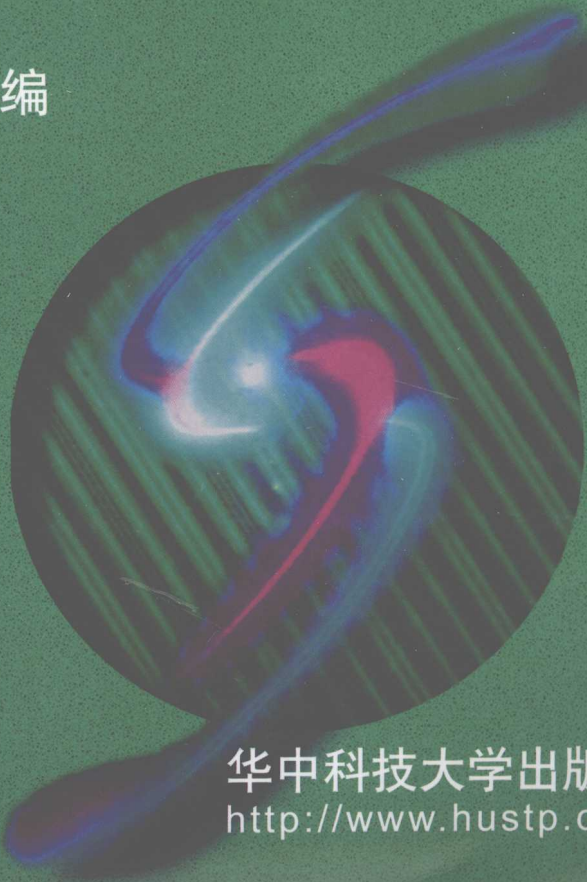




国家工科教学基地
21世纪电工电子系列教材

电磁场

叶齐政 孙 敏 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

0441.4/110

2008

电 磁 场

叶齐政	孙 敏	主 编
陈德智	颜秋容	参 编
夏胜国	江中和	

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

电磁场/叶齐政 孙 敏 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2008 年1 月
ISBN 978-7-5609-4307-7

I. 电… II. 叶… III. 电磁场-高等学校-教材 IV. O441.4

中国版本图书馆CIP 数据核字(2007)第175468 号

电磁场

叶齐政 孙 敏 主编

策划编辑:李 德

责任编辑:谢佩玲

责任校对:刘 竣

封面设计:潘 群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787mm×960mm 1/16

印张:17.5

字数:349 000

版次:2008 年1 月第1 版

印次:2008 年1 月第1 次印刷

定价:26.80 元

ISBN 978-7-5609-4307-7/O · 428

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

序

“电磁场”是电类专业的一门重要基础课,又称为“电磁场理论”、“工程电磁场基础”,近来出于学科整合的需要也称为“电磁场与波”。但无论叫法如何变化,其核心目的是面向工科学生,提高他们的理论素养和培养他们扎实的解决工程电磁场问题的基本能力。

孙敏、孙亲锡和叶齐政于2001年编著的《工程电磁场基础》在华中科技大学等院校已经使用了6年。本书是在该书的基础上,结合近年的教学实践,重新编写而成,主要对原书的教学体系和部分内容进行了调整,强调理论建构的内在联系,电磁场理论在工程实践中建模的方法。具体修改内容如下。

(1)增补了第一章绪论,删减了原书第二章以时变场麦克斯韦方程为起点的教学内容。在绪论中以整体的观点介绍电磁场理论的体系,希望学生从一开始就对大学物理的相关学习内容有一个复习性的、全貌的和更高的认识,但不过早进入时变场的实质性学习。该章的教学可以单独进行,也可以结合后续各章进行而不影响从静电场到恒定磁场,再到时变场的比较可行的教学体系。该章的学习将有助于提高学生的理论素养。

(2)在静态场的边值问题这一章,删减了部分教学内容,如复变函数法、模拟电荷法、有限元法等;保留了分离变量法和有限差分法这两个基本方法,将重点放在边值问题的建模上,强调对工程电磁场问题分析能力的培养。

(3)单列了一章准静态场。该章的学习有助于培养学生在实际工程应用中,将一些特殊的也是常见的时变电磁场问题,简化为准静态场问题的能力,实际上也是一种物理建模能力。

(4)部分烦琐的推导略去,深入的讨论作为注解,以满足不同的需求。

本书由叶齐政、孙敏主编。第一、七、八和九章由叶齐政编写,第二、五章由颜秋容编写,第三章由夏胜国、江中和编写,第四、六章由陈德智编写。孙敏提出了编写意见。第四、六章承蒙盛剑霓教授、周克定教授、詹琼华教授和马志云教授等批评指正,作者对此深表感谢,但若有不当之处,由作者本人负责。在编写过程中,承蒙教研室孙亲锡等老教师的关心和支持,在此谨致谢意。

因学识和经验有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请同行和读者指正。

编 者

2007年7月于华中科技大学

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 前言	(1)
1.2 电磁场理论的模型、方法和体系	(2)
第二章 矢量分析与场论基础	(11)
2.1 标量场和矢量场	(11)
2.2 三种正交坐标系	(12)
2.3 矢量代数	(14)
2.4 标量场的梯度	(15)
2.5 矢量场的散度	(17)
2.6 矢量场的旋度	(23)
2.7 亥姆霍兹定理	(27)
习题	(28)
第三章 静电场	(30)
3.1 电场强度	(30)
3.2 高斯定理	(36)
3.3 静电场基本方程	(42)
3.4 泊松方程和拉普拉斯方程	(45)
3.5 唯一性定理	(52)
3.6 镜像法	(55)
3.7 电容和部分电容	(70)
3.8 电场能量	(78)
3.9 电场力	(82)
习题	(87)
第四章 恒定电场	(96)
4.1 恒定电场的电流和电源	(96)
4.2 恒定电场的基本方程	(101)
4.3 导电媒质中的恒定电场与静电场的比拟	(105)

4.4 电导与电阻	(107)
习题	(114)
第五章 恒定磁场	(117)
5.1 恒定磁场的基本方程	(117)
5.2 矢量磁位	(128)
5.3 标量磁位	(137)
5.4 镜像法	(141)
5.5 电感	(143)
5.6 磁场能量和磁场力	(148)
习题	(154)
第六章 静态场的边值问题	(160)
6.1 静态电磁场的数学模型	(160)
6.2 求解边值问题的方法概述	(170)
6.3 分离变量法	(172)
6.4 有限差分法	(182)
习题	(188)
第七章 时变电磁场	(191)
7.1 麦克斯韦方程组	(191)
7.2 分界面上的边界条件	(198)
7.3 波动方程组	(200)
7.4 位函数表示的电磁场方程	(203)
7.5 电磁场能量守恒定律(坡印亭定律)	(207)
7.6 定解条件与唯一性定理	(211)
习题	(212)
第八章 准静态场	(214)
8.1 准静态场方程	(214)
8.2 准静态场近似的条件	(220)
8.3 集总参数电路近似	(225)
8.4 集肤效应和交流阻抗	(229)
8.5 传输线的横向似静场	(232)
8.6 三相输电线的电场计算	(235)
习题	(237)

第九章 电磁波的传播.....	(240)
9.1 辐射	(240)
9.2 均匀平面电磁波	(248)
9.3 电磁辐射干扰与电磁屏蔽	(255)
习题.....	(259)
附录.....	(260)
附录 A 主要矢量运算式及微分算子运算式	(260)
附录 B 电磁学的量和单位	(262)
部分习题答案.....	(264)
参考文献.....	(271)

第一章 绪 论

1.1 前 言

电气科学与工程领域的核心问题是电磁场与物质的相互作用问题,无论是电能传输、转换以及各种电磁现象,都离不开电磁场理论对它们的分析计算。作为电气科学与工程的两大学科基础理论——电磁场理论与电路理论之一的电磁场理论,也一直是电类专业的重要技术基础课。实际上,电路理论也是研究电磁系统的理论,不过是用积分量描述特定模型(如准静态模型)的理论,而且“场”是“路”的基础,因此掌握好电磁场理论对深入理解和探索各种电磁现象,正确分析和认识各种电磁过程具有重要意义。

电磁场理论是经典理论的一个典范,一方面,理论本身已经发展到非常成熟的阶段,主要是作为电气工程定量分析的基础,分析和计算工程实际中的电磁问题,如电机电磁场、高压传输线电磁场、电磁干扰等。因此,将一个实际问题“转化”或“简化”为一个物理模型,进而利用数学方程进行经济、快速、有效地计算(解析、近似解析或数值求解)是“电磁场”这门课的重要教学内容。另一方面,随着高新技术的发展,该学科的主题也不仅仅局限于电力系统、微波、光学的基础内容,还逐渐增加了生物电磁学、半导体装置设计、微制造加工、机器人、磁记忆系统、新材料等内容。同时,各种超微对象、超快或超强过程、非线性现象也对电磁场理论的分析 and 计算方法提出了新的挑战。分析和探索这些来源于工程实际和交叉学科中的新电磁现象的变化规律(抑或是新的电磁变化规律),已成为电磁场理论和应用的一个重要创新源头。因此,电磁场理论本身也有发展的要求,反映在教学上,就要求大家掌握电磁场理论是如何建立基本模型、基本概念和基本规律的,使大家能够在更高的层次上发展电磁场理论和应用,进而推进电气科学与工程进步。

基于计算、分析和探索新规律的需要,电磁场和大学物理中的电磁学比较起来也就有很大不同。电磁场的理论性更强,从数学的角度来说,它以微分形式为主,需要更多的数学知识;从物理的角度来说,它以更本质、更一般的规律为基础,需要更多的抽象思维的能力;从联系实际的角度来说,它有更多的工程问题需要学习和研究。

下面以大学物理中的电磁学为出发点,简单描述本课程将要介绍的电磁场理论体系,以期大家对整门课程的内容有一个基本的了解,在学习过程中能够更多地关注一些核心问题(如物理模型的建立、近似方法的应用等)和事物之间的有机联系(如体系的来龙去脉、近似取舍的根据等)。

1.2 电磁场理论的模型、方法和体系

1.2.1 基本模型

首先讨论两个最基本的模型,电荷和电流。通常认为,电荷是物质的一种基本属性,用以描述物体是否因带电而产生相互作用,但在这里,将其理解为是一个模型要更恰当一些,例如,点电荷、线电荷、面电荷用来描述观察到的真实带电体(也包括电中性体)。同样,可以有线电流、面电流、体电流的模型,它们也是用来描述观察到的真实载流体。因此,电磁场理论的基本工作就包括如何将一个实际带电体用一个合适的点、线、面、体及其叠加模型来描述和计算。图 1.1 所示为几种电磁实体的建模过程。图 1.1(a) 所示为几个不同的带电体,如果讨论的电场区域离它们较远,则可以近似成点电荷模型 q ,然后利用点电荷场强计算公式计算;如果距离它们较近,则可以将它们剖分成很多个小体积元,然后对每个小体积元采用点电荷计算场强的公式计算场强,最后将所有体积元电荷建立的场强叠加。图 1.1(b) 所示为一个导体通有高频电流 J ,由于趋肤效应,电流基本集中在上表面附近,此时可以采用面电流模型 K 。

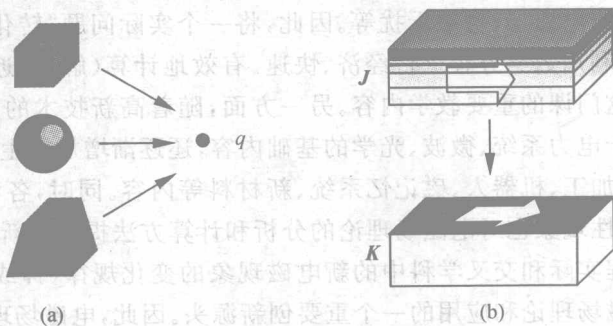


图 1.1 电磁实体的建模过程

(a) 不同的带电体演变成点电荷模型; (b) 趋肤体电流演变成面电流模型

在静态场中,电荷建立电场,电流建立磁场,而电流实际上就是运动的电荷。因此,即使在静态场中,电场和磁场本质上也是有关系的,因为运动是相对的。另一方面,电磁装置近似后的基本参数“电阻”反映的是能量的耗散,“电容”反映的是带电体电场之间的相互作用,而“电感”反映的是载流体磁场之间的相互作用,因此电导率、介电常数和磁导率是三个基本的物理量。电场和磁场既然是相互联系的,就可以推论出电阻、电容和电感也是有关系的,它们本质上反映的是电磁装置的结构和性能。

电磁场存在于真空和实物中,它与物质的相互作用可以通过两个理想模型——电偶极子和磁偶极子来体现。两个同量异号电荷组成的一个系统,如果不关心它们附近的

电场,就可以用一个电偶极子模型代替这样的系统;一个环电流组成的载流体,如果不关心它附近的磁场,也可以用一个磁偶极子模型代替这样的系统。对“电子极化”类型的一个原子,电子绕原子核运动,在电场作用下电子云的中心相对原子核发生偏移,它可以看做是一对正负电荷形成的电偶极子;电子绕核的轨道运动也可以看做是一个小电流环(原子核相对电子来说不动)形成的磁偶极子,在磁场作用下会发生偏转。图 1.2 所示为这种经典认识的模型化过程。对电场中的介质来说,很多个电偶极子在外电场作用下的统计表现就反映了介质宏观的介电特性;对磁场中的媒质(介质)来说,很多个磁偶极子在外磁场中的统计表现就反映了媒质宏观的磁化特性。既然电场和磁场本身是有关系的,那么,有时候将这样的原子看做是电偶极子,有时候又看做是磁偶极子就不难理解了(虽然在涉及物质的具体特性时会有不同)。但是,如果深入到材料内部分子附近,上述模型就有很大的问题了,原子是否还能用一个偶极子代表?其余偶极子对它是否有干扰作用?这种相互之间强耦合的系统也是目前的一个研究热点。更进一步,原子的模型还是应该采用量子力学的方法来建立。一般来说,一种物质的极化和磁化(也包括传导)特性是同时存在的,但不同的物质有很大的差别,即使是同一种物质在不同条件下也可能会体现不同的特性。

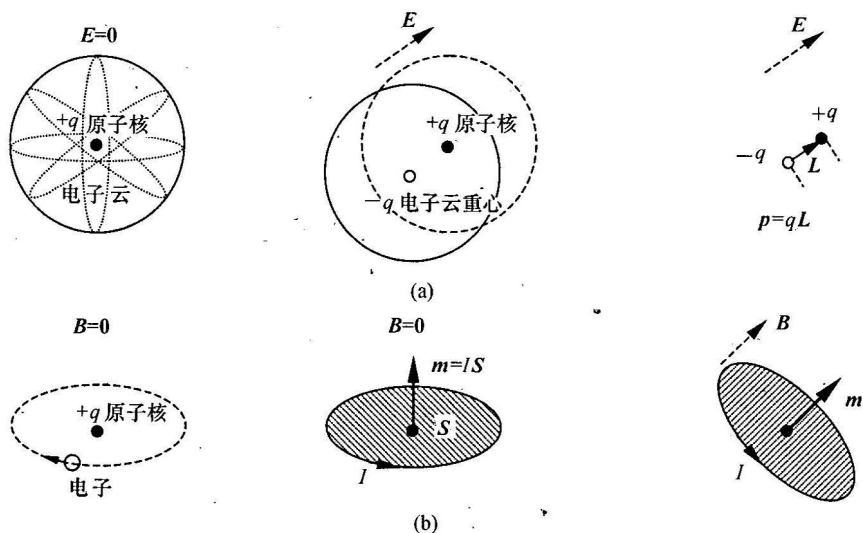


图 1.2 场中原子的经典模型

(a) 电子位移极化——电偶极子模型; (b) 电子轨道磁化——磁偶极子模型

总之,从电荷、电流,电偶极子、磁偶极子这些基本模型的建立过程中,可以看到一种抓住物理本质,大胆近似的思想和方法。由此出发,可以认识电磁场与物质相互作用的基本概念(电场强度、电位移矢量,磁感应强度、磁场强度),进一步认识描述电磁现象的基本规律,同时也可以认识描述电磁装置的基本参数——电容、电感和电阻。

1.2.2 静态场的理论体系

电荷建立的静电场、电流建立的恒定磁场的理论体系,如图 1.3 和图 1.4 所示。它由实验定律、定义模型和数学理论组成^①,下面分述其意义。

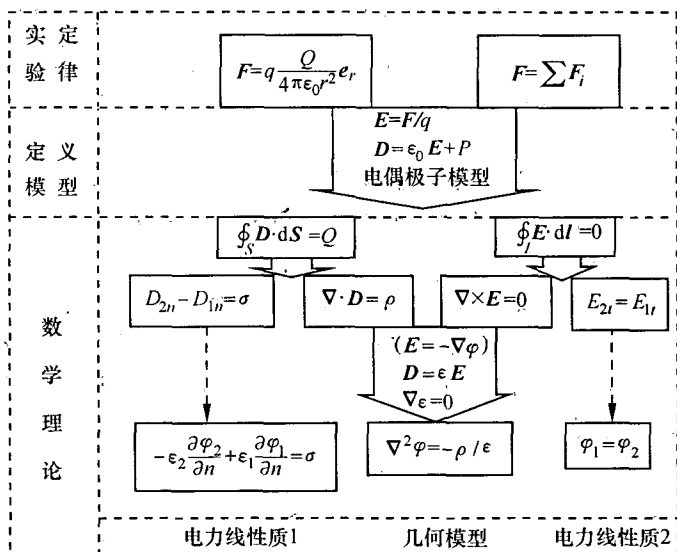


图 1.3 静电场理论逻辑关系图

1. 实验决定一切

由于受力是人们最初感受和观察的现象,因此,将理论体系建立在库仑定律 $F = q \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r$ 和安培力定律 $\mathbf{F} = \oint_{l_1} I_1 d\mathbf{l}_1 \times \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_2} \frac{I_2 d\mathbf{l}_2 \times \mathbf{e}_r}{r^2}$ (q 是试探电荷, Q 是源电荷; I_1 是试探电流, I_2 是源电流) 的基础上,并认为库仑定律和安培力定律是两个关于力的实验定律。所谓实验定律是指它来源于实践,实践决定理论体系也是符合唯物主义世界观的。不同的出发点可以有不同的基础,例如,从理论建立的顺序来看,毕奥-沙伐定律也可以作为基础。

另外,在实验定律中也引入力的叠加原理 $\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i$ 。首先,力的叠加原理不可能从其他定律中推出,它是来源于实践并被证明是正确的原理,所以将其归属于实验定律。其次,叠加原理是集团电荷(连续或非连续分布电荷)作用力的基础,引入数学处理方法,也可以得到线分布、面分布、体分布电荷和电流的物理模型。因此也认为它是整个理论体系的一个基础。

^① 在本书中,将本体系中的来源于实验、第一性、公理性质的电磁场规律称为定律,而将由定律推导出的规律称为定理。

关于力的实验定律和叠加原理相配合,原则上可以解决静态场的所有问题。

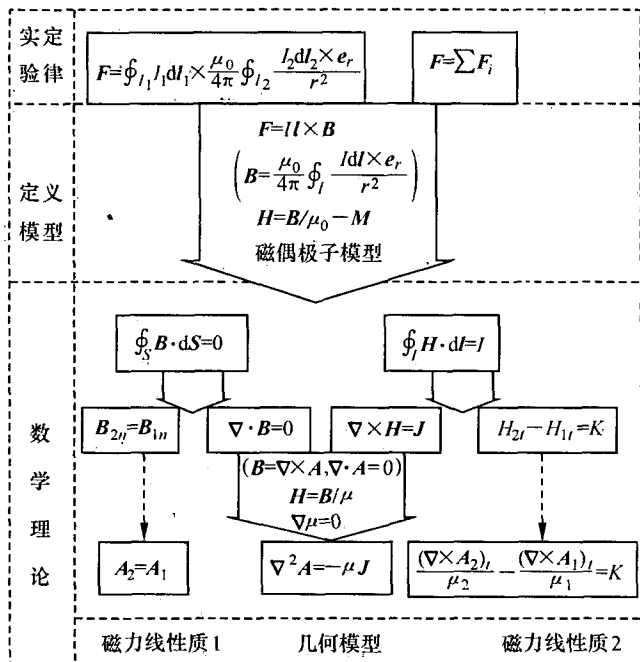


图 1.4 恒定磁场理论逻辑关系图

2. 定义和模型

任何理论都离不开对概念的定义,没有定义就没有描述,就没有定量,电磁场基本规律将只能用现象学的语言描述。提炼实验现象中具有实质意义的关系(如力与电荷的关系),并赋予这些关系一定的物理意义(如电场强度或电场力),是构造一切理论的基础。应该明确的是:定义形式上是给一个量赋予物理意义,实质上是对一个关系(如 $E = F/q$) 进行描述,也就是说定义是交互的,且这种关系往往就是定理本身(力与电荷量成正比),所以对概念的定义绝不会比对作为它们依据的物理定理的认识更完善。一方面,我们已经习惯于认为物理定理(也就是量与量之间的关系)就是“真理”,如果一旦被发现,就是不能被违背的,然而物理定理和定义是相互联系的,当定义要扩大和改变时,物理定理也必须修正。例如,将电场力 F 扩展到电磁力,则物理定理要修正为 $F = qE + qv \times B$;在静电场中,定义电位 $\varphi = \int_P^\infty E \cdot dl$,它实际指的物理定理是 $\oint_l E \cdot dl = 0$,在时变场中,该物理定理不成立,对电位的这种定义本身也就不成立。另一方面,虽然量与量之间的关系(定理)是客观的,但定义的选择仍然具有一定的随意性(如本书将讲到的库仑规范和洛伦兹规范),这种随意性直接影响了后继理论的繁易与本身的意义,因此选择合适的对象和本质关系进行定义对建立一个完善的理论也是非常重要的。

任何理论对客观世界的描述都离不开模型,构造模型是联系客观世界与理想世界的桥梁。模型的好坏直接决定了构造的理论在多大程度与客观世界相符合。例如,点电荷是一种最基本的模型,点电荷的模型在什么程度上能够代表一个带电体,理论计算出的电场就能在什么程度上反映实际电场。电偶极子和磁偶极子也分别是描述在电场和磁场下物质特性的两种基本模型,这里不再讨论真空下的电场和磁场,而是将这两种模型的一般关系作为基础。另外还有一类模型比较特殊,即理想模型。例如,理想导体(完纯导体)描述的是电导率为无穷大的媒质,它实际上是对良导体的一种近似表示;理想介质描述的是电导率为零的媒质(介质),它实际上是对绝缘材料的一种近似表示。

定义和模型是构造理论的关键,它们的提出不是孤立的臆测,需要仔细衡量各种可能的解释,同时加以缜密的分析,最后还需要实践支持。磁荷模型也是描述媒质的一种理想模型,虽然理论上它似乎可以带来更多想要的东西,对称性等(见时变场部分的讨论),但由于目前仍没有发现磁单极子,因此无法得到广泛认同。

定义和模型构筑了基本概念,把定义和基本模型结合起来,就容易深刻理解基本概念,而不会错误地应用。例如,电位移矢量的一般表达式 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ 是建立在电偶极子模型基础上的定义,凡是可以用电偶极子模型描述的材料(一般情况下都满足)和讨论的宏观特性,该定义都成立,且因为极化强度 $\mathbf{P}$ 是电偶极矩的宏观统计量,因此电位移矢量是宏观量,在微观上没有意义,值得注意的是电场强度 $\mathbf{E}$ 在微观上却是可用的;如果采用 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ 的定义(或本构方程),则是建立在线性、各向同性的理想模型基础上的,它比前面的一般定义适用的范围更小,由此导致泊松方程 $\nabla^2 \varphi = -\rho_t/\epsilon$ 适用的范围也更小。另外,这里的介电常数 ϵ 也是一个宏观量。同样的道理也适用于磁场强度 $\mathbf{H}$ 。需要着重指出的是高斯定理和环路定理并不要求线性、各向同性,也就是说它们比要求此项近似的泊松方程处理问题的范围更广一些。

3. 反比平方关系和线性的原则

首先,库仑定律和安培力定律都满足反比平方关系(与万有引力定律类似),这是整个理论体系的关键,也是后续数学理论的一个基础,任何对反比平方的偏离都会颠覆整个理论体系。

其次, $F \propto q$, $\mathbf{F} \propto \oint_{l_1} \mathbf{I}_1 d\mathbf{l}_1$ 。正比即是线性的关系,这种关系既是对实际的一种表示,也符合构造理论的唯一追求——简洁。叠加原理则是线性原则在空间的体现,这两者保持了内在一致性。另外一个涉及线性的地方是物质的线性,如 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu$, 这是一种在电偶极子和磁偶极子模型的基础上更进一步理想化的处理方法或者说是近似处理方法(零阶可以认为是常量,一阶可以认为是线性),虽然适用的物质非常有限,但它有助于建立简单明了的理论体系。需要注意的是电介质和磁介质之间有一个重要的区别,大多数电介质基本满足这一线性关系,而大部分磁介质(如铁磁材料)不但是高度非线性的,而且它们的性质还与其过去的历史有关。

大部分经典理论的特点是,尽可能使用线性的框架来处理任何事物,然而令人遗憾的是,当线性化失效以后,就充满了数学和概念上的困难,而有些实验中则可能出现与理论计算相差几个数量级的差异,对此,必须有清楚的认识。解决这些问题的途径已经超出了本课程的范围,但应该指出它们仍然需要经典理论的知识积累。

4. 数学与理论

在逻辑图中,将一些定理归属于数学理论,一方面是因为它们本身是可以通过数学公式互相推导的,当然有时要引入一些简化和近似的方法,如线性、各向同性的物质特性;另一方面也是因为在力场、流场等其他学科中也会出现。用数学工具精确地描述理论是学科发展的要求,也是一门学科成熟的标志,只有量化的数学描述才能经得起实践检验。数学理论的另外一个作用是其简洁性。所谓的电磁场理论实际上是利用合适的定义和模型、合适的数学工具,定量和简洁地反映及预测实验现象。

(1) 关于积分方程和微分方程。在大学物理中学到的定理基本上是积分形式的,例如,电场的高斯定理 $\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q$,“环路定理” $\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$;磁场的“高斯定理” $\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$,安培环路定理 $\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I$ 。它们只能处理一些场具有高度对称性的简单问题,或者说积分量大部分是直接可以拿到积分号外,积分比较容易的问题。例如,常常利用电场的高斯定理计算球、柱、线等带电体的电场,电场强度或电位移矢量由于对称性的特定分布,在对称的积分面上是常量,可以提到积分号外,只需进行简单的面积分即可。需要指出的是此时环路定理 $\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ 也隐含着在起作用(确定对称性场的特定分布时需要用到电力线不构成闭合曲线的特性),高斯定理和环路定理必须同时得到满足,才有定解,磁场也是一样的。在本课程中,应用微分形式也是一个重要的教学内容,如 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$, $\nabla \times \mathbf{E} = 0$; $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ 。这是因为它对处理复杂问题具有较好的实用性,有很多数值计算的方法也是以微分方程为基础的。应该强调的是积分方程处理的是宏观量,微分方程处理的也是宏观量,而不是微观量。在逻辑关系图中,还可以看到微分方程是从积分方程中推导出来的,而且还发现从积分方程可以推出分界面上的边界条件,这从原则上说明积分方程比微分方程适用的范围要广,微分方程只适合媒质物理性质不发生突变的区域,它必须结合边界条件才能与积分方程等价。也就是说积分方程可以确定特解;而微分方程只决定通解,需要借助边界条件确定特解。分界面上的边界条件实际上是分界面上的场方程,通过它将物理边界条件转化为待求场域的定解条件。

(2) 关于散度和旋度。从积分形式看,静电场和恒定磁场都有高斯定理和环路定理,它们的微分方程形式中就具有散度 $\nabla \cdot \mathbf{D}$ 、 $\nabla \cdot \mathbf{B}$ 和旋度 $\nabla \times \mathbf{E}$ 、 $\nabla \times \mathbf{H}$ 。从数学角度来说,要想确定一个矢量,就必须知道它的散度、旋度和边界上的量(亥姆霍兹定理),因此知道这两个定理,理论体系就完备了。

(3) 关于位函数。在静电场和恒定电(流)场中引入电位 φ , 在恒定磁场中引入矢量磁位 A , 归根结底是一种数学处理的技巧, 都试图将关于两个物理量的微分方程(如 $\nabla \cdot D = \rho, \nabla \times E = 0$) 变化为关于一个辅助量 φ 的微分方程($\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon$), 使计算方便(变成一个方程), 当然有时并不方便(二阶微分)。对恒定磁场而言, 除了矢量磁位 A 外, 也可以引入标量磁位 φ_m , 对时变电磁场需要引入动态位。

(4) 关于几何模型。几何模型就是力线模型, 也是一种近似描述电场和磁场分布的方法。力线的两个性质分别对应的是高斯定理和环路定理。力线一方面形象地反映了场量的分布, 另一方面在一定程度上还可辅助计算, 是一种在历史上曾起过较大作用的工具。随着计算机技术的发展, 力线也找到了新的发展机会, 在工程实践中, 有时候借助力线也可以很快地分析和解释一些问题。

5. 能量

上面是从力出发, 建立一个理论体系, 实际上也可以像牛顿力学一样, 从能量出发建立一个理论体系, 即从哈密顿原理出发, 可以推出泊松方程, 然后再反推上去。当然这超出了本课程的范围, 但它告诉我们, 一个理论体系是可以有多种逻辑结构的。

6. 量级

判断物理量的基本大小(量级)是分析问题的一个重要基础, 对量级的认识是学习电磁场理论时容易忽视的地方。例如, 两个相距 1 m 的 1 C 电荷之间的作用力约为 900 kt, 已非一般的材料能够控制它们, 显然 C 是一个非常大的单位, 实际工程中常用的是 μC ; 10 nm 的金属球上有一个电子时, 它周围的电场强度可能达到 140 kV/cm, 已远远超过大气压下空气的击穿场强 30 kV/cm, 它带来的却是纳米科学中所谓的库仑阻塞效应(阻止后一个电子进入); 地球磁场在 10^{-4} T(特斯拉) 范围, 普通线圈产生的磁场约在 10^{-3} T, 目前的脉冲强磁场也不过产生低于 100 T 的磁场, 因而 T 也是一个比较大的单位, 一般用 mT。

1.2.3 时变电磁场的理论体系

在静态场中, 电场和磁场具有一定的相似性, 并且可能还具有一定的关系; 在时变电磁场中, 情况就更复杂, 变化的电场可以产生磁场, 变化的磁场也可以产生电场, 电场和磁场成为一种互为因果的关系。实际上在爱因斯坦的相对论中, 电场和磁场是同一种物质, 电场和磁场已经统一。

基于电场和磁场是同一种物质的认识, 就能从能量守恒定律和电荷守恒定律这两个最基本的实验定律出发来看麦克斯韦方程组, 如图 1.5 所示。其意义分述如下。

1. 守恒的意义

从能量守恒和电荷守恒出发导出时变电磁场方程组具有更一般的意义, 它和自然科学理论体系的基本思想是一致的, 没有理由怀疑这个坚实、来自于实践的基础。电荷守恒还有一个比较有趣的解释: 电荷不是在空间上变化, 就是在时间上变化; 空间上增

加了,时间上就要减少,反之亦然。

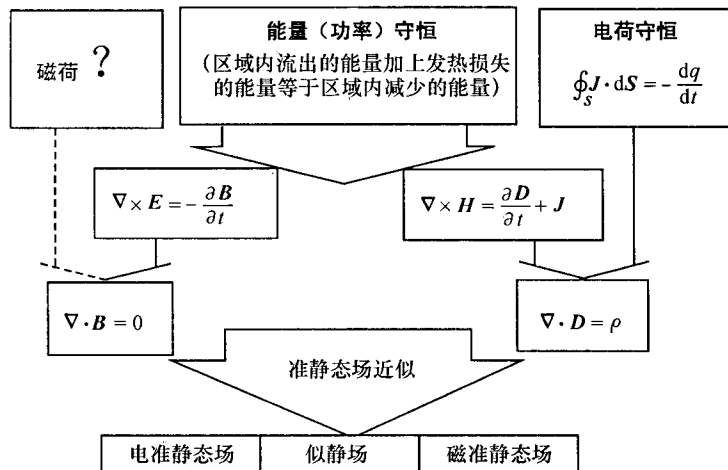


图 1.5 时变电磁场理论逻辑关系图

2. 磁荷存在的理论意义

在时变电磁场理论逻辑关系图中,可以看到磁荷在理论上是有存在的可能性的。如果存在,也不违背现有的理论体系,同时也使方程结构更具有对称性。磁荷存在的问题还在继续研究,其中一个重要的原因也是人们对对称性的追求,这也是一个方法论的问题。

3. 麦克斯韦方程组的限定性

由四个方程组成的麦克斯韦方程组实际上每个方程的地位是不一样的。两个具有散度性质的方程是非限定性的(可导出的),两个限定性麦克斯韦方程(电磁感应定律和全电流定律)和电荷守恒定律组成具有基础地位的限定性方程。

4. 准静态场是时变场在缓慢变化条件下的近似表示

准静态场是本课程的一个重点教学内容,它同样体现出了建立近似物理模型的基本思想。当电磁场缓慢变化到一定程度,电磁场的传播时间已经可以不再考虑,这是其最基本的前提。

5. 场与路的对应

电路理论是一种用积分量(如电压和电流)描述特定对象(准静态场)的电磁场理论。可以认为电路中的特勒根定律来自场理论中的能量守恒定律,基尔霍夫电压定律来自电磁感应定律,基尔霍夫电流定律来自全电流定律。至于场理论中存在的电荷守恒限制性方程为什么在路中没有对应的定律,可以理解为在电路中并非所有的问题仅依靠基尔霍夫定律就可以解决,有时候它还需要电荷守恒定律来协助。当然场向路过渡的问题还需要进行更多的近似处理。

1.2.4 理论体系中数学的学习

关于数学问题。必须指出,掌握必要的数学知识不仅是深刻理解和娴熟应用电磁场理论的基础,而且也是欣赏这一经典理论典范的基本素养,它也会帮助我们很快进入其他领域。然而,不可否认的是,除了对数学本身有特殊兴趣的同学以外,大部分同学学习的困难也正在于对数学的畏难情绪,而这些困难也由于课时的减少显得更加突出。考虑到最基本的任务仍然是对一个具体的工程问题选择合适的模型、进行正确的分析和计算,因此建议大部分同学学习时注意将抽象的数学符号和具体的物理意义联系起来,而不必太在意数学本身的严谨性,另外只是需要稍多一点的耐心,毕竟基本的数学并不是太多。比如关于散度,可以理解为力线是否有净发出或净流入(有源或无源);关于旋度,可以理解为力线是否闭合(有旋或无旋),而不必追究它们原始的定义和掌握它们之间的各种相互运算(公式可以查表)。数学中的高斯定理和斯托克斯定理是联系积分方程和微分方程的关键,记住这些定理也就能够娴熟地转换微分形式和积分形式。这些令人头疼的数学符号也就仅仅是符号而已。除了这些,不知道还有什么困难能够阻碍一个认真的学生去掌握这样一个经典的、使人受益终生的基础理论。