

国家示范院校重点建设专业

机电一体化技术专业课程改革系列教材

机电系统执行器应用 ——电机与电控技术

◎ 主 编 蒋永明 蓝旺英
◎ 副主编 卢 彦 刘明高
◎ 主 审 陶有抗



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家示范院校重点建设专业

机电一体化技术专业课程改革系列教材

机电系统执行器应用

——电机与电控技术

◎ 主 编 蒋永明 蓝旺英

◎ 副主编 卢 彦 刘明高

◎ 审 陶有抗



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是针对高职教育的特点,在总结多年的理论教学经验和生产实践经验的基础上编写而成的。全书共分7章,包括直流电机、变压器、交流电动机、常用控制电机、常用低压电器、电动机的基本电气控制电路、常用生产机械的电气控制,每章配有小结、思考题与习题,以便学生课后学习和练习。

本书按照高职教育机电一体化技术及相关专业培养目标的要求,在内容编写上遵循学生的认知规律,内容顺序从常用设备和元件的工作原理到生产机械上的实际应用,力求取材的实用性、内容的典型性,突出分析方法,培养分析能力。本书以必须、够用为原则,减少理论推导,由浅入深,突出实用能力的培养。

本书适用于高职高专院校电气类专业、机电类专业以及相关专业,也可作为相关工程技术人员,特别是维修人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机电系统执行器应用:电机与电控技术/蒋永明,
蓝旺英主编. — 北京:中国水利水电出版社,2010.3
(国家示范院校重点建设专业、机电一体化技术专业
课程改革系列教材)
ISBN 978-7-5084-7311-6

I. ①机… II. ①蒋… ②蓝… III. ①电机—高等学
校:技术学校—教材②电气控制—高等学校:技术学校—
教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第039795号

书 名	国家示范院校重点建设专业 机电一体化技术专业课程改革系列教材 机电系统执行器应用——电机与电控技术
作 者	主 编 蒋永明 蓝旺英 副主编 卢 彦 刘明高 主 审 陶有抗
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 12.25印张 298千字
版 次	2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	26.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是国家示范院校重点建设专业——机电一体化技术专业的课程改革与建设成果之一。在编写过程中根据高职教育的特点和要求，面向当前高职院校生源状况，结合教育教学改革精神，着重处理好教材的知识传授和能力培养两者之间的关系。在原理分析中以定性为主，在应用技术上突出实用性和分析方法。

本书在内容组织上以必须、够用为度，淡化理论、突出应用；内容结构上循序渐进，语言文字精炼，内容简洁、好学易学。配有典型例题，各章附有丰富的思考题与习题，便于学生掌握和巩固所学知识。通过本课程的学习，使学生具有对工厂常用电气控制设备运行、维护、安装、调试及选用的能力，具有对常用生产机械电气控制电路工作过程的分析能力，具有对常用生产机械电气控制电路常见故障的诊断能力。教学中可根据不同专业的需要，取舍相关的章节内容。

本书由蒋永明、蓝旺英任主编，卢彦、刘明高任副主编。编写分工如下：安徽水利水电职业技术学院蒋永明编写第5章、第6章，安徽水利水电职业技术学院蓝旺英编写第3章、第4章，安徽中天电力电子有限公司卢彦编写第2章，合肥安明电力安装公司刘明高编写第7章，安徽水利水电职业技术学院黄均安编写第1章。

本书在编写过程中，参阅了同行专家编著的教材和相关企业的设备资料，得到安徽水利水电职业技术学院教务处领导的大力支持，同时还得到国家电网天成公司、合肥安明电力安装公司、金德电力设备公司、合肥锻压公司的积极参与和大力帮助，在此表示最诚挚的感谢。

由于时间紧张，作者水平有限，本书难免有一些疏漏，不足之处在所难免，恳请广大师生和读者提出意见和建议。

编者

2010年1月

前言

第 1 章 直流电机	1
1.1 直流电机的结构和工作原理	1
1.1.1 直流电机的结构	1
1.1.2 直流电机的工作原理	2
1.2 直流电机的励磁方式和铭牌	5
1.2.1 直流电机的励磁方式	5
1.2.2 直流电机的铭牌	5
1.3 直流电动机的基本平衡方程式和机械特性	7
1.3.1 直流电动机的基本平衡方程式	7
1.3.2 直流电动机的机械特性	7
1.4 直流电动机的起动和反转	10
1.4.1 直流电动机的起动	10
1.4.2 直流电动机的反转	12
1.5 直流电动机的调速	12
1.6 直流电动机的制动	14
本章小结	17
思考题与习题	18
第 2 章 变压器	19
2.1 变压器的基本结构和分类	19
2.1.1 基本结构	19
2.1.2 分类和用途	22
2.1.3 铭牌数据	22
2.2 单相变压器的工作原理	23
2.2.1 变压器的空载运行	23
2.2.2 变压器的负载运行	24
2.2.3 变压器的匹配运行	25
2.3 变压器的工作特性	26
2.3.1 变压器的外特性和电压调整率	27
2.3.2 变压器的损耗与效率	27
2.4 三相变压器	28
2.4.1 三相变压器的组成	28

2.4.2 三相变压器的绕组联结	30
2.5 其他常用变压器	34
2.5.1 自耦变压器	34
2.5.2 电压互感器	35
2.5.3 电流互感器	36
2.5.4 电焊变压器	37
本章小结	38
思考题与习题	39
第3章 交流电动机	41
3.1 三相异步电动机的结构和工作原理	41
3.1.1 三相异步电动机的结构	41
3.1.2 旋转磁场	42
3.1.3 转动原理	45
3.1.4 运行过程与转差率	45
3.1.5 三相异步电动机铭牌	46
3.2 三相异步电动机的运行特性	47
3.2.1 电磁转矩	47
3.2.2 转矩与功率的关系	49
3.2.3 三相异步电动机机械特性	50
3.3 三相异步电动机的起动	51
3.3.1 起动性能	51
3.3.2 笼形电动机的起动	52
3.3.3 线绕式电动机的起动	53
3.4 三相异步电动机的调速、反转和制动	54
3.4.1 异步电动机的调速	54
3.4.2 异步电动机的反转	55
3.4.3 异步电动机的制动	55
3.5 电力拖动系统运动状态分析	56
3.5.1 电力拖动系统的运动方程式	56
3.5.2 电力拖动系统的负载与负载转矩特性	57
3.5.3 电力拖动系统的稳定运行条件	59
3.6 单相异步电动机	59
3.6.1 电容分相单相异步电动机	59
3.6.2 电阻分相单相异步电动机	61
3.6.3 单相罩极电动机	61
3.7 同步电机简介	62
3.7.1 三相同步发电机	62
3.7.2 三相同步电动机	63
3.7.3 三相同步补偿机	65

本章小结	65
思考题与习题	66
第 4 章 常用控制电机	68
4.1 伺服电动机	68
4.1.1 直流伺服电动机	68
4.1.2 交流伺服电动机	70
4.2 测速发电机	71
4.2.1 直流测速发电机	71
4.2.2 交流测速发电机	72
4.3 步进电动机	74
4.3.1 反应式步进电动机的结构及工作原理	74
4.3.2 步进电动机的驱动电源	77
本章小结	77
思考题与习题	78
第 5 章 常用低压电器	79
5.1 常用低压电器的基本知识	79
5.1.1 低压电器的分类	79
5.1.2 电磁机构	79
5.1.3 低压电器的触头系统和灭弧系统	81
5.2 主令电器与转换开关	84
5.2.1 主令电器	84
5.2.2 万能转换开关	86
5.3 电磁式接触器	87
5.3.1 电磁式接触器的结构及工作原理	87
5.3.2 电磁式接触器的分类及主要技术参数	88
5.4 电磁式继电器	89
5.4.1 电磁式继电器的基本知识	89
5.4.2 电磁式电流继电器	90
5.4.3 电磁式电压继电器	91
5.4.4 电磁式中间继电器	91
5.4.5 常用电磁式继电器	92
5.5 时间继电器	92
5.5.1 电磁阻尼式时间继电器	92
5.5.2 空气阻尼式时间继电器	93
5.5.3 晶体管式时间继电器	94
5.5.4 电动式时间继电器	94
5.6 热继电器	95
5.6.1 热继电器的结构及工作原理	95

5.6.2 常用的热继电器	96
5.7 速度继电器	97
5.8 熔断器	98
5.8.1 熔断器的结构、原理及保护特性	98
5.8.2 熔断器的主要技术参数	98
5.8.3 常用熔断器	99
5.9 低压断路器	100
5.9.1 低压断路器的结构和工作原理	100
5.9.2 低压断路器的型号及主要技术参数	100
本章小结	101
思考题与习题	102
第6章 电动机的基本电气控制电路	104
6.1 电气图	104
6.1.1 电气图用符号	104
6.1.2 电气原理图	105
6.1.3 位置图	106
6.1.4 接线图	106
6.2 三相笼形异步电动机的全压起动控制电路	107
6.2.1 三相笼形异步电动机单向旋转控制电路	107
6.2.2 三相笼形异步电动机正反转控制电路	109
6.2.3 自动往返行程控制电路	112
6.2.4 顺序控制与多地控制电路	113
6.3 三相笼形异步电动机的减压起动控制电路	115
6.3.1 定子绕组串电阻或电抗器减压起动控制电路	115
6.3.2 Y— Δ 减压起动控制电路	116
6.3.3 自耦变压器减压起动控制电路	118
6.3.4 延边三角形减压起动控制电路	119
6.4 线绕式三相异步电动机起动控制电路	120
6.4.1 转子绕组串电阻起动控制电路	120
6.4.2 转子绕组串频敏变阻器起动控制电路	122
6.5 三相异步电动机电气制动控制电路	123
6.5.1 能耗制动控制电路	123
6.5.2 反接制动控制电路	124
6.6 三相异步电动机变极调速控制电路	126
6.7 直流电动机电气控制电路	128
6.7.1 直流电动机单向起动控制电路	128
6.7.2 直流电动机正反转起动控制电路	129
6.7.3 直流电动机制动控制电路	130
本章小结	131

思考题与习题	131
第7章 常用生产机械的电气控制	134
7.1 普通车床的电气控制	134
7.1.1 卧式车床的主要结构、运动形式及控制要求	134
7.1.2 CA6140 型普通车床电气控制电路	135
7.2 平面磨床的电气控制	136
7.2.1 平面磨床的主要结构、运动形式和控制要求	137
7.2.2 M7120 型平面磨床电气控制电路	138
7.3 摇臂钻床电气控制电路	141
7.3.1 摇臂钻床的主要结构、运动形式及控制要求	141
7.3.2 液压系统工作简介	142
7.3.3 Z3040 型摇臂钻床电气控制电路	144
7.4 铣床的电气控制	147
7.4.1 铣床的主要结构、运动形式和控制要求	147
7.4.2 X62W 型万能升降台铣床电气控制电路	150
7.5 镗床的电气控制电路	157
7.5.1 镗床的主要结构、运动形式和控制要求	157
7.5.2 T68 型卧式镗床电气控制电路	158
7.6 组合机床的电气控制电路	165
7.6.1 液压动力滑台的电液控制及其控制电路	165
7.6.2 带定位夹紧的一次进给系统控制电路	169
7.6.3 双面单工位组合机床电气控制电路	171
7.7 交流桥式起重机的电气控制	175
7.7.1 桥式起重机的结构和运动形式	175
7.7.2 桥式起重机的电力拖动特点及控制要求	175
7.7.3 20t/5t 桥式起重机电气控制电路	178
本章小结	185
思考题与习题	186
参考文献	187

第 1 章 直 流 电 机

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称。直流电机是可逆的，即一台直流电机既可作为发电机运行，又可作为电动机运行。当用作发电机时，将机械能转换为电能；当用作电动机时，将电能转换为机械能。直流发电机和直流电动机在结构上没有差别。

直流电动机和交流电动机相比，具有良好的起动性能和调速性能，因此广泛应用于对调速性能要求较高的机械设备上，如矿井卷扬机、挖掘机、大型机床、电力机车、船舶推进器、纺织及造纸机械等。

本章主要介绍直流电机的结构、工作原理和机械特性，在此基础上进一步分析直流电动机的起动、调速和制动方法。

1.1 直流电机的结构和工作原理

1.1.1 直流电机的结构

直流电机主要由定子和转子（电枢）两大部分构成。定子和电枢之间的间隙称为气隙。定子的主要作用是产生主磁场并作为机械支撑，它主要由主磁极、换向磁极、机座和电刷装置组成。电枢的作用是产生感应电动势和电磁转矩，它主要由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇组成。直流电机的径向剖面图如图 1.1 所示。下面分别介绍各主要部件的结构和作用。

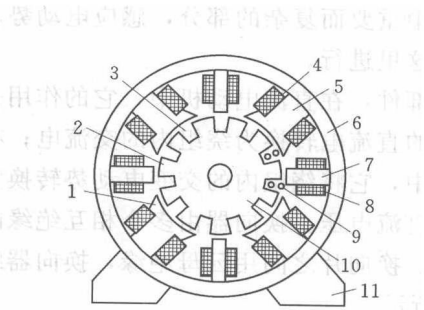


图 1.1 直流电机径向剖面图

- 1—极靴；2—电枢齿；3—电枢槽；4—励磁绕组；
- 5—主磁极；6—机座；7—换向磁极；
- 8—换向磁极绕组；9—电枢绕组；
- 10—电枢铁芯；11—地脚

1. 定子

(1) 主磁极。主磁极的作用是产生主磁场，它由主磁极铁芯和绕组构成，如图 1.2 所示。为减小涡流损耗，主磁极铁芯一般采用 1~1.5mm 厚的低碳钢板冲片叠压而成。主磁极铁芯上绕有励磁绕组。

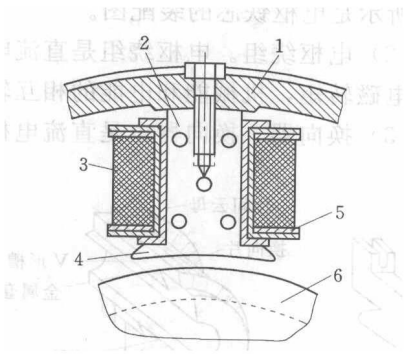


图 1.2 主磁极

- 1—机座；2—极身；3—励磁绕组；
- 4—极靴；5—框架；6—电枢



(2) 换向磁极。换向磁极的作用是产生附加磁场,用以改善换向,使电动机运行时电刷下不产生有害的火花。它由换向磁极铁芯和换向磁极绕组两部分构成。

(3) 机座。机座是直流电机的外壳,一方面用来固定主磁极、换向磁极和端盖等,另一方面也是电机磁路的一部分,这部分磁路称为定子磁轭。为保证良好的机械强度和导磁性能,机座一般采用铸钢制造或用厚钢板卷制焊接而成。

(4) 电刷装置。电刷装置的作用是用来固定电刷,并使电刷与旋转的换向器保持滑动接触,将电枢绕组与外电路接通,使电流经电刷输入电枢或从电枢输出。电刷装置由电刷、刷握、刷杆、刷杆座以及汇流条等构成,如图 1.3 所示。

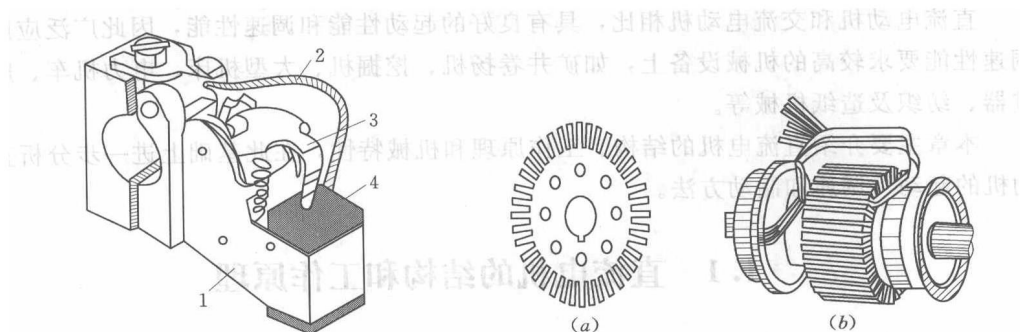


图 1.3 电刷装置

1—刷握; 2—汇流条; 3—压紧弹簧; 4—电刷

图 1.4 电枢结构

(a) 电枢铁芯冲片; (b) 电枢铁芯装配图

2. 转子 (电枢)

(1) 电枢铁芯。电枢铁芯是电机主磁路的一部分。为减少损耗,提高电机的效率,电枢铁芯用 $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$ 厚涂有绝缘漆的硅钢冲片叠压而成,如图 1.4(a) 所示。如图 1.4(b) 所示是电枢铁芯的装配图。

(2) 电枢绕组。电枢绕组是直流电机结构中重要而复杂的部分,感应电动势、电流和产生电磁转矩,机械能和电能的相互转换都在这里进行。

(3) 换向器。换向器也是直流电机的重要部件,在直流电动机中,它的作用是将电刷

两端的直流电转换为绕组内的交流电;在直流发电机中,它将绕组内的交变电动势转换为电刷两端的直流电压。换向器由多个相互绝缘的换向片组成。换向片之间用云母绝缘,换向器结构如图 1.5 所示。

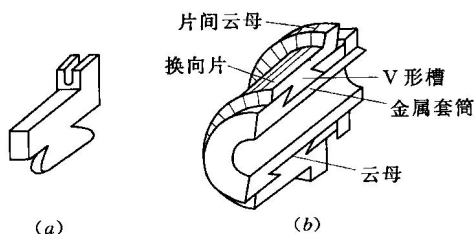


图 1.5 换向器

(a) 换向片; (b) 金属套筒换向器

(4) 转轴。转轴是支撑电枢铁芯和输出 (或输入) 机械转矩的部件,它必须具有足够的刚度和强度,以保证负载时气隙均匀及转轴本身不致断裂。转轴一般用圆钢加工而成。

1.1.2 直流电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理

如图 1.6 所示为一台两极直流发电机工作原理简图。定子是两个在空间固定的主磁极 N、S。在两个主磁极之间,有一个可以转动的铁质圆柱体就是电枢,电枢上面固定一个



线圈,有效边为 ab 、 cd 。线圈的两个出线端分别接到两个半圆形铜质换向片上,两个换向片构成的圆柱体就是一个最简单的换向器。它固定在转轴上,随轴一起转动。为了使线圈与外电路接通,换向器与空间固定的电刷 A 和 B 相接触。

当发电机的电枢由原动机拖动逆时针恒速旋转时,根据电磁感应定律,线圈的 ab 、 cd 边将切割磁力线而感应电动势,感应电动势的方向可用右手定则确定,如图 1.6 所示。瞬时,线圈 ab 边处于 N 极下,其电动势方向为 $b \rightarrow a$,并通过换向片引到电刷 A,因此电刷 A 的极性为正,线圈 cd 边处于 S 极下,电动势的方向为由 $d \rightarrow c$,所以电刷 B 的极性为负。当电枢逆时针转过 180° 后,线圈 cd 边电动势的方向变为由 $c \rightarrow d$, ab 边电动势的方向变为由 $a \rightarrow b$ 。虽然两个线圈边电动势的方向都发生改变,但由于 cd 边通过换向片变为与电刷 A 接触,电刷 A 仍为正极性。同理可分析出电刷 B 仍为负极性。随着电枢连续旋转,线圈的每个有效边交替切割 N 极和 S 极磁力线而感应出交变电动势,但由于进入到 N 极下的线圈边总是和电刷 A 相接触,进入到 S 极下的线圈边总是和电刷 B 相接触,因此电刷 A 始终是正极性,电刷 B 始终是负极性,所以在电刷 A、B 之间引出的是方向不变的直流电动势。

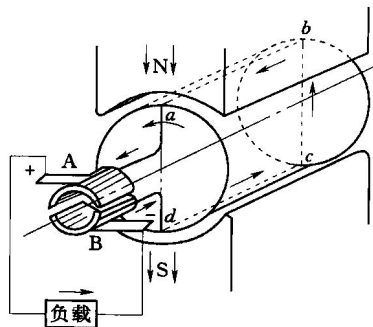


图 1.6 直流发电机工作原理图

2. 直流电动机的工作原理

把如图 1.6 所示直流发电机的原动机撤掉,使电刷 A、B 两端接于直流电源,如图 1.7 所示。该直流电机就会运行在电动工作状态,并且把输入的直流电能转换为机械能输出。

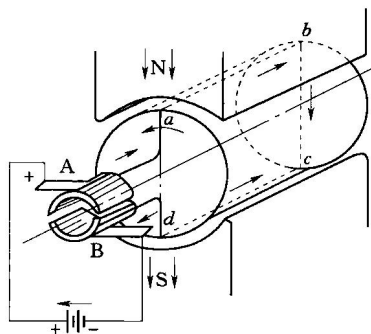


图 1.7 直流电动机工作原理图

由图 1.7 可以看出,当电刷 A 接直流电源的正极,电刷 B 接负极时,电流将从电刷 A 通过换向片流入线圈 $abcd$,并从电刷 B 流出。N 极下线圈有效边的电流方向是由 $a \rightarrow b$; S 极下线圈边电流方向是由 $c \rightarrow d$ 。根据电磁力定律,线圈的 ab 边和 cd 边将分别受到电磁力的作用,电磁力的方向可按左手定则确定。如图 1.7 所示瞬时,线圈 ab 边的受力方向为自右向左, cd 边的受力方向为自左向右,两个电磁力对转轴形成逆时针方向作用的力矩,即电磁转矩。在电磁转矩的作用下,电枢将沿逆时针方向转动。

当电枢转过 180° 时,线圈的 ab 边转到 S 极下, cd 边转到 N 极下,此时线圈两个有效边的电流方向将变为由 $d \rightarrow c$ 和由 $b \rightarrow a$ 。按左手定则可确定,此时进入 N 极下的 cd 边所受电磁力的方向为自右向左,进入 S 极下的 ab 边所受电磁力的方向为自左向右,因此电磁转矩的作用方向仍为逆时针。由此可看出,由于电刷 A 总是通过换向片和进入 N 极下的线圈边相连接;电刷 B 总是通过换向片和进入 S 极下的线圈边相连接,在电刷两端所接电源极性不变时,电流总是通过电刷 A 流入 N 极下的线圈边,再沿 S 极下的线圈边经电刷 B 流向电源。因此电磁力和电磁转矩的方向能始终保持不变,从而使电机沿逆时针方向连续旋转。



3. 直流电机的可逆性

通过上述对直流发电机和直流电动机工作原理的分析可看出,同一台直流电机既可作发电机运行,也可作电动机运行。当用原动机拖动电枢旋转即输入机械功率时,在电刷两端就会输出直流电能,此时电机作发电机运行;当在电刷两端接直流电源即输入直流电能时,电机将通过电枢拖动生产机械旋转从而输出机械能,电机又作电动机运行。以上所述就是直流电机可逆运转的原理。

4. 直流电机的电枢电动势

电枢绕组切割气隙磁通而产生的感应电动势简称为电枢电动势。其单根导体感应电动势的有效值为

$$E_c = BLv \quad (1-1)$$

式中: v 为导体运动的线速度, m/s ; B 为磁感应强度, T ; L 为导体的有效长度, m 。

直流电机的电枢绕组由许多导体按一定规律连接,保证所有导体的感应电动势都是叠加的,即电枢电动势与每根导体中的感应电动势成正比。导体运动的线速度 v 与电枢绕组的转速 n 成正比。由于习惯上用磁通来表示各个电量,根据电枢绕组的结构、绕制规律和电磁感应的有关知识推导出感应电动势的表达式为

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-2)$$

式中: C_e 为电枢电动势常数,与电动机的结构有关; Φ 为一个磁极下的总磁通; n 为电动机的转速。

由式 (1-2) 可以看出,电枢电动势与每极磁通 Φ 和转速 n 成正比,对于直流电动机,电枢电动势的方向与电枢电流方向相反,所以电枢电动势也称为反电势。

5. 直流电机的电磁转矩

直流电动机的电磁转矩 T_M 是由电枢绕组通入直流电后,在主磁场的作用下使得电枢绕组的导体受到力 F 的作用而形成的。根据电磁力定律,电枢绕组通入直流电后,每根有效导体受到的力可以表示为

$$F = BIL \quad (1-3)$$

式中: B 为电磁感应强度,与每极磁通 Φ 成正比; L 为每根有效导体的长度,取决于电机的结构,是个定值; I 为每根导体中的电流,与电枢电流 I_a 成正比。

直流电动机受到的电磁转矩 T 是由所有有效的导体所受电磁力共同产生的,正比于电磁力 F ,根据电磁感应的有关知识推导出电磁转矩的表达式为

$$T_M = C_T \Phi I_a \quad (1-4)$$

式中: C_T 为电磁转矩常数,与电机结构有关; Φ 为一个磁极下的总磁通, Wb ; I_a 为电枢电流,单位为 A ; T_M 为电磁转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

由式 (1-4) 可以看出,电磁转矩 T_M 与一个磁极下的总磁通 Φ 和电枢电流 I_a 成正比,其方向取决于 Φ 和 I_a 的方向。

对于同一台电机,电动势系数 C_e 和电磁转矩常数 C_T 之间的关系为

$$C_T = 9.55 C_e$$



直流电动机的额定转矩 T_N 的计算公式和交流电动机相同，即

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} \quad (1-5)$$

其中， T_N 的单位为 $N \cdot m$ ； P_N 为额定功率，W； n_N 为额定转速，r/min。

1.2 直流电机的励磁方式和铭牌

1.2.1 直流电机的励磁方式

主磁极励磁绕组中通入直流电流产生的磁场称为主磁场。励磁绕组的供电方式称为励磁方式。根据励磁方式的不同，直流电机分为他励和自励两类。他励直流电机的励磁绕组与电枢绕组之间无电的联系，由独立电源给励磁绕组供电，如图 1.8 (a) 所示。自励直流电机的励磁电流由自身供给，根据励磁绕组与电枢绕组的联结关系，又可以分为并励、串励和复励三种。并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组并联，励磁绕组上所加的电压就是电枢电路两端的电压，如图 1.8 (b) 所示。对并励直流电动机 $I = I_a + I_f$ ，并励直流发电机 $I_a = I + I_f$ 。串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联，如图 1.8 (c) 所示，这种直流电动机的励磁电流就是电枢电流，即 $I_f = I_a$ 。复励直流电机的主磁极上装有两个励磁绕组，一个与电枢绕组并联，称为并励绕组；另一个与电枢绕组串联，称为串励绕组。这两个励磁绕组若产生的磁动势方向相同称为积复励，否则称为差复励；按两个励磁绕组的接线不同，有长复励和短复励两种，两种联结方式分别如图 1.8 (d)、(e) 所示。

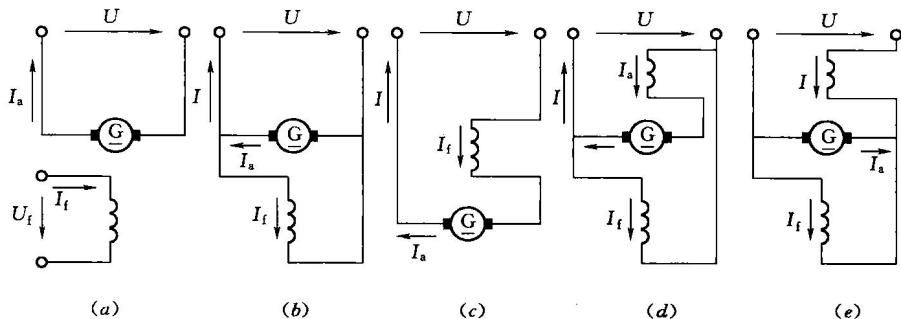


图 1.8 直流电机的励磁方式

(a) 他励；(b) 并励；(c) 串励；(d) 长复励；(e) 短复励

励磁绕组所消耗的功率虽然仅占直流电机额定功率的 $1\% \sim 3\%$ ，但是直流电机的性能随着励磁方式的不同将产生很大差别。一般自动控制系统所用的直流电动机主要是他励直流电动机。这主要是因为当改变他励直流电动机的电枢电压进行调速控制时，不影响其磁场，使其具有良好的控制特性。

1.2.2 直流电机的铭牌

为了保证电机安全而有效地运行，电机制造厂都对它所生产电机的工作条件加以规定。电机按制造厂规定条件工作的情况，叫额定工作情况。表征电机额定工作情况的各种数据叫做额定值。这些数据都列在电机的铭牌上，是使用和选择电机的依据，因此使用前一定要详细了解。某直流电机的铭牌数据见表 1.1。



表 1.1

直流电动机的铭牌

直 流 电 动 机			
型 号	Z3—95	产品编号	7009
结构类型		励磁方式	他励
功率	30kW	励磁电压	220V
电压	220V	工作方式	连续
电流	160.5A	绝缘等级	定子 B 转子 B
转速	750r/min	重量	685kg
标准编号	JB1104—68	出厂日期	年 月 日

(1) 型号。型号可表明每一种产品的性能、用途和结构特点。国产直流电机型号采用汉语拼音大写字母和阿拉伯数字的组合来表示。其中汉语拼音大写字母表示电机的结构特点和用途等，阿拉伯数字则表示电机的尺寸及规格。如型号 Z3—95 的含义为：Z 表示直流电动机，3 表示第三次改型设计；第一个数字 9 表示机座号，第二个数字 5 表示铁芯长度。

(2) 额定功率 P_N 。指电机在额定运行状态时的输出功率，对发电机是指出线端输出的电功率，等于额定电压与额定电流的乘积，即 $P_N = U_N I_N$ ；对电动机是指其轴上输出的机械功率，等于额定电压与额定电流之积再乘以机械效率，即 $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。额定功率单位为 W 或 kW。其中， η_N 为额定效率。

(3) 额定电压 U_N 。指额定运行状况下，直流发电机的输出电压或直流电动机的输入电压，单位为 V。

(4) 额定电流 I_N 。指额定负载时允许电机长期输入（电动机）或输出（发电机）的电流，单位为 A。

(5) 额定转速 n_N 。指电机在额定电压和额定负载时的旋转速度，单位为 r/min。

【例 1.1】 一台直流发电机的额定数据如下： $P_N = 200\text{kW}$ ， $U_N = 230\text{V}$ ， $n_N = 1450\text{r/min}$ ， $\eta_N = 90\%$ ，求该发电机的额定电流和输入功率各为多少？

解

$$P_N = U_N I_N$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{200 \times 10^3}{230} = 869.6 \text{ (A)}$$

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{200}{0.9} = 222.2 \text{ (kW)}$$

【例 1.2】 一台直流电动机额定数据如下： $P_N = 160\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 1500\text{r/min}$ ， $\eta_N = 90\%$ ，求额定电流和输入功率各为多少？

解

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{160 \times 10^3}{0.9 \times 220} = 808 \text{ (A)}$$

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{160}{0.9} = 177.8 \text{ (kW)}$$



1.3 直流电动机的基本平衡方程和机械特性

1.3.1 直流电动机的基本平衡方程式

直流电动机的励磁方式不同，平衡方程式也有所差别。他励直流电动机的平衡方程式如下。

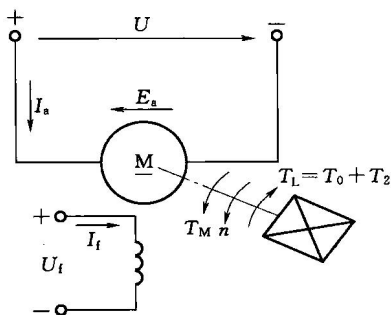


图 1.9 他励直流电动机的运行原理图

1. 电动势、转矩平衡方程式

在写直流电动机稳态运行时的基本平衡方程式之前，按电动机的运行惯例规定好正方向，如图 1.9 所示为他励直流电动机的运行原理图。图 1.9 中 U 为直流电动机的电枢电压， I_a 是电枢电流， E_a 为电枢绕组的感应电动势， T_M 为电磁转矩， T_0 为电动机的空载转矩， T_2 为电动机转轴上的输出转矩， T_L 为负载转矩， n 是电动机电枢的转速。

根据图 1.9，可写出直流电动机稳态运行时的电动势平衡方程式和转矩平衡方程式

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-6)$$

$$T_M = T_L = T_2 + T_0 \quad (1-7)$$

2. 功率平衡方程式

根据以上转矩平衡方程式和电动势平衡方程式，可以得到功率平衡方程式。将式 (1-6) 乘以电枢电流 I_a 得

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

则

$$P_1 = P_M + p_{\text{cua}} \quad (1-8)$$

式中： $P_1 = UI_a$ 为从电网输入的电功率； $P_M = E_a I_a$ 为电磁功率； $p_{\text{cua}} = I_a^2 R_a$ 为电枢回路的总铜耗。

将转矩平衡方程式 (1-7) 两边同乘以角速度 Ω ，得

$$T_M \Omega = T_2 \Omega + T_0 \Omega$$

则

$$P_M = P_2 + p_0 \quad (1-9)$$

式中： $P_M = T_M \Omega$ 为电磁功率； $P_2 = T_2 \Omega$ 为输出的机械功率； $p_0 = T_0 \Omega = p_m + p_{\text{Fe}}$ 为空载损耗功率（包括机械摩擦和铁损耗）。

若考虑少量的附加损耗 p_{ad} ，可得功率平衡方程式为

$$P_1 = P_2 + p_{\text{cua}} + p_m + p_{\text{Fe}} + p_{\text{ad}} = P_2 + \sum p \quad (1-10)$$

式中：总损耗 $\sum p = p_{\text{cua}} + p_m + p_{\text{Fe}} + p_{\text{ad}}$ 。

直流电动机的效率为输出功率 P_2 和输入功率 P_1 之比，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p} \quad (1-11)$$

他励直流电动机机的功率流程如图 1.10 所示。

1.3.2 直流电动机的机械特性

电动机的机械特性主要是描述电动机的转速 n 与其电磁转矩 T_M 之间的关系，通常用

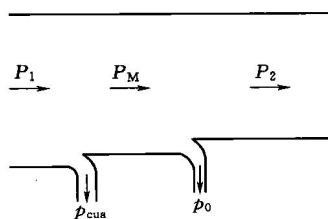


图 1.10 他励直流电动机的功率流程图



$n=f(T_M)$ 曲线表示。机械特性是描述电动机运行性能的主要特性,是分析直流电动机启动、调速和制动原理的一个重要依据。直流电动机的励磁方式不同,其机械特性有很大差别,在直流拖动中,他励直流电动机应用比较广泛,因此我们着重对他励直流电动机的机械特性进行比较全面的分析。

1. 他励电动机的机械特性

他励直流电动机的原理图如图 1.11 所示。运用前面推出的几个基本平衡方程式和有关公式,即可导出机械特性方程式。

将式 $E_a = C_e \Phi n$ 代入 $U = E_a + I_a R_a$, 得出转速特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a \quad (1-12)$$

由式 $T_M = C_T \Phi I_a$ 得

$$I_a = \frac{T_M}{C_T \Phi} \quad (1-13)$$

将式 (1-13) 代入式 (1-12) 得机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_M \quad (1-14)$$

假定电源电压 U 、磁通 Φ 、电枢回路电阻 R 都为常数,则式 (1-14) 可写为

$$n = n_0 - \beta T_M \quad (1-15)$$

其中

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}, \beta = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2}$$

式中: n_0 为电动机的理想空载转速,因为它是在理想空载 ($T_M = 0$) 时的电动机的转速; β 为机械特性的斜率。

当改变电枢回路的附加电阻或磁通时,就改变了特性曲线的斜率。

2. 他励直流电动机的固有机械特性

在 $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$ 和电枢回路串接电阻 $R_{ad} = 0$ 的条件下,电动机的机械特性称为固有机械特性。根据固有特性的定义,可得固有特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_M = n_0 - \beta T_M \quad (1-16)$$

其中

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N}, \beta = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2}$$

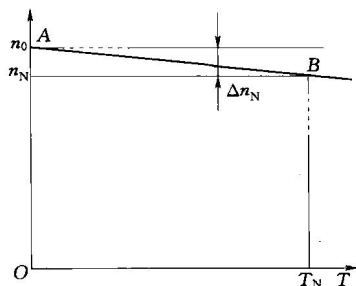


图 1.12 他励直流电动机的固有机械特性

若不计电枢反应的去磁作用,可以认为 Φ 是一个与 $T_M(I_a)$ 无关的常数,他励直流电动机固有机械特性的 β 值很小,其固有机械特性曲线是一条略微向下倾斜的直线,如图 1.12 所示。

3. 他励直流电动机的人为机械特性

在固有机械特性方程式中,当电压 U 、磁通 Φ 、电枢回路电阻 R 中任意一个参数改变后而获得的特性,称为直流电动机的人为机械特性。以下分别加以讨论。

(1) 电枢回路串接电阻 R_{ad} 时的人为机械特性。在 $U =$

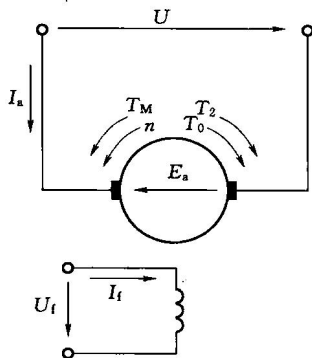


图 1.11 他励直流电动机的原理图