



自动化实践技术丛书

电机 控制技术实践

于少娟 左 龙 高云广 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

自动化实践技术丛书

电机 控制技术实践

于少娟 左 龙 高云广 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从实践、实训教学的角度出发,对电力拖动和电气工程中常用的交流电动机、直流电机、变压器及部分特种电机的结构、工作原理、运行特性、维护维修、选型和控制使用进行了全面阐述,侧重于应用和维修技术。全书分为上下两篇,共十章。上篇着重于电机原理特性分析的实训,下篇注重电机的维护、维修及控制使用实训。

本书内容全面,讲解循序渐进,实用性强,是大学本专科、中高等职业技术学院、电子电器类专业学生进行电机实训的首选参考书,也适合电气工程师使用。

图书在版编目(CIP)数据

电机控制技术实践/于少娟,左龙,高云广编著. —北京:中国电力出版社,2009
(自动化实践技术丛书)
ISBN 978-7-5083-7974-6

I. 电… II. ①于…②左…③高… III. 电机-控制系统
IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 198213 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 5 月第一版 2009 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25 印张 611 千字

印数 0001—3000 册 定价 42.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言



Preface

电能易于生产、转换、传输、分配、使用和控制,是现代能源的主要形式。电能的生产集中在火力、水力和原子能发电厂进行,还有为数较少的是风力发电和地热发电。电能的生产是由发电机完成的,发电机把机械能转换为电能。为了减小电能传输过程中的损耗,远距离输电都采用高压输电,然后经降压再供给用户,电压的升高和降低都是由变压器完成的。电能转换为机械能是由电动机完成的,电动机拖动生产机械工作称之为电力拖动。由于电动机种类和规格较多,具有各种良好的特性,能较好地满足大多数生产机械的不同需要;电动机效率高,运行经济;电力拖动易于控制和操作等,因此在国民经济中电力拖动方面得到了极为广泛地应用,电动机成为主要的动力源。例如,各种生产机床、电力机床、轧钢机、矿井提升机、球磨机、造纸机、纺织机械、印刷机械、化工机械、起重机、榨油机、卷扬机、水泵、电动机、空压机,乃至家用电器等,不胜枚举。因此电机技术的推广应用日益重要。

本书编写的主要目的是使学生具备电机及其控制技术的基本实践技能,加深学生专业知识,增强学生适应职业变化和解决实际问题的能力,使学生的素质得到全面提高。

本书从实践、实训教学的角度出发,对电力拖动和电气工程中常用的交流电机、直流电机和变压器的原理、应用和维修技术进行了阐述,侧重于应用和维修技术。全部内容分两篇,第一篇着重于电机原理特性分析的实训;第二篇注重电机的维护、维修及控制使用实训,全书共十章。第一章介绍了直流电机的原理、工作特性、启动和制动等;第二章阐述了三相异步电动机和单相异步电动机的结构原理、绕组、特性及控制;第三章简要介绍了三相同步发电机的结构原理;第四章阐述了变压器的结构、原理及应用;第五章简单介绍了测速发电机、步进电动机和无刷直流电动机的结构、原理及应用;第六章介绍了电机维修基础知识;第七章详细阐述了他励直流电动机的拆装、绕组重绕、维修、维护知识;第八章介绍了变压器的维修测试知识;第九章详细说明了三相异步电动机和单相异步电动机的安装、应用维护、故障分析处理、绕组拆换、试验;第十章简要介绍了电动机的控制使用。参加本书编写的人员有于少娟、左龙、高云广、许志强、齐向东、马花婷、魏阿勃、吴聚华、丁旭、焦凤娇、于少华、于淑田等。

本书的主要特点是内容全面,讲解循序渐进,实用性强,适用面广,便于自学。各类读者对书中的内容稍加取舍,均可将其作为参考资料使用,对电气工程人员也有实际指导意义。

限于作者水平,虽经斟酌,但不足之处在所难免,望广大读者不吝批评指正。

作者

2009年4月于太原

目 录

Contents

前言

第一篇 电机原理实训技术

第一章 直流电机实训技术	1
第一节 直流电机认识实训.....	1
第二节 直流电机工作特性实训	14
第三节 直流电机运行特性实训	20
第四节 直流电机的选择	27
第二章 异步电动机实训技术	33
第一节 异步电动机的主要用途与分类	33
第二节 三相异步电动机的结构与铭牌数据	34
第三节 三相异步电动机的电枢绕组与工作原理	40
第四节 三相异步电动机的功率、转矩及机械特性	61
第五节 单相异步电动机的结构与铭牌数据	63
第六节 单相异步电动机的定子绕组与工作原理	68
第三章 同步电机实训技术	80
第一节 同步电机概述	80
第二节 同步电动机的功率转矩及 V 形曲线	81
第三节 同步电动机的启动	82
第四章 变压器实训技术	83
第一节 概述	83
第二节 变压器的基本原理	83
第三节 变压器的分类	84
第四节 变压器的结构	85
第五节 变压器的铭牌含义及主要技术参数	89
第六节 单相变压器的空载运行	93
第七节 单相变压器的负载运行	97
第八节 小型变压器的制作.....	100
第五章 其他电机实训技术	105

第一节	测速发电机·····	105
第二节	步进电动机·····	110
第三节	无刷直流电动机·····	120

第二篇 电机维修及检测实训技术

第六章	电机维修常用知识·····	127
第一节	常用电气知识·····	127
第二节	电机修理常用工具·····	139
第三节	电机维修常用材料·····	150
第四节	电机维修常用仪器仪表·····	156
第七章	他励直流电机测试及维修实训技术·····	167
第一节	电机故障检测与分析·····	167
第二节	直流电机维修·····	173
第三节	直流电动机的拆装·····	204
第四节	直流电动机的运行与维护·····	206
第八章	电力变压器运行与维护·····	208
第一节	电力变压器的安装·····	208
第二节	电力变压器的运行与维护·····	223
第三节	电力变压器的检修·····	234
第九章	异步电动机测试及维修实训技术·····	275
第一节	三相异步电动机的安装·····	275
第二节	三相异步电动机的运行、维护与管理·····	280
第三节	三相异步电动机常见故障的分析与处理·····	285
第四节	三相异步电动机的拆卸与装配·····	297
第五节	三相异步电动机定子绕组的拆换·····	300
第六节	单相异步电动机的应用与维护·····	308
第七节	单相异步电动机常见故障的分析与处理·····	315
第八节	修复后电机的检查与试验·····	319
第十章	电机控制实训技术·····	324
第一节	电机控制技术·····	324
第二节	直流电动机的控制·····	344
第三节	三相异步电动机的控制·····	362
参考文献	·····	391

电机原理实训技术

第一章 直流电机实训技术

第一节 直流电机认识实训

一、直流电机的分类

直流电机在近代工业的电力拖动中是一种很重要的电机。按其用途可分为电动机和发电机,但也有其他特殊用途的电机,如自动控制系统中作为执行元件及一般传动动力用的力矩电动机等。因为直流发电机能提供无脉动的电力,其输出电压便于精确地调节和控制,它主要用做某些重要直流电机的电源和交流同步发电机的励磁电源,以及在化学工业方面用做电解、电镀的低压大电流电源。但随着电子整流技术的迅速成熟,晶闸管整流电源的广泛采用使直流发电机有被取代的趋势。

直流电动机则由于具有相当大的调速范围、平滑的调速特性、较高的过载能力和较大的启动、制动转矩等,因而被广泛应用于冶金矿山、交通运输、纺织印染、造纸印刷以及化工和机床等工业部门。

(一) 按励磁方式分类

直流电机的特性与其励磁方式有密切联系,直流电机的励磁方式是指电机励磁支路和电枢支路的相互关系。根据直流电机的定子磁场不同,可将直流电机分为两大类,其中一类是永磁式直流电动机,它的定子磁极由永久磁铁组成;另一类为激磁式直流电机,它的定子磁极由铁芯和励磁线圈组成。

永磁式直流电机的体积小,功率也较小,但运行速度稳定。录音机、录像机、电动剃须器中的电动机都是永磁式直流电动机。

激磁式直流电机的定子磁极由铁芯和励磁绕组组成。由于励磁绕组的供电方式不同,激磁式直流电机可分为他励、自励(并励、串励和复励)几种。

1. 他励方式

电枢绕组和励磁绕组电路相互独立,励磁绕组与电枢绕组使用两个单独电源。电枢电压 U 与励磁电压 U_f 彼此无关,电枢电流 I_a 与励磁电流 I_f 也无关。这种电动机具有良好的启动性能和稳定的运行性能,并且易于调速。

2. 并励方式

在并励电动机中电枢绕组和励磁绕组是并联关系共用一个直流电源。在并励发电机中 $I_a = I + I_f$ ，在并励电动机中 $I_a = I - I_f$ ，并励直流电动机运行稳定。

3. 串励方式

电枢绕组与励磁绕组是串联关系，共用一个直流电源。由于励磁电流等于电枢电流，所以串励绕组通常线径较粗，而且匝数较少。无论是发电机还是电动机，均有 $I_a = I = I_f$ 此种直流电动机具有较强的过载能力，其机械特性属于软特性。

4. 复励方式

复励电机的主磁极上有两部分励磁绕组，其中一部分与电枢绕组并联，而另一部分与电枢绕组串联。当两部分励磁绕组产生的磁通方向相同时，称为积复励，反之称为差复励。电枢绕组与励磁绕组共用一个直流电源。

直流发电机的各种励磁方式接线，如图 1-1 所示。

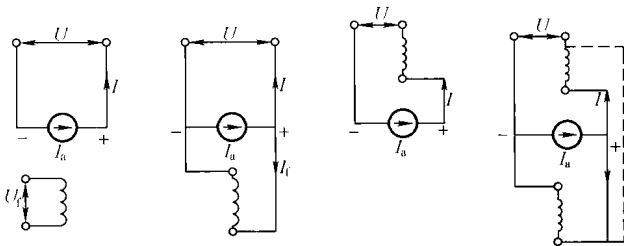


图 1-1 直流发电机按励磁分类接线图

直流电动机的各种励磁方式接线，如图 1-2 所示。

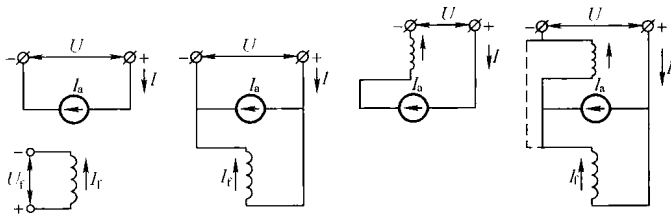


图 1-2 直流电动机按励磁分类接线图

不同励磁方式的直流发电机和直流电动机的特性与用途分别见表 1-1 和表 1-2。

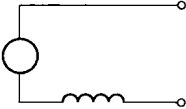
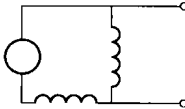
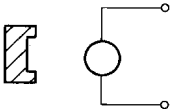
表 1-1 直流发电机的特性与用途

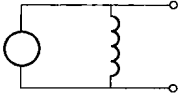
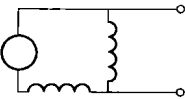
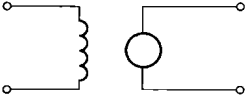
励磁方式	电压变化率		特 性	用 途
串 励			有负载时，发电机才输出端电压，输出电压随负载电流增大而上升	用做升压机
并 励	20~40%		输出端电压随周期电流增加而降低，降低的幅度较他励时为大，其外特性稍软	充电、电镀、电解、冶炼等用直流电源
复 励	积复励	不超过 6%	输出端电压在负载变动时变化较小，电压变化率由复励程度即串、并励的安匝比决定	直流电源，如起重机械和用柴油带动的独立电源等
	差复励	电压变化率较大	输出端电压随负载电流增加而迅速下降，甚至降为零	如用于自动控制系统中作为直流电动机的电源

续表

励磁方式	电压变化率	特 性	用 途
他 磁	5~10%	输出端电压随负载电流增加而迅速下降,甚至降为0	常用于电动机—发电机—电动机系统中,实现直流电动机的恒转矩宽广调速
永 磁	1~10%	输出端电压与转速成线性关系	用做测速发电机

表 1-2 直流电动机的特性与用途

励磁方式	串 励	复 励	永 磁
励磁特征图			
启动转矩	启动转矩很大,约可达额定转矩的5倍	启动转矩较大,约可达额定转矩的4倍,系由复励程度来决定	启动转矩约为额定转矩的2倍,也可制成为额定转矩的4~5倍
短时过载转矩	可达额定转矩的4倍左右	比并励电动机要大,约可达额定转矩的3.5倍	一般为额定转矩的1.5倍,也可制成为额定转矩的3.5~4倍
调整范围	用外接电阻与串励绕组串联或并联、或将串励绕组串联或并联连接来实现调整。其调速范围较宽	采用削弱磁场调速,可达额定转速的2倍	转速与电枢电压是线性关系,有较好的调速特性,调速范围较大
转速变化率	较速变化率很大,空载转速极高	由复励程度来决定,可达25~30%	3~15%
用 途	用于要求很大的启动转矩,转速允许有较大变化负载,如蓄电池供电车、起货机、起锚机、电车、电力传动机车等	用于要求启动转矩较大,转速变化不大的负载,如拖动空气压缩机、冶金辅助传动机械等	自动控制系统中作为执行元件及一般传动动力用,如力矩电动机

励磁方式	并 励	稳定并励	他 励
励磁特征图			
启动转矩	由于启动电流一般均限制在额定电流的2.5倍以内,故启动转矩为额定转矩的2~2.5倍		
短时过载转矩	一般情况约为额定转矩的1.5倍,带补偿绕组时,可达额定转矩的2.5~2.8倍		
调速范围	采用削弱磁场的恒功率调速时,其转速比可为1:2~1:8,他励时,可调节电枢电压,恒转矩时向下高速则范围较宽广		
转速变化率	5~20%		
用 途	用于启动转矩稍大的恒速负载,以及要求调速的传动系统,如离心泵、风机、金属切削机床、纺织印染、造纸和印刷机械等		

（二）其他分类方式

直流电机的分类还可以有其他方法。还可以按转速、电流、电压、工作定额、型号、安装结构类型以及通风冷却方式等特征来分类。例如，按机座号的大小或功率的大小，电机可分为大型、中型、小型和小功率电机。一般来说，电枢铁芯外径大于 990mm 的电机为大型电机，中心高 H 在 400~630mm 范围内的电机为中型电机。小功率电机是将转速折算至 1500r/min 时，其连续定额时的额定功率不超过 1.1kW 的电机。

电机还可按外壳防护型式、冷却方法、安装类型、使用环境条件、绝缘结构、励磁方式和工作制等特征进行分类。电机按结构型式进行分类，见表 1-3。

表 1-3 电机按结构类型的分类

分 类	类 型	分 类	类 型
按外壳防护型式	开启式、防护式、封闭式、防尘式、防爆式等	按绝缘等级	A 级、E 级、B 级、F 级、H 级
按通风冷却方式	自冷式、自扇冷式、他扇冷式、管道通风式等	按工作制	连续、短时、周期、非周期
按安装型式	卧式、立式、凸缘（带底脚或不带底脚）	按电机尺寸中心高/mm 定子铁芯外径/mm	大型、中型、小型、小功率

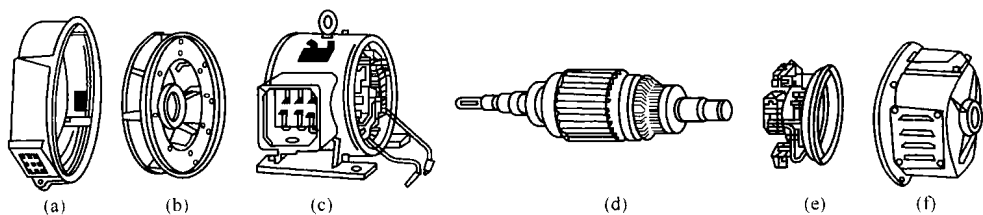


图 1-3 直流电机的结构图

(a) 前端盖；(b) 风扇；(c) 定子；(d) 转子；(e) 电刷及刷架；(f) 后端盖

二、直流电机的结构

直流电机既可作电动机用，也可作发电机用。直流电动机是将直流电能转换成机械能而带动生产机械运转。直流电动机和直流发电机的用途虽然各不相同，但它们的结构基本相同。对直流电机结构的基本要求是：能承受额定电压和电流并保持良好的绝缘性能；能产生需要的磁通；有一定的机械强度和启动、运转灵活正常；电机温升不允许超过额定值；所需材料应力求节省；制造工艺应力求简单等。电机主要由两大部分组成，一个是固定不动的部分（简称定子），另一个是可以自由旋转的部分（简称转子）。在定子、转子之间存在一个间隙，称作气隙。小型直流电机的结构如图 1-3 所示。

直流电机剖面结构图，如图 1-4、图 1-5 所示。

（一）定子

定子由主磁极、换向磁极、机座、电刷装置和前、后端盖等组成。定子的作用：在电磁方面，产生主磁场和作为磁路的组成部分；在机械方面，是整个电机的支撑。

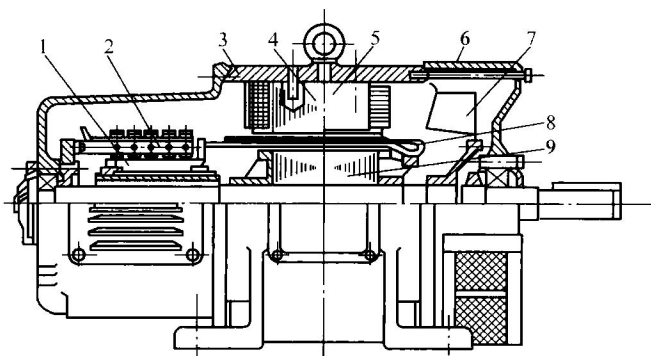


图 1-4 直流电机纵剖面结构图

- 1—换向器；2—电刷装置；3—机座；4—主磁极；5—换向极；
6—端盖；7—风扇；8—电枢绕组；9—电枢铁芯

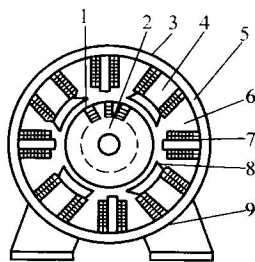


图 1-5 直流电机
横剖面示意图

- 1—电枢绕组；2—电枢铁芯；
3—机座；4—主磁极铁芯；
5—励磁绕组；6—换向极绕
组；7—换向极铁芯；8—主
磁极极靴；9—机座底脚

1. 主磁极

主磁极简称主极，主磁极的作用是产生主磁通，建立主磁场。它由主极铁芯和套在铁芯上的励磁绕组组成。其结构如图 1-6 所示。主磁极铁芯包括极身和极掌两部分。磁极用螺钉固定在磁轭上。磁极上套的线圈称为励磁绕组，主磁极上的励磁绕组是用绝缘铜线绕制而成的集中绕组，小型直流电机用圆铜线绕制，中、大型直流电机则多用扁铜线制造而成。与铁芯绝缘，各主磁极上的线圈一般都是串联起来的。当励磁绕组中通过直流电流时，在气隙中就会形成恒定的主极磁场。主磁极总是成对的，按 N、S 极性相间排列固定在机座上。磁极下面的扩大部分称为极靴，其作用是减小气隙磁阻，并使励磁绕组牢固地套在铁芯上。为了减少电枢转动时，由于齿、槽的移动引起的极靴表面磁感应强度变化造成的铁损耗和制造方便，磁极铁芯用 1~1.5mm 厚的低碳钢片叠压而成。小电机也有用整块的铸钢磁极。

2. 换向磁极

换向磁极也称附加极或间极，在两个相邻的主磁极之间有一个小的磁极，构造与主磁极相似，这就是换向极。换向极的作用是产生附加磁场，改善换向性能。它由换向极铁芯和换向极绕组组成，其极身和极靴都比较窄，极身处套装有换向极绕组，与主磁极绕组一样也是用圆铜线或扁铜线绕制而成，如图 1-7 所示。换向极绕组与电枢绕组串联，它的铁芯大都用整块锻钢制成，但也有用 0.5~1.5mm 厚的硅钢片或普通钢板制成的。其极性在作为发电机运行时，应与电枢导体将要进入的主磁极性相同；在作为电动机运行时，则应与电枢导体刚离开的主磁极性相同。

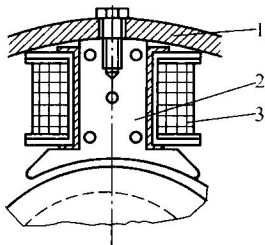


图 1-6 主磁极

- 1—机座；2—主磁极铁芯；
3—励磁绕组

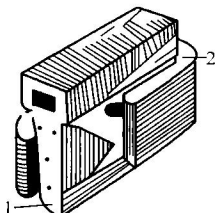


图 1-7 换向极

- 1—换向极铁芯；
2—换向极绕组

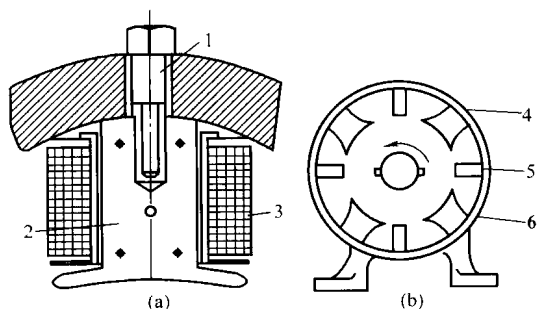


图 1-8 换向磁极的位置

(a) 主磁极；(b) 电机横剖面示意图

1—固定螺钉；2—主磁极铁芯；3—励磁绕组；

4—主磁极；5—换向极；6—极座

换向极安装在相邻两个主磁极之间的几何中性线上，如图 1-8 所示。

3. 机座

机座有两个作用，一方面作为电机的机械骨架用来固定主磁极、换向极和端盖等部件，主磁极、换向极、电刷装置和端盖等都固定在机座上，电机借助于底座固定在基础上。另一方面作为电机磁路的一部分作为各磁极间磁通的通路，机座中作为磁通通路的部分称为定子磁轭。

机座既要有足够的机械强度，又要有良好的导磁性能。机座一般用厚钢板焊接，或者用铸钢体制成。机座与磁极铁芯之间设置有一些铁垫片，它们是用来调整电机定、转子间隙的。

4. 电刷装置

在直流电机中电刷装置是电枢电路的引入（或引出）装置，它由电刷、电刷盒、刷杆和刷杆座组成，如图 1-9 所示。电刷是用石墨等做成的导电块，放在电刷盒中，用压紧弹簧压在换向器表面。电刷盒用螺钉固定在刷杆上，用铜绞线将电刷和刷杆连接，刷杆装在可移动的刷杆座上，彼此绝缘，刷杆座固定在端盖或轴承内盖上。

5. 端盖、轴承盖

前后端盖用来支撑整个转子，它借助正口结构与机座固定，转轴通过端盖中心孔安装的轴承而直接得到支撑，而轴承中心与端盖止口外圆同心，这就使电枢的旋转中心线与机座中心线重合以保证电枢与磁极间的间隙均匀。同时端盖也是电机的防护盖。

(二) 转子

转子又称电枢，它由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成，作用是产生感应电动势和电磁转矩，实现机电能量的转换。

1. 电枢铁芯

电枢铁芯的作用是通过主磁通和安放电枢进行绕组。电枢铁芯既是主磁路的组成部分，又是电枢绕组的支撑部分。当电枢在磁场中旋转时，铁芯将产生涡流和磁滞损耗，为了减少电枢铁芯损耗，提高效率，铁芯一般用 0.5mm 厚冲有齿和槽的硅钢片叠压而成，如图 1-10 (a)、(b) 所示。两端用线圈支架或压环夹紧固定，电枢铁芯中部有直径 25mm 左右具有轴向冷却通风孔，较大电机的电枢铁芯则在轴向分段，段间为宽度约 10mm 的径向通风沟，铁芯的轴向通风孔，通风孔和通风沟均为冷却空气的通道，用以增加整个电枢的散热能力。

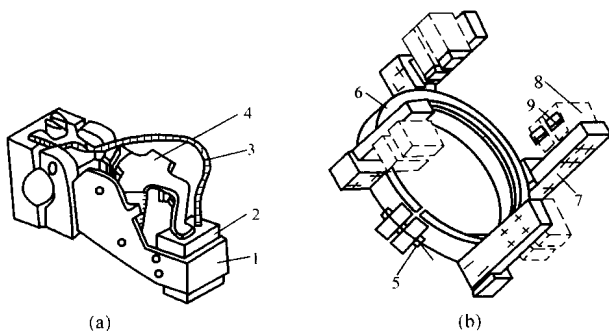


图 1-9 直流电机中电刷装置

(a) 电刷盒装配；(b) 直流电机的刷杆座

1—刷盒；2—电刷；3—铜丝辫；4—压紧弹簧；5—紧固螺钉；

6—座圈；7—绝缘刷杆；8—电刷盒；9—电刷

铁芯外圆周上按轴向均匀分布着槽，与铁芯绝缘电枢绕组嵌放在铁芯槽内。槽口处用槽楔封紧，绕组端部则用绑线捆住，以防止电枢高速旋转时绕组因离心现象而被甩出损坏。

2. 电枢绕组

电枢绕组是电机的重要部分，其作用是产生感应电动势，通过电流并产生电磁转矩，使电机实现能量转换。绕组通常用漆包线绕制而成，嵌入电枢铁芯槽内，并按一定的规则连接起来。它是直流电机的电路部分，也是产生电动势和电磁转矩进行机电能量转换部分。线圈用绝缘的圆形或矩形截面导线绕成，分上、下层嵌放在电枢铁芯槽内，上下层之间、线圈与铁芯之间都要绝缘，为了防止电枢旋转时产生的离心力使绕组飞出来，绕组嵌入槽内后，用槽楔压紧。

3. 换向器

换向器起到机械整流的作用，是将电枢绕组内的交变电动势转换成电刷之间的直流电动势，或把外电路通入电刷的直流电流转换成电枢绕组中所需的交变电流。换向器用具有鸽尾形的换向片，片间用云母片绝缘，叠压成圆筒形，两端借 V 形套筒和螺纹压圈拧紧成一个整体，每个换向片与绕组每个元件的引出线焊接在一起。换向器上换向片的竖板或长升高片用作电枢绕组端接引线的连接，端接引线与升高片之间一般用焊锡焊接，H 级的用氩弧焊焊接。汽车电机及小型直流电机采用整体压铸而成的塑料换向器，这种换向器则不能够进行拆修，换向器损坏后只能整体更换新的，如图 1-11 所示。

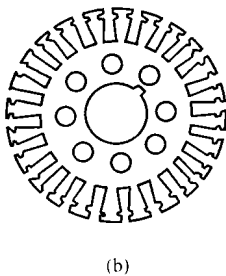
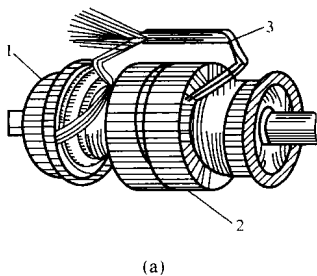


图 1-10 电枢铁芯

(a) 电枢铁芯装配；(b) 电枢冲片

1—换向器；2—电枢铁芯；3—电枢绕组；

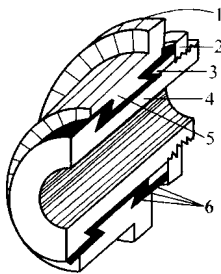


图 1-11 换向器结构

1—片间云母；2 螺帽；
3—V 形环；4—套筒；
5—换向片；6—云母

4. 电枢轴、轴承及风扇

电枢轴用以支撑整个电枢的所有部件，在轴的两端各紧密配置有一只轴承，使电枢能平稳运行于定子铁芯内。电枢轴上通常都装有风扇，用以加快电机的内部散热。

(三) 空气隙

在静止不动的定子磁极和旋转的电枢之间存在一段间隙，这段间隙就叫定转子间气隙，它的大小和形状直接影响电机的运行特性，不宜轻易改动。

三、直流电机的原理

(一) 直流电动机

如图 1-12 所示为直流电动机的工作原理示意图。

在励磁绕组中通入直流励磁电流建立 N、S 极，当电刷间加直流电压时，将有电流通过

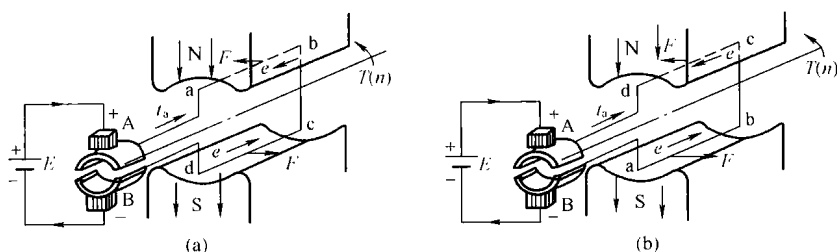


图 1-12 直流电动机的工作原理图

(a) ab 于 N 极下；(b) ab 于 S 极下

电刷流入电枢导体，由图 1-12 (a) 可以看出：将直流电源正级加于电刷 A，电源负级加于电刷 B，则线圈 abcd 中流过电流，在导体 ab 中，电流由 a 流向 b，在导体 cd 中，电流由 c 流向 d。载流导体 ab 和 cd 均处于 N—S 极间的磁场当中，受到电磁力的作用，电磁力的方向用左手定则确定，可知这一对电磁力行成一个转矩，称为电磁转矩。转矩的方向为逆时针方向，使整个电枢逆时针方向旋转。当电枢旋转 180° ，导体 cd 转到 N 极下，ab 转到 S 极下，如图 1-12 (b) 所示，由于电流仍从电刷 A 流入，使 cd 中的电流变为由 d 流向 c，而 ab 中的电流由 b 流向 a，从电刷 B 流出。用左手定则判别可知，电磁转矩的方向仍是逆时针方向。由于 A 电刷总与 N 极下的导体相连，B 电刷总与 S 极下的导体相连，当导体转过 180° 时，所受的电磁转矩依然使导体按原方向旋转。换向器的作用就是将电动机直流输入电流变换成电枢导体中的交变电流。另一方面，当电枢沿一定方向转动时，电枢导体也切割磁力线，产生感应电势 e ，根据右手定则判断，感应电动势 e 的方向始终与导体中的电流方向相反，故称其为反电动势。电源必须克服这一反电动势才能向电动机输送电能。可见电动机从电源吸取了电功率，向负载输出机械功率，从而将电能转换为机械能。

(二) 直流发电机

直流发电机的工作原理图如图 1-13 所示。

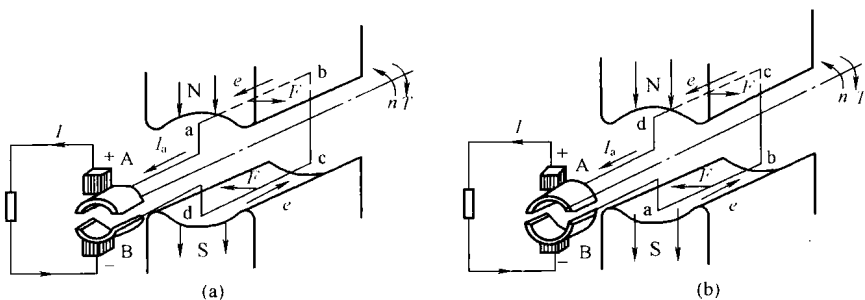


图 1-13 直流发电机的工作原理

(a) ab 于 N 极下；(b) ab 于 S 极下

当励磁绕组通以直流励磁电流时，产生固定不变的 N 极 S 极。直流发电机的模型与直流电动机相同，不同的是电刷上不加直流电压，而是用原动机（柴油机等）拖动电枢朝某一方，例如，朝逆时针方向旋转。这时导体 ab 和 cd 分别切割 N 极和 S 极下的磁力线，感应产生电动势，电动势的方向用右手定则确定。图 1-13 所示的情况，导体 ab 中电动势的方向由 b 指向 a，导体 cd 中电动势的方向由 d 指向 c。所以电刷 A 为正极性，电刷 B 为负极性。电枢旋 180° 时，导体 cd 转至 N 极下，感应电动势的方向由 c 指向 d，电刷 A 与 d 所

连换向片接触，仍为正极性；同理电刷 B 仍为负极性。可见，在同一个磁极下，导体中产生的感应电动势的方向总是固定不变的。如果 A 电刷总是与 N 极下的导线相连，B 电刷总是与 S 极下的导体相连，那么从 A、B 电刷间引出的电动势将是一个极性不变的直流电动势。当线圈 ab—cd 转到水平位置时，则它位于磁场的中性位置，故其感应电动势为零。此时，正好是换向片由一个电刷滑到另一个电刷的临界时刻，换向片虽被电刷短路而并没有短路电流。从上述情况可以看出，导体中的感应电动势是交变电势，其波形如图 1-14 所示。而通过换向器和电刷的作用，在电刷 A、B 两端输出的电动势是方向不变的直流电动势。它是一个波动较大的脉动直流，其波形如图 2-3 所示。但在实用的发电机中，电枢绕组的导体和换向片数量都很多，它们均匀分布在电枢圆周的不同位置，这些不同位置线圈的脉动峰值出现于不同时刻，诸多线圈电动势的合成结果，就构成了大体上平稳的直流电。若在电刷 A、B 之间接上负载，发电机就能向负载供给直流电能。这就是直流发电机的基本工作原理。

另一方面，当发电机带负载时，电枢导体中将有电流流过，方向与 e 相同，这时导体和磁场间将产生电磁力，其方向由左手定则判定，如图 1-15 所示。由于 N 极（或 S 极）下导体中电流方向不变，故导体所受电磁力方向也不变，从而形成了一个试图阻止电枢线圈旋转的电磁转矩，原动机必须输入足够的机械转矩来抵消它的影响，才能维持发电机匀速旋转发电。发电机就这样把机械能转换为电能。

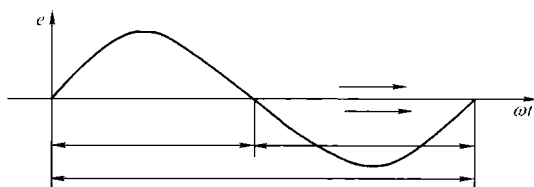


图 1-14 线圈中的交变电动势

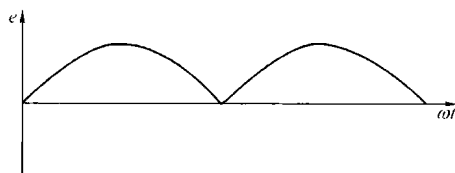


图 1-15 电刷 AB 间的脉动电动势

从以上分析可以看出：一台直流电机原则上既可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行，取决于外界不同的条件。将直流电源加于电刷，输入电能，电机能将电能转换为机械能，拖动生产机械旋转，作为电动机运行；如用原动机拖动直流电机的电枢旋转，输入机械能，电机能将机械能转换为直流电能，从电刷上引出直流电动势，作为发电机运行。同一台电机，既能作为电动机运行，又能作为发电机运行的原理，称为直流电机的可逆原理。

（三）直流电机的可逆运行原理

从上述直流电机的工作原理来看，一台直流电机若在电刷两端加上直流电压输入电能，即可拖动产机械旋转，输出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作为电源，输出电能而成为发电机。同一台电机在一定条件下既可作为电动机又可作为发电机运行，这就是电机的可逆运行原理。无论在什么位置，都能产生一个基本恒定的转矩。电动机的导体 ab 与 cd 在磁场中转动以后，它也像在发电机时一样因切割磁感线而产生感应电动势，其方向则与电源电动势相反，称为反电动势。同样，当直流发电机有了负载电流以后，它的导体也和电动机时一样在磁场中将受力而产生力矩，其方向则与原动力矩方向相反，称为制动力矩。由此可见，直流发电机与直

流电动机是直流电机的两种运行方式，从理论上讲它们是可逆运行的。

四、直流电机的铭牌

电机制造厂按照国家标准，根据电机的设计和试验数据，规定了电机的正常运行状态和条件，通常称之为额定运行。凡表征电机额定运行情况的各种数据称为额定值，标注在电机铝制铭牌上，铭牌上标注的功率、电压、电流、转速等技术数据，均为额定值。它是正确使用电机的依据。直流电机的主要额定值见表 1-4。

表 1-4 直流电机铭牌

型 号	Z2-72	励磁方式	并 励
功 率	22kW	励磁电压	220V
电 压	220V	励磁电流	2.06A
电 流	116A	定额	连续
转 速	1500r/min	温升	80℃
编 号	××××	出厂日期	×年×日
××××电机厂			

(一) 直流电机的额定值

电机制造厂在每台电机的机座上都钉有一块铭牌，上面标出该电机的主要技术数据，称为该电机的额定值。额定值是一台电机设计制造时，在达到国家标准规定条件下的正常允许值。下面介绍直流电机的主要额定值。

1. 额定功率 P_N

额定功率（额定容量） P_N (kW)：指电机在规定的额定状态下运行时输出的功率，单位为 kW。对发电机来说，额定功率是在额定条件下发电机供给负载的电功率即指发电机端点输出的电功率，其值等于额定电压与额定电流的乘积；对电机来说，额定功率是指电机轴身上输出的机械功率，其值等于额定电压与额定电流的乘积再乘以额定效率。常用的额定功率，见表 1-5。

表 1-5 直流电机的额定功率 (单位：kW)

电机类别		额定功率
小 型	电动机	0.4、0.6、0.8、1.1、1.5、2.2、3、4、5.5、7.5、10、13、17、22、30、40、55、75、100、125
	发电机	0.7、1、1.4、1.9、2.5、3.5、4.8、6.5、9、11.5、14、19、26、35、48、67、90、115、145、185
中 型	电动机	55、75、100、125、160、200、250、320、400、500、630、800、1000、1250
	发电机	180、240、300、350、470、580、730、920、1150、1450
大 型	电动机	1250、1600、2050、2600、3300、4300、5350、6700
	发电机	1900、2400、3000、3600、4600、5700

2. 额定电压 U_N

额定电压 U_N ：电机长期安全运行时所能承受的电压，单位为 V。直流电机常用额定电压见表 1-6。

表 1-6

直流电机的额定电压

(单位: V)

电机类型	额 定 电 压
电动机	110、220、(330)、440、630、(660)、800、1000、1500
发电机	6、12、24、48、115、230、(330)、460、630、(660)、800、1000

3. 额定电流 I_N

额定电流 I_N : 指电机在额定电压下, 转轴有额定功率输出时的定子绕组电流, 单位为 A。

注意 U_N 、 I_N 不同于电机的电枢电压 U_a 和电枢电流 I_a , 发电机的 U_N 、 I_N 是输出值, 电动机的 U_N 、 I_N 是输入值, 额定效率 η_N 为电动机的输出功率与输入功率之比。

4. 额定转速 n_N

额定转速 n_N : 指电机在额定电压和额定电流下、额定功率输出时的转子转速, 单位为 r/min。直流电机常用额定转速见表 1-7。

表 1-7

直流电机的额定转速

(单位: r/min)

电机类别	额 定 转 速
电动机	25、32、41、51、63、81、111、125、160、200、250、300、400、500、600、750、1000、1500、3000
发电机	300、330、375、427、500、600、750、1000、1500、3000

除上述额定值外, 还有诸如额定效率, 额定效率 η_N 为电动机的输出功率与输入功率之比。

$$M_N = 9550 \frac{P_N}{\eta_N}$$

额定值是经济合理地选择电机的依据, 如果电机运行时, 其各物理量 (如电压、电流、转速等) 均等于额定值, 则称此时电机运行于额定状态。电机额定运行时, 可以充分、可靠地发挥电机的能力。电机在实际应用时, 是否处于额定运行情况, 要由负载大小决定, 如果电机运行时, 其电枢电流超过额定值, 称为超载或过载运行; 一般不允许电机超过额定值运行, 因为这样会减少电机的使用寿命, 甚至损坏电机, 反之, 若小于额定电流运行, 则称为轻载。但也不能让电机长期轻载运行, 这样不能充分利用设备, 运行效率低, 所以应该根据负载大小合理选择电机。

(二) 直流电机的系列与型号

1. 直流电机系列

电机产品大多数为系列产品。所谓系列电机是指技术要求、设计方法、结构类型、冷却方法、生产工艺及应用范围基本相同, 功率及安装尺寸按一定规律递增, 零部件通用性很高的一系列电机。只有当用户提出与系列电机差别较大的特殊技术要求时, 才考虑进行特殊规格电机的设计和生产。即使这样, 也应尽量利用现有的工装、模具, 以降低生产成本, 缩短生产周期。

电机系列产品可分为基本系列、派生系列和专用系列。基本系列是为适应一般传动要求而生产的应用范围较广的一般用途电机产品, 例如, Y 系列和 Y2 系列三相感应电动机、Z4 系列小型直流电机等。派生系列是按照不同的使用要求, 在基本系列的基础上作部分改动,