



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

电磁学简明教程

Diancixue Jianming Jiaocheng

易溥藤 编著

北京师范大学出版社

0441-43

748

课程教材

电磁学简明教程

易溥藤 编著

北京师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁学简明教程/易溥藤编著. — 北京: 北京师范大学出版社, 2001.8
面向 21 世纪教材
ISBN 7-303-05865-6

I. 电… II. 易… III. 电磁学-师范大学-教材
IV. 0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 054305 号

北京师范大学出版社出版发行
(北京新街口外大街 19 号 邮政编码: 100875)

出版人: 常汝吉

北京东方圣雅印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 17.25 字数: 300 千字

2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1~3 000 定价: 21.00 元

前 言

《电磁学简明教程》是教育部“高等师范教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”项目“面向 21 世纪普通物理课程体系与教学内容改革的研究”成果之一。

现行电磁学教材内容和体系已相当成熟和完善,在此基础上如何进行改革以适应素质教育的需要,任务艰巨。本书的编写只是初步尝试,考虑如下:

双线体系 以电场的高斯定理、环路定理和磁场的高斯定理、环路定理作为贯穿全书的主线。但用通量和环流描述场是否有源、有旋,十分抽象,本书以库仑力的平方反比律、径向性、球对称性和可叠加性作为分析电场特性的贯穿线索;以安培力的平方反比律、横向性、可叠加性和恒定电流的闭合连续性作为分析磁场特性的贯穿线索。电磁相互作用以光速传播,属于相对论范畴,因此,把相对论引入电磁学教学。磁相互作用是电相互作用在运动电荷之间的一种特殊表现,应该让学生理解电场与磁场这种内在的本质联系。本书以电磁场的相对性和统一性作为贯穿全书的副线,用狭义相对论观点分析电磁现象,并与主线相互呼应。但讲法与理论物理不同,不是从第一原理出发,而是从特殊情况导出一般结论,数学则仅限于代数运算、微积分和矢量分析。

溯源通今 科学思想方法有逻辑思维和直觉思维两种,科学的直觉思维最具有创造性。在讲述最基本的概念和规律时,不仅要讲概念和规律本身,还要适当追溯历史,介绍它们是如何提出的,其前提与结论之间并无逻辑通道,只是科学的想象,正确与否要由实践来检验,这些介绍对于培养学生的科学素质很重要。同时还注意汲取国内外电磁学教学研究成果,对教学中的疑点、难点进行说明,以引导深入思考,培养教学研究能力。

更新内容 随着科学技术的迅猛发展,电磁理论的内涵与外延也在不断丰富。场与物质相互作用研究的深入,使经典理论的局限性日益突出;而广泛地应用又使电磁学涉及的研究领域大大拓宽。为了开阔眼界,激发兴趣,并为以后的学习设些接口,开些窗口,本书简略介绍了与电磁学有关的一些近代内容,如分数电荷、四种基本相互作用、等离子体与超导体、磁单极子、托卡马克、高能加速器、同步辐射等,还对磁场对运动电荷的作用一节做了较大改动。面对内容更新和学时减少,教学必须突出主干,以场为主,以路为辅,导体、电介

质、直流电路精简合并为一章，磁介质并入恒定磁场一章讲述两节，考虑师范院校《电工学》单独设课，故删去交流电路。全书共4章，尽力避免讲解过细、篇幅过长，给学生留有思索余地。

师范特色 作为师范院校用电磁学教材，将大学、中学电磁学内容紧密衔接，有机结合，从分析方法、数学表述、物理内涵多方面进行比较，并从普通物理的角度审视和分析中学物理电磁学内容，以培养学生的教学能力。在习题、思考题中引入一定数量与中学电磁学有关的题目和中学生物理竞赛试题，分析方法不以例题方式讲授，而相对集中，有利于综合比较和灵活运用。

本书内容分为大小两种字体，大字为基本内容，自成体系，小字可供参考。习题、思考题分为基本题、实用题（题前有*号）和难题（题前有**号），书后未附答案但有习题解答可供教师参考。本书可作为高等师范院校物理专业教材，也可供物理教育硕士、其他高等院校物理专业师生、中学物理教师以及中学生物理竞赛培训参考。

审阅本书的梁竹健、韩绍先、陈志方教授和北京师范大学出版社的编辑提出了许多宝贵意见和建议，在这里表示衷心感谢。习题、思考题采用了《电磁学原理在科学技术中的应用》一书中的许多论题，对该书编审者余守宪、黄莹、王云英教授深切致意。

编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，望大家批评指正。

编者

2001年2月

目 录

第 1 章 静电场	(1)
1.1 电荷	(1)
1.1.1 电荷的量子化	(1)
1.1.2 电荷守恒定律	(2)
1.1.3 电荷不变性	(3)
*1.1.4 夸克——分数电荷	(3)
1.2 库仑定律	(4)
1.2.1 电力平方反比律的确立	(5)
1.2.2 库仑定律的矢量表示	(6)
1.2.3 库仑定律的物理内涵	(8)
1.3 电场强度	(9)
1.3.1 电场	(9)
*1.3.2 四种基本相互作用	(10)
1.3.3 电场强度	(11)
1.4 电场高斯定理	(13)
1.4.1 电场线	(13)
1.4.2 电通量	(14)
1.4.3 高斯定理的证明	(16)
1.4.4 高斯定理的物理内涵	(18)
1.5 静电场环路定理	(19)
1.5.1 电场力做功	(19)
1.5.2 静电场力做功与路径无关	(20)
1.5.3 静电场环路定理的证明	(21)
1.5.4 静电场环路定理的物理内涵	(22)
1.6 电势	(22)
1.6.1 电势差和电势	(22)

1.6.2	电荷间相互作用能	(23)
1.6.3	各种静电场电势	(24)
1.6.4	等势面	(25)
1.6.5	电势梯度	(27)
1.7	静电场的分析方法	(28)
1.7.1	概述	(29)
1.7.2	电偶极子	(31)
1.7.3	均匀带电球壳	(32)
1.7.4	均匀带电球体	(34)
1.7.5	无限大均匀带电平面	(35)
1.7.6	均匀带电薄圆盘	(36)
1.7.7	无限长均匀带电直线	(37)
1.7.8	有限长均匀带电直线	(38)
1.7.9	余弦分布带电球壳	(39)
1.8	电荷在电场中的运动	(40)
1.8.1	电荷在匀强电场中偏转	(40)
1.8.2	电荷在电场中加速	(41)
*1.8.3	库仑散射	(42)
1.8.4	虚功原理	(43)
1.8.5	电偶极子在电场中受的力矩和力	(44)
*1.8.6	有极分子间的相互作用	(45)
1.9	静电场的相对性	(45)
1.9.1	电场强度的变换	(46)
1.9.2	匀速运动点电荷电场	(47)
1.9.3	匀速运动点电荷电场的特性	(48)
	思考题	(50)
	习题	(53)
第2章	导体 电介质 直流电路	(63)
2.1	导体的静电平衡状态	(63)
2.1.1	静电平衡条件	(63)
2.1.2	静电平衡状态下的带电导体	(64)
*2.1.3	场致发射显微镜和扫描隧道显微镜	(65)
2.1.4	静电平衡状态下的带电导体空腔	(66)

2.2 静电感应及其分析方法·····	(67)
2.2.1 静电场与导体的相互作用·····	(67)
2.2.2 有导体存在时的惟一性定理·····	(68)
2.2.3 静电感应的分析方法·····	(69)
2.3 电容和电容器·····	(72)
2.3.1 孤立导体电容·····	(72)
2.3.2 电容器·····	(73)
2.3.3 电容器的并联和串联·····	(74)
2.4 电介质的极化·····	(76)
2.4.1 静电场与电介质的相互作用·····	(76)
2.4.2 极化的微观机制·····	(78)
2.4.3 极化的定量描述·····	(79)
*2.4.4 压电陶瓷·····	(82)
2.5 静电场方程·····	(83)
2.5.1 静电场高斯定理和环路定理·····	(83)
2.5.2 电位移矢量·····	(84)
2.5.3 电介质中电场的分析方法·····	(85)
2.6 电场的能量·····	(87)
2.6.1 电荷体系的静电能·····	(87)
2.6.2 电容器储存电能·····	(88)
2.6.3 电场的能量和能量密度·····	(89)
2.7 恒定电流与恒定电场·····	(90)
2.7.1 电流密度·····	(90)
2.7.2 欧姆定律与焦耳定律的微分形式·····	(92)
2.7.3 恒定电场 恒定条件·····	(93)
2.7.4 直流电路中的恒定电场·····	(95)
2.7.5 经典金属电子论·····	(95)
2.8 直流电路基本定律·····	(97)
2.8.1 电源与电动势·····	(98)
2.8.2 闭合电路欧姆定律与含源电路欧姆定律·····	(99)
2.8.3 基尔霍夫定律·····	(100)
2.8.4 直流电路分析方法·····	(103)
*2.9 等离子体与超导体·····	(105)

*2.9.1 等离子体	(105)
*2.9.2 超导体	(106)
思考题.....	(109)
习题.....	(113)
第3章 恒定磁场	(121)
3.1 安培定律	(121)
3.1.1 安培定律的实验基础	(122)
*3.1.2 安培定律的建立	(122)
3.1.3 安培定律的微分形式	(122)
3.1.4 安培定律的物理内涵	(122)
3.2 磁感应强度	(126)
3.2.1 磁场	(126)
3.2.2 毕奥-萨伐尔定律	(126)
3.2.3 安培力公式	(128)
3.2.4 磁感应强度	(128)
3.2.5 低速运动电荷磁场和洛伦兹力公式	(129)
3.3 磁场高斯定理	(132)
3.3.1 磁感应线	(132)
3.3.2 磁通量	(133)
3.3.3 磁场高斯定理的证明	(134)
3.3.4 磁场高斯定理的物理内涵	(135)
*3.3.5 磁单极子	(135)
3.4 安培环路定理	(137)
3.4.1 安培环路定理的表述	(137)
3.4.2 无限长直线电流的磁场	(138)
3.4.3 安培环路定理的证明	(139)
3.4.4 安培环路定理的物理内涵	(140)
3.5 恒定磁场的分析方法	(141)
3.5.1 概述	(141)
3.5.2 无限大载流平面	(142)
3.5.3 载流圆线圈	(143)
3.5.4 载流螺线管	(145)
3.5.5 载流细螺绕环	(147)

3.6 磁场对载流回路的作用	(148)
3.6.1 磁场对载流导线的作用	(148)
3.6.2 磁场对载流线圈的作用	(150)
3.6.3 磁场对磁偶极子的作用	(151)
3.7 磁场对运动电荷的作用	(153)
3.7.1 电荷在匀强磁场中的运动	(153)
3.7.2 电荷在交叉电场磁场中的运动	(155)
3.7.3 电荷在非匀强磁场中的运动	(157)
*3.7.4 高温等离子体磁约束	(158)
*3.7.5 高能粒子加速器	(159)
*3.7.6 霍耳效应和量子霍耳效应	(160)
3.8 恒定磁场方程	(162)
3.8.1 恒定磁场与磁介质的相互作用	(162)
3.8.2 磁化的定量描述	(163)
3.8.3 恒定磁场高斯定理和环路定理	(164)
3.8.4 磁介质中磁场的分析方法	(166)
3.9 物质的磁性	(168)
3.9.1 原子的磁矩	(168)
3.9.2 抗磁质与顺磁质	(169)
*3.9.3 超导体的完全抗磁性	(170)
3.9.4 铁磁质的磁化特性	(171)
3.9.5 铁磁质的磁化机制	(173)
3.10 运动电荷之间的作用力	(174)
3.10.1 平行运动直线电荷之间的作用力	(174)
3.10.2 运动电荷之间的作用力	(176)
3.10.3 运动电荷的磁场及其特性	(178)
3.10.4 洛伦兹力公式	(179)
思考题	(180)
习题	(184)
第4章 电磁场理论	(192)
4.1 电磁感应定律	(192)
4.1.1 电磁感应现象	(192)
4.1.2 楞次定律	(193)

4.1.3	通量法则	(194)
4.2	动生电动势和感生电动势	(195)
4.2.1	动生电动势	(195)
4.2.2	感生电动势	(196)
4.2.3	普适的电场高斯定理和环路定理	(198)
* 4.2.4	电子感应加速器	(198)
4.3	感应电动势的分析方法	(199)
4.3.1	概述	(199)
4.3.2	矩形线圈在匀强磁场中旋转	(201)
4.3.3	导体棒的平移与旋转	(201)
4.3.4	导体圆盘在匀强磁场中转动	(203)
4.3.5	变化磁场激发涡旋电场	(204)
4.3.6	变化磁场中的导体棒	(205)
4.4	自感与互感	(206)
4.4.1	自感	(206)
4.4.2	互感	(208)
4.4.3	互感与自感的关系	(209)
4.5	磁场的能量	(210)
4.5.1	自感磁能与互感磁能	(210)
4.5.2	磁场的能量和能量密度	(212)
4.5.3	磁偶极子与磁场的相互作用能	(213)
* 4.5.4	低速电子磁场的能量	(214)
4.5.5	电磁振荡	(214)
4.6	麦克斯韦电磁场理论	(217)
4.6.1	历史背景	(217)
4.6.2	普适的磁场高斯定理和环路定理	(218)
4.6.3	位移电流	(220)
4.6.4	麦克斯韦方程组	(221)
4.7	电磁波的性质	(223)
4.7.1	自由空间中的麦克斯韦方程组	(223)
4.7.2	电磁波是横波	(224)
4.7.3	电磁波的传播速度	(224)
4.7.4	电场磁场之间的关系	(226)

* 4.7.5 电磁波谱	(227)
4.8 电磁波的能量和动量	(228)
4.8.1 电磁波的能量	(228)
4.8.2 电磁波的动量	(230)
4.9 电磁波的发射	(232)
4.9.1 偶极振子	(233)
4.9.2 赫兹实验	(234)
4.9.3 偶极振子辐射	(236)
4.9.4 加速运动电荷辐射	(238)
* 4.9.5 同步辐射	(240)
4.10 电磁场变换	(241)
4.10.1 电磁场变换	(241)
4.10.2 匀强电场的变换	(243)
4.10.3 直线电流磁场的变换	(244)
4.10.4 感应电动势的相对性	(247)
* 4.10.5 变化的磁场激发涡旋电场	(248)
* 4.10.6 变化的电场激发磁场	(249)
* 4.10.7 麦克斯韦方程组的洛伦兹协变性	(251)
* 4.10.8 经典电磁理论的局限性	(253)
思考题	(254)
习题	(257)

第 1 章 静 电 场

相对于观察者静止的电荷产生的电场称为静电场。本章主要讨论真空中静止电荷之间的相互作用，从库仑定律出发，引入关于静电场的基本概念和性质，从而导出反映静电场基本特性的高斯定理和静电场环路定理。并运用这些概念和规律分析静电场的一些典型问题。最后利用参照系变换讨论了静电场的相对性。

1.1 电 荷

有关电荷的基本知识中学已经讲过，这里重点介绍电荷的量子化、电荷守恒定律和电荷不变性。

1.1.1 电荷的量子化

自然界存在两种电荷：正电荷和负电荷，用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷是正电荷；用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷是负电荷。同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。电荷是带电体的一种属性，有时也表示带电体本身或带电体所带的电量。取任意三个电荷 A 、 B 、 C ，若 A 与 B 相吸引， A 与 C 相排斥，则 B 与 C 必然相吸引，从未发现例外。正因有两种相互作用，才认识到自然界存在两种电荷，至于两种电荷谁正谁负，纯属人为规定，对电的本质和规律没有影响。

从微观本质来看，物体之所以带电，是因为物体由原子组成，原子由原子核和核外电子组成，原子核内有质子和中子，质子带正电，中子不带电，电子带负电。核内质子数与核外电子数相等，质子与电子的电量等量异性，所以原

子呈电中性, 由原子组成的宏观物体不带电. 如果在外因的作用下, 破坏了物体内部的电中和状态, 即可使物体带电. 例如通过摩擦使电子从一个物体转移到另一个物体, 失去电子的物体带正电, 得到电子的物体带负电. 或者外加电场使电子从金属的一部分移动到另一部分, 缺少电子的部分带正电, 电子过剩的部分带负电, 这种现象叫做静电感应.

第一次较准确地测量电子电荷是 1911 年密立根的油滴实验 (思考题 1.1.1), 测得电子电荷为 $-e$, $e = 1.63 \times 10^{-19} \text{C}$, 近代精确测量结果 $e = 1.602\,177\,33 \times 10^{-19} \text{C}$. 质子电荷与电子电荷 (绝对值) 严格相等, 实验结果表明两者的差别小于 $10^{-20}e$, 这非常重要, 若稍有差异, 将破坏原子的电中性, 而物质由大量原子构成, 将呈现巨大的电力, 自然界就会面目全非.

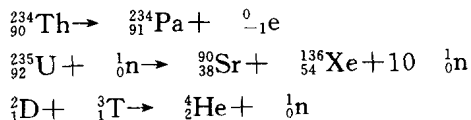
由于物体带电在于电子的得失, 所以任何带电体的电荷只能是 $\pm ne$ ($n=1, 2, 3, \dots$), 而且只能以 $\pm e$ 为单位进行交换和变化, 所以**电荷的变化是不连续的**, 这就是电荷的量子化, 而称电荷变化的最小单位 e 为**基本电荷**. 宏观电荷实质上也可表示为 $\pm ne$, 不过 n 非常大, 其变化也以 e 为单位, 但 e 与 ne 相比非常小, 从实际测量来看可以认为是连续变化的.

1.1.2 电荷守恒定律

高中物理教材把电荷守恒定律表述为: “电荷既不能创造, 也不能消灭, 只能从一个物体转移到另一个物体, 或者从物体的一部分转移到另一部分”, 这样讲不够确切.

从宏观现象看, 在物体中电荷代数和转移前后相等. 摩擦起电, 两不带电物体相互摩擦使其分别带电, 所带电荷等量异性, $0+0=Q+(-Q)$. 静电感应, 不带电导体在电场作用下两侧面带电等量异性, $0=Q+(-Q)$. 接触带电, 带电体与不带电体接触, 两物体带电量之和等于原带电体电量, $Q+0=Q_1+Q_2$.

在微观现象中, 变化前后基本电荷数代数和相等, 高中物理在讲述 β 衰变、重核裂变、轻核聚变时讲过



自 1932 年发现正电子至今, 又发现了几百种粒子, 而且各种粒子都有反粒子存在. 正、反粒子一部分性质完全相同, 另一部分性质完全相反. 例如电子和正电子质量、自旋相同, 电荷、磁矩相反. 中子和反中子质量、自旋、寿命相同, 磁矩相反. 所有粒子都不是不生不灭、永恒不变的, 在一定条件下都能

产生和湮没. 当高能光子通过铅板时, 可以产生电子和正电子.

$$\gamma \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_1e$$

如果电子与正电子相遇, 可以湮没为两个或三个光子

$${}^0_{-1}e + {}^0_1e \rightarrow 2\gamma, \quad {}^0_{-1}e + {}^0_1e \rightarrow 3\gamma$$

上述大量事实说明, 在孤立系统 (与外界无电荷交换的系统) 中, 正负电荷的代数和在任何物理过程中始终保持不变. 也可表述为, 单位时间内流入流出系统边界的净电荷等于系统内电荷的变化率. 这就是电荷守恒定律. 力学指出, 对称性导致守恒定律 [田清钧, 力学基础, § 5.3]. 电磁场具有规范不变性 [郭硕鸿, 电动力学, 第四章 § 1. 人民教育出版社, 1979], 这是一种系统内部的对称性, 它导致电荷守恒.

1.1.3 电荷不变性

电荷电量是由库仑定律来定义的, 库仑定律只适用于静止电荷, 当电荷运动时, 其电量是否还一样大? 我们习惯于认为理所当然地还是一样大. 但根据是什么呢?

如前所述, 质子和电子电荷严格等量异性, 这可以用非常精确地实验测量证明. 在高真空中使铯原子束通过强电场, 没有观察到原子束有任何偏移, 由此得出结论, 铯原子的净电荷小于 $10^{-16}e$ [J. C. Zorn. Phys. Rev, 1963, 129: 562], 还做过更为灵敏的实验, 测量精度可达 $10^{-20}e$. 在原子中, 核内质子与核外电子的运动状态很不相同, 但运动状态的不同并没有影响它们电量的严格相等. 另外, 不带电物体加热或冷却时, 其中电子运动的变化远大于核运动的变化, 但仍精确保持电中性. 所有这些实验不仅说明了质子、电子电量严格相等, 也说明了**电荷的电量不随电荷的运动状态而改变**. 所以电荷的电量与参照系的选择无关, 在任何参照系中观察同一电荷的电量都相同. 这就是电荷不变性, 在进行电磁场的参照系变换时必须予以考虑.

电荷不变性与电荷守恒定律密切相关, 孤立系统中电荷的代数和不变, 不论个别电荷的运动状态如何变化, 这个结论总成立. 如果系统内只有一个电荷, 此电荷值将为不变量. 但守恒量不一定都是不变量, 电荷既是守恒量也是不变量, 而能量、动量是守恒量, 但它们分别都不是不变量.

* 1.1.4 夸克——分数电荷

基本电荷是基本的吗? 中学教材在附注中说明: “在高能物理的研究中提出了一个设想, 认为质子、中子等粒子是由更基本的层子 (或夸克) 组成的, 层子所带电量是基本电荷的 $1/3$

或 $2/3$ ” [高中物理（必修本）第二册：3. 人民教育出版社，1990] 继电子、质子、中子之后，由于高能加速器的建立和探测技术、数据获取及处理技术的提高，迄今已发现数百种粒子，很难说它们都是基本粒子，所以把基本二字去掉，统称之为粒子。粒子可分为轻子（电子、 μ 子、中微子等）重子（质子、中子等）介子（ π 介子、K 介子等），重子、介子又统称为强子。

强子种类繁多，它们是否有内部结构？1968 年，在斯坦福直线加速器实验室用高能电子轰击质子，发现有时电子发生大角度散射，这使人联想到卢瑟福发现原子核式结构的 α 粒子散射实验，显示质子可能由一些更小的颗粒组成。在此之前，1964 年盖尔曼和茨威格已经尝试提出强子结构模型，他们认为所有强子都由“夸克”组成。现在发现夸克有 6 种，见表 1-1 [引自张三慧. 力学（第二版）：7. 清华大学出版社，1999]。夸克具有分数电荷，每种夸克都有反夸克存在，正反夸克电荷相反。重子由三个夸克 qqq 组成，介子由正反两个夸克 $q\bar{q}$ 组成，例如质子为 uud 、中子为 udd 、 π^+ 介子为 $u\bar{d}$ 、 k^+ 介子为 $u\bar{s}$ ，等等。

表 1-1

夸克种类	符号	自旋 ($\hbar$)	质量 (MeV/c^2)	电荷 (e)
上 夸 克	u	1/2	5	$2/3$
下 夸 克	d	1/2	9	$-1/3$
奇异夸克	s	1/2	1.75×10^2	$-1/3$
粲 夸 克	c	1/2	1.25×10^3	$2/3$
底 夸 克	b	1/2	4.50×10^3	$-1/3$
顶 夸 克	t	1/2	约 $3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$	$2/3$

夸克模型提出之后，物理学家们利用各种实验方法，试图找到单独存在的分数电荷，但都未成功。理论研究认为：强子内每种夸克都可能有三种不同的状态，借用三原色称夸克有红、绿、蓝三种不同的“色”，而整个强子是无色的。强子内不同“颜色”夸克之间相互吸引，这种力称为“色力”，色力是如此之强以至无法把它们分开，所以至今没有发现单个的自由夸克存在，似乎它们总隐藏在强子之内，称之为夸克“禁闭”。

1.2 库仑定律

库仑定律是电磁学中第一个基本实验定律，它阐明了静止电荷之间的相互作用规律，为静电场理论奠定了基础。它与相对论变换结合，可以导出安培定

律 (3.10.4 节) 和电磁感应定律 (4.10.5 节), 所以它也是整个电磁场理论的基础.

1.2.1 电力平方反比律的确立

库仑定律的核心内容是, 两个静止点电荷的相互作用力与它们之间距离的平方成反比, 即所谓平方反比律. 此定律虽以库仑来命名, 却是许多科学家研究的结果 [陈熙谋. 电力平方反比律的实验验证. 大学物理, 1982 (1)]. 1766 年普里斯特列在富兰克林的提示下进行实验, 发现带电金属空腔内表面没有电荷, 并且对放在腔内的电荷没有作用力. 这使他联想到, 放在均匀物质球壳内的物体不会受到来自壳体的引力, 因此他猜想电力与万有引力可能有相同的规律.

为了说明这一问题, 我们首先介绍平面角与立体角的概念. 某点有一平面角 θ (图 1-1), 以顶点为心, 任意长度

r 为半径作圆, 角 θ 对圆所截之弧长为 $\hat{S}$, $\hat{S}$ 与 r 成正比, $\frac{\hat{S}}{r}$

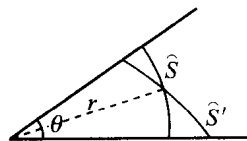


图 1-1

与 r 无关由角 θ 决定. 因此定义 $\theta = \frac{\hat{S}}{r}$ (弧度), 圆周角 =

$\frac{2\pi r}{r} = 2\pi$ (弧度). 注意: $\hat{S}$ 必须与角中心线正交, $\theta \neq \frac{\hat{S}'}{r}$. 某点有一立体圆锥张

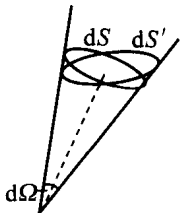


图 1-2

角 $d\Omega$ (图 1-2), 以顶点为心, 任意长度 r 为半径做球面, $d\Omega$ 所截球面面积为 dS , dS 与 r^2 成正比, $\frac{dS}{r^2}$ 与 r 无关由 $d\Omega$ 决定. 因此定义立体角 $d\Omega = \frac{dS}{r^2}$ (球面度), 全方位立体角 $= \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$ (球面度). 注意: dS 必须与 $d\Omega$ 中心线正交, $d\Omega \neq \frac{dS'}{r^2}$.

均匀物质球壳如图 1-3 所示, 质量面密度为 σ , 球壳内某点有质点 m , 以 m 为心对顶张开小立体角 $d\Omega$, 在壳上截出面元 dS_1 、 dS_2 , dS_1 、 dS_2 到 m 的距离为 r_1 、 r_2 , 两质量面元对 m 之引力合力为

$$dF = G \left(\frac{\sigma dS_1 m}{r_1^2} - \frac{\sigma dS_2 m}{r_2^2} \right)$$

根据立体角定义

$$d\Omega = \frac{dS_1 \cos \theta}{r_1^2} = \frac{dS_2 \cos \theta}{r_2^2}$$