

开关磁阻电动机 调速控制技术

王宏华 著

第2版

电气自动化新技术丛书

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

开关磁阻电动机调速控制技术

第 2 版

王宏华 著



机械工业出版社

开关磁阻电动机调速系统(SRD)是20世纪80年代兴起的新型机电一体化交流调整系统,兼有传统交直流传动系统的优点,结构坚固、简单、成本低、起动转矩大、效率高,已有正式的SRD产品,应用在牵引运输、通用工业、航空工业、家用电器等各个领域,显示出强大的市场竞争力。

本书基于作者长期从事SRD研究和开发工作的体会,全面阐述SRD的建模、分析及其控制器、功率变换器的设计理论,力图体现SRD非线性建模与仿真、无位置传感器控制、转矩脉动及振动控制、智能控制算法应用等SRD控制技术的主要进步。全书共分8章,包括导论,SR电动机建模与调速理论,SR电动机功率变换器设计基础,反馈信号检测,SR电动机控制系统设计基础,SR电动机脉宽调压调速系统设计举例,SR电动机转矩脉动、振动分析与控制,SR电动机直接数字控制系统设计举例。本书回避繁琐数学推导,注重物理概念,强调学术性和实用性相结合,理论联系实际。

本书可作为电气自动化、机电一体化等领域的工程技术人员、研究人员的参考书,亦可供高等院校电气工程、自动化、机电一体化等专业的教师、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

开关磁阻电动机调速控制技术/王宏华著. —2版. —北京:机械工业出版社,2014.4

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-46274-3

I. ①开… II. ①王… III. ①开关磁阻电动机-调速控制器 IV. ①TM352
②TM571

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第061412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:罗莉 孙流芳 责任编辑:罗莉 孙流芳

版式设计:常天培

责任校对:申春香

封面设计:陈沛

责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

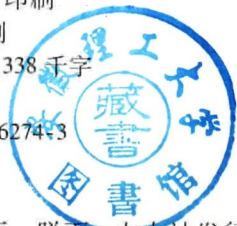
2014年6月第2版第1次印刷

169mm×239mm·17.5印张·338千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-46274-3

定价:49.00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

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面防伪标均为盗版

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主 任：王永骥

副 主 任：牛新国 赵光宙 孙 跃 阮 毅

何湘宁 霍永进 韩芙华

顾问委员：王 炎 孙流芳 陈伯时 陈敏逊

彭鸿才 尹力明

委 员：(按姓氏笔画为序)

王永骥 王 旭 王志良 牛新国

许宏纲 孙 跃 刘国海 李永东

李崇坚 阮 毅 陈息坤 汪 镭

沈安文 张 兴 张 浩 张华强

张承慧 张彦斌 何湘宁 赵光宙

赵 杰 赵争鸣 赵荣祥 查晓明

徐殿国 常 越 韩芙华 霍永进

戴先中

秘 书：王 欢 林春泉

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来,在中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会学会领导和广大作者的支持下,在前5届编辑委员会的努力下,至今已发行丛书53种55多万册,受到广大读者的欢迎,对促进我国电气自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信,表示这套丛书对他们的工作帮助很大,希望我们再接再厉,不断地推出介绍我国电气自动化新技术的丛书。本届编委决定选择一些大家所关心的新选题,继续组织编写出版,欢迎从事电气自动化研究的学者就新选题积极投稿;同时对受读者欢迎的已经出版的丛书,我们将组织作者进行修订再版,以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读,我们将对今后新出版的丛书进行改版,扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函,提出您的宝贵意见和建议,以使本丛书编写得更好。

在本丛书的出版过程中,得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持,在此我们对这些单位再次表示感谢。

第6届《电气自动化新
技术丛书》编辑委员会
2011年10月19日

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

的，机械工业出版社孙流芳编审对本书初稿提出了许多宝贵的修改意见，特此表示感谢。本书参阅和引用了国内外 SRD 研究的一些成果，对这些文献的作者在此一并致谢。另外，还要感谢我所在单位的课题组同事及我所指导的研究生的支持。

由于水平所限，本书难免有错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者的电子邮箱为：wanghonghua@263.net。

王宏华

2014 年 2 月

第2版前言

本书第1版出版于1995年,适应了当时国内开关磁阻电动机调速系统(SRD)研究、开发工作的急需。近20年来,伴随着电力电子技术、先进控制理论及微机技术的日新月异,SRD控制技术发展迅速。为了适应新形势下国内SRD深入研究及高性能SRD产品开发工作的需要,本次再版对原书进行了全面修订。

第2版仍然坚持第1版“回避繁琐数学推导,注重物理概念,强调学术性和实用性相结合,理论联系实际”的追求,基于作者长期从事SRD研究和开发工作的体会,全面阐述SRD建模、分析及其控制器、功率变换器的设计理论,并力图体现SRD非线性建模与仿真、无位置传感器控制、转矩脉动及振动控制、智能控制算法应用等SRD控制技术的主要进步。

全书共分8章。第1章在电气传动发展的背景下,概述SRD的结构、原理、特点及工业应用,综述SRD的发展历史、研究现状与发展方向。第2章首先建立开关磁阻电动机(SR电动机)的线性模型、准线性模型,分析SR电动机的起动方式及电流斩波控制、电压PWM控制、角度位置控制三种调速控制方式;在建立SR电动机非线性数学模型并对其相绕组非线性磁链特性计算的基础上,阐述基于MATLAB的SRD整体非线性动态仿真建模的方法,并仿真分析其电动、制动运行状态的特性。第3章主要阐述SR电动机功率变换器不同主电路结构的特点、主开关器件选型及驱动电路设计,分析功率变换器的伏安容量,分别给出以GTR、IGBT为主开关器件的功率变换器设计举例。第4章阐述SRD中转子位置、相电流、速度反馈信号测量的原理和方法,其中,转子位置检测包括直接检测方法和无位置传感器间接检测方法;速度检测包括模拟、数字测速方法;电流检测包括电阻采样光隔离、电隔离霍尔元件电流检测方法。第5章阐述基于经典控制理论的SRD调节器工程设计方法,介绍SRD运行方式优化组合和控制参数优化,以及基于智能控制(模糊控制、单神经元控制)技术的控制器设计。第6章给出SR电动机PWM调压调速系统设计举例。第7章阐述基于转矩分配函数法的SR电动机转矩脉动抑制方法,分别给出采用电流闭环、转矩闭环实现期望转矩跟踪的转矩脉动控制系统设计及仿真举例;介绍SR电动机定子振动特性分析的有限元方法和机械阻抗法,并结合样机参数给出计算实例;在给出SR电动机振动抑制策略的基础上,主要讨论两步换相法及其改进。第8章给出基于8098单片机的SR电动机直接数字控制系统设计举例。

本书的不少研究成果是在浙江大学许大中教授、陈永校教授的悉心指导下完成

的，机械工业出版社孙流芳编审对本书初稿提出了许多宝贵的修改意见，特此表示感谢。本书参阅和引用了国内外 SRD 研究的一些成果，对这些文献的作者在此一并致谢。另外，还要感谢我所在单位的课题组同事及我所指导的研究生的支持。

由于水平所限，本书难免有错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者的电子邮箱为：wanghonghua@263.net。

王宏华

2014 年 2 月

第2版前言

本书第1版出版于1995年,适应了当时国内开关磁阻电动机调速系统(SRD)研究、开发工作的急需。近20年来,伴随着电力电子技术、先进控制理论及微机技术的日新月异,SRD控制技术发展迅速。为了适应新形势下国内SRD深入研究及高性能SRD产品开发工作的需要,本次再版对原书进行了全面修订。

第2版仍然坚持第1版“回避繁琐数学推导,注重物理概念,强调学术性和实用性相结合,理论联系实际”的追求,基于作者长期从事SRD研究和开发工作的体会,全面阐述SRD建模、分析及其控制器、功率变换器的设计理论,并力图体现SRD非线性建模与仿真、无位置传感器控制、转矩脉动及振动控制、智能控制算法应用等SRD控制技术的主要进步。

全书共分8章。第1章在电气传动发展的背景下,概述SRD的结构、原理、特点及工业应用,综述SRD的发展历史、研究现状与发展方向。第2章首先建立开关磁阻电动机(SR电动机)的线性模型、准线性模型,分析SR电动机的起动方式及电流斩波控制、电压PWM控制、角度位置控制三种调速控制方式;在建立SR电动机非线性数学模型并对其相绕组非线性磁链特性计算的基础上,阐述基于MATLAB的SRD整体非线性动态仿真建模的方法,并仿真分析其电动、制动运行状态的特性。第3章主要阐述SR电动机功率变换器不同主电路结构的特点、主开关器件选型及驱动电路设计,分析功率变换器的伏安容量,分别给出以GTR、IGBT为主开关器件的功率变换器设计举例。第4章阐述SRD中转子位置、相电流、速度反馈信号测量的原理和方法,其中,转子位置检测包括直接检测方法和无位置传感器间接检测方法;速度检测包括模拟、数字测速方法;电流检测包括电阻采样光隔离、电隔离霍尔元件电流检测方法。第5章阐述基于经典控制理论的SRD调节器工程设计方法,介绍SRD运行方式优化组合和控制参数优化,以及基于智能控制(模糊控制、单神经元控制)技术的控制器设计。第6章给出SR电动机PWM调压调速系统设计举例。第7章阐述基于转矩分配函数法的SR电动机转矩脉动抑制方法,分别给出采用电流闭环、转矩闭环实现期望转矩跟踪的转矩脉动控制系统设计及仿真举例;介绍SR电动机定子振动特性分析的有限元方法和机械阻抗法,并结合样机参数给出计算实例;在给出SR电动机振动抑制策略的基础上,主要讨论两步换相法及其改进。第8章给出基于8098单片机的SR电动机直接数字控制系统设计举例。

本书的不少研究成果是在浙江大学许大中教授、陈永校教授的悉心指导下完成

第1版前言

开关型磁阻电动机调速系统 (Switched Reluctance Drive, 简称 SRD) 是 20 世纪 80 年代中期发展起来的新型交流调速系统, 它融新的电动机结构——开关型磁阻电动机 (Switched Reluctance Motor, 简称 SR 电动机) 与现代电力电子技术、控制技术为一体, 兼有异步电动机 (本书均指感应电动机) 变频调速系统和直流电动机调速系统的优点, 已成为当代电气传动的热门课题之一。国外已有正式的 SRD 产品, 应用在牵引运输、通用工业、航空工业、家用电器等各个领域, 显示出强大的市场竞争力。目前, 我国亦已从 SRD 理论研究阶段迈步入工业应用阶段, 相信不久的将来, SR 电动机在国内电动机调速领域内亦会取得真正的一席之地。

虽然 SRD 前景诱人, 但也有其缺点, 最主要是转矩脉动和引起的噪声较大。通过 SR 电动机的正确设计和优化控制技术, 这一问题正在逐步得到解决。

因此, 尽管 10 余年来发表的 SRD 研究论文为数不少, SRD 控制技术亦可以说已初步形成自己的体系, 但它毕竟是一项正在发展之中的新技术, 可能我们会发现更多的新观点, 也可能会看到现有的一些观点逐步被摒弃。无疑, 等待一段时间写书条件将更好, 但缺少系统介绍 SRD 原理及技术的书籍, 已成为 SRD 这一新技术推广应用的主要障碍之一, 为促进我国 SRD 研究的发展, 加快其商品化工作进程, 因而编写此书。

本书基于作者从事 SRD 研究与开发的体会, 以国内外成熟的研究成果为主线, 穿插个人研究成果, 系统阐述 SRD 工作原理及其功率变换器、控制器各环节的设计原理和方法。本书力求学术性和实用性相结合, 在注重理论分析的同时, 也给出一些实例, 避免过多的数学推导。作者希望本书能为读者熟悉、掌握 SRD 控制技术提供引玉之砖, 是否达到了这一目的, 只能由读者评判。限于作者的水平和视野, 书中谬误、疏漏之处在所难免, 衷心希望读者批评、指正。

本书初稿承南京动力高等专科学校王耀德教授逐字审阅, 提出了许多宝贵的修改和补充意见, 特此表示感谢。作者感谢上海工业大学陈伯时教授、上海电器科学研究所傅丰礼高级工程师、山西矿业学院王振民教授为本书写作提供资料。对许大中教授、毛宗源教授、喻士林教授级高级工程师给予的鼓励, 深表谢意。本书参阅和引用了国内外 SRD 研究的大量文献资料, 这些文献作者的研究成果为本书提供了极有价值的素材, 在此一并致谢。作者认为, 本书是国内外 SRD 研究工作者的共同成果。另外, 本书能够出版, 有赖于中国自动化学会电气自动化委员会、中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会、电气自动化新技术丛书编委会、机械工业出版社的支持和帮助, 作者谨致以深切的谢意。

作者

1994 年 10 月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第6届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

第2版前言

第1版前言

第1章 导论	1
1.1 电气传动技术的发展	1
1.2 SR电动机的基本结构、原理与特点	4
1.3 SRD的基本结构、原理与特点	8
1.3.1 SRD的基本构成与工作原理	8
1.3.2 SRD与步进电动机驱动系统的比较	9
1.3.3 SRD与异步电动机变频调速系统的比较	9
1.3.4 SRD与BLDCM调速系统的比较	12
1.4 SRD发展现状与发展方向	13
1.4.1 SRD发展简史	13
1.4.2 SR电动机设计与分析的发展	15
1.4.3 功率变换器设计与分析的发展	19
1.4.4 SR电动机控制技术的发展	21
1.4.5 SRD研究的发展方向	29
1.5 SRD的工业应用	31
附录 样机参数	33
第2章 SR电动机建模与调速理论	35
2.1 概述	35
2.2 SR电动机的基本方程式	36
2.2.1 电路方程	36
2.2.2 机械方程	37
2.2.3 机电联系方程	37
2.3 SR电动机线性模型及相电流线性分析	39
2.3.1 SR电动机线性模型	39
2.3.2 与SR电动机线性模型对应的相绕组磁链波形	41
2.3.3 基于SR电动机线性模型的相电流解析分析	42
2.4 SR电动机的准线性模型及转矩的准线性分析	48
2.4.1 SR电动机的准线性模型	48

2.4.2	基于准线性模型的瞬时转矩解析计算	50
2.4.3	基于准线性模型的平均转矩计算	51
2.5	SR 电动机调速控制的基本方法	55
2.6	SR 电动机非线性模型	58
2.6.1	基于特殊位置磁化曲线的磁链分区解析拟合	58
2.6.2	基于指数函数的非线性磁链解析模型	63
2.6.3	基于非线性模型的电磁转矩计算	65
2.7	SR 电动机起动及基本调速控制方式分析	66
2.7.1	SR 电动机起动运行分析	66
2.7.2	SR 电动机电流斩波控制方式运行分析	68
2.7.3	SR 电动机角度位置控制方式运行分析	70
2.7.4	基于非线性模型的 SR 电动机稳态运行仿真	72
2.8	SRD 整体非线性动态仿真建模	74
2.8.1	基于 MATLAB 的三相 (6/4 极) SRD 非线性动态仿真建模	74
2.8.2	基于 MATLAB 的四相 (8/6 极) SRD 非线性动态仿真建模	81
2.9	SR 电动机制动运行分析	87
第 3 章	SR 电动机功率变换器设计基础	91
3.1	概述	91
3.2	功率变换器拓扑	91
3.2.1	不对称半桥电路	92
3.2.2	每相只有一个主开关器件的功率变换器	93
3.2.3	对不对称半桥进行改进的少开关器件功率变换器	97
3.3	主开关器件	99
3.4	功率变换器的伏安容量	101
3.4.1	SR 电动机功率变换器伏安容量的计算	101
3.4.2	能量比率——SR 电动机的广义功率因数	102
3.4.3	饱和对要求的功率变换器伏安容量的影响	106
3.5	主开关器件的电压、电流额定值	107
3.5.1	以电流定额最小为目标的系统优化设计	110
3.5.2	主开关器件电流定额的估算	112
3.6	功率变换器设计举例	113
3.6.1	2.2kW SR 电动机功率变换器设计	113
3.6.2	0.75kW SR 电动机功率变换器设计	118
3.6.3	7.5kW SR 电动机功率变换器设计	120
第 4 章	反馈信号检测	127
4.1	概述	127
4.2	转子位置检测	127
4.2.1	用光敏式转子位置传感器检测转子位置	127

4.2.2 无位置传感器间接检测转子位置的方法	131
4.3 相电流检测	145
4.3.1 电阻采样光隔离式电流检测法	145
4.3.2 电隔离霍尔元件电流检测法	146
4.4 速度检测	148
4.4.1 模拟测速法 (F/V 电路测速)	149
4.4.2 数字测速法	149
第 5 章 SR 电动机控制系统设计基础	153
5.1 概述	153
5.2 SRD 小信号模型及调节器工程设计	153
5.2.1 SRD 小信号模型及其传递函数	153
5.2.2 调节器设计	160
5.3 SRD 优化运行控制	161
5.3.1 SR 电动机各种运行方式的最佳组合	161
5.3.2 SRD 参数最优化控制	165
5.4 SRD 模糊控制器设计	173
5.4.1 模糊控制决策表设计	174
5.4.2 量化因子及比例因子的调整	177
5.5 开关磁阻风力发电机单神经元自适应 PID 调节器设计	179
第 6 章 SR 电动机脉宽调压调速系统设计举例	188
6.1 概述	188
6.2 2.2kW SR 电动机 PWM 调压调速系统概述	188
6.3 位置逻辑控制电路设计	189
6.4 SG3524 线性 PWM 集成电路及其应用	190
6.4.1 SG3524 线性 PWM 集成电路	190
6.4.2 SG3524 在 SR 电动机电压 PWM 调压调速系统中的应用	192
6.5 调节器设计	192
6.5.1 系统参数计算	193
6.5.2 速度调节器的设计及具体实现	195
6.6 系统性能分析	197
6.6.1 闭环机械特性	197
6.6.2 饱和超调分析	197
6.6.3 速度环动态特性	198
第 7 章 SR 电动机转矩脉动、振动分析与控制	201
7.1 概述	201
7.2 基于转矩分配函数法的 SR 电动机转矩脉动抑制	201
7.2.1 转矩分配函数法概述	201
7.2.2 采用期望电流跟踪的转矩脉动控制器设计举例	205

7.2.3 采用直接瞬时转矩控制的转矩脉动控制器设计举例	210
7.3 SR 电动机定子振动特性分析	218
7.3.1 SR 电动机定子振动模态及固有频率的有限元计算	218
7.3.2 SR 电动机定子振动特性的机电类比分析	220
7.4 SR 电动机定子振动抑制策略	225
7.4.1 SR 电动机径向力及定子振动控制的一般方法	225
7.4.2 两步换相法及其实验分析	227
7.4.3 两步换相的时间间隔优化	232
第 8 章 SR 电动机直接数字控制系统设计举例	237
8.1 概述	237
8.2 系统原理框图	238
8.3 系统硬件设计	239
8.3.1 硬件结构框图	239
8.3.2 位置译码及换相控制电路设计	240
8.4 系统软件设计	243
8.4.1 换相规则的软件设计——HSI 中断服务程序	243
8.4.2 速度采样及数字滤波	244
8.4.3 速度环程序	245
8.4.4 电压 PWM 方式的实现和软起动的实现	247
8.4.5 改进的 PI 算法	248
8.4.6 比例因子自调整模糊控制算法的实现	248
8.5 系统运行实验	250
参考文献	253

第 1 章 导 论

1.1 电气传动技术的发展

1820 年, 丹麦物理学家奥斯特 (H. C. Oersted) 发现电流的磁效应, 率先揭示了电与磁的联系。法国数学家、化学家、物理学家安培 (A. M. Ampere) 在 19 世纪 20 年代建立了载流导体在磁场中受力的安培定律, 英国物理学家、化学家法拉第 (Michael Faraday) 在 1831 年建立了揭示“变磁生电”的电磁感应定律。安培公式指出电流元 Idl 在磁感应强度为 B 的外磁场中所受到的电磁力 df 为

$$df = Idl \times B \quad (1-1)$$

法拉第电磁感应定律指出, 导体回路中感应电动势 E 与穿过回路的磁通量 Φ 对时间的变化率成正比, 即

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

安培定律和法拉第定律为电机制造奠定了理论基础。与电场比较, 磁场较易获得高的储能密度, 故电机一般应用磁场为媒介实现机电能量转换, 通常“电机”只是“电磁机”的简称。事实上, 电机正是通过与电机绕组交链的磁通发生变化产生感应电动势实现对电系统的作用 (发电机) 或反作用 (电动机), 通过载流电枢导体在磁场中受电磁力实现对机械系统的作用 (电动机) 或反作用 (发电机), 气隙磁场是联系电机机械系统和电系统实现电能和机械能相互转换的纽带, 如图 1-1 所示。

图 1-1 中, 导体 ab 处于磁感应强度为 B 的磁场中, 磁力线垂直纸面向里, U 为导体端电压, I 为导体的电流, E 为导体感应电动势, v 为导体运动速度, F_{em} 、 F_J 分别为导体所受的电磁力、机械力。图 1-1a 中, 在外施电压 U 作用下, 导体流过电流 I , 在磁场中产生 F_{em} (动力) 与 F_J (阻力) 平衡, 导体以 v 匀速电动运行, 切割磁力线产生反作用于电系统的反电动势 E , 输入的电功率 (UI) 扣除导体损耗后即转换为机械功率 ($F_J v$) 的电磁功率 (EI)。图 1-1b 中, 在外施机械力 F_J (动力) 作用下, 导体切割磁力线而产生作用于电系统的电动势 E 并流过感应电流 I , 在磁场中产生反作用于机械系统的电磁力 F_{em} (制动力) 与 F_J 平衡, 导体以 v 匀速发电运行, 输入的机械功率 ($F_J v$) 近似为转换为电功率的电磁功率 (EI)。

从 1884、1885 年直流电动机、笼型异步电动机分别问世起, 电机学科的发展已有一百多年的历史。按传统的分类方法, 常用旋转电机分为直流电机和交流电机

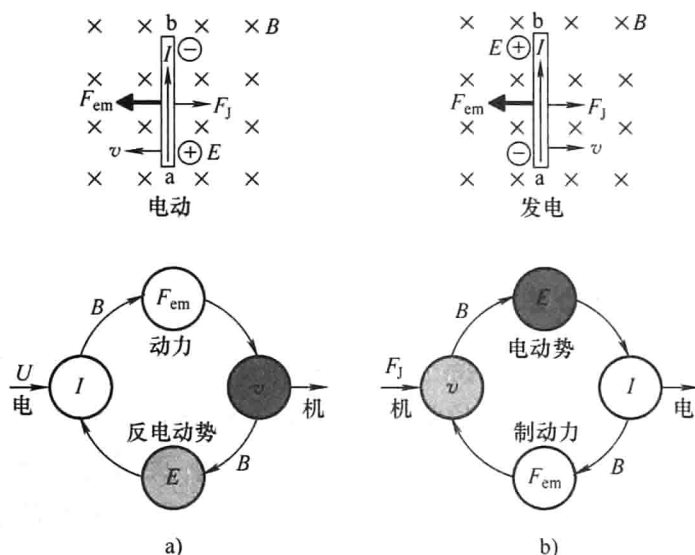


图 1-1 电动运行与发电运行

a) 导体电动 b) 导体发电

两大类，而交流电机又分为异步电机和同步电机。

众所周知，交流电动机的定子磁场是旋转磁场，异步电动机的转子转速与旋转磁场的同步转速之间总存在转差，而同步电动机的转子转速则是与定子电源频率（旋转磁场）严格同步的转速。

直流电动机的定子磁场是静止的，为了使转子受到方向不变的电磁转矩以连续旋转，其借助电刷与换向器的配合将外加直流电源提供的直流电流“逆变”成方向交变的交流电通入转子绕组，以使在同一磁极下转子绕组有效导体边流过同一方向的电流，定、转子磁场保持相对静止，从而转子所受定子磁场的平均转矩不为零；另一方面，转子绕组在旋转中，其任一有效导体边交替切割不同极性的磁极，产生的动生电动势方向本是交变的，借助电刷与换向器的配合才将转子绕组的交流电动势“整流”成了电刷两端的直流电动势。因此，直流电动机本质上是装有机机械换向装置的交流电动机，而从其电枢绕组可等效为与静止定子磁场无相对运动的“伪静止绕组”这一特点看，直流电动机也可视为一种特殊的同步电动机。

虽然，笼型异步电动机只较直流电动机晚一年问世，但直到 20 世纪 70 年代，在需要宽范围、高要求的电气调速传动领域中，大多用直流电动机，19 世纪 90 年代开发并使用的 Ward - Leonard 系统〔即直流发电机 - 电动机系统，如今已演变为晶闸管 - 直流电动机（ $\text{SCR}^\ominus - \text{M}$ ）系统、PWM 直流调速系统〕长期以来主导了调速传动领域。这是因为直流电动机为“双边励磁”，电枢绕组的电流 I_a 是由外接

⊖ 普通晶闸管（Thyristor）曾称为硅可控整流器（Silicon Controlled Rectifier, SCR），为方便起见，常沿用 SCR 代表普通晶闸管。