

电子图书



信息技术的结晶

人类文明的载体

网络的基本资源

现代文明显奇功 电磁学的故事

古代电磁学知识

我国是用文字记载电磁现象最早的国家之一。早在公元前 16-15 世纪，殷商时代的甲骨文字中就有“雷”字；西周时代的青铜器上发现刻有“电”字。西汉末年，《春秋纬·考异邮》中有“玳瑁吸裾”的记载，它告诉人们经过摩擦的玳瑁，能够吸引微小的物体。东汉王充已把顿牟被摩擦后可以吸引微小物体，与磁石吸引针的现象同时提出，这说明当时对这两种吸引现象引起了同样重视。在《三国志·吴书》中，曾有这样的说法：“琥珀不取腐芥，磁石不受曲针”，这就是说，腐烂的芥草不被摩擦过的琥珀吸引，比较柔软易于弯曲的金属也不被磁石吸引。这个发现说明当时已经初步可以分清哪些物质可以被吸引，哪些物质不被吸引。晋代张华曾发现用梳子梳理头发和解脱丝绸毛料衣服时的起电现象。明代的都邛在《三余赘笔》中，曾记述了一种丝绸摩擦起电现象，“吴绫出火。吴绫为裳，暗室中力持曳，以手摩之良久，火星直出。”

号称古希腊七贤之一的泰勒斯在公元前 600 年左右，发现摩擦过的琥珀可以吸引轻小的干草叶。琥珀是一种矿物化的黄色树胶，在古代用于装饰，琥珀和金子一样发亮，因此当时被称为“琥珀金”，后来则称为“琥珀电”。古罗马自然哲学家普林尼（Pliny 公元 23~79 年）曾讲了两个传说：其一是说牧羊人玛格内斯在克里特岛的艾达山上时，他的鞋被山石所吸，以至于很难行走；另一个是说，有一座沿海的磁山，它可以使驶向它的船四分五裂，原因是钉在船上的钉子，在磁山的吸引力作用下被拔掉了。这些传说证明西方古代也是很早就发现了磁现象。据说磁石这个词，是古罗马自然哲学家和诗人卢克莱修从磁铁矿的产地，小亚细亚的地名 Magnesia 得来的。

为什么会产生前面所叙述的这种吸引现象，古代人曾试图给予解释。在《论衡·乱龙篇》中这样写道：“他类有似，不能掇取者何也？气性异殊，不能相感动也。”这就是说，琥珀和磁石为什么对有些类似的东西，不能产生吸引的效果呢？是由于气性不同，不能互相感应的缘故。东晋郭璞在《山海经图赞》中也有类似的解释，其中写道：“磁石吸铁，玳瑁取芥，气有潜通，数有冥合。”西汉刘安（公元前 200—122 年）等人著的《淮南子》中，对雷、电作如下的解释：“电激气也”，“阴阳相薄为雷，激扬为电。”这就是说，当时把雷看做是阴阳相互作用的产物，把电则看做是激发的气。这种看法，是比较接近几百年后的近代关于电的学说的。

卢克莱修在他的《物的本性》长诗中，对磁石吸铁现象作了这样的解释：从磁石中发射出一种看不见的细小微粒，这种微粒通过空气进入铁中，从而引起磁石与铁的相互吸引现象的发生。宋代的陈显微在《古文参同契笺注集解》中，对磁石吸铁有过这样的解释：“磁石吸铁，皆阴阳相感，阻碍相通之理……”这就是说，磁石吸铁也是由阴阳相互感应引起的。

由此可见，古代对电与磁的吸引现象的产生有两种解释：一种是阴阳感应作用引起的；一种是“气”或“微粒”的作用引起的。

磁石吸铁现象，在指南针发明前就有各种应用的记载，如《水经注》等书中，提到秦始皇为了防备刺客行刺，就曾经用磁石建造阿房宫的北阙门，以阻止身带刀剑的刺客入内。此外医书上还谈到用磁石吸铁的作用，来治疗吞针。

把磁石利用在指向上，是在发现地磁场对磁石作用之后，并且经历了 3

个发展阶段最后制成了指南针。

最早指南的磁石，叫做司南，它是由磁石制成一种勺状的物体，把它放在光滑的圆盘上，勺底（球形）与盘接触，勺柄作为指向用。东汉王充在《论衡》中，对司南作了比较详细的描述。他写道：“司南之杓，投之于地，其柢指南。”这就是说，把勺状的磁石，放在刻有表示方位的铜盘上，它的柄停止在指南方向上。虽然司南只是天然磁石的利用，它的灵敏度是很低的，但是它却给人以启示：有一种地磁存在，利用磁石可以指向。

北宋时期，已经可以用人工的方法制造一种新的指向仪器，这就是指南鱼。它的制作过程，有个重大的突破，就是采用磁化的方法。制作过程可分为两步，第一步是使鱼形铁加热，达到 700 左右变成顺磁体；第二步再把鱼尾对正子位（北方）进行蘸水，使鱼磁化，成为一个指向仪器。

关于指南针的制造和安装方法，最早出现在北宋沈括（1035~1095 年）的《梦溪笔谈》的第 24 卷《杂志一》中。其中对指南针的制造有这样的记载：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。”这说明沈括不仅发现了针状的指南仪器，而且也发现地磁场的南北极与地球的南北方向并不完全一致。此外，沈括还提出了四种简单的指南仪器的结构。第一种是水浮法，就是将指南针穿在几节灯芯草上，并使它浮在水面指示方向。这就是后来常用的在远海航行中曾使用过的水浮磁针仪器。第二种是指旋法，就是将指南针放在拇指的指甲上，经适当的转动而指示方向。第三种是碗唇法，就是把磁针放在碗沿上，待磁针停稳后以指示方向。第四种方法是丝悬法，就是用芥子那样大小的一滴蜡粘接一根蚕丝，并把磁针用丝缕悬挂起来，以指示方向。这种丝悬法最接近近代的各种指示仪器的方法。对这四种方法，沈括自己有一个评价，他认为前三种方法都有明显的缺点，唯独丝悬法最好。

沈括所记载的几种方法都没有方位盘。不久磁针与方位盘结合起来，使指南针的发展进入一个新阶段。罗盘的出现为航海提供了一个可靠而方便的指向仪器。最早在我国出现了水罗盘。南宋朱继芳的航海诗中就有：“沈石寻孤屿，浮针辨四维”的诗句。后来，我国指南针传入欧洲之后，西方制成了旱罗盘，罗盘的磁针支在一个固定的钉尖上，可以自由转动，而钉盘就是刻有方位的方向盘。到了 16 世纪，欧洲出现了航海罗盘，这种罗盘的结构，增加了两个铜圈组成的常平架，小铜圈正好内切于大铜圈，并且由曲枢轴把它们联接起来，然后再把它们安放在一个固定支架上。

指南针的发明，不仅为航海提供了一个非常准确的指向仪器，而且也为研究地磁三要素创造了条件。

沈括在《梦溪笔谈》中记载了磁针的南北指向与地球的南北方向并不完全一致，这就是说存在着一个磁偏角。但是这个偏角多大，当时并没有进行定量的研究。美洲大陆的发现者，意大利的航海家哥伦布于 1492 年在海上航行时，发现罗盘上的指针并不是指向北极星，而是向西偏 5~6 度。在陆地上最早对磁偏角进行定量测定的，是德国天体物理学家哈特曼，他在 1544 年 3 月 4 日给友人的一封信中指出：“磁针指北端稍向东偏 9 度左右，并且还发现磁针并不保持水平，其中一端向下倾斜。”他在信中向友人表示，磁针向下方倾斜的原因还不十分清楚。

磁倾角的大小，是由罗盘制造者、英国地质学家罗伯特·诺曼测定的。他在 1581 年出版的《新奇的吸引力》小册子中，介绍了他实验的结果。他自制了一个简易的磁倾角测试仪，并于 1576 年测得伦敦的磁倾角为 $71^{\circ}50'$ 。

他还发现悬浮在水面上的穿在软木上的磁针，尽管方向上发生偏转，但只是在原位置，并不产生移动。于是，他断定使磁针发生偏转的力，不是移动力而是一种定向力。即我们现在所说的力矩。

对地磁的另一个要素——强度的测定要稍晚些，是由法国天文学家和数学家博达于 1776 年利用磁针振动法测得的。

奇妙的磁现象

磁石的传说

离古城西安南郊 15 公里，有一处地方叫阿房村。那里可以看到一大片用黄土夯筑而成的台基：周长 31 米，高 20 米，当地人称它郿坞岭，是秦代著名宫苑阿房宫的遗址。当年这里是“五步一楼，十步一阁；廊腰缦回，檐牙高啄”，如今只见碧天黄土，满目荒凉。

相传公元前 221 年秦王嬴政并吞六国，统一了中原。他觉得自己功盖三皇，威逼五帝，称自己为始皇帝，就是历史上大家熟悉的秦始皇。秦始皇好大喜功，穷奢极欲。命人将和氏璧刻成玉玺，传千秋万代。又嫌咸阳的皇宫太小，选定渭南上林苑建造宫殿。据《史记》记载：为了建造宫殿和陵墓，动员的民工就达 70 万。关中的石料，楚、荆等地的木材千里迢迢地运来。以至当时流传“蜀山兀，阿房出”的民谣。

秦始皇住在这楼台栉比、亭榭相连的阿房宫里过着轻歌曼舞、纸醉金迷的生活。一天深夜，宴散人静，万籁俱寂。秦始皇独自斜靠在栏杆旁，在朦胧之中觉得自己正坐在一辆车上，道路崎岖，战车颠簸，这不是 12 年前自己去东游巡视，车队行至博浪沙吗？突然一柄大锤从路边的灌木林里飞了出来，恰好击中了前面一辆副车。接下来是一片混乱，他只觉得自己被许多人拥簇着，飞也似地奔跑。在一连串跳跃、模糊的镜像之后，眼前又显现出一幅清晰的画面，那是一张苍白阴险的脸，一双眼睛如鹰，发出凶残的光，这人是荆轲。只见他一步一步走近，突然从一卷地图里抽出一把明晃晃的匕首，向自己刺来……“啊哟！”一声叫喊，原来是南柯一梦。“皇上，小心！”四周响起了宫娥的细声软语。秦始皇定了定神，不觉身上冷汗津津，自忖，如今中原初定，六国残党余孽，遍及四方，亡命之徒，大有人在。这时从旁走出一位近臣，躬身曰：“启奏皇上，刚才所惊莫非为刺客所虑？”“唔。”“此事臣已思虑多时，有一法可令身怀刀刃的刺客无法潜入内宫。”秦始皇看了他一眼。“皇上还记得吕不韦吗？此人虽心术不正，但略有歪才。他写的那本《吕氏春秋》一书中有‘慈石召铁’之说，臣已试过，确实灵验。只要用慈石（古代曾称磁石为慈石）筑门，刀刃被慈石门吸引，刺客即会暴露兵器而被擒拿。”“什么是慈石？”臣答：“慈石好比是铁的母亲，儿子见了母亲就迎向慈母。”“哪里去找慈石？”臣答：“古书管子上曰：‘上有慈石，下有铜金’。所以在铜、金矿的山上即可找寻到慈石。”听到这里秦始皇笑了说：“好吧！用慈石来筑北门，外杂人都要从北门入宫。”

可是秦始皇的磁石门并没有阻挡住秦王朝灭亡的命运。秦始皇死后不久，陈胜、吴广领导的农民起义揭竿而起，项羽率领的大军冲进了阿房宫。一场大火烧了整整三个多月才渐渐熄灭。阿房宫成了一堆瓦砾场。不过据历史记载那座用磁石筑成的北阙门倒幸免于难而留了下来。

还有一个流传很广的传说，出自晋书《马隆传》。说的是晋代的时候，西北地区的少数民族羌族，不时骚扰陇西、酒泉一带的边境，名将马隆奉旨带兵出征。由于羌人身披铁甲，剽悍异常。一开战马隆接连吃了几个败仗。后来马隆想出了一条妙计：在一条崎岖狭窄的山道两旁垒放了许多磁性很强的磁石。交锋时，他先派少数散兵诱敌，且战且退。把羌人引到这条小道上。由于羌兵身披铁甲，受到磁石的吸引力，动作迟缓。此时埋伏在两旁山

峦上，穿着皮革战服的马隆精锐部队冲杀下来，舞动刀枪、行动敏捷，吓得羌兵以为有神灵相助，丧失了斗志，全军溃败。从此马隆在羌人的心目中成了不可战胜的“战神”。

上面两种传说听起来有点离奇。据南北朝时代名医陶弘景的记录，当时最好的磁石块能吸住一二斤重的铁刀，由此推想这些传说故事是有一定的依据。磁石在我国古代很早就被用作药物，用于治疗。战国时代的药方五石散，其中就有磁石，相传魏晋时代的文人都很喜欢服这种药，这种药可以祛风湿，通关节，养肾脏，消痈肿。但药性燥热，常常使皮肤发干、发痒。所以魏晋时代的文人都喜欢穿广袖宽大的衣服，也就是这个道理。

无独有偶，西方也流传着许多有关磁石的神奇传说。相传第一个发现天然磁石的是古希腊时代的一位牧羊人，他名叫玛格乃斯，一天他把羊群赶到艾达山坡，忽然，他拿着的铁棍被山石吸住了，钉了铁钉的靴子也被山石吸住了。这件事传开来，引起了古希腊“七贤”之一的泰勒斯的注意。他派了学生从那里找来了一些石头，仔细研究。泰勒斯本来就认为万物都充满了灵魂。所以他就用灵魂来解释这种磁石吸铁现象。他还给石头取了名字，叫玛格乃脱，这是按矿石产地的地名（土耳其、麦克纳西亚）的读音转化而来的，现在英文中就用这个字 *magnette* 作为磁石。

生活在中东地区的阿拉伯人也有着自已关于磁石的传说，阿拉伯民族都信奉伊斯兰教，教徒通称为“穆斯林”（阿拉伯语的音译，意为“顺从者”），他们只信奉一个神，神的名字叫“安拉”，也称为“真主”。伊斯兰教的先知穆罕默德，历史上是确有其人的。他去世之后，巨大的灵柩被安放在麦地那城的先知寺内，于是麦地那就成为穆斯林朝觐的圣地。每个穆斯林都坚信，先知的灵柩是没有任何支撑悬于墓室之中，据说这是因为墓室的拱顶用磁石砌成，而巨大的磁吸引力使棺木凭空悬起。用科学的观点来分析，这样神奇的设想恐怕是办不到的。即使磁力恰好与棺木的重量相等，但这是一种不稳定平衡，因为磁力是随着距离的增大而减弱的，只要有一点风吹草动，平衡就会被破坏，棺木就会下落到地上或被吸引到天花板上。但是，如果利用同性磁石相斥的原理，把一部分磁石铺在地面，另一部分磁石安装在棺木的底部。由于同性磁石间的相互排斥使棺木悬浮在空中，这倒是一种稳定平衡。现代的磁悬浮列车就是利用了这个原理。

有趣的生物磁

我们都知道信鸽有种惊人的远距离辨认方向的本领，令人啧啧称奇。据资料，早在古埃及第五王朝的时候（约公元前 2500 ~ 前 2350 年）就有人把鸽子训练成快速而可靠的通讯工具。一直到无线电发明并得到广泛应用的第二次世界大战期间，信鸽仍在通讯战线上占有一席之地。1943 年 11 月 18 日英军第 56 步兵旅要求空军轰炸德军的防御阵地，来配合步兵进攻德军。当英军飞机正要起飞时，一只名叫“格久”的军鸽及时地赶到，带来了十万火急的信件。原来英军已经冲破了德军的防线，有 1000 名士兵已经进入德军的防御工事阵地中，要求立即撤销轰炸的命令。好样的“格久”，由于它及时传递了命令，拯救了 1000 人的生命。英国伦敦市长特授予“格久”一枚涂金勋章呢！

那么信鸽究竟是靠什么来判别方向的呢？在过去很长的一段时间里，人们把信鸽的这种高超的认路本领归结于它的眼力和记忆力。一直到上一世纪才有人想到，鸽子会不会是依赖地磁场来判别方向？后来这种设想就被实验所证实。科学家把几百只训练有素的信鸽分成两组。在一组信鸽的翅膀下缚了一块小磁铁，而在另一组信鸽的翅膀下缚了大小相同的铜块。然后把它们带到离鸽舍数十至数百公里的地方，逐批放飞。结果绝大部分缚铜块的信鸽飞回到鸽舍，而缚着磁铁的信鸽却全部都飞散了。原来磁铁的磁场扰乱了信鸽体内的“小罗盘”，把它们弄得晕头转向了。就好像把一块磁铁靠近磁罗盘时，罗盘上的指针会偏离南、北指向一样。近年来科学家在解剖信鸽时，在信鸽的头部找到了许多具有强磁性的 Fe_3O_4 颗粒。美国麻省理工学院的法兰克尔说：“这些磁性细胞排列成一定形状、一定长度，组成了对“地磁场”十分敏感的“磁罗盘”。现在我们已经知道，除信鸽之外，一些候鸟，如食米鸟、燕鸥，它们的头部也有丰富的磁性颗粒，并依赖它们在南北半球之间作长距离迁徙，从来不迷失方向。

鱼也是一种对磁场十分敏感的生物。生物学家注意到鱼类的间脑会对磁场产生感觉。当把鱼放入它完全陌生的水域里，并且尽可能排除水温、水流的干扰和影响，鱼一般都会沿着磁力线的方向游动。北美有一种鲑鱼，它辨识路径的能力是惊人的。这些鲑鱼通常在北美阿拉斯加到加利福尼亚的小溪里产卵。小鱼孵出后，便成群结队地沿着小溪、小河游向太平洋。它们在浩瀚无际的太平洋里沿着逆时针方向环游了一个巨大的圈子之后，还能正确无误地回到美洲，并寻找到原来的河道入口，再游经小河、小溪最终重返故里。而这类鲑鱼完全是依靠灵敏的磁罗盘来导航的。一次美国科学家奎恩·汤姆在小河的岸边放了一块电磁铁，当成群的鲑鱼游过磁铁附近时，突然接通电源。奇迹出现了，这群鲑鱼游向也突然改变了 90° 。

有兴趣的读者只要留意，可以观察到蜜蜂、苍蝇等昆虫，它们在起飞或降落的时候往往愿意取南、北方向（即地磁方向）。如果你在蜂巢的四周放上几块磁铁，出外觅食的工蜂就会找不到自己的蜂巢。如果你把磁铁放进它们巢里，可以发现蜜蜂回巢后一反常态，连舞蹈的姿势都与平时大相径庭。

80 年代初科学家还发现了一种“磁性细菌”，它们生长在盐碱沼泽地的沉积泥里，总是顺着地磁场磁力线的方向向北运动。当科学家用外加磁场来影响它时，细菌就会随之改变行进的方向。麻省理工学院的理查德教授发现这种细菌体内含的磁铁成分比一般细菌高 10 倍。在电子显微镜下，细菌体内

的磁性小颗粒，有规则地排成列，每一列长 0.5 微米，犹如一串珠子，行列的前端指向地磁 S 极，另一端位于鞭毛，鞭毛摆动时，细菌就向北方前进。方位很准，以至大家都叫它“活的指南针”。

植物对磁场也有“感觉”。加拿大的冬小麦的根部生长喜欢沿着磁场增强的方向，显示出“向磁性”。而水芹的根部却喜欢沿着磁场减弱的方向，显示出“背磁性”。

这些有趣的生物磁现象，说起来也并不奇怪。现代科学告诉我们：“自然界里的生物并不是像人们以前认为的仅仅是化学的集合体，而是闪烁着电磁火花的生命体。”分子生物学研究表明：生物体内的大多数分子和原子都具有一定的磁性。比如，人具有心磁、脑磁、肌磁等，甚至人头部的毛囊也会产生自己的毛囊磁场。珀杜大学的贾菲博士说：“毛囊磁场是皮肤电流活动的自然泄漏。”当然人体所产生的磁场很弱，大约只有地磁场的十万分之一至十亿分之一。（基本地磁场是 5×10^{-1} 奥斯特）。使人意料之外的是人恰在睡眠的时候，所产生的脑磁场达到最大值。正由于生物细胞本身的电磁结构，因此它们对外界电磁场的变化会引起相当敏感的反应是理所当然的。

科学家们还发现，长期生活在几万伏至几十万伏高压输电线附近地区的人，很容易激动，容易疲劳。大脑的效率低。在青年人中患白血病和淋巴瘤的比例也比一般要高。有人将猴子放在 70 千奥斯特的强磁场中 1 小时，猴子的心率会降低。而家鼠在弱磁场的环境里生理功能也会不正常，繁殖的后代容易生肿瘤。然而许多植物如番茄等在磁场的影响下，种子会提早萌芽，提前开花结果。春蚕在这样的环境里会提前进入成熟期，所结的茧也比较大。总之磁场对生物的影响已引起了越来越多的研究者的兴趣。

时至今日，尽管我们对生命体在磁场的影响下所发生的一系列变化细节还不甚清楚，但利用磁效应来治疗疾病，则早就开始了。我国早在东汉的《神农本草》一书里就记载了磁石味辛寒、可治麻痹风湿、关节肿痛，我国古时候也有用磁石来治疗眼病和耳聋的记载。现行的我国药典里就收有耳聋左慈丸、紫雪散、磁珠丸等药物，它们都是以磁石为主要成分的。在西方医学史上，磁石也很早入药，古希腊医生用它来做泻药，治疗足痛和痉挛。本世纪以来，医学上对磁现象的应用已发展到诊断、理疗、康复保健等许多方面。西方出现了磁椅、磁床、磁帽、磁带等保健器械。50 年代末我国市场上也出现了治疗高血压和神经衰弱用的磁性手镯。1956 年日本人发明了用磁带来治疗高血压和肩周炎。近年来美国药物专家试制磁性药丸来攻击肿瘤，引起人们的关注。这是将抗癌药与药性粉末结合，外面由聚氨基酸包膜制成微粒。注入人体后，在外磁场的“引导”下，使它停留在癌肿部位的毛细血管里，病人或医生可以用体外的手表式磁场发射器来控制药物的释放，这样既能有效地杀灭癌细胞，又可以减少其他的副作用。

磁铁的磁极

把一根条形磁铁放到铁屑里再拿出来，两端吸起的铁屑最多，越靠近中间部位吸得越少。把马蹄形磁铁放到铁屑里再拿出来，在开口那边的两头吸得最多，闭口那边中间吸得最少。

磁体上吸住铁屑最多的部位，磁性最强，叫做磁极。磁体都有两个磁极，针形磁体的磁极在两个针尖上，条形磁铁的磁极通常位于离磁体两端 $1/10$ 到 $1/12$ 全长的地方，蹄形磁铁的磁极就在开口那边的两头上。

把条形磁铁用细线水平地悬挂起来，或者把磁针水平地支在一个尖端上面，当它们平衡的时候，总是一个磁极指向南方，另一个指向北方。指北的那个磁极叫北极，用 N 表示；指南的那个磁极叫南极，用 S 表示。

同正负电荷之间会发生相互作用，同性相斥、异性相吸一样，南北磁极之间也会发生相互作用，同名磁极相斥，异名磁极相吸。

正负电荷可以分开；一个磁体的南北磁极是否也能够分开，获得只有南极或者北极的单磁极呢？答案是否定的。长期的实验表明，存在于一个磁体上的南北磁极是分不开的，它们总是形影不离地成对出现。

磁场和磁力线

同电荷周围存在一种叫电场的特殊物质一样，在磁体周围的空间里，也存在一种特殊的物质叫做磁场。磁体之间的相互作用，就是通过磁场来实现的。

磁场虽然看不见、摸不着，但是它客观存在着，既有方向，也有强弱。条形磁铁周围的磁场，可以用一些小磁针来检验。把小磁针放在磁铁周围，它们就会受到磁铁磁场的作用。放在不同位置的小磁针，N 极的指向各不相同。我们规定，在磁场中某一点上，小磁针北极的指向就代表这一点的磁场方向。假如用放到磁铁周围的无数铁屑代替小磁针，会出现什么情况呢？我们在磁铁上面放一块硬纸板，纸板上均匀地撒一层铁屑。由于磁感应，铁屑都被磁化成“小磁针”。轻敲纸板，“小磁针”就在磁场作用下转动，当它们停下来时，排列成许多条顺滑的曲线，每个“小磁针”的北极所指方向，就表示它所在点的磁场方向。

为了研究问题的方便和形象化，常用想象的磁力线来表示磁场的方向和强弱。仿照铁屑的规则排列，在磁场中画出一些有方向的曲线，使曲线上任一点的切线方向，都跟放在这一点上的“小磁针”北极的指向相同，这些曲线就叫做磁力线。

磁铁周围的磁力线都从 N 极出发，经过空间，终止在 S 极上，不会互相交叉。磁力线密集的地方，表示磁场比较强；稀疏的地方，表示磁场比较弱。在物理学中，就用穿过单位面积的磁力线条数来反映磁场的强弱，叫做磁感应强度。它的单位是特。

静电的奥妙

摩擦起电

人类对电的认识是从静电开始的。早在我国汉朝，著名学者王充在《论衡》一书里就有过“顿牟掇芥”的记载。“顿牟”是一种琥珀，是植物树脂经过石化的产物；“掇芥”就是拾起轻小物体。意思是说，摩擦过的琥珀，具有吸引轻小物体的本领。其实，别的物体经过摩擦，也会“掇芥”。把塑料钢笔杆在干燥的头发或者衣服上摩擦几下，然后靠近干燥的小纸片、粉笔末，笔杆就把它们吸了起来。你也许有过这样的体验，在空气干燥的时候，用赛璐珞梳子梳干燥的头发，头发总要竖起来，梳不平顺；拿这个梳子靠近小纸片，小纸片立刻飞到它上面。

物体经过摩擦以后能够吸引轻小物体的现象叫做摩擦起电，带了电的物体叫做带电体。任何两种物体摩擦，都可以起电。你可以做一个实验：把一根干燥的细长圆木棍搁在椅背上，使它处于平衡状态。然后拿一张干燥的报纸平铺在门板上，用干燥的手心（也可以用干燥的刷子）在报纸上来回地刷。刷一阵子以后，报纸像刷了浆糊那样地贴在门板上了。揭下报纸，挨近木棍，报纸就把木棍吸了过来。慢慢移动报纸，木棍也跟着转动。这是经过摩擦的报纸带了电的缘故。

你可能会疑问，所有物体都能摩擦起电的说法不对。一手拿金属棒，一手用丝绸去摩擦，金属棒就没有起电，不能吸引轻小物体。但是，如果戴上干燥的橡皮手套重做这一实验，金属棒一定会带电。这是为什么呢？原来，金属棒、人体和大地会传递电荷，摩擦产生的电荷被迅速传到地球上；而橡皮不会传递电荷，因此在后一种情况下，金属棒就带电了。

容易传递电荷的物体，像金属、碳、大地、人体、各种酸、碱、盐的水溶液等，叫做导体；不容易传递电荷的物体，像琥珀、橡胶、玻璃、石蜡、塑料、纸、油类、干木材、空气等，叫做绝缘体。当然，导体和绝缘体之间也没有绝对的界限。随着条件的改变，绝缘体的导电能力也会增强，甚至变成导体。比如木材湿了，玻璃加热到红热的程度，就都变成导体了。

物体摩擦可以起电，这电从哪里来的？为了寻找问题的答案，美国科学家富兰克林在18世纪中叶做了下面的著名实验。

甲乙两人并立在地面绝缘的蜡板上，丙直接站在地上。开始，甲用手摩擦玻璃管，使玻璃管带电。然后乙用手指接触甲手里的玻璃管，乙身上也带了电。最后，甲乙两人分别同丙接触，结果在接触的时候都出现了电火花。但是，如果乙和甲手里带电的玻璃管接触之后，又和甲的身体接触，那么他们分别接触丙的时候，就都没有火花产生。为什么呢？富兰克林解释说，甲乙丙三人所带的电本来处于正常状态，因为摩擦使甲身上的一部分电转移到玻璃管上，乙接触玻璃管的时候电就转移到乙身上。这样一来，甲身上的电减少了，乙身上的电变多了。因此当他们分别接触电量处于正常状态的丙的时候，就产生了电火花，使三者所带的电重新处于正常状态。如果乙接触玻璃管以后又接触甲，电就会在他们之间流通，使甲乙达到摩擦以前的正常状态，因此甲乙接触丙的时候就不会有电火花。

富兰克林认为，电不是摩擦“创造”出来的，只是从一个物体转移到另一个物体，并且在任何一个绝缘体系里总电量是不会变化的，这是电荷守恒

定律的最早表述。在这次实验中，富兰克林首创了用“-e”表示甲身上的电荷，用“+e”表示乙身上的电荷。这是电学史上第一次用数学上的正负概念来说明两种电荷的性质。

过去，人们只知道有“玻璃电”、“橡胶电”、“松香电”等，自从富兰克林提出正电、负电以后，人们发现，无论哪一种电都可以归结为正电或者负电。于是就规定，和用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电相同的叫做正电，和用毛皮摩擦过的橡胶棒所带的电相同的叫做负电。

后来建立起来的电子论，完全证明了富兰克林假设的正确。电子论认为，任何物体都由原子构成。原子由带正电的原子核和带负电的绕核转动的电子所组成。由于正负电量相等，在通常情况下，原子不显电性，整个物体也是中性的。原子核里的正电数量很难改变，而核外电子的数目却不难改变。物体失去一些电子，它就带正电；得到额外的电子，它就带负电。

两个物体互相摩擦，其中必定有一个失去一些电子，另一个得到额外的电子。摩擦起电不是创造了电，只是把正负电荷分开，使电子从一个物体转移到另一个物体上。比如用丝绸摩擦玻璃棒，就是把玻璃棒上的一部分正负电荷分开，使电子转移到丝绸上，玻璃棒失去电子就带正电，丝绸得到电子就带等量的负电。

让两个带等量异种电荷的物体互相接触，如果带负电的物体把额外的电子完全传给带正电的物体，两个物体就都恢复到不带电状态。这种现象叫做正负电荷中和。如果让两个带异种电荷的物体靠近，在它们之间就会发生火花，同时发出劈劈啪啪的响声，这是一种放电现象。当你从身上脱下毛衣和头发相擦的时候，会听到细微的爆烈声；如果在黑暗中，还可见到点点闪光。这是摩擦产生的电在你身上形成的现象，通过放电正负电荷得到了中和。

电荷间的相互作用

带电体之间相互作用的情况是怎样的呢？先做一个有趣的实验：把半张干燥的报纸剪成十几个窄条，每条都不剪到头，使它们的上部仍旧连着。然后把剪过的报纸铺在门板上，用一只手按住上部，另一只手在纸条上来回刷一阵子。取下报纸，手捏住报纸上部，围成圆圈。这时，这些纸条不是竖直下垂，而是向四周散开，好像一条张开的“裙子”。假如你用带负电的橡胶棒从下面伸进“裙筒”，“裙子”张得更开了；如果用带正电的玻璃棒从下面伸进“裙筒”，还没等伸进去，纸条立刻都聚拢到玻璃棒上，经过摩擦的纸条带上了负电，就张成“裙子”，这是负电荷相互作用的结果。实验证明，带同种电荷的物体互相排斥，带异种电荷的物体互相吸引。带电体所特有的这种相互作用性质，简单叫做同性相斥、异性相吸。

带电体之间相互作用力的大小，最早是在1785年，由法国物理学家库仑利用库仑扭秤测出的，他从中总结出了两个点电荷之间的相互作用定律。当带电体的大小比带电体之间距离小得多的时候，这些带电体就可以看成是点电荷，就是电荷好像集中在一个点上。

库仑指出，两个点电荷之间的相互作用力，跟它们所带的电量乘积成正比，跟它们之间的距离平方成反比，作用力的方向在这两个点电荷的连线上。点电荷用 q_1 、 q_2 表示，距离用 r 表示，写成公式是：

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

这就是库仑定律，力 F 称做库仑力， k 是一个和单位选定有关的比例常数。电荷同号的时候，库仑力是正的，表示排斥；电荷异号的时候，库仑力是负的，表示吸引。

电荷之间的这种相互作用是怎样产生的呢？原先人们都以为它是用无限大的速度在两个带电体之间直接传递的，叫做“超距作用”。后来，法拉第认为，电荷之间的相互作用不是直接传递，而是通过中间媒质用有限的速度传递的。这种相互作用叫做“媒递作用”，是电场概念的起源。

电场是一种特殊的物质。在电荷周围，总存在着电场；正是通过电场，才对场中其他电荷发生力的作用。静止电荷周围形成的电场，称做静电场。静电场对场中静止电荷的作用力叫做静电力，也就是库仑力。

静电的利弊

金属箔验电器是一种简单而实用的仪器，现在用它再来做个实验：把一根带正电的玻璃棒靠近验电器，但不与金属球接触，可以看到验电器的箔片也会张开。这种现象叫做静电感应，是由俄国物理学家赫曼和英国物理学家坎顿发现的。后来经过德国科学家埃皮努斯的研究，弄清楚其中的道理。原来当带正电的玻璃棒靠近验电器时，由于异种电荷相互吸引，负电荷纷纷涌到金属球上，而箔片由于缺少了负电荷而显了正电，因此箔片张开。此时用手指去碰一下金属球，人体中会有一部分负电荷跑到箔片上去，与箔片上的正电荷中和。再移去玻璃棒，留在金属球上的负电荷会分布在小球、金属杆和箔片上，整个验电器带负电。这种起电办法叫做感应起电。

在实验上用感应起电的办法似乎比摩擦起电更胜一筹，以至后来都用感应起电机来取代了摩擦起电机。下面我们来做一个感应起电板的小实验。这种起电板是由鼎鼎大名的电学家伏打发明的。

器材是：旧钢精锅盖一只，废薄膜唱片一张。

制作过程是：先将钢精锅盖用木槌敲平，并用砂皮擦一下。剪一条 10 厘米长、1 厘米宽的薄纸条，在一头的中间部分剪去一条，再用胶纸粘到纸条尾部，固定在锅盖内表面。

用手捏住锅盖的绝缘旋扭，把锅盖水平放置，内表面向上。

用干燥丝绸摩擦薄膜唱片，能使它带很多电荷。把带电的唱片平放在锅盖上，用手摸一下锅盖的外表面，再移开唱片，薄纸条就会向上竖起。

如果锅盖上带电较多时，用镊子夹一小片金属箔，让箔落到锅盖上，它就会明显向上跳起。移动锅盖跟随金属箔，可以使金属箔在空中停留很长时间。

摩擦起电和感应起电是自然界里两种最普遍、最大量，也最基本的电现象。由摩擦和感应产生的电荷通常被束缚在带电体上，不能像导线中的电荷那样沿特定的方向流动，所以称做静电。

静电最显著的特点，就是电压高。摩擦起电时，电压可以高达 4.5×10^5 伏特。在干燥的空气里，产生电火花（即击穿电场），电场强度要达到 3 万伏/厘米。当我们在黑暗中脱毛衣，听到噼啪之声，看到火星流散，这时毛衣上达到的电压已有好几千伏特。幸好它的电量很小，不会给人体带来伤害，

然而就是这点点星火，在某些场合也会酿成弥天大祸！例如摸过衣服带了高压静电的手，再去取集成电路块板，就会击坏元器件。医生在手术时引起的静电火花，会引起“乙醚”爆炸，危及医生和病人。至于化工、石油、炸药等危险品在生产、储藏和运输的时候更是要谨防静电的捣乱。历史上这种血的教训也是够多的。1976年12月29日，停靠在日本港附近的挪威油轮别尔克·伊斯特拉号，因为水手用毛刷油漆甲板、聚集起来的高压静电迸发火花，点燃了弥散在甲板上空的石油蒸汽，蒸汽急骤膨胀，猛烈爆炸，使这艘25万吨的超级巨轮毁于顷刻之间。

经过科研人员的认真鉴定，原来凶手是不被人注意的静电……一位女工穿着一双新的泡沫塑料凉鞋，走路时产生的电荷排放不掉，人体的电位越来越高，当她走近一支立在地面上的铁管，在她脚部触及铁管的刹那间，人体的静电对地放电，静电火花点燃了室内的汽油蒸汽，于是悲剧发生了。

静电除了容易迸发火花，它的同性相斥和异性相吸的性质也给人们的生活和工作带来了麻烦。比如说纺纱时纱锭与机轴摩擦产生的静电吸附纱头缠绕在机轴上，不仅影响产品的质量，还会妨碍机器的运转。印刷过程中，因为与机器摩擦带上了同种电荷的纸张，相互排斥，叠放不齐，甚至乱得无法印刷。在精密的电子产品生产中，静电的这种危害就更大了。

如何来减少静电的危害呢？一是把可能产生静电的设备和人员接地，比如运送危险品的车辆和油罐车的后面拖一根长长的铁链。长距离的输油管道每隔100~300米安装接地线。危险品仓库的工人穿上用导电橡胶做的防静电靴，通过这些导体把可能聚集起来的静电导入大地。此外科学家还发明了抗静电剂和放射性消电器等设备来有效地清除静电的聚集。现在防静电技术和设备的研制和生产已经形成了一个崭新的行业。专业公司能生产测试、计算、分析、监测和消除静电产品。如腕带、防静电兼防尘工作衣、鞋、帽、垫、袋、海绵，以及空气电离吹风机、电离空气枪等等。

当人们摸透了静电的脾气之后，正确引导、扬长避短也可以使它为人类造福。现在静电复印、静电植绒、静电喷漆、静电除尘等技术已经得到了广泛的应用。此外，静电技术也开始在淡化海水、喷洒农药、人工降雨、低温冷冻等许多方面大显身手。甚至在宇宙飞船上，也安装了静电加料器装置！

为了看一下静电在这些方面的本领，我们来做一个静电除尘的小实验。

在塑料瓶盖上钻孔，插入两根导线。每根导线的下端焊一片长方形铜片（2.5厘米×1.5厘米）作为电极。

实验的过程：

1. 先用一张纸、揉皱后垫在瓶底。
2. 瓶里放入两小截点燃的蚊香，可以看到瓶里弥漫着白色的烟雾。
3. 把两根导线的上端接入手摇发电机的正负极上，摇动发电机，可以看到顷刻之间烟消雾散。

原来电晕放电可以产生许许多多带负电的离子，叫做负离子。负离子吸附了周围空气中的尘埃，并把它们全部带到了带正电的金属极片上。所以瓶里的空气变得清彻透明，而金属片表面却积起了薄薄的一层脏东西。可见静电在除尘方面的奇功。

电荷守恒定律

本杰明·富兰克林是美国著名的科学家和政治活动家。出生于波士顿的一个贫苦家庭里，只念了几年小学，便到一所印刷房去当学徒。渴求知识的愿望，使他选择了自学成才的道路。他充分利用印刷房和书店的联系，如饥似渴地阅读了大量书籍，为他从事物理学的研究打下了深厚的基础。他一方面参加了美国的独立战争并担任了许多社会公职，另一方面醉心于科学研究，他的研究成果汇集于《在美国费城进行的关于电的实验和观察》一书中，此书于1753年出版。富兰克林为祖国的解放事业和科学事业作出了自己的贡献，被美国政府和人民誉为“伟大的公民”。

富兰克林对静电学的最重要贡献，是发现了电荷守恒定律。莱顿瓶发明后，他接到朋友寄来的一只莱顿瓶，并向他说明了使用方法，这引起了他的很大兴趣。于是，他利用莱顿瓶做了大量的静电方面的实验。他发现，两个带有不同性质电荷的带电体，相互接触后可以呈现中性。根据这种相消性和数学上的正、负数的概念，他把“玻璃电”称为正电，把“树脂电”称为负电，并进一步从电荷的相消性，推出如下结论：（1）正电和负电，在本质上不应有什么差异；（2）摩擦起电过程中，总是形成等量的异种电荷；（3）摩擦起电过程中，一方失去的电荷与另一方得到的电荷在数量上相等。于是，在上述推论的基础上，他总结出一个普遍的原理：电荷既不能创生也不能消灭，只不过是某一个带电体转移到另外一个带电体，在电荷转移过程中，电荷的总量是不变的。这就是电荷守恒定律的最原始的表述方式。

电荷守恒定律是物理学中一条比较普遍的守恒定律，富兰克林为电磁学理论建立了第一块颇为重要的基石。

另外一项研究成果，是他对雷电成因的研究以及奉献给人类社会一只避雷针。据说1752年某一天，富兰克林正在做实验，他的夫人在旁边观看，一不小心碰着了莱顿瓶，突然发生了闪（电）光和轰鸣声，夫人被击倒了，差点发生了人命。但是，这件事却引起了他的联想，当时所发生的情景与天上的闪电雷鸣多么相似啊！于是，他又进行了几个实验，来研究天电与地电的相似性。他用绸子做了一个大风筝，风筝绳的下端拴了只铜钥匙，使它与莱顿瓶接触，终于把天电引了下来。经过实验证明，天电与地电有12点相同之外：（1）发光；（2）光的颜色相同；（3）光的路线是弯曲的；（4）时间都很短促；（5）皆能由金属传导；（6）都发出响声；（7）可在水中发生；（8）可使物体分裂；（9）能杀伤动物；（10）能熔化金属；（11）能引起燃烧；（12）都发出硫磺味。他不仅断定天电与地电性质相同，是同一种电，而且还认为都是因摩擦而产生的。从而提出了云层因相对运动而发生摩擦带电的假说。

上述12个相同点，都是富兰克林通过实验获得的。例如杀伤动物这一点，他做了杀伤火鸡的实验。据说有一次他做用电杀伤火鸡实验时，不小心自己被电击晕了。但他苏醒后却说了一句笑话：好家伙，我本想电死一只火鸡，结果差一点电死一个傻瓜。这一句开心话，却反映了富兰克林为科学研究不顾个人安危的献身精神。

在研究雷电成因的同时，他发明了制伏天电的一根钢针——避雷针。他为了使这项新发明能更快地推广到世界各地，拒绝了当局授予他发明避雷针的专利权，这种科学观和态度是值得钦佩的。一只针，不知拯救了多少生命，

使多少房屋免遭焚毁和破坏。富兰克林对人类社会的这一重大贡献，人们是不会忘记的。

库仑定律

法国物理学家库仑从小就喜欢学习数学。后来在工兵队服役期间遇到的各式各样的力学问题引起了他的注意并写了不少这方面的论文。1779年他与荷兰物理学家斯威顿共同研究磁石方面的问题，获得了奖励。1781年关于摩擦的研究，又得到了法国科学院为简单机械理论研究设立的奖赏。同年，由于论述扭力的论文，被选为法国科学院院士。1784 - 1789年，他转向电磁学方面的研究，1785年他用自己设计的扭秤，建立了著名的库仑定律。

最初，他参加设计一种指向力强、抗干扰性能好的指南针的竞赛活动，提出了丝悬指南针的设想，并由此得到法国科学院为竞赛所设立的磁学奖，也可以说这就是扭秤的前身。因为当他把丝悬指南针用于测定地磁场场强时，发现丝线抗大气电的干扰能力不强，于是他金属丝代替了丝线，后来他又给出了扭力的计算公式

$$M = \frac{\mu d^4}{l} .$$

公式中的 l 和 d 分别为金属丝的长度和直径， μ 为弹性系数， M 为金属丝的扭转角。扭力计算公式为扭秤实验提供了主体结构 and 定量测定力的依据。

后来，库仑就是用扭秤仪器进行实验的。这个扭秤可以测定 0.005 达因的力，可见相当精巧。它是由直径和高均为 32.48 厘米的玻璃圆筒和上边的一个直径为 35.19 厘米的玻璃圆盖构成的。这个圆盖上有两个孔，一个孔在一侧，一个孔在中央，孔的直径为 4.51 厘米。中央孔处装有高为 64.96 厘米的玻璃管，玻璃管的上端装有测定扭转角大小的测微计，并悬挂一根银丝。悬丝下挂一横杆，横杆的一端为带电小球，另一端为作配平用的圆纸片。玻璃圆筒上刻有 360 个刻度。在一侧的孔用绝缘棒悬挂另一带电球。实验前作好调零的准备工作，然后做排斥力与距离关系的实验，作了三次记录：第一次两小球相距 36 个刻度，第二次为 18 个刻度，第三次为 8.5 个刻度；而银丝的扭转角度：第一次为 36 度，第二次为 144 度，第三次为 575.5 度。于是，他们之间存在如下比例关系： $1 \quad 1/2 \quad 1/4 = 1 \quad 4 \quad 16$ 。按扭转力来计算，第一次约为 0.0153 达因；第二次约为 0.0612 达因；第三次约为 0.245 达因。从而得出如下结论：两个带有同样类型电荷间的排斥力与两球中心之间的距离平方成反比。

库仑在做异性电荷吸引力与距离的关系实验，利用扭秤时遇到了困难，主要是两球相吸，很难保持稳定，相吸的结果常常是相互接触而发生电荷中和现象，使实验无法进行下去。于是，库仑采取了另外一种方法：从测定振动周期，来确定力与距离的关系，他巧妙地设计了一个新的实验装置，来实现他的设想。

至于力与电量之间的关系，由于当时还没有一个衡量电量多少的公认的单位制，不能直接给出定量的证明，但库仑采取让带电球与不带电球相互接触的办法，解决了这个问题。这样就可以得到等于原电量的 $1/2$ 、 $1/4$ 、.....，从而得出电力与电量相乘积成正比的结论。

同时，库仑采用同样的方法（平衡法与振动法）得到磁力的相互作用定律。至此，库仑终于于 1785 年在法国科学院发表的关于电力与磁力的作用规律的论文中，提出了电荷（或磁极）之间的作用力与其距离的平方成反比，