电力电子技术在电力系统中的应用

DIANLI DIANZI JISHU
ZAI DIANLI XITONG ZHONG DE YINGYONG

戴卫力 费峻涛◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

★★★电力电子技术★★★
在电力系统中的应用

戴卫力　费峻涛　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书首先以人类如何利用能源的视角简要地回顾了电力技术的发展概况，对交、直流电机和变压器的形成与发展进行了简单的梳理，并讲述了直流电力系统和交流电力系统的发展以及电力电子技术对电力系统各环节的影响以及未来电力系统的发展趋势。在此基础上，对电力系统中相关电功率的概念、定义、相量分析法、坐标变换以及*p-q*功率分析理论进行了简单的介绍和探讨；在分析谐波产生原因的基础上，就先进控制理论在有源滤波中的应用进行了简明扼要的分析与介绍；同时简单介绍了新型的电力传输技术、高压直流输电系统与柔性交流输电系统，并比较了它们各自的技术特点；紧接着，讲述了光伏发电系统与风力发电系统的分类、系统构成及控制方法；介绍了各种新型的储能形式以及分布式发电系统和微电网的构成与特点；最后，简单介绍了电力系统中的计算机仿真技术，主要介绍了 MATLAB 和 PSCAD 的基本使用方法。

本书基本涵盖了在电力系统中应用的相关电力电子技术，内容翔实，可作为高等院校电气工程及自动化专业和相关专业的本科生选修课程用书或研究生教学用书，也可作为从事电力系统设计、电力电子装备研制和运行管理等方面工作的相关技术人员或工程师的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

电力电子技术在电力系统中的应用/戴卫力，费峻涛编著. —北京：机械工业出版社，2015.2
ISBN 978-7-111-49275-7

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①戴…②费… Ⅲ. ①电力电子技术－应用－电力系统－研究 Ⅳ. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 023981 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：张俊红 责任编辑：吕 潇
版式设计：赵颖喆 责任校对：张 征
封面设计：马精明 责任印制：李 洋
三河市国英印务有限公司印刷
2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm · 14.5 印张 · 357 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-49275-7
定价：45.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：010-88361066	机工官网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-68326294	机工官博：weibo.com/cmp1952
010-88379203	金书网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版	教育服务网：www.cmpedu.com

前　言

从发现电磁现象开始，人类就一直在探索如何高效地利用电磁能量来改造自然世界和提高生活品质，从而推动生产力的发展。从伟大的迈克尔·法拉第发现电磁感应定律，并研制出世界上第一台发电机开始，人类就逐步从詹姆斯·瓦特铸就的蒸汽机时代迈向了电气时代。迄今为止，电能一直是被我们所推崇的终端能源形式，自然界中的任何能源，包括太阳能、风能、石油、煤炭、潮汐、声音的波动以及核能，都可以通过相应的光—电、机—电以及压—电等形式转换变成电能，以供各类负载使用，人类开发自然能源和提高其利用率的脚步一刻都不会停歇，并且还会一直持续下去。

人类最早大规模利用自然能源开发电能，主要采用的是机电能量转换装置。主要的机电能量转换装置有旋转电机和静止变压器。旋转电机可用于火电、风电、潮汐海浪发电等发电系统，而静止变压器则大多应用于输配电系统，承担着传输电能与电压变换的作用。早期的电力系统架构为美国爱迪生提出的直流输电系统，主要用于照明供电。当时，受到材料和拉伸生产技术与工艺的限制，制造的灯泡灯丝较粗，使得灯泡的耐压不能很高。因而，早期的电力系统大多设计成 110V 低压直流输电系统。该系统由于当时的技术条件而存在诸多缺陷：由于直流无法实现变压（即进行提高电压后传输）从而使得长距离传输电能变得异常困难，必须每隔一段距离增加相同容量的发电机组来弥补线路上的电压损失，因而投资巨大且可靠性低。交流电的出现，使得电压变换变得相对容易，通过电力变压器就可将发电机输出的交流电压进行提高，从而实现电能的远距离传输。

电力电子学的诞生和发展推动了电力系统的进步和技术革新。面对能源危机，在倡导可持续发展和绿色能源的今天，光伏、风力发电等新能源发电技术，新型高压直流输电与柔性交流输电技术、有源滤波、无功补偿等谐波治理，以及分布式发电与储能技术等均建立在电力电子相关技术的基础之上。可以预见，电力电子技术正以令人难以置信的迅猛速度逐步深入到国民经济的各个领域，发挥着重要的作用。

本书是作者近年来在讲授 IT 专业选修课程“电机运动控制简史及发展趋势”、“智能电网技术的发展与未来”以及“电力电子在电力系统中的应用”等课程后的阶段性总结。书中对电气学科的发展历史做了较为全面的回顾，对涉及电力系统的相关分析理论做了初步的梳理。在此基础上，结合当前电力系统的发展介绍了电力系统中相关的电力电子技术，如电能质量优化与调节控制技术，高压直流输电与柔性交流输电技术，光伏发电、风力发电新能源技术，储

能装置、分布式发电及微网，以及电力系统中的计算机仿真技术等。

本书为体现电力系统发展过程中相关电力电子技术的主流，本着通俗易懂、深入浅出的原则，对涉及电力系统领域的相关电力电子技术进行了较为全面的归纳总结。全书遵循先整体了解学科历史与发展、并在掌握电功率基础分析理论的基础上，再逐一介绍相关技术的原则进行编写。经过编者的多次商榷探讨，最终全书共分 7 个章节，较为全面地介绍了相关领域内的专业知识。在撰写安排上，全书的大部分章节由戴卫力副教授进行编写整理，其中，费峻涛教授在总结自身研究成果的基础上完成了书稿的第 3 章。研究生唐伟、侯世玺、丁骏、马凯琪、田浩，本科生荀倩、任亮亮、刘晨和薛伟民等同学完成了本书中的第 3 章、第 5 章和第 7 章中的部分仿真工作，并进行了相关的整理和校对。全书由戴卫力老师进行了统稿与校验工作。同时，为了便于各位老师的教学工作，本书专门配备了电子课件。凡选用本书 30 册及以上作为教材的授课老师，我们都会免费赠送电子课件，联系的电子信箱是 buptzjh@ 163. com。

在撰写本书的过程中，得到了许多老师、同学，还有社会各界人士的无私帮助。在此，致以诚挚的谢意。感谢相海涛博士提供了部分光伏发电的参考资料，感谢研究生侯世玺、唐伟、丁骏、田浩、马凯琪，本科生荀倩、任亮亮、刘晨以及薛伟民所做的仿真工作以及文稿排版和文字图形校对工作。同时，本书在编写的过程中参考了大量近年来出版的专业书籍和发表的专业论文及其他相关资料，在此对参考文献的各位作者表示衷心的感谢！另外，由于编者平时还承担了大量的教学工作，使得本书的成稿时间一再后延，出版社的张俊红老师从中协调，给予了充分的理解，在此一并表示感谢！

尽管作者试图对应用于电力系统中的相关电力电子技术做个全面、准确和详细的阐述，但限于编者的理解能力、专业水平和经验，加之投入撰写的时间有限，书中难免存在错漏之处，在此，恳请广大同行、读者能够谅解，并给予批评指正。

编者于常州

目　录

前　言

第 1 章　电力技术发展简史与趋势 …… 1

★ 1.1　电磁学的发展 …… 2

1.1.1　直流电机的产生和发展 …… 2

1.1.2　交流电机的产生和发展 …… 6

1.1.3　变压器的产生和发展 …… 7

★ 1.2　电力系统的形成和发展 …… 14

1.2.1　直流电力系统的形成和发展 …… 15

1.2.2　交流电力系统的形成和发展 …… 16

★ 1.3　电力电子技术对电力系统的影响 …… 18

1.3.1　发电领域 …… 18

1.3.2　输配电领域 …… 19

1.3.3　用电负载领域 …… 20

★ 1.4　电力系统的发展趋势 …… 20

★ 1.5　本书主要内容 …… 22

第 2 章　电功率基础分析理论 …… 23

★ 2.1　单相交流系统 …… 23

2.1.1　正弦条件下的功率分析法 …… 23

2.1.2　相量分析法 …… 24

2.1.3　非正弦条件下的功率分析法 …… 28

★ 2.2　三相系统中的电功率 …… 31

2.2.1　三相系统的分类 …… 31

2.2.2　对称分量理论 …… 32

2.2.3 三相对称系统中的功率 …… 33
2.2.4 三相不对称系统中的功率 …… 35
★ 2.3 坐标变换 …… 35
2.3.1 坐标变换的数学基础 …… 36
2.3.2 $\alpha\beta$ 坐标系统 …… 37
★ 2.4 剔除零序分量时的电压和电流矢量 …… 39
★ 2.5 p-q 功率基础理论 …… 41
2.5.1 三相三线制系统 …… 42
2.5.2 三相四线制系统 …… 45
★ 2.6 本章小结 …… 48

第 3 章 电能质量优化与调节控制技术 …… 49
★ 3.1 谐波的产生和危害 …… 50
3.1.1 谐波的产生 …… 50
3.1.2 谐波的危害 …… 51
★ 3.2 谐波的治理 …… 51
★ 3.3 无源电力滤波器 …… 52
★ 3.4 有源电力滤波器 …… 52
★ 3.5 谐波电流检测、跟踪补偿控制和直流侧电压控制技术 …… 56
3.5.1 谐波电流检测技术 …… 56
3.5.2 跟踪补偿控制技术 …… 58
3.5.3 直流侧电压控制技术 …… 59
★ 3.6 有源电力滤波器的模糊控制 …… 60
3.6.1 模糊 PI 复合控制 …… 60
3.6.2 模糊控制器的设计 …… 60
3.6.3 有源电力滤波器的仿真 …… 62
★ 3.7 有源滤波器电流自适应控制研究 …… 67
3.7.1 有源电力滤波器的动力学模型 …… 67
3.7.2 模型参考自适应控制 …… 69
3.7.3 仿真模型的建立及仿真结果与分析 …… 72
★ 3.8 本章小结 …… 81

第 4 章 新型电力输电技术 …… 82
★ 4.1 直流输电与交流输电系统的性能比较 …… 83

4.1.1 传输性能比较 …… 83
4.1.2 经济性比较 …… 84
★ 4.2 高压直流输电概况 …… 85
4.2.1 国内外现状 …… 85
4.2.2 高压直流输电的分类 …… 87
4.2.3 高压直流输电系统基本架构 …… 89
★ 4.3 换流器工作原理和电路分析 …… 90
4.3.1 单桥换流器运行分析 …… 91
4.3.2 双桥换流器运行分析 …… 97
4.3.3 换流器控制原理和控制特性 …… 101
★ 4.4 高压直流输电的谐波抑制 …… 104
4.4.1 增加换流桥的数量 …… 104
4.4.2 加装滤波器 …… 105
4.4.3 加装平波电抗器 …… 110
4.4.4 加装中性点冲击电容器 …… 111
★ 4.5 柔性交流输电的发展与概况 …… 111
4.5.1 国内外发展现状 …… 113
4.5.2 FACTS 控制器的基本类型 …… 115
4.5.3 FACTS 控制器的基本原理 …… 116
★ 4.6 变换型 FACTS 技术 …… 117
4.6.1 静态同步补偿器（STATCOM） …… 117
4.6.2 静态串联同步补偿器（SSSC） …… 121
★ 4.7 本章小结 …… 124

第 5 章 新能源发电系统 …… 126
★ 5.1 光伏发电系统 …… 127
5.1.1 光伏电池的等效电路和基本特性 …… 127
5.1.2 光伏发电系统用变换器 …… 135
5.1.3 MPPT 控制策略 …… 139
5.1.4 孤岛效应和反孤岛策略 …… 147
★ 5.2 风力发电系统 …… 153
5.2.1 风力机的数学模型 …… 154
5.2.2 风力发电系统的分类 …… 155

5.2.3 典型风力发电系统及其控制 …… 156
★ 5.3 本章小结 …… 165

第6章 储能系统、分布式发电系统和微电网 …… 166
★ 6.1 储能系统 …… 167
6.1.1 抽水储能 …… 167
6.1.2 压缩空气储能 …… 168
6.1.3 飞轮储能 …… 170
6.1.4 蓄电池储能 …… 172
6.1.5 超导磁体储能 …… 176
6.1.6 超级电容器储能 …… 177
★ 6.2 分布式发电系统 …… 179
6.2.1 分布式发电系统的基本概念和优势 …… 179
6.2.2 分布式发电系统的现状和关键技术 …… 181
6.2.3 分布式发电系统的基本结构 …… 182
★ 6.3 微电网 …… 183
6.3.1 微电网的基本概念和特点 …… 184
6.3.2 微电网的研究现状和基本结构 …… 185
6.3.3 微电网的基本控制方法 …… 187
★ 6.4 本章小结 …… 190

第7章 电力系统中的计算机仿真 …… 191
★ 7.1 MATLAB 仿真建模 …… 192
7.1.1 MATLAB 和 Simulink 简介 …… 192
7.1.2 S-Function 简介及其应用 …… 194
7.1.3 基于 Boost 变换器的 MPPT 仿真 …… 195
7.1.4 基于 Boost 变换器的 PID 稳压仿真 …… 199
★ 7.2 PSCAD 仿真建模 …… 200
7.2.1 PSCAD/EMTDC 仿真环境 …… 201
7.2.2 PSCAD/EMTDC 主程序结构与功能 …… 201
7.2.3 PSCAD 仿真实例 …… 202
★ 7.3 本章小结 …… 212

附录 A 换流阀内部电路仿真建模 …… 213

附录 B 控制系统电路仿真建模 …… 215

参考文献 …… 217

第 1 章

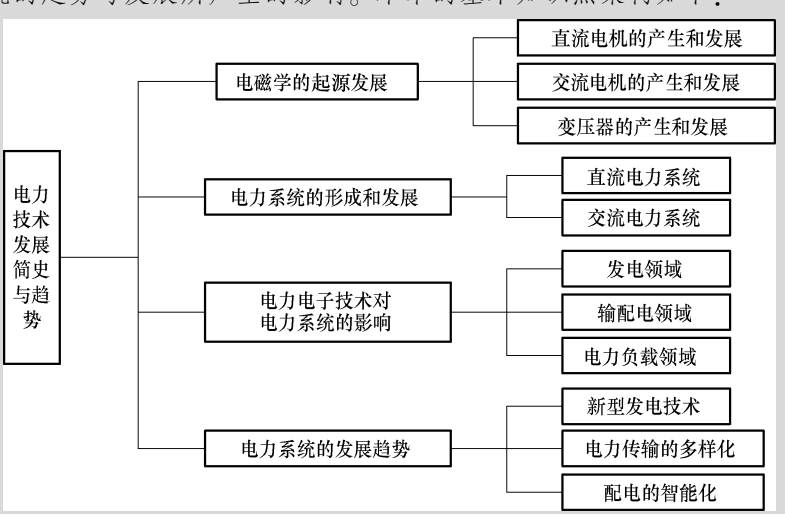
电力技术发展简史与趋势

本章引言：

人类利用开发自然界的进程经历了石器时代、青铜器时代、蒸汽时代以及如今的电气时代。科技是第一生产力，每次科技的革新都对人类的生活方式和发展带来了巨大的变革。石器和青铜器时代开创了以农业为主的经济模式；瓦特蒸汽机的发明则拉开了工业时代的序幕；而电磁感应现象的发现和电磁理论的提出，则使人类开发和利用能源进入了全新的时期，电气时代的开启彻底改变了人类以往的生活方式和社会活动，使人类的生活进入了一个更为光明和美好的新时期。了解科技的发展特别是电学发展的简史，有助于深入理解电力产生与发展的过程、预测未来能源利用与开发的发展趋势，同时，也能更为深入地了解相关知识提出的社会背景和科技探索的过程，从而加深对现有电力和能源开发体系的理解。

内容简介：

本章主要从电学发展的角度回顾了人类从发现电磁现象开始到开发和利用电能的历史进程，同时，从中见证了电力系统在发电、输变电以及电力应用等领域的技术变迁。电力电子技术的出现使人类在使用电能时更为精细、高效、安全可靠。从早期简单的低压直流供电到交流电力传输系统的推广应用，直至今天的远距离高压直流与柔性交流输电，人类从未像现在这样依赖和高效地利用电能。人类如何发展和利用电能的历史将在本章一一展现。通过本章的学习，将了解交流电和直流电的发展史、交流与直流之争以及新兴技术对未来电力系统的趋势与发展所产生的影响。本章的基本知识点架构如下：



1.1 电磁学的发展

“电”一词在西方是从希腊文琥珀一词转意而来，在中国，对“电”的认识大多始于电闪雷鸣这一目了然的现象。18 世纪中叶以来，对电的研究逐渐蓬勃发展，它的每项重大发现都引起了广泛的实用研究，从而促进了科学技术的飞速发展。进入 19 世纪以后，电磁学基础理论得以逐步建立。在此期间涌现出了一大批天才的物理学家——奥斯特、法拉第、特斯拉、爱迪生等，他们都对电学的发展做出了巨大的贡献。与此同时，还诞生了电气时代三个伟大的公司，分别为通用电气、西屋电气和西门子电气公司。一百多年来，它们一直在引领着电气应用领域的发展和潮流。

1.1.1 直流电机的产生和发展

1820 年，丹麦哥本哈根大学的物理学家奥斯特（Hans Christian Oersted，1777—1851）发现了电流磁效应现象：将导线的一端和伏打电池正极相连，同时将导线沿南北方向平行地放在小磁针的上方，此时，当导线另一端连接到伏打电池的负极时，磁针就会立即发生偏转，由原来的南北方向转而指向东西方向。奥斯特还发现，如果把玻璃板、木片、石块等非磁性物体插在导线和磁极之间，甚至把小磁针浸在盛水的铜盒子里，磁针照样发生偏转。在发现电流磁效应现象之后不久，物理学家安培（Ampère，1775—1836）通过总结电流在磁场中所受机械力的情况建立了安培定律。

1821 年，英国物理学家迈克尔·法拉第（Michael Faraday，1791—1867）发现了通电导线能绕永久磁铁旋转和磁体能绕载流导体运动的现象，首次实现了电磁运动向机械运动的转换，从而建立了电动机的实验模型，被认为是世界上第 1 台电动机原理模型，其原理如图 1-1所示。图中所示在一个水平放置的盘子内注入水银，盘子中央固定一个永磁体，盘子上方悬挂一根导线，导线的一端可在水银中移动，另一端与电池的一端连接在一起，而电池的另一端则与盘子相连。这样，盘子、水银、导线和电池就构成导电回路，载流导线在磁场中受力运动。

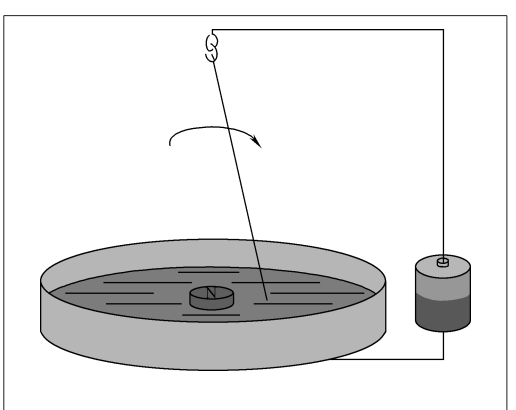


图 1-1 法拉第电动机模型

在随后的几年时间里，法国科学家阿拉果（Arago，1786—1853）提出了电磁铁的概念，即用电流通过绕线的方式使铁块磁化。斯特金（W. sturgeon，1783—1850）在 1825 年用 16 圈导线制成了第一块电磁铁。随后，美国电学家约瑟夫·亨利（Henry Joseph，1797—1878）在 1829 年对斯特金提出的电磁铁装置进行了改进，用绝缘导线代替了裸铜导线，从而不必担心铜导线之间过分靠近而造成接触短路。由于导线有了绝缘层，就可以将它们紧密地绕在一起，线圈绕制越密集，产生的磁场就越强，这样就大大提高了把电能转化为磁能的能力。到了 1831 年，亨利试制出了一块电磁转换能力更强的电磁铁，虽然它的体积不大，但它却能吸

起重达 1 吨重的铁块。

1831 年，在发现电磁感应现象之后不久，法拉第基于电磁感应原理发明了世界上第一台真正意义上的发电机——法拉第圆盘发电机，如图 1-2 所示。该发电机的结构与现代发电机不同，在磁场中做旋转运动的不是线圈绕组，而是一个紫铜做的圆盘。将铜圆盘放置于“U”形磁铁的磁场中，同时圆盘的轴心处装设摇柄，其边缘和圆心处各与一个电刷相接触。通过导线将电刷与电流表进行连接，可以与铜盘一起构成一个完整的闭合回路。当转动摇柄使铜圆盘旋转时，电流表的指针便发生偏转，电路中就会产生持续的电流。

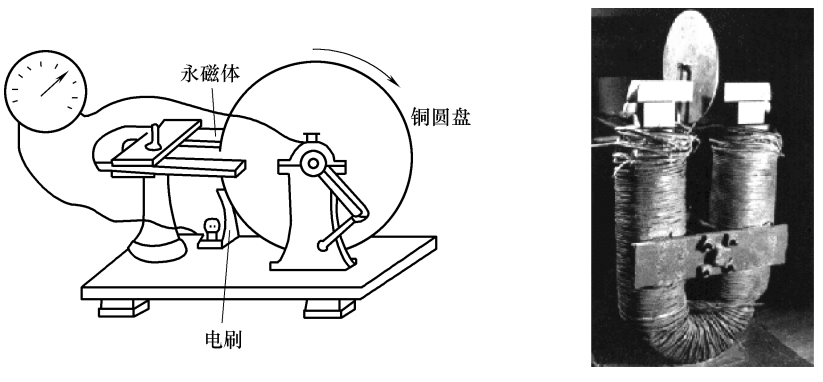


图 1-2　法拉第圆盘发电机

同年夏天，亨利对法拉第的发电机模型进行了改进，制作了一个简单的装置（振荡电动机），如图 1-3 所示。该装置的运动部件是在垂直方向上运动的电磁铁，当它们端部的导线与两个电池交替连接时，电磁铁的极性就会自动改变，使电磁铁与永磁铁之间相互吸引或排斥，电磁铁就会以每分钟 75 个周期的速度上下运动。亨利电动机的重要意义在于这是第一次由磁极排斥和吸引产生的连续运动，是电磁铁在电动机中的真正应用。

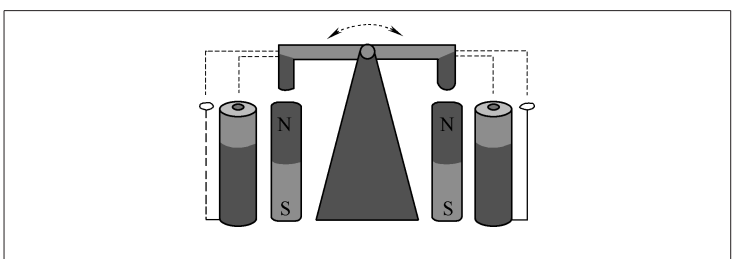


图 1-3　亨利振荡电动机

1832 年，斯特金发明了换向器，据此对亨利的振荡电动机进行了改进，并制作了世界上第一台能连续旋转的电动机，其原理图如图 1-4 所示。从图中可以看出，该电动机已初具现代直流电机的雏形。后来，他还制作了一台并励式直流电动机。

1832 年，法国 A. H. 皮克西在巴黎公开了一台永磁铁型旋转交流式发电机，如图 1-5 所示。一年后，他在发电机上安装了整流子，将交流电转变为直流电。同年，俄籍德国人 H. F. E. 楞次（Lenz，Heinrich Friedrich Emil，1804—1865）提出了“电动机—发电机”原理——楞次定律。证明了发电机和电动机是可逆的。然而，在 1870 年之前，直流发电机与

电动机一直处于各自独立发展的状态。

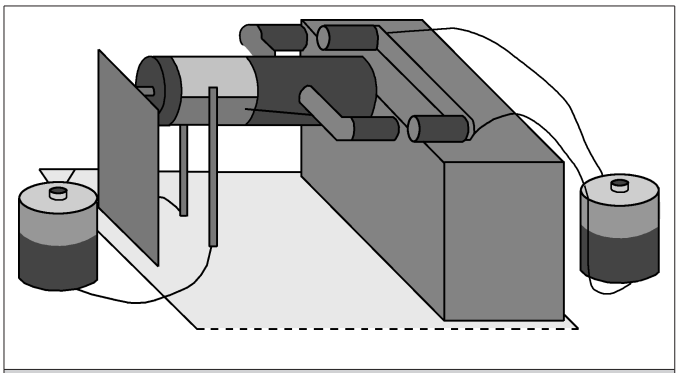


图 1-4　斯特金的旋转电动机原理图

1834 年，德国的卡尔·雅可比（Carl Gustav Jacob，1804—1851）制作了一台简单的装置：在两个 U 形的电磁铁中间，装一六臂轮，每臂带两根棒形磁铁，通电后，棒形磁铁和 U 形磁铁之间产生相互吸引和排斥作用，带动轮轴转动，如图 1-6 所示。后来，雅可比做了一套大型的装置，安在小艇上，由 320 个丹尼尔电池供电。1838 年，装有雅可比电动机的小艇在易北河上首次航行，时速只有 2.2km。与此同时，美国的达文波特也成功地研制出了驱动印刷机的电动机，印刷过美国电学期刊《电磁和机械情报》。但上述两种电动机都采用电池作为供电电源，成本高昂，没有太大的商业价值。

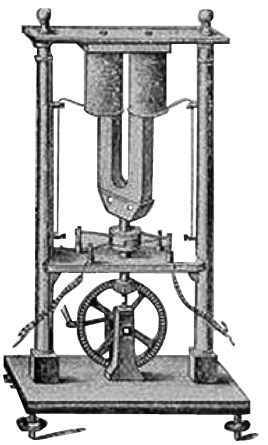
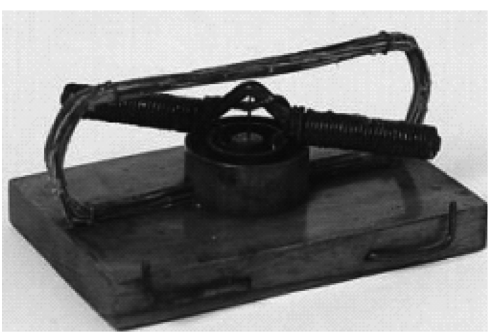
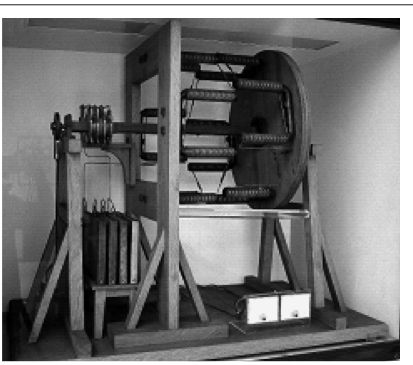


图 1-5　皮克西的永久磁铁型旋转交流式发电机



a)雅可比电动机原理模型



b)雅可比电动机实物图

图 1-6　雅可比电动机

1845年，为了增强发电机的输出功率，实现磁场大小可调，英国科学家惠斯通（Charle Wheatstone，1802—1875）提出了用电磁铁代替永磁铁作为电动机的磁势源，即电励磁式发电机，并获得了专利权。到1857年，惠斯通还发明了自激式电磁铁型发电机。

1866年，西门子的创始人维尔纳·冯·西门子（W. VonSiemens，1816—1892）先后研制了直流自励和并励式发电机，并在1867年的巴黎世界博览会上进行了展出，开创了19世纪晚期的“强电”技术时代。在之后的一年里，西门子对发电机又提出了重大改进。他开始考虑用电磁铁来代替永久磁铁以研制电磁铁式发电机。研制的样机能产生皮克西发电机所远不能相比的强大电流。同时，这种发电机比连接一大堆电池来通电要方便得多，因而它作为实用发电机被广泛地应用起来。

1870年，格拉姆（Z. T. Gromme，1826—1901）对直流发电机的电枢绕组进行了改进：将T形电枢绕组改为环形电枢绕组。格拉姆直流发电机在结构上和直流电动机非常相似，格拉姆证明向直流发电机输入电流，其转子会像电动机一样旋转。于是，这种格拉姆型电动机被大量制造出来，效率也不断提高。格拉姆被人们誉为“发电机之父”。1873年，德国的西门子公司研究发电机的工程师阿特涅发明了与格拉姆发电机不同的线圈绕制方式，制成了性能良好的发电机。格拉姆发电机的电枢是将铁丝绕成环状，在环与环之间夹上纸进行绝缘，然后将环捆在一起作为铁心，并在其上面绕上导线线圈，再由线圈的不同部位引出一些导线，接上整流子。而阿特涅发电机的电枢，是用许多薄圆铁板以纸绝缘后重叠起来，制成铁心，然后在上面绕上导线线圈。人们把这种方法叫作“鼓卷”，意思是像鼓一样的形状。经过这种改进后，发电机无论外观还是性能，都比原来有了很大起色。西门子公司由于阿特涅的这项发明而益发驰名。于是，德国以西门子公司为核心，大力研制各种发电机，从而使电力工业得到了迅速的发展。此后德国的西门子着手制造更好的发电机，并开始研究由电动机驱动的车辆。1879年，在柏林工业展览会上，西门子公司不冒烟的电车还是赢得观众的一片喝彩。后来美国发明大王爱迪生通过试验改进后的电力机车输出功率达到了12～15马力。但由于当时的电动机全是直流电动机，使用起来有一定的局限性，因而只在电车驱动领域进行应用。

1873年，英国詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831—1879）完成了经典电磁理论巨著《电和磁》，建立了经典的电磁场理论。同时，电动机绕组发展为鼓型绕组，直流电动机开始具备现代直流电动机的基本型式。

1875年，格拉姆将改造后的发电机安装在法国巴黎北火车站发电厂，建成了世界第一座火力发电厂。

1880年，爱迪生（Thomas Alva Edison，1847—1931）提出通过采用叠片铁心来减少铁心损耗，同时降低电枢绕组温升的方法。同年，马克西又提出将铁心分成几叠，且每叠之间均留出一定宽度的通风槽用于散热，从而使得直流电动机的电磁负载、单机容量和效率都提高到前所未有的水平。自此，直流电动机换向器上的火花问题就成为当时最为突出的问题。

同年，霍普金森（J. Hopkinson，1849—1898）确立了磁路的欧姆定律，对分析非线性磁路提供了一种近似的线性方法，具有非常重要的意义，至今还在电机与变压器的分析中使用。

1882年，德国将米斯巴哈水电站发出的2kW直流电通过57km的1.5～2kV输电线路输送到了慕尼黑，证明了直流远距离输电的可能性。这一方面成为直流发电机与电动机发展中的大事，促进了它们的广泛利用；另一方面也暴露出直流电在当时所存在的巨大缺陷——原

来电压越高，电能的传输损失会越小，但制造高压直流发电机的困难较大，而且单机容量越大，换向也越困难，换向器上的火花使直流发电机的工作极不稳定。因此，人们逐渐把目光转向了交流电动机。

1891 年，阿诺尔德（Arnold）建立了直流电枢绕组理论，这一全新的理论使直流电动机的设计和计算建立在了更加科学的基础之上。

1.1.2 交流电机的产生和发展 ★★★

正如前面所述，交流电动机的发展在 19 世纪之初一直是区别于直流电动机独立发展的。1824 年，法国人阿拉果（D. F. J. Arago，1786—1853）在转动悬挂着的磁针时发现其外围受到机械力。1825 年，他重复这项实验时，发现外围环的转动又使磁针偏转，这些试验导致了后来感应电动机的出现。

1885 年，意大利物理学家和电气工程师加利莱奥·费拉里斯（Galileo Ferraris，1847—1897）提出了旋转磁场原理，并研制出了二相异步电动机模型。同年，美国的尼古拉·特斯拉（Nikola Tesla，1856—1943）也独立地研制出了二相异步电动机，如图 1-7 所示。特斯拉交流发电机的工作原理是把几个线圈按辐射状排成一圈，接通交流电，交流电的频率相同，但电压和电流存在相移，于是，在线圈之间的空间就形成了旋转磁场，磁场带动金属使之产生旋转运动。据此，特斯拉成功研制出了二相异步电动机。

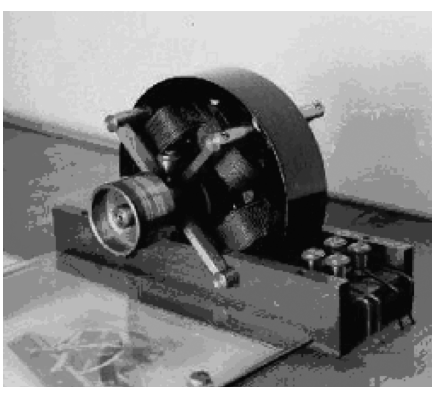


图 1-7 特斯拉发明的二相异步电动机

发明家特斯拉根据电磁感应原理制成的感应电动机结构简单，使用交流电，无火花，因此被广泛应用于工业和家庭电器中。

特斯拉早先在爱迪生公司任职的时候就决心开发交流电机，但爱迪生却坚持只钟情于直流电动机，因此，他就把两相交流发电机和电动机的专利权卖给了西屋公司。西屋电气公司据此得到了快速发展，并在美国芝加哥工业博览会的供电系统商业订单中一举击败了由爱迪生与其他公司组建的通用电气公司，成功地为博览会提供了交流供电系统。

俄国电工学家多利沃-多布罗沃利斯基（Dolivo-Dobrovolisky，1862—1919）于 1889 年成功研制出第一台实用的三相交流单笼型异步电动机，如图 1-8 所示。紧接着他又发明了第一台双笼型三相异步电动机。交流电动机的研制和发展，特别是三相交流电动机的研制成功为远距离输电创造了条件，同时把电工技术提高到了一个新的阶段。

1891 年，奥斯卡·冯·米勒在法兰克福世界电气博览会上宣布：他与多利沃合作架设的从劳芬到法兰克福的三相交流输电电路，可把劳芬的一台 300×735.5W/55V 三相交流发电机的电流经三相变压器提高到 10000V，并经电力线传输 175km，顺利通电，从此三相交流电动机很快代替了工业上的直流电动机，得到了迅速发展。

1896 年，特斯拉的两相交流发电机在尼亚拉的发电厂开始营运，产生的 3750kW/5kV 的交流电可以一直被输送到 40km 外的布法罗市。自此，交流发电机开始得以大规模推广应用。