

科学史上的直流电与交流电之战

◎戴吾三

爱迪生发明的白炽灯可以提供有效照明，但采用的是直流电系统，传输距离受到限制。最终，直流电供电系统输给了交流电系统。但爱迪生又转向蓄电池研究，做出新的发明。

白炽灯的发明是人类文明史上的重大事件，它深刻地改变了社会生产方式，极大地影响了人类的生活。

就白炽灯的发明而言，爱迪生并不是第一人。然而，是爱迪生在独立发明白炽灯的基础上，率先进行商业推广并取得成功的。不过，爱迪生推广白炽灯采用了直流电系统，虽然可以提供有效照明，但传输距离受到明显局限。尽管直流电供电系统最终输给了交流电系统，但爱迪生又转向研究蓄电池，做出新发明。这一案例表明，科学上不能简单以成败论英雄。

爱迪生的白炽灯与直流电系统

1878年夏天，爱迪生受弧光灯和煤气灯的激励，开始为发明白炽灯做准备，他定下明确的目标：不仅发明白炽灯，还要发明一整套与电灯照明、提供电力驱动机器相关的电力系统。爱迪生知道，他的主要竞争对手并非少数几家弧光灯制造公司，而是当时占市场主导地位煤气公司。为了成功挑战已成熟应用的煤气灯，必须能以“分送”的方式向用户分别提供电灯电力，就像煤气公司将煤气分送给顾客一样。

爱迪生颇有商业意识。1878年秋天，他研制的白炽灯成功持续点亮几十分钟，他立即致电纽约的报社记者，大胆地宣称自己“已经发现了一套方法”，可以让电取代煤气，成为便宜又实用的替代能源。

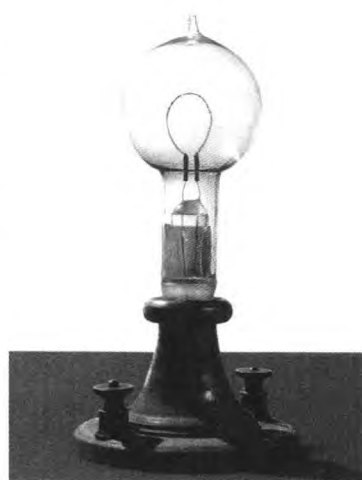
爱迪生的媒体宣传达到了预期效果，吸引了华尔街的众多投资者，其中有当时美国最有钱的富豪范德比尔特(W. H. Vanderbilt)、摩根(J. P. Morgan)以及西

方联合公司的董事等。1881年2月，他们共同出资30万美元在第五大道成立了一家新公司——爱迪生电灯公司(Edison Light Company)。爱迪生接受分期付款的资助方式，在门洛帕克的实验室进行实验，并且同意将未来5年所有的电力照明专利权转给这家新公司作为回报^[1]。

为提高白炽灯的连续发光时间，爱迪生试验了近千种材料，在1879年10月21日迎来成功，弧形炭化棉线制成的灯丝可以连续发光40多个小时。次年1月27日，爱迪生为他的发明申请到美国第一个白炽灯专利(美国专利号223,898)^[2]。爱迪生没有停步，他再度采用新材料进行试验，结果发现经炭化处理的竹丝发光更为持久。

在研制白炽灯的过程中，爱迪生一直采用直流电源。经测试，他发现如果电压太高，脆弱的灯丝很快就会燃烧过热断裂；如果电压不足，灯光则会闪烁不定。他最终选定110伏电压，这一电压标准一直沿用至今，美国、加拿大、墨西哥、日本等国都采用该电压标准。

随着白炽灯研制取得进展，爱迪生也加快了商业开发的步伐。他加紧发明一套电力系统，包括开关、电表、插座、保险盒、调节器、地下导线、接线箱，以及系统



爱迪生发明的白炽灯(1881年)

戴吾三：教授，清华大学深圳研究生院，深圳 518055。

Dai Wusan: Professor, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055.

的核心部分——产生直流电的中央电站。

为了将电引发的火灾和意外风险降至最低程度,爱迪生决定将电线埋于地下,而非架高电线。而且,爱迪生使此电力系统尽可能与当时使用的煤气系统类似,电灯的照明亮度定在 16 烛光(与煤气灯的亮度相同)。白炽灯也跟煤气灯一样,可以用钥匙开关。

1881 年 8 月,爱迪生买下珍珠街 255 号到 257 号的几间仓库,开始兴建全美第一座发电厂。直流电系统原定的输电范围约是 1.6 公里²,后根据实际情况,范围缩小到以珍珠街发电厂为中心的 1 公里² 区域^[3]。仓库经过整修,可以支撑发电机的庞大重量。一楼装设 4 座大型的煤炭锅炉,它们提供驱动发电机的加压蒸汽。发电机安装在二楼,原先老旧的地板被粗壮的梁柱取代。发电机重达 21 吨,可以产生 10 万千瓦的电,足够为 1200 个电灯提供电力,爱迪生将其取名为“巨无霸”(Jumbo)。珍珠街的发电厂最终运行了 6 台发电机。1882 年 9 月 4 日下午 3 点,巨无霸发电机开始运转,直流电经由地下电线输送到预先签约的 59 位客户的楼房中,由此迎来了电力时代的黎明。

考虑到今后的商业推广,在最初几个月,爱迪生没有向客户收取电费。随后,他利用化学平均值,设计了一个测量用电量的装置——爱迪生电表,这是一个连接在客户电路分路器上的玻璃罐,里面有两片浸泡在硫酸锌溶液中的锌片。当电流通过玻璃罐时,正极板的金属会溶解,并沉积在负极板上。工人每个月将这两片金属板从电表上拆下来清洗,再放到实验室的天平上测重量,测出两片金属板的重量差,从而知道消耗的电流。可以说,世界上最早的电表数据不是“读”的,而是用天平“称”的。

当时,爱迪生在美国没有任何竞争对手,他唯一的对手远在欧洲,而欧洲的电力市场正朝不同的方向发展。1882 年,法国科学家戈拉尔(L. Gaulard)和英国的商业伙伴吉布斯(J. Gibbs)一起申请了配电系统专利,他们对半个世纪前法拉第在实验室里发明的变压器进行了改进。这套系统与爱迪生的系统完全不同,利用变压器改变传输电流的电压,输送的是交流电,而非直流电。

威斯汀豪斯的选择

美国发明家威斯汀豪斯(G. Westinghouse)因发明火车的气闸而闻名。1885 年 12 月,威斯汀豪斯受白炽灯照明的影响,和他的哥哥以及其他几位投资者共同组建了西屋电气公司(Westinghouse Electric Company),资本为 100 万美元。该公司的主要资产是威斯汀豪斯收购的 20 多项与电有关的专利。

威斯汀豪斯收购的专利大多与直流电照明和发电系统有关。这些设计类似爱迪生的系统,但它们可以避免明显的专利侵权。1886 年,威斯汀豪斯为纽约市的温莎旅馆安装了一座独立的小型直流电电厂,不久后又点亮了匹兹堡的莫农加希拉旅馆的电灯。

然而,直流电的市场很难开拓,原因是爱迪生的产品几乎占据了整个市场,知名度高,并得到了客户的信赖。爱迪生电灯公司又掌握着直流电灯、发电机与马达等最好的专利,并且时刻紧盯可能发生的专利侵权而随时提出诉讼。在这种情况下,威斯汀豪斯只好将目光转向欧洲刚诞生的交流配电系统。

当时,直流电传输距离近的缺点已经显现,电力只能传输到离中央电厂不到 2 公里的区域,超过这个范围便会大幅度降低。爱迪生的珍珠街电厂服务范围很小,要服务整个纽约市,就必须建造数十座电厂,对纽约这样地价高昂的城市来说并不现实。

交流电利用变压器可以轻易地“升压”到更高的电压,高压交流电可以通过较细而廉价的铜线传输到更远的距离,而后“降压”供给旅馆、公司或家庭使用。对直流电而言,无法升高或降低电压,不具有交流电的可调控性。

威斯汀豪斯对交流电很感兴趣,但无法确定它的可靠性,以及成本是否能与直流电抗衡。当时有种否定意见认为,如果将交流电加压至数千伏传输,大部分的电能将转化为热能损耗掉,一套交流电系统会变成一台大型的电热器。这对投资人来说将是十足的灾难。威斯汀豪斯找来他最信任的电力专家波普(F. Pope),研究在美国应用交流电的可行性。最初波普也持怀疑态度,但深入阅读了在欧洲发表的研究报告后,他确信交流电具有创新性与工业价值。威斯汀豪斯听从了波普的建议,认为交流电值得一搏,于是购买了戈拉尔-吉布斯的交流电系统专利。该专利中最核心的部分是变压器,它是交流电能以低成本进行远距离传输的关键。

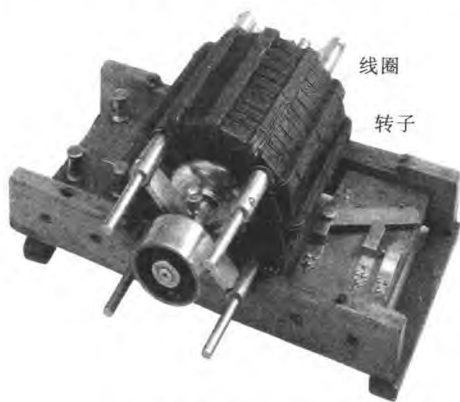
由于还没有建立交流电系统的标准,威斯汀豪斯和他的助手边研究边拟定,最初确立交流电的频率为 133 赫。1886 年,威斯汀豪斯团队的总工程师斯坦利(W. Stanley)设计出一套完整的交流电系统,为麻省小镇大巴林顿提供电力,这是美国第一个安装的实用交流电变压系统。斯坦利设计了 12 个变压器,将传输的交流电从 3000 伏降到 500 伏。8 个月后,威斯汀豪斯在纽约州水牛城的第一座商业用交流电发电厂开始运营,并且很快接到订单,随后陆续建立了 20 多座交流电电厂。到 1886 年底,西屋电气公司雇佣了 3000 名员工,威斯汀豪斯的势力日益强大,对爱迪生构成威胁。然而,交流电的发展仍面临一大障碍,尚缺乏交流电驱

动的感应电动机(即马达)的关键技术。当时,商用电动机几乎都采用爱迪生的直流电系统,要制造其他种类的电动机不太可能,而且几种已有的交流电动机功能欠佳,不仅无法自行驱动,而且运转不久会产生强烈的振动。就在此时,特斯拉(N. Tesla)出现了。

特斯拉与他发明的交流电动机

在科技史上,特斯拉被称为“电学奇才”“科学超人”。

特斯拉出生于克罗地亚,他天赋异禀,头脑里经常涌现奇特的想象。1883年,特斯拉进入巴黎附近的爱迪生大陆公司工作,在那里他凭灵感成功设计了第一台感应电动机模型。这种电动机全然不同于直流电动机,不需要电刷与整流器的铜片摩擦来改变转子的磁极,而是通过旋转磁场驱动转子。特斯拉确信自己的研究方向正确,却苦于没有足够的经费将其变成产品。



特斯拉的感应电动机模型

1884年,28岁的特斯拉前往美国,投奔到爱迪生的门下,然而不到10个月他便离开。特斯拉与爱迪生性格差异很大,跟其他人也合不来,更深层的原因在于:爱迪生不喜欢交流电,特斯拉无法说服他。

特斯拉创建了自己的电灯公司(The Tesla Electric Light Company),并建立了他的第一个实验室。他研制的特斯拉弧光灯,比起当时美国正在使用的弧光灯,更简单、更安全,也更经济。特斯拉申请了多项弧光灯的专利,并在街道上投入使用。然而,特斯拉不善于经营,新成立的公司遇上经济危机,所持股票形同废纸。有两年时间,特斯拉沦为一名苦力,在纽约街头挖过沟,扛过麻包,日后他很少提及这段痛苦的往事^[4]。

事情之后有了转机。西部联合电报公司(Western Union Telegraph Company)的经理布劳(A. K. Brow)看好交流电的前景,在他的帮助下,特斯拉成立了特斯拉电气公司(The Tesla Electric Company),开始专注于制

造交流电系统。公司注资50万美金,于1887年4月正式运营。因为特斯拉成竹在胸,所以只花了几个月就为整套多相交流电系统申请专利,实际上这是三套完整的单相、双相、多相交流电系统。特斯拉还试验了其他种类的系统,并为每种系统制造了必需的发电机、电动机、变压器以及安全控制装置。在公司开办6个月时,特斯拉已向专利局送去两台电动机用于测试,很快,他的一批专利申请都被批准。

康奈尔大学电气工程学教授安东尼(W. A. Anthony)看到了特斯拉系统的重大意义,并为其大声疾呼:这不仅仅是新的电动机,很可能一项新技术就将以此为基础而产生。由于安东尼教授力荐,1888年5月16日,一直默默无闻的特斯拉被邀请到美国电气工程师协会做演讲。演讲的题目是《交流电动机和变压器的新系统》(A New System of Alternate Current Motor and Transformers),结合演讲的内容,他演示了两台小型交流电动机,引起与会者的惊奇和赞叹。这场演讲让特斯拉在科学界一举成名。

特斯拉演讲的消息传开,引起了威斯汀豪斯的极大关注,特斯拉的专利正是他寻觅已久的东西。威斯汀豪斯亲自到特斯拉的实验室拜访,两位对新能源技术充满梦想的人物,大有相见恨晚的感觉。经过协商,威斯汀豪斯以6万美元,加上每利用特斯拉的电动机产生1马力电力便付给他2.5美元专利费,买下特斯拉的专利使用权。

要启用一种全新的系统,困难是显而易见的。西屋电气当时采用的交流电的频率标准为133赫,而特斯拉的感应电动机采用60赫的交流电,西屋电气的工程师起初非常抵触,在花费几个月的时间进行测试都不成功的情况下,他们才最终接受了特斯拉的意见,一将频率标准改到60赫,电动机就按照最初的设计顺利运转,60赫从此成为交流电的标准频率。

当爱迪生听说特斯拉用他的交流电和西屋电气达成协议时,不由得勃然大怒。很快,他的宣传机器便开始弹奏一系列怪调,大肆渲染交流电所谓的危险。在爱迪生看来,由交流电引起的事故,即便没有找到,也得制造出来,要让公众对此警觉。爱迪生在新泽西州的西奥兰治有一个大实验室,附近的居民注意到街上的一些流浪狗不见了。很快他们发现了原因,原来经爱迪生默许,有个叫布朗(H. P. Brown)的人充当了反交流电的角色,拿流浪狗进行交流电的电击实验。布朗怂恿街上的男孩去抓流浪狗,每抓到一只流浪狗就付给25美分,同时还到处散发诋毁交流电的传单,刊头用红色字体印上“谨防危险”!^[5]

威斯汀豪斯根本不理睬这种恫吓,他盯着前方的

挑战,更关注将于1893年在芝加哥举办的世界博览会。因为主办方宣布,为纪念“哥伦布发现新大陆400周年”,这次博览会将采用人工照明装饰会场建筑,并以电力作为博览会的唯一动力来源。

芝加哥世界博览会上的交流电秀

芝加哥世界博览会的能源与电力合同公开竞标,竞争非常激烈。最终,西屋电气公司竞标成功,报价比通用公司低一半。它利用交流发电机和变压器为博览会提供电力,并采用特斯拉的电动机驱动用电器。不过,西屋电气缺乏制造白炽灯的技术,有意向爱迪生购买专利,但遭到了拒绝。

距博览会举办只有不到一年的时间,威斯汀豪斯和他的工程师十分焦急,最后想出一个办法,对索耶(W. Sawyer)和曼(A. Man)两人发明的碳丝灯(Sawyer-Man lamp)进行改进,用一个玻璃罩封住灯泡底部并抽成真空,以此避开爱迪生的专利限制。这种两件式的灯泡不如爱迪生的设计灵巧,使用寿命也不长,但足以在博览会上使用。威斯汀豪斯为生产灯泡专门建了一座玻璃工厂,在不到一年的时间里生产了一百万个灯泡,显示出他在运用制造资源方面的惊人能力。



芝加哥国际博览会上使用的西屋电气公司生产的白炽灯

所有电器的电源,令人目不暇接的灯光将会场笼罩在一片神奇的光辉之中。

最令观众印象深刻的展览在电力大楼,其大厅堪称电力的神圣殿堂。观众先经过一个门廊,上面刻有铭文:“他从天空中夺走闪电,从暴君手中抢下权杖”(Eripuit Coelo Fulmen Sceptrumque Tyrannis),这句话原先形容的是美国开国元勋富兰克林(B. Franklin),用在这里的目的,是要消除大众对电力的恐惧。展览中



被电灯光照亮的芝加哥国际博览会建筑(1893年)

有一个电动的移动人行道,一列高架行驶的电动车,一间电器化厨房,还有数以万计的白炽灯泡。

在电力大楼内,西屋电气公司与通用公司双方各自摆出阵容,大有互不相让之势。威斯汀豪斯向大众展示:他的公司运营不到10年,有了长足的进步。一个名为“特斯拉多相系统”(Tesla polyphase system)的专题展,让特斯拉本人大放光彩。专题展展示了一套完整的多相电力系统,其中包括一台交流发电机、可以将电压提高以供长程传输的变压器、一条短程传输的传输线、减压用的变压器,以及可以将交流电转换为直流电的旋转整流器(因为有些引擎仍在使用直流电,如铁路用的电动机)^[6]。

通用公司展示了一组庞大的电力设备,驱动设备是壮观的爱迪生电塔(Edison electric tower)。这是一座高耸的白色木桅杆,四周环绕着数以千计的迷你电灯,透过水晶碎片反射出灯光。电塔旁边展示着2500个爱迪生白炽灯的样品,这些就是威斯汀豪斯原本想购买专利来生产的电灯。尽管爱迪生电塔受到万众瞩目,但其设计已有十几年,实际上已被西屋电气公司超越。

西屋电气公司为芝加哥博览会兴建的发电厂,是当时规模最大的交流电中央电厂,也是美国境内兴建的第一座大型多相电力系统,这是第一套真正的交、直流通用的交流电力系统,能够通过旋转整流器点亮白炽灯、弧光灯和其他使用直流电的电器装置。会场中每一个能移动或点亮的装置的电力,都是由西屋电气公司的多相交流电系统提供的。

芝加哥国际博览会让西屋电气大获全胜,这也成为社会大众改变对交流电认识的转折点。博览会结束后不满一年,美国国内新订购的电器、电动机有超过一半使用交流电,这要归功于西屋电气在博览会的成功展示以及特斯拉电动机的优越表现。

后续的故事

随着时间的推移,就连爱迪生的铁杆粉丝也明白,直流电在这场电流战争中已是输家。传输距离仅限于1.6公里以内的直流电厂,无论如何也无法满足美国高涨的电力需求,只有交流电系统可以通过有效的方式长距离传输价廉的电力。

然而,爱迪生仍不愿意放弃直流电,他执拗地坚信直流电在某些方面依然胜过交流电。他看准可充电的蓄电池,用于发展电动汽车。

可充电的蓄电池于1859年由法国化学家普朗泰(G. Planté)发明。早期的蓄电池用的是铅板和硫酸液,这种蓄电池既笨重又有腐蚀性,并不适用于汽车。爱迪生相信,他可以发明一种更好的替代电池。

经过三年多的试验,爱迪生测试了数千种化合物,最后选定了一对组合:以镍做正电极,铁做负电极,氢氧化钾的碱性溶液作为电解液。被称为“E型”的电池于1904年上市,爱迪生高调地向世界宣布它的功能。谁知新电池的使用并不理想,很多问题先前没有预料到。爱迪生不得已停止生产,但他却没有停止研究。从1905年到1909年,在持续进行了一万多次试验之后,爱迪生成功设计出“A型”电池。新电池的试用效果确实不错,从1910年开始,配备爱迪生电池的电动车销售很好,以当时的物价水平来看,汽油相当昂贵,而电动车不需要汽油,电动车也比内燃机汽车容易发动,后

者必须以手摇曲柄发动,弄不好有折断胳膊的危险。在这段时间里,爱迪生似乎觉得他已经东山再起。

然而世事难料,在爱迪生的蓄电池上市仅仅两年之后,电动车市场趋于饱和,之后急转直下,成为市场转型的牺牲品。油田的发现和炼油工艺的改进大幅度降低了汽油价格,而汽车启动器的发明,使得引擎发动变得容易。1920年代初,福特(H. Ford)批量制造低价位的T型汽车,这更是对电动车的致命一击。电动车于1930年代中期完全消失,直到半个世纪以后,能源紧缺,碳排放严重,高效蓄电池电动车的研制又被重新提上议事日程……

- [1] 麦尼可.商业标准大战:直流电 vs 交流电. 张淑芳,译. 台北:财讯出版社,2007: 70.
- [2] 戴吾三,等.影响世界的发明专利.北京:清华大学出版社,2010:164.
- [3] 拉皮罗夫-斯科勃洛.爱迪生传.南致善,张德浦,译.北京:商务印书馆,1997:116-118.
- [4] 切尼.被埋没的天才:科学超人尼古拉·特斯拉.陈璐,译.重庆:重庆出版社,2010: 33.
- [5] 切尼.被埋没的天才:科学超人尼古拉·特斯拉.陈璐,译.重庆:重庆出版社,2010: 39.
- [6] 麦尼可.商业标准大战:直流电 vs 交流电. 张淑芳,译. 台北:财讯出版社,2007: 201-202.

关键词: 爱迪生 威斯汀豪斯 特斯拉 直流电 交流电

跟踪·扫描

湖泊蓝藻卫星遥感反演研究取得进展

[本刊讯]中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊环境遥感马荣华研究团队,在内陆湖泊水体藻蓝素浓度遥感定量反演方面取得新进展。该项成果刊载于国际期刊 *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154:298-317,这是湖泊环境遥感团队继2012年在该刊发表内陆湖泊水体PC遥感反演算法研究以来,在湖泊水体藻华定量反演研究方面的又一显著成果,该成果使得湖泊蓝藻的监测从地面推向太空,可以利用卫星实现蓝藻的定量监测与估算。

湖泊水体富营养化现已成为一个全球性的普遍问题,与之相伴的一个

现象是蓝藻水华的频繁暴发。遥感技术具有监测范围大、速度快、周期性、成本相对较低廉等优点,能够弥补常规水质监测方法定时定点的不足,节省大量的人力、物力,是进行蓝藻水华监测的最佳选择之一。虽然近年来针对II类水体水华遥感监测的研究已取得了巨大的进步,但由于太湖水体光学组分复杂,以及遥感影像大气校正困难等诸多条件的限制,在太湖获得长时间序列的蓝藻定量反演数据仍然是难以攻克的难题。

藻蓝素(Phycocyanin, PC)是蓝藻携带的独有色素,具有独特的吸收特征光谱。研究团队利用PC的吸收特性,设计并建立了一个新的PC反演模型。从理论上推导、分析、并模拟了使用该方法进行PC遥感反演的可行性,然后使用实测数据验证,获得基于实测遥感反射比(Remote sensing re-

flectance, Rrs)的PC反演模型。使用辐射—传输方程模拟将该模型推导到瑞利反射率(Rayleigh-corrected reflectance, Rrc)上,并将其应用于中分辨率成像光谱仪(MERIS)长时序的Rrc数据得到PC分布结果。根据光谱分析、图像对比、直方图对比等一系列科学分析手段证明了该算法对气溶胶、薄云、太阳耀斑以及悬浮泥沙等干扰都不敏感,因此使得太湖MERIS有效数据从小于1%提升到大于50%。据此建立的基于MERIS的长时间序列(2002—2012年)的PC数据集,揭示了季节性变化、年际变化,以及不同湖区的相关性。通过将此算法思路试用于其他湖泊如滇池、巢湖等,显示了这种思路具有较好的可移植性,为推广于长江中下游湖泊提供了重要理论基础。

(闻正)

科学史上的直流电与交流电之战

作者: [戴吾三](#)
作者单位: [清华大学深圳研究生院, 深圳, 518055](#)
刊名: [科学 \(上海\)](#)
英文刊名: [Science](#)
年, 卷(期): 2014, 66(6)

参考文献(6条)

1. [麦尼可;张淑芳](#) [商业标准大战:直流电vs交流电](#) 2007
2. [戴吾三](#) [影响世界的发明专利](#) 2010
3. [拉皮罗夫-斯科勃洛;南致善;张德浦](#) [爱迪生传](#) 1997
4. [切尼;陈璐](#) [被埋没的天才:科学超人尼古拉·特斯拉](#) 2010
5. [切尼;陈璐](#) [被埋没的天才:科学超人尼古拉·特拉斯](#) 2010
6. [麦尼可;张淑芳](#) [商业标准大战:直流电vs交流电](#) 2007

引用本文格式: [戴吾三](#) [科学史上的直流电与交流电之战](#)[期刊论文]-[科学 \(上海\)](#) 2014(6)