

大学物理通用教程

主编 钟锡华 陈熙谋

电 磁 学

陈秉乾

王稼军

编著



北京大学出版社

大学物理通用教程

电 磁 学

陈秉乾 王稼军 编著

北京大学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理通用教程. 电磁学/钟锡华,陈熙谋主编;陈秉乾,王稼军编著. —北京:北京大学出版社,2003.5

ISBN 7-301-04593-X

I. 物… II. ①钟… ②陈… ③陈… ④王… III. ①物理学-高等学校-教材 ②电磁学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76622 号

书 名: 大学物理通用教程——电磁学

著作责任者: 陈秉乾 王稼军 编著

责任编辑: 瞿 定

标准书号: ISBN 7-301-04593-X/O·0477

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村 北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

890 毫米×1240 毫米 A5 开本 11.625 印张 330 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 0001—3000

定 价: 19.00 元

大学物理通用教程

主编 钟锡华 陈熙谋

《电磁学》内容简介

全套教程包括《力学》《热学》《电磁学》《光学·近代物理》，并配有《习题指导》。

《电磁学》包括静电场、静电场中的导体和电介质、直流电、恒定磁场、磁介质、电磁感应、交流电、麦克斯韦电磁场理论八章。本书在阐述电磁学中基本的实验、概念、规律、理论时，有重点地介绍相关发现的历史过程，借以加深理解、提高能力、培育创新意识。本书以电磁场理论为主干，从电磁场的性质与区别、电磁场对物质的作用和物质的电磁性质、电磁场的内在联系和运动变化规律等方面逐步展现这一极具现代精神的经典内容，在加强基础的同时，适当介绍近代发展和相关应用。

本书是一本通用教程，其分量大体上与讲授 40 学时相匹配，适合理、工、农、医和师范院校使用。

序

概况与适用对象 这套大学物理通用教程分四册出版,即《力学》、《热学》、《电磁学》和《光学·近代物理》,共计约 130 万字. 原本是为化学系、生命科学系、力学系、数学系、地学系和计算机科学系等非物理专业的系科,所开设的物理学课程而编写的,其内容和分量大体上与一学年课程 140 学时数相匹配. 本教程还配有《习题指导》分册,旨在辅导学生准确地掌握基本规律并能正确地解决具体问题,包括某些技巧和方法. 这套教程具有较大的通用性,也适用于工科、农医科和师范院校同类课程. 编写此书是希望非物理类专业的学生熟悉物理学,应用物理学,并对物理学原理是如何形成的有个较深入的理解,从而使他们意识到,物理学的学习在帮助他们提出和解决他们各自领域中的问题时所具有的价值. 为此,首先让我们大略地认识一下物理学.

物理学概述 物理学成为一门自然科学,这起始于伽利略-牛顿时代,经 350 多年的光辉历程发展到今天,物理学已经是一门宏大的有众多分支的基础科学. 这些分支是,经典力学、热学、热力学与经典统计力学、经典电磁学与经典电动力学、光学、狭义相对论与相对论力学、广义相对论与万有引力的基本理论、量子力学、量子电动力学、量子统计力学. 其中的每个分支均有自己的理论结构、概念体系和独特的数理方法. 将这些理论应用于研究不同层次的物质结构,又形成了原子物理学、原子核物理学、粒子物理学、凝聚态物理学和等离子体物理学,等等.

从而,我们可以概括地说,物理学研究物质存在的各种主要的基本形式,它们的性质、运动和转化,以及内部结构;从而认识这些结构的组元及其相互作用、运动和转化的基本规律. 与自然科学的其他门

类相比较,物理学既是一门实验科学,一门定量科学,又是一门崇尚理性、注重抽象思维和逻辑推理的科学,一门富有想像力的科学.正是具有了这些综合品质,物理学在诸多自然科学门类中成为一门伟大的处于先导地位的科学.

在物理学基础性研究的过程中所形成和发展起来的基本概念、基本理论、基本实验方法和精密测试技术,越来越广泛地应用于其他学科,从而产生了一系列交叉学科,诸如化学物理、生物物理、大气物理、海洋物理、地球物理和天体物理,以及电子信息科学,等等.总之,物理学以及与其他学科的互动,极大地丰富了人类对物质世界的认识,极大地推动了科学技术的创新和革命,极大地促进了社会物质生产的繁荣昌盛和人类文明的进步.

编写方针 一本教材,在内容选取、知识结构和阐述方式上与作者的学识——科学观、知识观和教学思想,是密切相关的.我们在编写这套以非物理专业的学生为对象的大学物理通用教程时,着重地明确了以下几个认识,拟作编写方针.

1. 确定了以基本概念和规律、典型现象和应用为教程的主体内容;对主体内容的阐述应当是系统的,以合乎认识逻辑或科学逻辑的理论结构铺陈主体内容.知识结构,如同人体的筋骨和脉络,是知识更好地被接受、被传承和被应用的保证,是知识生命力之本源,是知识再创新之基础.知识的力量不仅取决于其本身价值的大小,更取决于它是否被传播,以及被传播的深度和广度.而决定知识被传播的深度和广度的首要因素,乃是知识的结构和表述.

2. 然而,本课程学时总数毕竟也仅有物理专业普通物理课程的40%,故降低教学要求是必然的出路.我们认为,降低要求应当主要体现在习题训练上,即习题的数量和难度要降低,对解题的熟练程度和技巧性要求要降低.降低教学要求也体现在简化或省略某些定理证明、理论推导和数学处理上.

3. 重点选择物理专业后继理论课程和近代物理课程中某些篇章于这套通用教程中,以使非物理专业的学生在将来应用物理学于本专业领域时,具有更强的理论背景,也使他们对物理学有更为全面和深刻的认识.《力学》中的哈密顿原理,《热学》中的经典统计和量子

统计原理,《电磁学》中的电磁场理论应用于超导介质,《光学·近代物理》中的变换光学原理、相对论和量子力学,均系这一选择的结果。

4. 积极吸收现代物理学进展和学科发展前沿成果于这套通用教程中,以使它更具活力和现代气息.这在每册书中均有不少节段给予反映,在此恕不一一列举,留待每册书之作者前言中明细.值得提出的是,本教程对那些新进展新成果的介绍或论述是认真的,是充分尊重初学者的可接受性而恰当地引入和展开的。

应当写一套新的外系用的物理学教材,这在我们教研室已闲散地议论多年,终于在室主任舒幼生和王稼军的积极策划和热心推动下,得以起动并实现.北大出版社编辑周月梅和瞿定,多次同我们研讨编写方针和诸多事宜,使这套教材得以新面貌而适时面世.北大出版社曾于1989年前后,出版了一套非物理专业用普通物理学教材共四册,系我教研室包科达、胡望雨、励子伟和吴伟文等编著,它们在近十年的教学过程中发挥了很好的作用.现今这套通用教程,在编撰过程中作者充分重视并汲取前套教材的成功经验和学识.本套教材的总冠名,经多次议论最终赞赏陈秉乾教授的提议——大学物理通用教程。

一本教材,宛如一个人.初次见面,观其外表和容貌;接触多了,知其作风和性格;深入打交道,方能度其气质和品格.我们衷心期望使用这套教程的广大师生给予评论和批判.愿这套通用教程,迎着新世纪的曙光,伴你同行于科技创新的大道上,助年轻的朋友茁壮成长。

钟锡华 陈熙谋

2000年8月8日于北京大学物理系

作者前言

“电磁学”是《大学物理通用教程》的第3分册,包括静电场、静电场中的导体和电介质、直流电、恒定磁场、磁介质、电磁感应、交流电、麦克斯韦电磁场理论共8章.本书的内容、结构、体系与国内流行的各类电磁学教程相仿,为广大教师所熟知.现仅就使用时值得注意的几个问题稍加说明,以供参考.

1. 在阐述电磁学中基本的实验、概念、规律、理论时,本书结合相关内容,选取库仑、毕奥-萨伐尔、安培、法拉第、麦克斯韦等人的工作为例,适当介绍提出问题、抓住要害、克服困难、寻找联系、揭示本质、作出发现的历史过程.希望读者能有身临其境之感,体会前辈大师的研究方法、物理思想和科学精神,领略前辈大师的非凡智慧和创新意识,从中汲取营养.进而,再从现代的高度加以审视,达到正确理解、恰当评价、加强基础的效果.如果感到其中有些内容(如安培定律的建立,麦克斯韦关于电磁场理论的三篇论文)不适合课堂教学,可改作阅读材料或讲座.

2. 法拉第和麦克斯韦建立的电磁场理论是19世纪物理学最伟大的成就,也是极具现代精神的经典内容.本书以电磁场理论为主干,从静电场、恒定磁场的性质和它们之间的区别,电磁场对物质的作用和物质的电磁性质,电磁场的内在联系和运动变化规律等方面逐步展现这一宏伟绚丽的历史画卷.多年的实践表明,坚持主干,纲举目张,贯彻始终,是提高教学质量的可靠保证.同时,应注意克服由于研究对象变化(从实物变为场)所导致的不适应和困难,其实这也正是提高学生素质的契机.

3. 电磁学基本规律的广泛应用和近代发展对技术进步和人类文明产生了不可磨灭的深远影响.在本书中,除直流电、交流电作为基本内容单列两章外,其他应用则分散在各章之中,作适当的原理性

介绍. 对此, 请注意把握基础研究与应用研究的联系和区别、基本概念的延伸或更新、视野的拓展、新研究领域的开辟和对应用前景的关注, 借以弘扬物理学固有的“崇尚理性, 崇尚实践”的精神. 就具体内容而言, 如超导体、铁电体、铁磁材料, 如磁单极子, 如尖端放电、分布电容, 如变压器、三相电, 如矢势、边条件、场方程的微分形式, 如电磁辐射, 等等, 各具特色, 差别很大, 或讲授或作为阅读材料或删节, 酌情处置可也.

本书的内容、要求大体上与约 40 学时的 B 类电磁学课程相匹配.

陈秉乾、舒幼生、胡望雨的《电磁学专题研究》(高等教育出版社, 2001 年 12 月) 以及陈熙谋、胡望雨、舒幼生、陈秉乾的《物理教学的理论思考》(论文集)(北京教育出版社, 1997 年 7 月) 两书可供教师备课时参阅.

陈熙谋教授审阅本书, 提出了许多宝贵的意见, 谨此致谢. 限于水平, 本书疏漏谬误之处在所难免, 欢迎批评指正.

陈秉乾 王稼军

2003 年春节于北京大学物理系

目 录

第1章 静电场	(1)
1.1 库仑定律	(1)
1.2 电场 电场强度 场强叠加原理	(10)
1.3 静电场的高斯定理	(17)
1.4 静电场的环路定理 电势	(28)
1.5 静电场的基本微分方程	(42)
习题	(44)
第2章 静电场中的导体和电介质	(49)
2.1 导体和电介质	(49)
2.2 静电场中的导体	(51)
2.3 电容和电容器	(58)
2.4 电介质的极化	(64)
2.5 有电介质存在时的静电场	(74)
2.6 静电场的边界条件	(79)
2.7 带电体系的静电能	(81)
习题	(88)
第3章 直流电	(93)
3.1 电流的连续方程 恒定条件	(93)
3.2 欧姆定律 焦耳定律	(96)
3.3 电源的电动势	(103)
3.4 直流电路	(110)
习题	(116)
第4章 恒定磁场	(120)
4.1 奥斯特实验	(120)
4.2 毕奥-萨伐尔定律	(125)
4.3 磁场的高斯定理和安培环路定理	(136)
4.4 安培定律	(146)
4.5 洛伦兹力	(160)
习题	(176)

第 5 章 磁介质	(181)
5.1 “分子电流”模型.....	(181)
5.2 顺磁质与抗磁质.....	(183)
5.3 磁化的规律.....	(187)
5.4 有磁介质存在时的磁场.....	(193)
5.5 铁磁质.....	(199)
5.6 磁场的边界条件.....	(205)
习题.....	(208)
第 6 章 电磁感应	(211)
6.1 法拉第电磁感应定律.....	(211)
6.2 动生电动势 感生电动势 涡旋电场.....	(218)
6.3 自感与互感.....	(229)
6.4 暂态过程.....	(236)
6.5 超导体.....	(245)
习题.....	(254)
第 7 章 交流电	(259)
7.1 交流电概述.....	(259)
7.2 交流电路中的元件.....	(267)
7.3 元件的串并联——矢量图解法.....	(270)
7.4 交流电路的复数解法.....	(276)
7.5 谐振电路.....	(288)
7.6 交流电的功率.....	(296)
7.7 变压器原理.....	(300)
7.8 三相交流电.....	(304)
习题.....	(310)
第 8 章 麦克斯韦电磁场理论	(315)
8.1 麦克斯韦方程.....	(315)
8.2 电磁波.....	(327)
习题.....	(342)
附录	(343)
附录一 电磁学单位制.....	(343)
附录二 矢量分析.....	(347)
习题答案	(351)

1

静 电 场

- 1.1 库仑定律
- 1.2 电场 电场强度 场强叠加原理
- 1.3 静电场的高斯定理
- 1.4 静电场的环路定理 电势
- 1.5 静电场的基本微分方程

1.1 库 仑 定 律

- 扭秤实验及其他实验 电力平方反比律
- 库仑定律的物理内涵
- 库仑定律的成立条件
- 电荷守恒定律 电荷的量子性
- 扭秤实验及其他实验 电力平方反比律

电闪雷鸣的观察、摩擦起电的发现、避雷针的应用、导体与绝缘体的区分、莱顿瓶与伏打电池的发明、电荷是否守恒以及什么是电的探索,等等,粗略地勾画出人类对电现象从观察、应用、研制设备乃至试图作出解释的早期历史轨迹.它宣告:物理学一个新的研究领域——电学诞生了.

物体因带电而彼此吸引或排斥是一个重要的新发现,因为它表明,在非接触物体之间,除了此前已知的万有引力和磁力外,又有了电力.尽管三者有某些雷同之处(如都出现在非接触物体之间,都是有心力等),但也有显著的不同.例如,电力有吸引和排斥,带电有正负之区分,而万有引力则总是彼此吸引,并无负质量的物体;又如,电力与磁力虽都有吸引和排斥,带电有正负,磁体有南北极,但带电物体不受地磁及磁体的作用,不指向南北方向,且正电和负电可以单独

存在;等等.所有这些早期的观察都表明,电力是一种尚待探索的新的作用力.

受牛顿力学的深刻影响,寻找电力遵循的规律成为引人瞩目的研究课题,它的发现迎来了电学历史上第一个重要的突破.为了撇开带电物体形状、大小等次要因素的影响,人们自然地把注意力集中在两个点电荷之间的电力作用上.

在实验研究尚未开展之前,富兰克林注意到一个重要的现象:将细线悬挂的带电软木小球放在带电金属筒外时,小球明显地受电力作用而倾斜;将小球放入筒内时则几乎不受电力作用,竖直下垂.富兰克林把这一发现告诉了他的好友普里斯特利.普里斯特利通过类比,认为电力与万有引力一样,也应具有与距离平方成反比的特征.因为,均匀物质球壳对球外物质小球有非零的万有引力作用,而当小球置于球壳内任意位置时,所受万有引力为零,这是万有引力与距离平方成反比的结果(读者可试做证明).类似的现象暗示着类似的特征,普里斯特利的类比猜测为尔后的实验研究指引了方向.善于观察、勤于思索往往是有所发现的开端.

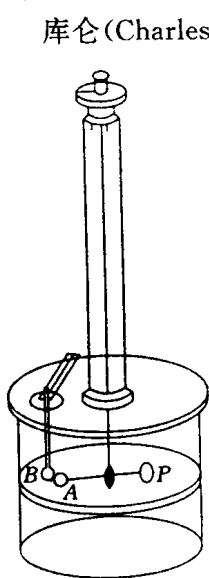


图 1-1 库仑的电斥力
扭秤实验

库仑(Charles Auguste de Coulomb, 1736—1806, 法国)是试图通过直接测量来寻找电力规律的第一人.当时的困难在于充电有限、容易漏电,使得电力微弱且有所变化,难以准确测量.库仑原先研究力学,曾发现固体间的滑动摩擦定律: $f = \mu N$. 库仑还是研究和制作扭秤的专家,他曾得出:扭秤金属悬丝所受转矩与扭转角成正比,比例系数与细丝的长度、直径、切变弹性模量等有关.

1785年,库仑设计制作了一台精巧的能够测出 10^{-8} N 微弱作用力的扭秤,用以测量两个带同号电小球(点电荷)之间的电斥力.库仑的扭秤实验如图 1-1 所示,在金属细丝下悬挂一根秤杠,秤杠的一端是带电木髓小球 A,另一端有平衡体 P,另一与 A 相同大小的带电木髓小球 B 用夹子固定.因 A 球受 B 球的电力使秤杠偏转,

转动细丝上端的旋钮,可使 A 球回复原来位置. 由于细丝所受扭力矩即 A 球所受电力矩,与旋钮指针转过的角度(扭转角)成正比,所以电力矩的大小可以通过扭转角来比较(相对测量). 另外, A 和 B 两球间的距离容易测量. 库仑测出,当两球间距之比为 $36:18:8.5$ 时,相应的扭转角为 $36^\circ, 144^\circ, 576^\circ$, 即当两球间距减小为一半和约四分之一时,其间的电力增大为 4 倍和 16 倍. 由此得出:“两个带同种电荷的小球之间的相互排斥力和它们之间距离的平方成反比.”这就是库仑电斥力扭秤实验的结论.

与电斥力不同,在异号电荷电引力情形,由于扭秤的平衡不稳定,难于测量,也不精确. 为此,库仑改做了电引力单摆实验.

大家知道,在万有引力(如地球重力)的作用下,单摆的振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{Gm}r},$$

式中 r 是摆锤到引力中心的距离(如地球半径), L 是摆长, m 是产生引力的物体的质量(如地球质量), G 是万有引力常数. 因此,当 L 与 m 给定时, T 应与 r 成正比,这是万有引力与距离平方成反比的结果.

库仑的电引力单摆实验如图 1-2 所示,细线下悬挂的水平绝缘细棒,一端是带电小球 A ,另一端是平衡体 P ,固定的金属球 B 带

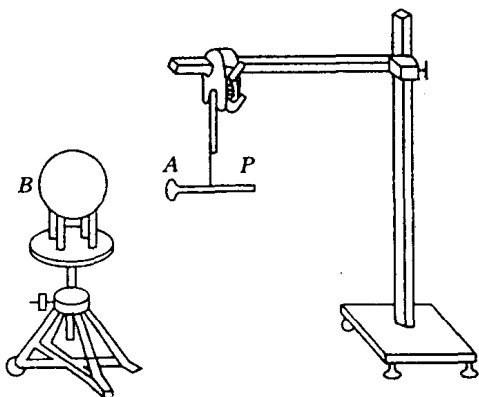


图 1-2 库仑的电引力单摆实验

异号电荷. 受电引力作用, 细棒在水平面内摆动. 库仑测出, 当摆锤 A 与电引力中心 (B 球球心) 的距离之比为 $3:6:8$ 时, 摆锤的振动周期之比为 $20:41:60$ (与预期的 $20:40:53.3$ 稍有差别, 原因是漏电). 由此确定, 电引力也应与距离平方成反比. 显然, 这是典型的类比研究.

总之, 库仑通过电斥力扭秤实验和电引力单摆实验的直接测量, 发现电力 f 与距离 r 的平方成反比, 称为**电力平方反比律**, 表为

$$f \propto r^{-2 \pm \delta},$$

式中 δ 是偏离平方反比律的修正数, 库仑实验的结果是 $\delta < 4 \times 10^{-2}$, 这一误差在当年的技术条件下, 实属不易. 不难设想, 随着技术的进步, 库仑实验的精度可以有所改善, 但难以期望大幅度的提高, 直接测量的限制即在于此.

在库仑实验之前, 1772 年卡文迪什提出了另一种精确验证电力平方反比律的理论和实验方法, 并得出了结果, 但没有发表, 不为人知. 百年之后的 1874 年, 麦克斯韦担任第一任卡文迪什实验室主任, 在整理卡文迪什的遗稿时, 才发现有关工作, 于是重新进行了详尽的理论分析和实验工作.

卡文迪什-麦克斯韦的想法是, 对于均匀带电的球形空腔导体, 在腔内无带电体时, 若 $\delta = 0$, 则导体内表面完全不带电 (若 $\delta = 0$, 静电场的高斯定理成立, 可由此证明, 见 1.3 节), 若 $\delta \neq 0$, 则导体内表面应带电 (若 $\delta \neq 0$, 静电场高斯定理失效). 经过理论分析, 卡文迪什-麦克斯韦得出了球形空腔导体内表面电量与导体充电总电量、修正数 δ 以及球壳内外半径的定量关系. 然后, 通过实验测量内表面的电量, 实际测量结果为零 (此类实验称为“示零”实验), 即小于测量仪器所能测出的下限. 再设法确定仪器的灵敏度, 即通过实验比较内表面电量的下限与导体充电总电量的相对关系. 综上, 便可得出 δ 小于多少的结果. 1772 年卡文迪什得出 $\delta < 2 \times 10^{-2}$. 19 世纪 70 年代麦克斯韦得出 $\delta < 5 \times 10^{-5}$. 由于电力平方反比律的精度不仅直接影响电磁场理论的精度, 而且与光子静止质量是否为零密切相关, 涉及物理学中一系列根本问题, 关系重大, 因此, 此后不断有人沿用卡文迪什-麦克斯韦的方法, 改进技术, 继续实验, 精度大幅度提高. 1971 年

威廉斯等的结果是

$$\delta < 2.7 \times 10^{-16}.$$

二百年来,电力平方反比律的精度提高了十几个量级,它已经成为迄今物理学中最精确的实验定律之一,卡文迪什-麦克斯韦方法的威力由此可见一斑.

• 库仑定律的物理内涵

库仑定律: 两个静止点电荷 q_1 与 q_2 之间相互作用力的大小与 q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间距离 r 的平方成反比;作用力的方向沿着它们的连线;同号电荷相斥,异号电荷相吸. 令 f_{12} 表示 q_1 对 q_2 的库仑力(也称电力), \hat{r}_{12} 表示由 q_1 指向 q_2 的单位矢量,库仑定律的定量公式为

$$f_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}. \quad (1.1)$$

(1.1)式采用国际单位制(SI). 它的电磁学部分,称为 MKSA 单位制. MKSA 制以长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流(安培)为四个基本单位,其他物理量的单位可由基本单位根据规定的公式和顺序导出(见附录一). 在(1.1)式中, r 的单位是米(m), f 的单位是牛[顿](N), q 的单位是库[仑](C), $1\text{C} = \text{A}/\text{s}$ (1库=1安/秒). 由于各量单位都已选定,比例系数 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 需经实验测定,其中 ϵ_0 称为真空介电常量是基本物理常量之一,1986年推荐值为

$$\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2),$$

近似值为

$$\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2), \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 8.99 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2.$$

熟知的库仑定律(1.1)式具有丰富的物理内涵.

1. 电力平方反比律: 两静止点电荷之间的作用力与其间距离的平方成反比,即 $f \propto r^{-2}$. 这一结论已为库仑电斥力扭秤实验、电力单摆实验以及卡文迪什-麦克斯韦实验、威廉斯实验等一再证实,极为精确,不再赘述.

2. 电力与电量的乘积成正比,即 $f \propto q_1 q_2$. 这是电量(电荷)的定

义. 由于电力来自带电物体, 与带电状况有关, 在电力的表达式中需要引入定量描述两点电荷带电多少的物理量——电量, 于是规定作用力大小与两点电荷电量乘积成正比. 这样, 既能表明是电力, 又能通过 q_1, q_2 的大小、正负区分电力的大小以及吸引还是排斥. 在物理学中, 新的研究领域的开辟, 新的基本规律的发现, 往往同时伴随着新概念的引入和新物理量的定义. 牛顿定律定义了惯性质量, 万有引力定律定义了引力质量, 热力学定律定义了内能和熵, 诸如此类, 概莫能外.

3. 两静止点电荷之间作用力的方向沿连线, 即静止点电荷在各点的电场强度的方向沿径向(场强的定义见 1.2 节), 以及电力具有球对称性, 即只与距离有关而与连线的空间方位无关. 应该指出, 电力的径向性和球对称性虽则与上述实验大抵相符, 但并非后者的严格结果. 实际上当年认为理所当然的这一结论是空间各向同性的必然要求. 试想, 如果点电荷 Q 在某点 P 的场强方向不沿径向 PQ 而有所偏斜, 则绕直线 PQ 旋转后, P 点场强的方向将有所改变, 与空间的各向同性矛盾, 破坏了空间的对称性, 明显不合理(注意, 静止点电荷作为理想模型不具有任何特殊方向). 这一事例表明, 物理学的规律是分层次、有联系的, 低层次的具体规律要受到高层次的普遍规律(基本法则)的制约, 不得违背.

另外, 如果点电荷 q_0 同时受到许多点电荷 q_1, q_2, \dots 的作用, 则所受合力 f 是各点电荷单独存在时对 q_0 作用力 f_1, f_2, \dots 的矢量和, 在电荷连续分布时为各电荷微元 dq 对 q_0 作用力 df 的矢量积分, 即

$$f = \sum_i f_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i q_0}{r_i^2} \hat{r}_i$$

或

$$f = \int df = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\hat{r}}{r^2} dq, \quad (1.2)$$

式中 r_i (或 r) 分别是 q_i (或 dq) 与 q_0 的距离, \hat{r}_i (或 \hat{r}) 分别是由 q_i (或 dq) 指向 q_0 的径向单位矢量. (1.2) 式称为**电力叠加原理**, 满足(1.2)式的叠加称为**线性叠加**. 叠加原理是独立于库仑定律的另一规律, 它表明电力具有可叠加性.