

DIAN CI XUE

· 第二版 ·

# 电磁学

· 赵凯华 · 陈熙谋

上册 · 高等教育出版社

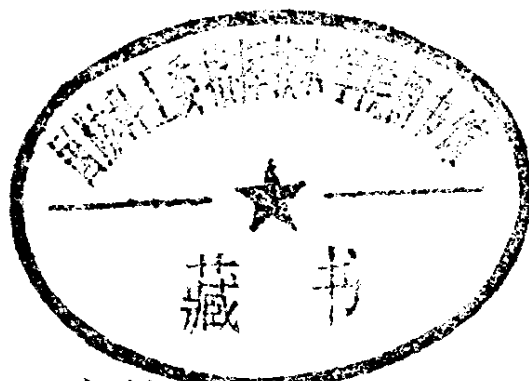
6.15

高等学校教材

# 电 磁 学

上 册

赵凯华 陈熙谋



高等教育出版社

本书第一版是由赵凯华、陈熙谋两同志在北京大学物理系使用的电磁学讲义的基础上，根据1977年10月全国高等学校理科物理教材会议所订的教材编写大纲改编而成的。1980年8月教育部颁发了综合大学物理学专业《普通物理学(电磁学)教学大纲(四年制)》，本书内容与该大纲的要求基本一致。第二版根据五年来使用情况和教学发展的实际作了适当的修改和补充。本书精装本为全一册，平装本分上、下两册出版。

本书系统地阐述了电磁现象的基本规律和基本概念，内容较丰富，并收集了较多的思考题和习题。全书内容包括：静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒电流、稳恒磁场、电磁感应和暂态过程、磁介质、交流电、麦克斯韦电磁理论和电磁波、电磁学的单位制。

本书可作为高等学校物理专业电磁学课程教材，也可供其它专业有关教师、学生参考。

高等学校教材

电 磁 学

上册

赵凯华 陈熙谋

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

\*

开本850×1168 1/32 印张14.5 字数350,000

1985年6月第2版 1986年4月第1次印刷

印数00,001—17,580

书号 13010·01210 定价 2.70 元

## 第二版序

1930年8月教育部颁发了经高等学校理科物理教材编审委员会审订的综合大学物理学专业《普通物理学(电磁学)教学大纲(四年制)》，本书第一版内容与该大纲的要求基本一致。第二版主要作了如下几方面的修改：(1)在近几年的教学实践中，再次比较了某些章节的不同讲法，我们认为有必要作适当的改动，改动的部分有安培环路定理的证明，磁化强度矢量与磁化电流关系的推导，位移电流的引入等。(2)增添了绪论、某些附录和小字部分的内容，如静电场边值问题的唯一性定理，安培实验和矢量分析中的一些推导和证明，不同参照系之间电磁场的变换等。它们或者提供了一些历史和背景知识，或者以读者可以接受的方式，论述了一些较深的理论问题。我们希望这对教学的深入能有所裨益。为了更突出本课程的基本要求和重点，把某些相对次要的内容改为小字。(4)改正了原书第一版中一些书写、印刷以及习题答案中的疏漏和错误。谨向几年来热情向我们指正的广大教师和读者致以衷心的感谢。

作 者

1984年6月于北京大学

## 第一版前言

1958年以来作者之一在北京大学物理系讲授电磁学，曾多次编写讲义。本教材以历年来所用的讲义为基础，根据1977年10月在苏州召开的全国高等学校理科物理教材会议制订的教材编写大纲改编而成。

电磁学是理科物理类专业的一门重要基础课。编写本教材时，我们力求在广泛介绍电磁现象的基础上，着重于基本规律和基本概念的系统阐述，尽可能保证理论体系的完整。关于实际应用，我们不过多地去介绍具体的细节，而是试图对理论在实际中的应用有哪些方面、问题是以怎样的方式提出的、以及理论在各个领域中的适用条件等作些概括，以求读者对电磁理论的应用，从整体上有所了解，从而在工作中具备较广的适应性。以上是我们的一些想法。我们感到本教材尚不很成熟，在某些方面仅仅是一些初步的尝试，还有待于在教学实践的基础上进一步改进和提高。

本教材部分内容取材较为深广，介绍了一些现代物理的应用，以适应不同的专业要求，并有利于开阔学生的眼界。为了分清主次，突出基本内容，本书用大、小两种字体排印。大字部分自成体系，反映教学的基本要求；小字部分可作进一步学习的参考。

为了教学方便，书中附有若干附录，介绍一些与内容有关的数学工具。书中收集了一些思考题、习题，其中有的反映了现代物理内容。思考题和习题总的数量较大，可供教师、学生根据不同情况加以选择。

本教材很多地方吸取了我校任课教师的教学经验。章立源、钟锡华二同志过去参加过本课的讲义编写工作。这次在本教材的

改编过程中,郭敦仁同志修改了部分初稿;钟锡华同志详细地阅读了初稿,和我们多次进行了有益的讨论,提供了他在教学中的心得和体会。张之翔同志把多年来收编的习题集提供给我们选择。周岳明、史凤起、冯庆莹等同志帮助演算和核对了习题答案。今年2—3月在本教材的审稿会议上,北京师范大学(主审)、中国科学技术大学、南开大学、山东大学、吉林大学、河北大学、内蒙古大学、北京师范学院等八个兄弟院校的同志们提出了不少宝贵的修改意见。温承诚、艾铁友同志帮助绘制了一部分插图。作者谨此一并表示感谢。

本教材分上、下两册。上册的内容有静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒电流、稳恒磁场;下册的内容有电磁感应和暂态过程、磁介质、交流电、麦克斯韦电磁理论和电磁波、电磁单位制。

本教材内容涉猎较广,作者水平有限,加以脱稿仓促,错误和不妥之处在所难免。我们诚恳地希望广大教师和读者给以批评和指正。

赵凯华 陈熙谋

1978年3月于北京大学

# 上册目录

绪论 .....	1
<b>第一章 静电场</b> .....	15
§ 1 静电的基本现象和基本规律 .....	15
1.1 两种电荷 .....	15
1.2 静电感应 电荷守恒定律 .....	17
1.3 导体、绝缘体和半导体 .....	19
1.4 物质的电结构 .....	20
1.5 库仑定律 .....	22
思考题 .....	25
习题 .....	26
§ 2 电场 电场强度 .....	27
2.1 电场 .....	27
2.2 电场强度矢量 $E$ .....	28
2.3 电场强度叠加原理 .....	32
2.4 电荷的连续分布 .....	35
2.5 带电体在电场中受的力及其运动 .....	39
思考题 .....	42
习题 .....	42
§ 3 高斯定理 .....	45
3.1 电力线及其数密度 .....	45
3.2 电通量 .....	52
3.3 高斯定理的表述和证明 .....	54
3.4 从高斯定理看电力线的性质 .....	59

3.5 高斯定理应用举例 .....	61
思考题 .....	69
习题 .....	70
§ 4 电位及其梯度 .....	73
4.1 静电场力所做的功与路径无关 .....	73
4.2 电位差与电位 .....	76
4.3 电位叠加原理 .....	82
4.4 等位面 .....	85
4.5 电位的梯度 .....	89
4.6 小结 .....	93
思考题 .....	94
习题 .....	95
*§ 5 带电体系的静电能 .....	101
*5.1 点电荷之间的相互作用能 .....	101
*5.2 电荷连续分布情形的静电能 .....	107
*5.3 电荷在外电场中的能量 .....	109
*5.4 带电体系受力问题 .....	110
思考题 .....	111
习题 .....	112
附录 A 矢量乘积 立体角 曲线坐标系 .....	112
A.1 矢量的乘积 .....	112
A.2 立体角 .....	116
A.3 柱坐标系和球坐标系 .....	117
<b>第二章 静电场中的导体和电介质 .....</b>	<b>127</b>
§ 1 静电场中的导体 .....	127
1.1 导体的静电平衡条件 .....	127
1.2 电荷分布 .....	132



1.3	导体壳(腔内无带电体的情形)	136
1.4	导体壳(腔内有带电体的情形)	142
	思考题	146
	习题	150
§ 2	电容和电容器	153
2.1	孤立导体的电容	153
2.2	电容器及其电容	154
2.3	电容器的并联、串联	160
2.4	电容器储能(电能)	163
	思考题	166
	习题	168
§ 3	电介质	177
3.1	电介质的极化	177
3.2	极化的微观机制	179
3.3	极化强度矢量 $\mathbf{P}$	181
3.4	退极化场	185
3.5	电介质的极化规律 极化率	189
3.6	电位移矢量 $\mathbf{D}$ 与有介质时的高斯定理 介电常数	191
*3.7	电介质在电容器中的作用	196
*3.8	压电效应及其逆效应	197
3.9	小结	199
	思考题	200
	习题	201
§ 4	电场的能量和能量密度	209
	习题	213
附录 B	静电场边值问题的唯一性定理	213
B.1	问题的提出	214

B.2	几个引理	214
B.3	叠加原理	216
B.4	唯一性定理的证明	216
B.5	静电屏蔽	217
B.6	有电介质的情形	219
<b>第三章 稳恒电流</b>		<b>223</b>
§ 1	电流的稳恒条件和导电规律	223
1.1	电流强度 电流密度矢量	223
1.2	电流的连续方程 稳恒条件	226
1.3	欧姆定律 电阻 电阻率	228
1.4	电功率 焦耳定律	234
1.5	金属导电的经典微观解释	237
	思考题	242
	习题	243
§ 2	电源及其电动势	246
2.1	非静电力	246
2.2	电动势	247
2.3	电源的路端电压	248
2.4	闭合回路的电流强度和输出功率	251
*2.5	丹聂耳电池	253
2.6	稳恒电路中电荷和静电场的作用	256
	思考题	258
	习题	259
§ 3	简单电路	260
3.1	串联和并联电路	260
3.2	平衡电桥	268
3.3	电位差计	272

思考题	275
习题	280
§ 4 复杂电路	288
4.1 基尔霍夫方程组	290
*4.2 电压源与电流源 等效电源定理	296
*4.3 叠加定理	301
*4.4 Y- $\Delta$ 电路的等效代换	302
思考题	304
习题	305
§ 5 温差电现象	310
5.1 汤姆逊效应	311
5.2 珀耳帖效应	312
5.3 温差电效应及其应用	314
思考题	318
§ 6 电子发射与气体导电	318
6.1 脱出功和电子发射	318
*6.2 气体的被激导电	321
*6.3 气体的自持导电	322
*6.4 等离子体与受控热核实验	325
习题	327
<b>第四章 稳恒磁场</b>	<b>331</b>
§ 1 磁的基本现象和基本规律	331
1.1 磁的基本现象	331
1.2 磁场	335
1.3 安培定律	337
1.4 电流强度单位——安培的定义和绝对测量	344
1.5 磁感应强度矢量 $\mathbf{B}$	346

思考题	350
§ 2 载流回路的磁场	352
2.1 毕奥-萨伐尔定律	352
2.2 载流直导线的磁场	353
2.3 载流圆线圈轴线上的磁场	355
2.4 载流螺线管中的磁场	361
思考题	367
习题	367
§ 3 磁场的“高斯定理”与安培环路定理	372
3.1 磁场的“高斯定理”	373
3.2 安培环路定理的表述和证明	377
3.3 安培环路定理应用举例	380
思考题	384
习题	385
§ 4 磁场对载流导线的作用	387
4.1 安培力	387
4.2 平行无限长直导线间的相互作用	387
4.3 矩形载流线圈在均匀磁场中所受的力矩	389
4.4 载流线圈的磁矩	390
4.5 直流电动机的基本原理	392
4.6 电流计线圈所受的磁偏转力矩	395
思考题	397
习题	397
§ 5 带电粒子在磁场中的运动	405
5.1 洛伦兹力	405
5.2 洛伦兹力与安培力的关系	408
5.3 带电粒子在均匀磁场中的运动	410

5.4	荷质比的测定	413
5.5	回旋加速器的基本原理	417
5.6	霍耳效应	419
*5.7	等离子体的磁约束	423
	思考题	425
	习题	427
*§ 6	不同参照系之间电磁场的变换	434
6.1	相对论力学的若干结论	434
6.2	电磁规律的协变性和电荷的不变性	439
6.3	电磁场的变换公式	442
6.4	运动点电荷的电场	443
6.5	运动点电荷的磁场	446
6.6	对特鲁顿-诺伯实验零结果的解释	450
	思考题	451
	习题	451

## 绪 论

电磁学是经典物理学的一部分。它主要是研究电荷、电流产生电场、磁场的规律，电场和磁场的相互联系，电磁场对电荷、电流的作用，以及电磁场对物质的各种效应等。电磁现象是自然界存在的一种极为普遍现象，它涉及到很广泛的领域；电的研究和应用在认识客观世界和改造客观世界中展现了巨大的活力。因此，电磁学课程是理科和技术学科的一门重要基础课。

任何一门科学都有其发展史，都是人类长期实践活动和理论思维的产物。回顾科学发展的历史可以使我们看清楚，在荒漠的知识原野上如何建造起庄严的科学大殿，从而获得科学方法论上的教益。

人类有关电磁现象的认识可追溯到公元前六百年。早在公元前585年，希腊哲学家泰勒斯(Thales)已记载了用木块摩擦过的琥珀能够吸引碎草等轻小物体，以及天然磁矿石吸引铁的现象。在以后的两千年中，虽然还有人发现摩擦过的煤玉也具有吸引较小物体的能力，但关于琥珀奇特性质的认识进展甚少，而磁石性质的认识逐渐增多起来。例如，磁石可以吸引一串铁片；磁石具有磁极，磁石的相同磁极靠在一起彼此排斥；弱磁可被强磁改变磁极；利用磁石制成罗盘並用于航海，等等。在相当长的时期内，琥珀吸引较小物体与磁石吸铁一样，都被看成物质固有的性质。

我国古代人民对电磁现象的认识曾有过重要贡献。春秋战国时期(公元前770—221年)，已有“山上有慈石(即磁石)者，其下有铜金”，“慈石名铁，或引之也”等磁石吸铁的记载。东汉已有指南针的前身司南勺。比欧洲更早，在北宋时，我国已有利用地磁

场进行人工磁化制作指南鱼或用磁石磨针尖制作指南针，並用于航海。关于静电现象，西汉末年已有关于“璊瑁(玳瑁)吸裾(细小物体之意)”的记载，以及“元始中(公元三年)……矛端生火”即金属制的矛的尖端放电的记载；晋朝(公元三世纪)还有关于摩擦起电引起放电现象的详细记载，“今人梳头，解著衣，有随梳解结，有光者，亦有咤声”。

1600年，英国伊丽莎白女王的御医吉尔伯特(William Gilbert)在他出版的《磁石论》一书中对于磁石的各种基本性质作了系统的定性描述。他发展了前人的实验研究，在地磁方面有重要贡献。他还对琥珀的吸引作了深入研究，他发现不仅琥珀和煤玉经摩擦后能吸引轻小物体，而且相当多的物质，如金钢石、蓝宝石、硫磺、硬树脂和明矾等经摩擦后也都具有吸引轻小物体的性质；他注意到这些物质经摩擦后並不象磁石，具有指南北的性质，为了表明与磁性的不同，他采用琥珀的希腊文字  $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ ，把这种性质称为“电的”(electric)。吉尔伯特在实验过程中制作了第一只验电器，这是一根中心固定可转动的金属细棒。当摩擦过的琥珀靠近时，金属细棒可转动指向琥珀。大约在1660年马德堡的盖利克(Otto von Guericke)发明了第一台摩擦起电机。他用硫磺制成形如地球仪的可转动球体，用干燥的手掌擦着转动的球体，使之停止而获得电。盖利克的摩擦起电机经过不断改进，在静电实验研究中起着重要作用，直到十九世纪霍耳兹(W. Holtz)和特普勒(A. Töpler)分别发明感应起电机后才被取代。

十八世纪电的研究迅速发展起来。1729年英国的格雷(Stephen Gray)研究琥珀的电效应是否可传递给其他物体时，发现导体和绝缘体的区别：金属可导电，丝绸不导电。并且他第一次使人体带电。格雷的实验引起法国杜费(Charles-François du Fay)的注意。1733年杜费发现绝缘起来的金属也可摩擦起电，因

此，他得出所有物体都可摩擦起电，从而认为吉尔伯特把物体分为“电的”和“非电的”并没有事实根据。他还让别人用丝质绳把自己吊起来绝缘，当他被带电而别人靠近时，他感觉到针刺般的放电袭击，放电产生噼拍声，在暗处还可看到放电的火花。杜费最重要的发现是电有两种。他改进了吉尔伯特的验电器，用金箔代替金属细棒。他观察到摩擦过的玻璃棒接触金箔后对金箔的排斥作用，而用摩擦过的硬树脂对此金箔却产生明显的吸引。他意识到不同材料经摩擦后产生的电不同，他把玻璃上产生的电叫做“玻璃的”(vitreous)，琥珀上产生的电与硬树脂上产生的相同，叫做“树脂的”(resinous)。他得到：带相同电的物体互相排斥，带不同电的物体彼此吸引。他把电想象为二元流体，当它们结合在一起时，彼此中和。

1745年荷兰莱顿的穆欣布罗克(Pieter van Musschenbroek)为了避免电在空气中逐渐消失，试图寻找一种保存电的办法。他手拿一玻璃瓶，给瓶中的水带电，当手接触到连接水的金属丝时，臂和胸部感觉到强烈的电击，于是他获得了电容器的原始形式——莱顿瓶。这种贮存电的方法同时也被德国的克莱斯特(Ewald Georg von Kleist)独立地发现。

莱顿瓶的发明为电的进一步研究提供了条件，它对于电知识的传播起了重要作用。法国的诺莱(Jean-Antoine Nollet)曾做了一个当时最为壮观的演示实验，他在巴黎大教堂前，在路易十五皇室成员面前，令七百个修道士手拉手地排成一条九百英尺长的队伍，一端的人接触带电莱顿瓶的外部，当另一端的人接触莱顿瓶的另一极时，七百个修道士全都因电击而跳起来，这就令人信服地演示了电的威力。

差不多同时在美国，夫兰克林(Benjamin Franklin)的工作使得人们对于电的认识更加丰富了，并澄清了许多观念。1747



年他根据自己的实验，认为在正常条件下电是以一定的量存在于所有物质中的一种元素；电象流体一样可以流动，摩擦的作用使电可以从一物体转移到另一物体，但不能创造；任何孤立物体的电的总量是不变的，这就是通常所说的电荷守恒；他把摩擦时物体获得电，而形成电的多余部分叫做带正电；物体失去电，而形成电的不足部分叫做带负电。严格地说，这种关于电的一元流体理论在今天看来并不正确，但他所使用的正电和负电的术语至今仍被采用。夫兰克林还认识到莱顿瓶的贮电作用来自玻璃；他观察到导体的尖端更易于放电等等。他的最著名的实验是风筝实验。早在1749年，他就注意到雷闪与放电有许多相同之处。1752年他在雷雨天气将风筝放入云层，在连接风筝的绳上系一钥匙，手放近钥匙，接收到强烈的电击，从而证明了雷闪就是放电现象。这是一个危险的实验，后来有人重复做同类实验时遭电击身亡。夫兰克林还建议用避雷针来防护建筑物免遭雷击。1754年首先由狄维施(Procopius Divisch)实现，这是迄今所知的电的第一个实际应用。

十八世纪后期在较好实验设备的条件下，开始了电荷相互作用的定量研究。1766年，普里斯特利(Joseph Priestley)根据他实验上发现带电金属容器内表面没有电荷和对内部不产生电力，猜测电力与万有引力有相似的规律，两个电荷之间的作用力与它们之间距离的平方成反比，但他未能予以证明。1769年罗宾孙(John Robinson)通过作用在一个小球上电力和重力平衡的实验，第一次直接测定了两个电荷相互作用力与距离平方成反比。1773年卡文迪许(Henry Cavendish)根据他实验中导体球内表面检测不到的电荷数量推算出电力与距离成反比的方次与2相差最多不超过百分之二。他的这一实验是近代精确验证电力定律的雏形。可是他的这一实验以及其他重要实验成果到1879年才由麦克斯韦