

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中小學生課堂故事博覽

現代文明顯奇功

— 電磁學的故事



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己关于磁石的传说，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： $1 : 1/2 : 1/4 = 1 : 4 : 16$ 。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，

和两者所带电量（或磁极强弱）的乘积成正比的关系。这就是著名的库仑定律。

库仑定律的问世，不仅揭示了电力（或磁力）相互作用的规律，奠定了静电（磁）学的理论基础，同时还暗示电、磁作用力与万有引力存在着内在的一致性，为统一自然力提供了重要的线索。库仑是静电（磁）学的第一位奠基人。

电学领域的探索者

起电机的改进

读者一定见到过水银温度计，或者气压计，如果在黑暗之中轻轻地晃动温度计，可以看到玻璃管里会发出粼粼的闪光。

这种现象是 1675 年由一个叫皮卡尔的人发现的，于是引起了不小的轰动，人们争相撰文发表议论。

有人说这是水银里含了硫，也有人说这是一种特殊的磷光，最后还是伦敦皇家学会干事豪克斯贝找出了引起这种现象的原因。原来是水银摩擦玻璃管壁生成的静电在闪光。为了使众人心服，豪克斯贝在一个抽空的容器里悬吊了几根线，当被晃动过的气压计放进容器里时，几根悬线就会被玻璃管吸引。

豪克斯贝最重要的工作是改进了起电机，经改进后的起电机可迸发出 2 厘米长的“美丽的紫红色光”。这种明亮的火花竟可以让人在暗中阅读书本上的小字。

豪克斯贝的起电机吸引了人们研究的注意力，不久形态各异而原理类同的摩擦起电机层出不穷，人们用这些起电机来引燃炸药、乙醚，点燃刚刚熄灭的蜡烛，其中最引人瞩目的是 1743 年由德国电学家豪森做的“人体链”实验。有一个巨大的玻璃起电机，一个男孩被丝绳悬吊起来，双脚触着旋转的玻璃球，手拉着一位小女孩。当玻璃球旋转时，摩擦产生的电会通过男孩，一直传递到小女孩的身上，顿时，这一对俊美的小孩的脸上和手上都闪烁着美丽的电火花，犹如天国来的小天使一般，带了电的小女孩还会把放在桌上的谷子和糠屑吸引起来。

这些实验虽然很吸引人，但毕竟只是前人工作的重复和改进。一直到了 18 世纪 30 年代，电学研究里才有了新的突破。

电传导现象

1729 年 7 月 3 日，笼罩在伦敦上空的大雾渐渐散去，淡淡的日光透过云层，整个市区变得光亮起来。在阿突坦广场一侧的街道旁，站着一位衣着寒酸、年近半百的人，不住地向四周张望，连马车驶过身旁溅起污水都不理会。他叫斯蒂芬·格雷，是一个靠领取退职金度日的穷人。一段时间来他迷上刚刚崭露头角的电学，整天不是思索问题就是摆弄仪器，简直到了废寝忘食的地步。最近又结识了一位志同道合的朋友惠勒，也是一个电学迷，两人一见如故，成了莫逆之交。惠勒很富有，出钱买了器材、添了设备。格雷得到了惠勒的资助，真是如鱼得水一般，劲头更足。几天前他们爬上了伦敦最高的建筑物——1710 年才竣工的新圣保罗大教堂的钟塔，使电荷沿着 30 多米长的金属线垂直流下来。成功的喜悦使两人都激动不已。于是他们约定今天再做一个试验，看看电荷会不会沿着水平方向流动。不一会儿惠勒来了，见面就问：“东西都带齐了？”格雷拍了一下手提箱回答：“全在这儿了，走吧！”两人来到了大教堂后院的一个空谷仓里。格雷取出一大捆金属线，于是就在谷仓里把金属线从这头拉到那一头，再从那一头拉到这一头，兜了好几个来回。粗一算，拉出来的金属线有 270 米。然后两人又用细丝线把金属线悬吊

在木梁上。线架好后，格雷又在金属线的一端系上一个象牙球，这才对惠勒说：“你把羽毛放在象牙球的附近，注意观察，我去那一边。”格雷走到另一端，把金属线绕在30厘米长的实心玻璃棒上。当他用丝绸使劲摩擦玻璃棒时，守在另一端的惠勒欣喜地看到，撒到象牙球四周的羽毛片和纸片都飞了起来，粘到了球上面。“电传过来啦！”惠勒兴奋得大喊起来。听到惠勒的声音，格雷越发使劲地摩擦玻璃棒，突然哗啦一声，金属线掉了下来，原来悬吊金属线的细丝线经不起晃动，断了。“唉，实验做不成了，丝线可没有了。”惠勒扫兴地说。“用铜线来代替吧，铜线更牢哩！”格雷刚刚被看来可以成功的实验提起了兴致，实在不愿意就此停下来。于是两人改用了粗铜丝把金属线重新悬吊好。奇怪，这一来无论格雷怎样使劲地摩擦玻璃棒，象牙球一点反应都没有。”惠勒好生纳闷：“不会是金属线给摔断了？”“不，你看。”格雷用手指着天花板说：“电荷都从铜线跑到木梁上去啦。原来电荷流不过丝线，可以流过铜线。”惠勒经点拨，恍然大悟地说：“啊，这不是一个重大的发现吗？格雷你太了不起了。”格雷先生确实了不起，他一眼就看清楚了铜线和丝线的区别，从而发现了导体和绝缘体。格雷先生有如此敏锐的洞察力，在于他对电学有强烈的兴趣，以及长期孜孜不倦的苦心钻研。

二元电液理论

当英国学者热衷于电现象实验时，与英伦三岛隔海相望的法国，电学研究也开展得十分活跃。最出名的要数杜飞和诺莱这对搭档。

杜飞生于巴黎，年轻时在军队任职，当过陆军军官，后致力于科学研究。1732年起担任巴黎植物园园长。他对格雷的工作很感兴趣。当他了解到格雷曾经使一个站在树脂板上的小孩带上了电，决定要切身体验一下。他是行伍出身，做实验就像上战场，敢冲敢打毫无惧色。他请诺莱和几个助手把自己用绝缘丝绳悬吊在天花板上，并用起电机使自己带上了电，当诺莱走近他的时候，他突然感觉针刺般的灼痛，身上竟射出长长一串闪烁的火花，同时发出噼噼啪啪的声响。这奇妙的情景使他俩都惊讶得半晌说不出话来。事后诺莱对人说：“这个情景永生难忘。”诺莱生于潘普雷，曾在克莱蒙、博韦和巴黎学习，当时他在巴黎担任实验物理学校教师。诺莱后来在电学上多有建树，他还特别热衷做人体传导电荷的实验，并且当众表演，有几次表演气势宏大，场面壮观，给观众留下了深刻的印象。他也因此声誉鹊起，当时诺莱的大名在法国是妇孺皆知的。

18世纪初，英吉利海峡两岸的自然哲学家们都以极大的热情在研究电学，但研究的风格却迥然不同。英国学者偏重于实验和应用，法国学者更倾向于电现象理论的探索。

杜飞在实验时注意到两个带电体不仅会相互吸引，有时也会互相排斥，于是他提出了二元电液理论。他说：“存在着两种实质上不同的带电形式，其中的一种称为玻璃型的，另一种称为树脂型的。第一种电在玻璃、宝石、毛发和其他物体上出现，而另一种出现在琥珀、生漆、丝绸等物体上。这两种电的特殊标志是：同种电相排斥，而异种电相吸引。”

我们来做一只由杜飞设计的，后经英国物理学家贝内特牧师改进的验电器。

材料是：玻璃瓶、软木塞、金属杆。

制作过程是：在软木塞中央钻一小孔，插入金属杆。金属杆上端固定一个金属小球（或拧一个螺帽）。金属杆下端用胶水纸固定两片狭长形的金属箔。盖紧木塞，用蜡封口。

当用带电体接触金属杆上部时，金属箔带上同种电荷，互相排斥会张开一个角度。

定性实验

通过实验系统地研究电磁现象，是到欧洲文艺复兴时代之初才开始的。

伽利略的同代人，英国皇家医生吉尔伯特仔细研究了磁相互作用。他用天然磁石做了一个大球，在它周围放一些小磁针，发现每个小磁针都有一定的取向，这些小磁针的行为与指南针放在地球上的行为一样；并发现球上有一点对磁针一端吸力最大，而在相反的端点对磁针的另一端吸力也最小，磁针在两极垂直地指向球面，在两极中间则平行于球面。由此，他断定地球是一个大磁球，并且第一次解释了磁针指南北的道理，这些结论都写在他的著作《论磁石》一书里。

吉尔伯特还研究了电现象，发现不仅摩擦过的琥珀有吸轻小物体的性质，而且其它物质像金刚石、水晶、硫磺、火漆和玻璃等摩擦后也有吸引轻小物体的性质，他把这个性质称为电性。他又把电现象和磁现象加以比较，得出结论：电性可以用摩擦的方法产生，而磁性是天然磁体本身所具有的；磁作用有两种——吸引和排斥，电作用只有一种；电吸引比磁吸引弱，但是带电体能吸引多种轻小物体，而磁力只能对少数几种物质有作用；电力可以用水消灭，磁力却不能被消除。吉尔伯特关于电和磁截然不同的看法在当时影响很大。

1650年以“马德堡半球实验”而闻名于世的德国物理学家格里克发现了经过摩擦的琥珀虽然会吸引小纸片，但两个与这块琥珀接触过的小纸片却互相排斥。他还发现，电荷可以从一个物体传给另一个物体，物体之间可以不直接接触，用一根潮湿的绳子或最好是一根金属丝把物体联接起来，电荷就会沿湿线或金属丝传过去。他在1663年制造了世界上第一架摩擦起电机。他取一个似小孩头大小的球形玻璃瓶，把研磨好的硫磺装到里面，并在火上熔化。冷却后，打破玻璃瓶，取出硫磺球，放在干燥的地方，再把它穿一个洞，使它能绕一根铁棒或轴转动。他把手或者破布按在硫磺球的表面上，并让球迅速旋转，硫磺球就获得了足够的电荷。后来经过改进，可以产生强烈的电击和骇人的火花。

1731年，在修道院领取养老金的英国人格雷，发现导体和绝缘体的区别，并提出了电的“双流质”说，他认为在正常的物体中存在着等量的两种“流质”，一种是“正流质”，另一种是“负流质”。当两个不同的物体相互摩擦时，就会有流质转移，使一个物体得到了超过平衡的“正流质”，而另一个物体留下了超过平衡的“负流质”。

1733年，法国化学家杜菲发现绝缘的金属也可以通过摩擦的办法起电。他让助手把自己用绝缘丝绳吊在天花板上，使自己的身体带电，当助手靠近他时，杜菲突然感到针刺般的电击，并产生噼噼啪啪的声响，从而说明绝缘的人体也可以带电。1734年杜菲发现，两根带电的琥珀棒或带电的玻璃棒悬挂起来彼此靠近，它们会相互排斥。可是带电的玻璃棒和带电的琥珀棒却互相吸引。这使他认识到电有两种，一种是由摩擦后的琥珀、火漆、硬橡胶和其他树脂类物质产生的，这种电称为“树脂电”；另一种是由摩擦后的玻璃、云母等所产生的，这种电称为“玻璃电”。他认为中性的物体是物体中所含的这两种电数量相同而互相抵消了。带电的物体则具有多余的“树脂电”或“玻璃电”。他指出这两种电的特殊标志是同种电相斥，异种电相吸。

1745年，荷兰莱顿大学物理学教授马森布洛克，为了寻找保存电荷的方

法，做了一个实验：把一支悬挂起来的枪管连在起电机上，另用一根铜线从枪管中引出再插入盛水的玻璃瓶里，他企图把起电机产生的电荷存入玻璃瓶中。他的助手一只手握住玻璃瓶，马森布洛克摇起电机，助手不小心，另一支手触到枪管，他突然感到强烈电击，喊叫起来。马森布洛克与助手互换位置，重复前面的过程，同样他的“手臂和身体产生了一种无法形容的恐怖感觉，总之我以为这下子可完蛋了”。为此他发誓即使把整个法兰西帝国赠给他，也不再重做这个实验了。并劝他的朋友也不要做这个可怕的实验了。但他的话起了反作用，他的实验引起了莱顿大学几位科学家的极大兴趣，他们多次重复“莱顿实验”并不断改进装置，形成了现在使用的莱顿瓶。这是人类首次找到了储存电荷的方法，为进一步深入研究电现象提供了方便。

莱顿瓶受到了美国学者富兰克林的重视，1746年英国物理学家考林森赠给富兰克林一只莱顿瓶。富兰克林利用它做了许多实验，在1747年发表了关于莱顿瓶功效的分析文章。在实验中证明了异种电荷可以相消，由这种相消性，得出两种电荷没有什么本质差异的结论。他提出了电的“单液说”，认为“玻璃电”是唯一存在的一种无重量的“电流质”。两种不同的带电现象只是相当于这种电流质的过剩或减少。他把带有过剩“玻璃电”的物体称为带正电的物体，而把缺少这种电的物体称为带负电的物体。当一个具有过剩的电流质的物体遇到一个缺少电流质的物体时，就有电流质从前者流向后者。富兰克林的观点是错误的，因为正电荷与负电荷是确实存在的。但他是“正电”和“负电”的命名人。并且他的理论在当时能解释各种电现象，特别是在导线中有电流的情况下是接近真实情况的。同时他的理论中包含了正确的概念，即“电不因摩擦玻璃管而创生，而只是从摩擦者转移到了玻璃管，摩擦者失去的电与玻璃管获得的电量严格相同”。这就是说，在任一绝缘体系中电的总量是不变的，这就是电荷守恒原理。

富兰克林在用莱顿瓶做放电实验时，注意到放电发生的火花和响声，联想到暴风雨时的闪光和雷声，他认为这两者在本质上是相同的，只是规模不同。他把自己的见解写成论文，寄给英国皇家学会，但未得到承认。富兰克林只好寻找实践的支持，他觉得有必要把天雷捕捉下来瞧瞧。1752年7月富兰克林冒着生命危险，在雷雨交加时，同他的儿子一起将一只带有铁丝尖端的丝绸风筝放入云层，通过打湿了的麻绳和末端的金属钥匙，把“天电”引入莱顿瓶，再从莱顿瓶取出了电火花。这就是震动世界的“费城实验”，它令人信服地证明了“天电”与“地电”是相同的，揭开了雷电的奥秘。第二年富兰克林发明了避雷针，这是人类利用电学知识征服自然界所迈出的第一步。

俄国科学家利赫曼和罗蒙诺索夫也从事大气中电现象的研究，他们设计了一个装有金属尖杆的“检雷器”，想用它来检测云中是否有电。1753年7月26日在雷雨即将来临时，利赫曼教授去观察仪器，一个霹雳打下来，击倒了利赫曼，他为科学献身的精神永远为后人纪念。

18世纪中叶对电的本质的争论一直未休战，直到19世纪末“电子论”诞生后争论才得到解决。

在18世纪，关于磁只有一项研究成果，它是1778年布鲁格曼斯看到铋被一块磁铁排斥时发现的抗磁性。

富兰克林与风筝

前面提到过的本杰明·富兰克林，1706年1月17日生于北美波士顿城。父亲是个虔诚的新教徒，1685年为了逃避宗教迫害，从英国移居到北美。在这里开了一家小作坊，制造和销售肥皂蜡烛。富兰克林从小聪明好学，但由于家庭贫困，只读了两年书就辍学了，在店里帮忙打杂。12岁的时候他被送到印刷所里当学徒。印刷厂的工作使他有了与书接触的机会。他常常在辛勤忙碌了一天，躲进阁楼，点上一支牛油蜡烛，兴趣盎然地读起那些刚装订好，还散发着油墨香的新书。由于他勤奋好学，进步很快。他攻文学，练写诗，习算学，研究航海术，这一切为他日后成为伟大的科学家、政治家和作家奠定了坚实的基础。富兰克林常常说：“千万不要浪费时间，因为生命是由时间组成的。”又说：“经常使用的钥匙是锃亮的。”

富兰克林在18岁的时候有过一次奇异的经历，从此他对自然界里的雷电现象产生了强烈的兴趣。那年他乘船去伦敦，船驶过大西洋百慕大群岛时，遇上了神秘的风暴，三四天不见太阳，大海像发了疯似地咆哮着。到第5天，风暴突然平息了，大家正在庆幸脱离了危险，突然有人叫起来：“桅杆起火了。”富兰克林睁大了眼睛朝桅杆尖看去，只见桅杆尖上有一串淡蓝色的火花在闪烁。这时一位水手走过来抚摸一下他的头安慰说：“不要怕，这是‘爱尔摩火’，也就是神火，是它保佑了我们死里逃生。”水手还讲起了自己的历险记：“几个月前，我在‘俄尔热斯’商船上当水手，当船行到大西洋中部时，碰上雷雨，一阵巨响，使人不寒而栗。雷电之后，船上两只罗盘全部失灵，船迷失了方向，在茫茫大海里东撞西碰，最后触礁沉没。我抱着一块木板，在海里飘了三天三夜，才侥幸被救。”富兰克林听完了故事，十分惊奇。雷霆、闪电、桅杆顶上神奇的火花，不时在他脑海中浮现，这究竟是一种什么样的神秘力量啊！可是青年时代的富兰克林实在没有条件来从事科学研究。光阴荏苒，春去秋来，富兰克林也已到了不惑之年。一次斯宾士的演讲又重新激发起很久以来一直埋藏在他心里的渴望探索自然奥秘的夙愿。他向斯宾士要了几件简单的仪器，回到费城家里。不久，他的英国朋友、英国皇家学会会员柯林生给他寄来了一只经过改进的莱顿瓶，并在信中介绍了使用方法。富兰克林高兴极了，怀着极大的热情和兴趣用它做了大量的电学实验。他在给柯林生的回信中说：“在以前我做的任何研究中，从来没有像这个实验那样如此集中我的注意力和花费时间。”下面我们来看一看富兰克林设计的小实验。

用呢绒摩擦玻璃板，让玻璃板带电，然后使用手指在板上写字或画一个简笔画，当然这字或画谁也看不出来。接着向玻璃板上撒一些粉笔灰，然后用力一吹，可以看到字画的轮廓马上就显示出来了。这是因为用手指写字时，玻璃板上的电荷会从手上跑掉，因此这部分玻璃不再带电，没有吸住粉末的本领了。

富兰克林从用莱顿瓶做的大量实验中，总结出了电的单流体说。前面已经介绍过，1733年法国科学家杜飞提出电有两种：玻璃电和琥珀电。富兰克林认为这种表述方式不够恰当，也容易引起误解。他提出：无论哪一种电荷都可以用正电或负电来表示，分别记作为 $+e$ 和 $-e$ 。这些电并不是摩擦“创造”出来的，而是由两个物体在摩擦过程中，电荷从一个物体转移到另一个物体，并且在任何一个绝缘的体系里总电荷数不变。这是电荷守恒定律的最早表

述。富兰克林这种简单的科学分类方法，给后人研究电现象带来了方便。

1752年7月，一个阴霾密布的夏日，电闪雷鸣，预示着一场大雷雨即将来临。富兰克林与小儿子威廉冒着生命危险，把一只用丝绸做的，顶端安装了铁丝的大风筝放上了天空。并通过放风筝的麻线和系在麻线下端的铜钥匙把聚集在云层里的电荷引下来。这就是著名的“费城实验”。他在给柯林生的信里是这样描绘当时的情景：“当带着雷电的云来到风筝上面的时候，尖细的铁丝立即从云中吸取电火，风筝和绳子全部都带了电，绳子上的松散纤维向四周竖起来，可以被靠近的手指所吸引。当雨点打湿了风筝和绳子，以至电火可以自由传导的时候，你可以发现电火从钥匙向你的指节大量地流过来。用这个钥匙，可以使莱顿瓶充电，用充得的电火，可以点燃酒精，也可以进行其他电气实验，像平常用摩擦过的玻璃球或玻璃棒来做的电气实验一样。于是闪电的物体和带着普通电的物体之间的相同之处就完全显示出来了。“费城实验”证实了雷电既不是什么“上帝之火”，也不是什么“毒气爆炸”，而是自然界里一种大规模的放电现象。消息传开来，引起了世界性的轰动效应，欧洲大陆的许多科学家都重复了这类实验，俄国物理学家里赫曼还在实验时被雷击中牺牲了生命。消息传来，富兰克林十分悲痛，又不胜感慨。原来早在几年之前富兰克林就设想了可以在建筑物的屋顶上装置尖端的铁杆，它就会把雷电引入能容纳大量电荷的大地，从而保护建筑物免遭雷击。他把这种想法写成论文，寄给了英国皇家学会，受到的却是一阵嘲笑。有的说：“他竟想把上帝和雷电分家，真是痴人说梦。”还有的说：“美洲的土包子也想研究科学，可笑。”现在他不再去理会这些讽刺和奚落，决心走自己的路了。他去铁匠铺定做了一根3米长、顶端尖尖的细铁棒，把它安装在自己家里的烟囱顶上。铁棒的下端拴上金属线，然后把金属线沿着楼梯，引到屋子里的金属水泵上，这水泵是通向地下的。他想，从烟囱顶上引下来的电，就会乖乖地泄流到地下去。为了能够知道有没有电荷通过导线流入地下，他又把屋里那段金属线分成两股，两股线相隔一段距离，各挂上一个铃，如果金属线上有电流通过，两只小铃由于受到相互吸引力的作用就会晃动起来发出叮当的响声。

一天下午，雷声隆隆，电光熠熠。富兰克林在屋里紧张地观察着自己精心设计的试验结果。每当天空出现一道强烈的闪电，那系在金属线上的铃就不住地左右晃动，小铃铛发出了一阵清脆悦耳的音响。富兰克林笑了，他知道避雷装置正在把天空中的大量电荷送入地下，试验成功了。

避雷针的原理

避雷针的发明是人类在电学研究为生产和生活服务的第一个实例。下面我们通过做一个小实验来了解避雷针的工作原理。器材是塑料唱片一张、木柄铁锤一把。

实验过程是：先用绒布摩擦唱片，使唱片带大量电荷。当带电的唱片（代表带电云）从置放在地面上的铁锤（代表建筑物）上方经过，唱片会被铁锤吸引并发出放电火花。如果在锤子上竖起一根针，放电现象就不会发生了。这是因为当带负电荷的唱片置放在铁锤的上方时，由于静电感应的缘故，铁锤上聚集起相当数量的正电荷。带着异种电荷的唱片和铁锤靠近时，就会产生剧烈的放电，迸发出火花来。当铁锤上竖起尖针时，锤上聚集的正电荷可以通过针的尖端放电，跑到空中去与唱片上带的负电荷中和，减弱了电场强度，从而避免了剧烈的放电发生。

雷电是地球上最常见的一种自然现象。整个地球表面平均每秒钟有 100 多次闪电。闪电的中心温度可以高达 17000 ~ 25000 ，并在 1% 到 1/10 秒之内释放出几百万至上亿焦耳的能量……一次长距离的闪电要经历 50 次左右的转折才落到地面上，在空中留下了一条蜿蜒曲折的轨迹。闪电时电流的颠值可以达一万安培，给地球带来 5 库仑电量。闪电的形状有树枝状、条状、片状、串珠状和球状。其中以罕见的球状闪电最引起科学家们的兴趣。19 世纪有人做过 1000 多次闪电观测纪录，然后报道：“这种火球直径大多在 10 ~ 20 厘米，但也有小于 1 厘米，大至 10 米的。颜色各种各样，最常见的是红、橙、黄三种。它沿着弯折的路径飘忽不定。移动速度比较慢，存在的时间在 1 到 5 秒之间。火球在消失的时候会发生猛烈的爆炸，具有很大的破坏力。1989 年 8 月 15 日我国青岛黄岛油库就由于球状闪电的袭击引起储油罐大爆炸。近年来科学家对球状闪电的成因，提出了许多猜想和假设。美国科学家在北美大草原陨石观测网观测了 12 万张闪电照片后认为球状闪电是从普通闪电的末端分离出来的，球状闪电是“被激发的亚稳定态分子和等离子体的凝结块”。

避雷针的发明迄今已有 240 多年的历史了，由于它的保护使万千幢高楼大厦摆脱了雷电的威胁，为人类的文明和繁荣作出了贡献。然而富兰克林发明的尖端避雷针并非尽善尽美，它的效果不太理想，并不能绝对预防闪电袭击。开始大家把这种失败归之于接地不好，或顶端不尖。后来英王乔治三世命令英国使用顶部为球状的避雷针，法国人则把避雷针的头部制成圆锥形。而美国则一直坚持使用富氏尖头避雷针，在 1977 年 7 月 13 日晚，美国纽约市遭到雷击，5 条负载 34 万 5 千伏的电缆全部被闪电切断，整个西北地区停电达 26 小时，这一重大事故引起了美国科学家对避雷装置换代更新的重视。据《纽约时报》报道，今天美国使用的新型避雷针外形像鸡毛掸子，它的中心是一根管子，顶端引出 2000 条细细的导线，导线呈辐射状，它可以驱散聚集在建筑物周围的静电荷，有很强的避免形成闪电的能力。我国解广润教授发明的半导体消雷器也是一种新型的避雷装置。当建筑物上空笼罩着带电云层时，消雷器会发出 1 米高的电晕火花，直冲云层与天空里的电中和。万一雷击发生，消雷器上的开关装置则可将巨大的电流挡住，从而保护了建筑物。

我们聪明的祖先远在西方之前就发明了避雷装置，并在实践中应用。据《后汉书》记载，一次当时的重要宫殿未央宫和柏梁台遭雷电袭击发生火灾

不久，就有一位名叫“勇之”的方士向汉武帝建议，在宫殿的屋脊上安装“鸱鱼”来防止灾难。此后两千年来，我国古建筑的屋脊上大多安装了这一类金属瓦饰，有的是龙、有的是飞鱼和雄鸡。虽然它们形状各异，却都有尖状物指向天空。尽管没有引导线与地面连接，但大雨淋湿的屋檐和墙壁，自然起到了接地的作用。由于这类瓦饰高于建筑物之上，即使是猛烈的落地雷，也通常只是击毁了瓦饰而保全了建筑物主体。

大约在三国时期，工匠们已经意识到接地的重要，他们在建造远远高于一般建筑的古塔时，顶部安装了钢铁制造的“葫芦串”，自然着眼于避雷的目的。而且还把它与涂了金属粉末容易导电的塔心柱连接起来，柱的下端又设置了贮藏金属的龙窟，组成了一套十分完整的避雷装置。如江苏省高淳县的保圣寺塔始建于公元 229 年的三国时期，塔高 31.5 米，远远高于周围的建筑群，由于塔顶安装了 4 米高的铁制古刹，由覆钵、相轮和宝葫芦等部分组成，至今历经千年风雨而从未遭雷击。明代，由金属杆、接地线组成的完整的避雷装置也出现了。1688 年西方传教士马卡连来华，在《中国札记》上写道：“中国有些建筑物的屋顶上有一种叫做龙的装饰物，它头部仰向天空，张着嘴。这些怪物向上伸出的舌头是根尖端的金属芯子，另一端和埋在地下的金属相接，能让雷电跑到地面去而不伤害建筑物。”就按这位西方人的记载来算，也要比富兰克林早了 70 余年！

伽伐尼与电流

任何事物都具有这样的特点，运动着的客体都要比它处于相对静止时，更能显露出它的本质和丰富多彩的性质。因此，电流的发现不仅是对电荷本身认识有质的飞跃，开辟了一个动电学的新领域，而且也打开了探索电现象与其它物理现象内在联系的大门。

最先发现电流的是意大利波洛尼亚大学的解剖学教授伽伐尼。大约在1780年，他和助手作解剖青蛙实验时，偶然发现用解剖刀具与蛙体神经相接触时，有时会发现蛙腿抽动的现象。最初以为这或许与附近的起电机有关，于是又变换了条件，把起电机拿走，用铜和铁的器械去接触蛙体神经，也同样产生抽动现象。后来又考虑到可能是空中外来电引起的，于是避开雷雨天，在密闭的房间中，同样有时也出现这种现象。最后，又用各种非金属的用具做实验，却看不到上述现象。这样反复作了上百次实验，连续观察6年之久，伽伐尼才下了结论。他认为：电来自蛙体的神经，而两种金属的导体只不过起传导作用。他把这种电称为“动物电”，并且公开在波洛尼亚大学1791~1792年的工作纪要上发表了。从1780年开始发现电流现象到正式发表，前后经历了十几年，这充分说明伽伐尼治学态度的严谨。尽管当时对这种现象的本质还不十分清楚，但这种现象却意想不到地引起了科学界的关注。引起了广泛的注意，纷纷进行有关实验与研究。

伽伐尼的发现也引起了他的好友意大利物理学教授亚历山得罗·伏打的重视。他首先做了大量的重复性实验，他发现用不同金属接触动物不只是引起神经的运动，而且还会引起视觉和味觉的效应。例如，用一根由两种金属构成的弯杆，其两端分别与头部和上颚接触的瞬间，会使眼睛有光亮的感觉；又例如，用舌头舔一个金币和银币，如把两者接触在一起，会产生一种酸味。于是，他联想到瑞士的苏尔查在1762年向柏林科学院提交的一篇题为《愉快和不愉快感觉理论》论文中，谈到铝和银金属小片接触舌头时，会使人感到有一种硫酸铁的味道。于是，他提出电来自两种金属，而湿润的动物体，只是起着传导作用的主张。同时，他建议伽伐尼所发现的电流，不应称为“动物电”，而应叫做“金属电”。他为了尊重伽伐尼最先发现权，他把这种电流称之为“伽伐尼电流”。尽管对电流的来源有不同的看法，但电流的客观存在则是两个人取得的共同结论。

发现电流的过程表明，一些重大的发现常常是偶然的，这就要求从事科学研究的人员，要有严谨的科学态度与细致的工作作风，才能及时发现这种偶然出现的现象，才能从偶然现象中，去追寻现象间的必然联系。

爱迪生与电灯

1879年10月22日的深夜，万籁俱寂，一片漆黑。在美国新泽西门罗公园的实验室里却洋溢着一片欢乐。房间里一群不修边幅的青年人正聚精会神地注视着桌上一盏明亮、可爱的白炽灯——世界上第一盏不是“昙花一现”的白炽灯。它已经亮了快40个小时了，大家虽然都很疲倦，但谁也不肯去休息。一个个都乐得眉开眼笑，“老头子，我们真的成功了！”突然有人兴奋地说。这位被大家称呼为“老头子”的人就是发明大王爱迪生。其实他才30多岁。爱迪生点点头，不由热泪盈眶。几年来他为了发明白炽灯，经常连续工作甚至连续5个昼夜都不合眼。查资料光笔记就记了400册。寻找做灯丝的材料，先后试了1600多种，连朋友的红胡子都拔下来试过了，可是还是没有成功。他耗费了不少精力用炭化的纸条做灯丝的那只白炽灯，一共只亮了8分钟，但失败在爱迪生的眼里只是走向成功的起点，他最喜欢说这样一句话：“天才是九十九分血汗加一分灵感。”

几天前的一个晚上，他独自一人坐在实验室，默默地思考着这上万次失败的教训，桌上恰好放了一堆从煤油灯罩上刮下来的油烟（是一种未经充分燃烧的碳）。他心不在焉地拿在手里搓揉，不知不觉就搓成了一条细线。突然一个灵感在他脑中出现：这不就是一种碳丝吗？啊！用棉线烧出的碳丝不是可以当灯丝吗？爱迪生心里一热，立即让助手找来了棉线。他把棉线放在一个镍制的模型里，送到高温密闭的炉中加热，当炉内温度达到摄氏800度时，棉线就被烤成一根碳丝。可是这种细碳丝实在太脆弱了，一碰就断，于是烧了断，断了再烧新的。就这样，爱迪生和助手们一直连续干了整整3天，终于在玻璃工的帮助下，把一根碳化后的棉线，顺利地装进了灯泡。这时爱迪生命令所有的助手好好睡一觉。10月21日的早晨爱迪生在二楼实验室将手下的助手召集在一起，开始发起这场光明向黑暗的决战。一位助手先用性能良好的抽气机抽出灯泡里的空气，再把抽气口封起来，接通电流，灯亮了。一小时、二小时、五个小时过去了，那明亮的光辉还没有一点收退的迹象，大家终于忍不住地欢笑起来。

45小时后灯灭了，爱迪生和他的助手们流着热泪拥抱在一起。高兴过后，爱迪生拿过记事本在上面写了一行大字：“1879年10月21日，灯泡寿命45小时。下个目标——1000小时。”后来爱迪生根据棉线的性质，集中力量考察了大批植物纤维的性能，先后试用了6000多种植物纤维，终于在1880年初春，找到了用竹丝烧成的碳丝来做灯丝，电灯亮了1200小时（50天），巨大的成功使爱迪生非常激动，他马上派人跑遍东方各国收集材料，大量制造灯泡，供应市场。1882年，爱迪生在纽约建立了第一个发电站，从此人类在白炽灯的光明中，开始了新的生活。

碳丝灯泡太脆弱，稍有震动灯丝就会断裂。到1910年美国库利奇发明用钨丝来做灯丝，这就是现代的白炽灯。早期的钨丝灯泡里面是真空，用了不久，玻璃泡里就发黑，灯丝也断了。原来钨丝受热后，钨原子蒸发跑到了玻璃泡上，灯丝越来越细，最后就断了。为了使灯泡寿命长一些，只好使灯丝的温度低一些，这时灯丝把大部分电能都转化为热能，只有小部分转化为光。所以灯很暗。1913年一位熟悉化工材料的工程师想到把碘元素涂在玻璃泡的内壁，制成了碘钨灯。在高温下从灯丝蒸发出来的钨蒸气会与涂在泡壁上的碘化合，生成碘化钨。但是碘化钨不稳定，它受不住1400的高温，于

是再分解，这样钨又会重新回到灯丝上来。在碘的作用下，钨的蒸发处在一一种动态平衡的状态，灯泡的寿命就大大延长了。但美中不足的是碘蒸气带紫红色。后来专家们用溴、氟、氯等卤族元素来代替碘，制成了形态各异的卤钨灯。卤钨灯能发出强光，拍摄电影和电视都离不开它。

1901年法国化学家克洛德发明了一种没有灯丝的新光源，即把正、负电极装进充有氖气的玻璃管里，电极之间放起电来，氖气的原子受到激发，发出明亮的红光。氖灯是最早的霓虹灯，霓虹灯里充上不同的气体，就会放出不同色彩的光，把城市的夜晚点缀得五光十色。

1939年德国人又发明了一种新型的荧光灯。在玻璃管的内壁涂上荧光粉，荧光粉有一种本领，当紫外线照到管壁的荧光粉上时，灯管就会发出近似日光颜色的光，所以也叫它“日光灯”。它是一种“冷”光源，发光效率是白炽灯的4倍，工作时略有微热，光线的分布也挺均匀。是家庭里使用的一种理想光源。50年代科学家又在荧光粉里掺入钨酸钷，同时增加了灯管里空气的压力，制成了高压汞灯，最大限度地把紫外线转变为可见光，功率可以达到几千瓦。

60年代复旦大学蔡祖泉教授发明了长弧氙灯。它的两个电极相距100毫米以上，在高频脉冲电流的作用下，灯管里火花放电的同时产生大量的电子、离子形成弧光放电。它功率大、亮度强。最大的长弧氙灯有几十万瓦，用一只五千瓦的长弧氙灯抵得上一千只100瓦的日光灯哩，难怪大家称它是“小太阳”。

伏打与电池

把两根不同材料的金属线一端焊接起来，组成一根长金属导线。导线的一端放进嘴里，另一端与眼睛的上方接触，在接触的瞬间，眼睛可以感觉到光亮闪烁。

把一片银元和一个铜钱夹放舌头的上、下面，再用导线把它们连接起来，舌头会感到有点麻木和酸味。

伏打认为实验中产生的“光亮”和“酸味”，都是因为电刺激了神经而产生的反应。上述实验里既没有青蛙腿，也没有动物的肌肉，这电又从何而来呢？电的来源只有一种可能：两种不同金属的接触。它才真正起到了莱顿瓶的作用，而蛙腿的抽搐仅仅是电刺激的一种表现，就像眼看见的光亮和舌尝到的酸味一个样。为了证实自己的设想，他用一种金属代替伽伐尼实验中的铜勺和铁杆，重复“蛙腿”实验。结果蛙腿的抽搐、收缩几乎完全消失了。于是伏打宣称伽伐尼实验中所发现的电流不应该称“动物电”，而应该叫“金属电”或“接触电”。伏打的观点得到了法国科学家库仑等电学专家的支持，却受到生理学家洪堡等人的反对。围绕着“动物电”和“接触电”的学术争论竟延续了几十年之久。

伏打坚信自己的观点，决心要用事实来说话。经过7年含辛茹苦的钻研，1794年他在“接触电”的研究上又取得新的突破。他提出了一种序列：铝、锌、锡、镉、铅、锑、铋、汞、铁、铜、银、金、铂、钯等。只要将序列前面的金属与后面的金属相互接触在一起，前者带正电，后者带负电。同时他还发现将不同的金属浸入电解液时，也会产生电流。

1800年6月26日在伦敦皇家学会的演讲大厅里，伏打介绍了由他发明的新仪器，这种新仪器由17枚银币和17块锌片组成。他把一枚银币与一块锌片叠放起来，片与片之间隔了一层浸透了盐水的马粪纸。34片小圆片叠起来也有几十厘米高。然后在顶、底两片金属片引出两根导线，令人惊异的是这些天天看到的银币和锌片叠放起来后，真的产生了电。当把两根引线的端点靠近时，也响起了噼啪声，迸发出火花来。伏打认为如果用30、40、50或更多的铜片和锌片，最好用银片来做实验，效果会更好。它产生的电击虽然在爆炸声和火花的强弱和放电的距离也许比莱顿瓶要略逊一筹，但它的优点却是莱顿瓶无法与之相比的。它不需要依靠外界的电来预先充电，只要我们一碰它，它就能产生电击，而且不管碰它的次数是多么频繁……从此伏打名扬四海，大家称这种新仪器为“伏打电堆”。欧洲的科学杂志上也开始长篇大论地介绍和报道这种“电堆”。不少学者也竞相试制这种新玩意儿。俄国科学院彼得罗夫院士，别出心裁，竟用4200片金属片叠起了这个“伏打电池”之最。

1801年10月伏打应法国科学院的邀请到巴黎进行演讲。这次在讲台上放的不是电堆，却是几只小碗，碗里盛了盐水，他在每只小碗里浸入一片铜片和一片锌片，然后再用导线把它们串联起来，他一边安装一边解释：“这种装置叫做‘杯冕’，比原来的电堆更好，因为金属竖起来放、不放电时，不会被腐蚀，寿命可以长得多。”在这次演讲中伏打受到了拿破仑的接见，并授予他一枚金质奖章。

伏打虽然在实验上取得了显赫的成果，但是他的“接触电”理论却是错误的。他认为只要两种金属接触就会产生电显然违背了能量守恒定律。伏打

电堆中产生的电流是因为电解液内部发生了化学反应，是由化学能转化成了电能。

伏打的发明和实验使人们对电的认识产生了一个飞跃，跳出了“静电”的领域。现在人们知道的不再只是摩擦引起的树脂电和玻璃电，以及雷雨时云层带的电，莱顿瓶里储藏的电，也不是动物电，而是一种能控制的流动的电。伏打电池就给人们提供了产生电的装置。不久，法国化学家盖·吕萨克改进了伏打电池：在一个大木槽里，每隔一定距离开出一条槽沟，把两种不同的金属片按间隔次序插入槽沟内，再在槽里注入硫酸溶液。著名化学家戴维用这种低效电池发现了十几种化学元素。大科学家法拉第用它发现了电解定律。而霍耳用它发明了电解法生产出铝。伏打电池在历史上的功绩还不小呢！

现在，我们在实验室里看到的是传统的铅酸蓄电池。它用铅和二氧化铅组成电偶，而电解质是硫酸。60年代英、美等国的科学家开始试制用液态钠（阳极）和液态硫（阴性）做电极，中间用固体物质（电解质）隔开，制成钠—硫酸电池，它的寿命要远远超过3000个充放电周期，每磅电池发电能力也比传统铅酸蓄电池高6.3倍，缺点是不够安全。80年代美国有多家公司研制用锂合金作阳极、硫化铁作阴极，以氯化锂和氯化钾混合液为电解液。在实验室里这种蓄电池可以连续发电5000小时。

在宇宙飞船上使用的是一种燃料电池。这种电池正、负极之间并不存在电解液、而是传递离子。这种离子是内部的燃料在燃烧的时候产生的。通常的燃料是氢与氧的混合物。只要给蓄电池供应充分的特种燃料和水，它就可以不断地工作而不需要充电。现在美国正在建造规模巨大的燃料电池堆，给市区供电。

欧姆与电阻

说起欧姆，读者都十分熟悉。中学课本里就有以他名字命名的电学定律，这个形式简洁的定律是电工学和一切电路计算的基本公式。欧姆为了它几乎耗尽了半生的心血。

欧姆生于德国巴伐利亚州，父亲是个技术熟练的锁匠，还爱好数学和哲学。父亲对他的技术启蒙，使欧姆养成了动手的好习惯，他心灵手巧，做什么都像样。物理是一门实验学科，如果只会动脑不会动手，那么就好像是用一条腿走路，走不快也走不远。欧姆有这一手好手艺，木工、车工、钳工样样都能来一手，这是他取得成功的一个重要条件。欧姆从小就有很高的志向，但他只能在科隆的一所中学里任教。繁重的教学使他仅能利用零星的业余时间从事研究。学校里图书资料匮乏，现成的仪器没有几件。然而，这些困难并没有使他气馁，反而磨炼了他的意志。

那个时候伏打电堆已经悄悄地走进了实验室，化学家用它来做电解实验，发现了不少的新元素。所以人们希望能确定电流的基本单元，使它定量；同时能发明一种测定电流强度的精密仪器。1820年，德国物理学家施韦格发明了一种检流计，由一个螺线管和中央小磁针组成，当电流流过螺线管的时候，产生的磁场使小磁针偏转。这样虽然可以知道回路里有无电流，但还不能确定电流强度的值。欧姆了解了这些情况，觉得改进检流计使之能定量测量电流强度，是一个切实可行的研究课题。于是他着手研究起来，开始他想利用电流的热效应会使导线热胀冷缩的事实来测电流，但这种效应过于微弱。还是施韦格的检流计启发了欧姆，电流的磁效应会使小磁针发生偏转。这是电流的一个十分显著的效应，可见度相当大，就是无法定量。能不能通过小磁针偏转角度与电路中电流强度的值一一对应起来，通过偏角的大小来知道相应的电流强度呢？他想去查资料，中学里没有，科隆市也没有。他果断地辞去了科隆的教职，只身来到柏林，寄居在弟弟家中，从此专心致志地做学问。欧姆在柏林市图书馆里很快地查到了有关用磁针偏角来测定电流的仪器资料——库仑扭秤原理。并按图索骥地做了一架扭力秤。但是效果不佳。因为用作实验的电源是伏打电堆。电堆很容易极化，给出的电动势不稳定。正当他束手无策的时候，能够提供稳定电压的温差电源问世了。当他原来的学生波根多夫把一架崭新的温差电源送到欧姆的寓所时，欧姆激动得热泪盈眶，连声说：“好，现在从理论上来说，已是万事俱备了。”然而，从理论上说通到实际上做成，两者之间还隔着千难万阻呢。他凭着自己一双灵巧的手，又经过了几个月的锉啊、敲啊、磨啊，硬是用手工制成了一个漂亮而精致的仪器。

经过一系列实验他得了—个经验公式 $X = \frac{a}{b + X}$ 。式中X表示导线的长度，X表示电流的电磁力(由小磁针的偏角读数可知)，a和b是依赖于激发力(如温差)及电路其余部分的长度。显然这个公式与今天我们学到的欧姆定律在外形上相差甚远。但是我们把它剖析一下，用现代的术语来解释：a表示电源的电动势，b+X表示电路中的总电阻，X表示电流强度，那么它就可以改写成读者所熟悉的全电路欧姆定律的形

$$\text{式} I = \frac{E}{r + R}。$$

1826年他把自已的研究成果发表在《金属导电定律的测定》论文中，论文鲜为人知。翌年他又出版了《动电电路的数学研究》一书，书中他巧妙地利用了类比的方法，把电在导体中传导与热在固体上传播这两种现象进行类比。

原来法国数学家傅立叶曾提出过一个热量传播公式 $dQ = ks \frac{dT}{dX} \cdot dt$ ，即传导的热量与截面积 S 、温度梯度 $\frac{dT}{dX}$ （即单位长度的温度降落）和时间 dt 成正比。欧姆认为传导的电量 dQ 应该与截面 S 、电势梯度 $\frac{du}{dX}$ （即单位长度的电势降落）和时间 dt 成正比，于是得到 $dQ = kS \frac{du}{dX} \cdot dt$ ，因为 $\frac{dQ}{dt} = I$ （电流强度），所以 $I = kS \frac{du}{dX}$ ，对均匀的长导线来说则有 $\frac{du}{dX} = \frac{u}{l}$ ，故原式可改写成一般形式 $I = k \frac{S}{l} u$ 。这就是部分电路欧姆定律。

欧姆满以为自已的研究成果一定会得到学术界的承认，可书的出版招来不少讽刺和诋毁。德国人鲍尔攻击他说：“以虔诚的眼光看待世界的人不要去读这本书，因为它纯然是不可置信的欺骗，它的唯一目的是要亵渎自然的尊严。”这一切使欧姆十分伤心，他在给朋友的信中写道：“伽伐尼电路的诞生已经给我带来了巨大的痛苦，我真抱怨它生不逢时，因为深居朝庭的人学识浅薄，他们不能理解它的母亲的真实感情。”

当然也有不少人为欧姆抱不平，发表欧姆论文的《化学和物理杂志》主编施韦格（即电流计发明者）写信给欧姆说：“请您相信，在乌云和尘埃后面的真理之光最终会透射出来，并含笑驱散它们。”

奥斯特与电磁效应

电现象与磁现象的相似性，很早就是人们谈论的题目。当库仑发现电力与磁力都是与距离平方成反比的力以后，寻找电与磁之间的联系便成为不少人研究的课题，但几十年过去了，都没有取得什么进展。为什么这天赐良机偏偏降落在丹麦物理学家奥斯特的身上，这是有他的主、客观原因的。从客观方面来说，电流，特别是电池的发现，不仅激发了人们研究电现象与化学现象、磁现象之间联系的兴趣，也为发现这种联系提供了可能性。电池问世后，德国物理学家、紫外线的发现者利特尔就大力提倡人们去探讨这种联系，并且亲自做了有关实验。1802年意大利的法律学家兼哲学家罗曼尼斯曾做过伏打电堆连结成的电路对磁针的影响的实验，并且看到了磁针的微小转动，但是他误认为这是电堆的两极对磁针的作用，没有想到是电流的作用，因为当时流传的看法是，电堆的两极与磁石的两极有类似性质。从主观方面来看，寻找电与磁的内在联系正是奥斯特从事科学研究的长远目标。1799年他对伽伐尼的发现有了浓厚的兴趣，第二年就掌握了酸溶液在电池中的重要作用。他最先提出了电池的两极的性质是不同的主张。1801~1803年到法国和德国各地进行学术交流与考察，大大扩展了他的科学视野。1812年发表的论文中，说明他对电力与化学力的认识是比较深刻的。利特尔是他的好友，他不仅与利特尔共同做了不少有关的实验，利特尔还向他介绍了不少德国的自然哲学家，这就更坚定了他的信念：自然界的各种力：光、电、磁和化学力都是相互关联的统一的。他就是在这种指导思想下去寻找电与磁的内在联系的。

1812年奥斯特作了这方面的探索，他从导线通电后发热的现象出发，进一步推测如果逐渐缩小导线的直径，将会出现光和磁的效果。结果，他只看到了光的效果而未获得磁的效果，失败说明此路是不通的。1819年冬，奥斯特在哥本哈根为一些科学工作者讲授电磁学方面的问题，当时他也正在研究电流对磁针是否有作用的课题，但一直没有什么成效。1820年有一天他突然想到以前的实验总是把电流的磁力想成是纵向力，是否这就是失败的原因呢？莫非电流对磁针的作用力是横向的不成？于是，在讲课后他立即把磁针与导线平行的放置在导线的下方，在接通电源的一瞬间，小磁针发生了神奇的一跳。从1807年开始经历了将近13个年头，终于发现了电流与磁针之间这种内在联系。奥斯特紧接着进行了为时3个月的实验研究，于1820年7月21日把他实验研究的成果以题为《关于电流对磁针的作用的实验》的论文发表出来。论文是用拉丁文写的，仅用了4页纸。法国的《化学与物理学年鉴》破例给予了全文发表。后来，在翻译成法文时，论文的题目改为《关于电冲撞对磁针作用的实验》，这也是后来通常采用的题目。

在这篇论文中，谈到了实验过程中的十种情况。其中(1)、(2)、(3)、(4)、(10)所叙述的情况是：

“(1)把导线的直线段，平行地放置在普通的可自由转动的磁针之上……接通伽伐尼装置的负极之后，磁针的N极转向西方，导线与磁针相距3/4英寸时，磁针转动的角度约为45°。如果增加两者的距离，转动的角度也随之减小……”

“(2)连接的导线，如果是由几根导线组成的导线束，或者是几片金属带，磁作用的效果更加明显。电流的磁作用效果与金属的性质没有多大关系。

我们实验时，用白金、金、银、黄铜、铁制成的导线，与锡和铅片、水银作导体，得到的结果基本相同……”

“（3）……在导线与磁针之间，放置玻璃板、金属板和木板，并不能消除电流的磁效应，甚至于把这三者合在一起，也看不出对电流的磁效应有明显的影响……”

“（4）把导线放在磁针的下方，和导线在磁针的上方的效果完全相同，只不过磁针的转动方向相反。也就是说接通电源负极时，磁针转向东方。为了记忆可以简单地说：导线在磁针的上方，磁针向西转动；导线在磁针的下方，磁针向东转动。”

“（10）与用磁针实验同样的方法，如果把黄铜针放在导线下方，看不到黄铜针受到什么作用，其它物质也是如此……这说明电冲撞只是对磁性物质起作用……”

最后，奥斯特在论文中指出：“我们把在导体周围所产生的这种效应称之为电冲撞……我们根据实验可以判定这种电冲撞是圆形的，否则就不可能发生这样情形：将闭合导线的一段放在磁针下面时，磁针（N极）被推转向东方；而放在上面时，就被推向西方。其原因是，只有圆才具有这种性质，其相反部分指向相反。”

奥斯特的发现具有重大的科学价值和历史意义，他不仅揭露出电与磁之间的内在联系，还发现一种新的自然力——旋转力。同时，为电的应用开辟了一个新的领域。

安培定律

奥斯特的电流磁效应的发现报告，很快被译成法文、英文和德文公开发表出来，并引起科学界的极大重视，纷纷转向这方面的讨论和研究，特别是当时的法国巴黎，成了研究中心。这个时候正在国外旅游的法国物理学家阿拉果立即从瑞士返回巴黎，并于7月11日向法国科学院报告了奥斯特这一伟大发现的详细情况。阿拉果的报告，引起了法国物理学家安培的联想：既然磁体和磁体之间有相互作用，电流对磁体也有作用，那么两个载流导体之间也一定存在着相互作用。安培的这种想法，如果从逻辑推理的角度来看，并没有什么合理性。但是，从自然界的对称性来考虑，还是很吸引人的。不妨把他的这种想法，写成下列的形式：



于是，安培把他的想法付诸实验。经过一周夜以继日的工作，终于在1820年9月18日找到了电流间相互作用的实验根据，并向法国科学院作了学术报告。紧接着于9月25日，10月9日、16日、30日，11月6日连续获得了很多重要实验结果。这些成果汇集在题为《电流对电流、地球对磁石的作用》这篇著名论文中。

这篇论文是由三个部分组成的：第一部分是关于电流间的相互作用；第二部分是关于地球磁场对电流方向的影响；第三部分则是关于通电导体对磁石的作用。

安培在论文第一部分中首先把电的作用分为两类：一类他称之为电的紧张力，另一类为电的流动力。他认为前一种力可发生在非导体之间；后一种力则产生在两个导体电路之间。他通过实验证明了两个通电导体之间这种相互作用的存在。

安培得出结论：两个通电导体的电流方向相同时，则相互吸引；两个通电导体的电流方向相反时，则相互排斥。同时，他还指出电流的这种行为，与异性电荷相互吸引、同性电荷相互排斥的行为恰恰相反，其原因是因为电的作用力的类型不同而引起的。

安培在论文第二部分中讨论了地球磁场对电流的作用问题。安培用实验来证明自己的理论，他用两个圆环形状的通电导体，一个是固定的，另一个可以自由转动。当给可以自由转动的圆环状导体通电后，它自动停止在某一个位置上：线圈的平面垂直于地磁的子午线。而当固定的环形导体再通电时，转动环形导体的平面，将转向与固定环形导体的平面平行的位置上。于是根据上述实验结果，安培指出：一个环形通电导体完全和一个磁石相似。由此，他在1821年1月前后，又进一步提出磁性起源的假说：整个磁石的磁性，是由许多这样小环形电流的磁性集合而成的。这就是历史上有名的分子电流假说。

论文第三部分，安培利用一个无定向磁秤，研究对折通电导体（或对折导体绕成螺旋线）的磁效应。结果发现这两种情况对无定向磁秤都不发生作用。于是，他得出结论：通电导体的磁作用具有矢量性质，因此它们的共

同作用才是零。

安培又对上述实验结果继续进行定量的研究，并于 1820 年 12 月 4 日向科学院提交了一篇论文，题目是：《电流引力与斥力的数学表示》。在这篇论文中，安培提出一个计算两个电流线元之间相互作用力的公式

$$\frac{K \cdot dX \cdot dz \sin \theta \cos \theta}{r^2}$$

式中 K 为比例常数，dX、dz 为电流线元， θ 、 θ' 和 ϕ 是相互间的夹角，r 为两个电流线元之间的距离。上述公式就是最早的安培定律的表示式。

安培所发现的电流间“力的定律”具有深刻的历史意义。电流元间相互作用力的平方反比的性质，反应出和电荷间相互作用力的一致性，使物理学向实现物理世界的统一图像跨进了一步。

安培出生在法国的里昂，少年时就非常喜欢学习数学和物理学。19 岁学习了拉普拉斯的《天体力学》和拉格朗日的《分析力学》，并从他父亲的朋友那里学习数学。1801 年在一个中学做教师，1802 年就写出了一本书，书名是《赌博中的数学理论的研究》。由此受到一些学者和专家的重视。1805 年开始在炮工学校就职，讲授数学与物理学。关于电流间相互作用的实验，就是在炮工学校的实验室中做的。1822 年发表了她的论文汇编《电动力学的观察汇编》；1827 年发表了《电动力学理论》一书。

安培是一位有成就的科学家，但也是一位“心不在焉”的学者，据说有一次在巴黎大街上，他在停放在街边的马车篷后演算一个数学题，后来马车走了他还跟在后面边走边做。这件事说明他在思考一个问题、解决一个算题时是多么专心致志。这也许正是他获得如此巨大成就的一个主要原因。的确，任何一项发明和创造，都凝聚着超人的心血和意志。

安培被麦克斯韦赞誉为“电学中的牛顿”。为了纪念安培对电磁学的贡献，1881 年在巴黎召开的电学国际会议上，决定以他的名字作为电流强度的单位。

法拉第与电磁旋转器

有一次英国化学家、物理学家沃拉斯通听到奥斯特的发现之后，到皇家学院找戴维，提出一个有趣的实验设想：如果把可以自由转动的磁棒，放在载流导线的一侧，磁棒将会产生旋转运动。这个想法得到戴维的赞同。但是，沃拉斯通做了几次这样的实验都失败了，他灰了心，放弃了这个尝试。那时沃拉斯通是很有威望的，当时在英国的学术界曾流传着这样一个说法：凡是与沃拉斯通争辩的人，将不会是正确的。因此，一般人认为沃拉斯通做不成的实验，别人也不会成功。然而，法拉第则认为沃拉斯通的设想是科学的，有实现的可能。于是，法拉第继续为实现沃拉斯通的想法进行了细致的大量的实验。他首先重复做了奥斯特的实验，将小磁针放在载流导体的周围，发现小磁针的磁极受到电流作用后，确实有环绕导线周围运动的倾向，这充分说明导线周围存在着一个圆形力。然后，他根据导线周围存在着的这种圆形力，设计了两种电磁旋转器。

这个装置在他的《电学的实验研究》中，曾有过这样的描述：“……这是为了使磁极围绕导线转动和使导线围绕磁极转动而制成的装置。此外还用一只沃拉斯通制造的包含 10 组极板的伽伐尼电池，它可以使导线和磁极获得足够的力量，产生快速的转动。这个装置有一个长宽约 3×6 英寸的水平台，台上装有 6 英寸高的铜支架，其中有导线接通，一端的导线是固定的，另一端装有可自由转动的导体。在固定导线这一方，有一个装有水银的玻璃杯，杯中装有可自由转动的磁极，杯底铜柱连接电源。在自由转动导体的那一方，也有一个稍浅的水银杯，中间固定一只磁极，杯底也有导线与水银连通着。”

法拉第指出，这个装置比较小，但比较灵敏，当接通电源时，导体与磁极将同时产生旋转运动。

法拉第的精彩电磁旋转器的实验文章，被刊登在 1821 年的《科学季刊》上。这第一次显露出法拉第高超的实验技巧与才能。电磁旋转器实验的成功，大大鼓舞了法拉第研究电磁学各种问题的信心。并使他联想起一个新的更加诱人的问题：既然电可以产生磁，为什么磁不可以产生电呢？于是，他在 1822 年的日记中写下了要进一步探索的课题：“由电产生磁，由磁产生电”。

电磁感应现象

法拉第选择了“磁产生电”的研究方向，除了他确信客观事物本身的结构应该是对称的以外，还有另外一个考虑，就是他认为伏打电池造价昂贵且电力不足，能否制造一个新式的产生电的装置呢？这就是他坚持十年的实验研究的出发点。

法拉第的研究工作是在奥斯特、安培等人的工作基础之上进行的。最初，他试图从一根临近通电导体或一块静止的磁铁的导线中获得电流，结果却接连遭到了失败。然而，法拉第并没有被失败所吓倒。失败、试验，再失败、再试验，终于于1831年8月29日获得首次成功。

法拉第发现电磁感应现象也还具有偶然性，因为当时他的实验目的，还是想要从一根通电导线的磁场作用下，使另一根导线中产生电流。但他为了加强电流的作用，把两根直导线绕成螺旋线；为了加强电流的磁场作用，让两根螺旋导线，绕在一个铁环上。在实验过程中，他偶然发现每当通电线圈的电源接通或断开时，另一个线圈中才会产生瞬间电流，而且发现一旦通电线圈中的电流达到稳定之后，另一线圈中的电流就消失了。法拉第在他的29日的日记中对这个实验现象有详细的记载：“用7/8英寸的圆软铁棒，制成一个外径为6英寸的圆环。在圆环的一边（B边），用三段纱包铜线（每段24英寸长）缠绕在圆环上，每绕一段后用白布包裹好。使用时，这三段铜线还可以连成一段，最后要检查各段铜线之间是否绝缘好。我们将铁环的左边称为A边，在铁环的A边，用两段总长为60英寸的铜线，绕上与B边完全相同的线圈，两线圈之间留有空隙。”接着他又写到：“用一根长导线把B边线圈的两端连接起来，并把直导线的一段架置于离线圈3英尺远处的一个磁针的正上方。当将电池与A边线圈接通时，小磁针立即产生明显摆动，最后又稳定在原来的位置上。当切断A边与电池的连接时，小磁针再一次出现暂时性的扰动。”同时，法拉第通过实验又进一步发现感生电流的方向在接通和切断电源这两种情况下是不一样的。他写道：“当接通电池时，小磁针的转动方向，好像B边线圈是A边线圈的一部分，即两者中的电流具有相同的方向；然而当切断与电池的连接时，从小磁针的转动方向来看，好像那瞬间A与B两线圈中的电流方向相反。”

法拉第并未满足已发现的现象，他又进一步提出新的实验要求：

- （1）铁环是产生感应所必须的吗？
 - （2）线圈A是必须的吗？
 - （3）用什么样的方法，能够产生持续的电流，使它能产生电池的效果？
- 于是，他又进一步通过实验来寻求这些问题的答案。

第一个问题，他是这样回答的：“把长为203码（约186米）用纱布包起来的铜导线绕在很宽的木棒上，再在原绕线圈外层绕上同样长度的纱包铜线，将一个绕组和电流计连接，另一个绕组和100对金属板组成的电池组连接。发现当电键K接通和切断的瞬间，电流计指针摆动起来。”在回答第二个问题时，法拉第用两个条形磁铁代替了通电线圈，结果同样看到了感应效应。他写道：“用普通的磁铁也产生了同样的效果……把线圈的两端用5英尺长的两条铜线与检流计连接，并把软铁棒插入线圈中。取两条长24英寸的磁铁，并把它们按异性磁极并在一起。然后，把一端分开（如马蹄形磁铁），让带线圈的软铁棒夹在其间。”接着他做了这样的实验：“当软铁棒与磁极

接触时，指针立即发生摆动，然而继续接触时，指针仍回到原来的位置。当脱离接触时，指针又一次发生摆动，但指针的摆动方向与前次相反。如果调换磁铁两极时，指针摆动方向与前次相反。”为了回答第三个问题，法拉第“用厚纸制成一个圆筒，筒外缠绕 8 段总长为 220 英尺长的铜线。把线圈的两端与检流计连接。再取直径 3/4 英寸、长 8.5 英寸的棒磁铁……插入线圈时，检流计的指针向某一方向摆动……再拔出时，指针则向前次摆动的相反方向摆动……如果磁铁插入又拔出时，指针向一方摆动后停止，然后再向相反方向摆动。”

最后，法拉第在 1831 年 11 月 24 日写了一篇论文，向英国皇家学会报告了实验结果，并把产生感应现象的条件概括如下：（1）变化的电流；（2）变化的磁场；（3）运动的稳恒电流；（4）运动的磁铁；（5）在磁场中运动的导体。并把上述现象称为“电磁感应”。

法拉第在上述产生感生电流的 5 种方式的基础上，进一步找到了引起感生现象发生的一个基本条件，就是二次电路——B 线圈中磁力线数量的变化。这个结论，被称为法拉第电磁感应定律。这个定律的数学表现形式，是由麦克斯韦完成的。

电磁感应现象的发现是具有划时代的意义的，他把电与磁长期分立的两种现象最后联结在一起，揭露出电与磁的本质的联系，找到了机械能与电能之间的转化方法。在实践上，开创了电气化时代的新纪元；在理论上，为建立电磁场的理论体系打下了基础。

自感现象

约瑟夫·亨利是美国物理学家。他出生在纽约的奥尔巴尼。虽然他的志趣在于从事剧本的创作，但由于环境所迫他不得不到钟表修理店当学徒，也许这就是他改变了原来志向的一个原因。后来，一个偶然的机会有幸他读到了一本《实验哲学讲义》，使他对自然科学发生了兴趣。于是，他进了奥尔巴尼学院学习，1826年成了这个学院的数学教授，1832年他受聘于普林斯顿学院做自然哲学教授，在1846年担任新成立的华盛顿斯密森学院的院长。他是继富兰克林之后，美国第一个从事电磁学研究并获得重要成就的人，他的科学研究与富兰克林一样是在繁忙的社会工作中进行的。他的科学研究是从改进别人已经发明的电磁铁开始的。

《电学杂志》月刊的创刊人斯特金制造了一个电磁铁能提起9磅重的物体，这个重量是它本身重量的20倍。他把软铁弯成马蹄形，在铁上涂以清漆，在它的上面绕了18圈的铜线，电源是内阻较小的铜锌电池。当亨利得知电磁铁的发现之后，很感兴趣，并且作了重大的改进。他用包上丝绸的铜线代替涂漆的铜线，这样他可以在铁芯上绕400圈铜线。于是，这块电磁铁就可以提起几百磅的重物，1829年3月他展出了这块新产品并做了表演。

就在他反复实验如何提高电磁铁的吸引力的过程中，在他不断增加导线圈数，不断变化各种条件的几十次、几百次的电磁铁实验中，突然发现意想不到的现象：当切断电源的一瞬间产生了一个电火花。这个电火花很具有引诱力，他立刻改变了研究方向，探讨电火花产生的条件和原因。并在1832年发表了关于这个问题的论文，题目是《在长螺旋线中的电自感》。他认为，电火花说明在切断电源时，产生一个比原电流大许多倍的感应电流。他把这种现象称为电的自感。

此外，1832年亨利在《美国科学杂志》上，发表了一篇关于电磁感应现象的文章。1842年他提出莱顿瓶的放电并不是简单的恢复平衡，而是一种复杂的过程。他是继富兰克林之后的美国电磁学的大师。国际电学会议决定以他的名字作为电感系数的单位。

1834年法拉第在不知道亨利发现的情况下，独立的发现了自感现象，并把这个现象详细记载在《电学实验研究》一书中：“詹金先生曾向我讲到这样一个现象，通常用导线连接两个极板时，无论实验者怎样做，都不会有触电的感觉，但是，如果是连接电磁铁的导线时，就会有比较明显的电击感觉。”他又写道：“此外，还有一个明显的现象，就像大家很早以前已经看到的一样，在切断电磁铁电源时，发生明亮的火花。”

法拉第在做了各式各样的实验之后，认为，这种火花是电磁铁电路中，感应出二次电流的结果，开始他把这二次电流叫做：“额外电流”，并且他认识到它是一种电流对它自身的感应，而且在断路时和原电流同方向并加强原电流；当接通电路时它向相反方面流出，并减弱了原电流，当时这种“额外电流”的理论受到强烈的反对，但最后还是被其他研究者所证实。

英国物理学家丁铎尔曾对法拉第的工作有过高度的评价，他曾指出：关于电磁感应的发现是迄今所获得的最伟大的实验成果。这是法拉第研究的新的高峰。

亨利和法拉第的科学实践说明，任何一项新的重大发现，都离不开原来的工作基础。许多新的发现，常常是在多次重复前人的实验中诞生的。这种

科学研究中的继承和创新的关系，反映了客观物理现象之间的内部联系。如果要不是电磁铁的出现，也就很难这样快地发现自感现象。

楞茨定律

德国物理学家楞茨出生于前苏联的杰浦特城的一个市法院书记家庭中。由于早年丧父生活贫困，因此很不容易才能受到中学教育。后来虽然于1820年考入杰浦特大学的自然科学系，但由于他家庭负担过重，不得不转入神学院学习，尽管如此，他仍继续钻研物理学。大学三年级他应邀参加了环球考察，3年的航海生涯和考察工作，使他增长了学识、开阔了眼界。1826年楞茨航海归来之后，一方面在一所中学里教物理，另一方面整理考察报告。1828年在彼得堡科学院作了关于考察结果的报告，引起了与会者的重视，可以说这是他第一次显露出科学研究的才华。1835年他应邀主持了彼得堡大学的物理学讲座，不久又当选为物理数学系的主任。

楞茨在1832年获悉法拉第发现电磁感应现象之后，立即开始了他的实验研究。开始他重复了奥斯特、安培和法拉第等人做过的一系列实验，并且又进行了一些新的探索，得到了一个新的定律。1833年11月29日楞茨在他向科学院作的《关于动电感应引起的伽伐尼电流的方向的确定》报告中写道：“我在阅读法拉第的论文时，曾产生了这样一种想法：一切动电感应实验都可以很容易纳入动电运动定律，如果后者已知，则前者即可决定，因为一系列实验（其中包括众所周知的许多实验和我为了证实自己的想法而特别进行的实验）证明了我的想法是正确的……”

楞茨在他的文章中，对法拉第的电磁感应定律与安培的电流间相互作用定律作了对比，从中找到了确定感生电流方向的规律。他对比两个定律的上述结论后指出，根据安培定律，同向通电导体受力使它们相互靠近；而根据法拉第定律，相互靠近的两导体所产生的感生电流的方向，则与原载流导体的电流方向相反。对比两个可动的导体，感生电流的方向，正是两通电导体的远离方向，这说明感生电流的方向是不让可动导体向固定导体靠近的方向，也就是阻碍导体靠近的方向。于是他认为“金属导体在电流或磁铁附近运动，那么导体中激起的伽伐尼电流的方向，使处于静止状态的导体朝相反的方向移动；当然这是假定这种移动只能沿着运动的方向或与运动恰恰相反的方向进行的话”。在这里，楞茨把安培发现的电流对磁铁（或电流）的相互作用定律和法拉第发现的电磁感应定律合并成一个定律。这个定律在现代可简捷表述为：感生电动势所产生的感生电流和机械力的方向，是阻碍产生感生电动势的导线的运动或磁通量的改变。同年，楞茨在其另一篇论文《关于伽伐尼电流的几个实验》中，从理论上给出了电与磁相互转换的可逆性原理，他写道：“每一电磁实验，都可以转换成相应的磁电实验。为此只要把电磁实验中所发生的运动，以其他某种方式传给伽伐尼电流的导体，这时导体内就会产生电流，其方向和电磁实验中所用的电流方向相反。”

楞茨定律的提出，在理论上对普遍的能量守恒和转化定律的诞生，起了催生的作用。因为楞茨定律实际上是能量守恒和转化定律的一种特殊情况，是机械能与电能的转换关系的具体表现。而在实际应用方面，这个定律又是电工学的基础。由它可以引出电磁惯性原理，这一原理对解决一系列理论电工问题有很大的意义；由楞茨定律还可以直接引出发电机与电动机的可逆性原理，它是实用电工学的基础。

此外，楞茨在发电机、金属导电性以及电流热效率等研究上，都获得了重要成果，他为经典电磁学的建立作出了自己的贡献。

电解定律

英国的化学家尼科尔森和医生卡莱尔从皇家学会那里得知伏打发现电堆之后，共同进行了这方面的实验。他们的电堆是用 17 枚银币和同样大小的铜片组成的，中间夹着被盐水浸湿的布片。在实验过程中卡莱尔最先发现当金属导线与水接触时，从水中发出一种气体，后来尼科尔森判定是氢气。于是，他们又进一步对这种现象作实验观察，取玻璃管并在其中装满了水，用软木塞盖严，插入白金丝后接通电源，发现从两根白金丝处分别有气泡出现。他们认为阴极产生的是氢气，阳极产生的是氧气。这个实验是 1800 年 5 月 2 日做的，因此这一天可以看做是水的电解的发现日。1800 年 9 月德国物理学家利特尔报告他成功地分别收集到水的电解所产生的两种气体，同时还发现可以从硫酸盐中沉淀出铜，把电解的实验又向前推进了一步。

当时，对电解现象进行比较深入的研究的是英国著名化学家戴维。最初他是气体研究所的研究员，后来成为大学的教授，他的研究方向是电化学。他的学术报告是很出色的，因此受到学术界的欢迎。他是最早重视伏打的各种发现的科学家，1801 年在他的学术讲座中，就介绍了各种电堆的性能和方法，以及伽伐尼电流的发展过程。同年 6 月曾向皇家学会提交了一篇很有水平的论文《伏打装置的制作与对伽伐尼电的解释》。在这篇论文中，不仅介绍了利用两种金属和一种液体能产生伽伐尼电流的结构，还介绍了用一种金属两种液体来产生电流的方法。

1806 年 11 月 20 日，戴维在皇家学会作了著名的学术报告，他写道：“我在 1800、1801 和 1802 年的各种实验中，以及其他许多新的事实，发现可燃性物质和氧、碱和酸、氧化金属之间都存在着正电和负电的关系。因此，我得出这样的结论：化合与分解现象，取决于电的引力与斥力的作用规律。”戴维的这篇论文，为电化学的建立提供了理论基础。

1807 年 11 月 19 日戴维又作了一次学术报告，题目是《由于电的作用而产生的新的化学变化》。其中他根据分离钾和钠的实验事实，对氧和金属作用生成化合物的过程给予科学的解释。此外，他利用电的作用成功地分离出钙、锂、铯、钡和镁等。这些发现，写下了科学史中的光辉一页。当时实验时所使用的电源是由 500 对两种金属构成的电池。

法拉第在研究伏打电堆的装置时，也发现了电解现象，他在 1811 年给爱伯特的信中写道：“我最近做了几个简单的电学实验，不过是为了借以说明最基本的科学道理……我把弄到的锌切成圆片，用它们和铜片作成一个小电池，中间隔了 7 层（确切地说应是 6 层）被食盐水浸过的纸板。请你不要见笑，亲爱的爱伯特，你一定会对这些简单的机构产生的效果大吃一惊的。它足以使硫酸镁分解，这个结果也使我极为惊奇。因为我没有也不可能想到它竟能产生如此功效。由此使我突然产生一个想法：是否可以用铜线使电堆两端和硫酸镁溶液之间接通。结果，你能相信吗？就是铜把我放在溶液中的一块块硫酸盐分解了。我认为这里发生的是一种伽伐尼效应，因为两根导线上很快就布满了某种气体的气泡，而且有一连串像微粒似的小气泡从溶液中析出。我说硫酸镁被分解是有根据的，大约两小时后，清澈的溶液变得混浊了，因为有镁悬浮在溶液之中。”

法拉第发现了电解现象之后，又连续几年进行了定量方面的研究，作了大量电解实验。

第一个研究成果告诉我们,电解生成物的质量,取决于总电量的多少(即生成物的质量与总电量成正比),而与电源的强弱、电极的大小以及导体的性质等状况无关。法拉第指出:“根据电解生成物与电量的这种关系,完全可以制成一个非常优良的有应用价值的电量测定器。”

第二个研究成果告诉我们,一定量的电量所析出的生成物的质量与这物质的化学当量成正比。法拉第并给出电化当量的定义:即单位电流所析出生成物的质量叫做该物质的电化当量。例如1安培的电流通过酸溶液1秒钟之后,即有 1.044×10^{-5} 克的氢被析出,如用银盐溶液则有0.00118克银分离出来。这样分离出来的银的重量很容易进行精确地称量,因此后来竟把它作为电流的实用单位——安培来定义。

上述这两个结论被称为法拉第电解定律。电的化学效应的发现以及法拉第电解定律的提出,不仅为电化学的进一步研究创造了条件,也为建立普遍的能量守恒与转化定律提供了一个方面的依据。

焦耳定律与基尔霍夫定律

伏打电堆在相当长的时间里是产生电流的唯一手段，但是它有一个缺点，就是由于极化作用，它的电流迅速减小，不能保持稳定。于是，英国化学家丹聂尔经过数年的努力，终于发明了一种新式电池，这个电池被后人称为丹聂尔电池。丹聂尔在科学研究道路上，所以取得显著的成就，是与他得到法拉第的帮助分不开的。他在给法拉第的信中，除了谈到新电池的具体设想外，还深表了他的谢意。1836年丹聂尔所设计的电池，是由一个玻璃圆筒和一个动物膜——公牛的气管，把浓硫酸铜和稀硫酸隔开的。不久以后，加西奥特建议用多孔的陶土杯（也就是素烧杯）代替了动物膜。

1839年英国法学家格罗夫交给英国协会一篇题为《论具有很大大能量的小伏打电池》的论文，并发明了一种新电池，它的结构与丹聂尔电池基本相同，只是把素烧筒内外的溶液改换为稀硫酸与浓硝酸，稀硫酸溶液中的电极为涂以水银的锌棒，而浓硝酸中的电极则是白金的。后来，本生把白金极换成价格便宜的碳棒。电池的改进，使输出的电流更加稳定，从而也使电流的各种效应更加明显。

1847年英国物理学家焦耳在已知电流通过金属导线产生热效应的基础上，进行了大量的定量实验，发现通电导体单位时间所产生的热量与电流的自感、导线的电阻成正比。人们把这个定律称为焦耳定律，电流所产生的热称为焦耳热。这个定律揭露出电能与热能之间的转换关系。焦耳在1843年英国皇家协会上宣读的论文中，给出了电功与热的当量值是一个法国大卡，相当于460千克重米。电流热效应的发现和对其规律的掌握，又开辟了一个新的研究领域。焦耳定律建立之后，于1847年焦耳发现了磁致伸缩现象。

德国物理学家基尔霍夫从1845到1848年间，发表了几篇关于稳恒电流电路中某些问题的研究文章，并提出了解决复杂电路的两条规则。第一条规则是说：几条电路相交于一点时，流入该点的电流的总和等于流出该点的电流总和。第二条规则是说：对任意一个闭合回路，在确定了电流流向的正与负之后，闭合回路电阻与电流相乘积的代数和，等于回路中电动势的代数和。根据基尔霍夫的这两个规则，可以解决比较复杂的电路问题。

法拉第与磁力线

法拉第新观念的产生，基于大量的科学实验。前面曾讲到法拉第发现了电磁感应现象，但如何解释这种现象呢？法拉第引进了“具有张力的电”这样一个新概念。他在《电学实验的研究》一书中写道：“具有张力的电使它的邻近处于相反带电状态，这种能力我们已经用普通术语感应一词来表示了。由于感应一词已经纳入科学术语之中，因此我们也就恰当地在同样普遍意义下用感应一词来表示电流所具有那种能力，即能使它邻近本来在平常状态的物质感应至某种特殊状态的能力。”“更进一步说：不管采用安培的漂亮理论或其它什么理论，也不管思想上作些什么保留，都会感到下述论点十分特别，即每一电流总伴有一个与它的方向成直角的磁作用力；然而电的良导体，当放在该作用范围内时，却应该没有任何感生电流流过它，也不产生在作用力方面与此相当的某些可觉察的效应。”“对这些问题及其后果的考虑，再加上想从普通的磁中获得电的希望，时时激励着我从实验上去探求电流的感应效应。最近，我得到了肯定的结果，这不仅满足了我的期望，而且使我得到了全面解释阿拉果现象的关键，并且还发现了一种新情况，这在电流的某些最重要的效应中可能有巨大的影响。”

阿拉果是法国天文学家和物理学家，当他听到奥斯特的新发现后，大约做了两周左右的大量实验，除了验证奥斯的实验结果无误外，还发现了新的现象，这就是铁的磁化现象。在他给科学院的报告《关于在伏打电流的作用下，铁与钢的磁化实验》中，作了如下描述。用一个螺旋线圈，在其中放置了铁（或钢）针，当线圈与伏打电池接通之后，使铁（钢）针具有了磁性，后来，又发现通电线圈具有吸引铁屑的能力，并且还发现铁屑在线圈周围呈圆形排列。1824年阿拉果发现了更加难于理解的实验现象：悬挂着的磁体（它可以自由转动）在它的下方平行放置一个可自由转动的铜圆盘。如果两者的距离足够近，当磁体转动时将引起铜盘的转动；而铜盘转动时，又会使磁体转动。对于刚刚发现电流的磁效应的科学界来说，是无法解释这些奇特现象的。

法拉第发现电磁感应现象之后，在试图对阿拉果的神秘实验予以科学的解释过程中，产生了磁力线的观念。《电学实验的研究》的116条目中，法拉第第一次绘制了表示磁力线的图形。其中有一个条形磁铁和一个银质小刀。并解释了小刀做切割磁力线运动时，小刀本身将产生什么样方向的感生电流，同时对磁力线的画法作了注解：“磁力线就是磁力的线，它的形状与磁铁放置的位置方式无关。它表示放在玻璃板上的铁屑或者小磁针所描绘的线。”他在后来的许多论文中，对磁力线作了详尽的论述。

首先，他认为磁力线并不是一些假想的几何线，而是代表着实实在在的物理实体。他指出铁屑所描绘出来的力线，只是力线存在的检验，没有铁屑空间也存在着这种力的作用线。他写道：“我不得不深信磁力线概念的真实性，因为它是以实验为基础建立起来的，而不是纯粹假设性的。”

其次，他认为每根磁力线都对应一对磁极或电荷。许多磁力线可组成力管，力管的横截面代表那个区域力的强弱。力管的收缩和扩张的趋势，是引起磁极或电荷相互吸引或排斥的原因，而且力线在几何上随距离平方稀疏起来，这说明电力或磁力遵从平方反比定律。

接着他又把布满力线的空间称之为“场”，力线疏密则是表示场的强弱。

这样就赋予空间以物理实在性质，而不是虚空。当然，力线概念本身并没有彻底摆脱力学的观念，这并不奇怪，这是科学发展的继承性遗留给新概念中的旧痕。1851年他在《论磁力线》论文中指出：“无论导线是垂直地还是倾斜地切过磁力线，也无论它是沿着某一方向或沿着另一方向，这根导线都能把它所切割过的力线中的力汇集在一起”，因此“形成电流的力应该正比于切割磁力线的数量”。

1837年法拉第又根据另一个实验结果，即由于力线在介质中的稠密程度与真空中不同而提出了近距作用的概念。当他在金属电容器中插入电介质后，电容器的电量与没有电介质时不同，并得出如下结论：两金属板上的电荷的相互作用不是超距的，而是通过介质逐点传递的，是一种近距作用。

法拉第还认为以太中的场和绝缘物质中的场并没有固有的差别，对于以太，其介电常数 $\epsilon = 1$ ，而对于其它绝缘物质的介电常数 $\epsilon > 1$ 。

约·汤姆逊曾对法拉第的力线观念有过这样的评价：在法拉第的许多贡献之中，最伟大的一个贡献就是力线概念。他认为借助于力线可以最简单地把电场和磁场的许多性质表示出来。确实如此，法拉第把电磁相互作用的空间“实体化”，对电磁场理论的建立，起了桥梁作用。

麦克斯韦的功绩

法拉第发现了电磁感应定律，提出了“力线”和“场”的概念，为电磁场理论的建立奠定了基础。但是他的发现和创见始终未能精确地表述出来，他的理论基本上是定性的。在他的研究电学的总结性的著作《电学实验的研究》中，没有一个数学公式。麦克斯韦信服法拉第的思想，并确定自己的研究工作是要把法拉第的实验结论赋予严密的数学形式。

麦克斯韦是在法拉第发现电磁感应现象那年出生的，比法拉第晚 40 年，他是一位优秀的数学家。当他在中学时代就对数学、物理和诗歌产生了浓厚的兴趣，天赋加勤奋，使他的数学才华出众，未满 15 岁就写了一篇数学论文发表在《爱丁堡皇家学会学报》上。1847 年，16 岁的麦克斯韦考进爱丁堡大学攻读数学物理。1850 年转入剑桥大学专攻数学。不久，便被著名数学家霍普金斯发现，成为霍普金斯的研究生。麦克斯韦在霍普金斯和斯托克斯两位优秀数学家指导下进步很快，不到 3 年时间就掌握了当时所有先进的数学方法。1854 年以优异的成绩通过了数学学位考试。

麦克斯韦在两位导师的影响下，非常重视数学理论和物理实验的结合。他批评二者相脱离的现象“把数学分析和实验研究联合使用所得到的物理科学知识，比之一个单纯实验人员或者单纯的数学家能具有的数学知识更加坚实、有益而巩固”。“可能有一些数学家从事他的研究，完全是为了他自己的目的；可是大多数人想到，数学的主要用途在于解释自然界。现在一个人研究一些数学，为的是要理解他所看见的某些自然现象，或者为的是去计算他要进行的某些实验的最佳装置。”数学是麦克斯韦手中的工具，他既充分利用工具，又紧紧抓住问题的物理本质，用数学去解释物理现象，去表述物理思想，去总结概括物理规律，扎实的数学根基和把数学思维与物理实验密切结合的科学方法是麦克斯韦成功的关键。

麦克斯韦毕业后留校工作，不久，就读到法拉第的《电学实验的研究》，使他产生了极大的兴趣。当时，由于牛顿力学的“超距作用”的传统观念统治极深，加上法拉第未能用数学精确地表述关于力线的物理意义，一般理论物理学家都不承认法拉第的观点，在学术界争议很大。年轻的麦克斯韦认真研究了法拉第著作，悟出了力线思想的宝贵价值，他决定用数学来弥补法拉第在表述上的不足。麦克斯韦对电磁的研究就这样开始了。

1855 年，麦克斯韦发表了电磁学的第一篇论文《论法拉第的力线》。在这篇论文中，他企图“把一个空间画力线的清楚概念摆在一个几何学家面前，并利用一个流体的流线概念，说明如何画出这些力线来”。可见，他采用了几何观点，得到一个物理现象的几何图像。麦克斯韦以类比的方法，用流体的稳定流速场比拟静电场，正负电荷相当于流体的源和沟，电力线比作流管，电场强度比作流速。因此力线的切线方向就是电力方向，力线的密度表示电场力的大小。他企图在这“几何图形”的基础上推导出在发生电磁感应时的磁场、电流和电动势之间的数量关系。这篇论文基本上是对法拉第力线思想的数学“翻译”。几何观点承认空间介质中的媒质传递作用，但不能解释物理本质。

1860 年秋，法拉第热情地接待了来访的麦克斯韦，并鼓励这位年轻的物理学家。在先行者的启示下，麦克斯韦选定了“场”这个主攻方向，向着科学高峰攀登了。

1861年，麦克斯韦对变化的磁场激发电场作了深入的分析，他意识到即使不存在导体回路，也会激发电场。麦克斯韦把这种场叫做感应电场。这种场中电力线具有涡旋形状，所以又叫做涡旋电场。这是他为统一电磁理论提出的第一个假设。

麦克斯韦分析了库仑定律、毕奥—萨伐尔定律、安培定律和法拉第电磁感应定律，在他用数学表达式描述这些定律时，发现各方程之间不能自洽，这是因为前3个定律是描写静电场和稳恒电流磁场的，要把它们推广，必须加以改造。1861年12月麦克斯韦在给威·汤姆逊的信中，提出了“位移电流”概念。

1862年，麦克斯韦在英国《哲学杂志》上发表了第二篇论文《论物理的力线》。在这篇文章中设计了一个理论模型，是关于力线的机械模型即以太模型，利用这个模型描绘了位移电流概念的物理图像。他写道：“作用在电介质上的电动力，使它的组成产生一种极化状态，有如磁铁的颗粒在磁体的影响下的极性分布一样。在一个受到感应的电介质中，我们可以想象，每个分子的电都是这样移动的，使得一边为正，另一边为负，但是电依然和分子联系在一起，而不是从一个分子跑到另一个分子上去。这种作用对于整个电介质的影响是引起电在一定方向上的一个总位移，这一位移并不构成一个电流。因为当它取得某一定值时，就保持不变了。但是，它是一个电流的起源，并且它的变化形成正方向或负方向的电流，视位移增大或减小而定。”他就这样解释了位移电流概念。后来又把它推广到没有物质的空间，因为麦克斯韦以为空间充满了以太，以太同其他电介质一样，其中也会产生位移电流。他认为位移电流和传导电流是等效的，可以按同一规律产生磁场。

真空中位移电流的引入，是麦克斯韦的一个创见，也是他的电磁理论的一个关键性问题。它揭示了不仅变化的磁场产生电场，而且变化的电场也能激发磁场，二者相互联系，相互激发，形成电磁场中一个问题的两个方面。由此出发，麦克斯韦导出了两个微分方程，由此方程预见电磁波的存在。他指出，既然交变的电场会产生交变的磁场，而交变的磁场又会产生交变的电场，这种交变的电磁场就会以波的形式向空间散布开去，这就形成了电磁波。

1865年，麦克斯韦在《伦敦皇家学会学报》上发表了第三篇论文《电磁场的动力学》，这篇论文是对电磁理论的一个总结。他把自己提出的理论叫做“电磁场理论”。他写道：“我提出的这个学说可以叫做电磁场的学说，因为它关系到带电体或磁体周围的空间。另外，这个学说也可以称为电磁的动力理论，因为它假定在此空间中有物质在运动，由此会产生可观察到的电磁现象。”

麦克斯韦为了对电磁场进行定量计算，于是把得出的结果，表示成电磁场的一般方程。这样的方程共有20个之多，其中包含了至今认为不是电磁场的方程，如全电流的定义、欧姆定律、电荷的连续性原理等，后来归纳为5个方程。麦克斯韦还采用了拉格朗日和哈密顿创立的数学方法，从诸方程中直接导出了电场和磁场的波动方向，证明电磁波是一种横波。并求得电磁波在真空或空气中传播速度等于电量的电磁单位与静电单位之比，等于介电系数和导磁系数的几何平均的倒数，又正好等于光速，这绝非偶然巧合，恰是光与电磁统一性的反映。麦克斯韦由此得出结论：“这一速度与光速如此接近，看来我们有充分理由断定，光本身乃是以波的形式在电磁场中按电磁规

律传播的一种电磁振动。”他断定光就是一种电磁波，这就是麦克斯韦创立的光的电磁学说。同时，他把光的特征参数和电磁学的特性参数联系起来，得出 $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ （ ϵ 为介电系数； μ 为导磁系数）。

麦克斯韦在 1865 年正式公布光的电磁说后不久，为了集中精力撰写电磁专著，辞去了皇家学院的教席。1873 年发表了《电磁学通论》，这是一部电磁理论的经典著作。在这篇巨著中，系统地总结了前人对电磁研究的成果，创造性地建立了电磁场理论的完整体系。他舍弃了多余的以太模型，经过高度概括，把库仑定律、高斯定律、毕奥—萨伐尔定律、法拉第电磁感应定律等以及位移电流理论都综合在一个方程组中，这组方程叫做麦克斯韦方程组。这组方程是已有各种电磁实验定律的总结，如前两个方程是库仑定律、高斯定理和法拉第电磁感应定律的概括形式；后两个方程是磁场中的高斯定理、毕奥—萨伐尔定律、安培环路定理和位移电流定律的概括形式。

麦克斯韦方程在电磁学中的地位和牛顿运动定律在经典力学中的地位以及薛定谔方程在量子力学中的地位相当，它是全部电磁学的核心。宏观的电磁现象一般都可以从这些方程中得到解释。1894 年英国物理学家坡印廷给出电磁场的能流表达式。1898 年荷兰物理学家洛仑兹提出了电子论和电子在电磁场中受力的公式。这些仅是对电磁场理论的补充，而不是对基本理论的修正。

麦克斯韦的电磁理论是建立在可靠的实验定律基础上的，尽管他的理论是完善的，但在当时并未得到承认。德国物理学家劳厄在《物理学史》中评论道：“尽管麦克斯韦理论具有内在的完美性并和一切经验相符合，但它只能逐渐地被物理学家们接受。它的思想太平常了，甚至像亥姆霍兹和玻耳兹曼这样著名的有异常才能的物理学家为了理解它也花了几年的力气。”这是因为几个数学符号和令人费解的几个方程就能概括各种电磁现象的规律，实在令人怀疑。麦克斯韦理论来源于实践，还需回到实践中再受检验。其中，一个关键性问题就是麦克斯韦预言的电磁波是否存在。麦克斯韦本人是位理论物理学家，他预言电磁波的存在，但没有通过实验去证明它的存在。

《电磁学通论》问世后，麦克斯韦回到剑桥任教，他在讲台上热心地宣传电磁理论，推广新学说。从这时起他还担负着筹建卡文迪许实验室，整理卡氏遗著的任务。实验室于 1874 年建成，麦克斯韦为第一任主任，后来接替他的有约瑟夫·汤姆逊、卢瑟福等一流物理学家。这个实验室至今仍是世界科研中心之一，培养造就了一大批优秀的物理学家，尤其是原子物理方面的人才。

1875 年贝尔发明了电话，1877 年爱迪生发明“炭阻”送话器，这些人类电讯史上的发明，激起了麦克斯韦的极大兴趣，同时，他坚信自己的理论预言的电磁波会使这些发明插上双翅传遍全球。

1879 年是麦克斯韦生命的最后一年，他的健康日趋恶化，但仍坚持工作，向他的学生、后来发明电子管的弗莱明和另一位来自美国的研究生讲解自己的理论。他于 1879 年 11 月 5 日因病不治逝世，终年 49 岁。这位杰出的科学家正当壮年不幸去世，非常可惜。他在科学上所取得的巨大成就，已成为人类知识宝库的重要组成部分，这位科学巨匠生前的荣誉不如法拉第，在他死后许多年，在赫兹证明了电磁波存在后，人们才意识到，并公认他为“自牛顿以后世界上最伟大的数学物理学家”。

赫兹的实验

1873年麦克斯韦发表《电磁学通论》时，赫兹还是一个16岁的中学生。当时德国和英国一样，牛顿学说的习惯势力根深蒂固，而法拉第和麦克斯韦理论否定了“超距作用”说，因此难于被人们接受。只是个别的有识之士，窥见其中的价值。首先支持电磁理论的是奥地利物理学家玻尔兹曼，他曾想把麦克斯韦方程模型化、形象化，以便理解，但是这等于退回到法拉第那里，因而这是没有出路的。继玻尔兹曼后是著名的德国物理学家亥姆霍兹，他是柏林大学物理学教授，1878年夏季他曾向学生们提出了一个物理竞赛题目，要学生们用实验方法来验证麦克斯韦理论。

1880年赫兹毕业于柏林大学，毕业后任亥姆霍兹的助手，在老师的影响下，他对电磁学作了深入研究。他信服法拉第、麦克斯韦的物理思想，在一篇论文中曾写道：“假使在通常的体系和麦克斯韦的体系中仅能选择一个，那么后者无疑的是占优势的。”他决定用实验来验证麦克斯韦理论。

1883年，爱尔兰教授菲茨杰拉德根据麦克斯韦理论作过一个推论：如果麦克斯韦理论正确，那么莱顿瓶放电时，即产生了变化的电场，它应引起变化的磁场，这变化的电磁场向外传播即形成电磁波，问题的关键是怎样侦测出电磁波。赫兹经过反复试验，在1886年发明了一个能收到电磁波的电波环。

他把一根粗铜线弯成环状，环的两端分别连着小球，球间距离可调，做成了一个检测电磁波的电波环。赫兹把这个电波环放在莱顿瓶附近，只要电波环尺寸和放置位置合适，在莱顿瓶放电时，电波环两球间就有电火花闪现。这正是莱顿瓶放电时辐射的电磁波被环路所接收激起的电火花。1887年11月5日赫兹寄给亥姆霍兹一篇题为《论在绝缘体中电过程引起的感应现象》论文，总结了这个重要发现。接着他又证明了电磁波射到大金属板上发生反射，并且有衍射、偏振等光波所具有的各种特征。赫兹于1888年1月将这些成果记载在《论动电效应的传递速度》一文中。麦克斯韦预言的电磁波和光的电磁理论为赫兹的实验所证实。

赫兹实验公布后，轰动了全世界科学界。由法拉第开创、麦克斯韦建立的电磁场理论经受了实践的检验，向全世界宣告了自己的胜利。赫兹这一年恰好和麦克斯韦当初预见电磁波一样也是31岁。麦克斯韦9年前已去世，可惜未能亲眼看到这一天。更令人遗憾的是年轻的赫兹不幸于1894年1月1日去世，年仅37岁。这位青年物理学家生命是短暂的，但他的伟大功绩载入史册，永放光辉！

赫兹的实验发现具有划时代的意义，它不仅证明了电磁理论确是真理，更重要的是开辟了电子技术的新纪元。电磁波的发现所产生的巨大影响，连赫兹本人也没有预料到。在他发现电磁波的第二年曾有人问他可否用来作无线电传播，并很快投入实际应用。其它无线电技术，也像雨后春笋般涌现出来。

麦克斯韦电磁场理论是电动力学的核心，电磁学发展到电动力学即经典电磁场理论的大厦已基本完成。需要注意的是，电磁场理论虽然是经过实践检验的真理，但它不是包罗万象的。它能成功地解释了宏观电磁现象，却不能解释另一些电磁现象如黑体辐射、光电效应、放射性现象、高速带电粒子的运动等等，这些问题从20世纪初诞生的新理论——量子论和相对论中才找

到正确的解释。

麦克斯韦电磁场理论不考虑量子效应，因此称为“经典电磁场理论”。在本世纪 20 年代后，经典电磁场理论和电子理论开始与量子力学相结合而发展为量子电动力学，用来研究微观电磁过程，即光子与电子间相互作用和相互转变等问题很有成效。

电气化时代

发电机和电动机

1832年在巴黎的博览会里展出了世界上第一台发电机，它是法国人比齐创制的。摇动手柄让马蹄形磁铁绕轴旋转时，固定在磁铁上方的线圈里就会激发起感生电流。从此，形态各异而原理相似的发电机如雨后春笋般地不断出现。在19世纪常用的发电机中当金属导线绕匝的电枢在磁场中做切割磁力线运动时，将电枢的两个输出端与外电路接通，组成闭合回路，就会有电能输出。电枢输出端的两个半圆柱装置叫做换向器，是安培的仪器工派克赛发明的，发电机通过换向器输出的是一种方向不变的脉动电流，这种电流叫直流电。如果电流的大小也不变化，这种直流电叫做稳恒电流。从1856年起商用发电机开始向用户供电。1862年小功率的直流发电机在沿海的灯塔上使用了。

发电机是把机械能转变为电能，能不能发明一种装置——把电能转化成机械能？美国电学家亨利研究了这个问题，他把这种转变能量的装置叫电动机。1831年7月他在“西里门”杂志上发表了自己关于电动机的设想，从而取得了电动机的发明权。这位亨利先生是个“不走运”的科学家，他比法拉第更早发现了电磁感应现象，还发明了继电器和电报。但他书生气太足，只热衷于研究，不注意实用，也不去申请专利，失去了好几次的科学荣誉，这一次总算抓住了机会。

1834年美国铁匠达文波特造出了一架用电池供电的玩具电动机，在波士顿展出时引起了轰动。同一年，俄国人雅可比也创制了电动机，也靠电池供电。这架电动机后来被装到一艘涅瓦河上的小船上，这样小船成了世界上第一艘机电船，着实出了一番风头。然而，电动机消耗的能量相当大，靠电池中的化学能来驱动电动机是得不偿失的，因此在相当长的时间里，这种用电池的电动机只能作为玩具而已。人们迫切期望找到廉价的电源来带动电动机，使人类能从繁重的体力劳动中解放出来。这种美好的前景激励了几代发明家投身到电力的研究领域之中。

然而这一难题却在一次偶然事件中解决了。1873年维也纳博览会上，一位工作人员偶然地把两台发电机连了起来，一台发电机产生的电流流过了另一台发电机的电枢线圈，这后一台发电机就在第一台发电机提供的电力下作为电动机转动了起来，这一偶然发现使在场的科学家欣喜若狂，第二天博览会的大厅上展示了一个惊人的表演：用一个小型的人工瀑布来驱动发电机，发电机的电流带动电动机，电动机又带动了小水泵来喷射泉水。当一批又一批的观众围在两台电机前，望着这奇妙的景象，发出啧啧的赞叹声时，发明家们已经领悟到，驱动电动机的廉价电源已经找到。用电动机来代替人力劳动已经指日可待了。人类的电气化时代开始了。

下面，我们也来做做发电机—电动机的模拟实验。

器材：U型磁铁两块、铁架台、漆包线一卷。卷筒擦手纸的纸板圆筒两个。

实验：用漆包线在纸板圆筒上绕100圈，两端各留出0.5米长的引线，然后用胶水纸将漆包线固定在纸筒上。

把两个线圈分别套在两块U型磁铁的磁极上，用2根0.5米的导线分别

把两个线圈的引线连起来，再悬挂在支架上。

这时用手拉动一个线圈，另一个线圈会发生什么现象？你能解释这是为什么吗？

交流电和直流电

从这一天起，电力技术大踏步地发展起来了。在美国，电器中第一个取得商业成就的是电灯泡。1882年爱迪生电气公司开始安装照明系统，仅仅经营了3年就出售了200000个灯泡，垄断了市场，并给股东支付可观的红利。发明家爱迪生也成了腰缠万贯的大老板。1884年的一天，爱迪生正踌躇满志地坐在办公室里，这时他才32岁，但头发已经花白了。突然一个青年人推门进来。“先生，我叫特斯拉，从巴黎分公司来。”说完双手递上一封信。爱迪生拆信一看，原来是自己改进贝尔电话机时的搭档，英国工程师巴切罗写来的推荐信。信上对特斯拉作了热情洋溢的介绍，说：“我知道两位伟人，您是其中的一位，另一位就是那位塞尔维亚的青年人！”特斯拉这时才20几岁，爱迪生是他崇拜的偶像，今日有幸相见心里激动不已。嗫嚅地说：“我对交流电很有兴趣。去年我在施特拉斯堡工作时自制了一台交流发电机。我想用直流电向用户供电，电压低损耗大。输电的范围只有3、5公里。每隔几公里建一座发电厂太不经济了，如果改用交流电网来输送高压电……”爱迪生听到这里竟拉长了脸，摆手打断了他说话。爱迪生是直流输电系统的创造人，见这乳臭未干的小伙子竟敢在祖师爷的面前说直流电这也不是，那也不是，岂不惹在爱迪生的气头上！事实上特斯拉的话是对的，因为发电机的输出功率决定于它的输出电压和输出电流，如果用直流低压输电，电流很大，会在输电线上损耗了大部分的电功率。倘若改用交流输电的办法，可以将发电机发出的低压电通过变压器升高电压，因为总的输电功率保持不变，经过变压后的高压电的电流就很小，在输电线上不会损耗多少电功率。到了用户处，再通过变压器将电压降落下来，这样既节电又安全，有什么不好呢？

直流发电机也可以输送高压电？这样不也可以在输电线上流通小电流吗？这种想法只能是纸上谈兵。直流发电机产生的电压最高只可到几千伏，电压再往上升高，线圈的绝缘性就不够了。由于它不能变电压，就是将几千伏电压的电流直接输入工厂、车间甚至住宅，既昂贵也太危险，也根本无法制造耐几千伏电压的白炽灯。

然而爱迪生已无意再听特斯拉说话，拿起了桌上的铜铃摇了几下，让秘书把特斯拉安排到修理部去当一名低级工程师，满腔热情的特斯拉如一下掉入冰窖里，连连打了几个寒噤。但转念一想，自己凭本事吃饭。我好好地干，干出成绩来，那时你就不敢小觑我了。从这天起特斯拉真的起早摸黑地埋头苦干，每天在车间里耽上18~20个小时，他不仅出色完成了本职工作，还抽出时间来研究交流电。然而这时的爱迪生已经十分主观，容不得半点反对意见。他不仅对特斯拉的成绩视而不见，还常常对他横加指责，使斯特拉觉得伤心和委曲。后来发生了一件事，终于导致了两人分道扬镳。特斯拉不得不离开了爱迪生电气公司。后来特斯拉想到了一个名叫乔治·威斯汀豪斯的人，这个人出身军人，前几年发明了铁路上用的空气闸而在工程技术界崭露头角。最近他进口了两套戈拉—吉布斯的变压器和西门子交流发电机，在纽约附近的布法罗地区开了一家小小的电气公司。特斯拉拿定了主意立即搭车去

布法罗。

再说威斯汀豪斯电气公司虽然已经开张多日，奈何只有十几个人，七八条枪，一时也难成气候，特斯拉的到来真使乔治喜出望外，他早就知道特斯拉是电力工程方面的高手，如今投奔来帮自己，可谓是如虎添翼。乔治立即以极大的热情来支持特斯拉的工作。这两个人都不是等闲之辈，经过几个月的努力就准备在匹茨堡建立起一个交流供电网来。爱迪生起先还并不把这两个小人物放在眼里，听说了这事后，不由得大吃一惊。本来白炽灯乃是自己公司的一统天下，想不到小小的威斯汀豪斯公司竟然要来抢饭吃，又羞又恼。爱迪生竟不顾自己的显赫名声，鼓动如簧之舌大造舆论：“交流电用高压，不安全，会电死人。”恰好纽约州的立法机关通过了一项用电刑来执行死刑的法令，用的正是威斯汀豪斯公司制造的发电机。这一下助长了民众对交流电的恐惧心理。经过报纸的渲染，一时街头巷尾、剧场餐厅都有人在谈论交流电的可怕。眼看这威斯汀豪斯公司刚刚挣扎起来的一点家业就要被葬送在这股流言蜚语之中。“先生，我们不能听任这些胡说八道泛滥惑众，开个记者招待会吧！”特斯拉愤愤不平地说。

两天后的一个傍晚，威斯汀豪斯电气公司的大门前车塞马鸣，人头攒动，围了有几百人。其中一部分是记者，更多的是看热闹的人。会议开始了，乔治先生说了几句开场白之后，特斯拉雄纠纠走上台阶。他从一台公司造的发电机上引出两根长长的绝缘导线，捆在自己身上，竖一下，横一下，一共捆了十几道。然后再将导线联到一长串灯泡上。“开闸。”随着他一声令下，挂在门前的一长串灯泡顷刻大放光明。特斯拉站在灯光之中不住地微笑，向大家挥手示意。观众都惊呆了。在片刻的寂静后，人群里爆发出雷鸣般的掌声，有人还把帽子抛上了天空。混在人群里的几个爱迪生电气公司的职员，原来想来看笑话，这一下倒急得手足无措，正要溜之大吉，突然见特斯拉迎面走了过来。特斯拉耸了耸肩膀说：“真理不崇拜权威啊！”爱迪生公司的几个职员满脸羞惭赶紧溜之大吉了。从这次记者招待会后，威斯汀豪斯公司才算站稳了脚跟。随着时间的推移，交流电逐渐显示出它的优越性，既经济实惠，又安全可靠。1893年威斯汀豪斯公司在芝加哥博览会上接受了25万只灯泡供电的订货。特别是酝酿已久的尼亚加拉大瀑布水电站决定采用威斯汀豪斯电气公司生产的交流发电传输系统，使交流电赢得了决定性的胜利。爱迪生电气公司的信誉已到了维持不下去的地步，不得不改名为通用电气公司。而威斯汀豪斯公司的业务一直兴旺到1907年美国大萧条之前。发明家特斯拉，虽然名字被铭刻在大瀑布发电机的主机上，但他仍然过着清贫的生活，也没有像爱迪生那样广为人知。事实上特斯拉是一位罕见的天才，他对未来世界有过许多新颖、独到的设想。这些设想中有一部分现在已成为事实，更多部分仍有待于现在工程技术人员去发掘和整理。特斯拉的晚境十分凄凉。1943年1月8日他在贫病中死于大瀑布附近的小客栈里，享年86岁。后来他的骨灰，生前使用的仪器和发电机模型被运回南斯拉夫，安放在贝尔格莱德的特斯拉博物馆里。

电话的发明

“电能传递信息，为什么不能传递声音呢？”提出这个问题的是美国波士顿大学的语言教授贝尔，当时他22岁。贝尔于1847年生于英格兰，他的

父亲和祖父都是声学家。贝尔小的时候十分淘气，好奇心很强，喜欢提各种怪问题。贝尔 17 岁进爱丁堡大学学习语言，毕业后获得博士学位，移居美国当了教授。当时电报刚发明不久，人们对电的作用产生了强烈的印象。贝尔也怀着浓厚的兴趣，业余从事研究。一天，他在做实验时偶然发现，当电路接通或断开时，螺旋线圈就会发出轻微的噪声。这启发了他，既然空气能使薄膜振动发出声音，那么如果用电使薄膜振动，不就可以把人的声音传递开来了吗？1873 年夏，贝尔正式向校长提出辞呈，决定去发明一种能传递人的声音的电话！他不去理会周围人的闲言碎语，变卖了家产做经费，与 18 岁的电工技师沃特森一起开始了艰难的创制电话的生涯。

下面我们利用废旧的双听筒耳机来了解电话机的工作原理。

找一副双听筒耳机，把原来的听筒线拆下来，再用有绝缘皮的双股长导线把两只听筒连起来。当一个人对着耳机说话时，站在远处的人就可以从另一个耳机里听到他的说话声音。

再拆卸耳机，可以看到里面有一块永久磁铁和一铁片。当有人对耳机说话时，声波使耳机里的薄铁片前后振动，铁片与永久磁极之间的空隙就忽大忽小，引起了磁场强度的变化。这样绕在永久磁铁上的线圈里就激发出忽强忽弱的感生电流来。这个随声波变化的电流，传到另一个耳机的线圈里，又引起了磁场对薄铁片的吸力变化，铁片振动发出了相应的声音，电就这样把声音传递开来了。贝尔的电话机就是按上述的原理设计的。他们在试制的时候也是备尝了艰辛，耗费了整整 1 年的时间。有趣的是，从电话里传来的第一声却是呼救声。当时贝尔正在把一个装置浸到硫酸里，不小心硫酸溅到了腿上，痛得他对着话筒大叫：“沃得森，快来！”这句话经过电线传到了安装在另一个房里的接收器，被沃得森听清了。两人兴奋地各自从房里跑了出来，在走廊里拥抱，庆贺电为人类第一次送话。这天是 1875 年 6 月 2 日。

贝尔发明电话之后，于 1876 年申请了专利。但它并没给贝尔带来好运。为了推广这个发明，他耗尽了家产，出卖了专利……后来富翁休巴顿爵士同意帮助他，1878 年贝尔电话公司终于开张了。

1915 年第一架实用电话机试制成功。不久在贝尔的指导下美国架起了 4000 英里的长途电话线，从此电话进入了千家万户。今天，以计算机控制的具有多种功能的程控电话成了现代化通讯事业的主角，并在我国许多城市里得到普及和发展。

