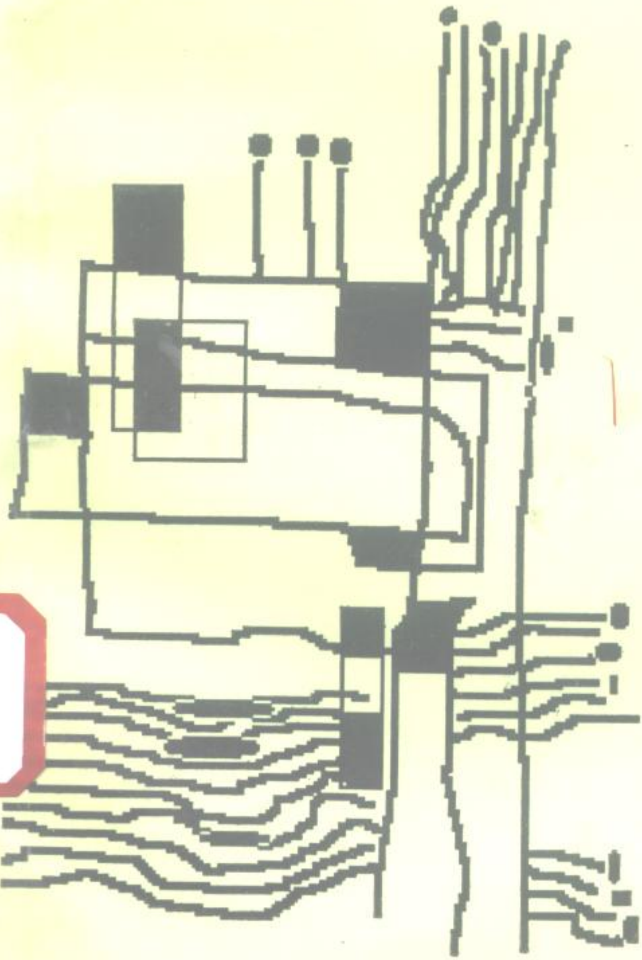
电磁场与波

黎滨洪　金荣洪　张佩玉　编著



DIANCICHANG YU BO

上海交通大学出版社

电 磁 场 与 波

黎滨洪　金荣洪　张佩玉　编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书采用公理法系统阐述电磁场与波的基本理论，主要内容包括：电磁场运动的基本规律，静电场、静磁场、平面电磁波、导行电磁波、电磁波辐射和狭义相对论。在进入主要内容教学之前，专设一章重点扼要地叙述与本课有关的矢量分析知识。书后附有三个附录备查。

本书为通信和电子类本科教材，若对内容适当删减也可用于大专和业余教育。

责任编辑　周星男

电磁场与波

上海交通大学出版社·出版

（上海市华山路1954号　邮政编码 200030）

新华书店上海发行所·发行

常熟市印刷二厂·印刷

开本：850×1168（毫米）1/32　印张：11.375　字数：303000

版次：1996年1月　第1版　印次：1996年2月　第1次

印数：1—1200

ISBN 7-313-01580-1/O·094　定价：7.80元

绪　论

电磁场与电磁波(或电动力学)研究的对象是电磁场这种物质的基本属性、运动规律以及它与其他物质的相互作用。在通信和电子类专业里,主要是用它来承载信息,因此学习内容侧重于它的运动规律,即电磁波的产生和传播的规律。本课程所需的先修课程是高等数学、普通物理和工程数学(或数理方法)。

电磁场和电磁波是同一种物质,运动的电磁场就是电磁波,因此在名词上我们常可"场""波"混用。回顾历史,20世纪以前的物理学对场的认识停留在两点上:一是把场看作物理量的空间分布;二是把场用作描写超距作用的抽象的工具。然而,物理学发展到现今,人们对电磁场是一种物质已深信不疑,只是由于我们的感官和仪器不够灵敏,才使对这一概念的认识拖延了漫长的岁月。在这一认识历程中,智力抽象和高新技术都起了关键性的作用。科学家构思设计的精确实验已证实,电磁场具有物质的基本属性:质量(动态质量)、能量和动量;也具有波粒二象性。但是为了不割断历史,我们也可把传统的由原子分子构成的物质叫做实体物质,而把电磁场叫做场物质。一般而言,频率较低的电磁场(如无线电波)其波动性较强而粒子性较弱,频率较高的电磁场(如光波,各种射线等)其粒子性较强而波动性较弱。

电磁学的发展历史虽然长流不断,但仍可分为若干阶段。17世纪以前阶段,可追溯到公元前600年。当时希腊人首先发现了摩擦后的琥珀能吸引微小物体,开始有了电场力的概念;公元前300年我国发现了磁石吸铁现象,这是磁场力概念的开始;公元初我国制成了首枚指南针,随后人们确认了地球磁场的存在。

17和18世纪阶段。1785年库仑(法国)通过实验提出了库仑定律;1820年奥斯特(丹麦)发现了电流的磁场,同时安培(法国)计算了两个电流之间的作用力;1831年法拉第(英国)发现电磁感应现

象并提出电磁感应定律，说明时变磁场可以产生电场；1862年麦克斯韦(英国)提出位移电流概念，说明时变电场可以产生磁场，并对电磁场所遵循的普遍规律进行严格的数学描述，创立了麦克斯韦方程组，预言了电磁波的存在，并被1887年赫兹(德国)的实验所证实。

20世纪阶段。麦克斯韦方程组面世之后，一般人以为电磁学的基本规律业已掌握，剩下的只是把这些基本规律应用到各种具体问题，求解方程和设计计算了。但这种看法很快就被新的实验事实所否定。爱因斯坦(先德国，后美国)在深刻洞察这些新的实验事实的基础上，在1905年提出崭新的时空观念，创立了狭义相对论，否定了带有机械论局限性的以太理论。狭义相对论和他稍后创立的广义相对论不仅使电磁理论摆脱了形而上学的影响，使之确立在新的时空观念的基础上，而且对物理学的其他领域均产生了广泛和深远的影响。另外，以麦克斯韦方程组为标志的电磁场理论是在研究和总结宏观电磁现象过程中建立起来的，因此称为宏观电磁场理论。随着原子物理、核物理和基本粒子物理等学科的发展，提出了新的带电微观粒子和电磁场的相互作用问题。宏观电磁场理论在解释这些问题时显示出局限性甚至无能为力。本世纪20年代量子理论建立以后，电磁场理论与之结合产生的量子电磁场理论(量子电动力学)成了阐述微观世界电磁现象的有力工具。

电磁学和其他学科一样，以其自身发展的进程雄辩地一次又一次地否定了唯心论和形而上学，证实了唯物论和辩证法。客观世界的运动变化永无止境，人们对其认识不会终结。业已发现和创立的定律、方程和理论，仅是在一定范围和条件下起作用的相对真理，仅标志着整个认识过程中的一定发展阶段。在通信和电子工程领域内，所涉及的多为大尺寸(计算区域、发送设备、传播媒质、接收设备的尺寸均比原子分子大许多)低速度(设备和媒质的运动速度远低于光速)的电磁场问题，因此只需运用宏观非相对论电磁

场理论便足够精确。

科学先驱们研究创立电磁理论的过程很长，因为这一过程包含着许多从特殊到普遍、从具体到抽象的步骤，即包含着反复多次的精心设计的具体实验和仔细测量，以及从这些实验结果抽象概括出系统完整理论的艰苦经历。然而对于后人来说，以“重走长征路”的方式学习这门科学并不是高效的方法。相反，我们可以采取从普遍到特殊，从抽象到具体的方法，即自近及远、厚今薄古的方法来学习。这并不违背认识论，反而更能体现普遍理论对具体实践的指导作用，使理论学习更快地与工程实际相结合，更能突出认识世界是为了改造世界这一最终目的。我们认为，从具体到抽象、从特殊到普遍属于归纳法，是一种综合(逆向)思维过程，包含着试探、失败、再试探、再失败，直至成功的多次反复，花时费事，而且逻辑不顺；而从抽象到具体、从普遍到特殊属于公理法，是一种分析(正向)思维过程，只需条件和参数的一次性设定，节时省事，而且逻辑顺畅。本书侧重于普遍到特殊的公理法论述体系，以便提高教学效率和缩减全书的篇幅。

本书采用国际单位SI制(有理化MKSA制)。在电磁学中，曾有多种单位制同时被人应用着，除了SI制外，常用的还有高斯单位制。SI制常见于工程类书刊文献中，高斯制常见于理论物理类书刊文献中。两种单位制长期并存是由于它们各有长短。SI制的单位与日常工程和生活中所用的单位一致，但真空的介电常数ε_0和导磁率μ_0均不等于1且有量纲，用它们描写空洞无物更无极化磁化的真空很不自然。高斯制中真空的ε_0和μ_0均为1而无量纲，这是无极化磁化的真实写照，但高斯制的单位比起日常所用的单位，有的显得太大，有的显得太小，而且在一些基本方程中常出现因子4π和光速c也有不便。因此近年在理论物理书刊中也有采用SI制的。另外，本书在描写时谐变化时用时间因子$e^{j\omega t}$。

本教材适用于通信和电子类专业本科，若对目录上带*号的节和文中小字号排的部分酌情删减，也可用于大专和职业教育。

本书绪论、第1章、第2章、第6章和第8章由黎滨洪编写；第5章、第7章由金荣洪编写；第3章、第4章由张佩玉编写。由于水平和时间所限，缺点错误难免，诚望大家批评指正。

编著者

1995年6月于上海交大

目 录

第1章 矢量分析

电磁场的特征量是电场强度 $\boldsymbol{E}$ 和磁感应强度 $\boldsymbol{B}$,它们是矢量场。为了在数学上便于求解其运动方程也常常引入标量的辅助函数，即标量场。本章简要介绍矢量分析(也涉及某些标量分析)和有关的定理,为学习本课程准备必要的数学基础。

1.1 标量场和矢量场

物理量可分为标量、矢量和张量三类。(也有人把所有物理量统称为张量的。此时标量归为零阶张量，矢量归为一阶张量，通常的张量归为二阶张量。还有三阶等高阶张量)。只有大小的量称为标量,例如长度、面积、体积、密度、质量、温度、电量、电位和能量等。在三维空间中它有 $3^0=1$个分量,在坐标变换中保持不变。有大小又有方向的量称为矢量,例如位移、速度、加速度、力、电场强度、磁场强度和能流密度等。在三维空间中它有$3^1=3$个分量，在坐标变换中服从矢量变换规则。矢量的几何表示是一条有向线段,矢量的代数表示是$\boldsymbol{A}=A_x\boldsymbol{a}_x+A_y\boldsymbol{a}_y+A_z\boldsymbol{a}_z$,矢量的矩阵表示是$\boldsymbol{A}=(A_x,A_y,A_z)^t$或$(A_x,A_y,A_z)$。有大小又有张向(并矢向)的量称为张量，例如应力张量和电磁场张量等。在三维空间中它有 $3^2=9$ 个分量，在坐标变换中服从张量变换规则。张量不便用几何表示,其代数表示为

$$\begin{aligned}\overline{\boldsymbol{T}}=&T_{xx}\boldsymbol{a}_x\boldsymbol{a}_x+T_{xy}\boldsymbol{a}_x\boldsymbol{a}_y+T_{xz}\boldsymbol{a}_x\boldsymbol{a}_z+T_{yx}\boldsymbol{a}_y\boldsymbol{a}_x\\&+T_{yy}\boldsymbol{a}_y\boldsymbol{a}_y+T_{yz}\boldsymbol{a}_y\boldsymbol{a}_z+T_{zx}\boldsymbol{a}_z\boldsymbol{a}_x+T_{zy}\boldsymbol{a}_z\boldsymbol{a}_y\\&+T_{zz}\boldsymbol{a}_z\boldsymbol{a}_z\end{aligned}$$

其矩阵表示为

$$\overline{\boldsymbol{T}}=\begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix}$$

在数学中，场指的是一种空间分布(在近代物理中，电磁场不只是一种空间分布，而且是一种物质(场物质))。当标量、矢量和张量为一种空间分布，即为空间坐标的函数时，就称它们为标量场、矢量场和张量场。若它们又随时间变化(即为时间的函数)，则称它们为时变场。

本书大量用到的是矢量场和辅助标量场，张量场只是偶尔遇到。

1.2 增量，标量场的梯度，格林定理

标量场$\Phi(\boldsymbol{r})$在$\boldsymbol{r}$点附近沿任意方向$\boldsymbol{l}$变化$\Delta \boldsymbol{l}$距离的增量为

$$\Delta\Phi|_{l}=\frac{\Delta\Phi}{\Delta l}\cdot\Delta l \tag{1-1}$$

当Δl向$\boldsymbol{r}$点无限收缩时，则有微分(微增量)

$$\mathrm{d}\Phi|_{l}=\frac{\partial\Phi}{\partial l}\mathrm{d}l \tag{1-2}$$

其中$\dfrac{\partial\Phi}{\partial l}$称为标量场$\Phi$沿$\boldsymbol{l}$的方向导数。显然有

$$\frac{\partial\Phi}{\partial l}=\frac{\mathrm{d}\Phi|_{l}}{\mathrm{d}l} \tag{1-3}$$

可见，方向导数即为该方向的单位长度的增量。

标量场$\Phi(\boldsymbol{r})$在$\bar{r}$点的梯度是一矢量，记作$\nabla\Phi$(哈密顿算符

$$\nabla=\boldsymbol{a}_x\frac{\partial}{\partial x}+\boldsymbol{a}_y\frac{\partial}{\partial y}+\boldsymbol{a}_z\frac{\partial}{\partial z}$$，读作“del”或“nabla”)，

它表示$\Phi(\boldsymbol{r})$在该点处最大方向导数的方向和大小，即

$$\nabla\Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial l_{\mathrm{m}}}\boldsymbol{a}_{\mathrm{m}} \tag{1-4}$$

式中$\boldsymbol{a}_{\mathrm{m}}$为最大导数方向$\boldsymbol{l}_{\mathrm{m}}$的单位矢量。梯度的直角坐标算式为

$$\nabla\Phi = \boldsymbol{a}_x\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \boldsymbol{a}_y\frac{\partial \Phi}{\partial y} + \boldsymbol{a}_z\frac{\partial \Phi}{\partial z} \tag{1-5}$$

梯度是标量场最重要的分析参量。一旦有了它，则标量场沿任意方向的方向导数和微分便可求出，即

$$\frac{\partial \Phi}{\partial l} = \nabla\Phi \cdot \boldsymbol{a}_l \tag{1-6}$$

$$\mathrm{d}\Phi = \nabla\Phi \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{1-7}$$

式中 $\boldsymbol{a}_l$ 和 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 分别为 $\boldsymbol{l}$ 方向的单位矢量和元长矢量。

场论中有一些很有用的积分恒等式，它们把不同阶的微商的不同重的重积分连系起来，即起了降价和减重的作用。在标量场论中，最重要的是格林定理：设标量场Φ和Ψ在区域V中具有连续的二阶偏导数，则Φ和Ψ满足

$$\int_V (\nabla\Psi \cdot \nabla\Phi + \Psi\nabla^2\Phi)\mathrm{d}V = \oint_S \Psi\frac{\partial \Phi}{\partial n}\mathrm{d}S \tag{1-8}$$

式中S为V的封闭面，$\frac{\partial \Phi}{\partial n}$为$\Phi$在$S$上的外法线$\boldsymbol{n}$的方向导数。上式即为第一格林定理。由$\mathrm{d}\boldsymbol{S} = \mathrm{d}S\boldsymbol{n}$和方向导数与梯度的关系式(1-6)，第一格林定理也可写成

$$\int_V (\nabla\Psi \cdot \nabla\Phi + \Psi\nabla^2\Phi)\mathrm{d}V = \oint_S (\Psi\nabla\Phi) \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{1-9}$$

在此定理中，将Ψ和Φ互换并相减，可得第二格林定理：

$$\int_V (\Psi\nabla^2\Phi - \Phi\nabla^2\Psi)\mathrm{d}V = \oint_S \left(\Psi\frac{\partial \Phi}{\partial n} - \Phi\frac{\partial \Psi}{\partial n}\right)\mathrm{d}S \tag{1-10}$$

或

$$\int_V (\Psi\nabla^2\Phi - \Phi\nabla^2\Psi)\mathrm{d}V = \oint_S (\Psi\nabla\Phi - \Phi\nabla\Psi)\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{1-11}$$

格林定理的物理意义是把区域内的场与封闭面上的场联系起来，因此它在电磁场理论中有重要的应用。

1.3 通量，矢量场的散度，奥高定理

矢量场$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r})$在$\boldsymbol{r}$点附近通过有向开曲面$S$的通量为

$$\Phi = \int_S \boldsymbol{A}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{1-12}$$

有向面元$\mathrm{d}\boldsymbol{S}$的方向沿其法线，指向任选。矢量场$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r})$在$\boldsymbol{r}$点附近通过（流出）封闭曲面$S$的通量为

$$\Phi = \oint_S \boldsymbol{A}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{1-13}$$

但有向面元$\mathrm{d}\boldsymbol{s}$的方向规定为外法线方向。若通量Φ为正，则S内必有矢量场的源；若通量Φ为负，则S内必有矢量场的汇。当S向$\boldsymbol{r}$点无限收缩成只包围体积元Δv时，则有微通量

$$\mathrm{d}\Phi = \lim_{\Delta v\to 0}\oint_S \boldsymbol{A}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{1-14}$$

矢量场$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r})$在$\boldsymbol{r}$点的散度是一个标量，记作$\nabla\cdot\boldsymbol{A}$，它表示当$\Delta v$无限收缩到$\boldsymbol{r}$点时通过单位体积的封闭面的通量，即

$$\nabla\cdot\boldsymbol{A} = \lim_{\Delta V\to 0}\frac{\oint_S \boldsymbol{A}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}}{\Delta V} \tag{1-15}$$

散度的直角坐标算式为

$$\nabla\cdot\boldsymbol{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \tag{1-16}$$

散度是矢量场最重要的分析参量之一（另一重要分析参量是旋度，见后）。