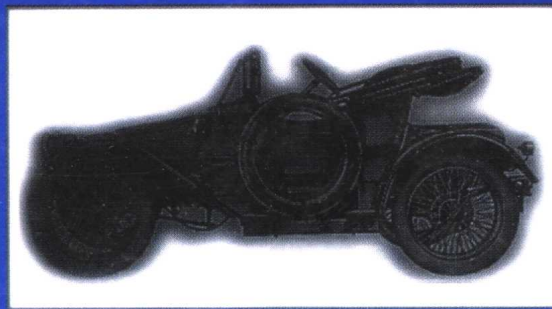


电动汽车发展史

— 电 池 动 力 车 辆

[美] Ernest H. Wakefield

叶云屏 孙逢春 译



北京理工大学出版社

电动汽车发展史

——电池动力车辆

[美] Ernest H. Wakefield

叶云屏 孙逢春 译

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书系统而全面地介绍了世界电动汽车的发展史,回顾了电动汽车 100 多年来的艰难历程,客观地分析和评价了电动汽车技术以及阻碍电动汽车产业化和市场化的关键性技术因素。本书还科学地预示了电动汽车在 21 世纪的社会地位。

本书图文并茂、史料系统丰富、分析客观透彻,是电动汽车领域的一部名著,适合广大科技管理干部、汽车工程技术人员、研究生、大学生和广大汽车爱好者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车发展史:电池动力车辆/(美)韦克菲尔德(Wakefield E. H.)著;叶云屏,孙逢春译—北京:北京理工大学出版社,1998.8

ISBN 7-81045-432-3

I. 电… II. ①韦…②叶…③孙… III. ①电传动汽车-历史-世界②汽车:蓄电池车-历史-世界 IV. U469.72-091

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 13577 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字 01—96—1550

《History of the Electric Automobile——Battery-Only Powered Cars》

by Ernest H. Wakefield

Published by Society of Automotive Engineers, Inc. 1994

责任印刷:毋长新 责任校对:陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

邮政编码 100081 电话 (010) 68912824

各地新华书店经售

国防科工委印刷厂印刷

*

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.75 印张 599 千字

1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:42.80 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

译者前言

电动汽车已列入我国“九五”重大科技产业攻关项目，电动汽车作为一种新生事物已成为社会各界的热门话题，经常见诸媒体，并受到党和国家领导人的重视和关心。近年来国内掀起了电动汽车研究、开发、演示和试运行的热潮，这将有力推动电动汽车技术和产业的发展。

电动汽车比燃油汽车的发展史要长，1881年世界上第一辆地面机动车辆不是燃油汽车，而是电动汽车，后来电动汽车步履蹒跚、起伏跌宕，它几乎成了世界上唯一的孕育和发展了100多年，但是仍然处于难拿起、放不下的一项技术。制约电动汽车推广应用的关键仍是动力电池和续驶里程。迫于能源和环境的压力，今天，人们又呼唤电动汽车，随着大量人力和财力的投入，驱动和动力电池技术的突破，电动汽车有望成为21世纪的重要交通工具。

《电动汽车发展史》是美国著名科学家、作家和电动汽车专家威克费尔德博士的一部力作和名著。该书图文并茂、史料系统丰富，系统全面地介绍了全世界电动汽车的发展历史，回顾了电动汽车100多年来的艰难历程，客观地分析和评价了电动汽车技术以及阻碍电动汽车产业化和市场化的关键技术因素，科学地预示了电动汽车在21世纪的社会地位。

经作者同意，美国汽车工程协会允许，北京理工大学出版社引进版权，我们将此书译成中文献给读者，旨在为我国科技管理领导干部在制定电动汽车发展政策和实施研究开发项目时提供借鉴；也为汽车工程专家、技术人员、研究生、大学生及广大汽车和电动汽车爱好者提供阅读和参考资料。

本书由北京理工大学叶云屏副教授和孙逢春教授合作翻译。叶云屏担任审校，孙逢春负责技术审定工作。本书前言、绪论、第1章至第9章、第16、17、22、23、27章、附录A、附录C至附录J由叶云屏翻译，其余部分由孙逢春翻译。

在此书的翻译过程中得到了北京理工大学祝家光教授、张承宁副教授、国防科工委电动车辆技术开发中心邵立人高级工程师、程夕明、张世化、陈熙等工程师、车辆工程学院研究生郭海涛、吴小兵、孙文强的帮助，在此深表谢意。

译者在翻译过程中力求忠实原文和准确理解作者的思想。但由于译者水平有限，谬误难免，恳请广大读者不吝指正。

译者

1998年1月

序 言

一个多世纪以来，家用电动汽车一直是个不解之谜，对汽车工程师具有极大的诱惑力。随着世界经济状况的发展变化及人们对矿物燃料储存量与环境问题的深切关注，世界各国对电动汽车的兴趣也如同电波一样此起彼伏。

自 19 世纪末叶起，仅在美国就有 300 多家公司(世界各地还有很多公司)积极支持电动汽车的私人与商业应用，这是因为电动汽车不产生噪声，不污染环境，又容易操作。

20 世纪初期，在美国汽车革命中，电动汽车受到全社会的青睐。但是，当这种“安静的服务工具”开到市外时，便马上在续驶里程、载重量及价格诸方面明显地表现出严重问题和局限性。

蓄电池是电动汽车最大的症结。一个多世纪以来，尽管各国投入了巨额资金进行研究和开发，但能够解决这个症结的“奇迹”尚未创造出来。然而，家用电动汽车的前景仍然像一个多世纪前那样诱人和激动人心。

电动汽车在过去一个世纪里的发展史终于在这部书里记载了下来。作者是电动汽车的权威之一厄内斯特·H·威克费尔德博士(Dr. Ernest H. Wakefield)，他把毕生的精力投入到了电气工程和核工程事业上。

在过去的半个世纪里，威克费尔德博士集电力工程师、教育家、演说家、作家、发明家和企业家为一身。他学识渊博，德高望重，最有资格撰写电动汽车的发展史。这部书详细叙述了世界各地电动车辆的发展过程，包括大量的纪实材料。

《电动汽车发展史》一书重点讲述了法国最早开发的蓄电池，19 世纪中期加斯顿·普兰特(Gaston Plante)和加米尔·福尔(Camille Faure)的工作及美国电动汽车的辉煌历史，还讲述了里克(Riker)、贝克(Baker)、特鲁夫(Trouve)、阿顿(Ayrton)、培里(Perry)、倍克(Walter Baker)和伍兹(Woods)等人的开拓性工作。电池、充电器、控制器的发展情况及现代新型交流电技术的试用等，也在本书里作了详细叙述，这的确是一部极好的电动汽车发展史。

今天，交通运输的发展必须适应生态环境和经济发展的需要，必须响应社会对零排放的呼唤。正因为如此，既诱人又令人困惑的电动汽车在走过了漫长而艰难的历程之后，终于步入了成功之门。

詹姆斯·A·华伦(James A. Wren)

美国汽车制造商协会专利部

作者简介

厄内斯特·H·威克费尔德博士年方十几便为一家周报专栏撰写文章。后来他开阔视野，接受高等教育，在密执安大学获文学学士、理学硕士和电气工程博士学位。

威克费尔德博士曾被通用电气公司和西屋公司雇佣；在田纳西大学教授过电力工程学课程；他志愿入伍，在密苏里州的科劳得军营受过军事训练；他还在麻省理工学院和芝加哥大学分别从事关于雷达和物理学方面的研究，并被选派到芝加哥大学曼哈顿工程(原子弹工程)物理部工作。今天，他还在悉心写作，乐此不疲。

第二次世界大战结束后，他创建并经营了一家世界级核器械公司，在斯科基，伊利诺伊、伯克利、加利福尼亚都有他的工厂，产品销往国内外。后来他又在菲律宾和海地建立核器械工厂，在当地雇佣工人。他继而独立提出了频率和脉宽调制概念，将直流电转化为可变频率的三相交流电，这一技术目前广泛应用在电动汽车中。为了将这一概念付诸实践，他亲自设计并制做电动汽车。与此同时，威克费尔德博士开始从事汽车方面的写作工作，于1977年写成了《消费者的电动汽车》一书。

威克费尔德博士游历过56个国家，在20多个国家讲学，并参加了西北大学的非洲发展项目和物理学项目，长达40多年之久。在此期间，他从未间断过写作。

威克费尔德博士的作品涉及范围很广。在核领域，他于1957年编写了《大学和工业核反应堆》一书；在企业与经济领域，他撰写的论文涉及非洲、西南太平洋地区和加勒比地区等第三世界国家。

在史学领域，威克费尔德博士最近完成了50本小册子的编辑工作，小册子的标题为《美国内战系列故事》。其中有一本题为《目比尔港湾战役》，写于1988年，另一本是1992年所作的《灯塔永远明亮》。为了方便使用文字处理机的作家，他还撰写了关于系谱学的著作。

在文学领域，威克费尔德博士于1953年完成了《渔夫帐篷里的珍宝》一书。他还利用自己四十多年进行核能工作的经历，记载了核冬天这种罕见现象。此外，他还写成了一部长达三卷的爱情故事。



古斯塔特·特鲁夫
1881 年组装了第一辆电动车辆
(资料来源: H. Munn & Co.)

前言

这部书讲述电动汽车的发展历史。1976年，美国国会因为认识到了石油短缺和美国城市日益严重的空气污染问题，所以推翻了总统的否决，通过了“电动车辆及混合车辆研究、开发与演示法案”。国会并对“电动车辆”及“混合车辆”这两个术语加以区分，前者指的是只用电作为动力的电动车辆，后者指的是混合使用电池动力及其它动力源的车辆。这部书只讲述电池动力车辆及其部件的历史。笔者正在撰写另外一部书，专门讲述各色各样混合动力电动车辆的发展史，包括电池与弹簧、内燃机、飞轮结合的电动车辆，太阳能蓄电池电动车辆，燃料蓄电池电动车辆及各自特有的部件。由于电池、控制器和电机是两类电动车辆共有的部件，所以这些部件的发展史只在此书中讲述。

在以上两类私人汽车的研究上各投入了多少时间，谁也说不准，也许投入的时间是相等的。目前的趋势是，对电池动力车辆的研究要多一些，而对多种动力电动车辆好像不那么重视；两个研究方向具有同样悠久的历史，但谁也无法预料将来电动车辆会朝其中哪个方向发展。

在很多人眼里，电动汽车既浪漫又神秘，具有很强的吸引力。今天，电如此广泛地用于人们的生活之中，因此，人们不断情不自禁地问，为何不用电驱动私人汽车呢？到目前为止，还没有人撰写电动汽车史的书，所以笔者搜集了有关资料，编写成书，供人们参考。幸运的是，笔者在过去四十多年里，亲身参加了新兴电动汽车工业的构想、设计、建设、市场分析、及筹措资金工作。这本书倾注了笔者的爱和心血，回顾了电动汽车工业所经历的漫长岁月，希望写得客观准确，并企望以此给世界各地的城市带来清洁的空气。

电动汽车是有关机械、电力、磁力和化学定律巧妙结合的产物，这些定律在完全正常的作用下，私人电动汽车便诞生了。这本书描述并说明这些定律如何应用到车辆、充电器、电池或其它动力源、控制器、电机、变速器和车轮中，并介绍了应用这些定律的先驱。

由于在电动汽车中所应用的物理原理之多，又没有人精通这些原理的各个方面，所以，很多技术只在书中简略提到。但有心的读者完全可以从书中及注释、附录和阅读书目中抓住电动汽车的主要原理。

《电动汽车发展史——电池动力车辆》分为五个部分。首先在绪论里简要介绍在最早几百年里，尤其是在对电现象作定量试验期间，人们如何获取有关电动汽车知识的。由于应用了新技术，第一辆电动车辆最终于1881年诞生了。接着探讨法国、英国分别开发的两辆电动汽车，然后讲述美国电动汽车的早期发展。这一部分还对汽油车、蒸汽车和电动汽车动力系统作了比较和评价，最后简要叙述汽车、充电器、动力电池、控制器及直流发电机的发展史。这个时期机动车的设计与大蓬马车相似。难怪人们称它们为“不用马拉的车”。

第二部分讲述1900年到1935年期间电动汽车的发展情况。从1902年起，电动汽车便呈现出现代汽车的造型，发动机安装在车身前部。汽车车身一般是封闭式的，以便保护乘客，不受恶劣天气的影响。这个时期也目睹了商业电动汽车的兴衰。从1902年到1912年十年间，私人轿车和工业卡车的设计都取得了卓越的成效，同时，这十年也是公司倒闭的高峰期，任何

一个公司都有成功的希望和失败的危险。

钢圈木轮首先被实心橡胶轮胎所取代，继之而来的是充气轮胎、钢丝轮辋，不久，钢丝轮辋也被淘汰，取而代之的是冲压钢轮以及铸铝轮辋。这样，轧带这个轮胎最大的问题得以解决，轮胎经久耐用，寿命延长。原来为马车车厢式的车架在设计、制造方面都得以改进；车身也从马车车篷式发展成为当今的构架；油灯一步一步地换成了汽灯、白炽灯、高效节能灯；制动器经历了轮圈摩擦式、鼓式到盘式的演变过程；动力传动由链条传动系统演变成了差速器系统；为了使表面光滑，采用滚子轴承；润滑采用高新技术如油脂和机油。所有这些进步使西方世界步入了汽车文明的时代。与此同时，为了满足汽车的需要，许多国家开始了大规模的道路建设工程，并一直延续到今天。

第三部分介绍电动汽车的萧条时期(1935—1955年)，为讨论复苏时期提供背景知识。这部分分析了电动汽车停产而燃油机汽车占领市场的主要原因。

第四部分讲述20世纪60年代初期世界各国设计的具有革命性的现代化驱动系统。这种系统应用了固态电子、三相交流电和高效蓄电池等各种技术，向世界展示了新技术的威力。这一部分还讲述了进入路试阶段的各种高新技术。

第五部分主要是十个附录、词汇表和索引。

最后值得一提的是，从1881年至今，有很多人预言，电动汽车会成为重要的私人汽车，但他们几乎都错了。美国及全世界电动汽车的发展实况究竟如何，都详细地记载于本书之中。

目 录

序 言	(I)
作者简介	(I)
前 言	(IV)
绪 论	(1)
第 1 章 最早的两辆电动车辆	(12)
第 2 章 美国“不用马拉的车”: 1890—1898 (I)	(21)
第 3 章 电动车辆问世的背景	(33)
第 4 章 电动车辆的首次商业应用	(40)
第 5 章 美国“不用马拉的车”: 1890—1900 (II)	(52)
第 6 章 1900 年前英国的电动车辆	(63)
第 7 章 1900 年前法国、比利时和德国的电动车辆	(73)
第 8 章 电动汽车的发展阶段	(89)
第 9 章 电动汽车的黄金时代	(97)
第 10 章 充电器和电池的发展	(108)
第 11 章 新型电池和燃料电池	(119)
第 12 章 电流控制器与电动机的发展	(144)
第 13 章 1900—1935 年间的电动汽车	(159)
第 14 章 两家经久不衰的电动汽车公司	(168)
第 15 章 早期的电动车赛	(175)
第 16 章 电动汽车设计的发展	(185)
第 17 章 电动汽车的沉睡时期: 1935—1955	(189)
第 18 章 电动汽车重获新生: 1955—1965	(195)
第 19 章 交流电驱动系统电动汽车: 1966—1992	(201)
第 20 章 20 世纪 70 年代初改装的电动汽车	(223)
第 21 章 新概念电动汽车	(235)
第 22 章 其它国家现代电动车辆的发展 (I)	(246)
第 23 章 其它国家现代电动车辆的发展 (II)	(265)
第 24 章 1965 年以来美国电动汽车大事记	(294)
第 25 章 尚待解决的问题	(309)
第 26 章 几点思考	(311)
第 27 章 一个世纪电动车辆的发展趋势	(314)
阅读书目	(323)
附录	(326)
附录 A 电动汽车商业化	(326)

附录 B 电动汽车的三相感应电动机及控制 (334)

附录 C 美国电动汽车名称表 (342)

附录 D 昔日的回顾 (347)

附录 E 电动汽车发展大事记 (350)

附录 F 加州理工学院-麻省理工学院电动汽车竞赛 (353)

附录 G 国会议员麦克·麦科梅克关于 1976 年电动车辆法案的报告 (354)

附录 H 评 1976 年美国电动车辆法案 (355)

附录 I 早期电动车辆竞赛 (358)

附录 J 狐谷电动汽车协会秘书威廉·H·夏菲尔的一封信 (362)

绪 论

研制电动汽车之前有关科学知识的积累

在开发电动汽车之前，首先必须具备合适的驱动系统和经久耐用的轮胎两个条件。下文将叙述电动汽车出现以前有关电学、橡胶轮胎及电动汽车的前身——两轮车和三轮车的发展情况。只有在允许科学研究自由、信息交流自由的社会条件下，才会发生下文所叙述的巨大变革。在此基础上，本书的前几章记述世界对电动汽车知识的积累过程以及继而开发出的电动汽车，而下文所讲述的内容是本书全部内容的基础。

研制电动汽车之前有关电学知识的积累

古代人对天然磁铁或天然磁石的特有性能就有所了解。早在公元1000年，欧洲航海家就利用悬挂磁铁为他们导航，使他们能够在远离海岸的空旷海域安全航行。1269年，即第七次基督教运动失败那一年，彼德鲁斯·马可特(Petrus Marcourt)就对天然磁石作过最早研究。他把一块天然磁石做成球体，在球体不同的点上按次序放上磁针，标出指向，这些指向点联接起来，所形成的经线相交于两点，便得出了磁铁两极的概念。

1600年，英国伊利莎白女王的保健医生威廉·吉尔伯特(William Gilbert)的《磁体》一书出版。吉尔伯特不仅论述了地球是一个磁体，而且论述了两种物质摩擦会产生静电，他还将磁力现象与静电加以区分，并首先运用了“电”这个词。他把呈现出电特征的物体叫“带电体”，这个词源于希腊语里的 *elektron* (电子) 一词，这个词在希腊语里代表琥珀这种物质，它与毛皮摩擦便会使两者都产生电。然后，奥托·冯·库克(Otto von Guericke)于1660年发明了静电摩擦机，这种机器在同轴旋转的一个玻璃圆盘上贴有一些物质，比如毛皮，该仪器用来给两个具有一定间隙的导电球体充电，并能保持一定的电压。英国的史蒂芬·格雷(Stephen Gray)继续了吉尔伯特的实验，于1729年发现了导电体，并论述了导电能力只与表面积有关，而与体积无关。1733年，查尔斯·弗兰科·西斯特内·杜斐(Charles Francois de Cisternay Du Fay)描述了电具有的两种力：吸引力和排斥力。依沃尔德·乔治·冯·克理斯特(Ewald George von Kliest)和彼得·冯·莫什布鲁克(Peter von Musschenbroek)继续进行科学实验，在1745到1746年间发现，电可以储存在装有铜丝或水银的玻璃瓶里，再把电放出，可以使小动物触电死亡^[1]。根据这一实验结果，格鲁拉特(Grolatt)在莱顿大学发明了广为人知的莱顿瓶，也就是今天的电容器。

1752年，美国人本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin)提出闪电类同于电，他证明了闪电散出的火花象摩擦机冒出的火花一样能够引起酒精燃烧，并且把正(+)负(-)符号用于电学中。一向重视公众舆论影响的富兰克林继而广泛宣传电现象，从而使科学得到人民大众的支持。英国化学家约瑟夫·普雷斯特莱(Joseph Priestley)运用富兰克林的理论，证明了一个空心的电容器通电后，对容器内部没有电场力的作用，这个现象今天被称为屏蔽。根据诸如此类的实验，普雷斯特莱引出了负二次方定律，这一定律与牛顿1680年发现的万有引力定律相

同。1769 年,詹姆斯·瓦特(James Watt)大大提高了蒸汽机的效率,为尔后开发电机奠定了重要基础。18 世纪末 19 世纪初,亨利·卡文第(Henry Cavendish),查尔斯·奥古斯丁·库仑(Charles Augustin Coulomb)及西门·丹尼斯·泊松(Simeon-Denis Poisson)在普雷斯特莱的研究基础上,取得了新的进展。泊松把数学理论应用到电磁场;1777 年,库仑发明了扭力天秤,从此能够定量地描述电荷,1785 年终于创立了库仑定律。

在意大利的波隆那,解剖学教授伽伐尼(Luigi Galvani)观察到,当几种金属做成的探针碰到青蛙的腿时,能引起肌肉抽搐。1791 年,伽伐尼把自己从事蛙腿痉挛的研究成果写成论文发表,把这种驱动力解释为“动物电”,当然这并不正确。意大利帕维亚大学的亚力山大·伏打(Alessandro Volta)得知这一实验后认为,这种试验结果是两种不同金属探针与青蛙体内液体发生反应造成的。1800 年,伏打在实验过程中,在一个铜盘和一个锌盘之间放一张浸在盐水里的吸水纸,这个装置就是自古以来最伟大的发明之一——蓄电池(见第 10 章)。于是从伏打的电池里便有电源不断地流出。在此以前,带电体只有在放电时才会产生电流。伏打还发现把电池并联可以产生更大的电流,把电池串联可以得到更高的电压。威廉·尼古松(William Nicholson)和安东尼·卡利斯(Anthony Carlisle)在写给英国皇家协会主席约瑟夫·班科斯(Joseph Banks)的信中,谈到伏打 1800 年的研究工作时说,在十天之内,可以通过电流的作用,将水分成氢和氧,就这样电化学诞生了。紧接着,休弗雷·戴维(Humphrey Davy)爵士分解出了钾和钠。1801 年,他把电池串联在一起,创造了白炽电弧光源。在此基础上,威廉·克鲁克(William Crooke)先后发明了气体放电灯管和日光灯。戴维爵士不仅是个科学家,而且还利用星期日晚上在伦敦开设免费讲座。

戴维爵士还于 1813 年做了一件最英明的事情,就是任命麦克尔·法拉第(Michael Faraday)为他的助手^[2]。法拉第(见图 P. 1)是个铁匠的儿子,本来是书店的装订工。有一次他听了戴维爵士的讲座,并作了详细笔记,回家后列出图解,再把讲座的内容连同图解一起整理装订成一本小册子,赠送给他的老师戴维爵士。戴维爵士深受感动,便雇佣法拉第为助手。起初他只是在实验室里刷洗瓶子,后来有一次,戴维爵士要赴欧洲各国游历讲学,也邀请法拉第一同前往。对法拉第来说,这是一次极好的机会,他拜访了欧洲科学巨人并参观了他们的实验室。法拉第便逐渐成长为真正举世闻名的伟大实验科学家之一,他的成果不



图 P. 1 麦克尔·法拉第(1791—1867),这是 J. Cochran 的版画作品,作于 1830 年

资料来源:Scientific American, 1991 年 10 月,第 129 页

能在此一一讲述，只能列举一二。他不仅发现了载流体之间的自感和互感(美国的约瑟夫·亨利(Joseph Henry)也独立观察到了这个现象)，而且于1821年发现，通过利用电磁作用能够得到旋转力。法拉第的这一发现为以后电机的发明铺平了道路(见图12.6)，也为交流电、变压器、电报机及感应电机奠定了基础。交流电目前不仅在全世界广泛应用，而且作为现代电动汽车的动力源，比直流电要好得多。法拉第还于1844年发表了电力线和磁力线概念，其重要性将在以后的章节里说明。

1820年，丹麦科学家汉斯·克里斯丁·奥斯特(Hans Christian Orsted)发现安装在枢轴上的罗盘针在靠近载流导体时会旋转到与该导体垂直的位置，将罗盘针从载流导体的上方移至下方，指针会旋转180°。同年，法国物理学家安德烈·马理·安培(Andre-Marie Ampere)演示了两根导线在通电电流方向相同时会互相吸引，方向相反时互相排斥。1824年，多米尼克·弗朗西斯·阿拉果(Dominique Francois Arago)应用法拉第原理，演示了与磁针同轴安装的旋转铜盘的感应现象，磁针也会跟着铜盘旋转。1825年，威廉·斯图金(William Sturgeon)做成了第一个电磁铁，电磁铁由一根长铁棒缠绕绝缘载流导线做成，同时他还注意到铁棒会加强磁场，尔后又于1836年发明了电流计。1827年，德国科学家乔治·西蒙·欧姆(George Simon Ohm)发表了电路中不同的电阻对电流影响的试验结果，创立了描述电流、电阻和电压关系的欧姆定律。欧姆定律是当今每一个学物理和工程专业的学生必须牢牢掌握的知识，用 $V=IR$ 表示，其中 V 代表电压， I 代表电流， R 代表电阻。

竞相发明电动机/发电机

法国人西伯莱特·皮克斯(Hippolyte Pixii)了解法拉第把载流导线置于磁场中的合适位置便会产生旋转运动的理论，于1832年9月3日在巴黎科学院演示了电机的工作原理，这便是电机的首次亮相。同年，卡尔·弗雷德雷斯·高斯(Karl Friedrich Gauss)确立了一系列磁现象的测量单位，且于1833年制做了一台电报机。

美国人托马斯·达文波特(Thomas Davenport)读了法拉第的试验结果报告后，于1836年制做了第一台实用的电机，用来驱动车床，如图12.9所示。从此，电的重要性和通用性也逐渐得到广泛认可。1838年，在沙皇尼古拉一世的支持下，出生在德国的物理学家莫里茨·雅可比(Moritz Jacobi)与英国人W. R. 格鲁弗(W. R. Grove)合作，在俄罗斯圣彼得堡前的涅瓦河上试运行了电动叶轮船。^[3]

19世纪中期，还有以下一批杰出的科学家清楚地解释了一些物理现象，为电的实际应用作出了较大的贡献。他们当中有弗兰茨·欧尼斯特·纽曼(Franz Ernst Neumann)、威廉·爱德华·韦伯(Wilhelm Eduard Weber)、H. F. E. 楞次(H. F. E. Lenz)、威廉·汤姆生爵士(Sir William Thomson)，也就是开尔文勋爵(Lord Kelvin)，还有詹姆斯·蒲莱斯哥特·焦耳(James Prescott Joule)、赫曼·冯·赫尔姆霍兹(Herman von Helmholtz)、乔治·伽伯里尔·斯多克斯爵士(Sir George Gabriel Stokes)、佳斯塔夫·基尔霍夫(Gustav Kirchhoff)等。今天，科技工作者和工程师们都熟知这些名字。1856年，韦伯和他的助手鲁道夫·科劳西(Rudolph Kohlrausch)确立了电磁单位的比值。第二年，基尔霍夫和韦伯的实验证明，电线上电的扰动是以光速传播的。接着在1860年，也就是美国独立战争的前一年，电磁学与光学被确认是两门相关的科学。

法拉第的实验对欧美科学家有很大影响。那么，如何才能研制出大功率的电动机和发电

机呢？皮克斯曾在这方面做过开拓性的工作。到了 19 世纪中期，大批科学家和工程师作出了不懈的努力，竞相开发电动机和发电机这种“灵丹妙药”，使机器运转，生产出商业产品。研制电动机和发电机的问题实际上是如何将铜线、磁铁和电阻这三个物理元件最佳组合的问题。奥古·古尔朗特(Aug Guerront)用图文重点讲述了电动机和发电机研究热的情况(见阅读书目)，这里只举其中几例。斯多尔(Stohrer)于 1843 年发明了手摇发电机^[4]。1845 年，查尔斯·惠斯登爵士(Sir Charles Wheatstone)把第一块电磁铁放在直流发电机内^[4]，后来他又研制出了惠斯登电桥，用以精确地测量电阻。鲁科夫(Rumkorff)也研制出了一台手摇发电机^[4]。1862 年，英格兰肯特郡南部海岸的灯塔上安装了电弧灯取代油灯；1863 年，在法国哈弗耳港口也安装了电弧灯。这里使用的是西伯莱特·皮克斯组装的直流发电机。在室内照明方面，保尔·雅布洛科夫(Paul Jablochhoff)以戴维爵士的研究为基础，用陶土做的空心圆筒把电弧灯罩起来^[5]，于是圆筒呈炽热发光、半透明状态，从而扩大了辐射光谱的范围，使灯光更加柔和宜人。在此基础上，雅布洛科夫新建了一台直流发电机。美国人查尔斯·布鲁什(Charles F. Brush)把电弧光用作街灯，为美国城市阴暗的道路带来了光明。

意大利人安东尼奥·帕塞诺蒂(Antonio Pacinotti)于 1861 年发明了环形直流电机，如图 P. 2 所示^[6]，并在比萨大学进行了表演。后来环形电机和发电机成为标准产品。帕塞诺蒂是位无名英雄，因为除上述成果外，他还首先论述了电动机同时也是发电机的原理。但这一原理是另一位科学家——伽斯顿·普兰特(Gaston Plante)公布于众的^[7]。帕塞诺蒂未能享有应得的荣誉，原因是当时他必须去军队服役，而未来得及发表他的理论。1864 年，王尔德(Wilde)制造了一台直流电机。同年，英国人詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)在法拉第电力线、磁力线概念基础上，列出了一套简要明确的电磁学方程并发表，形成了电磁学的完整理论体系。1866 年，德罗密利(De Romilly)也发明了一台直流电机；1867

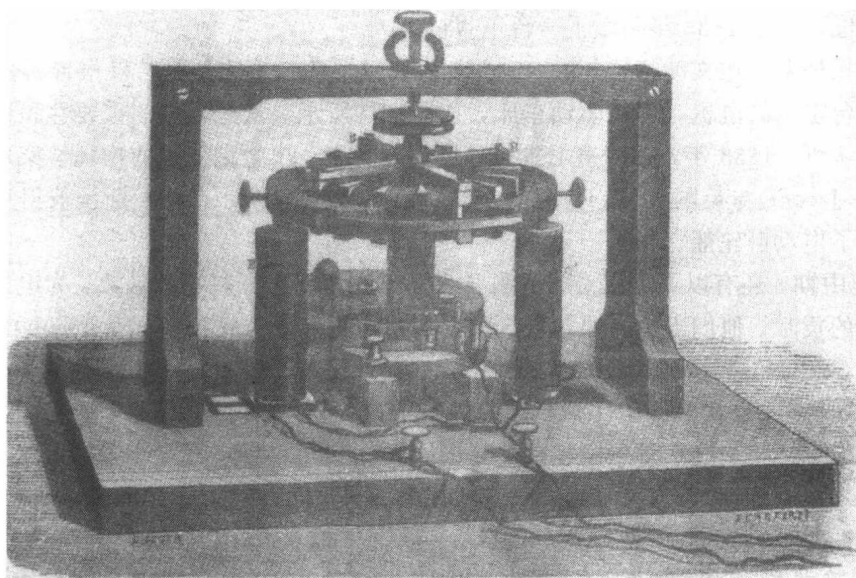


图 P. 2 安东尼奥·帕塞诺蒂发明的环形电动机/发电机
资料来源：Scientific American Supplement，第 14 卷，357 期，
1882 年 11 月 4 日，第 5696 页

年，威廉·拉德(William Ladd)制做了一台类似的电机；此时，威斯顿(Weston)也制做了一台能够作业的直流电机。

终于在1869年，比利时人泽诺比·狄奥斐尔·格拉姆(Zenobe Theophile Gramme)制造出了一台能够输出大于一马力功率(约3/4千瓦)的直流电机。这台机器象上述一些机器一样，如果施加旋转机械力便可以产生电；如果把电池接在输出电缆上，便会产生机械力。格拉姆的机器既可作发电机，也可作电动机，正好符合帕塞诺蒂的理论，见图10.6。当时，蒸汽是火车、客车和工业的主要动力源，而格拉姆第一个将蒸汽用来带动发电机发电，如图P.3所示。有了这种技术，便有可能提供大量电力，远远超过电池所能提供的有限电力。除上述科学家外，值得一提的还有威廉·西门子(William Siemens)和弗莱德瑞克·西门子(Friedrich Siemens)兄弟，他们出生在德国，但因为英国的专利法对他们更有利，所以自愿加入了英国籍。1870年，他们开发出了双T型绕组电机^[8]，而且还为提高蒸汽机的利用效率做出了重要贡献。在工业应用方面，发电机首先被用来为珠宝镀镍和银^[9]。

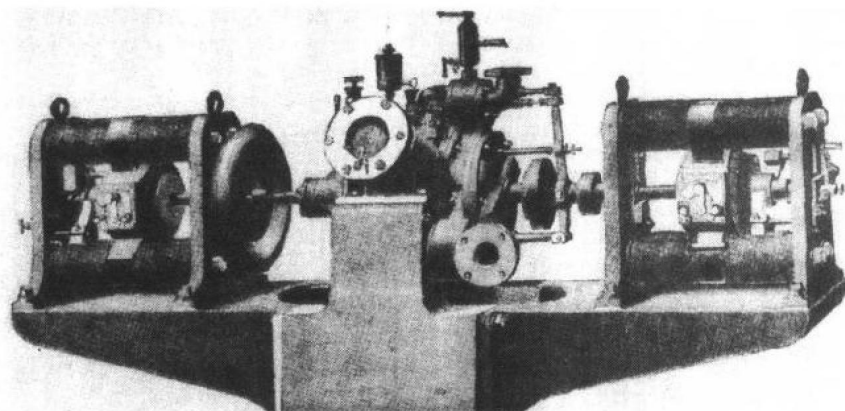


图 P.3 格拉姆的蒸汽机带动两个相同的发电机
资料来源: Scientific American Supplement, 第13卷, 327期,
1882年4月8日, 第5207页

历史上有这样一件有趣的故事，就是在美国南北战争期间，新奥尔良州支持南部联盟的人士试图利用电机来建造一艘电池动力潜艇，此项计划虽未成功，但南部联盟所用的鱼雷(现在也叫水雷)大大摧毁了联邦军队的炮艇^[10]。这一历史事实说明，在1861—1865年美国南北战争期间，正当美国政府经受严峻的政治考验时，南方的实验革新者是多么有创新精神。

1879年，美国人托马斯·阿尔伐·爱迪生(Thomas Alva Edison)用竹竿作灯丝，英国人约瑟夫·斯旺(Joseph W. Swan)使电灯更加完善。接着，爱迪生便着手进行电的基础设施建设工作，在纽约市珍珠街建成了直流电发电与输配电系统^[11]。而出于商业目的安装的第一批电灯是在船舶上。那是在1879年，一艘叫“詹尼特”的远征汽船要到俄罗斯弗兰格尔岛附近的北极海域探险，报社巨头詹姆斯·戈登·班尼特(James Gordon Bennett)担负费用，在船上安装电灯^[12]。船上的发电机和照明系统正常工作了两年之后，船只不幸撞击冰块。1879年，美国加利福尼亚电灯公司在三番市成立。1882年1月12日，英国伦敦建起了输电系统，为3000盏电灯供电，这个系统运用了爱迪生的大型发电机，发电机由阿明顿-西姆斯公司生产的蒸汽机驱动。应该知道，电灯大概是现在运用最为广泛的电器^[13]。

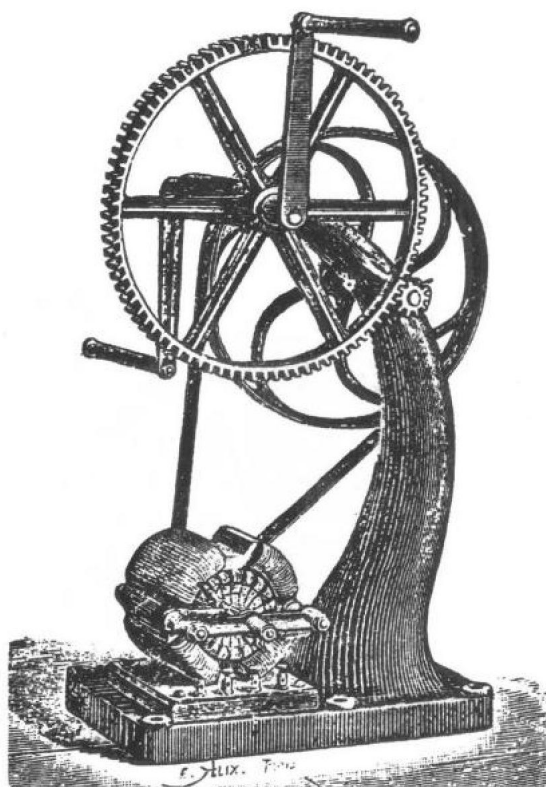
1881年,法国人古斯塔夫·特鲁夫(Gustave Trouve)在巴黎的塞纳河上驾驶了一艘舷外电机电动船,也是第一艘舷外电机电动船。同年,他又在莱特城的街道上驾驶了第一辆电动车辆。1882年,德梅里森(de Meritsen)开发了两台小型直流电机。其中一台见图P.4。后来,阿尔伯特·狄桑蒂尔(Albert Tissandier)和加斯特·狄桑蒂尔(Gaston Tissandier)两兄弟驾驶了一艘电动飞艇,飞艇的直径为 30×10 米,里面充进了1060立方米的氢气,在风速为零的情况下,飞行速度可达到每小时10公里。这样,在1881到1883年间,电机便成为在蒸汽机以后第一种动力源,使人能够在陆地、海上、空中遨游。

除此以外,伏打式电池还在实验过程中,第十章将详细讲这个问题。不久,两种主要电池——一次性电池和多次性电池,便开发出来了。伏打电池与1804年C.H.威尔金森(C.H. Wilkinson)开发的电池一样^[14],是一次性电池,一个极板用尽,另一个极板也得更换。法国化学家和电学家乔治·雷克兰(Georges Le Clanche)开发了最早的一次性碱性电池。众所周知,一次性电池不容易充电。不过,可以用直流电充电的多次性电池很快就开发出来了。到目前为止,最成功的多次性电池是1859年法国化学家伽斯顿·普兰特(Gaston Plante)构想出来的。经过他改进的铅-酸电池(见第10章)是目前使用最广泛的电池。第一辆电动车辆采用的就是普兰特电池和经过改进的西门子电机。

交流电机/交流发电机的问世

出生在克罗地亚的大学生尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla)1880年在奥地利的格拉茨大学对格拉姆电机进行实验时,产生了一个革命性的思想。他用新方法使用三个正弦交流电,使它们的电相位差为 120° 。如果定子磁铁上缠绕导线合适,就会产生旋转磁场。如果将导电的铁转筒同轴地安装在定子内,产生的感应力使其成为三相交流电机,也就是今天众所周知的交流感应电机。相反,如果用经过适当缠绕的转子替换转筒,通过两个滑环向转子提供直流电,用机械能转动便得到三相交流电。这实际上是应用了格拉姆电机的原理,只是设计不一样,电机在交流方式下运行。

特斯拉进一步发展了上述思想,并申请到国际专利。然后他来到巴黎,希望受雇于巴黎爱迪生工厂^[15]。1884年特斯拉带着一封推荐信和他的设计图移居美国,并在新泽西爱迪生工厂寻求职位,特斯拉向伟大的发明家爱迪生呈现他的三相交流电发明时,爱迪生对这个年轻人的话充耳不闻。特斯拉大失所望,只好来到匹兹堡找乔治·威斯汀豪斯(George Westing-



图P.4 1882年,也就是第一辆电动车辆组装成功的第二年,德梅里斯发明的双手摇电机,可以看出发电需要的人力。齿轮装置和皮带装置说明了发电机的旋转速度高