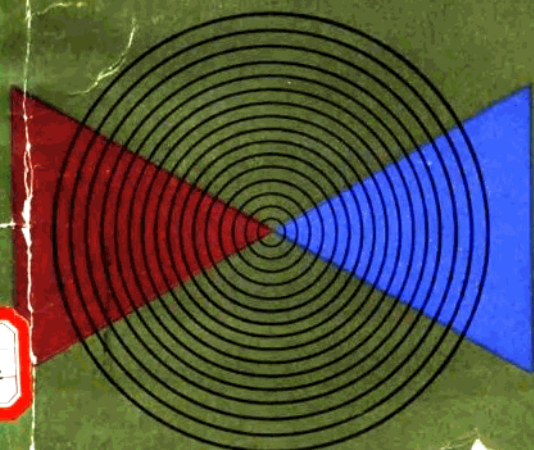


高等学校教材

# 电磁场 与电磁波基础

(第二版)

卢荣章 编



高等教育出版社

高等学校教材

# 电磁场与电磁波基础

(第二版)

卢荣章 编



## 内 容 提 要

本书是《电磁场与电磁波基础》的第二版，是在第一版本试用的基础上，广泛征求各兄弟院校意见，参照“电磁场与电磁波课程教学基本要求”进行修订的。

本版保持了第一版的风格特点，着重加强基础，在内容和体系上作了必要的删减、调整、更新，增加了相当数量的复习题和例题，并附有全部习题答案。本书可作为高等学校无线电类各专业的教材，也可供其他专业学生或自学者选用。

本书责任编辑 马 达

### 高等学校教材 电磁场与电磁波基础

(第二版)

卢荣章 编

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民邮电出版社印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 12.5 字数 300,000

1985年 月 第1版 1990年1月第2版 1990年1月第1次印刷

印数 0001—2,115

ISBN 7-04-002755-0/TM·143

定价 2.60元

## 前 言

本书的第一版自1985年出版后,得到许多同行的鼓励并为一些工科院校选作基本教材使用。1987年4月,国家教委颁发了高等学校工科“电磁场与电磁波课程教学基本要求”,作为编写基本教材和进行课程教学质量评估的依据。第二版就是在第一版试用基础上,广泛征求各兄弟院校意见,并参照课程教学基本要求进行修订的。修订的主要内容有:

1. 第二版删去第一版中“各向异性媒质中的电磁波”、“狭义相对论与电磁学的联系”两章以及“二次辐射”、“互易定理”两节,力求本书的内容与“电磁场与电磁波课程教学基本要求”相符合;

2. 为了使内容的衔接更加合理,将第一版中“静电场问题的解法”与“静电场的能量和力”两章相对调,构成本书前三章讲静电场的概念和规律,而第四章讲静电场的解法;

3. 为了加强基础,在“静电场问题的解法”一章中增加“解的叠加原理”、“直接积分法”、“电介质平面的镜像法”。

4. 为了使本书便于自学,旋度的概念放在“真空中的恒定磁场”一章中引入,对梯度、散度、旋度增加叙述。在“导行电磁波”一章中,改为借用辅助矢量进行分析。对其余内容,讲法和叙述的深度也作了许多调整;

5. 为了让学生了解理论的实际应用,第二版中调整了部分例题和习题,增加了一定数量有实际意义的例题。为了帮助学生掌握内容和思考问题,本书增添了复习题。为了提高学生作题的兴趣,对难的习题作了提示,全部习题都附上答案;

6. 参考书目也作了调整。

本书由国防科技大学张钧教授审阅，编者对此谨表示衷心的感谢。

卢荣章

1989年3月于北京理工大学

## 第一版的序

本书是根据1980年6月审订的高等学校工科无线电类专业《电磁场与电磁波教学大纲》(草案)编写的教学用书。本书按照传统的方法讲述电磁的基本理论,学生在学完高等数学课程和工程数学课程后,就可以学习本书。讲述电磁理论时,考虑到简洁的数学推导对初学者更易于接受,故书中对某些问题以讲清物理概念为主,数学推导可能有不够严格的地方。为了帮助学生加深理解书中的内容和提高解题能力,各章都有一定数量的例题和习题。习题分为A类和B类,前者是学生应当完成的习题,后者是供参考的难题。全书例题80道,习题265道。读者如果想知道比本书所讲的更广泛和更深入的内容,请参阅书末所列出的参考书。

本书是根据我近年来讲授电磁场理论课程时所用的讲义修订而成的。国防科技大学张钧副教授主审、西安交通大学黄席椿教授复审了本书,并提出许多修改意见。成都电讯工程学院饶克谨教授对本书的修改也提了不少宝贵的意见。我在编写本书的过程中,始终得到了北京工业学院的院、系领导的鼓励和支持。在此谨表示衷心的感谢。

卢荣章

1984年7月于北京工业学院

# 目 录

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| <b>第一章 真空中的静电场</b>   | <b>1</b>  |
| § 1.1 库仑定律           | 1         |
| § 1.2 电场强度           | 2         |
| § 1.3 电通量密度          | 5         |
| § 1.4 高斯定律           | 7         |
| § 1.5 高斯定律的微分形式      | 11        |
| § 1.6 静电场的电位         | 16        |
| § 1.7 电位的梯度          | 21        |
| § 1.8 电位的泊松方程和拉普拉斯方程 | 25        |
| § 1.9 电偶极子           | 26        |
| § 1.10 静电场中的导体       | 29        |
| § 1.11 多导体系统         | 31        |
| 复习题                  | 37        |
| 习题                   | 39        |
| <b>第二章 电介质的极化</b>    | <b>43</b> |
| § 2.1 电介质的极化         | 43        |
| § 2.2 极化电介质外部的电位     | 45        |
| § 2.3 电介质中静电场的基本定律   | 48        |
| § 2.4 分界面上电场的边界条件    | 52        |
| 复习题                  | 55        |
| 习题                   | 56        |
| <b>第三章 静电场的能量和力</b>  | <b>58</b> |
| § 3.1 电场能量           | 58        |
| § 3.2 电场能量的分布        | 60        |
| § 3.3 作用于带电导体的静电力    | 61        |
| 复习题                  | 64        |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 习题                  | 65  |
| <b>第四章 静电场问题的解法</b> | 67  |
| § 4.1 静电场问题的分类      | 67  |
| § 4.2 唯一性定理         | 68  |
| § 4.3 解的叠加原理        | 69  |
| § 4.4 直接积分法         | 70  |
| § 4.5 分离变量法, 直角坐标系  | 73  |
| § 4.6 分离变量法, 圆柱坐标系  | 77  |
| § 4.7 分离变量法, 球坐标系   | 81  |
| § 4.8 复变函数法         | 88  |
| § 4.9 镜像法           | 94  |
| § 4.10 有限差分法        | 100 |
| 复习题                 | 103 |
| 习题                  | 104 |
| <b>第五章 恒定电流</b>     | 110 |
| § 5.1 电流密度          | 110 |
| § 5.2 电流连续方程        | 111 |
| § 5.3 导电媒质中的电流和电场   | 112 |
| § 5.4 分界面上的边界条件     | 115 |
| § 5.5 恒定电流场与静电场的比拟  | 118 |
| 复习题                 | 120 |
| 习题                  | 121 |
| <b>第六章 真空中的恒定磁场</b> | 123 |
| § 6.1 载流导线回路之间作用力   | 123 |
| § 6.2 磁通量密度         | 124 |
| § 6.3 安培回路定律        | 129 |
| § 6.4 安培回路定律的微分形式   | 132 |
| § 6.5 磁场的高斯定律       | 139 |
| § 6.6 磁矢位           | 140 |
| § 6.7 磁偶极子          | 145 |
| § 6.8 磁标位           | 147 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| § 6.9 作用于电流回路的转矩·····         | 149        |
| 复习题·····                      | 150        |
| 习题·····                       | 151        |
| <b>第七章 磁介质的磁化</b> ·····       | <b>159</b> |
| § 7.1 磁介质的磁化·····             | 159        |
| § 7.2 磁化磁介质外部的磁矢位·····        | 161        |
| § 7.3 磁化磁介质外部的磁标位·····        | 163        |
| § 7.4 磁介质中恒定磁场的基本定律·····      | 164        |
| § 7.5 分界面上磁场的边界条件·····        | 167        |
| § 7.6 恒定磁场与静电场的比拟·····        | 172        |
| 复习题·····                      | 176        |
| 习题·····                       | 176        |
| <b>第八章 电磁感应、磁场能量和磁力</b> ····· | <b>179</b> |
| § 8.1 法拉第定律·····              | 179        |
| § 8.2 保守电场和感应电场·····          | 181        |
| § 8.3 运动回路的法拉第定律·····         | 182        |
| § 8.4 电感和互感·····              | 187        |
| § 8.5 磁场能量·····               | 190        |
| § 8.6 磁场能量的分布·····            | 193        |
| § 8.7 导线回路的内电感和外电感·····       | 194        |
| § 8.8 磁力·····                 | 200        |
| 复习题·····                      | 201        |
| 习题·····                       | 202        |
| <b>第九章 麦克斯韦方程</b> ·····       | <b>207</b> |
| § 9.1 推广安培回路定律·····           | 207        |
| § 9.2 麦克斯韦方程·····             | 211        |
| § 9.3 波印廷定理·····              | 216        |
| § 9.4 正弦电磁场·····              | 221        |
| § 9.5 复波印廷定理·····             | 225        |
| § 9.6 标量位和矢量位·····            | 227        |
| § 9.7 电磁场的边界条件·····           | 229        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| § 9.8 电介质的色散性质, 复电容率                | 232        |
| 复习题                                 | 234        |
| 习题                                  | 235        |
| <b>第十章 平面电磁波</b>                    | <b>238</b> |
| § 10.1 波动方程                         | 238        |
| § 10.2 理想电介质中的平面电磁波                 | 239        |
| § 10.3 电磁波的极化                       | 247        |
| § 10.4 导电媒质中的正弦平面电磁波                | 251        |
| § 10.5 向任意方向传播的平面电磁波                | 261        |
| § 10.6 电磁波入射到电介质的分界面上时所引起的反射和<br>折射 | 264        |
| § 10.7 全折射和全反射                      | 270        |
| § 10.8 导电媒质的表面上的反射                  | 276        |
| 复习题                                 | 278        |
| 习题                                  | 280        |
| <b>第十一章 导行电磁波</b>                   | <b>286</b> |
| § 11.1 导行波的电磁场                      | 286        |
| § 11.2 矩形波导管中的电磁波                   | 289        |
| § 11.3 $TE_{10}$ 型电磁波               | 297        |
| § 11.4 波导管中波的衰减                     | 301        |
| § 11.5 传输线上的 TEM 波                  | 305        |
| § 11.6 相速度和群速度                      | 309        |
| § 11.7 谐振腔                          | 312        |
| § 11.8 谐振腔的品质因数                     | 316        |
| 复习题                                 | 318        |
| 习题                                  | 320        |
| <b>第十二章 辐射</b>                      | <b>323</b> |
| § 12.1 推迟位                          | 323        |
| § 12.2 赫芝偶极子的辐射                     | 327        |
| § 12.3 辐射功率                         | 331        |
| § 12.4 磁偶极子天线的辐射                    | 334        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| § 12.5 半波天线·····            | 336        |
| § 12.6 方向性系数和增益·····        | 340        |
| § 12.7 天线阵·····             | 341        |
| 复习题·····                    | 346        |
| 习题·····                     | 347        |
| <b>第十三章 电荷在电磁场中的运动·····</b> | <b>350</b> |
| § 13.1 点电荷在静电场中的运动·····     | 350        |
| § 13.2 点电荷在静磁场中的运动·····     | 353        |
| § 13.3 点电荷在正交场中的运动·····     | 357        |
| 复习题·····                    | 361        |
| 习题·····                     | 361        |
| <b>附录·····</b>              | <b>364</b> |
| A 正交曲线坐标系·····              | 364        |
| B 矢量公式·····                 | 365        |
| C 亥姆霍兹定理·····               | 366        |
| D $\delta$ 函数·····          | 367        |
| E 国际单位制·····                | 370        |
| <b>习题答案·····</b>            | <b>372</b> |
| <b>参考书目·····</b>            | <b>386</b> |

# 第一章 真空中的静电场

电现象和磁现象都是由电荷产生的。静止的电荷产生静电场；等速运动的电荷不但产生电场，同时还产生磁场，并且电场与磁场相互独立；加速运动的电荷产生动态的电磁场，动态的电场与磁场的相互作用，形成传播的电磁波。本章将讨论真空中静止电荷所产生的静电场。静电场的基本性质归结为两个基本定律，根据静电场的基本定律，引入电位。电场强度与电位之间有两个重要关系。电位的分布遵循一定变化规律。

## § 1.1 库 仑 定 律

电荷是所有电磁现象的起源，电荷有正负之分，正电荷的出现总是伴随着负电荷的出现，所有电荷都是电子电荷  $e$  ( $e = -1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ ) 的绝对值的整倍数。电荷可以分布在空间里，也可以分布在导体的表面上，电荷之间存在着相互作用力。如果两个带电体的尺寸都远比带电体之间距离小得多，则带电体的电荷都可以看作点电荷。库仑通过实验总结出两个点电荷相互作用的定律，我们称之为库仑定律。图 1-1 表示真空中的两个点电荷  $Q'$  和  $Q$ ，从原点  $O$  到  $Q'$  和  $Q$  的矢量分别为  $\mathbf{r}'$  和  $\mathbf{r}$ ， $\mathbf{r}'$  和  $\mathbf{r}$  分别称为  $Q'$  和  $Q$  的位置矢量。实验指出， $Q'$  作用于  $Q$  的力可以写成

$$\mathbf{F}_{Q' \rightarrow Q} = \frac{Q'Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{R}}{R^3} \quad (1-1)$$

上式就是真空中的库仑定律，其中  $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$  代表自  $Q'$  到  $Q$  的矢

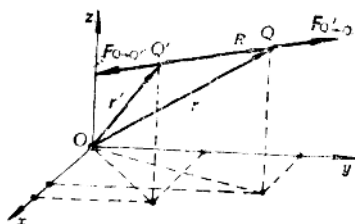


图 1-1 真空中的两个点电荷

量,  $R=|R|$  代表  $Q'$  与  $Q$  之间距离。 $\epsilon_0$  是表征真空电性质的物理量, 我们称它为真空电容率。 $\epsilon_0$  的单位为

$$\frac{\text{库伦}^2}{\text{牛顿} \cdot \text{米}^2} = \frac{\text{库伦}^2}{\text{焦耳} \cdot \text{米}} = \frac{\text{法拉}}{\text{米}}$$

国际单位制中,  $\epsilon_0 = 1/(36\pi \times 10^9) \approx 8.8538 \times 10^{-12} \text{F/m}$

如果把式 (1-1) 中的  $R$  换成  $-R$ , 就得到  $Q$  作用于  $Q'$  的力  $F_{Q' \rightarrow Q} = -F_{Q \rightarrow Q'}$ , 可见两个静止点电荷的相互作用力符合牛顿第三定律。

## § 1.2 电 场 强 度

电荷  $Q'$  之所以对电荷  $Q$  产生力作用, 是由于  $Q'$  在它的周围产生电场, 此电场对  $Q$  的作用表现为  $Q'$  对  $Q$  产生作用力。电场是客观存在着的一种物质, 虽然我们不能直接看到它, 但是我们可以测出它。考虑到  $Q'$  所产生的电场对  $Q$  的作用力与  $Q$  的大小成正比, 我们把作用于单位试验电荷的力作为描述电场的物理量, 此物理量称为电场强度。假设试验电荷  $\Delta Q$  在电场中受力  $F$ , 则电场强度的定义为

$$E = \lim_{\Delta Q \rightarrow 0} \frac{F}{\Delta Q} \quad (1-2)$$

$E$  为电场强度矢量, 它的单位为  $V/m$  (牛顿/库仑 = 焦耳/(库仑·米) = 伏/米)。 $E$  为矢量函数, 它可以用直角坐标的分量表示

$$E = e_x E_x + e_y E_y + e_z E_z \quad V/m \quad (1-3)$$

上式中的  $e_x$  代表沿  $x$  轴方向上的单位矢量,  $e_y$  和  $e_z$  分别代表沿  $y$  轴和沿  $z$  轴方向上的单位矢量, 矢量  $E$  的  $x$  轴分量  $E_x = E \cdot e_x$ , 矢量  $E$  的  $y$  轴分量  $E_y = E \cdot e_y$ , 矢量  $E$  的  $z$  轴分量  $E_z = E \cdot e_z$ ,  $E_x$ ,  $E_y$  和  $E_z$  都是标量函数。

因为电场对单位电荷的作用力为  $E$ , 所以电场对电荷  $Q$  的作用力为

$$F = QE \quad (1-4)$$

库仑定律(1-1)可以写成下面形式

$$F_{Q' \rightarrow Q} = QE$$

其中

$$E = \frac{Q'}{4\pi\epsilon_0} \frac{R}{R^3} \quad (1-5)$$

$E$  为点电荷  $Q'$  所产生的电场强度矢量。如果真空中共有  $N$  个点电荷, 则任意点  $P$  上的总电场强度等于各个点电荷所单独产生的电场强度的矢量和

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N Q'_i \frac{R_i}{R_i^3} \quad (1-6)$$

其中  $R_i$  代表自  $Q'_i$  到  $P$  的矢量。

以上的叙述是根据叠加原理得来的。

因为一个点电荷的电场强度是电荷的线性函数, 所以  $N$  个点

电荷的电场强度可以运用线性叠加求得。叠加原理说明任意两电荷之间作用力与其他电荷的存在无关。图 1-2 为  $N=3$  的情形。

以上方法同样可以用来计算分布电荷的电场强度。图 1-3 分别表示电荷连续分布在体积  $V$  里、分布在表面  $S$  上以及分布在细

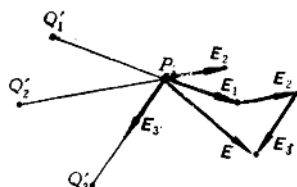


图 1-2 三个点电荷在任意点  $P$  所产生的电场强度

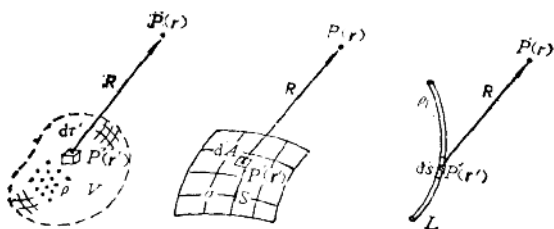


图 1-3 计算分布电荷的电场强度

线  $L$  上的情形。如果电荷以体密度  $\rho \text{ C/m}^3$  分布在体积  $V$  里，我们就把体积元  $d\tau$  里的电荷  $\rho d\tau$  看作一个点电荷，它所产生的电场强度为

$$dE(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{R}}{R^3} \rho(\mathbf{r}') d\tau$$

体积  $V$  里的分布电荷所产生的电场强度是上式的体积分

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\mathbf{R}}{R^3} \rho(\mathbf{r}') d\tau \quad (1-7)$$

如果电荷以面密度  $\sigma \text{ C/m}^2$  分布在表面  $S$  上，则面积元  $dA$  上的电荷  $\sigma dA$  可以看作点电荷，因而面积  $S$  上的表面电荷所产生的电场强度为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\mathbf{R}}{R^3} \sigma(\mathbf{r}') dA \quad (1-8)$$

如果电荷以线密度  $\rho_l \text{ C/m}$  分布在细线  $L$  上，则线元  $ds$  上的电荷  $\rho_l ds$  可以看作点电荷，故细线  $L$  上的线电荷所产生的电场强度为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{\mathbf{R}}{R^3} \rho_l(\mathbf{r}') ds \quad (1-9)$$

### § 1.3 电通量密度

为了更好地描述电场与电荷的联系，我们需要引入电通量的概念。电通量是由流体的流量引伸过来的量，流体中单位时间通过一定面积的流量称为通量。在垂直于流速方向的平面里，单位面积所通过的通量称为通量密度，通量密度的单位为通量数/米<sup>2</sup>。根据式(1-5)， $\epsilon_0 E$  的单位为 C/m<sup>2</sup> (库仑/米<sup>2</sup>)，它的单位与通量密度的单位相当，因而可把它看作电通量密度。电荷是电通量的源，它向四周发出电通量。真空中的电通量密度由下式定义

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (1-10)$$

$\mathbf{D}$  为电通量密度矢量，它的方向处处与电场强度矢量的方向一致。由已知的电通量密度，可以计算垂直于矢量  $\mathbf{D}$  的面积元  $dA_n$  所通过的电通量  $d\psi$ ， $d\psi = \mathbf{D} dA_n$ 。这样，电通量密度可以定义如下

$$\mathbf{D} = \frac{d\psi}{dA_n} \quad (1-11)$$

电场中通过任意面积元  $dA$  的电通量为

$$d\psi = \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = D dA \cos \theta \quad (1-12)$$

其中  $d\mathbf{A} = \mathbf{e}_n dA$ ， $dA$  代表面积元的面积，而  $\mathbf{e}_n$  代表沿此面积元的法线方向上的单位矢量， $\theta$  为矢量  $\mathbf{E}$  与矢量  $\mathbf{e}_n$  的交角，如图 1-4

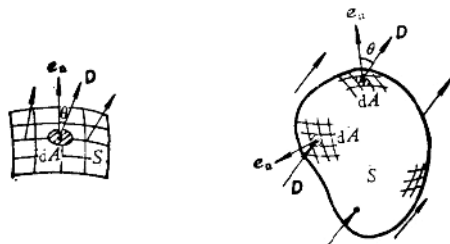


图 1-4 电通量的意义

所示。通过有限面积  $S$  的电通量是式(1-12)的面积分

$$\Psi = \int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} \quad (1-13)$$

通过闭合面  $S$  的电通量为  $\Psi = \oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$ 。我们规定闭合面上所有面积元的法线向外为正,故  $\theta$  为锐角与电通量为正值相对应,而  $\theta$  为钝角与电通量为负值相对应,前者表示电通量“流出”闭合面,而后者表示电通量“流进”闭合面。

有了电通量概念,我们就能够用图形表示电场。为此,我们在电场中作许多小管,每根管的侧面处处与矢量  $\mathbf{E}$  相平行,图 1-5 表示其中的一根管,此管的任意截面上所通过的电通量都相同,这样的管称为电通量管。假设此管的两个截面  $dA_1$  和  $dA_2$  上的电通量密度分别为  $D_1$  和  $D_2$ ,则  $D_1 dA_1 = D_2 dA_2$ 。因此,电通量密度大的地方管的截面就小,电通量密度小的地方管的截面就大。让我们设想整个空间充满着许多小电通量管,这些管所通过的电通量都相同。这些管的轴线组成空间里的许多曲线,称为电通量线。任意点上的电通量密度矢量的方向与通过该点的电通量线的切线方向一致,而电通量密度的值与该点电通量线的密度成正比,通常取电通量线的密度等于电通量密度的值。电通量线是从正电荷发出而终止于负电荷或无限远处。因为电通量密度矢量与电场强度矢量方向一致,所以上述曲线也可以表示电场强度的分布。表示电场强度分布的曲线称为电力线,电力线上任意点的切线方向与该点的

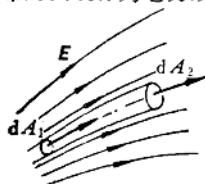


图 1-5 电通量管

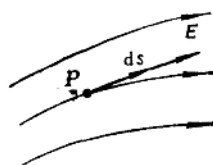


图 1-6 电力线上的矢量  $d\mathbf{s}$  与矢量  $\mathbf{E}$  方向一致