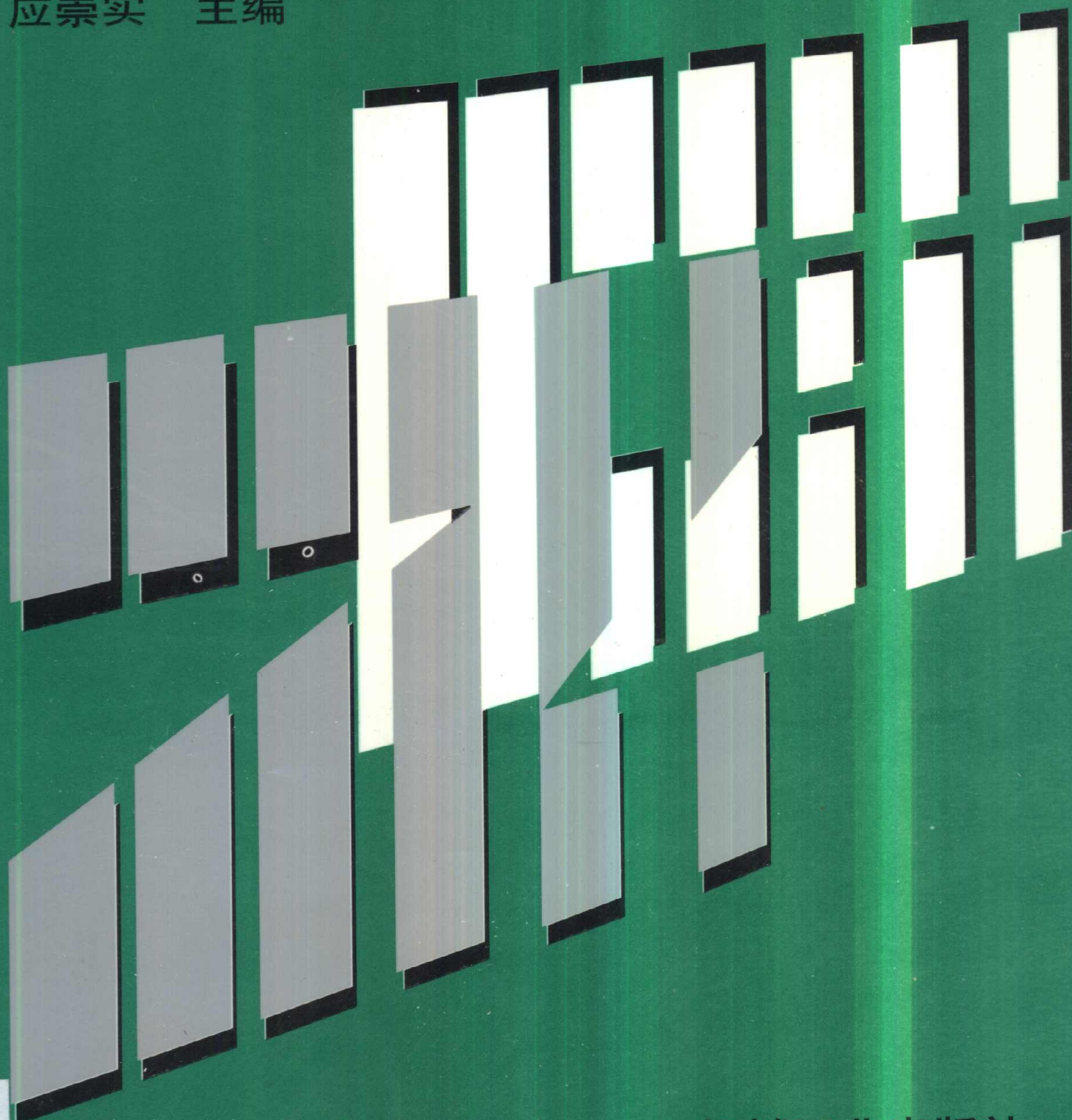


职工高等工业专科学校试用教材

电机及拖动基础

应崇实 主编



机械工业出版社

884

7/11/3
259

职工高等工业专科学校试用教材

电机及拖动基础

应崇实 主编



机械工业出版社

电机及拖动基础是工业电气自动化专业的一门技术基础课，它由电机学和电力拖动基础两门课程结合而成。全书主要内容包括：直流电机、电力拖动的动力学基础、直流电动机的电力拖动、变压器、交流电机的绕组及磁动势和电动势、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、单相异步电动机和三相同步电动机、控制电机、电动机的选择，共十章。并附有实验指导书。书中备有选讲内容和附录，以便照顾到不同的生产单位对职工教育的要求。

本书除作为职工大学工业电气自动化专业的专科用教材外，也可供业余大学、中专学校的有关专业师生选用，科技人员和工人亦可参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机及拖动基础/应崇实主编. —北京：机械工业出版社，1999 重印

职工高等工业专科学校试用教材

ISBN 7 - 111 - 00872 - 3

I . 电… II . 应… III . ①电机-教材②电力传动-教材
IV . TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 18182 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：卢若薇 韩雪清

责任印制：郭景龙

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版第 14 次印刷

787mm × 1092mm¹/₁₆ · 27.5 印张 · 668 千字

81 701—83 700 册

定价：30.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

本书是根据原教育部成人教育司、机械工业部教育局审定的职工高等工业专科学校工业电气自动化专业的教学计划及《电机及拖动基础》教学大纲而组织编写的。全书包括直流电机、电力拖动的动力学基础、直流电动机的电力拖动、变压器、交流电机的绕组及磁动势和电动势、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、单相异步电动机和三相同步电动机、控制电机、电动机的选择，共十章，并附有实验指导书。书中备有选讲内容（用*号注明）和附录，以便照顾到不同的生产单位对职工教育的要求。本书编写时注意从职工大学的教学实际出发，力求做到精选内容、深入浅出、层次分明、清楚易懂、便于自学、处理好与有关基础课程的衔接关系。

本书可作为职工大学工业电气自动化专业的专科用教材。在使用本教材时，一般不需要对内容作较大增减。本书也可供有关专业的师生、科技人员和工人参考。

本书第一、八、九章由本钢职工工学院许裕光老师编写，第四、五、六章由济钢职工大学刘锡珊副教授编写。第二、三、七、十章由鞍钢职工工学院应崇实副教授编写，全书由应崇实主编。

本书由陕西机械学院北京研究生部高其昌副教授主审，参加审稿的有孙永宽老师、沈毓敏老师和李礼贤老师，他们对书稿提出了许多宝贵的意见，特此表示衷心的感谢。

在拟定本书的编写提纲和收集资料的过程中，陈伯时教授、姚守猷教授、戴绪愚高级工程师、武继文工程师和张天一老师给予了热情的帮助，在此一并致以衷心的感谢。

由于水平所限，书中不当和错误之处在所难免，诚恳希望使用本书的师生和其他读者批评指正。

编 者

目 录

绪 言

第一章 直 流 电 机

§ 1-1 直流电机的基本工作原理	3	二、电枢的感应电动势	29
一、直流电动机的基本工作原理	3	三、电磁功率	30
二、直流发电机的基本工作原理	5	§ 1-8 直流电机稳态运行时的平衡关系式	31
三、直流电机的可逆性	6	一、电压平衡关系式	31
§ 1-2 直流电机的结构	7	二、功率平衡关系式	32
§ 1-3 直流电机的铭牌数据和主要系列	10	三、转矩平衡关系式	33
一、铭牌数据	10	§ 1-9 直流电动机的工作特性	35
二、国产直流电机的主要系列	11	一、并励直流电动机的工作特性	35
§ 1-4 直流电机的绕组	12	* 二、串励直流电动机的工作特性	38
一、绕组构成的原则	12	* 三、复励直流电动机的工作特性	39
二、单叠绕组	14	§ 1-10 直流发电机的运行特性	40
三、单波绕组	17	一、他励直流发电机的运行特性	40
四、其他型式的绕组	19	二、并励直流发电机的自励条件和外特性	41
五、各种绕组的应用范围	19	* 三、复励直流发电机的特性	43
§ 1-5 直流电机的励磁方式和空载磁场	19	§ 1-11 直流电机的换向	43
一、直流电机的励磁方式	19	一、换向的物理现象	43
二、直流电机的空载磁场	20	二、直线换向、延迟换向和电磁性火花	44
§ 1-6 直流电机的电枢反应	23	三、产生火花的其他原因	46
一、电枢表面的电流分布	23	四、改善换向的基本方法	47
二、电枢磁动势和磁场	23	五、环火和补偿绕组	48
三、交轴电枢反应	27	六、自动控制系统中影响换向的因素	48
四、电刷不在几何中线上时的电枢反应	27	小结	49
§ 1-7 直流电机的电磁转矩和感应电动势	28	思考题和习题	51
一、直流电机的电磁转矩	28		

第二章 电力拖动的动力学基础

§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式	53	一、传动损耗功率和传动损耗转矩	64
一、运动方程式的基本形式	53	二、传动效率与输出转矩的关系	65
二、转矩正负号的确定规则	56	三、提升装置传动效率的确定方法	66
§ 2-2 转矩、力、飞轮矩和质量的折算	57	§ 2-4 静负载转矩特性和静负载的分类	70
一、多轴旋转系统的运动方程式	57	一、按照静负载转矩的大小随转速的	
二、折算的原则	60	变化规律分类	70
三、工作机构作直线运动时，静负载		二、按照静负载转矩的方向是否随转	
力和质量的折算	62	速方向变化分类	70
* § 2-3 传动损耗和传动效率	64	小结	71

思考题和习题 72

第三章 直流电动机的电力拖动

§ 3-1 他励直流电动机的机械特性 75	二、调速指标 123
一、机械特性的定义 75	三、他励直流电动机的调速方法 126
二、他励直流电动机的机械特性方程式 75	四、调速方法与负载的配合 128
三、机械特性的硬度 78	* § 3-7 串励直流电动机的机械特性 131
四、他励直流电动机的固有特性和人为特性 78	一、串励直流电动机的特点 131
§ 3-2 根据机械特性分析稳定运行问题 83	二、串励直流电动机的机械特性 131
§ 3-3 他励直流电动机的起动 84	三、串励直流电动机的通用特性曲线 132
一、起动方法 84	四、串励直流电动机的起动、制动和反向电动运行 133
二、电阻分级起动的电阻计算 85	* § 3-8 复励直流电动机的机械特性 134
三、起动的过渡过程 89	* § 3-9 他励直流电动机在过渡过程中的能量损耗 135
§ 3-4 他励直流电动机的制动 109	一、理想空载下恒压起动的能量损耗 136
一、制动的一般概念 109	二、理想空载下电压分级起动的能量损耗 137
二、他励直流电动机的能耗制动 109	三、理想空载下能耗制动的能量损耗 137
三、他励直流电动机的反接制动 112	四、理想空载下反接制动的能量损耗 138
四、他励直流电动机的回馈制动 115	五、理想空载下反转的能量损耗 138
§ 3-5 他励直流电动机运行状态的实例分析 119	六、减小过渡过程能量损耗的方法 139
一、反抗负载 119	小结 140
二、位能负载 121	思考题和习题 141
§ 3-6 他励直流电动机的调速 122	
一、对调速的一般说明 122	

第四章 变 压 器

§ 4-1 变压器的基本工作原理 144	§ 4-4 单相变压器的负载运行 157
一、变压器的主要用途 144	一、负载运行时的磁动势平衡方程式 157
二、变压器的基本工作原理 144	二、负载运行时的电压平衡方程式 158
三、变压器中各电磁量正方向的规定 145	三、绕组的折算 159
§ 4-2 变压器的分类、结构和额定值 146	四、负载运行时的 T 型等值电路 161
一、变压器的分类 146	五、负载运行时的 Γ 型等值电路 161
二、变压器的基本结构 146	六、负载运行时的简化等值电路 162
三、变压器的额定值和型号 150	七、负载运行时的相量图 162
§ 4-3 单相变压器的空载运行 151	§ 4-5 变压器参数的测定 165
一、空载运行时的物理情况 151	一、空载试验 165
二、主磁通与感应电动势的关系 151	二、短路试验 166
三、励磁电流 152	§ 4-6 变压器的标么值 168
四、空载运行时的电压平衡方程式 154	§ 4-7 变压器的运行特性 170
五、空载运行时的相量图 155	一、外特性和电压变化率 170
六、空载运行时的等值电路 156	二、效率特性 171

§ 4-8 三相变压器的磁路系统	174	§ 4-11 变压器的并联运行	182
一、三相变压器组的磁路系统	174	一、变压器理想并联运行的条件	182
二、三相芯式变压器的磁路系统	174	* 二、对理想并联运行条件的分析	183
§ 4-9 三相变压器的连接组	175	§ 4-12 自耦变压器	185
一、由同一磁通交链的原、副绕组的		一、自耦变压器的电压关系	186
电动势相位关系	175	二、自耦变压器的电流关系	186
二、三相绕组的连接方法	176	三、自耦变压器的容量关系	187
三、三相变压器的连接组	177	§ 4-13 仪用交流互感器	187
§ 4-10 三相变压器的绕组连接方法和		一、电流互感器	187
磁路系统对电动势波形的影响	181	二、电压互感器	188
一、Y/Y接法的三相变压器组	181	小结	189
二、Y/Y接法的三相芯式变压器	181	思考题和习题	190
三、 Δ /Y和Y/ Δ 接法的三相变压器	181		

第五章 交流电机的绕组、磁动势和电动势

§ 5-1 交流电机的主要型式	194	动势	213
§ 5-2 旋转磁场产生的基本原理	195	一、用图解法分析三相基波合成磁动势	214
§ 5-3 交流绕组的基本知识	197	二、用三角函数分析三相基波合成磁	
一、对交流绕组的基本要求	197	动势	214
二、交流绕组的分类	198	三、三相基波合成磁动势的性质	218
三、交流绕组的几个术语	198	四、三相绕组的谐波合成磁动势	218
§ 5-4 三相单层绕组	199	五、三相定子绕组的磁场	219
§ 5-5 三相双层绕组	201	§ 5-8 交流绕组的感应电动势	220
一、三相双层叠绕组	201	一、导体中的感应电动势	220
* 二、三相双层波绕组	204	二、整距线圈的感应电动势	221
§ 5-6 单相绕组的磁动势——脉振磁		三、短距线圈的感应电动势与短距系数	222
动势	205	四、线圈组的感应电动势与分布系数	222
一、整距线圈的磁动势	206	五、相绕组的感应电动势	224
二、整距分布线圈组的磁动势	209	六、感应电动势与绕组交链磁通的相	
三、短距线圈组的磁动势	211	位关系	224
四、绕组系数	212	小结	225
五、相绕组的磁动势	213	思考题和习题	226
§ 5-7 三相绕组的磁动势——旋转磁			

第六章 三相异步电动机

§ 6-1 三相异步电动机的基本工作原理	227	三、气隙	232
一、电动运行状态	228	§ 6-3 三相异步电动机的额定值及主	
二、发电运行状态	228	要系列	232
三、电磁制动运行状态	229	一、额定值	232
§ 6-2 三相异步电动机的基本结构	229	二、异步电动机的类型和系列	232
一、异步电动机的定子	229	§ 6-4 三相异步电动机的空载运行	234
二、异步电动机的转子	230	一、异步电动机的主磁通与漏磁通	234

二、转子绕组开路时的电磁关系	234	五、异步电动机的相量图	245
三、空载运行时的电磁关系	236	§ 6-8 三相异步电动机的功率和转矩	248
§ 6-5 三相异步电动机负载运行时的		一、功率变换与功率方程式	248
磁动势平衡方程式	236	二、转矩平衡方程式	249
一、转子磁动势	236	三、电磁转矩公式	250
二、磁动势平衡方程式	237	§ 6-9 三相异步电动机的工作特性	251
三、笼型转子的磁动势	239	一、转速特性 $n = f(P_2)$	251
§ 6-6 三相异步电动机负载运行时的		二、定子电流特性 $I_1 = f(P_2)$	252
电动势平衡方程式	239	三、电磁转矩特性 $M = f(P_2)$	252
§ 6-7 三相异步电动机负载运行时的		四、功率因数特性 $\cos\varphi_1 = f(P_2)$	252
等值电路和相量图	240	五、效率特性 $\eta = f(P_2)$	253
一、频率折算	241	§ 6-10 三相异步电动机的参数测定	253
二、绕组折算	242	一、空载试验和励磁参数测定	253
三、异步电动机的等值电路	244	二、短路试验和短路参数测定	254
四、用 T 型等值电路解释异步电动机		小结	257
的运行	245	思考题和习题	258

第七章 三相异步电动机的电力拖动

§ 7-1 三相异步电动机的机械特性方		二、降压起动	280
程式	260	三、笼型转子异步电动机起动性能的	
一、用参数表示的机械特性方程式	260	改善	289
二、实用的机械特性方程式	265	* 四、笼型转子异步电动机起动的过渡	
§ 7-2 三相异步电动机的固有特性和		过程	290
人为特性	265	§ 7-5 三相异步电动机的制动	292
一、三相异步电动机的固有特性	265	一、三相异步电动机的反接制动	292
二、三相异步电动机的人为特性	268	二、三相异步电动机的回馈制动	295
§ 7-3 绕线转子异步电动机的起动	273	三、三相异步电动机的能耗制动	297
一、转子串联对称电阻起动	273	§ 7-6 三相异步电动机的调速	299
二、转子串联频敏变阻器起动	277	一、改变同步转速调速	299
三、起动的过渡过程	279	二、改变转差率调速	305
§ 7-4 笼型转子异步电动机的起动	279	小结	312
一、直接起动	279	思考题和习题	314

第八章 单相异步电动机和三相同步电动机

§ 8-1 单相异步电动机	316	二、同步电动机的基本工作原理	322
一、一个单相脉振磁动势分解为两个		三、同步电动机的电压平衡关系	323
旋转磁动势	316	四、同步电动机的功角特性	326
二、单相异步电动机的工作原理	317	五、同步电动机的 V 形曲线	330
三、单相异步电动机的起动方法	319	六、同步电动机的起动	331
§ 8-2 三相同步电动机	321	小结	332
一、同步电动机的结构特点	321	思考题和习题	333

第九章 控制电机

§ 9-1 伺服电动机	335	* § 9-5 旋转变压器	350
一、交流伺服电动机	336	一、基本结构	350
二、直流伺服电动机	339	二、基本工作原理	351
§ 9-2 测速发电机	340	* § 9-6 微型同步电动机	353
一、直流测速发电机	340	一、微型反应式同步电动机	353
二、交流测速发电机	342	二、永磁式同步电动机	353
§ 9-3 自整角机	344	三、微型磁滞电动机	354
一、力矩式自整角机	344	小结	356
二、控制式自整角机	346	思考题	357
* § 9-4 步进电动机	348		

第十章 电动机的选择

§ 10-1 关于选择电动机额定功率的一般说明	358	率的预选	369
一、电动机温度升高的物理过程	358	三、连续周期工作制电动机的发热校验	369
二、温度和温升	358	四、连续周期工作制电动机的过载校验	373
三、绕组绝缘材料的等级	359	§ 10-6 短时工作制的电动机额定功率选择	376
四、电动机的额定功率	359	一、恒定负载	376
五、正确选择电动机额定功率的意义	359	* 二、变化负载	378
六、选择电动机额定功率的条件	360	* 三、当环境温度不等于标准值时的修正	380
§ 10-2 电动机的温升变化过程	360	§ 10-7 断续周期工作制的电动机额定功率选择	380
一、电动机的温升方程式	360	一、恒定负载	380
二、电动机的温升高过程	361	* 二、变化负载	382
三、电动机的温降低过程	362	* 三、当环境温度不等于标准值时的修正	383
§ 10-3 按照发热情况划分电动机的工作制	363	* 四、过载校验	383
一、连续工作制	363	* 五、当负载持续率很大或负载持续率很小时的处理方法	383
二、短时工作制	363	§ 10-8 电动机的电流种类、结构型式和额定转速选择	385
三、断续周期工作制	364	一、电动机的电流种类选择	385
§ 10-4 连续工作制的电动机额定功率选择	365	二、电动机的结构型式选择	385
一、标准环境温度下的额定功率选择	365	三、电动机的额定转速选择	385
二、环境温度不等于标准值时，额定功率的修正	366	小结	385
§ 10-5 连续周期工作制的电动机额定功率选择	368	思考题和习题	387
一、连续周期工作制的典型情况	368		
二、连续周期工作制的电动机额定功			

附 录

附录一	关于本书使用的单位、量方程式 和数值方程式的说明	390	附录三	电焊变压器	395
附录二	整流变压器	392	附录四	小型变压器的计算	396

参 考 文 献

实验指导书

实验一	他励直流电动机工作特性测定	402	实验五	三相变压器连接组的测定	416
实验二	并励直流发电机的特性测定	406	实验六	三相异步电动机实验	422
实验三	他励直流电动机的机械特性测定	408	实验七	绕线转子异步电动机的机械特性 测定	427
实验四	单相变压器实验	411			

绪 言

一、电机和电力拖动在国民经济中的作用

在现代工业生产、农业生产、交通运输、科学技术、信息传输和日常生活等各个方面都广泛地应用电能。电能具有生产和变换比较经济，传输和分配比较容易，使用和控制比较方便等优点，从而成为国民经济中使用极为普遍的一种能量。

电能可以由多种能量经过转换得到，例如由机械能转换成电能，由化学能转换成电能，由光能转换成电能等。目前应用最多的是通过发电机将机械能转换成电能，如用汽轮机、水轮机等原动机带动发电机旋转来获得电能。发电机可分为直流发电机和交流发电机两大类。直流发电机将机械能转换成直流电能；交流发电机将机械能转换成交流电能。现代的火力发电站和水力发电站都毫无例外地采用交流发电机发出交流电能。由于发电机产生的电压不能很高，通常不超过20kV，而远距离输电时，为了减少损耗和节省材料，必须采用高电压，例如110kV、220kV以及更高的电压，因此，发电机输出的电能要经过变压器将电压升高以后进行远距离传输。各种用电设备的电压通常为6kV、380V、220V等，比起远距离输电的电压要低很多，因此，来自高压输电网的电能还必须经过变压器将电压降低以后才能供用户使用。由此可见，在电能的获得、传输和分配中，发电机和变压器具有非常重要的作用。

利用电动机将电能转换成机械能，为生产机械提供动力，是电能应用的一个重要方面。用电动机带动生产机械工作，称为电力拖动，或称为电气传动。凡是在生产过程中完成加工、搬运等各项工作的机械，统称为生产机械，例如金属切削机床、泵、起重机、轧钢机、电机车等。由电动机、控制电动机的设备和生产机械组成的成套装置，称为电力拖动装置，也称为电力拖动系统。在电力拖动装置中，电动机的作用是将电能转换成机械能，带动生产机械运行，因而电动机是生产机械的原动机。在有些情况下，电动机也起着制动作用，将机械能转换成电能。电动机可分为直流电动机和交流电动机两大类。直流电动机将直流电能转换成机械能；交流电动机将交流电能转换成机械能。控制设备的作用是控制电动机的运行，从而也就控制了生产机械的运行。从简单的开关到各种复杂的控制装置都属于这里所说的控制设备。生产机械的运动部件可以归纳为传动机构和工作机构两部分。传动机构的作用是将电动机输出的机械能传递给工作机构，同时改变转速或运动方式。齿轮是最常见的传动机构，它用来使转速升高或降低。卷筒-钢绳也是一种传动机构，它用来将旋转运动变为直线运动。此外，还有其他的传动机构。工作机构指生产机械中直接进行工作的部分，例如，车床的主轴、电梯的升降室和轧钢机的轧辊等。在图0-1中，以简单的钻床为例，示意地说明了电力拖动装置的各个组成部分。近代还有包括电子计算机在内的复杂的自动化电力拖动系统。

生产机械除了采用电力拖动外，还可以采用水力拖动、风力拖动、蒸汽拖动等其他拖动方式。但是电力拖动比较容易控制，能够获得所需要的各种静态特性和动态特性，比较容易实现完善的保护，便于实现自动控制以至整个生产过程的自动化。尤其是数控技术和电子计算机技术的应用，进一步提高了自动化电力拖动的性能。采用电力拖动能够提高劳动生产率

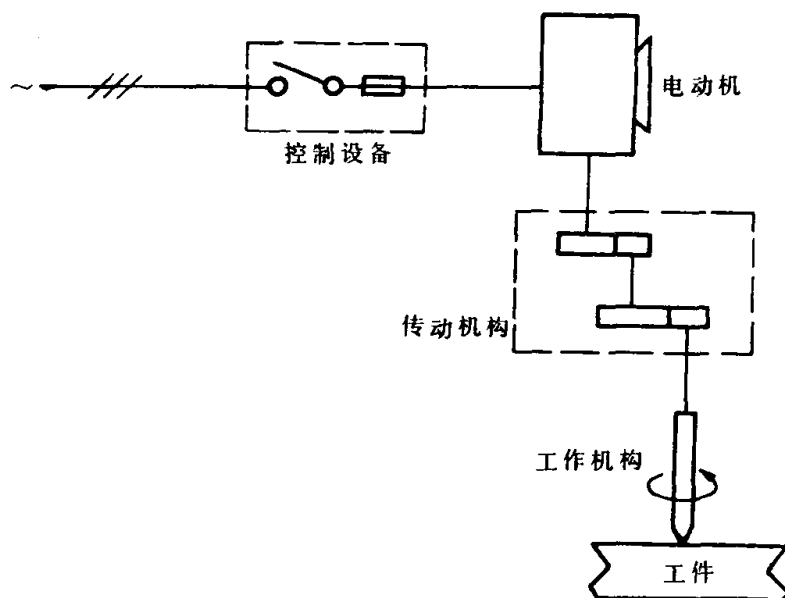


图 0-1 钻床的电力拖动装置示意图

及产品质量、改善劳动条件。电力拖动是工业部门最广泛采用的一种拖动方式，在国民经济的其他部门应用也很广泛。

二、本课程的性质、内容、任务和特点

电机及拖动基础是工业电气自动化专业的一门技术基础课，它由电机学和电力拖动基础两门课程结合而成，主要研究电机（发电机和电动机的总称）、变压器内部的电磁关系和电动机带动生产机械工作时用机械量转速、转矩表示的各种关系。本课程研究电机时以电动机为主，将电动机内部的电磁关系同带动生产机械工作时用机械量转速、转矩表示的各种关系连贯起来研究。实践表明，这种处理方法能够节省学时，适合职工高等专科学校教学的情况。因为变压器是电能传输和分配中的重要设备，在控制设备中也常用到各种变压器，所以本课程还要研究变压器的工作原理和基本工作特性。

本课程的任务是培养学生掌握电机及电力拖动的基本理论、计算方法和实验技能，为学习后续课程和从事实际工作打好基础。

本课程既是基础理论课程，又结合一定的生产实际。电机和电力拖动问题，往往包含电学、磁学、力学和热学的规律，几方面的因素又互相影响。所以分析问题时必须全面考虑，不能按照单纯的电路问题或单纯的力学问题来处理。又因为实际问题涉及到的因素很多，可以根据具体条件忽略一些次要因素，从而得出比较简单而又足够准确的结论。所谓次要因素是对一定条件来说的，在一种条件下是次要的因素，在另一种条件下却可能是主要的因素。注意到这些特点，对于学习本课程将会有很大帮助。

三、本书的数值方程式的表示方法系以国家标准 GB 3101-82《有关量、单位和符号的一般原则》为依据

有关这方面的说明请见附录一。使用本教材时，在 § 1-7 以前通过讲授或自学清楚了解这些说明是非常必要的。

本书的电气图用图形符号采用国家标准 GB 4728《电气图用图形符号》。

第一章 直流电机

电机是用来进行机电能量转换的电气装置。直流电机的作用是将直流电能转换为机械能，或者将机械能转换为直流电能。将直流电能转换为机械能的叫做直流电动机，将机械能转换为直流电能的叫做直流发电机。

直流电动机具有调速性能好、过载倍数大、控制性能好等优点，在调速性能要求比较高的场所，例如在金属切削机床、轧钢机、电机车、造纸机和纺织机等设备上，直流电动机都得到广泛应用。直流发电机主要用作各种直流电源，由于电力电子学的发展，直流发电机正在逐步被晶闸管整流装置所取代，因此，本章主要分析直流电动机的原理、结构和运行性能。

§ 1-1 直流电机的基本工作原理

一、直流电动机的基本工作原理

电磁力定律是电动机的理论基础。这个定律告诉我们，通电导体在磁场中要受到电磁力的作用，当磁场方向与电流方向相互垂直时（图 1-1），作用在通电导体上的电磁力为

$$f = B_x l I \quad (1-1)$$

式中 f ——作用在通电导体上的电磁力；

B_x ——通电导体所在位置的磁感应强度（即磁通密度）；

l ——导体在磁场中的长度；

I ——导体中的电流。

电磁力的方向可以用左手定则来判定。图 1-2 表示左手定则的用法：将左手伸平，使姆

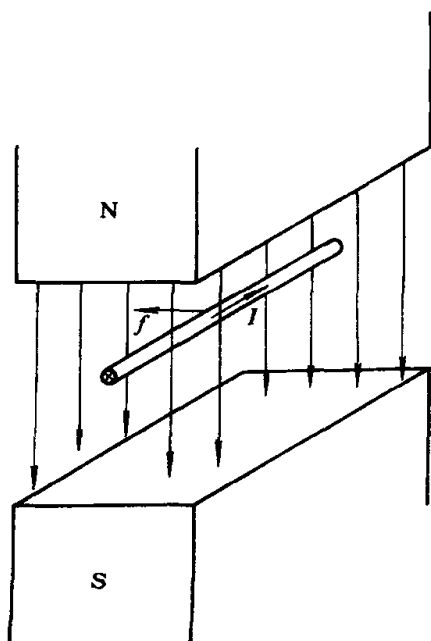


图 1-1 磁场对通电导体的作用力

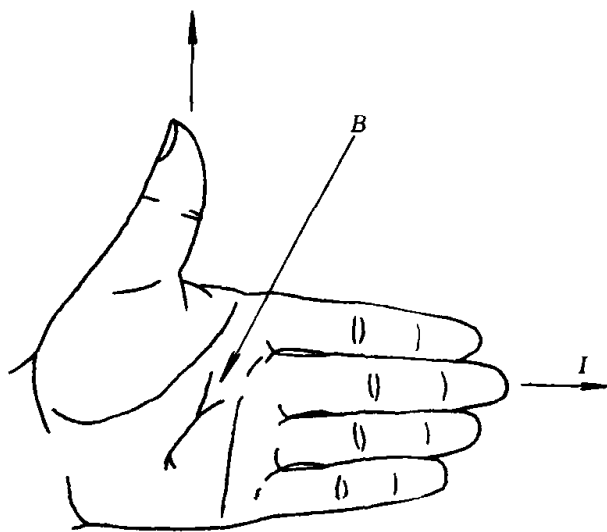


图 1-2 左手定则

指与其余四指垂直，并使磁力线的方向指向掌心，四指指向电流的方向，则拇指的指向就是电磁力的方向。在电机中，磁场方向与电流方向相互垂直，因而可以用左手定则确定电磁力的方向。

电动机通常都是以连续的旋转运动带动机械设备运行的，那末，怎样才能构成一台能够连续转动的直流电动机呢？现在先分析一下图 1-3 中的情况，图中，N 和 S 为一对固定的磁极，在两个磁极之间装一个可以绕 OO' 轴转动的钢质圆柱体，线圈 $abcd$ 固定在圆柱体上，这个装有线圈的钢质圆柱体称为电枢。线圈的 a 、 d 两端分别接在两个随电枢转动的铜环上，铜环与固定不动的电刷 A 和 B 保持滑动接触，直流电流经电刷 A 通入线圈并经电刷 B 返回电源，当线圈 $abcd$ 在图示位置时，根据磁场方向和导体中电流的方向，利用左手定则可以判断出线圈边 ab 所受的电磁力向左， cd 边的电磁力向右，它们都产生企图使电枢逆时针方向转动的力矩。由电磁力产生的企图使电枢转动的力矩叫做电磁转矩。如果电磁转矩足够大，电枢就会在电磁转矩的作用下按逆时针方向转动。但是，

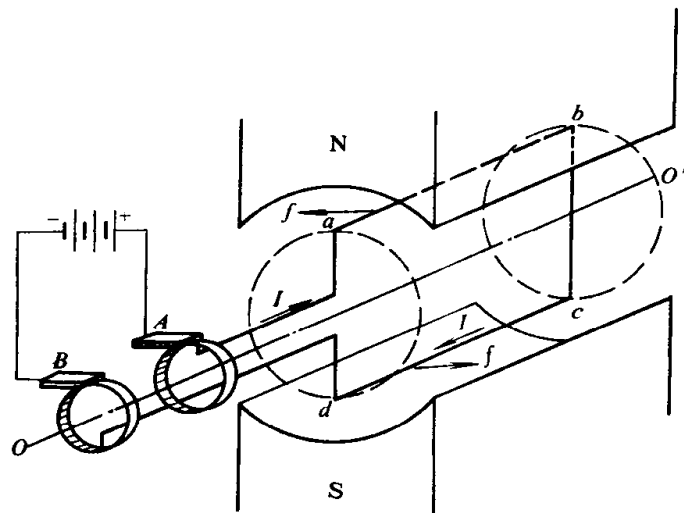


图 1-3 线圈中引入方向不变的电流

如果线圈边 ab 由磁极 N 下面转到磁极 S 下面、线圈边 cd 由磁极 S 下面转到磁极 N 下面，由于线圈中的电流方向不变，使电磁转矩由逆时针方向变为顺时针方向，这说明电枢不能按一个方向连续转动。要使电枢连续转动，就必须保持电磁转矩的方向不变，为此，当线圈边由一个磁极下面进入极性相反的另一个磁极下面时，应当及时改变线圈中电流的方向。这种线圈电流改变方向的过程叫做换向。为了实现换向，须将图 1-3 中的两个铜环改为图 1-4 中所示的换向器。该图中的换向器由互相绝缘的两个半圆铜环组成，它装在电枢的轴上，随电枢一起转动。电刷 A 和 B 固定不动，并与换向器保持滑动接触。当电枢在图示位置时，线圈中电流的路径是：电源正极→电刷 A→ $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ →电刷 B→电源负极。根据用左手定则确定的电磁力方向可知，此时的电磁转矩是逆时针方向的。设电枢在电磁转矩

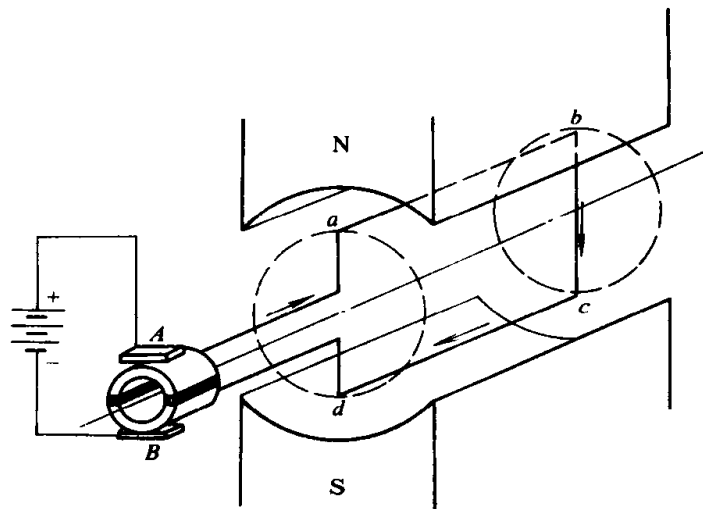


图 1-4 直流电动机工作原理

的作用下按逆时针方向旋转，当线圈边 ab 由 N 极下面转到 S 极下面、线圈边 cd 由 S 极下面转到 N 极下面时，由于换向器的作用，使线圈中的电流改变方向，电流路径是：电源正极→电刷 A→ $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ →电刷 B→电源负极，但是各磁极下面的线圈边中，电流方向并不改变，这就保证了电磁转矩的方向不变，从而使电枢能够连续转动。

以上按照电枢只有一个线圈的情况说明了直流电动机的基本工作原理。然而，只有一个线圈的电枢结构是很不完善的，无论从电磁转矩的平稳性考虑，还是从增大电磁转矩的角度考虑，都应该增加线圈的数量，并使线圈边沿电枢圆周均匀分布。这是因为，电磁转矩的大小决定于电磁力 $f = B_x I l$ 的大小，对于确定的电枢来说线圈边长度 l 一定，设线圈中电流 I 恒定，则电磁力 f 与电枢表面的磁通密度 B_x 成正比。在主磁极的作用下，电枢表面的磁通密度分布情况大致是这样，在磁极极面下，磁通密度比较均匀，而且数值最大；在磁极极尖外侧，磁通密度较小；在相邻两个磁极的中心线处，磁通密度为零。这条中心线叫做几何中线。在一个磁极范围内，磁通密度在空间的分布曲线接近于梯形，如图 1-5 所示。当电机旋转时，由于线圈边的位置不断改变，电磁力的大小会发生很大变化，如果只有一个线圈，作用在电枢上的电磁转矩就会有很大波动。如果沿电枢圆周均匀放置很多线圈，电枢的总电磁转矩就等于各个线圈产生的电磁转矩之和，线圈数愈多，总电磁转矩愈大；均匀分布的线圈愈多，总电磁转矩的波动就愈小。所以，实际的直流电机在电枢上都均匀放置了很多线圈。

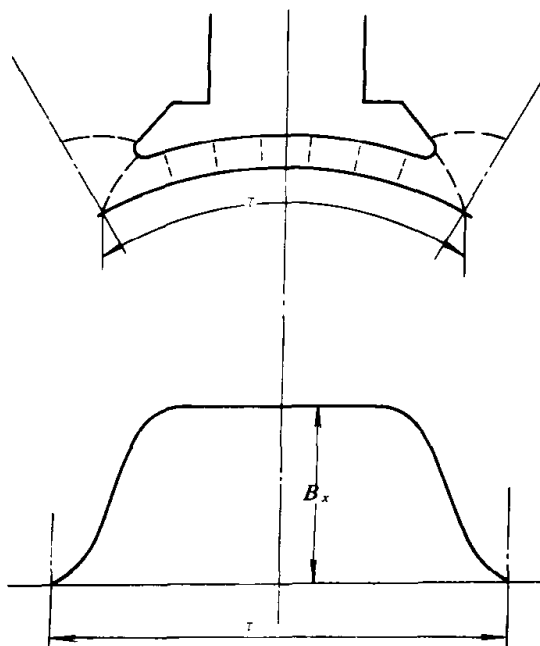


图 1-5 磁极磁通密度的分布

二、直流发电机的基本工作原理

在图 1-4 中给出了一个最简单的直流电动机模型，如果去掉它的电源部分，并在原来连接直流电源的地方连接一个用电设备（例如，接一只灯泡），再用一台原动机拖动电枢旋转，这样，它就成为一台最简单的直流发电机，如图 1-6 所示。现在研究它的工作原理。当电枢由原动机带动按照箭头 n 的方向旋转时，在图示位置，线圈边 ab 在 N 极下切割磁力线，线圈边 cd 在 S 极下切割磁力线，因而两个线圈边中都会产生感应电动势。设线圈只有一匝，根据电磁感应定律，每一线圈边中感应电动势的大小为

$$e_B = B_x l v$$

式中 e_B ——线圈边的感应电动势；

B_x ——线圈边所在位置的磁通密度；

l ——线圈边的有效长度；

v ——线圈边的线速度。

可见，当电枢匀速转动时，每一瞬间感应电动势的大小与这一瞬间线圈边所切割的磁通密度 B_x 成正比。

感应电动势的方向可以用右手定则确定，方法是，将右手手掌伸直，拇指和其余四指在同一平面内并互相垂直，使磁力线的方向指向掌心，拇指指向导体运动的方向，则其余四指的指向就是感应电动势的方向，如图 1-7 所示。因此，图 1-6 中线圈边中感应电动势的方向从 b 到 a 和从 d 到 c 。线圈总电动势 e_Q 等于两线圈边的感应电动势之和，即

$$e_Q = 2e_B = 2B_x l v$$

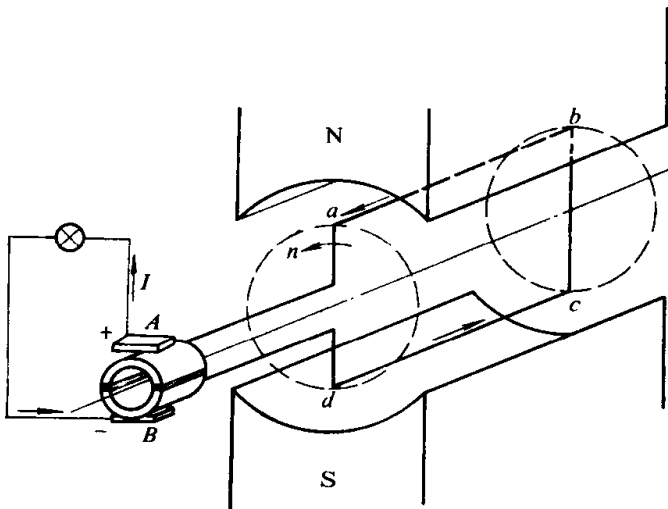


图 1-6 直流发电机的工作原理

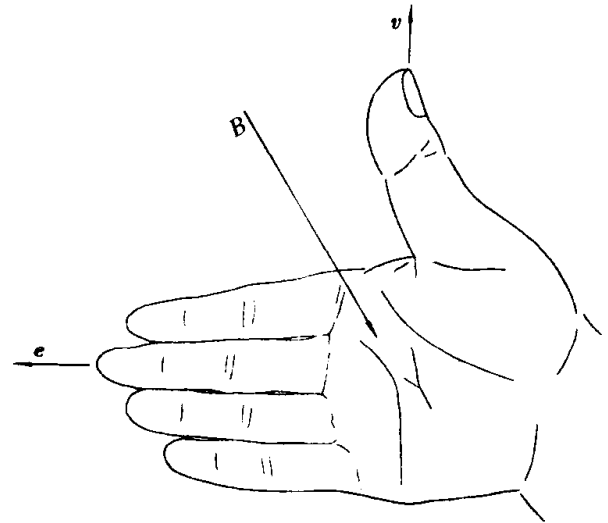


图 1-7 右手定则

当线圈边 ab 和 cd 转到 N 极和 S 极之间的几何中线上时，由于此处磁通密度为零，所以这一瞬间感应电动势也为零。随着电枢转动，线圈边 ab 由几何中线转到 S 极下， cd 边由几何中线转到 N 极下，可以判定，此时线圈中感应电动势的方向为从 a 到 b 和从 c 到 d 。

对这个线圈来说，电动势的方向恰恰与原来相反。根据上述情况并联系到磁极磁通密度沿电枢表面的分布，可以大致画出线圈感应电动势 e_Q 的波形如图 1-8a 所示。由于换向器随着电枢一起转动，电刷 A 和电刷 B 固定不动，所以，电刷 A 始终通过换向器和 N 极下的线圈边相连接，电刷 B 始终通过换向器和 S 极下的线圈边相接，从而在电刷 A 和 B 之间得到一个方向不变的脉动电动势，电刷 A 的极性为正，电刷 B 的极性为负，它的波形如图 1-8b 所示。如果在电刷 A 和 B 之间接上负载，就会有电流从电刷 A 流出，经负载流回电刷 B，也就是说，电机将机械能转换成电能，向负载输出电功率，从而成为一台直流发电机。

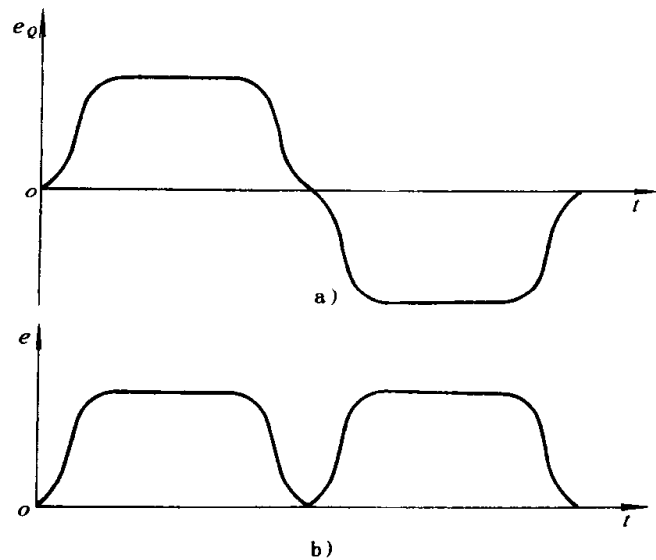


图 1-8 线圈电动势和刷间电动势

a) 线圈电动势 b) 刷间电动势

如果电枢上只有一个线圈，不仅感应电动势很小，而且由图 1-8b 可以看出，刷间电动势波动也很大，所以没有实用价值。只有在电枢表面放置许多线圈，并按一定规律把它们联结起来才能增大输出电动势，并使输出电动势平稳，从而制成可以实际应用的直流发电机。

三、直流电机的可逆性

图 1-9 所示是一台直流电动机，根据图中磁极的极性和电枢电流的方向，可以用左手定则判定旋转方向是逆时针的。当电枢转动时，电枢绕组切割磁力线会产生感应电动势，感应电动势的方向可以根据磁场方向和电枢旋转方向用右手定则判定。由于电动机运行时的电枢电动势的方向总是与电枢电流的方向相反，因而称它为反电动势。电动机的电源只有克服反

电动势才能源源不断地向电动机输送电功率。

既然直流电动机的电枢线圈也能产生感应电动势，所以，给它提供适当的外界条件，例如，用原动机拖动直流电动机旋转，并将用电负载通过电刷连接到电枢上，它就可以将机械能转变为电能，成为一台直流发电机。

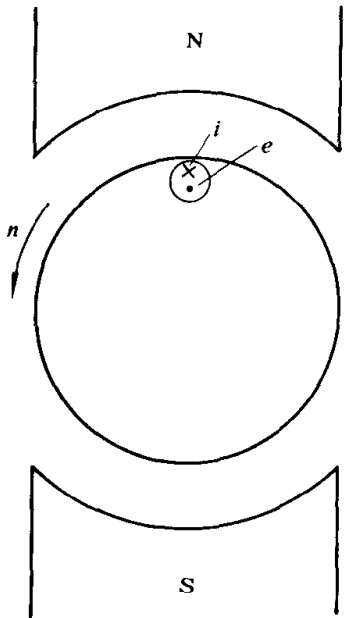


图 1-9 直流电动机的反电动势

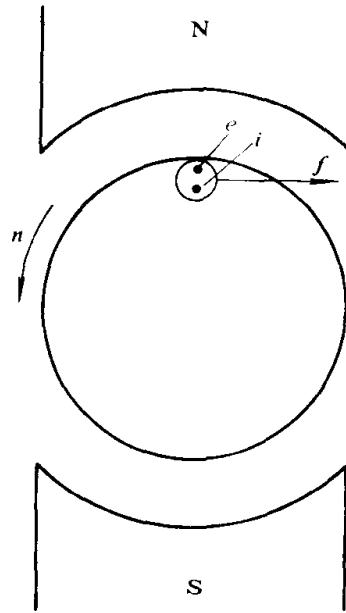


图 1-10 发电机中的电磁力

当直流发电机向负载输出电功率时，负载电流流过电枢线圈，使处在磁场中的线圈受到电磁力作用。例如，图 1-10 为一台直流发电机，根据图中标明的电枢旋转方向和磁极极性，可以用右手定则判定电枢电流的方向。再根据磁场方向和电枢电流方向，用左手定则判断出作用在电枢导体上电磁力的方向。可以看出，在直流发电机中，作用于电枢导体上的电磁力形成一个与旋转方向相反的转矩，即电磁转矩为阻转矩。原动机的拖动转矩必须克服发电机的电磁转矩，才能连续不断地将机械能转换为电能供给用电设备。

同一台直流电机，在不同的外部条件下，可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行，这说明了直流电机能量转换作用的可逆性。必须指出，如果我们把电机制造厂生产的直流电动机当作直流发电机用，或者把直流发电机当作电动机用，它们的运行特性都是不太好的。

§ 1-2 直流电机的结构

直流电机进行能量转换，必须有磁场以及与磁场耦合的线圈，磁场与线圈之间还必须有相对运动。因此，直流电机由静止部分和转动部分所组成。静止部分称为定子，包括主磁极、换向极、电刷装置和机座等主要部件。转动部分称为转子。直流电机的转子通常称为电枢，它主要由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等部件组成。图 1-11 为直流电机的剖面图。

下面对直流电机的主要部件作简要介绍。

(1) 主磁极 主磁极的作用是建立电机的磁极磁势，产生主磁通。主磁极由磁极铁芯和套在它上面的励磁线圈（励磁绕组）组成。只有功率很小的某些微电机的磁极才用永久磁钢