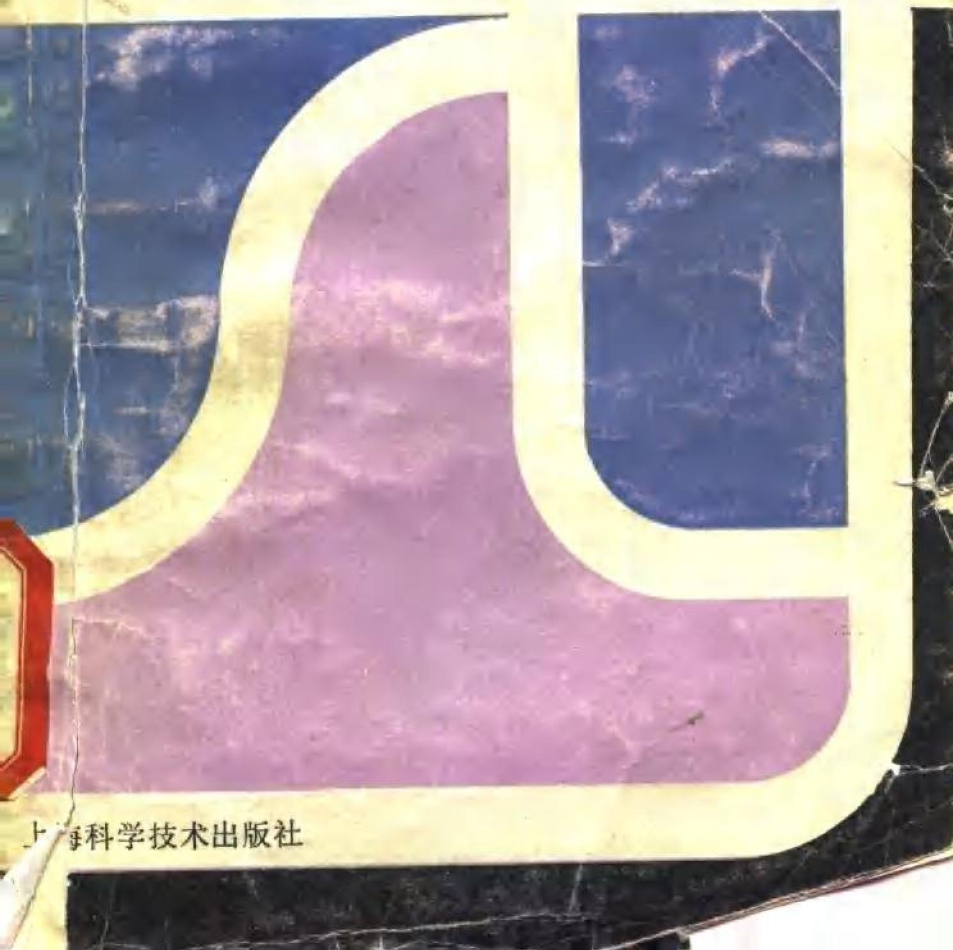
物理实验丛书

WULISHIYAN CONGSHU

电磁学实验

上册

沙振舜 范家师编



上海科学技术出版社

物理实验丛书

* * *

电磁学实验

上册

沙振舜 范家师 编

上海科学技术出版社

物理实验丛书

* * *

电磁学实验

上册

沙振舜 范家师 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

本书在上海发行所发行

上海东方印刷厂印刷

开本 787×1032 1/32 印张 9.625 字数 229,000

1983年11月第1版 1983年11月第1次印刷

印数 1-3,600

ISBN 7-5323-0627-5/0.62

统一书号: 13119·1456 定价: 2.25 元

内 容 提 要

本书系根据我国高等院校普通物理实验教学大纲中电磁学实验内容编写而成。全书较系统地介绍电磁学实验的原理、仪器和方法,分上、下两册出版。上册主要是直流电实验和静电实验;下册包括交流电实验、磁测量、非电量的电测量以及电子方面的实验。上册内容有:概论、仪表和仪表应用、电桥、电位差计、电流计及其应用、静电场的描绘,共六章。每章均安排若干有关实验,作为各章的有机组成部分。附录中列出电磁测量指示仪表和附件的符号。

本书可供大专院校理工科的师生、电大、中等专科学校理工科师生、中学物理教师以及有关科技工作者参考。

出版说明

物理学是一门以实验为基础的科学。每个物理概念的确立以及原理和定律的发现无不具有坚实的实验基础，而且只有经过实验的检验，才能得到公认。所以，物理实验在物理学中起着非常重要的作用。

为了实现我国四个现代化的要求，需要迅速培养大批科学技术专门人材。在整个物理学的教学过程中，物理实验是培养物理工作者和其他科学技术专门人材不可缺少的组成部分。可是在物理实验的教学中，深感这方面书籍的不足，以及实验仪器和实验设备的缺乏。鉴于上述情况，为了提高物理实验的水平，适合我国的实际情况，推广实验中的新技术、新仪器和新方法，我们请国内有关高等院校从事物理实验教学时间较长、经验丰富的教师编写这套《物理实验丛书》。

本丛书内容包括当前我国高等院校正在开设和准备开设的普通物理实验。每一分册集中介绍一个专题。本丛书采用章节式的实验参考书编写方式，注意到专题的系统性与完整性，中间插入有关的实验，并有备查的附录，内容简明扼要，重点突出。此外，为了适应科研部门和工矿企业实验工作者的需要，还适当增加了一些实际应用的内容。本丛书不但可供大专院校物理专业师生参考，亦可供中等专科学校和中学物理教师以及科研单位与工矿企业从事物理实验工作的技术人员参考。

本丛书已拟定的普通物理实验方面的分册有：《力学实验》、《静电实验》、《几何光学实验》、《物理光学实验》、《电磁学实验》、《热学实验》、《真空实验》、《气垫导轨实验》等，将陆续出版。

序

电磁学实验包括范围较广，尤其近年来随着科学技术的发展，电磁测量技术突飞猛进，测量仪器制造工艺不断改进，使电磁学实验内容更加丰富。一般它包括一些最基本的电与磁的测量以及电工基础知识，这些都是每个物理工作者所必须具备的知识。

电磁测量方法是物理实验中的基本方法，电磁测量仪表仪器是基本测量仪器。整个普通物理实验都不同程度地使用电磁测量仪器和仪表。很多物理的测量往往通过各种传感器转变为电的或磁的测量，因此电磁学实验在整个物理实验中占着重要的地位。

电磁测量之所以成为科研与现代生产技术的重要基础，是因为它有其他测量无可比拟的优点：

1. 准确度高；
2. 反应迅速；
3. 适于远距离测量和自动记录；
4. 非电量可以通过传感器转变为相应的电磁量。

因为本“物理实验丛书”已有《静电实验》分册，所以除静电场描绘外，静电测量不再列入电磁学实验。电工和无线电电子学方面的实验，因另外有书，本书也不列入。这样本书将以静电场描绘、直流和交流电磁测量为主要内容。

本书采取章节式，欲给读者系统的较完整的电磁学实验知识。每章后面安排几个实验室实验，我们设想将来电磁学实验作为一门课程开设，讲课—实验—讲课—实验，交替进行，相

辅相成,以做到理论与实验的密切结合。

本书分上、下两册出版,上册包括概论、仪表和仪表应用、电桥、电位差计、电流计、静电场描绘,共六章,下册包括交流电实验、磁测量、非电量的电测量、电子以及电子在磁场中的运动。

在本书编写过程中一些兄弟院校以及厂家给予我们帮助,不少同志提出宝贵意见,在此表示衷心感谢。限于我们的水平,难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者 1985. 6.

目 录

序

第一章 概论	1
§ 1-1 电磁量单位和量具	1
§ 1-2 电磁测量方法	16
§ 1-3 电磁量指示仪表概论	18
§ 1-4 数字仪表概述	27
§ 1-5 电磁学实验中的要点	39
实验 1-1 电流的绝对测量	43
实验 1-2 绝对伏特计	46
第二章 仪表和仪表的应用	52
§ 2-1 磁电系仪表	52
§ 2-2 逐次渐近比较式数字电压表	55
§ 2-3 运算放大器式电表	60
实验 2-1 基本电学仪器的使用	65
实验 2-2 欧姆定律及电阻的串联、并联	77
实验 2-3 万用电表的设计、装配和校验	81
实验 2-4 仪表灵敏度及内阻的测定	94
实验 2-5 灯泡的特性曲线的测定	100
实验 2-6 半导体二极管的伏安特性的测量	102
实验 2-7 集成运放万用表的制作	106
实验 2-8 象限静电计	112
第三章 电桥和电桥的应用	119
§ 3-1 直流惠斯登电桥原理与结构	119
§ 3-2 单电桥的灵敏度与准确度	123

§ 3-3 直流双臂电桥	126
§ 3-4 交流电桥简介	130
§ 3-5 电桥的使用	142
√ 实验 3-1 惠斯登电桥测电阻	145
实验 3-2 卡瑞-福斯特电桥	155
实验 3-3 用双臂电桥测低电阻	159
实验 3-4 用交流电桥测量电容和电感	163
实验 3-5 铜丝电阻温度系数的测定	173
实验 3-6 电解液电阻率的测定	175
实验 3-7 热敏电阻温度计	179
第四章 直流电位差计及其应用	186
§ 4-1 直流电位差计	186
§ 4-2 直流电位差计的选用	195
√ 实验 4-1 学生型电位计	198
实验 4-2 用电位差计校准电表	203
实验 4-3 四探针法测电阻率	210
第五章 直流电流计	215
§ 5-1 灵敏电流计的构造原理	215
§ 5-2 灵敏电流计的运动特性和工作参数	223
§ 5-3 冲击电流计	231
§ 5-4 电流计的选择与使用	237
实验 5-1 灵敏电流计的研究	241
实验 5-2 冲击电流计的研究	248
实验 5-3 用冲击电流计测电容和高阻	254
实验 5-4 正切电流计	260
第六章 静电场描绘	266
√ § 6-1 用电流场模拟静电场	266
§ 6-2 电解槽法	269
§ 6-3 导电纸法	272

§ 6-4 电阻网法	277
实验 6-1 电解槽法模拟静电场	282
实验 6-2 导电纸法模拟静电场	284
实验 6-3 电阻网法模拟静电场	287
附录	289
表 1 常用电磁测量指示仪表和附件的符号	289
表 2 影响量的额定值及其允许偏差	291
表 3 影响量变化时各级仪表附加误差的规定	292
表 4 几种主要型式的仪表的性能比较	294

第一章 概 论

§ 1-1 电磁量单位和量具

一、电磁学量的单位制

电磁量有多种不同的单位制,如绝对静电单位制、绝对电磁单位制、高斯单位制、实用单位制和现代国际公认的先进单位制,即国际单位制(记作SI)等。

电磁量有多种单位制,这是历史原因造成的。因为最初只把厘米、克、秒作为基本单位,但在电磁学中需要再加一个基本单位才能满足需要。若把真空中的介电常数 ϵ_0 定为基本单位,就构成静电单位 CGSE 制。若把真空中的磁导率 μ_0 定为基本单位,就是电磁单位 CGSM 制。后来发现这两种单位制中,一些物理量不是太大就是太小,而且在应该出现 4π 的公式中没有出现,不该出现 4π 的公式中却出现了。由于这些缺点,便又产生了高斯制^①和实用单位制等。在电工测量中,普遍应用的是实用单位制,只有在表示磁学量时,才用一些高斯单位制。

实用单位制又称有理化米、千克、秒、安培制,代号是 MKSA。在这种单位制中,以长度的米、质量的千克、时间的秒和电流的安培为基本单位。这样,一些常用单位的量,其大小都比较合适了,所以得到广泛使用。这种单位制的基本单位安培,它定义为:“安培是一恒定电流,若保持在处于真空

^① 高斯单位制就是 CGSE 和 CGSM 两种单位制的混合制。

中,相距 1 米的两无限长,而圆截面可忽略的平行直导线内,则在此两导线之间产生的力在每米长度上等于 $2 \times 10^{-7} \text{N}$ 。”这种单位制中的其它单位均由基本单位导出,叫导出单位。

1948 年第九届国际计量大会建议在国际间采用以米、千克、秒、安培为基本单位的实用单位制,1956 年又决定将这种单位制定名为“国际单位制”,这样使得电磁测量中一些与其它学科有关的公式采用国际单位制后,单位得以统一,显得很方便。MKSA 有理制是 SI 制电磁学部分。但是,国际单位制不完全等于实用单位制,它们之间还有一些区别。

我们把国际单位制列于表 1-1^①。为了方便读者,把常用的一些电磁学量的 SI、CGSM、CGSE 三种单位制之间的换算关系列于表 1-2,但这里指的均是使用合理化方程式时的换算关系。而非合理化电磁场方程式改为合理化时,下面的物理量必须改为:

$$1. \text{ 真空的介电常数 } \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi} \epsilon'_0$$

$$\text{介质的介电常数 } \epsilon = \frac{1}{4\pi} \epsilon'$$

$$2. \text{ 磁场强度 } H = \frac{1}{4\pi} H'$$

$$3. \text{ 磁通势 } F = \frac{1}{4\pi} F'$$

$$4. \text{ 磁阻 } R_m = \frac{1}{4\pi} R'_m$$

$$5. \text{ 真空中的磁导率 } \mu_0 = 4\pi \mu'_0$$

$$\text{磁导率 } \mu = 4\pi \mu'$$

$$6. \text{ 磁导 } A = 4\pi A'$$

^① 引自国家标准 GB3102.5-82。

表 1-1 电学、磁学量的 SI 单位①

量的名称	符号	单位名称	单位符号	
			中文	国际
电流	I	安[培]①	安	A
电量、电荷	Q	库[仑]	库	C
电荷体密度	ρ	库[仑]每立方米	库/米 ³	C/m ³
电荷面密度	σ	库[仑]每平方米	库/米 ²	C/m ²
电场强度	E	伏[特]每米	伏/米	V/m
电位、电势	V, φ	伏[特]	伏	V
电位差、电势差、电压	U	伏[特]	伏	V
电[动]势	E	伏[特]	伏	V
电通量密度, 电位移	D	库[仑]每平方米	库/米 ²	C/m ²
电通量、电位移通量	ψ	库[仑]	库	C
电容	C	法[拉]	法	F
介电常数(电容率)	ϵ	法[拉]每米	法/米	F/m
真空介电常数(真空电容率)	ϵ_0, ϵ_0	法[拉]每米	法/米	F/m
相对介电常数(相对电容率)	ϵ_r, ϵ_r			
电极化率	χ_e, χ			
电极化强度	P	库[仑]每平方米	库/米 ²	C/m ²
电偶极矩	$p, (p_e)$	库[仑]米	库米	C·m
电流密度	$J, (S, \delta)$	安[培]每平方米	安/米 ²	A/m ²
电流线密度	$A, (a)$	安[培]每米	安/米	A/m

(续表)

量的名称	符号	单位名称	单位符号	
			中文	国际
磁场强度	H	安〔培〕每米	安/米	A/m
磁位差, (磁势差)	U_m	安〔培〕	安	A
磁通势, 磁动势	F, F_m	安〔培〕	安	A
磁通〔量〕密度, 磁感应强度	B	特〔斯拉〕	特	T
磁通〔量〕	Φ	韦〔伯〕	韦〔伯〕	Wb
磁矢位, 磁矢势	A	韦〔伯〕每米	韦/米	Wb/m
自感	L	亨〔利〕	亨	H
互感	M, L_{12}	亨〔利〕	亨	H
耦合系数	$k(x)$			
漏磁系数	δ			
磁导率	μ	亨〔利〕每米	亨/米	H/m
真空磁导率	μ_0	亨〔利〕每米	亨/米	H/m
相对磁导率	μ_r			
磁化率	$\chi, (\chi_m, \chi)$			
磁矩	m	安〔培〕平方米	安·米 ²	A·m ²
磁化强度	M, H_s	安〔培〕每米	安/米	A/m
磁极化强度	J, B_s	特〔斯拉〕	特	T
电磁能密度	w	焦〔耳〕每立方米	焦/米 ³	J/m ³
坡印亭矢量	S	瓦〔特〕每平方米	瓦/米 ²	W/m ²
电磁波在真空中的传播速度	c, c_0	米每秒	米/秒	m/s

(续表)

量的名称	符号	单位名称	单位符号	
			中文	国际
[直流]电阻	R	欧[姆]	欧	Ω
[直流]电导	G	西[门子]	西	S
电阻率	ρ	欧[姆]米	欧·米	$\Omega \cdot m$
电导率	ν, σ, κ	西[门子]每米	西/米	S/m
磁阻	R_m	每亨[利]	$\frac{1}{\text{亨利}}$	H ⁻¹
磁导	$\Lambda, (P)$	亨[利]	亨	H
绕组的匝数	N			
相数	m			
极对数	p			
相[位]差, 相[位]移	φ	弧度	弧度	rad
阻抗(复数阻抗)	Z	欧[姆]	欧	Ω
阻抗模(阻抗)	$ Z $	欧[姆]	欧	Ω
电抗 (交流)电阻	X R	欧[姆]	欧	Ω
品质因数	Q			
导纳(复数导纳)	Y	西[门子]	西	S
导纳模(导纳)	$ Y $	西[门子]	西	S
电纳	B	西[门子]	西	S
[交流]电导	G	西[门子]	西	S
功率	P	瓦[特]	瓦	W
电能[量]	W	焦[耳]	焦	J

① 去掉方括号时为全称, 去掉方括号及方括号中的字时为简称。

表 1-2 常用电磁学量的 SI 单位与 CGSE 及 CGSM 单位的关系①

SI 制单位			一个 SI 单位 包含的 CGSE 单位的个数	一个 SI 单位 包含的 CGSM 单位的个数
量的名称	量的符号	单位符号		
电流	I	A	$c_0 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}
电势差、电压、 电位差	U	V	$c_0^{-1} \cdot 10^8$	10^8
电场强度	E	V/m	$c_0^{-1} \cdot 10^6$	10^6
电阻	R	Ω	$c_0^{-2} \cdot 10^9$	10^9
电荷、电量	Q	C	$c_0 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}
电容	C	F	$c_0^2 \cdot 10^{-9}$	10^{-9}
自感、互感	L, M	H	$c_0^{-2} \cdot 10^9$	10^9
磁通量	Φ	Wb	$c_0^{-1} \cdot 10^8$	10^8Mx
磁感应强度	B	Wb/m ²	$c_0^{-1} \cdot 10^4$	10^4(Gs)
磁场强度	H	A/m	$c_0 \cdot 10^{-3}$	$4\pi \times 10^{-3} \text{(Oe)}$
磁位差	U_m	A	$c_0 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}(Gb)
磁通势	F_m	A	$c_0 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}(Gb)

真空中的光速 $c_0 = 2.997925 \times 10^{-8} \text{m/s}$

① 这里是指使用合理化方程式时的换算关系。

表 1-3 SI 和高斯制间的单位换算关系

物理量名称	单 位 换 算 关 系
电量 Q	$1\text{C} = \frac{c_0}{10} \text{sC} = 3.0 \times 10^9 \text{sC}$
电流 I	$1\text{A} = \frac{c_0}{10} \text{CGSE} = 3.0 \times 10^9 \text{CGSE}$
电场强度 E	$1\text{V/m} = \frac{10^8}{c_0} \text{CGSE} = \frac{1}{3.0 \times 10^4} \text{CGSE}$
电位移 D	$1\text{C/m}^2 = \frac{4\pi c_0}{10^5} \text{CGSE} = 12\pi \times 10^5 \text{CGSE}$
电势 φ	$1\text{V} = \frac{10^8}{c_0} \text{CGSE} = \frac{1}{300} \text{CGSE}$
电阻 R	$1\Omega = \frac{10^9}{c^2} \text{CGSE} = \frac{1}{9 \times 10^{11}} \text{CGSE}$
电容 C	$1\text{F} = \frac{c^2}{10^9} \text{CGSE} = 9.0 \times 10^{11} \text{CGSE}$
磁感应强度 B	$1\text{T} = 10^4 \text{Gs}$
磁场强度 H	$1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3} \text{Oe}$
磁通量 Φ	$1\text{Wb} = 10^8 \text{Mx}$
电感 L	$1\text{Hz} = 10^9 \text{CGSM}$

7. 磁极化强度 $B_i = 4\pi B'_i$

8. 磁化率 $\kappa = 16\pi^2 \kappa'$

9. 磁矩 $m = 4\pi m'$

考虑到还有很多书刊文献仍用高斯单位制，我们把国际单位制和高斯单位制间的单位换算关系列于表 1-3。

二、电学量具

1. 电学量具的一般知识

在电磁学测量时，实际上是把被测量 X 与作为测量单位的同类量作比较，从而确定被测量 X 的大小。所谓量具（或称度量器），就是测量单位或测量单位的分数、整数的复制体。

在电学计量中，根据度量器在量值传递上的作用和准确度的高低。分为基准量具（基准器）、标准量具（标准器）和工