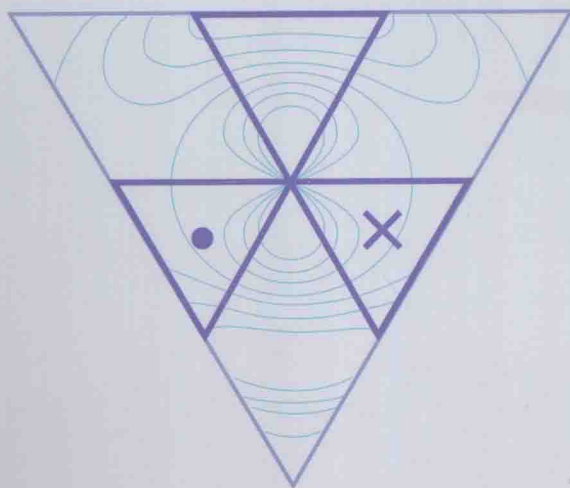


# 电磁理论、 计算、应用

盛新庆



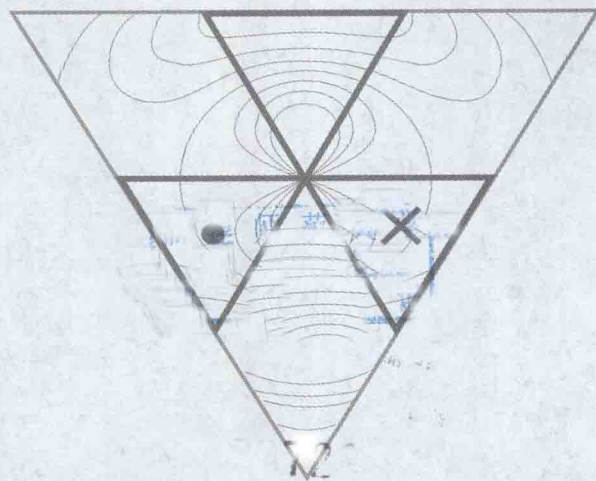
高等教育出版社

# 电磁理论、 计算、应用

Dianci lilun Jisuan Yingyong

盛新庆

新  
思



切  
問

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书以问题为中心,主要讲了4个问题,对应4章,分别为1,电磁波是如何发现的;2,电磁波是怎样传播与传输的;3,电磁波是如何发射的;4,电磁波是怎样散射的。本书横穿电磁波理论、微波技术、天线、计算电磁学、雷达等多门课程知识;纵贯本、硕、博三个阶段的电磁波理论课程知识,以把问题解得通透。本书不求知识点的完备,唯重讲得从容和通明。概念与公式之源慢慢引,概念与公式之用细细讲。在传授知识的同时,更重能力的培养与价值的塑造。

本书可供普通高等学校电子信息、通信工程、信息工程等专业作为电磁波课程的教材使用,也可供学者品鉴。

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁理论、计算、应用/盛新庆编著.--北京:  
高等教育出版社,2016.8

ISBN 978-7-04-045497-0

I. ①电… II. ①盛… III. ①电磁理论-高等学校-  
教材 IV. ①O441

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第102591号

策划编辑 王勇莉      责任编辑 杨 希      封面设计 张申申      版式设计 范晓红  
插图绘制 杜晓丹      责任校对 张小轱      责任印制 田 甜

---

出版发行	高等教育出版社	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址	北京市西城区德外大街4号		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码	100120	网上订购	<a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a>
印 刷	北京宏伟双华印刷有限公司		<a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>
开 本	787mm×1092mm 1/16		<a href="http://www.hepmall.cn">http://www.hepmall.cn</a>
印 张	21.5	版 次	2016年8月第1版
字 数	410千字	印 次	2016年8月第1次印刷
插 页	1	定 价	34.00元
购书热线	010-58581118		
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 45497-00

# 序

在人类文明史上,牛顿力学堪称是第一次工业革命的**科学基础**,而电磁理论则是第二次工业革命的**科学基础**。在当今信息时代,不论是百姓生活,还是社会运行,乃至国家安全,都一刻离不开基于电磁理论所发明的各种技术和制造的各种产品。在这些技术发明和产品研制过程中,电磁计算方法起着至关重要的作用。因此,电磁理论及其计算方法成为众多理工科专业和学科的必修课。

在目前国内外大学的教学计划中,既有电磁理论、微波技术方面的专业基础课程,也有天线技术、电磁计算等方面的专业课程,已形成了比较完整的知识传授体系。但绝大多数的课程注重知识传授,尚未充分体现对学生的能力培养和价值塑造。

2007年我担任北京理工大学校长后不久,便结识了本书作者盛新庆教授。他自2005年受聘教育部“长江学者奖励计划”特聘教授之后,就开始思考电磁理论与计算方法的教学改革。阅读他赠送的两部著作《电磁波述论》和《计算电磁学要论》之后,我能感受到他在撰写中不仅重视传授知识,而且试图探索对学生的能力培养和价值塑造。此后,我不时获悉他对人才培养和学术研究的真知灼见,深感他是一位勇担责任、深入思考的优秀青年学者。

2009年,北京理工大学在兵器、航天、信息等三个学科试点实施“本硕博贯通培养”工作,培养理论基础扎实、善于实践创新的研究工程师。经过几年探索之后,根据盛新庆教授的建议,学校决定实施“明精计划”,完善“本硕博贯通培养”工作。在“明精计划”框架下,学校邀请若干校内外著名学者研讨和设计了一批贯通课程和交叉课程,通过较大幅度的教学改革,探索知识传授、能力培养、价值塑造的有机统一。

今天,我非常高兴地看到盛新庆教授所负责的贯通课程教材《电磁理论、计算、应用》即将交付出版。该书是他基于多年从事电磁学计算研究和教学的心得而著。该书不仅传授知识,而且着力从电磁现象的发现到电磁理论的建立过程,挖掘学术传统、数学工具等所起的作用;不仅介绍方法,而且深入地剖析其隐含的学术思想。这些探索,无疑将有益于激发学生的科学精神,深化对能力的培养。

编著一部好教材,仅仅完成了人才培养改革的第一步。我期待着,盛新庆教授在今后的人才培养实践中,继续深化治学思想,不断推进教育改革,助力“明精计划”获得成功!

中国科学院院士  
北京理工大学校长



2015年9月

# 前言

价值塑造、能力培养、知识传授,“三位一体”的教育理念是当前很多高校全面深化改革中提出的目标。说易做难,如何从这一教育理念演化出具体的培养模式需要真诚、切实、漫长的探索。课堂授课是学校教育最切实的一个培养环节,而课堂授课总是围绕教材展开。因此,“三位一体”如何在授课教材中体现,是学校实现“三位一体”教育理念的一个关键。本教材是在这一教育理念下的探索产物。

内化于心的价值观念是创造力的源泉。这一点可以从电磁理论的建立,微波技术的发明中清楚地体现出来。因此,对理论建立、技术发明等产生过程的剖析,便是对学生价值观念的塑造过程。尝试讲述理论建立和技术发明背后的价值观念是本教材的一个特色。

人的能力总是在解决问题中体现出来。因此,本教材采用从解决问题的角度来阐述电磁知识及其应用,抛弃以往教材以知识为中心的传统。这是本教材的第二特色。这样做的优势:不仅在于有利于学生解决问题能力的培养,而且更为重要的是便于知识贯通,培养学生抓住学科核心,把握学科前沿的能力。万事有利必有弊。这样做的劣势在于:知识点不够全面和系统。为了弥补这一不足,需要精心挑选所要解决的问题,尽量使解决问题所需要的知识点涵盖这门课程的主要知识点。不过,在当今互联网日益发达的情况下,知识获取是相对容易的,知识的融汇通透更为难得可贵。

本教材第三个特色在于倡导用计算工具检验理论分析结果,用理论分析简化计算模型,使理论与计算相辅相成。通过典型电磁问题的数值求解,讲述了电磁计算中的矩量法、有限元法,时域有限差分法;通过布置课程设计,培养学生用计算解决问题的能力,体会理论与计算的相辅相成。

电磁波是现代信息社会的主要载体之一。本教材从解决现代信息系统中电磁波问题的角度,融合电磁场与微波技术学科中传统课程体系中的电磁场理论、高等电磁场理论、微波技术、天线、计算电磁学等多门课程知识,力所能及地将电磁波讲“通”、讲“透”。这种取材与现有电磁场理论课程教材有些不同。现有电磁场理论教材大致可分两类:一类以静电、静磁及应用为主,电磁波内容较少,教材名称只含“电磁场”,没有“电磁波”,一般适用于电机学院学生;另一类是将静

电、静磁内容减少,适当增加电磁波内容,教材名称中既有“电磁场”又有“电磁波”,这类教材一般适用于电子信息学院学生。但是,由于顾及知识的全面以及学时的有限,这两类教材在阐述电磁波方面都不够充分。

具体说来,本教材以电磁波为核心,从以下4个方面来阐述电磁波:①电磁波的发现;②电磁波的传播和传输;③电磁波的辐射;④电磁波的散射,它们分别构成本教材的4章。在第1章里,通过剖析电磁波的发现过程,不仅让学生掌握电磁波理论的整体结构,而且更为重要的是让学生感受到“场概念的重要,矢量分析的有力,麦克斯韦方程的坚实博大”,切实体会“从现象中提炼概念,利用数学工具建立逻辑体系学术传统”的价值。后续3章是现代任何一个无线通信或信息系统都要涉及的3个问题,解决这3个问题,不仅需要以往本科电磁场理论知识,研究生阶段高等电磁场知识,而且还需要微波技术、天线、计算电磁学等课程知识。即便如此,这3个问题也未必都能彻底解决,遗留的便是当今学术的前沿问题。本教材将融合多门课程的知识,由浅入深,展示解决这些问题的过程以及应用,领略从理论发展成技术,从技术到应用的演化方法与技巧,感知前沿学术问题。

本教材在章与章、节与节之间,都特别撰写了连接段落,以示它们相通之处;对于每一问题的解决务必彻底、通透,即便不能详细阐述,也尽量点明当今解决此类问题的程度。除此之外,本教材还在多处做了一些新的处理,值得特别指出。第1章采取了一种新的方式给出矢量恒等式,并给出了一些科研中有重要应用价值的矢量恒等式;给出了超材料本构关系的严格论证;第2章给出了隐身衣设计原理的详细论证;给出了一种从麦克斯韦方程出发推导传输线方程的方法,清晰展示了由理论演化成技术的过程,领略到电磁场理论与微波技术之间的演变;特别增加了一节讲述波导中激励问题与不连续性问题,以让学生更好理解波导中模式完备正交性定理的作用,波导模式的激发与转化机理,更深入理解电磁波在波导中传输的过程;第3章以电流源和磁流源在自由空间中的辐射公式为中心,论证了该公式与Stratton-Chu, Kirchhoff公式的关系,指出了现有著作中的一些论证错误,从多个侧面强调了该公式在电磁辐射和散射问题中的重要地位;第4章给出了角闪烁简明计算公式及其详细论证过程;总结了目标散射特性研究的一些最新成果;详细分析比较论证了单脉冲精导系统的测角精度优势。

本教材是北京理工大学“明精计划”资助的一门电子信息专业的核心贯通课程。意在横向上融合电磁理论、微波技术、天线、电磁计算课程内容,纵向上贯通本科初级电磁理论和研究生高级电磁理论课程内容。面向本硕博学生,共168个学时,分三个学期讲授。但是,实际上本教材还可供各学校进行电子信息专业教材改革试用。目前电磁理论教材,静态场内容偏多、偏老,电磁波讨论不够全面。然而,对于电子信息专业来说,接触电磁波更多,全面了解更加需要。因此,根据电子信息专业培养目标,改革现有电磁理论教材是迫切需要的。当

然,本教材内容过多,各高校可根据各自培养目标,进行裁剪讲授。譬如,对于将来非从事电磁场与微波技术学科相关领域研究的人来说,第4章电磁波散射的大部分内容可以略去,部分公式的论证过程可以略去,但也要慎而为之。电磁理论是博大、有力、美妙的。这些特点只有在论证的跋涉中才能充分领略,电磁理论才能被真正理解,除此别无他途。不要蜻蜓点水,将一门逻辑缜密的理论课变成一门科普性的知识罗列课。建议宁可少讲知识点,也要将核心内容讲深、讲透。没有论证,就没有理解。没有理解,怎能解决问题,更不可能创造!

在本书编著过程中,北京理工大学信息与电子学院宋巍副教授和郭琨毅副教授协助做了大量工作。在《电磁波述论》基础上,宋巍副教授依据我拟定的提纲,补充了前3章部分内容的初稿,而且协助设计和收集了前3章的例题和习题;郭琨毅副教授在我拟定的提纲下,草拟了第4章部分内容的初稿,而且补充了全书部分公式的详细证明,以及设计了第4章的部分习题。同时,研究生张晓杰帮助绘制了书中大部分图形。作者在此一并表示衷心的感谢。

承蒙高等教育出版社的编辑作了大量的审编工作,作者表示深切的谢意。

本书虽经多次修改,但疏漏和缺陷仍在所难免,恳请广大读者提出宝贵的批评和建议,编者邮箱 xsheng@bit.edu.cn。

盛新庆

2015年12月



# 目录

第 1 章 电磁波的发现	1
§ 1.1 物理背景	1
1.1.1 库仑定律发现以前	1
1.1.2 库仑定律发现以后	2
1.1.2.1 库仑定律	2
1.1.2.2 安培定律	3
1.1.2.3 法拉第定律	4
§ 1.2 数学背景	5
1.2.1 矢量定义	5
1.2.2 矢量运算	5
1.2.3 坐标系	7
1.2.3.1 一般曲线坐标系	7
1.2.3.2 圆柱坐标系	9
1.2.3.3 球坐标系	12
1.2.4 矢量算子	13
1.2.4.1 梯度算子	13
1.2.4.2 散度算子	17
1.2.4.3 旋度算子	19
1.2.4.4 拉普拉斯算子	23
1.2.4.5 算子在一般正交 坐标系中的表示 式	23
1.2.5 张量	24
1.2.5.1 张量的定义	24
1.2.5.2 张量的运算 法则	25
1.2.6 矢量恒等式	26
1.2.7 算子基本积分定理	27
1.2.7.1 高斯散度定理	27
1.2.7.2 斯托克斯定理	28
1.2.7.3 格林定理	29
§ 1.3 学术传统	30
§ 1.4 麦克斯韦方程的建立	33
1.4.1 场概念的提炼	33
1.4.2 物理规律的系统 化数学表述	34
1.4.3 本构关系	36
阅读与思考	37
1.A 一般介质的本构 关系	37
1.B 等离子体的本构 关系	39
1.C 超材料——金属线 介质的等效电磁参数	42
1.D 超材料——金属开口 谐振环介质的等效 电磁参数	45
§ 1.5 电磁波发现及验证	50
§ 1.6 电磁波问题的确定性 表述	52
1.6.1 两种介质交界面的 边界条件	52
1.6.1.1 磁场强度 $H$ 的边界 条件	52
1.6.1.2 电位移矢量 $D$ 的 边界条件	53
1.6.1.3 分界面边界条件 小结	54

1.6.2 导体分界面上的 边界条件 .....	54	的传播 .....	82
1.6.3 辐射边界条件 .....	54	2.1.1.1 平面波解 .....	82
§ 1.7 静电场再认识 .....	54	2.1.1.2 相速和群速 .....	83
1.7.1 静电边值问题 .....	54	2.1.1.3 波的极化 .....	86
1.7.2 电容和电感 .....	56	2.1.1.4 无耗介质中的电 磁波传播 .....	88
§ 1.8 麦克斯韦方程频域 形式 .....	58	2.1.1.5 有耗介质中的电 磁波传播 .....	88
§ 1.9 电磁波的性质 .....	60	2.1.1.6 各向异性介质中 的电磁波传播 .....	89
1.9.1 惟一性定理 .....	61	2.1.1.7 坡印廷定理 .....	93
1.9.2 等效原理 .....	63	2.1.2 层状介质中电磁波 的传播 .....	95
1.9.3 对偶原理 .....	65	阅读与思考 .....	102
1.9.4 互易原理 .....	66	2.A 坐标变换空间中的 麦克斯韦方程 .....	102
§ 1.10 电磁波传播的仿真 .....	67	§ 2.2 波导中的传输 .....	108
1.10.1 电磁波方程 .....	67	2.2.1 波导传输问题的 求解途径 .....	109
1.10.2 Yee 格式及蛙跳 机制 .....	68	2.2.2 矩形波导中电磁波 的传输特性 .....	111
1.10.3 电磁波方程的 离散 .....	69	2.2.3 波导正规模的 特性 .....	117
1.10.4 稳定性条件 .....	70	2.2.4 任意截面空波导电 磁波传输模式的有 限元分析 .....	119
1.10.5 激励源 .....	71	2.2.5 波导激励分析 .....	121
1.10.6 边界条件 .....	71	§ 2.3 微波传输线的分析 模型 .....	124
1.10.6.1 一阶 Mur 吸收 边界 .....	72	2.3.1 传输线分析模型 及其解 .....	124
1.10.6.2 棱边及角点的 处理 .....	73	2.3.1.1 传输线方程—— 场方法 .....	124
1.10.6.3 吸收边界的 精度 .....	73	2.3.1.2 传输线方程—— 路方法 .....	126
§ 1.11 电磁波的应用 .....	73	2.3.1.3 传输线方程 的解 .....	128
本章小结 .....	76		
练习题 .....	76		
思考题 .....	79		
课程设计(一) .....	80		
<b>第 2 章 电磁波的传播和传输</b> .....	81		
§ 2.1 电磁波传播 .....	81		
2.1.1 无限大均匀介质中			

2.3.2 传输线特征量及其变换式 .....	129	辐射 .....	164
2.3.2.1 电压和电流变换式 .....	129	3.1.1 自由空间中带源麦克斯韦方程的解 .....	164
2.3.2.2 反射系数变换式 .....	130	3.1.2 电流与磁流辐射场的其他数学表达形式 .....	168
2.3.2.3 输入阻抗变换式 .....	131	3.1.2.1 Stratton-Chu 公式 .....	168
2.3.2.4 驻波比 .....	133	3.1.2.2 基尔霍夫公式形式 .....	169
2.3.2.5 传输功率与传输效率 .....	134	阅读与思考 .....	171
2.3.3 均匀无耗传输线的工作状态 .....	135	3.A 电流与磁流辐射表达式的另类推导 .....	171
2.3.3.1 行波状态 .....	135	3.A.1 电流与磁流源辐射场的两种表达式的等效性证明 .....	171
2.3.3.2 纯驻波状态 .....	135	3.A.2 电流与磁流源辐射场的另类计算方法 .....	172
2.3.3.3 行驻波状态 .....	138	3.1.3 激励源辐射场的远场近似 .....	173
2.3.4 圆图 .....	140	3.1.4 辐射条件 .....	177
2.3.5 阻抗匹配 .....	144	§ 3.2 天线 .....	178
2.3.5.1 信号源与传输线的匹配 .....	145	3.2.1 赫兹偶极子 .....	180
2.3.5.2 负载与传输线的匹配 .....	145	3.2.1.1 近区场 .....	182
§ 2.4 微波网络的分析模型 .....	148	3.2.1.2 远区场 .....	183
2.4.1 不均匀性等效网络 .....	148	3.2.1.3 天线的重要参数 .....	186
2.4.2 微波网络参量 .....	148	3.2.2 线天线 .....	187
2.4.2.1 归一化参量 .....	148	3.2.2.1 传输线模型 .....	187
2.4.2.2 微波网络的电路参量 .....	149	3.2.2.2 积分方程模型 .....	192
2.4.2.3 微波网络的波参量 .....	150	3.2.2.3 积分方程的求解 .....	194
2.4.2.4 波导不连续性问题分析 .....	154	3.2.2.4 实际馈电系统的数学模型 .....	197
本章小结 .....	156	3.2.3 微带天线 .....	199
练习题 .....	157	3.2.3.1 微带天线的发展历程 .....	199
思考题 .....	160		
课程设计(二) .....	161		
第 3 章 电磁波的辐射 .....	163		
§ 3.1 激励源在自由空间中的			

3.2.3.2 腔模型理论 .....	200	§ 4.2 随机目标的散射 .....	255
阅读与思考 .....	204	4.2.1 随机面的几何 模型 .....	256
3.B 微带天线的全波 分析法 .....	204	4.2.2 光滑型随机面 的散射 .....	257
3.2.4 天线阵 .....	211	阅读与思考 .....	259
3.2.5 天线馈电 .....	215	4.B 光滑型随机表面散射 解析解的证明 .....	259
3.2.5.1 馈电系统要求 .....	215	4.2.3 微粗糙型随机面的 散射 .....	261
3.2.5.2 天线馈线系统 常用微波器件 .....	216	阅读与思考 .....	263
3.2.6 天线测量 .....	217	4.C 微粗糙度随机表面 散射解析解的证明 .....	263
3.2.6.1 概述 .....	217	4.2.4 蒙特卡洛(Monte Carlo)方法 .....	266
3.2.6.2 源天线与待测 天线之距离 .....	218	4.2.5 随机面散射和辐射 的关系 .....	267
3.2.6.3 天线测量环境 .....	219	§ 4.3 雷达 .....	267
3.2.6.4 天线测量典型 仪器设备 .....	220	4.3.1 目标特性 .....	268
本章小结 .....	221	4.3.1.1 雷达散射截面 .....	268
练习题 .....	221	4.3.1.2 角闪烁 .....	269
思考题 .....	223	4.3.1.3 散射中心 .....	272
课程设计(三) .....	225	4.3.2 雷达原理 .....	280
<b>第 4 章 电磁波的散射</b> .....	227	4.3.2.1 测距原理 .....	280
§ 4.1 确定性目标的散射 .....	227	4.3.2.2 测速原理 .....	281
4.1.1 规则目标的散射 .....	228	4.3.2.3 测角原理 .....	281
4.1.1.1 导体圆柱的 散射 .....	228	4.3.2.4 雷达成像原理 .....	282
4.1.1.2 导体圆柱的 绕射 .....	231	4.3.3 单脉冲雷达系统 .....	284
4.1.1.3 导体球的 散射 .....	233	4.3.3.1 单脉冲测角的 技术方案 .....	284
4.1.1.4 规则目标散射的 解析求解法 .....	239	4.3.3.2 单脉冲雷达系统各 部件功能实现 .....	287
阅读与思考 .....	243	4.3.3.3 系统测角误差 分析 .....	291
4.A 半平面导体散射 的解析解 .....	243	阅读与思考 .....	294
4.1.2 不规则形状目标 的散射 .....	251	4.D 扩展目标角闪烁的 计算公式推导 .....	294
4.1.3 目标散射机理 .....	253		

---

4.E 目标散射中心参数 的估计方法 .....	301	附录 C .....	310
本章小结 .....	303	附录 D .....	312
练习题 .....	303	附录 E .....	314
思考题 .....	304	附录 F .....	317
课程设计(四) .....	305	附录 G .....	320
附录 A .....	307	参考文献 .....	321
附录 B .....	309	索引 .....	323

# 第1章 电磁波的发现

## 这一章

将围绕“电磁波是如何发现的”这一核心问题而展开：

首先，介绍历史上通过观察和实验获得的电磁知识，尤其是电磁三大定律；

其次，介绍矢量分析，尤其是不同坐标系下矢量的相互转化、三个重要的矢量算子以及一系列重要矢量恒等式；

第三，通过介绍东、西方科学发展历史，比较东、西方学术传统，阐释电磁理论建立背后的源动力；

第四，通过分析电磁三大定律，提炼出更为本质的物理概念，再利用矢量分析工具，建立统领电磁规律的麦克斯韦方程；

第五，利用麦克斯韦方程，预言电磁波的存在及传播速度，进而预言光就是一种电磁波；

第六，通过利用计算机模拟电磁波传播过程，介绍计算电磁学中一种重要数值方法——时域有限差分法；

最后，利用麦克斯韦方程阐释电磁场和电磁波的性质。

电磁波的发现固然起于电磁现象的观察，但根本之处是凭借想象力。想象力植根于社会文化之中，取决于多种因素，诸如知识之积累，学术之传统，价值之取向。本章主旨便是勾勒出电磁波发现的数理背景及学术传统，展示矢量分析的力量和电磁理论的精深，计算机仿真的具体与形象，揭示电磁波的性质。

## § 1.1 物理背景

电磁知识是麦克斯韦(Maxwell, 1831—1879)构建电磁理论的基础。麦克斯韦之前，人类就已获得大量电磁知识。这些知识大致可分两类：一类主要是凭借对自然界直接观察获得，这主要发生在库仑定律发现以前；一类是凭借一定的哲学观念，通过有目的的实验获得，这主要发生在库仑定律发现以后。

### 1.1.1 库仑定律发现以前

在库仑定律发现以前，人类获知的电磁现象并不是很多，主要有各类静电、静磁现象、闪电、指南针、磁偏角等。下面将分别列出这些电磁现象在中西方被发现的年代，以示中西方在这一时期对电磁认识的具体进程。

中国在公元前后百年间发现了摩擦起电及静电吸引现象，然后便是各种可摩擦起电材料以及静电火花、爆裂声现象的不断发现和详尽记载，宋代学者沈括(1031—1095)对闪电熔化金属，而不熔木料的观察，明代学者方以智(1611—1671)在其《物理小识·卷二(风雨雷暘类)·野火塔光》中，据雷电击墙杆而出声的细致观察，推测天上闪电和静电火花同类。



这些大致便是电学知识在中国的发展。至于磁方面,认识得更早,有文字记载的是公元前3世纪《吕氏春秋·精通篇》:“慈石召铁,或引之也”。后有药物学家用磁石做各种药物实验,到唐代晚期之前已有称为“司南”的磁性指向器发现,宋代学者沈括名著《梦溪笔谈》有对指南针制作及磁偏角的阐述。

西方对电磁的认识比中国更早,可追溯到古希腊米利都的泰勒斯(Thales of Miletus,约公元前624—公元前546),他当时已知道摩擦的琥珀会吸引轻小物体,磁石可吸铁。但此后对电磁认识一直停留于此。直到12世纪,欧洲才用磁针指南,至少晚中国一百年。至于磁偏角的认识,在西方是由哥伦布在1492年航海中发现,晚中国四百余年。

综上所述,在库仑定律发现以前,中国对电磁现象的认识丝毫不弱于西方,实际上是略强于西方。这源于中国古代学者高品质的观察能力。然而也可以看出,仅靠简单直接地对自然的观察,是很难获得更丰富、更深入的电磁知识的。

### 1.1.2 库仑定律发现以后

自牛顿(Newton,1642—1727)提出力学三大定律及万有引力定律之后,通过有目的的实验建立定量物理规律已成为西方研究世界的锐利武器。可惜这一锐利武器未被中国学者重视和运用,因而也就未能在电磁领域继续有所创获。下面要讲述的便是西方利用这一锐利武器在电磁领域先后提出的库仑定律、安培定律以及法拉第定律。

#### 1.1.2.1 库仑定律

法国物理学家库仑(Coulomb,1736—1806)在1784—1785年间,设计了一个扭秤实验。扭秤的结构示于图1-1。在细金属丝下悬挂一根秤杆。它的一端有一小球A,另一端有平衡体P,在A旁还置有另一与它一样大小的固定小球B。为了研究带电体之间的作用力,先使A、B各带一定的电荷,这时秤杆会因A端受力而偏转。转动悬丝上端的旋钮,使小球回到原来位置。这时悬丝扭力矩等于施于小球A上电力的力矩。

库仑正是通过这一实验总结出下面库仑定律:在真空中,两个静止的点电荷 $q_1$ 、 $q_2$ 之间的相互作用力的大小和 $q_1$ 、 $q_2$ 的乘积成正比,和它们之间的距离 $r$ 的平方成反比;作用力的方向沿着它们的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。即

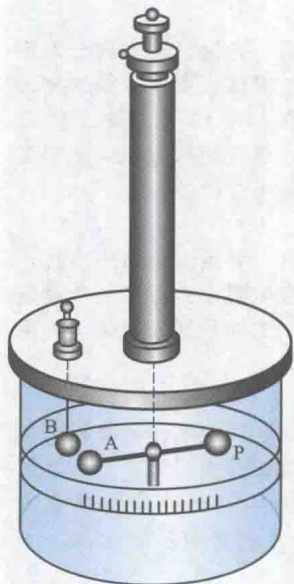


图1-1 库仑扭秤

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} e_{r_{12}} \quad (1.1.1)$$

式中  $q_1$  和  $q_2$  是两个静止点电荷的电荷量, 单位为 C(库仑)。 $F_{12}$  是  $q_1$  对  $q_2$  的作用力,  $e_{r_{12}}$  是从  $q_1$  指向  $q_2$  的单位距离矢量,  $\epsilon_0$  是真空介电常数, 精确实验可测定为  $\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 817\ 8 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ 。此定律与牛顿的万有引力定律的形式极其相似。

### 1.1.2.2 安培定律

在康德哲学的影响下, 丹麦学者奥斯特(Oersted, 1777—1851)深信电与磁之间存在着联系, 并一直设法找到这种联系。1820年4月, 奥斯特在讲授电、伽伐尼电、磁的课程时, 做了一个实验: 他使一个伽伐尼电池的电流通过一条细铂丝, 铂丝放在一个带玻璃罩的指南针上方, 结果发现, 在通电和断电的瞬间, 玻璃罩中的磁针被扰动了。尽管效应很弱, 但奥斯特觉得很寻常。事后, 奥斯特使用更大的电池做了许多同样的实验, 终于证实“电流的磁效应是围绕着电流, 呈圆形的”, 并于1820年7月的一篇题为《电冲击对磁针影响的实验》的四页论文中, 宣布了这一发现。

奥斯的发现立刻引起了许多学者的重视和更深入的研究, 其中最为著名的便是毕奥(Biot, 1774—1862)、萨伐尔(Savart, 1791—1841)和安培(Ampere, 1775—1836)。毕奥和萨伐尔通过对奥斯特实验的分析、改进得出定量结论: 载流导线对磁极的作用力与其间垂直距离成反比, 还发现了弯折载流导线对磁极作用力大小与折线夹角的关系。毕奥-萨伐尔的实验观测结论经法国数学家拉普拉斯(Laplace, 1749—1827)的数学提炼得出如下现代形式的毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律。即电流元  $I d\mathbf{l}$  在距离  $r$  处产生的磁感应强度(magnetic induction, 即磁通量密度)矢量  $\mathbf{B}$  为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{e}_r}{r^2} \quad (1.1.2)$$

其中  $\mu_0$  是磁导率, 其值为  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ,  $\mathbf{B}$  的单位为 T(特斯拉)。

安培在物理思想上走得更远: 认为磁的本质是电流, 一个磁体是由无数小电流环在有序排列下形成的。因此安培认为研究电流元之间的相互作用更为根本。通过四个杰出的示零实验, 安培得出了类似式(1.1.2)的公式。即在真空中, 电流元  $I_1 d\mathbf{l}_1$  对电流元  $I_2 d\mathbf{l}_2$  的作用力可表示为

$$d\mathbf{F}_{12} = I_2 d\mathbf{l}_2 \times d\mathbf{B} \quad (1.1.3)$$

其中  $d\mathbf{B}$  为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 d\mathbf{l}_1 \times \mathbf{e}_{r_{12}}}{r_{12}^2} \quad (1.1.4)$$

并且证实下述安培环路定律: 磁感应强度沿任何闭合环路  $L$  的线积分, 等于穿过这个环路所有电流的代数总和的  $\mu_0$  倍, 即



$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I \quad (1.1.5)$$

其中电流  $I$  的正负规定如下:当穿过回路  $L$  的电流方向与回路  $L$  的环绕方向服从右手螺旋法则时,  $I$  为正;反之,为负。

### 1.1.2.3 法拉第定律

奥斯特发现电能产生磁,那么磁能否产生电呢?众多学者对此问题进行了种种探索,但多年都未有突破。英国物理学家法拉第(Faraday, 1791—1867)经过十余年的不断努力,在经历无数失败之后,终于在1831年夏,在图1-2的实验中发现了寻找已久的电磁感应现象。

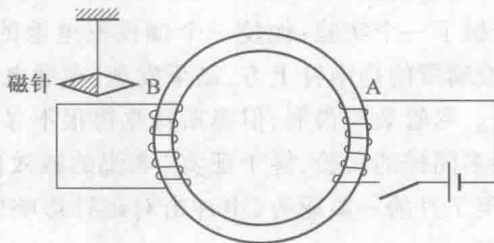


图 1-2 法拉第电磁感应实验

具体而言,在图1-2的实验中,法拉第发现:当把与电池、开关相连的线圈A的开关合上,使线圈A中的电流从零增大到某恒定值的瞬间,在闭合线圈B附近的磁针偏转、振动并且最终停在原来的位置上;当把线圈A的开关断开,其中的电流从恒定值减小为零的瞬间,在闭合线圈B附近的磁针反向偏转、振动并且最终停在原来的位置上。

法拉第领悟到电磁感应现象是一种在变化和运动过程中出现的非恒定的暂态效应。随后做了几十个产生感应电流的实验,并概括成五类:(1)变化着的电流;(2)变化着的磁场;(3)运动的恒定电流;(4)运动的磁铁;(5)在磁场中运动的导体。

法拉第同时代的德国物理学家纽曼(Neumann, 1798—1895)在1845年发表的论文中,首次给出了法拉第电磁感应定律的定量表达式

$$\varepsilon_{\text{EMF}} = - \frac{d\psi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.1.6)$$

这里  $\varepsilon_{\text{EMF}}$ <sup>①</sup> 是感应电动势,是一个表示产生电流能力大小的量,其准确定义在 § 1.4 麦克斯韦方程的建立中讲述。

①  $\varepsilon_{\text{EMF}}$  的下标 EMF 是 electromotive force 的简写,早期用来描述电池的电动势。在一块开路电池内,由化学能转化而来的电场  $\varepsilon_1$  与正、负电极上累积电荷产生的电场  $\mathbf{E}$  相互抵消,而  $\mathbf{E}_1$  从负电极到正电极的路线积分定义为  $\varepsilon_{\text{EMF}}$ :  $\varepsilon_{\text{EMF}} = \int_2^1 \mathbf{E}_1 \cdot d\mathbf{l} = - \int_2^1 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ 。因为  $\int_1^2 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \int_2^1 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ , 所以,  $\varepsilon_{\text{EMF}} = \int_1^2 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = U_{12} = U_1 - U_2$ , 因而  $\varepsilon_{\text{EMF}}$  是一个电路能够产生电流的势能源,也被看做是电源的电压升。