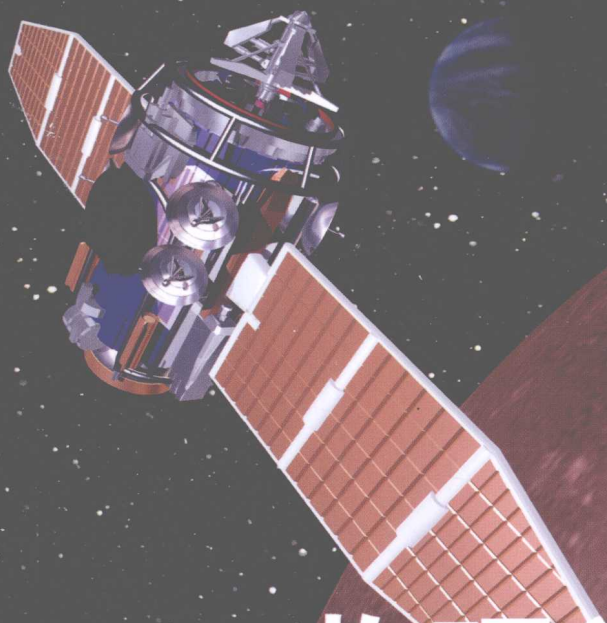




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



物理学导论(下册)

敬仕超 杜 泉 金 蓉 主编



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物理学导论

(下册)

敬仕超 杜 泉 金 蓉 主编



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,根据教育部高等学校非物理基础课程教学指导分委员会最新制定的“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求(正式报告稿)”编写而成。与本教材相关的系列化教材,包括《物理学导论》上、下册,《物理学导论习题分析与解答》和《现代物理与工程技术原理》。

上册包括力学、统计热力学基础和电磁学;下册包括变化电磁场、振动和波动、光学和近代物理。《现代物理与工程技术原理》可单独使用,供学时多的专业选讲,或开设选修课之用,利于实现教学内容现代化。

本书重视力学的基础地位和衔接作用,循序渐进,由浅入深,便于自学。同时重视类比叙述,利于激发学生的学习兴趣,使其进入自主学习的良性循环。

本书与解放军信息工程大学沈辉奇教授研制的教学软件系统“大学物理教学多媒体动画资源库”配套使用效果更好。

本书可作为理科和师范院校的非物理类专业以及工科院校各专业的本科生大学物理课程的教材,也可供工程技术人员及物理爱好者自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

物理学导论.下册 / 敬仕超,杜泉,金蓉主编. —北京:科学出版社,2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-021688-5

I. 物… II. ①敬…②杜…③金… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 054616 号

责任编辑:昌盛 / 责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张: 25

印数: 1—5 000 字数: 491 000

定价: 31.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<长虹>)

《物理学导论》知识结构

上册

第一篇 力学

第1章 运动学 第2章 质点动力学 第3章 刚体转动力学基础

阅读材料 科学家系列简介(一)和力学的发展

第二篇 统计热力学基础

第4章 气体动理论 第5章 热力学基础 第6章 实际气体

阅读材料 科学家系列简介(二)和热学的发展

第三篇 电磁学

第7章 真空中的静电场 第8章 静电场中的导体和电介质

第9章 真空中的稳恒磁场 第10章 介质中的稳恒磁场

下册

第11章 变化电磁场的基本规律

阅读材料 科学家系列简介(三)和电磁学的发展

第四篇 振动和波动

第12章 机械振动 第13章 机械波 第14章 电磁振荡和电磁波

第五篇 光学

第15章 几何光学 第16章 波动光学

阅读材料 科学家系列简介(四)和光学的发展

第六篇 近代物理

第17章 狭义相对论 第18章 量子物理

阅读材料 科学家系列简介(五)和现代物理学的发展

附录 物理学发展简史大事纪(1)

《物理学导论习题分析与解答》

《现代物理与工程技术原理》

第19章 分子与固体、能带论和半导体技术

第20章 原子核物理与新能源技术 第21章 粒子物理学

第22章 天体物理与宇宙学 第23章 激光技术原理

第24章 光纤通讯技术 第25章 红外辐射技术原理

第26章 传感技术原理 第27章 超导原理

第28章 纳米科技简介 第29章 生物物理简介

附录 物理学发展简史大事纪(2)百余年来诺贝尔物理学奖获得者选录

目 录

第 11 章 变化电磁场的基本规律	1
11-1 电动势	1
11-1-1 电源; 11-1-2 电动势	
11-2 电磁感应定律	3
11-2-1 电磁感应现象; 11-2-2 法拉第电磁感应定律; 11-2-3 应用举例	
11-3 动生电动势	8
11-3-1 动生电动势; 11-3-2 动生电动势的计算; 11-3-3 动生电动势的应用	
11-4 感生电动势与涡旋电场	13
11-4-1 麦克斯韦假设; 11-4-2 感生电场与静电场的比较; 11-4-3 感生电动势; 11-4-4 感生电动势的应用; * 11-4-5 涡旋电流; * 11-4-6 电子感应加速器	
11-5 自感 互感 磁场能量	22
11-5-1 自感; 11-5-2 互感; 11-5-3 自感磁能 互感磁能 磁场的能量; * 11-5-4 感应圈 互感器	
11-6 麦克斯韦电磁场理论	30
11-6-1 位移电流; 11-6-2 麦克斯韦方程组的积分形式; 11-6-3 麦克斯韦方程组的地位和作用	
习题	35

第四篇 振动和波动

概述	49
第 12 章 机械振动	50
12-1 简谐振动	50
12-1-1 简谐振子模型——弹簧振子; 12-1-2 简谐振子的动力学方程及其解; 12-1-3 应用举例	
12-2 描述振动特征的基本物理量	53
12-2-1 振动周期 频率 角频率; 12-2-2 振幅; 12-2-3 相 初相 相差; 12-2-4 应用举例; * 12-2-5 简谐振动的旋转矢量图表示法	
12-3 简谐振动的能量	58
12-3-1 简谐振子的能量与特征物理量的关系; 12-3-2 振动的动能和势能的周	

期; 12-3-3 简谐振子的平均动能和平均势能; 12-3-4 简谐振动的能量表达式和运动方程的关系	
12-4 简谐振动的合成	61
12-4-1 同方向同频率的两个简谐振动的合成; 12-4-2 同振动方向不同频率的两个简谐振动的合成——拍的概念; * 12-4-3 相互垂直频率相同的两个简谐振动的合成; 12-4-4 相互垂直不同频率的两个简谐振动的合成	
* 12-5 阻尼振动、受迫振动和共振简介	69
12-5-1 阻尼振动; 12-5-2 受迫振动和共振	
习题	72
第 13 章 机械波	78
13-1 机械波产生的条件和类型	78
13-1-1 机械波产生的条件; 13-1-2 机械波的类型	
13-2 波速 波长 波的周期和频率	79
13-2-1 波速; * 13-2-2 介质弹性性质简介; 13-2-3 波长 波的周期和频率	
13-3 平面简谐行波的波动方程	82
13-3-1 平面简谐行波的运动学方程; * 13-3-2 波动方程的动力学推导; 13-3-3 对平面简谐波表达式的进一步分析和理解; 13-3-4 应用举例; 13-3-5 简谐纵波和纵波介质质点振动的描述	
13-4 机械波的能量和能流密度	90
13-4-1 机械波的能量; 13-4-2 机械波的能流和能流密度; 13-4-3 波的吸收	
13-5 惠更斯原理	94
13-5-1 惠更斯原理; 13-5-2 惠更斯原理的应用	
13-6 波的叠加原理 波的干涉	97
13-6-1 波的叠加原理; 13-6-2 波的干涉; 13-6-3 应用举例	
13-7 驻波	103
13-7-1 驻波实验观察; 13-7-2 驻波的波动方程; 13-7-3 驻波特性定量分析; 13-7-4 边界特性和半波损失简述	
* 13-8 声波 超声波 次声波	109
13-8-1 声波; 13-8-2 人的听觉特点与声强级; 13-8-3 超声波的传播特性及其应用; 13-8-4 次声波的传播特性及其应用	
13-9 多普勒效应	111
13-9-1 声源静止, 观察者相对于介质以 v_0 运动时; 13-9-2 观察者静止不动, 声源相对于介质以 v_s 运动时; 13-9-3 声源与观察者都相对于介质运动的情况	
习题	114
第 14 章 电磁振荡和电磁波	121
14-1 振荡电路和电磁振荡	121
14-1-1 LC 串联无阻尼自由电磁振荡电路; 14-1-2 无阻尼自由振荡的规律;	

14-1-3 无阻尼自由振荡规律的形象描述; 14-1-4 实际的振荡电路	
14-2 电磁波的产生和传播	125
14-2-1 振荡电路的改进; 14-2-2 电磁辐射过程的描述; 14-2-3 电磁波的波动方程及其解	
14-3 电磁波的性质和能量	128
14-3-1 电磁波的性质; 14-3-2 电磁波的能量; 14-3-3 电磁波的波谱习题	132

第五篇 光 学

概述	135
第 15 章 几何光学	137
15-1 几何光学基本定律	137
15-1-1 几何光学三定律; 15-1-2 全反射及其应用简介	
15-2 费马原理	140
15-2-1 光程; 15-2-2 费马原理	
15-3 成像基本概念	142
15-3-1 单心光束 物与像; 15-3-2 物方和像方,物与像的共轭性	
15-4 光在平面界面上的反射和折射	143
15-4-1 光在平面上的反射; 15-4-2 光在平面界面上的折射 光束单心性的破坏	
15-5 光在球面上的反射和折射	145
15-5-1 符号法则; 15-5-2 光在球面上的折射; 15-5-3 光在球面上的反射	
15-6 薄透镜	151
15-6-1 近轴条件下薄透镜的成像; 15-6-2 薄透镜的作图求像法	
15-7 简单光学仪器	156
15-7-1 照相机; 15-7-2 显微镜; 15-7-3 望远镜	
习题	160
第 16 章 波动光学	163
16-1 光源和相干光源	163
16-1-1 光源及其发光特点; 16-1-2 光的相干性条件; 16-1-3 获得相干光源的基本方法	
16-2 杨氏双缝干涉——分波阵面法干涉	165
16-2-1 杨氏双缝实验; 16-2-2 杨氏双缝实验规律的定量计算; 16-2-3 菲涅耳双镜实验; 16-2-4 劳埃德镜实验; 16-2-5 应用举例; * 16-2-6 光强的概念——相干叠加和非相干叠加	
16-3 薄膜干涉——分振幅法干涉	173
16-3-1 光程的概念; 16-3-2 薄膜干涉; 16-3-3 薄膜干涉的增强透射和增强反	

射作用; * 16-3-4 等倾干涉条纹简析	
16-4 等厚干涉	181
16-4-1 劈尖干涉; 16-4-2 牛顿环; 16-4-3 等厚干涉的应用、分析和举例	
16-5 迈克耳孙干涉仪	188
16-5-1 迈克耳孙干涉仪的基本结构和干涉原理; 16-5-2 相干长度; 16-5-3 等厚干涉条纹和等倾干涉条纹	
16-6 光的衍射现象和惠更斯-菲涅耳原理	191
16-6-1 光的衍射现象的实验观察; 16-6-2 惠更斯-菲涅耳原理; 16-6-3 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	
16-7 夫琅禾费单缝衍射	193
16-7-1 实验装置及衍射图样的规律性; 16-7-2 菲涅耳半波带分析法; 16-7-3 衍射光强度分布定量计算	
16-8 夫琅禾费圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	201
16-8-1 夫琅禾费圆孔衍射; 16-8-2 光学仪器的分辨本领	
16-9 光栅衍射	204
16-9-1 光栅及其衍射实验的规律性; 16-9-2 光栅衍射原理; 16-9-3 对光栅衍射规律的物理解释; 16-9-4 关于缺级现象和大片暗区的物理解释; 16-9-5 光栅衍射光谱; 16-9-6 应用举例	
16-10 X射线的衍射	211
16-10-1 X射线产生的方法和特点; 16-10-2 X射线衍射的劳厄实验; 16-10-3 晶体衍射的布拉格公式; 16-10-4 X射线衍射的应用	
16-11 光的偏振	214
16-11-1 自然光和偏振光; 16-11-2 线偏振光和部分偏振光	
16-12 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	218
16-12-1 偏振片; 16-12-2 偏振片的起偏; 16-12-3 偏振片的检偏; 16-12-4 马吕斯定律	
16-13 光在各向同性介质分界面上反射和折射中的起偏和检偏——布儒斯特定律	220
16-13-1 光在反射和折射中偏振的实验事实; 16-13-2 布儒斯特定律; 16-13-3 玻璃片和玻璃片堆的检偏作用	
16-14 单轴晶体的双折射 偏振棱镜	223
16-14-1 寻常光和非寻常光的特点; 16-14-2 双折射晶体结构的特点; 16-14-3 双折射晶体的折射率和类型; 16-14-4 双折射现象的物理解释; 16-14-5 尼科耳棱镜	
* 16-15 偏振光的干涉和人为双折射现象及旋光现象简介	230
16-15-1 偏振光的干涉原理; 16-15-2 椭圆偏振光、圆偏振光和四分之一波片;	
16-15-3 人工双折射现象; 16-15-4 旋光现象简介; 16-15-5 磁致旋光效应	

习题.....	235
---------	-----

第六篇 近代物理

概述.....	249
第 17 章 狭义相对论	251
17-1 伽利略变换 力学相对性原理 牛顿的绝对时空观	251
17-1-1 伽利略变换; 17-1-2 力学相对性原理; 17-1-3 牛顿的绝对时空观;	
17-1-4 几点基本认识	
17-2 爱因斯坦的狭义相对性原理和洛伦兹变换	256
17-2-1 相对性原理的实验基础; 17-2-2 爱因斯坦的两个基本原理; 17-2-3 洛伦兹变换; 17-2-4 洛伦兹速度变换关系; * 附 洛伦兹时空变换式的推证	
17-3 狭义相对论的时空观	264
17-3-1 同时的相对性; 17-3-2 长度收缩效应(长度的相对性); 17-3-3 运动的时钟变慢(时间间隔的相对性)	
17-4 狭义相对论动力学基础	271
17-4-1 相对论中的质量和速度的关系; 17-4-2 牛顿运动定律的相对论形式;	
17-4-3 质量和能量的关系; 17-4-4 能量和动量的相对论关系; 17-4-5 本节小结	
习题.....	278
第 18 章 量子物理	285
18-1 热辐射和普朗克的辐射量子论	286
18-1-1 热辐射; 18-1-2 绝对黑体辐射和基尔霍夫定律; 18-1-3 绝对黑体辐射的实验规律; 18-1-4 绝对黑体辐射的经典理论解释; 18-1-5 普朗克的量子论; 18-1-6 光测高温方法	
18-2 光电效应和爱因斯坦的光量子理论	296
18-2-1 光电效应的实验规律; 18-2-2 光电效应的经典理论解释; 18-2-3 爱因斯坦的光量子理论; 18-2-4 光电效应的应用	
18-3 康普顿-吴有训效应——光的粒子性的进一步证实	303
18-3-1 康普顿实验; 18-3-2 康普顿-吴有训效应的理论解释; 18-3-3 应用举例; * 18-3-4 康普顿-吴有训效应公式的定量推导; 18-3-5 结论	
18-4 光的波粒二象性和普朗克常量 h	308
18-4-1 人类对光在认识上的深化过程; 18-4-2 光的波粒二象性的定量关系和物理意义; 18-4-3 普朗克常量 h 的地位和作用	
18-5 氢原子光谱的规律性和玻尔的氢原子理论	311
18-5-1 氢原子光谱的实验规律; 18-5-2 氢原子的玻尔理论; 18-5-3 玻尔理论所得的结论; 18-5-4 玻尔理论的局限性	
18-6 实物粒子的波粒二象性和不确定关系	322

18-6-1 德布罗意假设和德布罗意波; 18-6-2 德布罗意波的实验验证; 18-6-3 德布罗意波的统计解释; 18-6-4 不确定关系	
18-7 波函数的统计解释、标准条件及叠加原理	328
18-7-1 波函数的一般形式; 18-7-2 波函数的统计解释; 18-7-3 波函数的概率特性及其数学表示; 18-7-4 波函数的标准化条件; 18-7-5 波函数描述量子态的叠加性	
18-8 薛定谔方程	334
18-8-1 薛定谔方程应满足的条件; 18-8-2 薛定谔方程的建立和基本类型	
18-9 定态薛定谔方程	337
18-9-1 定态薛定谔方程的特点; 18-9-2 特解 $\Psi_n(r,t) = \psi(r)e^{-\frac{E_n}{\hbar}t}$ 的意义;	
18-9-3 哈密顿能量算符的本征方程、本征值和本征函数	
18-10 一维无限深势阱	339
18-10-1 势阱模型的实用价值; 18-10-2 一维无限深势阱中自由粒子的波动方程及其解法; 18-10-3 解的物理意义; 18-10-4 定态波函数和含时薛定谔方程的一般解	
18-11 势垒穿透——量子隧道效应	344
18-11-1 量子散射与经典散射的定性比较; 18-11-2 解定态薛定谔方程的基本思路; 18-11-3 结论; 18-11-4 隧道效应的应用; 18-11-5 小结	
18-12 线性谐振子	350
18-12-1 经典谐振子的一些重要结论; 18-12-2 谐振子问题的重要性;	
18-12-3 线性谐振子问题量子力学处理的基本思路; 18-12-4 线性谐振子的量子力学结论的物理意义	
18-13 氢原子的量子力学描述	354
18-13-1 氢原子的定态薛定谔方程和求解的主要步骤; 18-13-2 解的物理意义;	
18-13-3 电子的自旋——第四个量子数; 18-13-4 氢原子的量子力学描述	
18-14 泡利不相容原理和化学元素周期表的微观解释	363
18-14-1 多电子原子系统的复杂性及其处理方法; 18-14-2 元素原子核外电子的壳层分布模型; 18-14-3 核外电子在填充壳层时应遵从两个基本原理;	
18-14-4 化学元素周期表的电子壳层排列及其物理解释	
习题	369
附录 I	383
附录 II 物理学发展简史大事纪(1)	387

第 11 章 变化电磁场的基本规律

1820 年,奥斯特通过实验发现了电流的磁效应,解决了电流可以产生磁场的问题.英国物理学家和化学家法拉第经过 10 年的反复实验和研究,于 1831 年发现了电磁感应现象,并总结出电磁感应定律.这两个伟大的发现,不仅揭示了电和磁的统一,还证明了它们之间可以相互转化,为电磁理论的发展和麦克斯韦电磁理论的形成奠定了坚实的基础.麦克斯韦电磁理论,不仅在理论上具有重大意义,而且是现代电工技术、电子技术、通信技术的基本理论基础,为人类进入电气化时代做出了重大贡献.

变化的电场和变化的磁场及其相互转化的基本规律是本章的核心内容.本章将介绍法拉第电磁感应定律和楞次定律;讨论动生电动势、感生电动势的产生及其应用;涡旋电流、自感应和互感应现象及其应用;磁场的能量;最后总结出电磁运动的基本规律——麦克斯韦方程组.

11-1 电 动 势

在讨论法拉第电磁感应定律之前,先讲述电源和电动势的有关问题.

11-1-1 电源

如图 11-1-1 所示的实验装置,金属板 A 带正电荷,金属板 B 带负电荷, A 板的电势比 B 板的电势高.当用导线和电阻 R 将 A 、 B 两板连接起来时,在静电力的作用下, A 板的正电荷向 B 板流动,结果形成了电流,同时对电阻做功.由于正、负电荷中和,使 U_{AB} 减小,最后 $U_{AB}=0$,使电荷定向运动停止,电流消失,对外做功也就停止.可见,电容器不可能形成恒定电流对外持续做功.

如果有一种外力能不断地分离正负电荷,并把正电荷从电容器的负极板,逆着电场方向移到正极板,使正极上的正电荷得以补充,从而保持两极板的电势差不变,这样导线内就有恒定的电流持续对外做功.由于静电场力只能将正电荷从高电势处送到低电势处,因此这种力不可能是静电场力.那么什么装置能做到这一点呢?那就是电源.

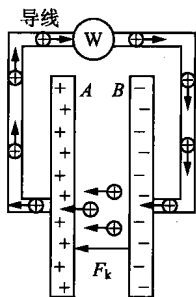


图 11-1-1

电源是一种提供非静电力做功的装置. 它能不断地将正电荷经电源的内部, 从低电势处移到高电势处, 在电路中形成恒定的电流. 实际的电源能将化学能、磁能、机械能、核能等转换成电能.

11-1-2 电动势

(1) 电动势是描述电源做功本领的物理量

为解决在均匀导体中维持稳恒电流做功, 需要在导体中维持稳恒的电场分布, 应保持导体两端有恒定不变的电势差, 实验证明用电容器放电不行, 而电源电动势能做到.

电动势就是非静电力做功. 用 F_k 表示电荷 $+q$ 在电源中所受的非静电力, 仿照静电场强用 E_k 表示非静电场强, 表示单位正电荷在电源内部所受的非静电力. 即

$$E_k = F_k/q \quad \text{或} \quad F_k = qE_k \quad (11-1-1)$$

在电源外部不存在 E_k , 也没有 F_k 对电荷 $+q$ 做功, 因而在含电源的闭合电路中, $+q$ 沿此闭合路环绕一周时电源所做的功, 正是非静电力 F_k 所做的功. 即

$$A = \oint_L qE_k \cdot dl = \int_-^+ qE_k \cdot dl \quad (11-1-2)$$

定义 单位正电荷绕闭合回路一周时非静电力所做的功为电源的电动势, 用 $\mathcal{E}$ 表示, 如图 11-1-2 所示. 由(11-1-1)式可得

$$\mathcal{E} = A/q = \oint_L F_k \cdot dl = \int_-^+ qE_k \cdot dl \quad (11-1-3)$$

电动势是定量描述电源非静电力做功本领的物理量.

对一般导体回路, 由于在电源外部, $E_k = 0$, 即

$$\mathcal{E} = \oint_L E_k \cdot dl = \int_{B(-)}^{A(+)} E_k \cdot dl \quad (11-1-4)$$

电动势又陈述为: 电源电动势等于非静电力使单位正电荷从电源负极沿电源内部到达正极所做的功.

把电源负极经电源内部指向正极的方向规定为电动势的正方向. 电动势是标量, 其单位与电势的单位相同.

(2) 电源电动势和电源两端的电势差的区别

一切用电器相对于电源来说, 可统称为负载, 常用 R 来表示, 如图 11-1-3 所示.

两者的区别在于: 电动势是反映非静电力做功本领的, 表征电源特征的物理量, 与电路工作状态无关. 而电源两端的电势差则是反映静电场力做功本领的. 由电路理论可得

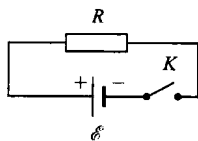


图 11-1-3

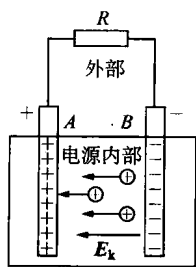


图 11-1-2

$$U_A - U_B = \mathcal{E} - Ir \quad (11-1-5)$$

式中 r 为电源的内阻, $U_A - U_B$ 为电源两端的电势差.

11-2 电磁感应定律

11-2-1 电磁感应现象

(1) 电磁感应现象的实验观察

如图 11-2-1(a)、(b)所示,将条形磁铁相对于固定线圈运动,发现磁铁插入或拔出的同时,电流计显示线圈内都有电流流过,两种情况电流方向相反. 将永久磁体代之以通电线圈(或电磁铁),如图(c),其余条件不变,重作上述实验效果一样.

若通电线圈不动,如图 11-2-2 所示,可用启开或关闭电键的瞬间使电路中的电流变化,在另外一个线圈中同样可以观测到感应电流.

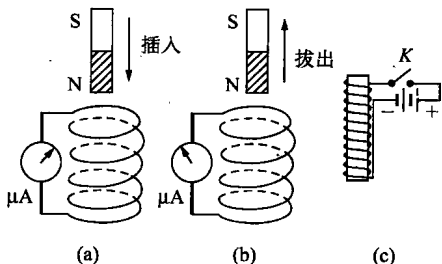


图 11-2-1

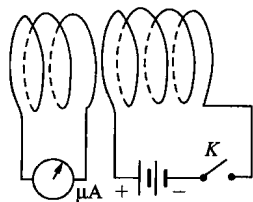


图 11-2-2

这类实验的共同点是:线圈围成的面积 S 保持不变, S 所在处的磁感应强度发生变化,使通过 S 的磁通量随时间变化,因而在导体闭合回路中产生感应电流.

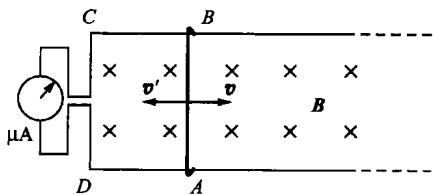


图 11-2-3

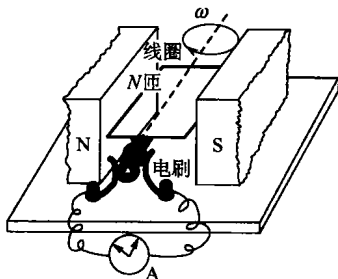


图 11-2-4

如图 11-2-3 所示的矩形回路 $ABCD$ 中,让回路平面与 B 垂直, AB 边可滑动,并始终与 CD 接触良好,在 CD 间接上一个 μA 电表,当 AB 以 v (或 v') 平行于 CD 运动时,可以观测到电流表指针偏转;当 AB 停止运动时电流表的指针又将回到零点. 又如图 11-2-4 所示,一金属线圈放在两个异性磁极间,以 ω 匀速转动,在

金属线圈的两极端处接以电刷引出接线连上电表,发现电表指针在平衡位置附近往复等周期的摆动。

后两种方法的特点是:磁感应强度 B 保持恒定,回路面积 S 或面积的法线方向与磁感应强度 B 之间的夹角 θ 发生变化,也使磁通量随时间变化,从而产生感应电流。

(2) 产生感应电流的条件

上述实验结果表明:只要穿过导体闭合回路的磁通量发生变化,在回路中就会产生感应电流。因此产生感应电流的两个必要条件:一是要有闭合回路存在;二是穿过回路围成的曲面 S 的磁通量要发生变化。既然回路中有感应电流,那么回路中一定存在电动势,称其为**感应电动势**。

值得注意的是:假若保持上述实验中其他条件不变,只改变导体闭合回路的电阻,感应电流也会发生改变,而回路中的感应电动势却不变。说明磁通量的变化的直接结果是产生感应电动势,而不是感应电流。与感应电流相比,感应电动势是更本质的因素。还可以考察非导体闭合回路或导体非闭合回路,实验发现,只要回路中的磁通量发生变化,就会产生感应电动势,但不会产生感应电流。用**感应电动势**描述电磁感应现象,比用感应电流来描述更具有普遍意义。

11-2-2 法拉第电磁感应定律

(1) 定律的陈述和数学表示

实验表明:回路中产生的感应电动势 $\mathcal{E}_i$ 与穿过回路的磁通量随时间的变化率的负值成正比,这就是法拉第电磁感应定律。在国际单位制中,其数学表达式为

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (11-2-1a)$$

这个结论是对只有 1 匝导线回路来说的,若回路由 N 匝导线串联构成,穿过各匝线圈的磁通量分别为 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$,这时法拉第电磁感应定律的数学表达式为

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_i &= - \left(\frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d\Phi_2}{dt} + \dots + \frac{d\Phi_n}{dt} \right) \\ &= - \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n) = - \frac{d\Psi}{dt} \end{aligned} \quad (11-2-1b)$$

其中, $\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n$ 称为磁通匝链数,或全磁通。如果每匝的磁通量相同,即 $\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_n$,也即 $\Psi = N\Phi$,则有

$$\mathcal{E}_i = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (11-2-1c)$$

法拉第电磁感应定律中的负号“ $-$ ”实质上是楞次定律的数学表达式,表明感应电流产生的磁通量(称副磁通)要反抗原磁通的变化。上式中的 $\mathcal{E}_i$ 既表示感应电动势

的大小又表示了方向,故又称为**电磁感应定律**。

(2) 楞次定律

现在来分析(11-2-1)式中负号的物理意义. 在回路上任意选一个转向作为回路的绕行正方向,再用右手螺旋定则确定此回路所围面积的正法线单位矢量 $\boldsymbol{n}$ 的方向,如图 11-2-5(a)所示. 凡穿过回路面积的 $\boldsymbol{B}$,方向与正法线方向相同者,其通过回路面积的磁通量为正,相反者为负。

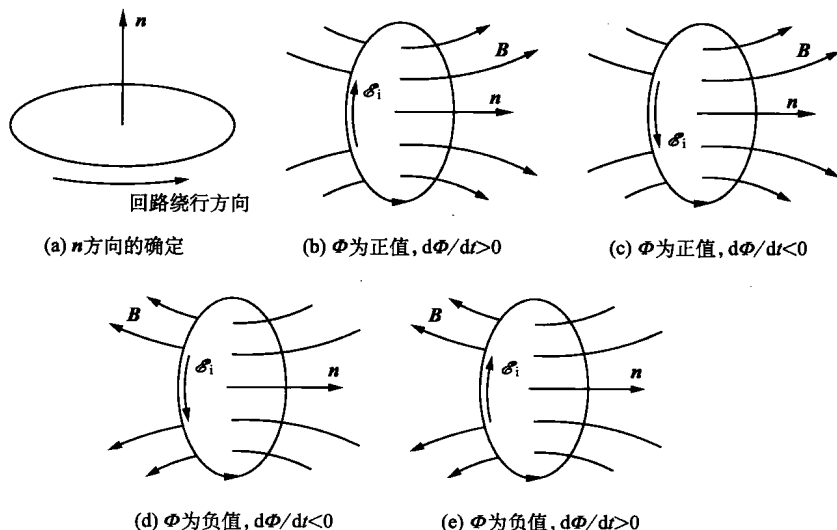


图 11-2-5

在图 11-2-5(b)、(d)中的 B 值在增大, (c)、(e)中的 B 值在减小, 这样对于图 (b)、(c), $\Phi > 0$. 其中图 (b) $\frac{d\Phi}{dt} > 0$, 则 $\varepsilon_i < 0$, 表示感应电动势的方向和回路正方向相反; 在图 (c) 中, $\frac{d\Phi}{dt} < 0$, 则 $\varepsilon_i > 0$, 表示 ε_i 与回路正方向相同. 对于图 (d)、(e), $\Phi < 0$, 可作同样的讨论。

就磁通量来说, 上述回路中变化的磁场引起的感应电流的作用是抵消或补偿引起感应电流的磁通量的增加或减少. 1833 年, 楞次通过大量实验, 总结出判别感应电流方向的法则, 称为楞次定律. 即: 闭合回路中, 感应电流的方向总是使得它自身所产生的磁通量反抗引起感应电流的磁通量的变化. 用这种方法确定感应电动势的方向和用法拉第电磁感应定律完全一致, 但在实际问题中用楞次定律来确定感应电动势的方向更为简便。

(3) 感应电流 I 和感应电量 Q

当回路中线圈的电阻为 R 时, 则流过回路的感应电流应为

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (11-2-2)$$

显然,当电磁感应过程由 t_1 到 t_2 经历了 Δt 时间,通量由 $N\Phi_1$ 到 $N\Phi_2$. 由 $I_i = \frac{dQ_i}{dt}$, 可得 $dQ_i = I_i dt = -\frac{N}{R} d\Phi$. 故

$$Q_i = \int_{t_1}^{t_2} I_i dt = -\frac{N}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi = -\frac{N}{R} (\Phi_2 - \Phi_1) = \frac{N}{R} |\Delta\Phi| \quad (11-2-3)$$

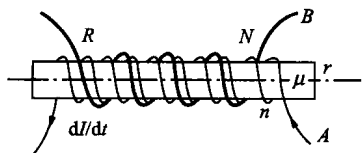
(4) 电磁感应定律符合能量守恒定律

如在图 11-2-3 中的矩形回路平面 ABCDA, 导线 AB 段可以平行于 DC 运动的实验中. 若选 ADCBA 为绕行正向, $\mathbf{n}$ 垂直纸面向内, 则 $\mathbf{B}$ 、 Φ 与 $\mathbf{n}$ 一致为正. 实验过程中: 当 AB 段导线保持以 v 的速度向右运动时, 要受到磁场力(安培力向左)的阻碍, 故只有外力克服这种阻碍做功时才能保持以 v 向右运动的实现. 这就是将其他形式的能量(如机械能等)转换为感应电流流过回路产生焦耳热放出; 由于导线在运动, 根据电磁感应基本定律, 回路中 $\Phi > 0$ 为正, $d\Phi/dt > 0$ 也为正, 与 $\mathbf{n}$ 一致, 要产生感应电流. 这个电流受的安培力要起阻碍导线运动的作用, 根据安培定律, $\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}$, 安培力的方向向左. 只有感应电流 I_i 从 A 流向 B 才可能. 即: 感应电动势 $\mathcal{E}_i$ 的 B 端的电势高于 A 端, 只有电流 I_i 与绕行方向相反时, 感应电流产生的磁通量才与 $\mathbf{n}$ 相反, 是反抗原磁通量增加的. 这正表明: 回路生热是感应电流提供的. 可见, 这个结论与法拉第电磁感应定律和楞次定律完全一致, 并说明电磁感应现象符合能量守恒定律.

法拉第电磁感应定律中的负号正反映了两者的一致性和内在联系. 假如感应电流产生的磁场不是反抗导线的运动. 那么, 只要最初给导线以微小的运动, 以后就会越来越快地运动下去. 这样我们就可以用做微小的功来获得无穷大的机械能, 这是与能量守恒定律相违背的, 显然是不可能实现的空想.

11-2-3 应用举例

例 11-2-1 如例 11-2-1 图所示, 一铁棒上套有两个长密绕线圈 A、B, 铁棒的半径为 r 、磁导率为 μ , 线圈 A 单位长度的匝数为 n , 线圈 B 的匝数为 N 、电阻为 R . 如果线圈 A 中的电流随时间的变化率为 dI/dt .



例 11-2-1 图

① 求线圈 B 中的感应电动势;

② 若测得线圈 B 中的感应电量为 q_i , 求穿过线圈 B 每匝的磁通量的变化值.

分析 当原线圈 A 中的电流变化时, 铁芯中的磁通量也变化, 在副线圈 B 中就会产生感应电动势.

解 ①线圈 A 的磁感应强度 B 为 $\mu n I$, 穿过线圈 B 每匝的磁通量为 $\Phi = B \cdot S = \mu n I \pi r^2$. 根据(11-2-1c)式, 线圈 B 中的感应电动势为

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = \mu n N \pi r^2 \frac{dI}{dt}$$

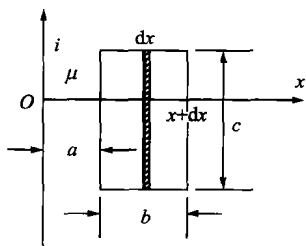
②根据(11-2-3)式, 感应电荷为 $q_i = \frac{N}{R}(\Phi_1 - \Phi_2)$, 故

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \frac{q_i R}{N} \quad \text{或} \quad \Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -\frac{q_i R}{N}$$

例 11-2-2 如例 11-2-2 图所示, 一长直导线通以交变电流 $i = I_0 \sin \omega t$, I_0 、 ω 均为常量. 在此导线外平行放置一矩形线圈, 长为 c , 宽为 b , 线圈一边与导线相距 a , 周围介质的磁导率为 μ . 求任一时刻线圈中的感应电动势.

分析 电流 i 随时间 t 变化, 因而通过线圈的磁通量也随时间变化, 故在线圈中产生感应电动势 $\mathcal{E}_i$.

解 建立坐标系, 如例 11-2-2 图所示. 在任一时刻, 距长直导线 x 处的磁感应强度为 $B = \frac{\mu i}{2\pi x}$. 根据磁场的对称性, 在线圈上 x 处,



例 11-2-2 图

取一个长条面元 $dS = c dx$, 通过 dS 的磁通量为

$$d\Phi = B dS \cos 0^\circ = \frac{\mu i}{2\pi x} c dx$$

t 时刻通过整个线圈的磁通量为

$$\Phi = \int_a^{a+b} \frac{\mu i}{2\pi x} c dx = \frac{\mu I_0 c}{2\pi} \sin \omega t \int_a^{a+b} \frac{dx}{x} = \frac{\mu I_0 c}{2\pi} \sin \omega t \left(\ln \frac{a+b}{a} \right)$$

根据法拉第电磁感应定律, 线圈中的感应电动势为

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu I_0 c \omega}{2\pi} \cos \omega t \left(\ln \frac{a+b}{a} \right)$$

感应电动势随时间按余弦变化.

思 考 题

11-2-1 非静电力和静电力、非静电场强和静电场强, 非静电力做功与静电力做功这几对概念有何异同? 其本质差别是什么?

11-2-2 电源电动势有几种定义法? 其实质是什么? 从本质上讲是否可以把感应电动势也称为电源电动势? 为什么?

11-2-3 法拉第电磁感应定律和楞次定律的基本内容是什么? 它们是如何统一起来的?