



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机及拖动

吴玉香 李艳 刘华 毛宗源 编著



化学工业出版社

TM3/101

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机及拖动

吴玉香 李 艳 刘 华 毛宗源 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要讲述电机及电力拖动的相关理论和知识, 主要包括: 电力拖动系统的运动方程式及稳定运行条件; 直流电机、变压器、三相异步电动机、三相同步电机的基本结构、工作原理、运行特性的分析与计算; 直流电动机、三相异步电动机的启动、制动、调速原理与方法; 各类控制电机的运行原理与特性分析; 电动机的选择; MATLAB 仿真等。

本书可作为电气工程及其自动化、自动化及机电一体化等非电机类专业本科生的专业基础课教材, 也可供从事电机及运动控制的工程技术人员参考学习。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机及拖动/吴玉香, 李艳, 刘华, 毛宗源编著. —北京: 化学工业出版社, 2008.1
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-01454-2

I. 电… II. ①吴…②李…③刘…④毛… III. ①电机-高等学校-教材②电力传动-高等学校-教材 IV. TM3 TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 002224 号

责任编辑: 唐旭华
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 高 震
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 474 千字 2008 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着控制理论、电力电子技术、计算机技术、检测技术等不断发展,各门学科的相互渗透,运动控制领域已发生了根本性的变化,许多新思想、新方法在该领域得到了应用。作为运动控制系统中主要执行元件的电机,也处在不断发展中,许多基于新原理制造的电机不断涌现。要对运动控制系统进行研究,就必须对电机及电力拖动技术有足够的了解。本书对电机及电力拖动技术的基本内容进行了整合,并尽可能反映上述最新进展情况,以满足现代工业对“电机及拖动”课程的要求。编者根据自动化类专业的性质和多年来的教学体会,参考了国内外一些相关教材和文献,结合高等教育教学改革的要求以及传统教材存在的问题,编写了这本《电机及拖动》教材。

与传统教材相比,本书具有以下特点:

(1) 将电机学与电力拖动基础有机地融为一体,力求简明扼要、层次分明、重点突出,以节省教学时间;

(2) 既重视基本概念、基本原理的阐述,又强调工程实际应用;

(3) 增加了许多新型电机的内容,如无刷直流电机、直线电机、力矩电机、超声波电机等;

(4) 增加了有关 MATLAB 的仿真内容,有利于读者借助计算机加深对内容的理解,并进行一些相关的科学研究,由此提高读者对本课程的学习兴趣。

本书的适用对象为电气工程及其自动化、自动化、机电一体化等专业的本科生,也适用于从事电机及运动控制的工程技术人员参考学习。

本书配套电子课件可免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用,如有需要请联系:txh@cip.com.cn。

本书包括绪论和 10 章内容。其中绪论、第 1~3 章和第 10 章由华南理工大学吴玉香编写;第 4 章由广州大学刘华编写;第 5~7 章由华南理工大学李艳编写;第 8 章由吴玉香、刘华共同编写;第 9 章由李艳、吴玉香共同编写。华南理工大学毛宗源教授对全书进行了修改定稿。

由于时间仓促及编者水平有限,书中难免存在一些错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

编者

2007 年 9 月

目 录

0 绪论	1	2.3 直流电动机的机械特性	35
0.1 电机及拖动系统发展概况	1	2.3.1 机械特性的一般表达式	35
0.2 本课程的性质及任务	1	2.3.2 固有机械特性	35
0.3 本课程的学习方法	2	2.3.3 人为机械特性	36
0.4 本课程涉及的电磁学基本理论	2	2.3.4 根据电机的铭牌数据估算机械特性	38
0.4.1 磁的基本概念	2	2.4 串励和复励直流电动机	39
0.4.2 磁性材料	3	2.4.1 串励直流电动机的机械特性	39
0.4.3 电磁感应定律	4	2.4.2 复励直流电动机的机械特性	40
0.4.4 电磁力定律	5	本章小结	41
0.4.5 全电流定律	5	思考题与习题	41
1 直流电机原理	6	3 直流电动机的电力拖动	43
1.1 直流电机的基本原理	6	3.1 电力拖动系统的运动方程式	43
1.1.1 直流电机的用途	6	3.1.1 运动方程式	43
1.1.2 基本结构	6	3.1.2 单轴与多轴系统	44
1.1.3 基本工作原理	7	3.2 负载的转矩特性及电力拖动系统稳定运行条件	45
1.1.4 铭牌数据和型号	9	3.2.1 负载的转矩特性	45
1.2 直流电机的电枢绕组	11	3.2.2 电力拖动系统稳定运行条件	47
1.2.1 概述	11	3.3 他励直流电动机的启动	50
1.2.2 单叠绕组	12	3.3.1 降压启动	50
1.2.3 单波绕组	15	3.3.2 电枢回路串电阻启动	50
1.3 直流电机的磁场	17	3.4 他励直流电动机的调速	53
1.3.1 励磁方式	17	3.4.1 调速方法	54
1.3.2 空载磁场	18	3.4.2 调速性能指标	57
1.3.3 负载磁场和电枢反应	20	3.4.3 调速方式与负载性质的配合	60
1.4 直流电机的感应电动势和电磁转矩	21	3.5 他励直流电动机的制动	62
1.4.1 感应电动势	21	3.5.1 电动运行与制动运行	62
1.4.2 电磁转矩	21	3.5.2 能耗制动	63
1.5 直流电机的换向	22	3.5.3 反接制动	65
本章小结	24	3.5.4 回馈制动	67
思考题与习题	25	3.5.5 他励直流电动机的四象限运行	70
2 直流电机的运行特性	26	3.6 其他直流电动机的电力拖动	70
2.1 直流发电机的运行原理	26	3.6.1 并励直流电动机的电力	
2.1.1 基本方程式	26		
2.1.2 运行特性	28		
2.2 直流电动机的运行原理	31		
2.2.1 直流电机的可逆原理	31		
2.2.2 基本方程式	31		
2.2.3 工作特性	34		

拖动	70	5.1 三相异步电动机的基本原理	122
3.6.2 串励直流电动机的电力		5.1.1 基本结构	122
拖动	71	5.1.2 铭牌数据和型号	124
3.6.3 复励直流电动机的电力		5.1.3 工作原理	125
拖动	72	5.2 交流电机的定子绕组	127
3.7 电力拖动系统的过渡过程	73	5.2.1 交流绕组的基本知识	127
3.7.1 机械过渡过程分析	73	5.2.2 三相单层绕组	129
3.7.2 机电过渡过程分析	78	5.2.3 三相双层绕组	130
本章小结	80	5.3 交流电机绕组的磁动势	130
思考题与习题	81	5.3.1 单相绕组的磁动势——脉振	
4 变压器	84	磁动势	130
4.1 变压器的工作原理与结构	84	5.3.2 三相绕组的磁动势——旋转	
4.1.1 基本工作原理	84	磁动势	134
4.1.2 基本结构	85	5.4 三相交流电机绕组的电动势	137
4.1.3 分类和铭牌数据	87	5.4.1 线圈单个有效边的基波电	
4.2 单相变压器的空载运行	88	动势	137
4.2.1 电磁关系	88	5.4.2 线圈基波电动势	137
4.2.2 电压平衡方程式	88	5.4.3 线圈组基波电动势	138
4.2.3 等效电路和相量图	90	5.4.4 基波相电动势	139
4.3 单相变压器的负载运行	91	5.4.5 感应电动势与绕组交链磁通	
4.3.1 电磁关系	91	的关系	139
4.3.2 基本方程式	92	5.4.6 谐波电动势及其削弱	
4.3.3 等效电路及相量图	93	方法	139
4.4 变压器的参数测定和标么值	97	5.5 三相异步电动机的电磁关系	141
4.4.1 空载试验	97	5.5.1 磁路分析	141
4.4.2 短路试验	98	5.5.2 转子绕组开路时的电磁	
4.4.3 标么值	100	关系	141
4.5 变压器的运行特性	101	5.5.3 转子绕组短路且转子堵转时	
4.5.1 外特性	101	的电磁关系	144
4.5.2 效率特性	102	5.5.4 转子旋转时的电磁关系	146
4.6 三相变压器	103	5.5.5 笼型转子绕组的参数	151
4.6.1 磁路分析	103	5.6 三相异步电动机的功率和	
4.6.2 绕组连接法与联结组	104	转矩	152
4.6.3 空载电动势波形	107	5.6.1 功率平衡关系	152
4.6.4 并联运行	109	5.6.2 转矩平衡关系	153
4.7 特殊变压器	112	5.7 三相异步电动机的工作特性	154
4.7.1 三绕组变压器	112	5.7.1 工作特性分析	154
4.7.2 自耦变压器	114	5.7.2 工作特性测试方法	155
4.7.3 电压互感器	116	5.8 三相异步电动机的参数测定	155
4.7.4 电流互感器	116	5.8.1 空载试验	155
4.7.5 其他特殊变压器	117	5.8.2 短路试验	156
本章小结	118	本章小结	157
思考题与习题	119	思考题与习题	159
5 三相异步电动机的基本原理	122	6 三相异步电动机的电力拖动	161

6.1 三相异步电动机的机械特性	161	7.3.2 功(矩)角特性	209
6.1.1 电磁转矩表达式	161	7.3.3 功角的物理意义	210
6.1.2 固有机械特性	163	7.3.4 稳定运行分析	211
6.1.3 人为机械特性	165	7.4 功率因数调节	212
6.1.4 利用电磁转矩实用表达式计算 机械特性	166	7.4.1 同步电动机的功率因数 调节	212
6.2 三相异步电动机的启动	168	7.4.2 U形曲线	214
6.2.1 直接启动的问题	169	7.4.3 同步调相机	214
6.2.2 笼型三相异步电动机的直接 启动	169	7.5 同步电动机的启动	215
6.2.3 笼型三相异步电动机的降压 启动	169	本章小结	216
6.2.4 高启动转矩的笼型三相异步 电动机	173	思考题与习题	216
6.2.5 笼型三相异步电动机的软 启动	175	8 微控电机	218
6.2.6 绕线型三相异步电动机的 启动	176	8.1 单相异步电动机	218
6.3 三相异步电动机的制动	180	8.1.1 基本结构	218
6.3.1 能耗制动	180	8.1.2 工作原理	218
6.3.2 反接制动	185	8.1.3 等效电路	219
6.3.3 回馈制动	187	8.1.4 启动和调速	219
6.3.4 三相异步电动机的各种运行 状态	189	8.2 伺服电动机	222
6.4 三相异步电动机的调速	189	8.2.1 直流伺服电动机	222
6.4.1 调速方法	189	8.2.2 交流伺服电动机	224
6.4.2 改变极对数调速	191	8.3 测速发电机	226
6.4.3 变频调速	191	8.3.1 直流测速发电机	226
6.4.4 改变转差率调速	194	8.3.2 交流测速发电机	227
本章小结	199	8.4 步进电动机	229
思考题与习题	200	8.4.1 基本结构	229
7 同步电机	202	8.4.2 工作原理	229
7.1 同步电机的基本工作原理	202	8.4.3 控制与应用	231
7.1.1 基本结构	202	8.5 开关磁阻电动机	232
7.1.2 基本工作原理	203	8.5.1 基本结构	232
7.1.3 铭牌数据和型号	204	8.5.2 工作原理	232
7.2 同步电动机的电磁关系	205	8.5.3 控制方式	233
7.2.1 隐极同步电动机的电磁 关系	205	8.6 力矩电动机	234
7.2.2 凸极同步电动机的电磁 关系	206	8.6.1 概述	234
7.3 同步电动机的功率、转矩和功 (矩)角特性	208	8.6.2 直流力矩电动机	234
7.3.1 功率传递与转矩平衡	208	8.6.3 交流力矩电动机	235
		8.6.4 使用注意事项	235
		8.7 直线电动机	235
		8.7.1 概述	235
		8.7.2 直线异步电动机	236
		8.7.3 直线直流电动机	238
		8.7.4 直线步进电动机	238
		8.8 无刷直流电动机	239
		8.8.1 基本结构	239
		8.8.2 工作原理	240

8.9 超声波电机	241	9.4.2 额定功率与允许温升之间的 关系	254
8.9.1 工作原理	241	9.5 电动机额定功率的选择	257
8.9.2 超声波电机与传统电磁电机 的比较	241	9.5.1 额定功率的选择步骤	257
8.9.3 超声波电机的特点	242	9.5.2 负载功率的计算	257
8.9.4 超声波电机的分类及 应用	243	9.5.3 常值负载时电动机额定功率 的选择	258
本章小结	244	9.5.4 负载变化时电动机额定功率 的选择	260
思考题与习题	244	9.6 选择电动机额定功率的统计法和 类比法	261
9 电动机的选择	246	9.6.1 用统计法选择电动机的额定 功率	261
9.1 电力拖动系统方案的选择	246	9.6.2 用类比法选择电动机的额定 功率	262
9.1.1 电力拖动系统的供电 电源	246	本章小结	262
9.1.2 电力拖动系统的稳定性	246	思考题与习题	262
9.1.3 调速方案的选择	247	10 电机及拖动的计算机仿真	264
9.1.4 启动、制动与正、反转方案的 选择	247	10.1 仿真的基本概念	264
9.1.5 电力拖动系统的经济性	249	10.2 MATLAB 简介	264
9.2 电动机的一般选择	249	10.2.1 MATLAB 的功能特点	265
9.2.1 种类选择	250	10.2.2 MATLAB 的语言特点	265
9.2.2 工作条件分析	250	10.3 MATLAB 在电机及拖动课程中 的应用	266
9.2.3 额定转速的选择	251	10.3.1 参数计算	266
9.2.4 结构类型的选择	252	10.3.2 曲线绘制	269
9.3 电动机的发热与温升	252	10.3.3 运行仿真	271
9.3.1 发热过程	253	思考题与习题	275
9.3.2 冷却过程	253	参考文献	276
9.4 电动机的额定功率与允许温升之 间的关系	254		
9.4.1 允许温升	254		

0

绪 论

0.1 电机及拖动系统发展概况

电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等,都必须利用电机这种能够进行机电能量转换与传递的电磁机械。从能量转换的角度看,电机可分为发电机、电动机和变压器三大类。发电机将机械能转换为电能,主要用于生产电能的发电厂。电动机将电能转换为机械能,用来驱动各种用途的生产机械。变压器是输送交流电时所使用的一种变电压和变电流的设备。

在现代工业和日常生活中,到处都可以找到电机的踪影。从以煤、天然气等为燃料的火力发电厂及以核反应堆中核裂变所释放出的热能进行发电的核能发电厂中的汽轮发电机、以水资源为动力的水轮发电机、以风为动力的风力发电机,到输配电系统中的变压器,从工厂的自动化生产线、车间的机床、机器人到家用电器甚至电动玩具等,电机几乎无处不在。

目前,电机的发展主要有三种趋势。①大型化;单机容量越来越大,如60万千瓦及以上的汽轮发电机。②微型化;为适应设备小型化的要求,电机的体积越来越小,重量越来越轻。③新原理、新工艺、新材料电机不断涌现,如无刷直流电机、直线电机、超声波电机等。

电力拖动又称电气拖动,是用电动机作原动机去拖动各种生产机械的工作机构运动,以满足各种生产工艺的要求。电力拖动系统的发展,从最初的成组拖动,经单电机拖动直至发展为现代电力拖动的基本形式——多电机拖动。

电动机是电力拖动系统的核心,分直流和交流两大类,分别组成直流拖动系统和交流拖动系统。直流电动机具有良好的启动、制动性能,宜于在宽广范围内平滑调速,在需要高性能可控电力拖动的领域中得到了广泛的应用。交流电机,特别是异步电动机,以其结构简单,性能可靠,广泛应用于工农业生产及居民生活中。交流拖动近年来发展很快,有逐渐取代直流拖动的趋势。

现代电力拖动系统都是可控的,电动机的控制装置随着科学技术的发展亦在日新月异的变化。近三十年来,功率电子技术的发展,各种形式的功率变换器已直接为电动机供电,而微处理器和数字信号处理器的应用以及软件技术的发展,促使模拟控制向数字控制转化。复杂的电机控制因数字化技术的应用得以实现,既简化了硬件设备,又提高了控制精度,大大拓宽了交流拖动的应用领域。数字控制的电力拖动系统在国民经济中有广泛应用,如数控机床、机器人等,对生产力的发展和技术进步起着极其重要的作用。

0.2 本课程的性质及任务

现代工业控制系统总的来说可分为两大类:一类是运动控制系统,它主要涉及与动作类有关的被控对象,如机器人、机床类生产机械等;另一类是过程控制系统,它涉及到过程类的被控对象,如压力、温度、流量等。电机作为运动控制系统的执行机构和控制对象,在运动控制系统中占据着重要地位。对运动控制系统,只有了解和熟悉执行机构、被控对象的特点和规律,才能有效地设计控制策略,获得稳定、准确、快速的系统。

“电机及拖动”课程就是为解决运动控制系统中上述问题而为电气工程、工业自动化、机电一体化等非电机专业开设的一门专业基础课，是电机原理和电力拖动两门课程的有机结合，其理论性较强，同时强调实际应用。本书侧重于基本原理和基本概念的阐述，采用工程方法进行分析，着重分析电机的机械特性与拖动运行特性。

本课程的任务是使学生或相关技术人员掌握交直流电机、变压器及微控电机的基本原理和结构、机械特性及外特性的分析与计算、电力拖动系统的运行性能、电机容量选择等内容，为后续课程的学习和今后工作准备必要的基础知识。

0.3 本课程的学习方法

本课程虽然是一门专业基础课，但同时又是一门实践性很强的独立课程。电磁场是电机赖以实现机电能量转换的媒介，因此要了解和熟悉电机的各种特性，就必须分析电机内部的电磁过程。由于电磁场的抽象性，因而增加了该课程的难度。电力拖动则涉及系统的性能指标要求与方法的实现等问题，必须要用系统的观点看问题。因此，学习本课程时一定要以物理概念为主、工程计算为辅。除了了解基本运行原理与电磁过程，还应重点掌握各类电动机的机械特性以及与生产机械配合时的启动、制动与调速方法，并通过实验和仿真加深对相关知识的理解和掌握。只有理论与实际相结合，才能真正学好本课程。

0.4 本课程涉及的电磁学基本理论

从能量转换角度来看，电机是一种能量转换装置，其能量转换的媒介是磁场。电机的工作原理都是建立在电磁感应定律、电磁力定律和全电流定律等基本电磁定律之上的。在此将本课程用到的一些电磁理论知识简要介绍一下，以便查阅。

0.4.1 磁的基本概念

磁场是传递物体间磁力作用的场，由电流产生。整个磁场的情况可形象地用磁力线来描述。磁力线是闭合曲线，其方向与产生磁场的电流方向符合右手螺旋定则。如果电流流过一次一根直导体，用右手握住直导体，伸直大拇指表示电流方向，则弯曲的四指所指的方向即为磁力线的方向。如果电流通过一匝或多匝线圈，用右手握住线圈，弯曲的四指表示线圈中电流的方向，则伸直的大拇指所指的方向即为线圈内部磁力线的方向，如图 0-1 所示。

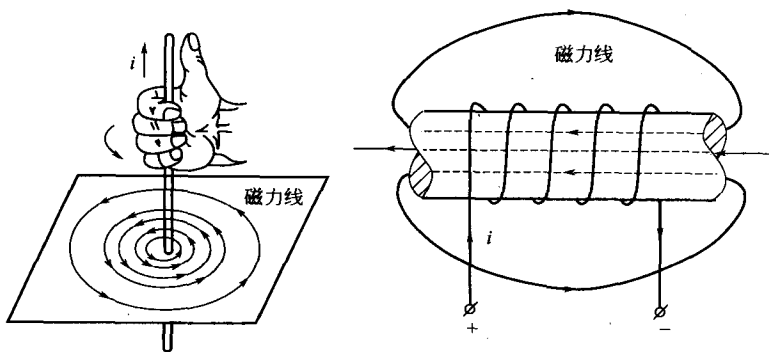


图 0-1 磁力线与电流之间的右手螺旋关系

磁力线上每一点的切线方向与该点磁场的方向一致，而磁场的强弱则可用磁力线的疏密程度表示。

在对磁场进行分析和计算时，常用到以下几个物理量。

(1) 磁通密度 B

磁通密度 B 是描述磁介质中实际的磁场强弱和方向的物理量, 可用通过磁场方向单位面积的磁力线数来表示。磁通密度的单位为特斯拉 (T)。

(2) 磁通 Φ

磁场中穿过某一截面 S 的磁通密度 B 的总通量, 即穿过截面 S 的总磁力线数称为通过该面积的磁通, 用 Φ 表示

$$\Phi = \int_S B dS \quad (0-1)$$

若截面 S 与磁通密度 B 垂直, 则 $\Phi = BS$; 若截面 S 与磁通密度 B 不垂直, 截面 S 的法线与磁通密度 B 的夹角为 α , 则 $\Phi = BS \cos \alpha$ 。磁通单位为韦伯 (Wb)。

(3) 磁场强度 H

磁场强度是进行磁场计算时引进的一个辅助物理量。磁场强度定义为介质中某点的磁通密度 B 与介质磁导率 μ 之比, 用 H 表示

$$H = B/\mu \quad (0-2)$$

磁场强度代表电流本身产生磁场的强弱, 其大小只与产生该磁场的电流大小有关, 与介质的种类无关。磁场强度的单位为安/米 (A/m)。

(4) 磁动势 F

在磁路中, 产生磁通 Φ 的是磁动势, 它等于流过线圈的电流 I 与其匝数 N 的乘积, 用 F 表示

$$F = IN \quad (0-3)$$

磁动势的方向由产生它的线圈电流按右手螺旋定则确定。磁动势的单位为安·匝。

(5) 磁阻 R_m

和电路中的电阻一样, 磁路中也有磁阻 R_m , 它对磁通起阻碍作用。磁阻与磁路的平均长度 l , 磁路截面积 S 及磁路介质的磁导率 μ 有关, 即

$$R_m = l/\mu S \quad (0-4)$$

0.4.2 磁性材料

自然界的物质按导磁能力的大小, 可分为磁性材料和非磁性材料。磁性材料主要是铁、镍、钴及其合金, 通常也称为铁磁材料。

实测表明, 磁性材料有三个显著特点。(1) 高导磁性能: 所有非磁性材料的磁导率都接近真空的磁导率 μ_0 , 而磁性材料的磁导率 μ 比 μ_0 大得多。因此在同样的电流下, 铁芯线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多。(2) 磁滞性: 在非磁性材料中, 磁通密度 B 与磁场强度 H 成正比, 即 $B = \mu_0 H$, B 与 H 成线性关系。而磁性材料的 B 与 H 成非线性关系, 即 $B = f(H)$ 是一条曲线, 如图 0-2 所示。(3) 磁饱和性: 从图 0-2 可知, 在磁化曲线的 bc 段, 当 H 增大时, B 的增加已很有限, 这种现象称为磁饱和现象, 这种性质称为磁饱和性, 也就是通常所说的磁性材料的非线性。

磁性材料的磁化曲线可以通过试验测得。在测试时, H 由零上升到某个最大值 H_m 时, B 沿着磁化曲线 Oa 上升, 如图 0-3 所示。而当 H 由 H_m 下降到零时, B 不是沿着 aO 下降, 而是沿着另一条曲线 ab 变化。当 H 由零变化到 $-H_m$, 即进行反向磁化时, B 沿着曲线 bcd 变化。当 H 由 $-H_m$ 回升到 H_m 时, B 沿着曲线 $defa$ 变化。这样将磁性材料磁化一个循环时, 得到一个闭合回线 $abcdefa$, 称为磁性材料的磁滞回线。不同的磁性材料有不同的磁滞回线。从图 0-3 可知, B 的变化滞后于 H 的变化。当 H 下降到零时, B 不为零而为某一值 B_r , 这种现象称为磁滞性, 把 B_r 称为剩余磁通密度。当磁性材料在交变磁场作用下反复磁化时, 磁滞现象会引起磁滞损耗。磁滞损耗与磁通的交变频率及磁通密度的幅值有关。

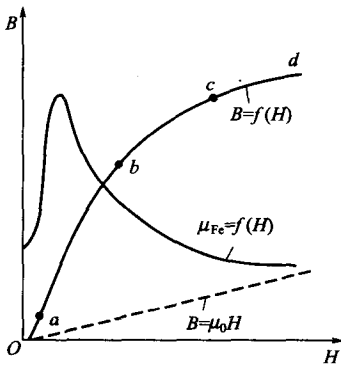


图 0-2 磁性材料的磁化曲线

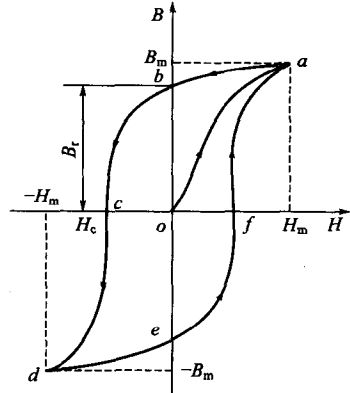


图 0-3 磁性材料的磁滞回线

0.4.3 电磁感应定律

当导体在磁场中与磁场发生相对运动，导体切割磁力线，或者当穿过线圈的磁通发生变化时，在导体或线圈中就会产生感应电动势，这种现象称为电磁感应现象。导体切割磁力线时产生的感应电动势称为切割电动势。在均匀磁场中，如果导体、磁通密度和导体相对运动速度三者之间相互垂直，则切割电动势可表示为

$$e = Blv \quad (0-5)$$

式中 e ——切割电动势，V；

B ——导体所在处的磁通密度，T(Wb/m²)；

l ——导体在磁场中的长度，m；

v ——导体切割磁力线的速度，m/s。

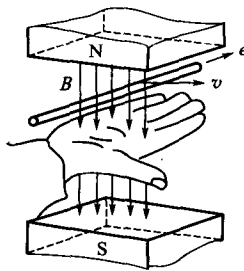
切割电动势主要表现在电动机和发电机中，方向按右手定则确定，即把右手手掌伸开，大拇指与其他四指在同一平面内成 90°，如果让磁力线垂直指向手心，大拇指指向导体运动方向，则其他四指的指向就是导体中感应电动势的方向，如图 0-4(a) 所示。

当穿过线圈的磁通发生变化时，产生的感应电动势称为变压器电动势，表示为

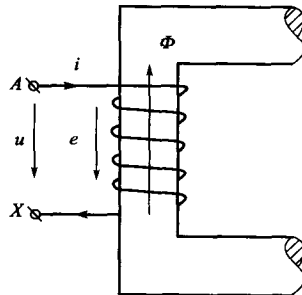
$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-6)$$

式中， N 为线圈匝数单位为匝； Φ 的单位为 Wb； e 的单位为 V。

变压器电动势主要表现在变压器中，方向按右手螺旋定则确定，如图 0-4(b) 所示。



(a) 切割电动势的右手定则



(b) 变压器电动势的右手螺旋定则

图 0-4 感应电动势的方向确定

0.4.4 电磁力定律

载流导体在外磁场中运动时, 所受到的磁场对它的作用力称为电磁力。在均匀磁场中, 如果载流导体与磁通密度垂直, 则电磁力可表示为

$$f = Bli \quad (0-7)$$

式中 f ——电磁力, N;

B ——导体所在处的磁通密度, T(Wb/m²);

l ——导体在磁场中的长度, m;

i ——导体中流过的电流, A。

电磁力的方向按左手定则确定, 即把左手手掌伸开, 大拇指与其他四指在同一平面内成 90°, 如果让磁力线垂直指向手心, 其他四指指向导体中电流的方向, 则大拇指的指向就是导体受到的电磁力方向, 如图 0-5 所示。

0.4.5 全电流定律

全电流定律也称安培环路定律, 它表示全电流和由该全电流所产生磁场之间的关系, 可叙述为: 在磁场中沿任意一个闭合磁回路的磁场强度 H 的曲线积分在数值上等于该闭合磁回路内的全电流, 即

$$\oint_c H dl = \sum i \quad (0-8)$$

工程应用中遇到的磁路, 其几何形状是比较复杂的, 直接利用安培环路定律进行计算有一定的困难。常用的方法是: 根据磁路几何形状的特点, 把整个磁路分成几段, 几何形状规则的为一段, 找出该段磁路的平均磁场强度, 再乘以该段磁路的平均长度, 得到该段磁路的磁压降, 即该段磁路消耗的磁动势, 最后把各段磁路的磁压降相加, 就等于总磁动势, 即

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = F = IN \quad (0-9)$$

式中 H_k ——第 k 段磁路的平均磁场强度, A/m;

l_k ——第 k 段磁路的平均长度, m;

IN ——作用在整个磁路上的磁动势;

N ——励磁线圈的串联匝数。

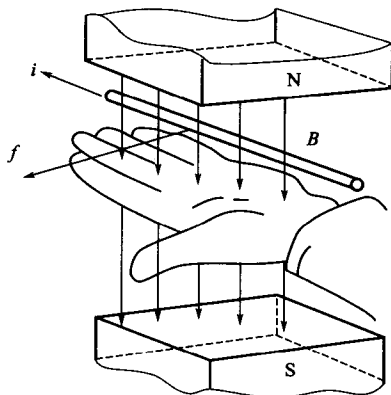


图 0-5 载流导体受力方向的左手定则

1

直流电机原理

1.1 直流电机的基本原理

1.1.1 直流电机的用途

直流电机分为直流发电机和直流电动机。把机械能转变为直流电能的电机称为直流发电机；反之，把直流电能转变为机械能的电机称为直流电动机。目前，使用直流电动机的场合很多，这是由于直流电动机具有以下突出优点：

- ① 启动、制动和过载转矩大；
- ② 调速范围宽广，且易于平滑调速；
- ③ 易于控制，可靠性较高。

直流电动机曾经一度在工农业生产中占据相当重要的地位。直流电动机的主要缺点是换

向问题，换向不仅限制了直流电动机的极限容量，而且增加了制造成本和维护工作量。近几十年来，随着电力电子技术、控制理论、微处理器技术等迅猛发展，交流电动机调速性能不断提高，由交流电动机组成的交流拖动系统大有取代由直流电动机组成的直流拖动系统的趋势。尽管如此，直流电动机及其组成的直流拖动系统在某些特定的应用场合，如轧钢系统、煤矿电机车、纺织机械等领域仍有不可取代的优势，使用量仍很大。

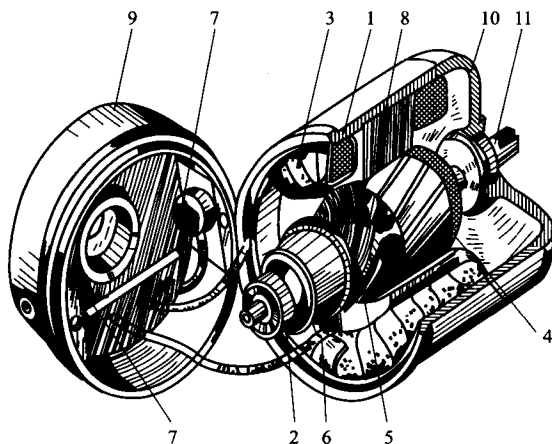


图 1-1 小型直流电机立体图

- 1—机座；2—轴承；3—励磁绕组；4—电枢；
5—电枢绕组；6—换向器；7—电刷；8—主
磁极；9—前端盖；10—后端盖；11—轴

1.1.2 基本结构

直流电机的结构较复杂，且形式多样。直流发电机和直流电动机从主要结构上看，没有差别。图 1-1 所示为一台小型直流电机的立体图。图 1-2 所示为一台

两极直流电机从轴端看进去的剖面图。直流电机由定子部分和转子部分构成，定子和转子靠两个端盖连接。

(1) 定子部分

直流电机定子部分包括机座、主磁极、换向极和电刷装置等。一般直流电机都用整体机座，即一个机座同时起两方面的作用：一方面起导磁的作用；另一方面起机械支撑的作用。

① 机座 机座由厚钢板（小型直流电机）或铸钢材料制成，它用来固定主磁极、换向极以及两个端盖。机座除对内部具有保护作用外，还是电机主磁路的一部分，故又称为定子磁轭。

② 主磁极 主磁极的作用是在定子和转子之间的气隙中产生一定形状分布的气隙磁场。主磁极上装有励磁绕组。绝大多数直流电机的主磁极都由直流电流励磁，只有小型直流电机的主磁极采用永久磁铁，后者称为永磁直流电机。

③ 换向极 容量在 1kW 以上的直流电机，在相邻两主磁极之间要装上换向极。换向极又称为附加极，其作用是改善直流电机的换向。换向极一般用整块钢板制成，外面套有换向极绕组，绕组里流过电枢电流，故换向极绕组的导线截面积较大，匝数较少。

④ 电刷装置 电刷装置的作用是把电机做机械旋转运动的电枢中的电流引出到外部静止的电路中，或者反过来把外部静止电路里的电流引入到电机电枢中。电刷装置必须与换向器配合使用来完成直流电机的机械整流，把电枢中的交流电转换成电刷上的直流电或把外部电路中的直流电转换为电枢中的交流电。电刷放置在电刷盒里，用弹簧压紧在换向器上，电刷上有铜辫，可引入、引出电流。正常运行时，电刷相对于换向器表面有一个正确的位置，如果电刷的位置放得不合理，将直接影响电机的性能。

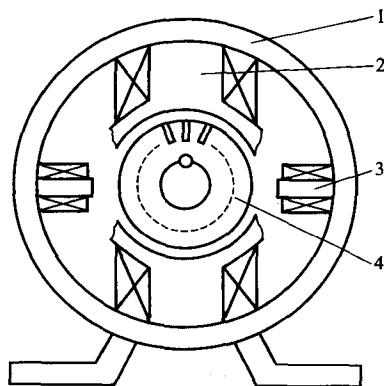


图 1-2 两极直流电机剖面图

1—机座；2—主磁极；
3—换向极；4—电枢

(2) 转子部分

直流电机转子部分包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、风扇和转轴等。

① 电枢铁芯 电枢铁芯是直流电机主磁路的一部分。当电枢旋转时，铁芯中磁通方向发生变化，在铁芯中引起涡流和磁滞损耗。为了减少这部分损耗，通常用 0.35~0.5mm 厚的电工钢片冲压成一定形状的冲片，然后把把这些冲片两面涂上漆再叠装起来，成为电枢铁芯，安装在转轴上。电枢铁芯外圆周上有均匀分布的槽，以嵌放电枢绕组。

② 电枢绕组 电枢绕组的作用是产生感应电动势和电磁转矩，从而实现机电能量转换，它是直流电机的关键部件。电枢绕组是由许多电枢线圈（又称为元件）串联而成的闭合绕组，电枢线圈由绝缘导线绕制。各电枢线圈分别嵌入不同的电枢铁芯槽中，线圈两端按一定规律与换向器的换向片相连。

③ 换向器 换向器的作用是与电刷配合使用，在电刷间得到方向恒定的直流电动势，或保证每个磁极下电枢导体电流方向不变，以产生恒定方向的电磁转矩。换向器由多个换向片围成环状，套在转轴上，片与片之间用云母绝缘，换向片与转轴之间也用绝缘物隔开，且换向片数与电枢绕组的元件数相等。运行时换向器的外圆周与电刷保持良好的滑动接触。

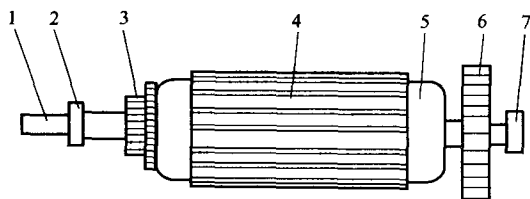


图 1-3 直流电机电枢装配示意图

1—转轴；2—轴承；3—换向器；4—电枢铁芯；
5—电枢绕组；6—风扇；7—轴套

转子上还有轴承和风扇等。图 1-3 所示为直流电机电枢的装配示意图。

(3) 端盖

端盖把定子和转子连为一个整体，两个端盖分别固定在定子机座的两端，并支撑着转子。

1.1.3 基本工作原理

(1) 直流发电机

直流发电机是使电机的电枢绕组在直流磁场中旋转以感应出交流电，经过机械整流（换向装置）得到直流电。为了说明直流发电机的基本工作原理，下面先从一个最简单的直流发电机模型开始研究。

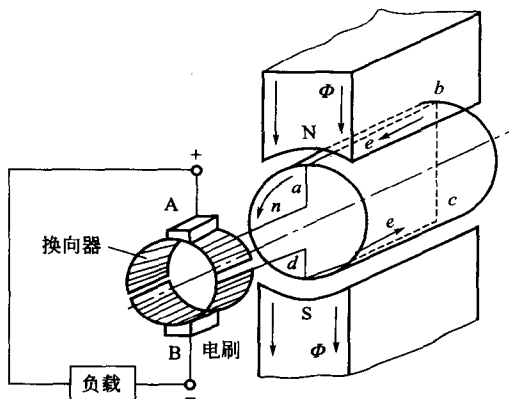


图 1-4 直流发电机物理模型

图 1-4 所示为一台两极直流发电机的模型示意图。图中 N、S 是一对位置固定的主磁极，两主磁极间有一个用导磁材料制成的圆柱体，即电枢铁芯，在电枢铁芯上放置了一个电枢线圈 $abcd$ ，线圈的首端和末端分别接到两个圆环形的换向器上。换向器固定在转轴上，与电枢一起旋转。换向器之间以及换向器与转轴之间都互相绝缘。在每个换向器上放置一个固定不动的电刷 A 或 B，它们与换向器之间保持滑动接触。电枢线圈通过

换向器和电刷与外面静止的电路相连接。

当原动机拖动电枢以恒定的转速 n 旋转时（以逆时针方向为例），根据电磁感应定律可知，电枢线圈导体 ab 和导体 cd 因切割磁力线会产生感应电动势，感应电动势的大小可表示为

$$e = Blv \quad (1-1)$$

式中 B ——导体所处位置的磁通密度，T；

l ——导体切割磁力线部分的长度，称为有效长度，m；

v ——导体切割磁力线的速度，即电枢旋转的线速度，m/s。

则整个电枢线圈 $abcd$ 的感应电动势大小为 $e_{abcd} = 2Blv$ 。由于转速 n 是恒定的，故 v 为一定值；对于已制成的电机， l 也是一定的，所以感应电动势 e 与磁通密度 B 成正比。

感应电动势的方向可用右手定则确定。如图 1-4 所示瞬间，导体 ab 在 N 极下，感应电动势的极性为 a 点高电位， b 点低电位；导体 cd 在 S 极下，感应电动势的极性为 c 点高电位， d 点低电位。由此可以判定导体 ab 的感应电动势方向为由 b 指向 a ；导体 cd 的感应电动势方向为由 d 指向 c 。由图 1-4 可知，此时电刷 A 与导体 ab 所连的换向器相接触；而电刷 B 则与导体 cd 所连的换向器相接触，因此电刷 A 的极性为“+”，电刷 B 的极性为“-”。

当电枢逆时针方向转过 180° 时，导体 cd 到了原来导体 ab 的位置，导体 ab 则到了原来导体 cd 的位置。因此，导体 ab 中的感应电动势方向变为由 a 指向 b ，而导体 cd 中的感应电动势的方向变为由 c 指向 d 。由于电刷 A 和电刷 B 的位置是固定不动的，而换向器随着线圈一起旋转，本来与电刷 A 相接触的换向器变为与电刷 B 接触了，本来与电刷 B 相接触的那个换向器变为与电刷 A 接触了。显然这时电刷 A 的极性仍为“+”，电刷 B 的极性仍为“-”。由此可知，和电刷 A 接触的导体永远位于 N 极下，电刷 A 的极性总是为“+”，和电刷 B 接触的导体永远位于 S 极下，电刷 B 的极性总是为“-”。

如果电枢继续逆时针方向旋转 180° ，导体 ab 和导体 cd 又回到了图 1-4 所示位置，完成一次循环。由此可知，电机电枢每旋转一周，电枢线圈 $abcd$ 中的感应电动势方向交变一次，但由于有换向器的缘故，两个电刷的极性保持不变，在两电刷之间就得到了一个方向不变的电动势。这就是最简单的直流发电机工作原理。

显然，当电枢绕组只有一个线圈时，电刷间感应电动势的方向虽然不变，但数值却是变化的。因此在实际电机中，电枢绕组是由许多线圈按照一定规律连接起来而构成的，从而使电刷间电动势的脉动程度大大降低，使用时可以认为产生的是恒定直流电。

(2) 直流电动机

如果不用原动机去拖动电枢旋转,而是由外电源从电刷 A 和电刷 B 输入直流电,使电刷 A 接电源正极,电刷 B 接电源负极,此时线圈中将有电流流过,电流的方向如图 1-5 所示。根据电磁力定律,载流导体 ab 和 cd 上受到的电磁力为

$$f = Bli \quad (1-2)$$

式中 B ——导体所处位置的磁通密度, T;

l ——导体切割磁力线部分的长度,称为有效长度, m;

i ——导体中流过的电流, A。

导体受力方向可由左手定则确定。由图 1-5 可知, N 极下的导体 ab 受力方向为从右向左, S 极下的导体 cd 受力方向为从左向右,从而使电枢线圈产生电磁转矩(电磁力与转子半径的乘积),此时电磁转矩的方向为逆时针方向。当电磁转矩大于阻转矩时,电枢就能按逆时针方向旋转起来。当电枢转过 180° 后,导体 cd 到了原来导体 ab 的位置,位于 N 极下,导体 ab 则到了原来导体 cd 的位置,位于 S 极下,由于直流电源产生的电流方向不变,仍从电刷 A 流入,经导体 dc 和 ba 后,从电刷 B 流出。这时导体 cd 的受力方向变为从右向左,导体 ab 的受力方向变为从左向右,电枢线圈产生的电磁转矩方向未变,仍为逆时针方向,电枢在此电磁转矩的作用下仍为逆时针方向旋转。

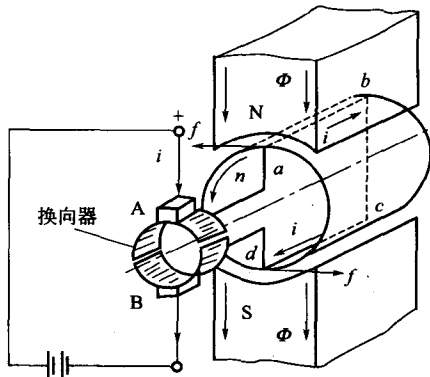


图 1-5 直流电动机的物理模型

由此可知,直流电动机电枢线圈里的电流方向是交变的,但由于有换向装置,产生的电磁转矩方向是不变的。这个电磁转矩使电枢始终沿一个方向旋转,把电能变换成机械能,带动生产机械工作。

与直流发电机一样,实际直流电动机的电枢绕组并非单一线圈。但不管有多少个线圈,产生的电磁转矩方向都是一致的。

根据上述直流电机的工作原理,一台直流电机若在电刷两端加上直流电,输入电能,就可拖动生产机械,将电能变为机械能而成为电动机;反之,若用原动机带动电枢旋转,输入机械能,就可在电刷两端得到一个直流电动势,将机械能变为电能而成为发电机。这种一台电机既能作电动机又能作发电机运行的原理,在电机理论中称为电机的可逆运行原理。

1.1.4 铭牌数据和型号

(1) 直流电机的铭牌数据

电机制造厂在每台电机的机座上都钉有一块标牌,称之为铭牌。上面标有电机的额定数据,是电机正常运行时有关电量和机械量的规定数据。根据国家标准,直流电机的额定数据有以下五个。

① 额定功率 P_N 指额定运行状态下电机所能供给的功率。对直流发电机而言,是指发电机在额定运行状态下,电刷两端输出的电功率;对直流电动机而言,是指电动机在额定运行状态下,轴上输出的机械功率。单位为 W。用公式表示如下:

直流发电机的额定功率为

$$P_N = U_N I_N \quad (1-3)$$

直流电动机的额定功率为

$$P_N = U_N I_N \eta_N \quad (1-4)$$

式中, η_N 为直流电动机的额定效率,是直流电动机额定运行时轴上输出的机械功率与