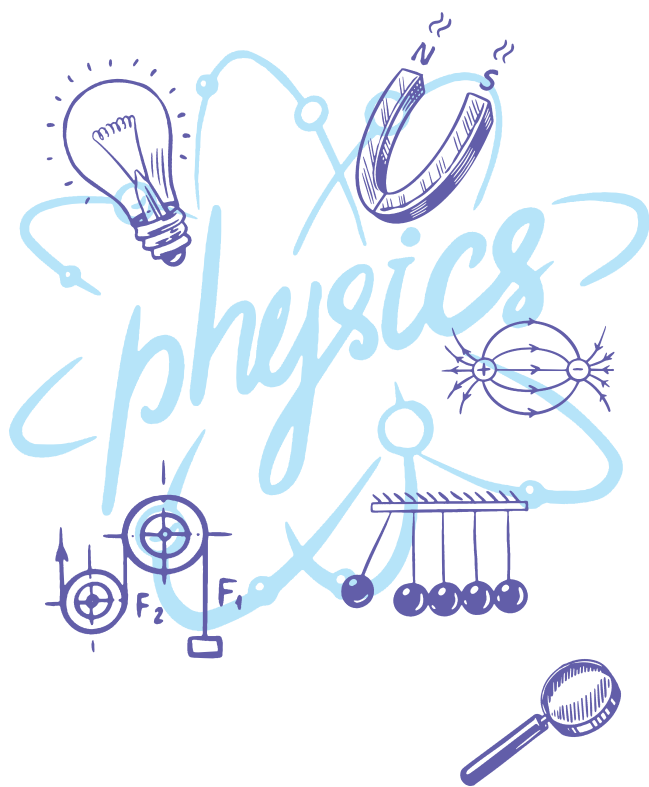


物理如此简单

电磁学篇

张君可 宋艾晨 王超 王君翔 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是一本适合全学段中学生进行严肃阅读的物理学科普读物。人类很早就注意到生活中的电现象和磁现象，并留下了许多文字记载。电磁学继牛顿力学之后历经几个世纪的准备，终于在 20 世纪前叶成为经典物理学大厦的又一支柱。本书我们将探究电和磁的奥秘，让我们一起进入电和磁的神秘世界吧！

本书针对中学低年级、中年级、高年级三个学段学生的阅读特点与需求，立足于中学必备物理知识，内化科学思维方法，重点培养和提升学生的物理学科素养，提升学生解决问题的能力，开阔学生的物理视野，促进学生科学思维水平的实质发展。

本书可以作为中学生学习物理的重要课外读物，具有极高的科普及学习辅助价值。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目 (CIP) 数据

物理如此简单. 电磁学篇 / 张君可等编著. —北京：清华大学出版社，2023.8
ISBN 978-7-302-64485-9

I. ①物… II. ①张… III. ①中学物理课—教学参考资料 IV. ①G634.73

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 153677 号

责任编辑：杜春杰

封面设计：刘 超

版式设计：楠竹文化

责任校对：马军令

责任印制：

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>，<http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社 总 机：010-83470000 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：

经 销：全国新华书店

开 本：170mm × 230mm 印 张：12.25 字 数：208 千字

版 次：2023 年 10 月第 1 版 印 次：2023 年 10 月第 1 次印刷

定 价：59.80 元

产品编号：098697-01



前言

物理真的很难吗？其实物理可以很简单！物理学家坚信“自然的法则尽管无所不包，条例却很少”。物理学家坚信“物理世界是简单的，是可以被理解的”。如果你也能像物理学家一样思考，你会悟到：物理如此简单！

作为物理教师，我们经常会遇到学生恐惧学习物理的情况，甚至他们在还没有接触物理时就对这门学科的学习毫无信心。究其原因，很重要的一点是，当前的物理教学和学生的物理学习远远脱离了物理学科的本真。物理是自然科学领域的一门基础学科，作为自然科学的带头学科，物理学研究大至宇宙、小至基本粒子等一切物质最基本的运动形式和规律，因此成为其他各自然科学学科研究的基础。它是教人认识自然和理性思考的。庄子云：“判天地之美，析万物之理。”这大概就是物理学和物理教育的真谛。

现在中学生对物理学科的学习大多沉浸于解题，知识的获得局限于有限的教材和门类繁多的教辅，使提高物理思维、形成物理观念、提升物理学科素养有很大的困难。这也导致一些中学生对物理形成了刻板印象，认为物理很枯燥、难学，并没有感受到物理是对自然的描述，物理是最具简洁美的科学。生活中处处有物理，学习物理不仅仅是为了解题，更是为了解决实际问题；学习物理不仅仅是为了学习已知，更是为了探究和发现未知！

为避免科普宽泛、缺少物理知识内化的问题，我们紧扣



中学物理知识点，强化科学拓展与思维发散，编写了系列图书。本系列图书分为三册，第一册《物理如此简单：力学篇》主要阐述生活中涉及的运动和力、功和能、动量、振动和波动等力学现象蕴藏的原理及应用；第二册《物理如此简单：电磁学篇》主要阐述与日常生活、生产和科技发展息息相关的电场、磁场、电磁波、直流电路和交流电路等；第三册《物理如此简单：近现代物理篇》主要阐述热学、光学和量子物理基础等。

你手中这本有关物理学的书是严肃的，其中的每一个概念、思想、方法都是很多科学家经过细致严谨的实践研究获得的。作为编写者的我们并不是这些问题的发现者，我们能承诺的是书中的每一个知识点都有更为专业的物理学研究作为保障。在编写过程中，为降低初、高中不同年龄段学生的阅读门槛，我们减少大量数学公式的堆砌，力求用有意思的语言、生动的例子甚至是比喻来更好地阐述。

为了让处于中学阶段的学生能够从更多角度认识物理学，本书以初、高中物理知识为主线，以内化物理原理、学习物理方法、培养科学思维为目标，充分考虑初、高中学生的思维特点，设置了多个板块分散到全书各个章节。

- “生活物理”从生活中的具体实例提出问题，激发学生思考。
- “科学实验”利用生活中的实验器材进行实验，用所学物理知识进行解释和分析，将物理与生活紧密联系起来，让学生体会生活中处处是物理。
- “科学探索”引领学生像科学家一样思考，用科学的思维和方法探索未知。
- “原来如此”对“生活物理”中的问题给予解答并概括性地提炼和总结，从方法、能力等维度点拨，提升学生的科学素养，让学生豁然开朗，体会物理如此简单和有趣。
- “思维拓展”对中学物理知识进行拓展补充，发散思维。主要从物理知识的深化及量化、最前沿科技成果及应用、物理学史的发展等方面开阔学生视野，让其站在高处看物理。
- “科学中国”将中学物理知识与中国物理学发展融合在一起，让学生充分认识中国的物理学成就，知道中国科学家在物理学的道路上付出的努力。
- “小试牛刀”给出生活中另外一些具有相同原理的案例，预留空间，鼓励学生进一步深入学习并应用上述原理大胆尝试和实践。





物理是一种想象力，
你的想象力有多强，
你的物理世界就有多大。
物理是一种思维方式，
你的思维方式有多独特，
你就有多少种看待物理问题的视角。
物理如此简单，
打开书开始阅读吧！

编 者
2023 年 5 月



目 录

第 1 章 奇妙的静电

第 1 节	物体带电的本质是什么?	3
第 2 节	库仑对带电体间相互作用的 研究及发现	9
第 3 节	静电力的作用是一种超距作用吗?	15
第 4 节	如何定量地描述电场的强弱?	19
第 5 节	电场力是保守力吗?	24
第 6 节	你知道粒子加速器的原理及 应用吗?	29
第 7 节	生产和生活中静电的防止与应用	33

第 2 章 认识简单的电路

第 1 节	电路知多少?	41
第 2 节	电流的规律	47
第 3 节	重要的发现——焦耳定律	53
第 4 节	测量电路的小能手——万用表	57



第3章 63 “隐身”的磁场

第1节	磁是如何产生的?	65
第2节	发射高速带电粒子的“炮”	72
第3节	汽车是如何“知道”自己的速度的?	79
第4节	如何设计直流电动机?	84

第4章 91 相生相克的电与磁

第1节	揭开电与磁神秘面纱的 奥斯特与法拉第	93
第2节	探秘动生与感生电动势	99
第3节	自感之父——亨利	105
第4节	电磁炉是如何工作的?	110
第5节	磁悬浮列车的伟大设计	114

第5章 119 广泛应用的交流电

第1节	发电机是如何工作的?	121
第2节	交流电与直流电的世纪之战	130
第3节	中国科技之光——特高压 输电技术	135
第4节	你知道三相交流电吗?	140





第 6 章 145

无处不在的电磁波

第 1 节	发现一个大家族——电磁波	147
第 2 节	你知道莫尔斯电码吗?	154
第 3 节	无线电通信的前世今生	161
第 4 节	懒人的福利——微波炉	169

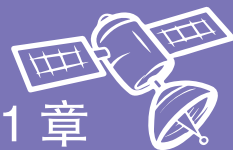
参考文献	173
------	-----

“小试牛刀” 参考答案	177
-------------	-----

后 记	185
-----	-----



第 1 章
奇妙的静电





第1节 物体带电的本质是什么？



生活物理

在干燥的秋冬季节，当我们用手接触门把手时，有时会被门把手轻轻地“电”一下；当我们穿着腈纶材质的衣服时，衣服会贴在身上，引起不适感，当我们在黑暗中脱衣服时，会看到一道道小闪电并听到噼里啪啦的放电声；当我们走近加油站时，会被告知禁止使用手机；打雷下雨时，我们要避免在大树下避雨，而高大建筑物往往装有避雷针，所有这些都是因为存在静电现象。当然，静电也不是一无是处，生活中我们也会利用静电，比如给手机贴膜，给汽车贴膜，不使用任何黏合剂而将塑料窗花贴在玻璃上……那么，物体带电的本质是什么呢？

其实，早在公元前 600 年左右，古希腊学者泰勒斯就发现摩擦过的琥珀吸引轻小物体的现象。公元 1 世纪，中国学者王充也指出摩擦过的琥珀能吸引轻小的物体。16 世纪，英国科学家威廉·吉尔伯特在研究这类现象时首先根据希腊文的琥珀创造了英语单词 electricity（电），用来表示琥珀经过摩擦以后具有的性质，并且认为摩擦过的琥珀带有电荷。

人们发现，很多物体都会由于摩擦而带电，这种现象被称为**摩擦起电**。



科学实验

我们来做一个小实验（见图 1-1）。

图 1-1（a）所示为一个验电器。如图 1-1（b）所示，我们用丝绸摩擦玻璃棒，然后用玻璃棒触碰验电器顶端的金属，此时验电器下端的金属箔片张开，表明验电器带了电，用手摸一下验电器上端的金属部分，箔片下落闭合，表明验电器不带电；如图 1-1（c）所示，我们用毛皮摩擦橡胶





棒，然后用橡胶棒触碰验电器顶端的金属，此时验电器下端的金属箔片也张开，表明验电器带了电，用手摸一下验电器上端的金属部分，箔片又下落闭合，表明此时验电器又不带电了。这是为什么呢？物体所带的电从哪里来，又到哪里去了呢？

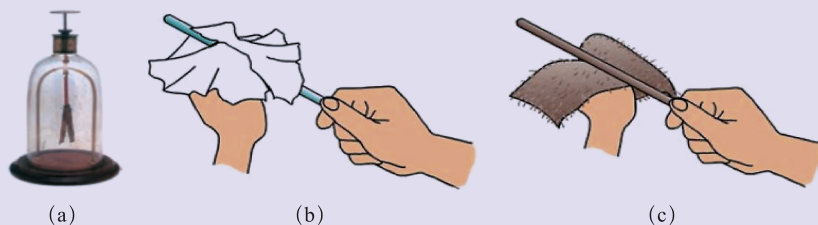


图 1-1 摩擦起电实验



原来如此

早期人们并不知道这种带电现象的本质，直到 20 世纪，在物理学终于解开物质的分子和原子的内部结构之谜后，人们对这种现象才有了较深入的了解。

现在我们已经知道，物质是由分子和原子组成的，而原子又由带正电的原子核和带负电的电子组成，原子核中有质子和中子，中子不带电，质子带正电。一个质子所带的电量和一个电子所带的电量数值相等，也就是说，如果用 e （其数值）代表一个质子的电量，那么一个电子的电量就是 $-e$ 。所有物质内部固有地存在着带有两种基本电荷的电子和质子，这正是各种物体带电过程的内在依据。在正常情况下，物体中任何一部分所包含的电子的总数和质子的总数是相等的，所以对外界不表现出电性。如果在一定的外因作用下（比如上面实验中的相互摩擦）物体得到或失去一定数量的电子，使得电子的总数和质子的总数不再相等，物体就呈现电性。两种不同材料的物体互相摩擦后之所以都会带电，是因为通过摩擦，每个物体中都有一些电子脱离了原子的束缚，跑到另一个物体中，但是不同材料的物体彼此向对方转移的电子数目往往不相等，所以总体上讲一个物体失去了电子，另一个物体得到了电子，结果失去电子的物体就带正电，得到电子的





物体就带负电。因此**摩擦起电**实际上是通过摩擦使电子从一个物体转移到另一个物体的过程。

1. 元电荷

迄今为止，实验发现的最小电荷量就是电子所带的电荷量。人们把这个最小电荷量叫作**元电荷**，用 e 表示。实验还发现，所有带电体的电荷量都是 e 的整数倍。这就是说，电荷量是不能连续变化的物理量。

元电荷 e 的数值最早是由美国物理学家罗伯特·密立根测得的，他因此获得诺贝尔物理学奖。在密立根实验之后，人们又做了许多测量。现在公认的元电荷 e 的值为 $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}\text{ C}$ 。在计算中，可取 $e = 1.60 \times 10^{-19}\text{ C}$ 。

2. 两种电荷

美国科学家本杰明·富兰克林（见图1-2）通过风筝实验，把天上的电引到地上，证明了天电和地电的同一性，即他发现雷电的性质与摩擦产生的电的性质完全相同，并命名了**正电荷**和**负电荷**。迄今为止，人们没有发现对这两种电荷都排斥或都吸引的电荷。**自然界的电荷只有两种，同种电荷间相互排斥，异种电荷间相互吸引。**

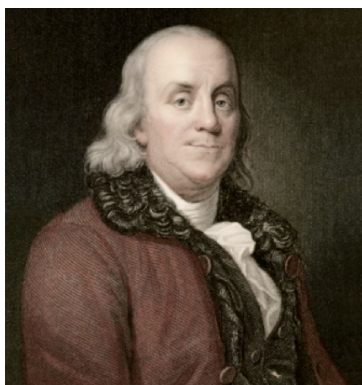


图1-2 本杰明·富兰克林



思维拓展

摩擦可使物体带电，那么还有其它方法可使物体带电吗？

我们再来做一个科学小实验（见图1-3）。

取一对用绝缘柱支持的导体A和B，使它们彼此接触。起初它们都不带电，贴在下部的两片金属箔是闭合的。手握绝缘棒，把带正电荷的带电体C移近导体A，A和B下方的金属箔均张开，这时手持绝缘柱把导体A和B分开，然后移开C，金属箔依然张开，表明此时A和B均带电，也就是说，我们用这种不接触的方式使物体带电。之后再让导体A和B接触，会看到金属箔下落闭合，表明A和B刚才带异种电荷，在接触过程中发生了中和。



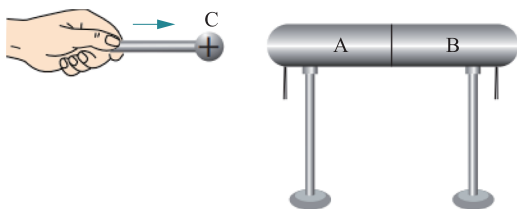


图 1-3 静电感应实验

1. 静电感应

当一个带电体靠近导体时，由于电荷间相互吸引或排斥，导体中的自由电荷便会趋向或远离带电体，使导体靠近带电体的一端带异种电荷，远离带电体的一端带同种电荷，这种现象叫作**静电感应**。利用静电感应使金属导体带电的过程叫作**感应起电**。

当一个带电体靠近绝缘体（如橡胶、玻璃等材料做成的物体）时会不会发生上述现象呢？答案是否定的。看来是否会发生静电感应与物体内部的自由电荷相关。金属类物体内部存在着可以自由移动的电荷（金属导体中自由电荷就是自由电子），我们称之为导体。当然，并非只有金属才是导体，电解液、电离的气体等都是导体。与导体不同，在一些物体中，绝大部分电荷只能在一个原子或分子的范围内做微小的移动，这些物体叫作绝缘体。注意，绝缘体内部并不是没有电子，只是自由电子少，导电性能很差，也就不会发生感应起电，而只能靠摩擦起电的方式带电。我们从微观角度想象一下，当玻璃等绝缘体受到摩擦，某些电子获得了足以挣脱原子核引力的能量而成了自由电子转移到另外一个物体上时，该绝缘体就带了电。

2. 电荷守恒定律

显然，在上述的摩擦起电和感应起电方式中，电荷都不是凭空产生的，电荷只是在物体间转移，电荷数是守恒的。

在物理学发展史中，对电现象的研究要比其他研究困难得多，因为一直没有找到恰当的方法来产生稳定的静电和对静电进行测量。直到 1660 年，盖里克等科学家发明了摩擦起电机，才有了对电现象系统的研究。1747 年，富兰克林根据他所做的摩擦起电实验提出了“电荷守恒原理”。富兰克林使电学的研



究从单纯的现象观察进入精密的定量描述，使人们开始有可能用数学方法来表示和研究电现象。因此，后人把他看成是电学理论的奠基人。富兰克林在《电的实验和观察》一书中是这样表述的：在任一封闭的系统中，电基质的总量不变，它只能被重新分配而不能被创生。这和现今教材中的论述在本质上是相同的。

电荷既不会被创生，也不会被消灭，它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；在转移过程中，电荷的总量保持不变。这个结论叫作**电荷守恒定律**。电荷守恒定律更普遍的表述是：一个与外界没有电荷交换的系统，电荷的代数和保持不变。电荷守恒定律是自然界中重要的基本规律之一。



中国古代关于摩擦起电的记载

中国是世界四大文明古国之一。几千年来，我们的祖先创造了光辉灿烂的古代文化，其中包括电磁学上的一些发现和发明。值得注意的是，在世界文明古国中，只有中国和古希腊发现了磁石吸铁和摩擦起电的现象。中国古代在电磁学方面的成就散见于古籍中。

西汉末期的《春秋考异邮》（公元前20年左右）中有“玳瑁吸裙”的记载（见《太平御览》卷八百七），现在一般认为它的意思是经过摩擦的玳瑁能够吸引草屑。这是现今发现的中国最早关于摩擦起电现象的记载。公元1世纪，中国学者王充在《论衡》一书中写下“顿牟掇芥”一语，意为摩擦过的琥珀（一说指玳瑁）能吸引草芥一类的轻小物体。明代李时珍所著《本草纲目》中有“惟以手心摩擦拾芥为真”的记载（见第三十七卷）。这是鉴别琥珀真假的方法，即用手掌心摩擦物体到发热，看它能不能吸引草屑，能吸引草屑的就是真琥珀。这也可以帮助我们理解王充在《论衡》中所写“顿牟掇芥”的意思。

西晋张华在《博物志·杂说上》（290年）中记载：“今人梳头脱着衣时，有随梳解结有光者，亦有咤声。”这是关于摩擦起电产生火花并发出声音的记载。



U 小试牛刀

自制验电器

试一试：自己动手制作一个验电器，并用验电器检测不同带电体所带电荷的种类和相对数量。

建议方案：找一个带有绝缘橡皮塞的干燥洁净的空玻璃瓶，将一根导体棒（铜或铁等）穿过橡皮塞，在其下端用金属丝挂两片金属箔（可以用锡箔纸制作），就制成了一个简单的验电器。可以使用这个验电器检测一下用头皮摩擦过的塑料梳子所带的电荷的种类和相对数量。



第2节 库仑对带电体间相互作用的研究及发现

生活物理

当我们用气球摩擦两侧的头发后，两侧头发均会被气球吸引而飘起（见图1-4），这是因为头发和气球所带的异种电荷相互吸引。而当我们把这两只气球相互靠近时，会感觉靠得越近，它们之间的斥力越大。带电体间的相互作用力与哪些因素有关呢？



图1-4 气球摩擦头发

科学实验

我们来做一个科学小实验（见图1-5）。

在实验室中用感应起电机（后文将介绍它的基本结构）使物体C带正电。将带正电的带电体C置于铁架台旁，把系在丝线上带正电的小球（这个小球要尽可能轻）先后挂在 P_1 、 P_2 、 P_3 等位置。我们发现，带电体C与小球间的作用力会随带电体间距离的变大而变小，表现为绝缘丝线与竖直方向之间的夹角变小；而改变带电体C的带电量，C的带电量越多，在同一位置丝线偏离竖直方向的角度越大。

电荷之间作用力的大小与距离和带电量存在怎样的定量关系呢？

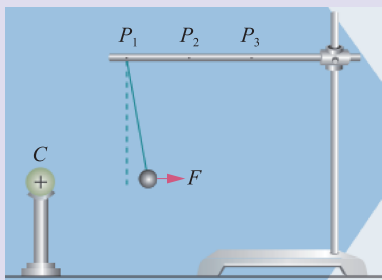


图1-5 电荷的相互作用实验



原来如此

实验表明，两个实际的带电体间的相互作用力与它们自身的大小、形状以及电荷分布都有关系。

1. 点电荷

为方便研究，我们可以忽略带电体本身的形状和大小，引入一个理想化的模型——**点电荷**。当带电体的大小比它们之间的距离小得多，以致带电体的形状、大小及电荷分布状况对它们之间的作用力的影响可以忽略时，这样的带电体可以看作带电的点，叫作**点电荷**。点电荷类似于力学中的质点，也是一种理想化模型。

2. 库仑定律

法国科学家查利·库仑设计了一个十分精妙的实验（扭秤实验），对电荷之间的作用力开展研究，最后确认：真空中两个静止点电荷之间的相互作用力，与它们的电荷量的乘积成正比，与它们的距离的二次方成反比，作用力的方向在它们的连线上。这个规律叫作**库仑定律**。这种电荷之间的相互作用力叫作**静电力**或**库仑力**。

真空中两个带电量分别为 q_1 、 q_2 的点电荷相距 r 时静电力 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 。式中的 k 是比例系数，叫作**静电力常量**。当两个点电荷所带的电荷为同种电荷时，它们之间的作用力为斥力；反之，所带的电荷为异种电荷时，它们之间的作用力为引力。

在国际单位制中，电荷量的单位是库仑（C），力的单位是牛顿（N），距离的单位是米（m）。通过实验测得， $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 。根据库仑定律，两个电荷量为 1 C 的点电荷在真空中相距 1 m 时，相互作用力是 $9.0 \times 10^9 \text{ N}$ ，相当于地球上 100 万吨的物体所受的重力！可见，库仑是一个非常大的电荷量单位，我们几乎不可能做到使相距 1 m 的两个物体都带 1 C 的电荷量。

通常，一只气球与头发摩擦后所带的电荷量不到百万分之一库仑，但天空中发生闪电之前，巨大的云层中积累的电荷量可达几百库仑。

库仑定律是电磁学的基本定律之一，它是继牛顿万有引力定律之后的第二个



作用力与距离平方成反比的物理定律，两个定律有相似性。人们利用引力和电力或磁力的相似性，用类比方法进行推测，对库仑定律的发现具有借鉴作用，但是如果没有实验的检验，仅仅是理论上的推测，再聪明的头脑也无法做出决断。库仑定律的发现过程正说明了这一点。

18 世纪中叶，牛顿力学已经取得辉煌胜利，人们借助已经确立的万有引力定律，对电力和磁力的规律做了种种猜测。1760 年，瑞士物理学家伯努利首先猜测电力会不会也跟万有引力一样，服从平方反比定律。他的想法显然有一定的代表性，因为自然现象中许多过程都存在平方反比关系，如光的照度、水向四面八方喷洒、均匀固体中热的传导等无不以平方反比变化。

富兰克林在 1755 年左右做了一个“空罐实验”：把一只银罐放在绝缘支架上，使它带电，用丝线吊着一个直径约为 1 英寸（约 2.54 厘米）的木球放在银罐中，触及银罐的底部，当取出球时发现，球并没有因接触带电体而带电；但若将球与银罐的外部接触，则球可以带上同种电荷。富兰克林的朋友，英国科学家普利斯特利在 1767 年问世的《电学历史和现状及其原始实验》一书中提到：由富兰克林的空罐实验可以得出“电的吸引与万有引力服从同一定律，即相互作用力与距离的平方成反比”。普利斯特利的这一结论不是凭空想出来的，因为牛顿在 1687 年就证明过，如果万有引力服从平方反比定律，则均匀的球壳对壳内物体的引力为零。不过，普利斯特利的结论并没有得到科学界的普遍重视，因为他并没有进行特别明确的论证，仍然停留在猜测的阶段。

英国物理学家卡文迪什在 1773 年用两个同心金属壳探究了两个带电体间的相互作用力与距离的平方之间的关系（见图 1-6）。卡文迪什把这个实验重复了多次，确定静电力服从平方反比定律，指数偏差不超过 0.02。卡文迪什的实验设计相当巧妙，他用的是当年最原始的电测仪器，却获得了相当可靠而且精确的结果。他成功的关键在于掌握了牛顿万有引力定律这一理论武器，通过数学处理将直接测量变为间接测量。

人们公认的库仑定律是库仑在 1785 年发现的。这一年他发表了第一篇有关电荷作

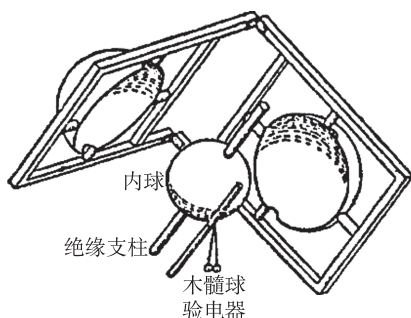


图 1-6 卡文迪什的实验装置





用力的论文，报道了他对静电力随距离变化的研究。他用的实验装置，即中学教材中介绍的电扭秤，也叫作**库仑扭秤**。

如图 1-7 所示，细银丝的下端悬挂一根绝缘棒，棒的一端是一个小球 A，另一端通过物体 B 使绝缘棒平衡，悬丝处于自然状态。把另一个带电的金属小球 C 插入容器并使它接触 A，从而使 A 与 C 带同种电荷。将 C 和 A 分开，再使 C 靠近 A，A 和 C 之间的作用力使 A 远离 C。扭转悬丝，使 A 回到初始位置并静止，通过悬丝扭转的角度可以比较力的大小。改变 A 和 C 之间的距离 r ，记录每次悬丝扭转的角度，就可以找到力 F 与距离 r 的关系，结果是力 F 与距离 r 的二次方成反比。

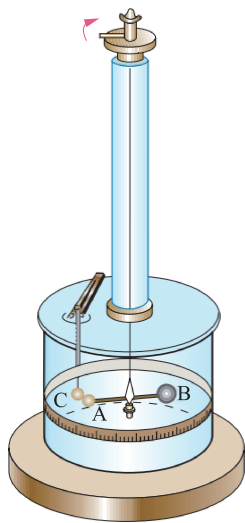


图 1-7 库仑扭秤实验

在库仑那个年代，还不知道怎样测量物体所带的电荷量，甚至连电荷量的单位都没有。不过两个相同的金属小球（一个带电、一个不带电）互相接触后，它们对相隔同样距离的第三个带电小球的作用力相等，因此，可以断定这两个小球接触后所带的电荷量相等。这意味着，如果让一个带电金属小球与另一个不带电的完全相同的金属小球接触，前者的电荷量就会分给后者一半。多次重复，可以把带电小球的电荷量 q 分为 $q/2$ 、 $q/4$ 、 $q/8$ ……这样就可以得出电荷之间的作用力与电荷量的关系：力 F 与两电荷量的乘积成正比。综合上述实验结论，可以得



到库仑定律。值得一提的是，1787年库仑发表了第二篇有关静电力研究的论文。在论文中他坦诚地说明了电扭秤方法的欠缺。他在实验时使用的小球为木髓小球，在测量电荷的吸引力时遇到了困难，因为活动小木球的平衡是一种不稳定的平衡，即使能达到平衡，最后两球也往往会相碰。这是因为电扭秤十分灵活，多少会出现左右摇摆的情况。尽管如此，他还是声称得到了带电体间的吸引力也满足平方反比规律的结果。



思维拓展

从库仑定律的发现经过可以看出，“相互作用力与距离的平方成反比的关系”自始至终对库仑的实验起着指导作用，也可以看到类比方法在科学研究中所起的重要作用。如果不是先有万有引力定律的发现，单靠实验的探索 and 数据的积累，不知道何年何月才能得到严格的库仑定律的表达式。实际上整个静电学的发展都是在借鉴和利用引力理论的已有成果的基础上取得的。

虽然库仑定律是通过宏观带电体的实验研究总结出来的规律，但是物理学进一步的研究表明，原子结构、分子结构、固体和液体的结构，以及化学作用等问题的微观本质都和这种库仑力有关，而在这些问题中，由于引力常数 G 值（通常计算中取 $6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ）非常小，万有引力的作用十分微小，基本可以忽略。譬如，氢原子核与电子之间的静电力是万有引力的 2.3×10^{39} 倍，在研究相关问题时万有引力就可以忽略了。再进一步延伸思考，那就是在研究微观带电粒子的相互作用时，都可以把万有引力忽略，除非有特殊的说明。

多个点电荷间的静电力满足**力的叠加原理**。库仑定律描述的是两个点电荷之间的作用力。如果存在两个以上点电荷，那么每个点电荷都要受到其他所有点电荷对它的作用力。两个或两个以上点电荷对某一个点电荷的作用力，等于各点电荷单独对这个点电荷的作用力的矢量和。

库仑定律给出的虽然是点电荷之间的静电力，但是任何一个带电体都可以看成是由许多点电荷组成的，因此如果知道带电体上的电荷分布，应用数学微积分的思想，根据库仑定律同样可以求出带电体之间的静电力的大小和方向。



U 小试牛刀

感应起电机的工作原理

手摇感应起电机（见图 1-8）的核心部件是两个玻璃圆盘，它们套在同一根轴上。手柄通过传动装置带动两个圆盘朝相反的方向旋转。圆盘靠外一侧贴有若干对扁圆形的导电膜，两边各有一根放电杆，放电杆的上端制成球形。使两根放电杆上端的两个金属小球分开一定的距离，用手摇动手柄，很快就会看到两个金属小球间发生火花放电，同时会听到“啪啪”声。你知道它是怎么起电的吗？

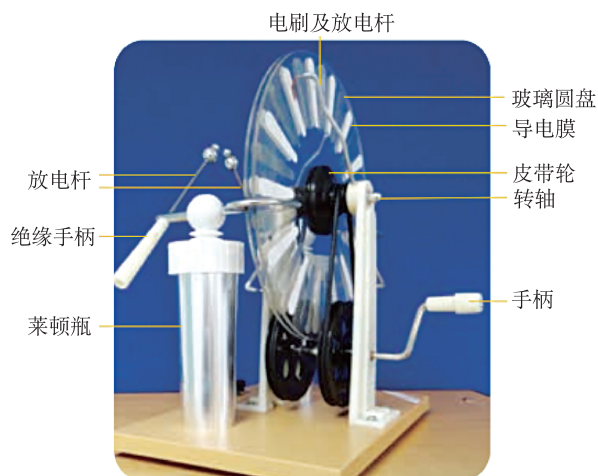


图 1-8 手摇感应起电机