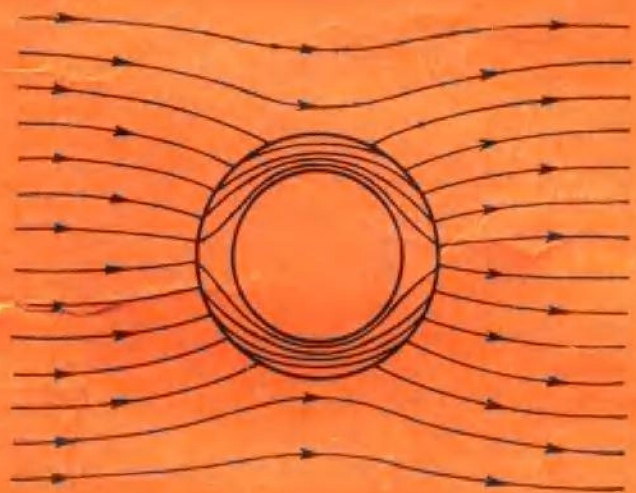


电动力学

虞福春 郑春开 编著



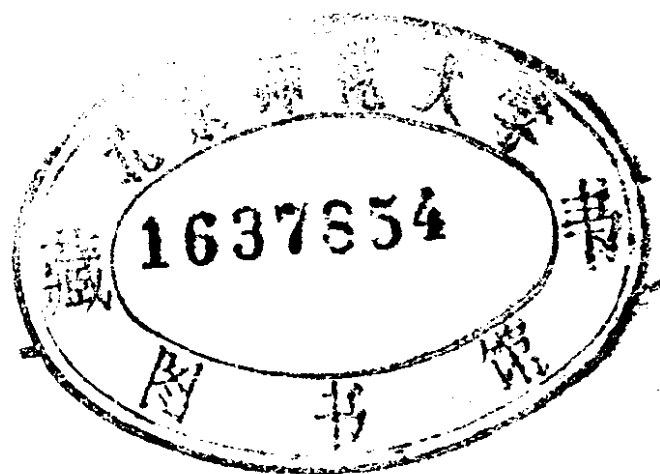
北京大学出版社

北 京 大 学 教 材

电 动 力 学

虞福春 郑春开 编著

381141/14



北 京 大 学 出 版 社

新登字(京)159号

电 动 力 学

虞福春 郑春开 编著

责任编辑: 瞿 定

*

北京大学出版社出版发行

(北京大学校内)

国防科工委印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

850×1168毫米 32开本 13.625印张 350千字

1992年10月第一版 1992年10月第一次印刷

印数: 0001—4,000册

ISBN 7-301-01887-8/O·287

定价: 9.00元

内 容 简 介

本书系统地阐述了经典电动力学的基本概念、原理及处理问题的方法，并注意与实际的联系。全书内容包括：静电场，稳恒电流的磁场，随时间变化的电磁场，电磁波的传播，等离子体电动力学，狭义相对论，电磁辐射，电磁场与介质的相互作用。书末附有七个附录和相当数量的习题及答案，并列出了主要的参考书目。

本书可作为理工科大学和高等师范院校各物理类专业、无线电技术专业等的教材或参考书，也可供研究生、教师和科研工作者参考。

前 言

本书是根据编者在北京大学技术物理系十余年讲授《电动力学》讲稿、讲义的基础上编写的。书中的体系、内容的选择和讲授的方法，是在多年的教学实践中经过了多次的尝试和调整才确定下来的。现将本书编写所考虑的原则说明如下：

1. 关于《电动力学》的教学内容的体系

在这个问题上有两种选择。一种选择是从麦克斯韦方程组出发，讲解电磁场及其规律、狭义相对论和经典电子论，把静电学和稳恒电流的电磁现象等内容，作为麦克斯韦电磁理论的特殊例子处理。按这种讲法，要保持整体内容的系统性和逻辑性，静电学和静磁学内容不应占据太多篇幅。这样处理将和普通物理中电磁学部分的衔接有一定的矛盾。若静电学和静磁学的篇幅占得太多，又会使整体内容的系统性和逻辑性不很协调。另一种选择是本书所采用的，遵循《电动力学》这门科学的历史发展顺序，即从实践到理论又回到实践的顺序，从库仑平方反比定律开始，按静电学、稳恒电流的磁场、法拉第电磁感应定律的发现和应用，上升到麦克斯韦的电磁理论以及后面的发展。这种讲法能够使学生领会理论来源于实践又回到实践，而且理论也具有其自身的发展规律这一科学真理。本书采用这个体系的另一重要目的，是使学生认识到平方反比定律在物理学整体上所占的重要地位。它远远超过了库仑当时的发现，因为它联系着现代物理学的许多重要问题，如光子的静止质量是否为零，狭义相对论的出发点——光速不变的前提等。为此目的，本书在静电学的最后加入了平方反比定律实验检验的内容和在狭义相对论中增加了光子静止质量是

否为零的问题的讨论。这种讲法，是不把《电动力学》作为一个完整的封闭理论，而强调它与其它物理现象和规律的联系，书中在不少地方指出了这一点。特别是，经典电动力学是建立在点电荷模型之上的，电子间的相互作用遵守库仑平方反比定律，更进一步从量子电动力学的观点看，是电子间交换虚光子所形成的交换力。

2. 关于本书内容轻重的安排

《电动力学》是一门重要的基本理论课，应着重阐明电磁理论的基本物理概念和规律，保持其理论的系统性。但电磁理论、概念在许多科学领域也有很重要的应用，这方面的内容也十分丰富，本书也将适当地介绍。因此，作为教材，书中的内容可分为三类：

(i) 必须掌握的基本概念、规律和理论方法，是本书的核心内容，保证系统的阐述，要求学生深入理解并牢固地掌握。

(ii) 书中的一部分只要求学生理解不一定深入掌握的概念、原理和结论。

(iii) 为了扩大知识面，反映科学的新发展，对于那些与电动力学基本规律和原理有关的更深入的问题，书中也简单地介绍，或给出参考文献。这部分只要学生知道而已。

3. 理论与实际的结合

在实际应用中有重要意义的电磁理论、计算方法和结果，本书通过一些典型例子予以介绍。为了着重突出物理内容，尽量避免流于数学形式，凡数学推导中不涉及物理内容的推理、物理规律和近似条件的运用，纯属数学运算的步骤一概从略。

4. 其他

本书在狭义相对论的讲法上基本遵循爱因斯坦 1905 年的原

著，加入必要的前相对论(pre-relativity)的一些实验以及相对论应用的例子。

本书加入等离子体电动力学和超导电动力学的基本内容。

本书引用编者在科研中应用电磁理论所获得的一些概念和结果，作为例子举出，以加深学生对基本概念和理论的理解并扩大其知识面。

为了便于教学，本书附有七个附录以备查考。还选编一百多道习题，附有答案，以供教师选用。

本书内容不一定要全部讲授，可以根据不同专业的需要适当取舍。供选择的章节或内容在目录中加了“*”号。编者认为，这部分内容的概念、结论还是重要的，在实际工作中仍然有用。所以建议，这部分内容的有关公式、理论推导和证明，不一定细讲，甚至可以不讲，可以简要地介绍其中的物理概念、结论或结果，这对扩大学生的知识面、提高分析问题和解决问题的能力还是有好处的。

本书根据国家有关主管部门的规定，采用国际单位制。考虑到目前仍有不少文献或书籍采用高斯单位制，为了学习和使用上的方便，在附录 F 中给出用两种单位制的公式之间的转换关系和主要公式的对照表。

本书在编写和出版过程中，得到北京大学技术物理系、物理系、无线电电子学系和地球物理系的许多老师以及北京大学出版社、北京大学教材委员会多方面的关心、支持与帮助，编者表示衷心的感谢。

由于编者的水平所限，书中的缺点与错误在所难免，敬请阅读本书的广大教师和读者指正。

编者

1991 年 9 月于北京

目 录

前 言	1
第一章 静电学	1
§1.1 真空中的静电场	1
1. 库仑定律和电力的叠加性(1) 2. 真空中的电场及电场叠加原理(8)	
§1.2 静电场的奥-高定理与场的无旋性	5
1. 奥-高定理(5) 2. 静电场的无旋性(7) 3. 静电场的边值关系(8)	
§1.3 介质中的静电场	10
1. 电介质的极化与极化强度(10) 2. 电介质中的电场与电感应强度(13)	
3. 分子极化率模型(15)	
§1.4 静电势, 泊松方程与拉普拉斯方程	18
1. 静电势与电势叠加原理(18) 2. 泊松方程与拉普拉斯方程(20)	
§1.5 静电问题的唯一性定理	21
1. 普遍的情况(21) 2. 具有导体系的特殊情况(23) 3. 叠加定理(25)	
4. 用分离变量法求解拉普拉斯方程(26)	
§1.6 格林等效层定理, 镜像法	28
1. 格林等效层定理(29) 2. 格林等效层定理应用举例(31) 3. 镜像法(34)	
*§1.7 静电问题的格林函数法	38
1. 格林函数(38) 2. 静电势普遍公式(38)	
*§1.8 导体椭球在外场中的极化与椭球场强计原理	42
1. 导体椭球在均匀的外场中的电势分布(42) 2. 导体椭球感生的电偶极矩——各向异性例子(44) 3. 椭球场强计原理(45)	
§1.9 静电能	47
1. 真空中点电荷系的静电能(47) 2. 电荷连续分布时的静电能(48)	
3. 导体系的静电能(49)	
§1.10 电多极矩场及其与外加电场的相互作用	50
1. 电多极矩的电场(50) 2. 电多极子与外电场的相互作用(55)	
§1.11 库仑平方反比定律的检验	57
1. 库仑平方反比定律实验检验的重要意义(57) 2. 库仑定律的实验检验	

第二章 稳恒电流磁场	63
§2.1 稳恒电流与稳恒电场	63
1. 电流密度及其连续性方程(63)	
2. 欧姆定律及维持稳恒电流的条件(65)	
3. 稳恒电流与稳恒电场分布(68)	
§2.2 真空中稳恒电流的磁场	69
1. 电流间相互作用的 安培 定律(70)	
2. 电流的 磁场, 毕奥-萨伐尔定律(73)	
3. 磁场的散度与旋度(73)	
4. 磁感应强度 的边值关系(75)	
§2.3 磁介质中的磁场	75
1. 磁介质的磁化和磁化强度(75)	
2. 磁介质中的 磁场强度, 磁介质中的环路定理(78)	
3. 在磁介质中磁场强度和磁感应强度所满足的边值关系(80)	
§2.4 静磁场的矢势与环形电流的磁场	81
1. 静磁场的矢势及其满足的微分方程(81)	
2. 环形电流分布的磁场(83)	
§2.5 静磁场的标势与静磁屏蔽	90
1. 静磁场的标势及其满足的微分方程(90)	
2. 静磁屏蔽(92)	
*§2.6 永磁体的磁场	93
§2.7 磁场的能量	96
1. 两个闭合电流回路相对位置改变的过程中磁力所做的功(96)	
2. 电流系统的势函数(99)	
3. 移动 电流回路时的 能量交换(100)	
4. 磁场能量(102)	
§2.8 磁多极矩的磁场及其与外磁场的相互作用	103
1. 磁多极矩的磁场(103)	
2. 磁多极子与外磁场的相互作用(106)	
第三章 随时间变化的电磁场	109
§3.1 法拉第电磁感应定律	109
§3.2 麦克斯韦方程组与洛伦兹力公式	111
1. 麦克斯韦方程组(112)	
2. 洛伦兹 力公式(116)	
3. 麦克斯韦方程组的对称性与磁单极子(117)	
§3.3 电磁场的能量与能量守恒定律	119
§3.4 电磁场的动量与动量守恒定律	121
§3.5 电磁场的波动性	127
*§3.6 麦克斯韦方程组的完备性及其解的唯一性	130
§3.7 电磁场的矢势与标势	132
1. 电磁场的矢势与标势, 规范变换与规范不变性(132)	
2. 矢 势 与 标 势 所	

满足的微分方程(133) 3. 推迟势(135) 4. 阿哈罗诺夫-玻姆效应(136)

第四章 电磁波的传播139

§4.1 电磁波在绝缘介质分界面上的反射与折射139

1. 反射与折射定律(140) 2. 菲涅耳公式(141) 3. 反射系数与透射系数(142) 4. 波反射时的半波损失(144) 5. 全反射(146)

§4.2 电磁波在导电介质中的传播及其在导体表面上的反射149

1. 电磁波在均匀导电介质中的传播(149) 2. 电磁波在导体表面上的反射(152) 3. 透入金属内部的电磁波(153)

§4.3 惠更斯-菲涅耳原理与电磁波的衍射155

1. 基尔霍夫公式(155) 2. 惠更斯-菲涅耳原理(156) 3. 基尔霍夫的衍射理论(158)

§4.4 电磁波在波导中的传播161

1. 波导中电磁场的解(162) 2. 矩形波导中传播的电磁波(164) *3. 圆柱形波导中传播的电磁波(168)

§4.5 波导的波阻抗, 传输功率, 衰减171

1. 电磁导波的波阻抗(171) 2. 导波能流及波导的传输功率(172) 3. 电磁波的衰减(174)

§4.6 电磁波在同轴传输线中的传播177

1. 同轴传输线中传播的电磁波(177) 2. 同轴传输线中传播的 TEM 主波(179) 3. 同轴传输线的电报方程(181)

§4.7 电磁驻波与谐振腔183

1. 谐振腔的电磁驻波与谐振频率(184) 2. 谐振腔的品质因素与谐振曲线(187)

*§4.8 测量电磁场的微扰法191

§4.9 电磁波在等离子体中的传播196

1. 无磁场情况(196) 2. 有磁场情况(199)

第五章 等离子体电动力学204

§5.1 等离子体的定义与电荷屏蔽现象204*

1. 等离子体的定义(204) 2. 电荷屏蔽现象(204) *3. 等离子体的描述与研究方法(206)

§5.2 带电粒子在电磁场中的运动207

1. 带电粒子在均匀恒定磁场中的运动(207) 2. 电场及其它外力引起的漂移(209) 3. 带电粒子在不均匀磁场中的漂移(211)

§5.3 浸渐不变量及其应用	216
1. 磁矩 μ 的不变性(216) 2. 纵向不变量 J 与费米加速(220)	
§5.4 磁流体力学方程	222
1. 磁流体力学的基本方程式(223) 2. 磁应力与磁压强(224)	
§5.5 磁场的冻结与扩散	225
1. 磁场的冻结(226) 2. 磁场的扩散(228) 3. 磁雷诺系数(229)	
*§5.6 磁流体的平衡与箍缩效应	229
1. 磁流体的平衡(229) 2. 箍缩效应(230)	
§5.7 磁流体力学波	233
§5.8 电子等离子体振荡与电子等离子体波	237
1. 电子等离子体振荡(238) 2. 电子等离子体波(240)	
第六章 狭义相对论	244
§6.1 狭义相对论的实验基础及其产生的历史背景	245
1. 牛顿力学与伽利略相对性原理(245) 2. 电磁现象与经典力学原理的矛盾(246) 3. 寻找绝对参考系的实验(247)	
§6.2 狭义相对论基本原理与相对论时空观	252
1. 同时性问题(253) 2. 狭义相对论的基本原理(256) 3. 相对论的时空观(256)	
§6.3 洛伦兹变换和狭义相对论的时空理论	261
1. 洛伦兹变换(262) 2. 狭义相对论的时空理论(266)	
§6.4 四度空间的洛伦兹变换及物理量的变换性质	276
1. 四度空间及洛伦兹变换形式(276) 2. 四度空间中物理量的变换性质(278) 3. 四度波矢量与相对论多普勒效应(280)	
§6.5 麦克斯韦方程组的协变性	281
1. 四度电流密度及连续性方程的协变性(282) 2. 四度势及电磁势方程的协变性(283) 3. 场强张量(284) 4. 麦克斯韦方程组的协变性(285)	
§6.6 电磁场的变换及其能量与动量守恒的协变性	286
1. 电磁场的变换(286) 2. 四度洛伦兹力密度与电磁场应力能量动量张量(288) 3. 电磁场能量动量守恒的协变式(289)	
§6.7 相对论力学	290
1. 四度速度,四度动量,质能关系式(290) 2. 牛顿力学定律的协变式(293)	
*3. 高能粒子反应的运动学(296)	
§6.8 带电粒子在电磁场中运动的拉氏函数与哈密顿函数	301

7/11/14

1. 带电粒子在电磁场中运动的拉氏函数与拉氏方程(301)	2. 带电粒子在电磁场中运动的哈密顿函数与哈密顿方程(302)
§6.9 电磁场的拉氏函数, 光子的静止质量问题	303
1. 电磁场的拉氏函数和普罗卡方程(303)	2. 光子的静止质量问题(305)
第七章 电磁辐射	308
§7.1 电偶极振子的电磁场	308
§7.2 多极辐射	312
1. 推迟势的多极展开(312)	2. 磁偶极与电四极辐射(313)
*3. 电多极辐射与磁多极辐射(315)	
§7.3 从中央馈送的直线天线辐射	318
§7.4 运动电荷的电磁场	322
1. 李纳-维谢尔势(322)	2. 运动电荷的电磁场(324)
§7.5 加速运动电荷的辐射	326
1. 辐射场及辐射功率的角分布(326)	2. 辐射总功率(328)
§7.6 韧致辐射与直线加速器中的辐射	329
§7.7 同步辐射	331
1. 辐射功率角分布和总功率(331)	*2. 同步辐射的频谱(334)
*3. N 个回旋电子的相干辐射(336)	
*§7.8 切伦科夫辐射	338
§7.9 电子的电磁质量与辐射阻尼力	342
1. 电子的电磁质量(343)	2. 辐射阻尼力(346)
§7.10 谐振电子的辐射阻尼和光谱线的自然宽度	347
第八章 电磁场与介质的相互作用	351
§8.1 电子对电磁波的散射与吸收	351
1. 电子对电磁波的散射(351)	2. 电子对电磁波的吸收(356)
§8.2 介质的色散	357
1. 介质色散的经典电子模型(357)	2. 反常色散与共振吸收(359)
§8.3 导体的色散——电导率与介电常数	361
§8.4 超导体电动力学	363
1. 超导体的电磁性质(364)	2. 超导体电动力学(366)
附录	371
A 矢量分析常用公式及有关定理(371)	B 正交曲线坐标(374)
C δ 函数	

数(379) D 球函数(381) E 柱函数(384) F 单位制的换算及主要公 式的代换(387) G 有关的物理学常数(392)	
习题及答案	393
主要参考书目	420

第一章 静 电 学

本章从静电学的基本实验规律——库仑定律与电力的叠加性出发，引进电场强度概念，然后讨论静止电荷分布所产生的静电场的性质及求解静电场的基本原理与方法。

§1.1 真空中的静电场

1. 库仑定律和电力的叠加性

1785年，库仑首先发表了他的实验结果，即两个点电荷之间相互作用力的规律——库仑定律。它指出，在真空中两个静止的点电荷（即电荷分布的几何线度远小于它们之间的距离）之间的相互作用力的大小与它们的电量 q_1 和 q_2 的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比，其方向是沿着它们的连线，如图 1.1.1 所示。因此， q_1 作用于 q_2 的力为

$$\mathbf{F}_2 = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \left(\frac{\mathbf{r}_{21}}{r_{21}} \right), \quad (1.1.1)$$

其中 $\mathbf{r}_{21} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$, $r_{21} = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|$ 。

同理 q_2 作用于 q_1 的力为

$$\mathbf{F}_1 = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \left(\frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \right) = -\mathbf{F}_2, \quad (1.1.2)$$

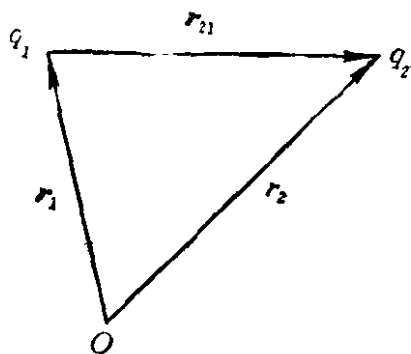


图 1.1.1

式中的系数 k 与所选取的单位制有关，如取高斯单位制时 $k=1$ 。本书采用国际单位制，则 $k=1/4\pi\epsilon_0$ ， ϵ_0 为真空介电常数， $\epsilon_0=10^7/4\pi c^2=8.854\times 10^{-12}\text{F/m}$ 。

如果一个点电荷 q ，其位置矢量 $\mathbf{r}$ ，同时受到许多点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 的作用，实验证明：点电荷 q 所受的力是各个点电

荷 $q_i (i=1, 2, \dots, n)$ 单独存在时对 q 作用力的矢量和, 即

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_i}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|^2} \frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}, \quad (1.1.3)$$

式中 $\mathbf{r}_i$ 是 q_i 的位置矢量, 这就是电力的叠加性。注意, (1.1.3) 式所表示的电力叠加性并不是理所当然的, 也不是库仑定律推出来的, 它是根据大量实验总结出来的一条实验规律, 反映了电荷相互作用的一个基本特性。

实际上电荷分布是不连续的, 每个微观带电粒子的电荷都是电子电荷的整数倍(即量子化的)。但在宏观电动力学中, 当考察物体的宏观性质时, 所取的宏观上足够小的体积元内一般都包含大量的带电粒子, 因此电荷可以看成是连续分布的。于是可以引进体电荷密度 ρ 来描述空间电荷分布, 其定义:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \Delta q / \Delta V, \quad (1.1.4)$$

Δq 是空间任意小体积元 ΔV 中的电量。有时电荷是分布在物体表面上很薄的一层(如导体表面)或是两种不同介质的分界面上, 这时对于电荷薄层的厚度 τ 不感兴趣, 于是可引入面电荷密度 σ 来描述电荷分布。面电荷密度定义为:

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \Delta q / \Delta S, \quad (1.1.5)$$

Δq 是曲面 S 上小面元 ΔS 内的电荷。

在计算两个带电体之间的相互作用力时, 连续分布的电荷可以看作是由无限多个点电荷所组成, 每一点电荷的电量为 $dq = \rho dV$ 或 $dq = \sigma dS$ 。因此, 根据库仑定律和电力的叠加性, 分布在两个体积 V_A 和 V_B 内的电荷 A 作用于电荷 B 的力为

$$\mathbf{F}_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V_A} \int_{V_B} \frac{\rho_A(\mathbf{r}_A) \rho_B(\mathbf{r}_B)}{|\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A|^3} (\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A) dV_A dV_B. \quad (1.1.6)$$

对于点电荷, 也可以引用一种特殊的连续函数来表示电荷的密度分布。这种函数就是狄拉克在 1926 年首先引用的所谓 δ 函数

(见附录C)。

因为点电荷可以看成体积很小而密度很大的一个带电球体的极限，所以可以用 δ 函数来表示点电荷的密度分布。设空间有 N 个点电荷，处在 $\mathbf{r}_i$ 处的第 i 个点电荷的电量为 q_i ，则电荷密度分布可表示为

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N q_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), \quad (1.1.7)$$

而

$$\int_{V_i} \rho(\mathbf{r}) dV = q_i, \quad (1.1.8)$$

这里 V_i 只包含第 i 个点电荷的任意体积。在宏观电动力学中，一般的讨论都采用体电荷密度 ρ 来表示连续电荷分布，它 also 包括了点电荷情况。

2. 真空中的电场及电场叠加原理

电场的概念有着自己发展的历史。我们今天对电场的了解和认识比当初引进电场概念时的认识要深刻得多了。

最初，电场的概念只是作为描述电力作用的一种手段而引入的。

在(1.1.3)式中，我们可以看到，电荷 q (可以称它为试探电荷) 所受的力是由两个因素决定的，即其它电荷 q_i (可以称它为场电荷) 的大小及其位置和电荷 q 的大小及其位置。这样，试探电荷所受的力与它的电量 q 成正比，因此，(1.1.3) 式可改写为

$$\mathbf{F} = q \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad (1.1.9)$$

其中

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_i). \quad (1.1.10)$$

显然， $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 可以完全不依赖于试探电荷 q ，只要 q 的存在不影响场电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 的大小及位置。 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 是由场电荷的大

小、位置所决定的空间位置的函数，称为电场强度。我们也可以从另一观点出发，认为在电荷周围空间存在特殊的物理性质，在此空间中各点总存在着电的作用，这种电作用的存在是不随有无试探电荷而转移的，它是由电荷所激发的。换句话说，在电荷的周围空间本来就存在电作用的性质，只是在空间中引入试探电荷后，这种电作用才以力的作用形式显示出来。我们把这种电荷在其中会受到力作用的空间称为电场。电场是由电荷在空间激发产生的，电场强度 $E(\mathbf{r})$ 就反映了电场本身的性质。在本节似乎只能看作纯粹为了方便而引入的一种概念。但进一步的实验事实证明了电磁场是物质存在的另一种形态。它可以脱离电荷、电流而独立存在，它的电作用是以有限速度传播的，它和原子分子组成的实物物质一样，具有能量和动量等。电磁场是物质的一种形态，在今天已经是确信无疑了。在这里由于我们只考察相对于观察者为静止的电荷在周围空间产生的场(静电场)，因此场的物质性还不能被充分地显示出来，但在本书的后续部分，尤其是在随时间迅速变化的电磁场(电磁波)中，电磁场的物质性就会更明显地表现出来。

显然，(1.1.10)式也可改写为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n = \sum_i \mathbf{E}_i, \quad (1.1.11)$$

其中

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \quad (i=1, 2, \cdots, n)$$

表示 q_i 单独存在时在空间一点 $\mathbf{r}$ 的电场强度，而 $\mathbf{E}$ 表示 $q_1, q_2, \cdots, q_n$ 同时存在时在 $\mathbf{r}$ 点的总电场强度。因此，(1.1.11) 式表明，点电荷系在空间一点产生的电场强度等于各点电荷单独存在时在该点所产生的电场强度的矢量和。这就是电场强度的叠加原理。从本质上讲，电场强度叠加原理是电力叠加性的直接结果。

对于连续的电荷分布，设体电荷密度为 $\rho(\mathbf{r})$ ，则 (1.1.10)