

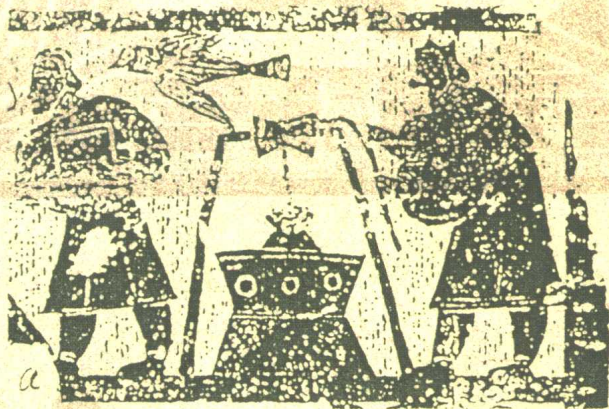


# 物理学 基础教程

A Course in Physics

(中册)

林清凉 戴念祖 编著



CHEP  
高等教育出版社



Springer  
施普林格出版社

PHYSICS

# 物理学基础教程

(中册)

林清凉 戴念祖 编著



CHEP  
高等教育出版社



Springer  
施普林格出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

物理学基础教程(中册)/林清凉 戴念祖 编著. - 北京: 高等教育出版社;  
海德堡: 施普林格出版社, 2000.12

ISBN 7-04-009122-4

I. 物… II. ①林… ②戴… III. 物理学 - 高等学校 - 教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 78818 号

**责任编辑 赵天夫 封面设计 王凌波 责任印制 陈伟光**

物理学基础教程(中册)  
林清凉 戴念祖 编著

---

出版发行 高等教育出版社 施普林格出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010 - 64054588

传 真 010 - 64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京民族印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16

版 次 2000 年 12 月第 1 版

印 张 23.75

印 次 2000 年 12 月第 1 次印刷

字 数 600 000

定 价 30.00 元

---

© China Higher Education Press Beijing and Springer-Verlag Heidelberg 2000

**版权所有 侵权必究**

# 目 录

<b>第七章 电磁学</b> .....	(1)
(I) 回顾人类的经验 .....	(2)
(A) 祖先的贡献 .....	(2)
(B) 西洋的贡献 .....	(5)
(C) 电磁学和牛顿力学的大致比照 .....	(6)
(II) 静电学(一): 电荷、电场、电势、Gauss 定律、电容器 .....	(8)
(A) 摩擦生电, 电荷(electric charge)是什么? .....	(8)
(B) 电荷间的相互作用, Coulomb 定律 .....	(10)
(C) 电场强度 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ , 电势 $V(\mathbf{r})$ .....	(15)
(D) 导体(conductor), 半导体(semiconductor), 绝缘体(insulator) .....	(19)
(E) 重看 Coulomb 定律, Gauss 定律 .....	(20)
(F) 电偶极子和电偶极矩 .....	(29)
(G) 电容器(capacitor), 电容(capacitance)和电能 .....	(30)
(III) 静电学(二): 电流、电阻、电动势、电路 .....	(45)
(A) 电流密度(electric current density)和电流 .....	(45)
(B) 电阻 $R$ 、电阻率 $\rho$ 、导电率 $\sigma$ .....	(48)
(C) 电动势(electromotive force), 电能 .....	(53)
(D) 电路(circuit) .....	(59)
(IV) 静电学与人体 .....	(68)
(A) 人体 .....	(68)
(B) 神经系统 .....	(69)
(C) 神经如何传递信号? .....	(70)
(D) 信息传递的 $RC$ 电路模型 .....	(74)
(E) 心脏的跳动(缩胀)和脉搏 .....	(76)
(V) 静磁学: 磁荷、磁场、Biot-Savart 和 Ampere 定律、Hall 效应 .....	(79)
(A) 什么叫静磁学呢(magnetostatics)? .....	(79)
(B) 天然磁铁以外的磁场 .....	(82)
(C) 电荷 $q$ 在外磁场 $\mathbf{B}_{\text{ext}}$ 的情况下的运动 .....	(96)
(D) Hall 效应 .....	(105)
(E) 简单地比较静电学和静磁学 .....	(108)
(XI) 物质的电磁性 .....	(110)
(A) 物质 .....	(110)
(B) 物质呈现的电学现象 .....	(111)
(C) 磁性物质呈现的磁学现象 .....	(114)

(D)物质(电介质、磁性物质)对电磁场的非线性反应 .....	(119)
(VII) Faraday 定律 .....	(122)
(A)复习及检讨 .....	(122)
(B)电磁感应 .....	(124)
(C)Faraday 定律的内涵 .....	(127)
(D)静电场 $E_S$ 和感应电场 $E_{ind}$ 的比较 .....	(131)
(VIII)自感应和互感应、电振动、交流电 .....	(134)
(A)自感应(self induction)、互感应(mutual induction)、电感(inductance) .....	(134)
(B)电路内配件间的能量交换,电磁振动 .....	(139)
(C)交流电 .....	(150)
(D)讨论:瞬变效应,共振现象,品质因子(quality factor) .....	(158)
(IX)总结电磁学定律、Maxwell 方程组、电磁波 .....	(162)
(A)Ampere-Maxwell 定律 .....	(162)
(B)经典电磁学理论(Maxwell 的电磁学理论) .....	(169)
(C)经典电磁学的本质 .....	(182)
(D)心电图,脑电图或脑波图 .....	(195)
(E)Maxwell 在电磁学以外的重要贡献,Maxwell 分子涡旋理论简介 .....	(198)
本章主要内容 .....	(202)
参考文献和注解 .....	(207)
<b>第八章 光 学</b> .....	(229)
(I)回顾光学史 .....	(230)
(A)光是什么? .....	(230)
(B)中国人在人类光学史上的贡献 .....	(230)
(C)西洋在人类光学史上的贡献 .....	(239)
(II)光就是电磁波 .....	(247)
(A)确定光是电磁波 .....	(247)
(B)电磁波和以太 .....	(248)
(C)电磁场的粒子性一面 .....	(248)
(III)几何光学 .....	(249)
(A)光的反射 .....	(250)
(B)光的折射 .....	(250)
(C)反射和折射的应用 .....	(253)
(IV)物理光学 .....	(273)
(A)干涉 .....	(274)
(B)衍射 .....	(286)
(C)非波动光学 .....	(298)
本章的主要内容 .....	(308)
参考文献和注解 .....	(310)

<b>第九章 狭义相对论</b> .....	(311)
(I) 历史背景 .....	(312)
(A) 牛顿力学的时空以及牛顿的相互作用观念 .....	(312)
(B) 19 世纪的物理学遇到的一些问题 .....	(313)
(II) 进一步探讨 Maxwell 电磁学理论 .....	(315)
(A) 波动现象, Lorentz 变换 .....	(316)
(B) Minkowski 空间 .....	(318)
(III) 1905 年狭义相对性理论如何诞生? .....	(320)
(A) 同时性 .....	(320)
(B) 长度(空间)和时间的相对性 .....	(321)
(C) 固定系和相对于它做等速运动的坐标系间的坐标和时间变换 .....	(322)
(D) 长度收缩(length contraction)和时间膨胀(time dilation) .....	(324)
(E) 速度的转换 .....	(327)
(IV) 相对论性力学 .....	(328)
(A) 质量问题 .....	(329)
(B) 动量及其变换 .....	(330)
(C) 质量能量关系和自由粒子的总能量 $E$ .....	(333)
本章的主要内容 .....	(337)
参考文献 .....	(339)
<b>附 录</b> .....	(341)
物理常数(量)表(MKSA)制 .....	(341)
(G) 电磁势和惯性系间的电磁场变换——MKSA 制 .....	(343)

# 第七章

## 电 磁 学

---

## (I) 回顾人类的经验

现代化的物质生活、文化生活都离不开电,尤其国防技术和通信技术完全建立在电磁学理论基础之上。因此,有人说:“要在 21 世纪活得有尊严,就要看你有多少电磁学知识”。

从 17,18 世纪以来,电磁学得到很好的发展,建立起相当完备的理论。在我们讨论它的具体内容之前,让我们先回顾一下古代东西方人在电磁方面所作出的贡献。

### (A) 祖先的贡献<sup>1~4</sup>

#### (1) 有关磁的知识和发明发现

春秋战国之际,冶铁业在中国开始诞生。由于寻找铁矿的需要,在《管子·地数篇》中记载了磁铁矿与其他矿石的共生关系:“上有慈石者,下有铜金。”其中,“慈石”即今“磁石”,也就是磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ );“铜金”可能是铜硫铁矿( $\text{CuFeS}_2$  或  $\text{Cu}_3\text{FeS}_3$ )。《管子》一书是管子弟子记录管子(又名管仲, ? - 645 B. C.) 言行的著作,虽成书时间难于确切断定,但其中“地数”篇的有关内容为管子生活年代即公元前 7 世纪的人们的知识,当无疑问。由此推断,在公元前 7 世纪中国人发现了磁石。

在秦汉及其之前,人们称磁石为“慈石”。这是因为磁铁矿具有吸铁的特性,“如慈母之招子”,因而得名。可见,磁铁矿及其吸铁的特性在中国古代是同时被认识的。在历史地理上,有称为“慈州”、“慈山”的地名、山名,皆因其盛产磁石的缘故。古代中国人不仅按照磁铁的吸铁力强、或能相连不断地吸十余针,作为判断磁铁的品质优劣,而且发现磁石不能吸引黄金、铜。现在我们知道,黄金和铜是抗磁性物质,它们的磁化率为负值,因此不被磁体所吸引。

与磁铁吸引性质相比较,它的排斥性的发现稍微晚些。汉代初期,即公元前 121 年,方士栾大向汉武帝献斗棋术。棋子是用长条形磁铁作成的。在斗棋时,人们见到棋子“自相触击”,且有“慈石提棋”和“慈石拒棋”的现象。前者是异性相吸、后者是同性相斥的现象。可见,磁石的极性至晚在汉初已被人们发现。

由于磁石吸铁并非需要接触作用,而是在一小段空间距离内就可以发生。古代中国人将此现象称之为“磁石吸铁,隔阔潜应”。这大概是电磁超距作用的思想先导。然而,更有趣的是,至晚,明代人发现“磁石吸铁,隔碍潜通”。这似乎表明他们曾观察过诸如磁铁使铜盆内的铁沙跳舞的现象。虽有铜物质阻碍,但磁作用不被隔绝。刘献廷(1648 - 1695)在其著《广阳杂记》述及这一现象时,曾问其侄子阿孺,何物可以隔断磁作用?阿孺回答说:“惟铁可以隔耳”。于是,立即让人去实验,结果确实如此。这正是一个多世纪之后,即 1786 年 A. C. Coulomb(1736 - 1806) 又一次发现的磁屏蔽现象。

自从“司南”和指南针的发明,就表明人们发现磁铁指极性。宋代沈括(1031 - 1095)在其著《梦溪笔谈·补笔谈》卷三《药议》中指出:

“以磁石磨针锋,则锐处常指南,亦有指北者。”

甚至明代的堪舆师发现:“铁条长而均者,悬之亦指南。”以磁石磨针,是磁感应发现的典型例子。悬挂的铁条会指南,是由于地磁场对铁条影响。但是,对于磁针或悬挂的铁条如何会指南、指北,古代中国人尚不明其理。直至英国的 William Gilbert(1540 - 1603) 于 1600 年通过实验发现地球本身也是个大磁体之后,人们才明白磁铁指极性的奥妙。



中国古代人虽不懂地球是个大磁体,但他们却在世界上最早发现地磁偏角。沈括说,指南针“常微偏东,不全南也。”这个偏东方向,正是地理南北极和地磁南北极的偏差所致。明代朱载堉(1536 - 1611)于1567 - 1581年间曾经测得洛阳的地磁偏角为南偏东 $4^{\circ}48'$ ,他还指出,“八方之地,各有偏向。”也就是说,他发现了地磁偏角随地理位置而变。

古代文献中虽没有明确的地磁倾角的记述,但是,宋代曾公亮(999 - 1078)在其著《武经总要》描写指南针的制造过程中,述及经锻烧通红的条形铁需要淬火,淬火时将铁片斜插入水中,令其一端正对地理子午线方向的子位。这恰好是利用了地磁倾角,以增加对铁片的磁化程度。

磁石在古代中国得到多方面的应用。在医疗上,作为中医中药用于治疗风湿,腰肢疼痛等症;还用它作成磁化水,磁化酒等;在建筑上用磁石作门,以防盗贼携铁器入室;在陶瓷生产上,用磁石吸引釉料中铁质杂物(氧化铁、氧化钴),以避免烧瓷过程中在白色瓷器上出现红色或黑色斑点。

集中了古代人关于静磁学知识的是指南针的发明和应用。早在战国至汉代时期,中国人利用天然磁石作成了能指示方向的“司南”(见图1-4)。大约唐宋之际,发明了指南针,它是以磁感应方法使铁针磁化而成;前述曾公亮记载了指南鱼、指南龟的制造方法:将鱼形、龟形铁片烧红后淬火,利用地磁场磁化钢铁片制成的。指南针的安装方法也有水浮法、钉支法、悬丝法等多种形式。悬丝法比A. C. Coulomb于1777年因发明这种方法而获得法国科学院的奖赏要早600多年。水浮法后来成为水罗盘的始祖。钉支法(又称轴托法)是后来旱罗盘的始祖。罗盘,无论水罗盘或旱罗盘都是中国人于10至12世纪期间发明的。过去曾一度认为,旱罗盘是欧洲人发明的,这种说法并不符合历史事实。1988年在江西省临川县宋墓中出土了两个“张仙人瓷俑”,瓷俑右手持一早罗盘,置于左胸前(图7-1)。知其为旱罗盘不仅是因为瓷俑竖持罗盘,而且磁针中央塑有转动中心轴。墓主人为南宋邵武知军朱济南(? - 1197),葬于1198年。可见,在公元1198年之前,旱罗盘已在中国被用于堪舆。已有大量确凿文献,表明中国人在12世纪初年已将指南针用于航海。现在,人们一般地公认,指南针和罗盘是由阿拉伯人从中国传播到欧洲的。实际上,一旦指南针或罗盘上了航船,其传播之快当与航速相同。



图7-1 江西临川宋墓出土张仙人瓷俑  
(引自《考古》1988年第4期,图版3)

## (2) 有关电的知识和发现

在殷商时代的甲骨文中,有近10个表示同一意思的“电”字。它们都是天空中线状闪电的真实描绘,只不过是用车轮表示雷声,用车轮的隆隆转动象征随电闪之后而来的声音。西周金文中出现了与如今繁体相同的“电”字,它把天空雨滴,线状闪电和雷声集中在一个字里。一个汉字“电”字的造形,却浓缩了上古代人对雷电现象的仔细观察和精心描绘。

对静电现象的观察记载稍微晚些。大约西汉初期的纬书《春秋考异邮》中才有“玳瑁吸

喏”的记述。东汉王充将“玳瑁”写为“顿牟”，这大概因为他是浙江上虞人，至今该地的方言还将“玳瑁”念成“顿牟”。玳瑁原指海中似龟般的爬行动物，其甲壳也叫玳瑁，经摩擦后会呈现静电，并吸引草屑一类轻小绝缘体，也即“喏”。东汉末开始，“琥珀拾芥”的现象受到越来越多的人注意，以致本草学家将此作为判别真假琥珀的标准。据《三国志·虞翻传》载，三国时期人们普遍知道琥珀不吸引腐烂的芥草。今天我们知道，这是因为它含有水分，成了导体的缘故。刘宋朝本草学家雷斅（生活于5世纪）发现用布与琥珀摩擦比用手所得的静电力更大，以致琥珀可以吸引比芥草重许多的芥子。

自从西晋张华(232 - 300)发现并记述了用漆木梳梳头，解脱毛皮或丝绸衣服时的静电闪光和放电声之后，在明代以前人们发现的经摩擦而起静电的物质有猫皮、孔雀毛、貂皮、皮毛、丝绸、普通羽毛等等。例如，明代都邛(生活于16世纪上半叶)在其《三余赘笔》中写道：

“吴绫出火。吴绫为裳，暗室中力持曳，以手摩之良久，火星直出。”

这正是摩擦丝绸织品的静电放电现象。

历代中国人对雷电的观察，使他们知道，先看见闪光，后听到雷声。他们除观察到大量的线状闪电外，还观察记载了联珠状闪电和球状的火光闪电。东汉王充认为雷电本质是火，并以其杀死动物、烧毁屋宇、含硫磺气味、有爆裂声、会发光等论证它是火。在王充之后1600年，美国B. Franklin(1706 - 1790)于1737年认为，闪电是一种有怪味的火；1749年他以风筝实验证明闪电本质时提出12种证据，其中4种与王充完全相同。中国古代人还以阴阳二气的摩擦、碰撞解释雷电产生的原因。如果将古代人的“阴阳二气”看作是分别带阴电和阳电的二个云层，我们就不能不惊讶古代人对雷电成因的物理机制，即摩擦与碰撞运动的猜测与近代的科学解释几乎相同。而与此同时的中世纪欧洲人，绝对地将雷电看成是神的愤怒的感情泄露。

历代文献中还记述了许多异乎寻常的雷电事故。雷电烧熔了在平时看来坚固的金属物质或器皿，而紧挨着它们的皮革或干燥的漆木却丝毫未损。明代方以智(1611 - 1671)在总结这些现象时明确指出：“雷火所及，金石销熔，而漆器不坏。”所谓“金石”也就是金属物质。方以智以对雷电具有不同性状的物质分类，可以看作是近代电学中关于导体和绝缘体的肇始思想。

古代中国人还知道人工消雷的方法。清雍正十年(1732)编修的《江西通志》卷107中记述了公元1512年在余干县仙居寨发生持续多日雷云遮空，当地士卒“因发銃冲之，其火四散”。这是历史上以枪銃发射子弹进行人工消雷的最早尝试，也是今日以发射导弹进行人工消雷的先导。

从汉代起，历代不断有人观察到尖端放电的现象。在长兵器的尖端，旗杆顶、金属塔刹、屋宇殿堂的脊吻上，都见到迸射火光或闪射火星的现象。方以智对于历史上诸多记载，认为这是“雷火，每依墙杆栋楹有披击出声而上者”。他对大气电场中的尖端放电现象作出了直观的合乎事实的解释。

或许由于屋顶脊吻的尖端放电现象，曾经使中国人产生了建筑避雷的思想，也未可知。山西应县木塔建于1056年，高67米，其中铁制塔刹长14.21米。塔刹分别用8条铁链系于各屋脊端加以固定。这一建筑，历经近千年，但未被雷电烧毁。近年的研究表明，该塔是建于周围绝缘极好的地基之上，具有“绝缘避雷”的机制。300多年以前，来华传教士、葡萄牙人安文思(Gabriel de Magalhaens, 1609 - 1677)曾经提出中国人的建筑避雷问题。他的记述比美国Franklin在1752年提出用避雷针保护建筑物的建议要早一个世纪。

安文思，1636年应其本人之请被耶稣会派往印度果阿，在该地教授哲学。1640年入华，深入中国各地传教，最后定居于四川。他曾受到清顺治帝的赏识，并赐予教堂和传教经费。顺治

帝死后,他又被两次指控行贿罪。后来,在康熙帝的保护下,他平静地度过晚年。卒时,康熙帝为他举行了隆重葬礼。安文思在 1688 年前后完成两本介绍中国文化的著作,其中之一为《中国的十二大奇迹》(les Douze excellences de la Chine)。该书被分别译成法文和英文,成为欧洲人了解中国的经典著作。其中有一段关于中国建筑避雷的文字描述。当他叙述了中国建筑特点和渊源之后,他说,屋顶脊吻即龙上的“金属条一端插入地里。这样,当闪电落在屋上或皇宫时,闪电就被龙舌引向金属条通路,并且直奔地下而消散,因而不致伤害任何人。人们可以清楚地看到,这个民族极有智慧,他们知道,如何以自己的劳动将美和实用结合在一起,如何将聪明睿智寓于精致的工艺之中。”

今天,从大量遗存的古建筑中,人们并未发现屋脊龙吻上的那根铁条直通地下,然而,值得注意的是,当时的整个欧洲尚未产生任何避雷或避雷针的思想观念,安文思的记述也不会是他本人凭空想像,通过那条金属通路雷电可以被引向地下消散的观念无疑是中国人的看法。可以说,避雷针的想法和设计思想源渊于中国。

### (B) 西洋的贡献<sup>1,6,7</sup>

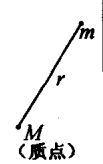
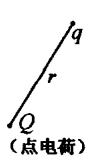
希腊人和中国人几乎同时发现磁石吸铁的现象,但没记明年代。西洋称磁为“magnetism”,是因为中亚细亚的一个小镇 Magnesia 盛产磁石,人们称磁石为 magnes,而称磁学为 magnetism。可见,西洋人以地名命名磁石,而中国人以磁石命名地名。真可谓中西辉映,相异其趣。至于摩擦生电,早在公元前 6 - 7 世纪希腊人 Thales(625 - 547B.C.),摩擦琥珀时发现它会吸引小物体的现象。加上世界到处都有雷电闪光,为什么西洋对于磁和静电方面的记载如此地稀少,并且一直到 14 世纪远远落后于中国,这是件费解的现象。例如最早也是到 1269 年才有罗盘,但它早从中国经阿拉伯传过去的;1205 年法国人 Guyot de Provins 首次用天然磁石来磁化铁针作指南针,这比沈括的记述晚了一个多世纪。稍后在 1269 年左右,也是法国人 Maricourt(Petrus Peregrinus de Maricourt) 才确认磁石有南北两极,并且发现同极相斥,异极相吸的事实。他又发现一根磁针折断后成为两根小磁针;接着他制作球状磁石,推断地球是个大磁石。到了 1492 年意大利人 Christopher Columbus 横渡大西洋发现新大陆时,才观测到磁偏角;约 150 年后的 1634 年才发现磁偏角和时间以及地点有关。到了 1600 年西洋科学得到快速发展。英国人 Gilbert(William Gilbert, 1544 - 1603, 英国医生和自然科学家)首先用“electric”表示起电物体,1646 年 T. Brown 才用“electricity”表示电;1720 年代 Stephen Gray(1666 - 1736, 英国自然科学家)研究静电时才把物体分为导体和非导体。不过西方命名时,必定经过种种实验肯定后才取名;例如 W. Gilbert, 他是 16 世纪的一位英国名医,是英女王 Elizabeth 的御医,又是有名的磁与静电的研究者;他从实验肯定地球是个大磁石后,进一步研究磁的指极性、磁倾角和磁偏角,以及分辨过去混淆不清的“磁石的吸引”和“摩擦生电的吸引”确实属两件不同的吸引之后,才使用“electric”来表示摩擦起电的物体。从此到 19 世纪前电和磁暂时被分开。

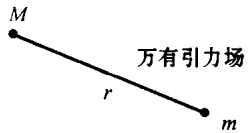
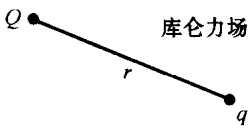
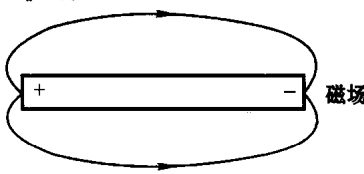
自从 Galilei(Galileo Galilei, 1564 - 1642, 意大利物理学家)将科研带上理论实验互动的路线之后,西欧的物理学发展非常迅速。接着是 Newton(Sir Isaac Newton, 1643 - 1727, 英国物理学家和数学家)在 1687 年创造性地综合整理归纳,完成了 17 世纪以前,人类从天上到地上力学现象的大统一,同时使 Galilei 的科研态度和精神更加稳固。此外,在相继的几个世纪里,光学、热学、电和磁的研究也得到充分发展。约 200 年后的 1862 年 Maxwell 统一了磁学和电学,并在 1865 年完成了现今使用的电磁学理论。让我们一起来研讨,科学家们如何观察、分析、归纳与电磁有关的现象,以及在综合整理的过程中如何发现隐藏其中的物理本质。为此,我们先对比地看看力学和电磁学中的物理量、关系式以及有关的定律。

## (C) 电磁学和牛顿力学的大致比照

这比照如表 7-1。

表 7-1

牛顿力学(MKS制)		电磁学(MKSA制)	
对象	质点	对象	一般非质点
时间	$t, [t] = \text{s(秒)}$	时间	$t, [t] = \text{s}$
坐标 (三维)	$x, y, z, [x] = [y] = [z] = \text{m(米)}$	坐标	$x, y, z, [x] = [y] = [z] = \text{m}$
空间	Euclid	空间	Minkowski
坐标系	惯性系	坐标系	惯性系
时空间	时间相当于参数(parameter), 各惯性系共有	时空间	时间空间对等, 时间是各惯性系固有
位移	$r(x, y, z), [r] = \text{m}$	电荷	$Q$ (有正和负), $[Q] = \text{C(库仑)}$
		磁荷	没有
速度	$v = \frac{dr}{dt}, [v] = \text{m/s}$	电流	$I = \frac{dQ}{dt}, [I] = \text{C/s} = \text{A(安培)}$
质量	$m, [m] = \text{kg(千克)}$	电感	$L, [L] = \frac{\text{J(焦耳)}}{\text{A}^2} = \text{h(亨利)}$
动量	$p = mv, [p] = \text{kg} \cdot \text{m/s}$	动量	没有 电磁场 $P_{EB} = S/(\text{光速})^2, S = \text{Poynting 矢量}$
力	$F \frac{dp}{dt}, [F] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \text{N(牛顿)}$	电动势	$\epsilon, [\epsilon] = \text{J/C} = \text{V(伏特)}$
		磁动势	
静	摩擦系数 $\mu, [\mu] = \text{无量纲}$ 【Ex】阻尼振动 $m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0$ $b > 0, [b] = \text{kg/s}$	电阻	$R, [R] = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega(\text{欧姆})$ 【Ex】阻尼振动 $L \frac{d^2Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C}Q = 0$ $k \xrightarrow{\text{对应}} \frac{1}{C}, C = \text{电容}$
动	$k = \text{Hooke 系数}, [k] = \frac{\text{N}}{\text{m}}$ 【Ex】简谐振动 $m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$	电容	$C, [C] = \frac{\text{C(库仑)}}{\text{V}} = \text{F(法拉)}$ 【Ex】电振动 $L \frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{1}{C}Q$
态	动能 $K = \frac{1}{2}mv^2, v^2 = v \cdot v = v^2$ 【K】= J(焦耳)	【Ex】电路动能 $K_{EM} = \frac{1}{2}LI^2$ 【K <sub>EM</sub> ] = J	
	势能 $U, [U] = \text{J}$ 【Ex】 $\begin{cases} \text{万有引力 } U_g = -G \frac{Mm}{r} \\ \text{简谐振动 } m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx \\ U = \frac{1}{2}kx^2 \end{cases}$ 	势能 $U_{EM}, [U_{EM}] = \text{J}$ 【Ex】 $\begin{cases} \text{静电势能 } U_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r} \\ \text{电振动 } L \frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{1}{C}Q \\ U_{EM} = \frac{1}{2C}Q^2 \end{cases}$ 	
	功率 $P = F \cdot v, [P] = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W(瓦特)}$	电功率 $P_{EM} = IV, [P_{EM}] = \text{W}$	

		牛顿力学(MKS制)	电磁学(MKSA制)
空 间	场 (field)	<p>【Ex.1】万有引力(点质量为例)</p>  <p>万有引力</p> $F_g = -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}$ <p><math>G =</math> 万有引力常数  <math>\approx 6.6726 \times 10^{-11} \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)</math></p> <p>场强 <math>= \frac{F_g}{m} = g</math>  <math>=</math> 重力场          即重力加速度  <math> g  \approx 9.8066 \text{m/s}^2</math></p>	<p>【Ex.1】库仑力(点电荷为例)</p>  <p>库仑力</p> $F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(\pm Q)(\pm q)}{r^3} \mathbf{r}$ <p><math>\epsilon_0 =</math> 电容率  <math>\approx 8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)</math></p> <p>场强 <math>= \frac{F_c}{q} = E</math>  <math>=</math> 电场强度(简称电场)  <math>[E] = \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}}</math></p> <p>· 除外,磁场的变化也会产生电场。</p>
	场 (field)		<p>【Ex.2】磁铁</p>  <p>磁感应强度(简称磁场) <math>= B</math></p> $[B] = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \text{T}(\text{tesla})$ <p>· 除外,带电体的运动、电流、电场的变化也会产生磁场。</p>
运 动 方 程	运动方程	<p>粒子运动(质量 <math>m</math> 的粒子)</p> $F = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \quad \text{质量} = \text{常量} \quad m\mathbf{a}$ $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \text{加速度}$ $[a] = \text{m/s}^2$	<p>粒子运动(质量 <math>m</math>, 电荷 <math>q</math> 的粒子)</p> $F = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = q(\mathbf{E}_{\text{ext}} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_{\text{ext}})$ <p><math>\mathbf{E}_{\text{ext}}, \mathbf{B}_{\text{ext}} =</math> 不是 <math>q</math> 自己产生的电磁场  <math>q(\mathbf{E}_{\text{ext}} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_{\text{ext}}) = \text{Lorentz 力}</math></p>
	运动方程		<p>场方程(Maxwell方程式)</p> <p>【Ex】真空时(<math>\rho =</math> 电荷密度, <math>\mathbf{J} =</math> 电流密度):</p> $\begin{cases} \epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho, \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \end{cases}$
现 象	定律	<p>牛顿运动第一定律          牛顿运动第二定律          牛顿运动第三定律</p>	<p>库仑定律 <math>\leftrightarrow</math> Gauss 定律          Biot-Savart 定律 <math>\leftrightarrow</math> Ampere 定律          Lenz 定律 <math>\leftrightarrow</math> Faraday 定律</p>

\* 量纲:长度 = m(米),质量 = kg(千克),时间 = s(秒)—MKS制,加电流 = A(安培)称为 MKSA 制,表内空格,除了肯定写“没有”之外自己想,至于磁动势请参阅本章图 7-53。

从上表 7-1 不难看出电磁学比力学繁些,更繁的是电磁学有 5 种单位<sup>8)</sup>,我们使用其中的 MKSA 制。力学,除了部分英美人士还使用英制外,全世界大都使用公制的 MKS 制,但电磁学就不是。所以阅读电磁学书籍或有关资料时,首先要弄清使用的单位。工程方面使用 MKSA 制较多,但基础物理学使用 Heaviside-Lorentz 制和 Gauss 制<sup>8)</sup>者不少。

## (II) 静电学(一): 电荷、电场、电势、Gauss 定律、电容器

### (A) 摩擦生电,电荷(electric charge)是什么?

电荷和质量不同,它不是以轻重来定大小;又看不到它,只有它达到某量之后才会让我们感觉得到而已。通常以它引起的电磁现象才能知道它的存在。从惯性系观察,电荷是静态,例如它所引起的电场  $E$  和磁场  $B$  不随时间变化。研究这些现象以及电荷  $Q$  的学问称为静电学(electrostatics)。那么电荷  $Q$  是什么呢?如何定义电荷大小呢?从表 7-1 可见,除了电荷或电流之外,其他电磁学物理量,就它们的量纲而言,我们都曾见过。

**实验:**(1) 准备一块干燥的毛布(不能用潮湿的,因水是导体),以及玻璃棒。如果没玻璃棒则以细长的玻璃瓶来代替;同时备一些细草芥,样样必维持干燥;

(2) 用毛布摩擦玻璃棒;

(3) 将玻璃棒靠近细草芥,如右图,草芥被玻璃棒吸上来。

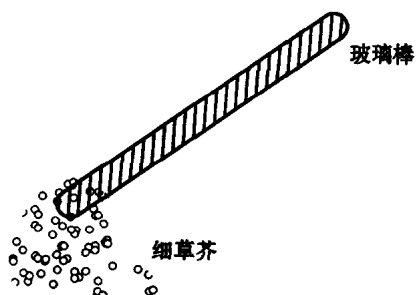
这现象称为摩擦生电现象,或静电现象。

为什么会这样呢?玻璃棒有什么东西呢?在玻璃棒上好像有浆糊那样会粘上草芥的东西称为电荷。它从哪里来的呢?各种物质都由原子构成,各原子由带正电的核和带负电的电子构成。平时正负电数目等量,所以保持电中性。电子比核至少轻两千倍且易被游离。电中性的毛布和玻璃棒经摩擦运动,即做功给玻璃上的电子,电子获得能量离开玻璃棒跑到毛布上,于是玻璃棒缺少电子变成带正电,毛布多了电子变成带负电。为了回到原来的电中性,玻璃棒遇到虚弱草芥就想夺走其电子,于是吸住草芥不放。玻璃棒上的电,短时间停留在上面不动,所以才称作静电。时间久了,经空气中水分,或接触物等的多余电子中和掉玻璃棒的正电,结果玻璃棒不带电了。同样毛布上的电子经接触物传走,使毛布恢复到原来的电中性。

干燥的冬天处处可见静电现象。如往头上脱下化学纤维的衣服时,毛发跟着衣服竖起来;化纤内衣付着外毛衣时,要拉开它们常听到噼噼啪啪的声音,甚至于有时候好像有东西刺到手上;当开门碰到门的金属把时,手指头发麻,同时听到噼噼啪啪的声音等等。这是不同种的两绝缘体经相互摩擦后,本是电中和的两物体之中,摩擦做功使电子较容易游离的一边缺少电子而带正电,接受到多余电子的另一边便带负电,如图 7-1, A 物体所带的电称为正电荷, B 的称为负电荷,怎么计算它们的大小呢?

#### (1) 电量是量子化,并且守恒

原子核是由不带电的中子(neutron)和带正电的质子(proton)所组成。质子的正电大小



和电子的负电大小一样。平时电子数等于质子数,于是原子是电中性的。电子和质子相吸加上不断地运动,相互保持平衡。如果从外边做功破坏平衡,电子就被游离出来,留下带正电的原子,而电子自己带负电。所以电子有多少便有多少电量,如果以“e”表示电子(electron)一个的电量大小,则电量  $Q = ne, n = 1, 2, 3, \dots$ , 这叫**电量或电荷的量子化**<sup>9)</sup>。任何量  $A$ , 如果它是一个基本单位量  $a$  的整数倍  $A = na, n = 1, 2, 3, \dots$  时,称  $A$  为**量子化量**(quantized quantity)。物体所带的电量称为**电荷**。在日常生活中人们无法造成湮灭电子,因此电荷是守恒量,并且正电量和负电量相等。如果某地方有多余的电子,另个地方一定有同量的正电存在,一旦它们接近立刻相吸而中和。这过程称为**放电**。这时必释放能量,同时影响周围空气的运动。如果电量非常多,放电剧烈引起空气的振动而产生声音,同时释放大量的能量,这现象如果发生在空中便是雷声和闪电。

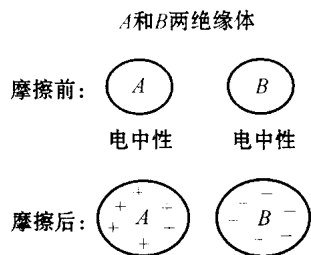
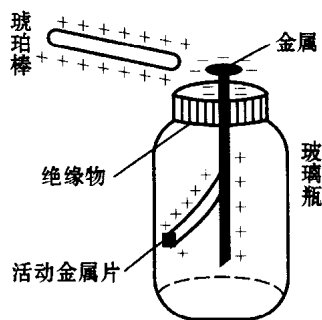


图 7-1

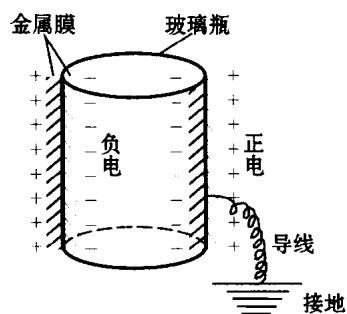
### (2) 定电荷单位,以及本章要用的单位

电荷有两种是 1733 年由 Du Fay(Charles Francois de Cisternay Du Fay, 1698 - 1739, 法国物理学家)发现的。他为了研究带电体间的斥力和引力关系,用摩擦带电的玻璃棒和硬胶棒,分别使两小金属片带电。如果两金属片所带的电是仅由玻璃棒,或硬胶棒来的,则会相斥;如果分别来自玻璃棒和硬胶棒来的电,两小金属片会相吸。这就证明玻璃棒和硬胶棒所带的电不同。但玻璃棒和丝绸摩擦琥珀生的电是相同的。因此把琥珀所带的电定为**正电**,而硬胶棒所带的电定为**负电**。后来 Du Fay 进一步使用如右图,把夹有活动金属片的装置叫作**验电器**<sup>10)</sup>来做实验,得出下面结论:



电确实有两种,并且同性相斥异性相吸。

到了 1747 年美国科学家和政治家 Franklin (Benjamin Franklin, 1706 - 1790) 使用如右图的莱顿瓶[它是德国人 Ewald Geory von Kleist(1700 - 1748) 在 1745 年和 Preter van Musschenbroek(1692 - 1761) 在 1746 年独立发明的囤积电荷的装置,通称**莱顿瓶**]做放电实验。Franklin 发现正负电相接触会相互抵消,以及电荷守恒的事实。稍后在 1752 年他为了探讨雷电, Franklin 在木架的风筝固定一条一尺多长的铁丝,用粗麻绳放入云中,另一端用细绳拴上一把金属钥匙。雷电交加,雨湿了麻绳而绳纤维向四周翘起,这时手一靠近钥匙便引起火花,其现象和莱顿瓶放电相同。其后再经种种实验, Franklin 肯定天上的雷电和摩擦所生的电是一样的。后来为了避雷,他发明了避雷针。



莱顿瓶相当于今日的电容器,玻璃内外涂上金属膜。如果使内部带负电,外部便受感应而带正电,本来电中和的外部负电经导线传到地球。利用正负电相吸可贮存电。

18 世纪中叶已肯定,电只有两种,且定为正电和

负电。它们是同性相斥异性相吸,并且正电和负电可以独立存在,但同量的正负电相碰便放电中和;后两性质和磁截然不同。磁是正负磁荷必须同时存在,不会中和;同样地同性相斥异性相吸。于是 18 世纪中叶以后,激发了人民研究磁和电的兴趣。例如电和磁的关系,电荷间的作用力大小,如何贮存更多的电,电磁的应用以及如何测量电量等等。对于测量电量 19 世纪上半叶的共识是从电流  $I \equiv \frac{\text{电荷量 } Q}{\text{时间 } t}$  来定电量  $Q$ ,即独立于力学基础

量纲“长度、质量、时间”来定电量。以通电流分解银化合物的溶液所得的银质量的多少来定电量  $Q$ 。到了 20 世纪初叶,是以力学基础量:“长度  $l$ (米),质量  $m$ (千克),时间  $t$ (秒)”来定义电量  $Q$ 。如图 7-2,相距 1 米的无限长且横切面积无限小的两平行导线(参阅(7-45e)式或【Ex.7-38】),通同向电流  $I$ ;这时如果导线单位长之间的相吸力  $= 2 \times 10^{-7} \text{N}$ (牛顿)/ $m$ (米),则称  $I = Q$ (电荷)/ $t$ (时间秒)为 1 安培(ampere),此时的电荷  $Q$  称为 1 库仑(coulomb);前者用英文字母的头一个字“A”代表安培,后者用“C”代表库仑。显然定义电磁学上的各单位时,电荷  $Q$  不是主体,电流  $I$  才是主体。1948 年的国际会议决定的第四个物理学的基础单位中,电流以安培计算。所以电磁学的基础单位是:

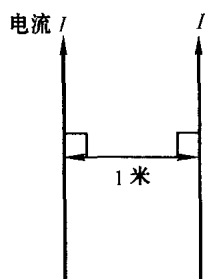


图 7-2

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{长度} = \text{米(m)}, & \text{质量} = \text{千克(kg)} \\ \text{时间} = \text{秒(s)}, & \text{电流} = \text{安培(A)} \end{array} \right\} \quad (7-1)$$

称为国际 SI(System of International) 单位的 MKSA 制,基础科学家对 MKSA 制有不少意见<sup>8)</sup>。MKSA 制在工程方面较方便,本章所用的单位是 MKSA 制。

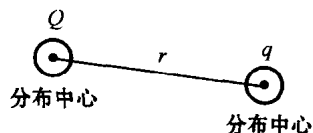
### (B) 电荷间的相互作用, Coulomb 定律<sup>1,7,11)</sup>

从 18 世纪中叶到 19 世纪中叶奠定的电磁学定律,全由实验归纳而出,在此要介绍的是静电学的 Coulomb 定律,是真空中两个静态点电荷间的相互作用所遵从的规律。

#### (1) 电荷间的相互作用

自 Du Fay 肯定电仅有两种,且同性相斥异性相吸之后,研究电荷间相互作用的科学家激增。最早提出(1766 年)电荷间的吸引力类似万有引力的是英国科学家 Joseph Priestley(1733 - 1804)。接着同样是英国的 John Robinson(1739 - 1805)在 1769 年从实验获得电荷间的吸引力正比于  $1/r^{2.06}$ ,  $r$  = 两点电荷间的距离。再来是 Cavendish(Henry Cavendish, 1731 - 1810, 英国物理学家)在 1772 年同样地从实验获得电荷间吸引力  $\propto \frac{1}{r^{2.02}}$ 。于是他提出电荷间的吸力或斥力和两点电荷间的距离平方成反比。到了 1785 年 Coulomb(Charles Augustin de Coulomb, 1736 - 1806, 法国物理学家)以他发明的扭秤直接测量电荷间的作用力,和两点电荷  $Q$  和  $q$  以及相互间距离  $r$  的关系,其实验数据得到 Gauss(Carl Friedrich Gauss, 1777 - 1855, 德国数学和物理学家)的协助完成如下式:

$$F = k \frac{Qq}{r^2} \quad (7-2)$$



式(7-2)中,如果不是点电荷,则  $r$  是各电荷的分布中心间的距离。采用 MKSA 制的式



(7-1) 时, 比例常数  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ,  $\epsilon_0$  称为真空电容率(permutivity of vacuum), 其值如下:

$$\epsilon_0 = 8.854188 \times 10^{-12} \frac{(\text{C(库仑)})^2}{\text{N(牛顿)}(\text{m(米)})^2}$$

式(7-2)称为 **Coulomb 定律**,  $\frac{\mathbf{r}}{r^3}$  也可以使用矢量  $\mathbf{r}$  的单位矢量  $\mathbf{e}_r$ ,

$\equiv \frac{\mathbf{r}}{r}$  来表示, 即  $\mathbf{r}/r^3 = \frac{1}{r^2}\mathbf{e}_r$ . 那么如何取  $\mathbf{r}$  的方向呢? 完全和万有

引力时一样, 如果以  $Q$  为主, 则  $\mathbf{r}$  是从  $Q$  向  $q$ , 倒过来是从  $q$  向  $Q$ , 如上图所示, 于是得:

$$\mathbf{F}_Q = k \frac{Qq}{r^3} \mathbf{r}_{Q \rightarrow q} = -\mathbf{F}_q = k \frac{qQ}{r^3} \mathbf{r}_{q \rightarrow Q}$$

万有引力时质量是正量; 但电荷有正有负两种, 且同性相斥异性相吸, 所以两点电荷的作用力  $\mathbf{F}$  有两种符号, 完全取决于两点电荷的符号是否相同。负号来自  $Q$  和  $q$  带不同符号的电荷, 所以是相吸;  $Q$  和  $q$  带相同符号时  $\mathbf{F}$  变为正号, 于是相斥:

$$\mathbf{F}(\text{相吸}) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \mathbf{e}_r, \quad \mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}}{r}$$

$$\mathbf{F}(\text{相斥}) = +\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \mathbf{e}_r,$$

$\mathbf{F}$  的量纲  $[F] = \text{N(牛顿)}$ , 电荷  $q$  和  $Q$  的单位是库仑 C。如果不是点电荷, 而各以电荷体积密度  $\rho(\mathbf{r}_1)$  和  $\rho(\mathbf{r}_2)$  分布在有限空间的体积  $V_1$  和  $V_2$  时, 则必须对每个分布空间积分, 以  $d^3x_i, i = 1, 2$  代表三维空间的积分, Coulomb 定律式(7-2)变成如下:

$$\mathbf{F} = k \int_{V_1} \int_{V_2} \frac{\rho(\mathbf{r}_1)\rho(\mathbf{r}_2)}{r^2} \mathbf{e}_r d^3x_1 d^3x_2$$

上式意味着电荷间相互作用的本性叠加原理(principle of superposition)。构成  $Q$  和  $q$  的成分间, 其相互作用怎么会是相加呢? 连续地加起来就是积分。这个性质是经过严谨的验证的, 因为实验所用的电荷不是点电荷, 并且 Coulomb 力是两体力。

**【Ex. 7-1】** 探讨某惯性系有三个电荷  $q_1, q_2$  和  $q_3$  时的相互作用情形。

(i) 孤立系统

Coulomb 力和万有引力是同性质的二体距离平方反比的有心力, 同时满足叠加原理和牛顿运动第三定律。如果  $q_1, q_2$  和  $q_3$  构成孤立系统, 和外界无任何接触的封闭(closed)系统  $S$ (右图), 则系统成员各自独立, 无法定义以哪一个电荷为主。由库仑定律式(7-2), 系统的总相互作用力  $\mathbf{F}_{\text{总}} \equiv \mathbf{F}_t$  为:

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_{23} + \mathbf{F}_{32} + \mathbf{F}_{31} + \mathbf{F}_{13} = \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}}^3 \mathbf{F}_{ij}.$$

$\mathbf{F}_{ij} \equiv \mathbf{F}_{i \rightarrow j}$ , 即第  $i$  个电荷对第  $j$  个电荷的作用, 但  $\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji}$ , 所以  $\mathbf{F}_t = 0$ , 表示系统的总内力  $= 0$ 。这个结果来自库仑定律满足牛顿运动第三定律的两体力。 $\mathbf{F}_t = 0$  并不是同时表示稳

