

ELECTROMAGNETISM



电 磁 学

(第三版)

赵凯华 陈熙谋



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

电 磁 学

Diancixue

(第三版)

赵凯华 陈熙谋



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书第一版(1978年)是由赵凯华、陈熙谋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审订的教材编写大纲改编而成。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(1985年)根据几年来使用情况和教学发展的实际作了适当的修改和补充;1987年获第一届国家级全国高校优秀教材奖。本书为第三版(2011年),保持原来的教学体系和教学要求不变;在一些大字和小字部分稍作必要的调整;改正了原书中的一些不适之处;在重要物理概念的引入上增加了一些指导性阐述;此外,还增加了带电粒子加速运动辐射场的初等分析。

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、恒定电流、恒定磁场、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。

本书可作为一般高等学校物理专业电磁学课程教材,也可供其他专业有关教师、学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/赵凯华,陈熙谋编著. —3版. —北京:高等教育出版社,2011.7
ISBN 978-7-04-029533-7

I. ①电… II. ①赵…②陈… III. ①电磁学-高等学校-教材 IV. ①O441

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第208705号

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	三河市春园印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787×960 1/16	版 次	1978年8月第1版
印 张	42.75		2011年7月第3版
字 数	800 000	印 次	2011年7月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	57.00元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29533-00

第三版序

本书第一版于1978年出版发行,至今已经30余年,本书第二版于1985年出版也已24年多了.本书体系严谨,知识结构清晰,说理透彻,例题、思考题、习题丰富且富于启发性,图文并茂,一直受到广大师生的欢迎,至今仍被不少院校采用.2003年我们作了较大的修改,以《新概念物理教程·电磁学》书名出版,其中不仅教学体系有了很大的改变,体系显得更为简洁,而且某些内容提高了要求,作了更为深入的讨论,如电磁学中的对称性分析,把静电场的唯一性定理和电磁场的相对论变换提升为大字内容,引入电荷加速运动时的电磁辐射,增加了关于矢势和场动量的若干讨论等,以适应科学技术和教学发展的需求.

然而也有不少教师仍然偏爱原来《电磁学》的教学体系和教学要求的层次,他们认为原来《电磁学》的教学体系和教学要求更能体现循序渐进的原则,也就更适合于起点稍低的一般学生的认知过程.为了适应他们的需要,在这次修订中我们在保持原有教学体系和教学要求、不增加难度的前提下,在一些大字和小字部分稍作必要的调整;改正原书的一些笔误、排版印刷错误和其他不妥之处;并且,在重要概念的引入上增加一些指导性的阐述和分析,如在高斯定理和环路定理前增加了一段关于矢量场的描述,以利于学生更好地掌握相应的重要概念;此外,增加带电粒子加速运动电磁辐射的分析,这是过去普通物理教学中所缺少的内容,而很多物理现象的分析都需要用到它,例如回旋加速器和电子感应加速器中加速能量所受到的限制,光学中的色散和散射的分析,X射线韧致辐射的产生以及经典物理的原子稳定性的疑难分析中都要用到,现在通过一个特例用普通物理方法作近似分析.

我们希望本教材的新版能在电磁学的教学中发挥更好的作用,取得更好的效果.多年来,广大教师和读者曾热情地向我们指正教材中的不妥之处,我们在此表示衷心的感谢,并恳切希望大家继续关心本教材的完善.

作者

2010年6月于北京大学

第二版序

1980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，不同参考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。(3)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定的教材编写大纲改编而成.

电磁学是理科物理类各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、钟锡华两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、冯庆荣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,加之脱稿仓促,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予批评和指正.

赵凯华 陈熙谋
1978年3月于北京大学

目 录

绪论	1
第一章 静电场	11
§ 1.1 静电的基本现象和基本规律	11
1.1.1 两种电荷	11
1.1.2 静电感应 电荷守恒定律	12
1.1.3 导体、绝缘体和半导体	13
1.1.4 物质的电结构	14
1.1.5 库仑定律	15
思考题	18
习题	18
§ 1.2 电场 电场强度	19
1.2.1 电场	19
1.2.2 电场强度矢量 E	20
1.2.3 电场强度叠加原理	22
1.2.4 电荷的连续分布	24
1.2.5 带电体在电场中受的力及其运动	27
1.2.6 矢量场的描述	29
思考题	31
习题	31
§ 1.3 高斯定理	33
1.3.1 电场线及其数密度	33
1.3.2 电场强度通量	36
1.3.3 高斯定理的表述和证明	39
1.3.4 从高斯定理看电场线的性质	42
1.3.5 高斯定理应用举例	43
思考题	48
习题	49
§ 1.4 电势及其梯度	51
1.4.1 静电场力所做的功与路径无关	51
1.4.2 电势差与电势	53
1.4.3 电势叠加原理	57
1.4.4 等势面	59

1.4.5	电势的梯度	61
1.4.6	小结	64
	思考题	65
	习题	66
§ 1.5	带电体系的静电能	70
1.5.1	点电荷之间的相互作用能	70
1.5.2	电荷连续分布情形的静电能	75
1.5.3	电荷在外电场中的能量	76
1.5.4	带电体系受力问题	77
	思考题	78
	习题	78
附录 A	矢量乘积 立体角 曲线坐标系	79
A.1	矢量的乘积	79
A.2	立体角	82
A.3	柱坐标系和球坐标系	83
第二章	静电场中的导体和电介质	91
§ 2.1	静电场中的导体	91
2.1.1	导体的静电平衡条件	91
2.1.2	电荷分布	94
2.1.3	导体壳(腔内无带电体的情形)	97
2.1.4	导体壳(腔内有带电体的情形)	101
	思考题	103
	习题	106
§ 2.2	电容和电容器	108
2.2.1	孤立导体的电容	108
2.2.2	电容器及其电容	109
2.2.3	电容器的并联、串联	113
2.2.4	电容器储能(电能)	115
	思考题	117
	习题	118
§ 2.3	电介质	124
2.3.1	电介质的极化	124
2.3.2	极化的微观机制	125
2.3.3	电极化强度 \boldsymbol{P}	127
2.3.4	退极化场	129
2.3.5	电介质的极化规律 极化率	132
2.3.6	电位移矢量 \boldsymbol{D} 与有介质时的高斯定理 介电常量	134
* 2.3.7	电介质在电容器中的作用	137

* 2.3.8 压电效应及其逆效应	138
2.3.9 小结	139
思考题	139
习题	140
§ 2.4 电场的能量和能量密度	146
习题	148
附录 B 静电场边值问题的唯一性定理	148
B.1 问题的提出	149
B.2 几个引理	149
B.3 叠加原理	150
B.4 唯一性定理的证明	150
B.5 静电屏蔽	151
B.6 有电介质的情形	152
第三章 恒定电流	157
3.1 电流的恒定条件和导电规律	157
3.1.1 电流 电流密度矢量	157
3.1.2 电流的连续方程 恒定条件	159
3.1.3 欧姆定律 电阻 电阻率	160
3.1.4 电功率 焦耳定律	164
3.1.5 金属导电的经典微观解释	166
思考题	170
习题	170
3.2 电源及其电动势	172
3.2.1 非静电力	172
3.2.2 电动势	173
3.2.3 电源的路端电压	174
3.2.4 闭合回路的电流和输出功率	176
* 3.2.5 丹聂耳电池	177
3.2.6 恒定电路中电荷和静电场的作用	179
思考题	180
习题	181
§ 3.3 简单电路	182
3.3.1 串联和并联电路	182
3.3.2 平衡电桥	188
3.3.3 电势差计	190
思考题	192
习题	195
3.4 复杂电路	201

3.4.1	基尔霍夫方程组	202
* 3.4.2	电压源与电流源 等效电源定理	206
* 3.4.3	叠加定理	209
* 3.4.4	Y- Δ 电路的等效代换	211
	思考题	212
	习题	213
§ 3.5	温差电现象	216
3.5.1	汤姆孙效应	216
3.5.2	佩尔捷效应	218
3.5.3	温差电效应及其应用	218
	思考题	221
§ 3.6	电子发射与气体导电	221
3.6.1	逸出功和电子发射	221
* 3.6.2	气体的被激导电	223
* 3.6.3	气体的自持导电	224
* 3.6.4	等离子体与受控热核实验	226
	习题	228
第四章	恒定磁场	231
4.1	磁的基本现象和基本规律	231
4.1.1	磁的基本现象	231
4.1.2	磁场	234
4.1.3	安培定律	235
4.1.4	电流强度单位——安培的定义和绝对测量	240
4.1.5	磁感应强度矢量 \mathbf{B}	241
	思考题	244
4.2	载流回路的磁场	244
4.2.1	毕奥-萨伐尔定律	244
4.2.2	载流直导线的磁场	245
4.2.3	载流圆线圈轴线上的磁场	247
4.2.4	载流螺线管中的磁场	251
	思考题	255
	习题	255
4.3	磁场的“高斯定理”与安培环路定理	259
4.3.1	磁场的“高斯定理”	259
4.3.2	安培环路定理的表述和证明	261
4.3.3	安培环路定理应用举例	264
	思考题	266
	习题	267

§ 4.4	磁场对载流导线的作用	268
4.4.1	安培力	268
4.4.2	平行无限长直导线间的相互作用	269
4.4.3	矩形载流线圈在均匀磁场中所受的力矩	269
4.4.4	载流线圈的磁矩	271
4.4.5	直流电动机的基本原理	273
4.4.6	电流计线圈所受的磁偏转力矩	274
	思考题	275
	习题	276
§ 4.5	带电粒子在磁场中的运动	281
4.5.1	洛伦兹力	281
4.5.2	洛伦兹力与安培力的关系	283
4.5.3	带电粒子在均匀磁场中的运动	284
4.5.4	比荷的测定	286
4.5.5	回旋加速器的基本原理	289
4.5.6	霍耳效应	290
4.5.7	等离子体的磁约束	293
	思考题	294
	习题	296
* § 4.6	电磁场的相对论变换	300
4.6.1	问题的提出	300
4.6.2	相对论力学的若干结论	301
4.6.3	电磁规律的协变性和电荷的不变性	305
4.6.4	电磁场的相对论变换公式	307
4.6.5	运动点电荷的电场	308
4.6.6	运动点电荷的磁场	310
4.6.7	对特鲁顿-诺伯实验零结果的解释	313
	思考题	314
	习题	314
第五章	电磁感应和暂态过程	317
§ 5.1	电磁感应定律	317
5.1.1	电磁感应现象	318
5.1.2	法拉第定律	321
5.1.3	楞次定律	324
5.1.4	涡电流和电磁阻尼	325
5.1.5	趋肤效应	328
	思考题	330
	习题	331

§ 5.2	动生电动势和感生电动势	333
5.2.1	动生电动势	333
5.2.2	交流发电机原理	336
5.2.3	感生电动势 涡旋电场	338
5.2.4	电子感应加速器	339
	思考题	341
	习题	342
§ 5.3	互感和自感	343
5.3.1	互感系数	343
5.3.2	自感系数	345
5.3.3	两个线圈串联的自感系数	349
5.3.4	自感磁能和互感磁能	350
	思考题	352
	习题	353
§ 5.4	暂态过程	355
5.4.1	LR 电路的暂态过程	355
5.4.2	RC 电路的暂态过程	357
* 5.4.3	微分电路和积分电路	359
5.4.4	LCR 电路的暂态过程	361
	思考题	363
	习题	364
§ 5.5	灵敏电流计和冲击电流计	366
5.5.1	灵敏电流计	366
* 5.5.2	冲击电流计	369
	思考题	375
附录 C	二阶线性常系数微分方程	376
第六章	磁介质	381
§ 6.1	分子电流观点	381
6.1.1	磁介质的磁化 磁化强度矢量 \mathbf{M} 及其与磁化电流的关系	381
6.1.2	磁介质内的磁感应强度 \mathbf{B}	385
6.1.3	磁场强度矢量 \mathbf{H} 与有磁介质时的安培环路定理和“高斯定理”	386
	习题	388
* § 6.2	等效的磁荷观点	389
6.2.1	磁的库仑定律 磁场强度矢量 \mathbf{H} 磁偶极子	389
6.2.2	磁介质的磁化 磁极化强度矢量 \mathbf{J} 及其与磁荷的关系	392
6.2.3	退磁场与退磁因子	394
6.2.4	两种观点的等效性	397
	思考题	402

习题	402
§ 6.3 介质的磁化规律	404
6.3.1 磁化率和磁导率	404
6.3.2 顺磁质和抗磁质	406
6.3.3 铁磁质的磁化规律	409
6.3.4 磁滞损耗	413
6.3.5 铁磁质的分类	414
6.3.6 铁磁质的微观结构	417
习题	418
§ 6.4 边界条件 磁路定理	421
6.4.1 磁介质的边界条件	421
6.4.2 磁感应线在边界面上的“折射”	422
6.4.3 磁路定理	423
6.4.4 磁屏蔽	427
习题	428
§ 6.5 磁场的通量和通量密度	432
习题	436
第七章 交流电	439
§ 7.1 交流电概述	439
7.1.1 各种形式的交流电	439
7.1.2 描述简谐交流电的特征量	441
习题	443
§ 7.2 交流电路中的元件	444
7.2.1 概述	444
7.2.2 交流电路中的电阻元件	445
7.2.3 交流电路中的电容元件	445
7.2.4 交流电路中的电感元件	447
7.2.5 小结	449
思考题	450
习题	450
§ 7.3 元件的串联和并联(矢量图解法)	451
7.3.1 用矢量图解法计算串、并联电路	451
7.3.2 用矢量图解法计算同频简谐量的叠加	452
7.3.3 串联电路	453
7.3.4 并联电路	456
* 7.3.5 串、并联电路的应用(旁路、相移、滤波)	457
思考题	461
习题	462

§ 7.4 交流电路的复数解法	466
7.4.1 用复数法计算同频简谐量的叠加	466
7.4.2 复电压、复电流及复阻抗的概念	467
7.4.3 串、并联电路的复数解法	468
* 7.4.4 复导纳	471
7.4.5 交流电路的基尔霍夫方程组及其复数形式	472
* 7.4.6 等效电源定理和 Y- Δ 阻抗代换公式的运用	476
* 7.4.7 有互感的电路计算	479
思考题	480
习题	481
§ 7.5 交流电的功率	484
7.5.1 瞬时功率与平均功率 有效值和功率因数	484
7.5.2 有功电流与无功电流 提高功率因数的第一个作用	487
7.5.3 视在功率和无功功率 提高功率因数的第二个作用	488
7.5.4 有功电阻和电抗	490
* 7.5.5 电导与电纳	492
7.5.6 品质因数(Q 值)、损耗角(δ)和耗散因数($\tan \delta$)	493
思考题	495
习题	496
§ 7.6 谐振电路与 Q 值的意义	498
7.6.1 串联谐振现象 谐振频率和相位差	498
7.6.2 储能与耗能和 Q 值的第一种意义	500
7.6.3 频率的选择性和 Q 值的第二种意义	503
7.6.4 电压分配和 Q 值的第三种意义	504
* 7.6.5 阻尼振荡和 Q 值的第四种意义	506
7.6.6 并联谐振电路	507
思考题	509
习题	509
§ 7.7 交流电桥	509
7.7.1 基本原理	510
7.7.2 几种常用的交流电桥	511
思考题	513
习题	513
§ 7.8 变压器原理	514
7.8.1 理想变压器	514
7.8.2 变比公式	515
* 7.8.3 输入和输出等效电路	518
* 7.8.4 阻抗的匹配	520

7.8.5	变压器的用途	521
	思考题	522
	习题	523
§ 7.9	三相交流电	524
7.9.1	什么是三相交流电 相电压与线电压	524
7.9.2	三相电路中负载的连接	526
7.9.3	三相电功率	529
7.9.4	三相电产生旋转磁场	530
7.9.5	三相感应电动机的运行原理、结构和使用	532
	思考题	535
	习题	536
附录 D	矢量图解法和复数法	536
D.1	一维同频简谐量的叠加问题	536
D.2	矢量图解法	537
D.3	复数的基本知识	539
D.4	复数法	541
D.5	小结	542
第八章	麦克斯韦电磁理论和电磁波	547
§ 8.1	麦克斯韦电磁理论	547
8.1.1	麦克斯韦电磁理论产生的历史背景	547
8.1.2	位移电流	548
8.1.3	麦克斯韦方程组	553
* 8.1.4	边界条件	555
	习题	557
§ 8.2	电磁波	557
8.2.1	电磁波的产生和传播	557
8.2.2	偶极振子发射的电磁波	560
8.2.3	带电粒子加速运动的电磁辐射	565
8.2.4	电磁波的性质	567
8.2.5	光的电磁理论	571
8.2.6	电磁波谱	573
§ 8.3	电磁场的能流密度与动量	575
8.3.1	电磁场的能量原理和能流密度矢量	575
* 8.3.2	电磁场的动量 光压	578
* 8.3.3	电磁场是物质的一种形态	580
	思考题	582
	习题	583
§ 8.4	似稳电路和迅变电磁场	584

8.4.1 似稳条件和集中参量	584
* 8.4.2 高频时杂散参量的处理	586
* 8.4.3 传输线与电报方程	586
* 8.4.4 微波的特点	590
习题	591
附录 E 矢量分析提要	591
E.1 标量场和矢量场	591
E.2 标量场的梯度	592
E.3 矢量场的通量和散度 高斯定理	593
E.4 矢量场的环量和旋度 斯托克斯定理	597
E.5 一些公式	600
E.6 矢量场的类别和分解	601
E.7 磁场的矢势	602
习题	605
第九章 电磁学的单位制	609
§ 9.1 单位制和量纲	609
9.1.1 单位制 基本单位和导出单位	609
9.1.2 物理量的量纲	611
§ 9.2 常用的两种电磁学单位制	612
9.2.1 MKSA 有理制	612
9.2.2 高斯单位制	613
§ 9.3 两种单位制中物理公式的转换	620
习题	624
习题答案	626
名词索引	652
人名索引	665

(带 * 号章节为小字部分)

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更加清楚,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 600 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 2000 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;利用磁石制成罗盘并用于航海,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—前 221 年),已有“山上有慈石(即磁石)者,其下有铜金”,“慈石召铁,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,并用于航海。关于静电现象,西汉末年已有关于“瑋瑁(玳瑁)吸裾(细小物体之意)”的记载,以及“元始中(公元 3 年)……矛盾生火”即金属制的矛的尖端放电的记载;晋朝(公元 3 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,如金刚石、蓝宝石