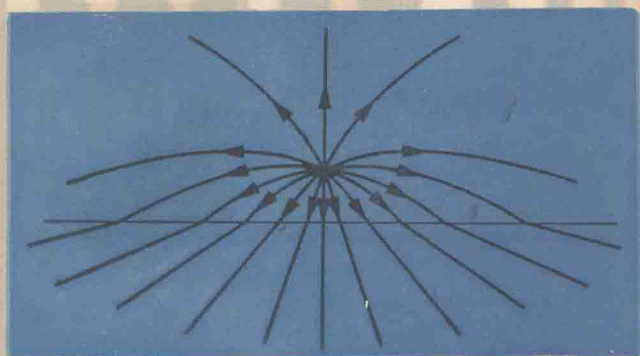


高等学校试用教材

电磁场基本教程

周省三 编



高等教育出版社

高等学校试用教材

电磁场基本教程

周省三 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是教育部高等学校工科电工教材编审委员会“电磁场理论”编审小组 1982 年评选的基本教材。内容符合教育部颁发的高等工业学校四年制电类（不包括无线电技术类）专业的《电磁场理论教学大纲（草案）》的基本要求，可作为电力类和自动化类专业的试用教材，也可供有关工程技术人员参考。

全书分六章，内容包括静电场、恒定电荷的电场和电流场、恒定磁场、边值问题的求解、时变电磁场、平面电磁波。考虑到不同专业的需要，将传输线内容列入附录，供选用。

每章均配有小结、习题。书末附有习题答案。

本书责任编辑 楼史进

高等学校试用教材 电磁场基本教程

周 省 三 编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京昌平区印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.125 字数 240,000

1985 年 10 月第 1 版 1985 年 10 月第 1 次印刷

印数 00,001—6,000

书号 15010·0660 定价 2.10 元

序 言

本书系根据1980年6月教育部高等学校工科电工教材编审委员会审订的高等工业学校四年制电类(不包括无线电技术类)专业《电磁场理论教学大纲(草案)》编写的,经1983年11月教育部高等学校工科电工教材编审委员会电磁场理论编审小组审查通过,同意作为电类专业的教材试用。

全书共分六章,分别阐述了静电场、恒定电荷的电场和电流场、恒定磁场、边值问题的求解、时变电磁场、平面电磁波等内容。在编写中吸取了已有电磁场教材使用中的经验,也注意到某些不足,力求做到少而精,突出基本内容。对于教学大纲中不作要求的,一般不予编入。考虑到不同专业的需要,在附录中编入了关于复变函数法和传输线的内容,供选用。本书可供60—70学时左右的课程使用,如删掉位场计算及时变电磁场和平面电磁波的某些内容,也可供40—50学时左右的课程使用。

本书承简柏敦、盛剑霓同志审阅。他们对书稿提出了很多宝贵意见,在此谨向他们致以衷心的感谢。在编写中曾得到武汉工学院电工教研室同志们的支持和帮助,胡焕章、王天珍同志校阅了本书初稿,胡桂仙同志协助描绘了本书的插图,在此一并表示谢意。

由于本人水平有限,书中难免存在错误和不当之处,敬希读者批评指正。

周 省 三

1984年12月于武汉工学院

目 录

引言

第一章 静电场	1
§ 1-1 库仑定律·电场强度	1
§ 1-2 静电场的高斯定理	5
§ 1-3 静电场的守恒性·电位及电位梯度	7
§ 1-4 静电场中的导体和介质	12
§ 1-5 静电场的微分方程组	16
§ 1-6 不同介质分界面上静电场的边界条件	20
§ 1-7 泊松方程和拉普拉斯方程	24
§ 1-8 已知电荷分布求电位·场源问题	26
§ 1-9 已知边界情况求电位·边值问题	28
§ 1-10 静电场的唯一性定理	34
§ 1-11 镜象法	40
§ 1-12 二线输电线的电场	46
§ 1-13 电容及其计算	49
§ 1-14 多导体带电系统电位和电荷的关系	52
§ 1-15 电场能量和能量密度	60
§ 1-16 带电导体在静电场中受到的力	63
本章小结	67
习 题	69
第二章 恒定电荷的电场和电流场	75
§ 2-1 载流回路周围介质中的电场	75
§ 2-2 导电媒质内的电场和电流场	76
§ 2-3 电阻的计算	80
§ 2-4 接地电阻及其计算	84
§ 2-5 静电模拟法	87
本章小结	89

习 题	90
第三章 恒定磁场	92
§ 3-1 磁感应强度·毕奥-沙伐定律	92
§ 3-2 磁通连续性原理	94
§ 3-3 安培环路定律	95
§ 3-4 物质的磁化·磁场强度	97
§ 3-5 磁场的微分方程组和边界条件	101
§ 3-6 标量磁位	107
§ 3-7 向量磁位	113
§ 3-8 磁场中的镜象法	120
§ 3-9 二线输电线的磁场	123
§ 3-10 电感及其计算	126
§ 3-11 利用向量磁位计算电感·诺曼公式	130
§ 3-12 磁场能量和能量密度	132
§ 3-13 载流导体在磁场中受到的力	136
本章小结	140
习 题	143
第四章 边值问题的求解	148
§ 4-1 分离变量法	148
§ 4-2 分离变量法举例	153
§ 4-3 图解法	160
§ 4-4 差分法	165
本章小结	175
习 题	175
第五章 时变电磁场	179
§ 5-1 电磁感应定律和全电流定律	179
§ 5-2 电磁场基本方程组——麦克斯韦方程	183
§ 5-3 电磁场的边界条件	186
§ 5-4 电磁场的能量和能量传播·坡印亭向量	188
§ 5-5 电磁场方程及坡印亭向量的相量形式	192
§ 5-6 时变电磁场的唯一性定理	195

§ 5-7 时变电磁场的动态位	197
§ 5-8 振荡电偶极子场的分析	202
§ 5-9 电磁场和电路	207
本章小结	212
习 题	215
第六章 平面电磁波	218
§ 6-1 理想介质中的均匀平面波	218
§ 6-2 波的极化	228
§ 6-3 平面电磁波的反射和折射	231
§ 6-4 导电媒质中的电磁场	235
§ 6-5 集肤效应	243
§ 6-6 变压器铁心叠片中的电磁场	246
§ 6-7 导体的内阻抗	251
§ 6-8 邻近效应和电磁屏蔽的概念	253
本章小结	255
习 题	259
附录一 立体角的概念	261
附录二 向量分析概要	264
1. 梯度	264
2. 散度	265
3. 高斯散度定理(奥氏公式)	266
4. 旋度	266
5. 斯托克斯定理	268
6. 纳布拉算子 ∇	269
7. 常用向量分析公式	270
8. 梯度、散度、旋度和拉普拉斯算符在柱坐标和球坐标系 的表达式	270
附录三 利用复变函数解平行平面位场	273
1. 解析函数	273
2. 复位函数	274
3. 保角变换	278

附录四 传输线	281
1. 均匀传输线的微分方程	281
2. 均匀传输线的正弦稳态解	284
3. 均匀传输线的参数	287
4. 接有不同负载的无损耗传输线	289
5. 均匀传输线的等值二端口网络	296
附录五 常用电学和磁学的量和单位	298
习题答案	300
中英名词对照	307

引 言

在电路理论中,我们通过电流、电压等物理量,研究了发生在电路中的电磁现象。通过电磁场理论的学习,我们将进一步研究各种宏观电磁现象和电磁过程的物理本质和基本规律。

在电荷周围的空间,存在有电场。电场的性质可以通过电场强度等物理量来描述。在电流周围的空间,存在有磁场,磁场的性质可以通过磁感应强度等物理量来描述。电场强度、磁感应强度等物理量有什么特征,它们在空间的分布与哪些因素有关,服从什么规律,它们相互之间的关系,以及如何对它们进行分析和计算,这便是电磁场理论所要阐述和研究的基本内容。

学习电磁场理论,可以加深对电路、磁路和其他电磁现象的理解。近代很多电工问题,如无线电波的发射和传播,高频淬火和加热,电子光学,高电压技术以及集肤效应和电磁屏蔽的分析, L 、 C 元件参数的计算和设计,以及电机、电器电磁性能的分析 and 计算等等,都是以电磁场理论为根据的。因此,作为电专业的工程技术人员,有必要掌握一定的电磁场基本理论。

本书在大学普通物理学的电磁学基础上展开讨论。但为了便于学习起见,对有关物理内容仍作了简短的阐述。在第一、二、三章中,分别讨论了静电场、恒定电荷的电场和电流场、及恒定磁场。在第四章中,介绍静态场的各种计算方法,包括解析法、图解法、近似求解法等。最后在第五章和第六章中介绍了时变场的基本理论,以建立电磁场的完整概念。应当指出,本书主要研究宏观电磁场理论,而不去研究原子、分子内部的电磁过程。后者是理论

物理课所研究的内容。此外，本书主要介绍分析工程电磁场问题所需要的基本概念和基本方法，这一方面和理论物理电磁学及电动力学课程的侧重点是有所不同的。

在本书中，还要用到高等数学和工程数学中的一些有关知识，尤其是向量分析和场论，更是研究电磁场理论的有力的数学工具。为了便于查考，我们把有关的主要公式和结论列在附录中。详细内容请读者参阅有关专著。

由于电磁场的概念，与我们在生活中直接体验所获得的机械运动的概念，以及在电路中所遇到的概念相比较，有其本身的特点，所以初学时往往觉得抽象。但是只要我们认真思考，刻苦钻研，多加分析和对比，注意掌握矛盾的特性和共性，就能逐渐地熟悉和掌握它们。入门既不难，深造也是办得到的。

第一章 静 电 场

如果相对于观察者静止的带电体的电量不随时间变化,那么,在这个带电体的周围,便存在不随时间变化的静电场。静电场是电磁场的一种特殊情况。许多实际的电工问题,如电器的绝缘问题,带电质点在电子管电极间的受力问题,电容的计算等等,都是静电场应用的例子。此外,研究静电场对于建立场的基本概念,为研究一般电磁场问题打下基础,也是完全必要的。

本章内容大体分四部分:§1-1—§1-4 复习普通物理课程中有关内容;§1-5—§1-7,在前四节的基础上研究静电场的基本方程;§1-8—§1-15 介绍静电场问题的分析计算方法;§1-16—§1-17 阐述静电场的能量和力的效应。

§ 1-1 库仑定律·电场强度

1785年,法国学者库仑用实验确定,真空中两个静止的点电荷的相互作用力,与这两个点电荷的电量的乘积成正比,而与它们之间的距离的平方成反比。这一规律称为库仑定律,可以用下式表示

$$f = \frac{q_1 q_2 \alpha_r}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1-1)$$

式中 q_1 、 q_2 分别表示两点电荷的电量,在国际单位制(SI)中^①,电

^① 本书一律采用国际单位制(SI)。

量的单位是库仑(C)。 $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, 为真空的介电常数。 r 为两点电荷间的距离, 单位为米(m)。 $\mathbf{a}_r$ 是 $\mathbf{r}$ 的单位向量。当考虑 q_2 受力(即 q_1 对 q_2 的作用力)时, $\mathbf{r}$ 是由 q_1 指向 q_2 ; 考虑 q_1 受力时, $\mathbf{r}$ 是由 q_2 指向 q_1 。力的单位是牛顿(N)。实际上真正的点电荷是不存在的, 但当带电体的尺寸远较它们之间的距离 r 为小时, 就可作为点电荷处理。

点电荷 q_1 、 q_2 相互间感受到力的作用, 是由于在 q_1 、 q_2 周围空间存在着电场。 q_1 的电场作用在 q_2 上使 q_2 感受到力, 而 q_2 的电场则作用在 q_1 上使 q_1 感受到力。电场是一种特殊形式的物质, 能使场内的电荷感受到力的作用。

电场的分布特性可以通过单位正点电荷在场中所受的力来表征。我们将这个描述电场性质的物理量称为电场强度 $\mathbf{E}$ 。它的数学表达式为

$$\mathbf{E} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{f}}{\Delta q} \quad (1-2)$$

式中 $\Delta \mathbf{f}$ 是受试电荷 Δq 在场中所受的力。 $\mathbf{E}$ 是随着空间位置不同而变化的向量函数。在国际单位制中, 它的单位是伏特每米(V/m)。

由(1-1)、(1-2)式可知, 点电荷 q 产生的电场强度可由下式计算:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{a}_r \quad (1-3)$$

对于多个点电荷产生的电场, 可以分别计算每一个点电荷的电场, 然后叠加起来。一般而言, 对于任意已知分布电荷的电场, 也可由(1-3)式求得。如图 1-1, ρ 为 V 中的分布电荷密度, 将 V 分做很多小体积元 dV , 则 ρdV 可以看做一个点电荷, 它在 A 点产生的相

应的电场为 $\frac{\rho dV}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{a}_r$, 则 A 点的总电场可通过积分求得如下

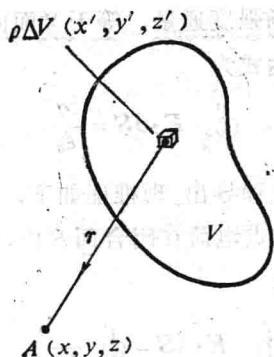


图 1-1

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \int_V \frac{\rho(x', y', z') dV}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{a}_r \quad (1-4)$$

式中, x, y, z 为场点 A 所在点坐标, 而 x', y', z' 为场源 ρ 所在点坐标。

但是, 按(1-4)式进行积分, 一般比较复杂。下面, 我们将在库仑定律的基础上进一步研究静电场的性质, 并逐步掌握一般电场的分析计算方法。

§ 1-2 静电场的高斯定理

电场分布可用电力线来描绘。电力线上各点的切线方向和该点电场强度的方向一致, 而场中各处的电力线密度则正比于该点的电场强度。穿过电场中一个给定面积的电场强度的面积分, 叫做通过该面积的电场强度通量, 可用下式表示

$$\Psi_E = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-5)$$

带电体发出的电场强度通量和它们的电量有一定关系。这个关系可用静电场的高斯定理来描述。它说明: 真空中通过任意闭

合曲面 S 发出的电场强度通量, 等于 S 面内电荷的代数和与 ϵ_0 之比。它的数学表达式为

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1-6)$$

高斯定理可由库仑定律导出, 现推证如下:

考虑图 1-2(a), 点电荷在闭合面 S 内, 由 (1-5) 式和 (1-3) 式, 穿过 S 的电通量为

$$\begin{aligned} \Psi_E &= \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \oint_S \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} (\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{a}_n) dS \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{a}_n}{r^2} dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_S d\Omega \end{aligned}$$

式中, $d\Omega = \frac{\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{a}_n}{r^2} dS = \frac{\cos\theta}{r^2} dS$, 为 dS 对 q 所张的立体角 (立体角的概念, 可参考附录一)。闭合曲面对 q 所张的立体角, 可以通过以 q 为中心, R 为半径的球曲面对 q 点所张的立体角来求得, 其值为

$$\Omega = \oint_S d\Omega = \frac{1}{R^2} \oint_S \mathbf{a}_r \cdot \mathbf{a}_n dS = \frac{1}{R^2} 4\pi R^2 = 4\pi \text{ sr}$$

在国际单位制中, 立体角的单位是球面度 (sr), 由此可得

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_S d\Omega = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} 4\pi = \frac{q}{\epsilon_0}$$

如电荷在闭合曲面 S 外如图 1-2(b) 所示, 则 S 面对 q 所张的立体角, 可以分为左半部 S_1 对 q 所张的立体角和右半部 S_2 对 q 所张的立体角之和。因两者大小相等而符号相反, 故总的结果为零。这表明闭合曲面 S 外的电荷, 其电力线只能通过 S 面, 而不可能由 S 面内发出或终止在 S 面内。

如果 S 面内有若干个电荷或存在分布的体电荷, 则根据电场的叠加性质, (1-6) 式仍适合, 但 q 应理解为 S 面内电荷的代数

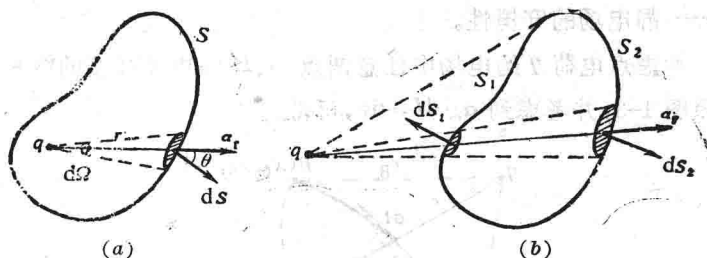


图 1-2

和。

高斯定理反映了静电场的一条基本性质。在某些对称情况下(例如球对称、柱对称),可用它来直接求解电场。兹举例说明如下。

例 1-1 设有电荷均匀分布的圆球,球半径为 a , 电荷体密度为 ρ , 求球内和球外两区域中的电场强度。

解 根据球对称的特点,以球心为原点,以 r 为半径作一球面,对此球面应用高斯定理,并考虑到在此球面上 $\mathbf{E}$ 的数值相同,方向与外法线 $\mathbf{a}_n$ 一致,由(1-6)式,有

$$r \geq a \quad 4\pi r^2 E = \frac{1}{\epsilon_0} q, \quad E = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 r^2}$$

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 r^2} \mathbf{a}_r, \quad \text{其中 } q = \frac{4\pi}{3} a^3 \rho$$

$$r \leq a \quad 4\pi r^2 E = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho, \quad E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0}$$

$$\mathbf{E} = \frac{\rho r}{3\epsilon_0} \mathbf{a}_r$$

§ 1-3 静电场的守恒性 · 电位及电位梯度

通过对库仑定律的研究,还可以得到静电场的另一条基本性

质——静电场的守恒性。

考虑点电荷 q 的电场中任意两点 A, B 间电场强度的线积分。参照图 1-3, 并考虑到 $\mathbf{a}_r \cdot d\mathbf{l} = dr$, 可得

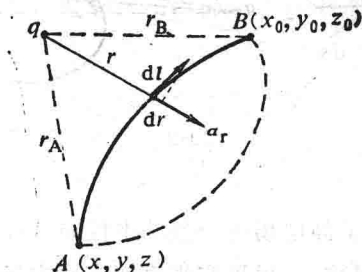


图 1-3

$$\begin{aligned} \int_{AB} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= \int_{AB} \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{a}_r \cdot d\mathbf{l}}{r^2} \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \end{aligned} \quad (1-7)$$

积分的结果只与 A, B 两点的位置有关, 而与积分的途径无关。例如, 我们也可以沿图中虚线的途径积分, 可得到相同的结果。换句话说, 假如我们沿一条途径计算从 A 点到 B 点电场强度的线积分, 并从另一条途径计算由 B 点到 A 点电场强度的线积分, 两者之和必为零, 可表示为

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-8)$$

对于任意分布电荷的电场, 可以看成点电荷电场的叠加, 而每一分量均符合于(1-8)式, 故相加的结果也符合于(1-8)式。由(1-8)式可知: 在静电场中沿任意闭合途径, 电场强度的线积分恒等于零。这个结论也可看作是单位正电荷在电场作用下, 沿闭合

曲线移动一周时, 电场力所作的功为零。它反映了静电场的另一条基本性质, 称为静电场的守恒性。

根据静电场的守恒性可以说明:

(1) 电力线不能闭合。如果电力线闭合, 则沿此闭合途径的电场强度线积分便不能为零。

(2) 可以引用电位函数来研究静电场。

由(1-7)式可知, 任意两点间电场强度的线积分只与该两点的位置有关, 如果固定其中的一点 B , 则积分值只与 A 点的位置有关, 称为 A 点的电位, 记作

$$\varphi(x, y, z) = \int_{A(x, y, z)}^{B(x_0, y_0, z_0)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-9)$$

它等于单位正电荷在电场作用下, 由 A 点移到 B 点时, 电场所作的功。在国际单位制中, 电位的单位是伏特(V)。 B 点称为参考点(参考点的电位为零)。参考点可以任意选取。当选取的参考点不同时, A 点的电位值可以相差一常数。当电荷分布在有限区域内时, 通常选取无限远处作为参考点, 则在(1-7)式中 $\frac{1}{r_B} \rightarrow 0$, 便得到点电荷以无限远处为参考点时的电位表达式为

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1-10)$$

以(1-10)式为基础, 可以计算任意分布电荷的电位。由于电位是一个标量函数, 它比直接计算电场强度向量一般要方便些。

那么在电位函数求出以后, 又如何根据它求得电场强度呢?

考虑电场中任意两相邻点 A 、 B , 如图 1-4 所示, 则由(1-7)式有

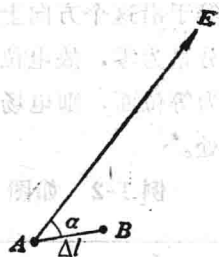


图 1-4