

应用型本科机电类专业“十三五”规划精品教材

机电传动与控制技术

JIDIAN CHUANDONG YU KONGZHI JISHU

主编　吴何畏







華中科技大學出版社
http://www.hustp.com



应用型本科机电类专业"十三五"规划精品教材

机电传动与控制技术

JIDIAN CHUANDONG YU KONGZHI JISHU

主　编　吴何畏
副主编　秦　拓







华中科技大学出版社
http://www.hustp.com
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

机电传动与控制技术/吴何畏主编. —武汉：华中科技大学出版社，2018.8
ISBN 978-7-5680-4145-4

Ⅰ.①机… Ⅱ.①吴… Ⅲ.①电力传动控制设备 Ⅳ.①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 175592 号

机电传动与控制技术　　吴何畏　主编

Jidian Chuandong yu Kongzhi Jishu

策划编辑：袁　冲
责任编辑：刘　静
责任监印：朱　玢
出版发行：华中科技大学出版社(中国·武汉)　　电话：(027)81321913
　　武汉市东湖新技术开发区华工科技园　　邮编：430223
录　　排：华中科技大学惠友文印中心
印　　刷：武汉科源印刷设计有限公司
开　　本：787mm×1092mm　1/16
印　　张：22.75
字　　数：566 千字
版　　次：2018 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
定　　价：49.00 元

本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线：400-6679-118　竭诚为您服务
版权所有　侵权必究

前言

本书是基于精品资源共享课的教学改革成果而编写的，突出了“机电结合，电为机用”的特点，将机械生产中，尤其是制造业中对电气控制的需求整合在一本书中，从电机、电器和电气三个方面讲解，在内容安排上既注重基础理论、基本概念的系统性阐述，也注重理论联系实际，尤其是各种知识在生产实际中的应用，同时尽可能地反映本领域近年来发展的最新技术。通过二维码链接实例视频教学资源库，帮助读者快速掌握机电系统的电气控制方法。本书课程体系新颖，内容全面、实用，每章后附有习题与思考题，便于自学。

全书主要包括五个方面的内容：电动机的结构与工作原理、机械特性、调速系统、驱动装置；典型生产机械的继电器-接触器控制系统；可编程控制器，三菱 PLC 的结构、工作原理；编程指令，高级编程技巧，典型行业例程和应用程序；分布式与集中式控制系统，人机界面的开发等。

本书可作为高等学校机械设计及其自动化专业、机械电子工程专业的本科生教材，也可作为近机械类专业本科生和研究生教材，还可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考，作为进行生产线设计或设备改造的实施指南。

在本书编写过程中，课题组及兄弟院校的老师们在教学实践的基础上提出了很多宝贵的意见和建议，同时还得到了华中科技大学出版社的大力支持，谭宇良和栗世尧两位同学也提供了不少帮助，在此一并表示感谢。

本书还提供了以二维码形式呈现的相关资源，读者可通过扫描二维码获取。如遇到问题，可通过邮箱 142602@qq.com 与作者沟通解决。

限于编者的水平，书中难免有错误和不妥之处，敬请各位读者批评指正。

吴何畏 于丁酉除夕

目录

第 1 章　驱动电机 …… (1)

1.1　直流电机 …… (2)

1.1.1　直流电动机的基本原理 …… (3)

1.1.2　直流电动机的结构 …… (4)

1.1.3　直流电动机的分类 …… (6)

1.1.4　直流电动机的机械特性 …… (7)

1.1.5　直流电动机的启动 …… (9)

1.1.6　直流电动机的调速 …… (11)

1.1.7　直流电动机的制动 …… (14)

1.2　交流电机 …… (16)

1.2.1　三相交流电路 …… (16)

1.2.2　三相异步电动机的结构 …… (17)

1.2.3　三相交流异步电动机的工作原理和额定参数 …… (19)

1.2.4　三相交流异步电动机的调速 …… (23)

1.2.5　三相交流异步电动机的启动 …… (28)

1.2.6　三相交流异步电动机的制动 …… (32)

1.2.7　三相交流同步电动机 …… (34)

1.2.8　单相交流异步电动机 …… (37)

1.3　步进电动机 …… (40)

1.3.1　反应式步进电动机的结构 …… (41)

1.3.2　反应式步进电动机的工作原理 …… (41)

1.3.3　小步距角步进电动机 …… (44)

1.3.4　混合式步进电动机 …… (45)

1.3.5　步进电动机的性能指标 …… (45)

1.4 伺服电动机 …… (48)
1.4.1 直流伺服电动机 …… (49)
1.4.2 交流伺服电动机 …… (51)
1.4.3 伺服电动机的选型方法 …… (53)
1.5 电动机的典型应用 …… (56)
1.5.1 指针式石英钟表 …… (56)
1.5.2 家用汽车 …… (58)
1.5.3 混动式汽车 …… (59)
1.5.4 电力机车 …… (61)
习题与思考题 …… (64)
第 2 章 电动机的控制技术 …… (66)
2.1 电动机控制的概念 …… (66)
2.1.1 闭环(反馈)控制 …… (67)
2.1.2 开环(前馈)控制 …… (68)
2.1.3 电动机的滞后响应 …… (68)
2.2 转速控制 …… (69)
2.2.1 转速控制原理 …… (69)
2.2.2 直流电动机的转速控制 …… (73)
2.2.3 同步电动机的转速控制 …… (78)
2.2.4 感应电动机的精密控制 …… (79)
2.3 位置控制 …… (82)
2.3.1 步进电动机的开环控制 …… (83)
2.3.2 步进电动机的闭环控制 …… (85)
2.3.3 步进电动机的 DSP 控制 …… (85)
2.3.4 步进电动机的计算机控制 …… (87)
2.4 伺服系统 …… (89)
2.4.1 伺服系统的基本要求、结构和作用 …… (89)
2.4.2 直流伺服电动机的控制 …… (93)
2.4.3 交流伺服电动机的控制 …… (94)
习题与思考题 …… (96)
第 3 章 继电器-接触器控制 …… (97)
3.1 常用的低压电器 …… (97)

3.1.1　电磁式电器 …… (98)
3.1.2　开关和主令电器 …… (101)
3.1.3　接触器 …… (110)
3.1.4　继电器 …… (113)
3.1.5　保护电器 …… (118)
3.2　继电器-接触器基本控制线路 …… (121)
3.2.1　电气控制线路基础 …… (122)
3.2.2　点动控制线路 …… (125)
3.2.3　单向连续运行控制线路 …… (126)
3.2.4　正反转控制线路 …… (130)
3.3　继电器-接触器的连锁控制 …… (133)
3.3.1　顺序启动控制线路 …… (134)
3.3.2　多地点控制线路 …… (136)
3.3.3　反接制动控制线路 …… (136)
3.3.4　电磁抱闸制动控制线路 …… (138)
3.4　继电器-接触器的行程控制 …… (139)
3.4.1　极限位置的行程保护 …… (139)
3.4.2　自动往复行程控制 …… (140)
3.4.3　行程控制设计实例 …… (143)
3.5　继电器-接触器的时间控制 …… (145)
3.5.1　顺序启动时间控制 …… (145)
3.5.2　Y/△降压启动控制 …… (146)
3.5.3　定子串电阻降压启动控制 …… (147)
3.5.4　能耗制动控制 …… (149)
3.5.5　时间控制设计实例 …… (151)
3.6　机电液综合控制 …… (152)
3.6.1　液压传动基础 …… (153)
3.6.2　机械动力滑台控制 …… (153)
3.6.3　液压动力滑台控制 …… (155)
习题与思考题 …… (157)
第 4 章　可编程控制器 …… (162)
4.1　PLC 概述 …… (162)

4.1.1 PLC 的产生与发展 …… (162)
4.1.2 PLC 与其他控制器对比 …… (164)
4.1.3 PLC 的特点与应用领域 …… (166)
4.2 PLC 的结构及工作原理 …… (167)
4.2.1 PLC 的结构 …… (167)
4.2.2 PLC 的工作原理 …… (173)
4.2.3 PLC 的编程语言 …… (176)
4.2.4 PLC 的技术指标 …… (178)
4.3 三菱 FX 系列 PLC …… (179)
4.3.1 FX PLC 概述 …… (179)
4.3.2 FX 的编程元件 …… (182)
4.3.3 FX 的基本指令 …… (189)
4.3.4 FX 的编程规则 …… (202)
4.4 梯形图程序设计 …… (204)
4.4.1 梯形图程序的转换设计法 …… (204)
4.4.2 梯形图程序的经验设计法 …… (209)
4.4.3 PLC 系统开发的一般步骤 …… (218)
4.4.4 梯形图实例 …… (220)
4.5 顺序功能图(SFC)程序设计 …… (224)
4.5.1 SFC 基础 …… (224)
4.5.2 STL 基础 …… (225)
4.5.3 单流程结构编程 …… (227)
4.5.4 选择型分支编程 …… (230)
4.5.5 并行型分支编程 …… (234)
4.5.6 跳转的编程 …… (236)
4.5.7 SFC 程序实例 …… (237)
4.6 应用指令程序设计 …… (240)
4.6.1 应用指令基础 …… (241)
4.6.2 比较指令 …… (243)
4.6.3 传送指令 …… (244)
4.6.4 跳转指令 …… (247)
4.6.5 区间复位指令 …… (248)

4.6.6　算术运算指令 …… (248)
4.6.7　移位指令 …… (250)
4.6.8　循环指令 …… (253)
4.6.9　应用指令程序实例 …… (255)
4.7　三种编程方式的对比 …… (258)
4.8　SWOD5C-FXTRN-BEG-C 软件 …… (260)
4.8.1　软件界面 …… (260)
4.8.2　编程方式与符号栏 …… (262)
4.8.3　梯形图编辑 …… (263)
4.8.4　文件操作 …… (264)
4.9　GX Works2 软件 …… (264)
习题与思考题 …… (271)
第 5 章　机电系统的计算机控制 …… (276)
5.1　机电系统的计算机控制 …… (276)
5.1.1　计算机控制技术 …… (276)
5.1.2　机电系统的控制器 …… (279)
5.1.3　数字控制器的设计 …… (282)
5.2　工控机 …… (284)
5.2.1　IPC 概述 …… (284)
5.2.2　IPC 的总线结构 …… (287)
5.2.3　IPC 的接口技术 …… (289)
5.2.4　IPC 的主要类型 …… (291)
5.3　PC-based 系统 …… (292)
5.3.1　输入/输出信号 …… (292)
5.3.2　数据采集与传输 …… (295)
5.3.3　PC-based 集中式控制系统 …… (297)
5.3.4　PC-based 分布式控制系统 …… (300)
5.3.5　PC-based 运动控制技术 …… (300)
5.4　组态软件 …… (305)
5.4.1　组态软件概述 …… (306)
5.4.2　KingView 程序设计 …… (308)
5.4.3　LabVIEW 软件 …… (322)

5.5 机电系统的计算机控制实例 …… (327)
习题与思考题 …… (331)
第 6 章 典型生产机械的电气控制 …… (332)
6.1 C650-2 型普通车床电气控制 …… (332)
6.2 Z3050 型摇臂钻床电气控制 …… (336)
6.3 M7130 型平面磨床电气控制 …… (341)
6.4 X62W 型万能铣床电气控制 …… (345)
习题与思考题 …… (350)
附录 A 常用电器图形符号和文字符号 …… (351)
参考文献 …… (354)



数字资源

第1章 驱动电机

机电控制主要是指对驱动电机的控制，电机的控制系统调节电机的运行状态，使其满足不同的运行要求。不同类型的电机，其控制系统的工作原理和控制方式有很大差别。早期的机电控制大多采用继电器-接触器控制方法，随着计算机技术和电力电子技术的发展，现代控制技术的应用日益广泛。要学好机电控制技术，必须首先了解和掌握驱动电机及其拖动的基本知识。

电机包括发电机和电动机。绝大多数电动机是应用电磁感应原理运行的旋转电磁机械，用于实现电能与机械能的转换。电动机运行时从电系统吸收电功率，向机械系统输出机械功率。还有一部分电动机是通过其他媒介的作用完成能量转换的。例如超声波电动机，它借助压电体加压时产生的机械形变完成电能和机械能之间的转换。根据设计原理与分类方式的不同，电机的具体构造和成本构成也有所差异。电机的分类如图 1.1 所示。

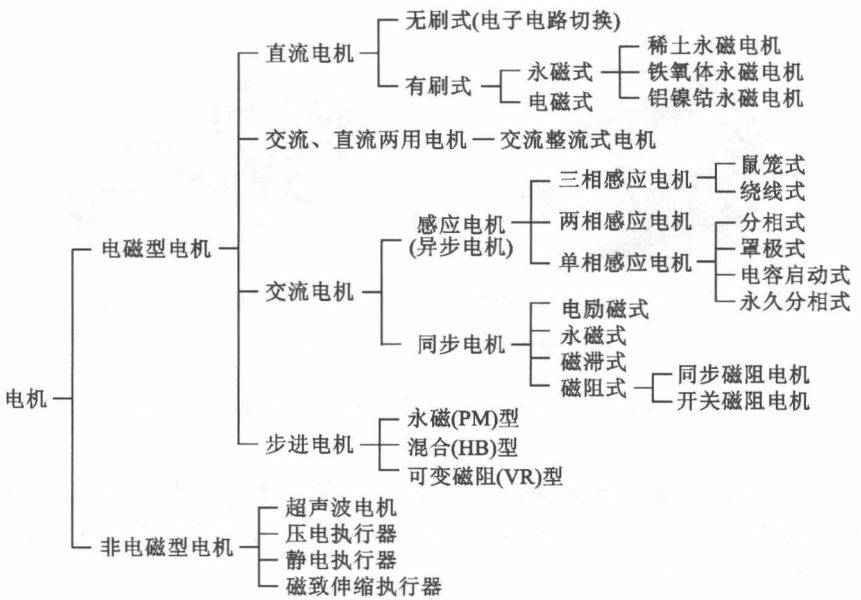


图 1.1 电机的分类

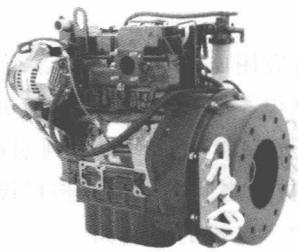
随着半导体技术的发展，电动机的应用发生了很大的变化。使用开关技术和变频技术，可以使电源小型化，同时还可以任意调节功率因数。随着晶体管、集成电路(IC)和大规模

集成电路(LSI)的不断开发和由计算机控制的数字模拟转换电路的不断完善,智能化控制系统逐渐取代由继电器等机械触点组成的电动机控制线路,如今的电动机已不仅仅局限于单纯的旋转,通过连接计算机控制系统,可完成高精度动作的电动机已随处可见。

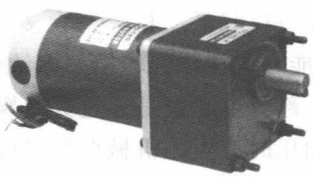
办公室中的大部分办公设备是可动的,计算机对硬盘和光驱等存储单元进行读/写操作、计算机内部 CPU 的散热风扇、打印机和扫描仪的送纸机构,都需要电动机。在工厂里,产品的加工、组装和运送需要大量的电动机来提供动力,如钻孔用的钻床、冲压机床、用于复杂零件成形的加工中心、用于焊接和组装的机器人、自动存取货物的自动化仓库、运送货物的传送带及吊车等。另外,液压与气压传动系统也需要电动机来提供动力。

1.1 直流电机

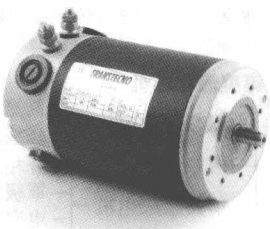
直流电机是电机的主要类型之一。直流电机可作为发电机使用,也可作为电动机使用。常用的直流电机如图 1.2 所示。



(a)作电源用的直流发电机



(b)作动力用的直流电动机



(c)用于信号传递的直流测速发电机



(d)用于控制的直流伺服电机

图 1.2 常用的直流电机

直流发电机将机械能转换成电能,用作直流电源。其优点是,电势波形较好,受电磁干扰的影响小。

直流电动机将电能转换成机械能,具有调速范围宽广、调速特性平滑、过载能力较强及启动转矩和制动转矩较大等优点。但传统的直流电动机由于具有换向装置,因此存在结构较复杂、维护和保养成本高的缺点。

随着电力电子技术的发展,交流电动机的调速技术已经日趋完善,许多领域中的直流电动机正在逐步被变频调速的交流电动机取代。但在速度调节精度要求高、启停频繁和换向及多电动机协同运转的生产设备上,仍广泛采用直流电动机拖动。

1.1.1　直流电动机的基本原理

这里以有刷式直流电动机为例来阐述直流电动机的工作原理。电动机的旋转是永久磁铁的磁场与通电线圈的磁场相互作用的结果。

把线圈套在一个可自由转动的轴上就形成了通常所说的转子，也称为电枢。具有放置转子的空间，并有 S 极和 N 极磁性的两个永久磁铁的装置称为定子。定子产生磁场的过程称为励磁。磁场可以靠外部电流通过励磁线圈产生，也可以由永久磁体产生。

工作时，首先在励磁绕组上通入直流励磁电流，产生恒定磁场，再通过电刷和换向器向电枢绕组通入直流电流，电枢绕组有效边流过电流后，在磁场中产生电磁力（电磁转矩），从而驱动电动机转动。图 1.3 所示为直流电动机工作原理模型图。

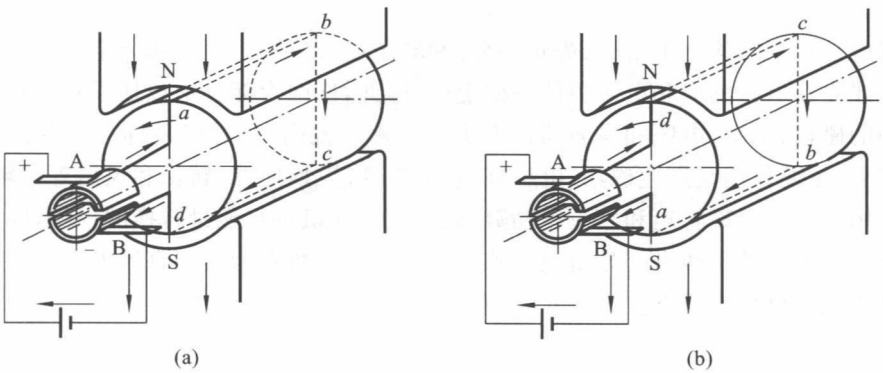


图 1.3　直流电动机工作原理模型图

在图 1.3 中，N 极、S 极为定子中的一对主磁极，*abcd* 是安放在电枢铁芯上的一个线圈，线圈的首端 *a* 和末端 *d* 分别连接到相互绝缘并可随线圈一同旋转的两个换向片上。直流电动机的外加电压通过电刷 A、B 及换向器中的换向片加到线圈上，从而在线圈的有效边上产生电磁力，形成电磁转矩。当线圈转过 180°、处在图 1.3(b)所示的位置时，线圈的有效边 *ab* 转到 S 极下，有效边 *cd* 转到 N 极下，但在电刷和换向片的共同作用下，线圈中的电流方向改变，电磁转矩方向仍为逆时针，使电动机一直保持按逆时针方向旋转。通过换向器，电刷 A 始终和 N 极下的导线相连，电刷 B 始终和 S 极下的导线相连，使得在 N 极与 S 极下的导线电流方向始终保持不变，所以电动机的电磁转矩和旋转方向始终保持不变。

综上可知，推动电动机持续转动的原理就是，转子通过换向器每 180°断一次电，之后再通入反向电流。

换向器与电刷根据转子转动位置的不同而自动切换连接位置，从而改变转子电流方向，这是一个很巧妙的组合。有了它，电动机接通电源就能旋转。但是在实际应用中，这种有刷结构存在着以下缺点。

(1) 磨损问题。换向器多使用硬质铜合金材料，电刷则使用石墨或金属石墨材料，两者在电动机运转过程中在弹簧机构的作用下始终保持滑动接触，这也意味着接触面之间的磨损总是会随着转子的旋转而产生，所以必须定期更换磨损到极限位置的电刷。

(2) 噪声问题。换向器与电刷间的接触面在工作时易产生噪声。

(3) 旋转中换向器换向的瞬间会产生电火花与电气干扰。这种电气干扰会使电动机周围的计算机设备及其他电气设备产生误动作。电火花容易烧坏换向器。

(4) 电动机的转速不能过高。电刷与换向器是通过弹簧片和弹簧压接在一起的。电刷转动得太快,就有可能打乱换向器切换顺序,引起转子电流切换错误。另外,换向器也可能因为离心力过大而产生脱离转动轴的危险。

换向器和电刷结构用比较简单的方式为电动机提供自动换向的电流,但受到机械结构的影响,其应用有一定限制。还有一种依赖电子线路进行电流切换而不需要换向器和电刷的无刷电动机。另外,利用交流电源提供动力的交流电动机,它的工作原理与直流电动机稍有不同,也不需要换向器和电刷。

1.1.2 直流电动机的结构

直流电动机在结构上由定子(静止部分)和转子(转动部分)两大部分组成。其基本的工作原理是建立在电磁感应和电磁力的基础上的,因此,这两大部分中包括了基于直流电动机工作原理的磁极、电枢、电刷和换向器四大主要部件。机座、主磁极、换向极、端盖和电刷等在定子部分,主要作用是产生磁场;电枢绕组、电枢铁芯、换向器、转轴和风扇等在转子部分,其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势,是直流电动机进行能量转换的枢纽,所以通常又称为电枢。定子和转子两大部分由空气隙分开。图 1.4 所示为典型直流电动机的基本构成图。对直流电动机各主要部件分别介绍如下。

一、定子

1. 主磁极

主磁极由铁芯和套装在铁芯上的励磁绕组两个部分组成,作用是建立主磁场。绝大多数直流电动机不是用永久磁铁而是由励磁绕组通以直流电流来建立磁场的。主磁极铁芯靠近转子一端的扩大部分称为极靴。极靴的作用是,使气隙磁阻减小,改善主磁极磁场分布,并使励磁绕组容易固定。为了减小转子转动时由于齿槽移动引起的铁耗,主磁极铁芯采用厚度为0.5~1.5 mm 的低碳钢板冲片叠压铆紧而成。整个主磁极用螺杆固定在机座上。主磁极的个数一定是偶数,励磁绕组的连接必须使相邻主磁极的极性按 N 极、S 极交替出现。

2. 机座

机座就是电动机的壳体部分,它一方面是电动机的结构框架,另一方面也作为主磁极的一部分。机座中作为磁通通路的部分称为磁轭。机座一般用厚钢板弯成筒形以后焊成,或者用铸钢件(小型机座用铸铁件)制成,两端装有端盖,以保证有足够的机械强度。

3. 电刷装置

电刷装置包括电刷和电刷座。电刷放在刷握内,用弹簧压紧,使它与换向器能够始终保持良好的滑动接触。电刷一方面使转子绕组与电动机外部电路接通;另一方面与换向器配合,完成直流电动机外部直流电与内部交流电的互换。

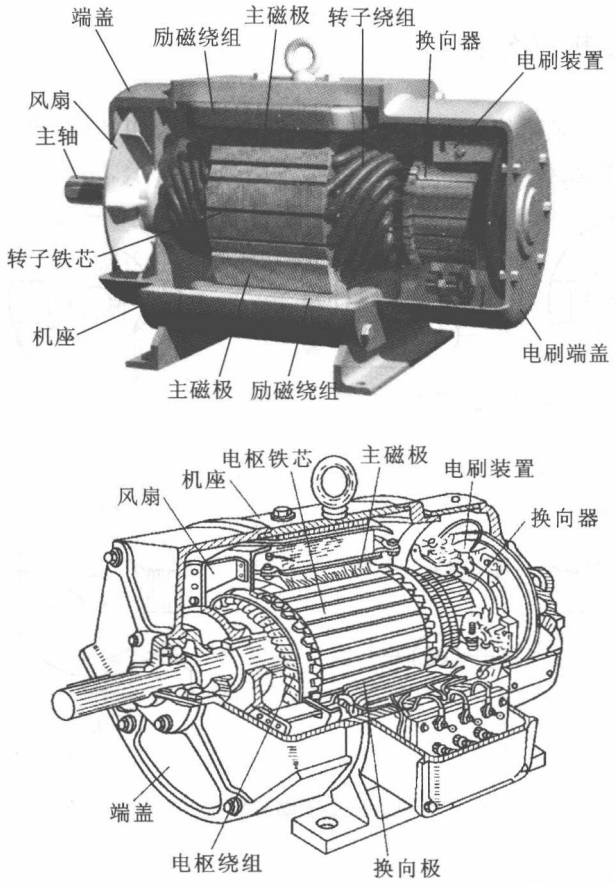


图 1.4　典型直流电动机的基本构成图

二、转子(电枢)

1. 转子铁芯

为了减小电动机磁通变化产生的涡流损耗,转子铁芯通常采用硅钢片冲压叠成。转子铁芯的作用有两个:一是作为磁路的组成部分;二是将转子绕组嵌放在铁芯槽内。

2. 转子绕组

转子绕组是直流电动机的电路部分,也是感生电动势、产生电磁转矩、进行机-电能量转换的部分。转子绕组由线圈按一定的规律连接组成,线圈用高强度漆包线或玻璃丝包扁铜导线绕成,分上、下两层嵌放在电枢铁芯槽内,截面呈圆形或矩形,上、下层以及线圈与铁芯之间都要妥善地绝缘,并用槽楔压紧。

3. 换向器

换向器中有多个换向片,片与片之间用云母板隔离绝缘。换向器与电刷配合,在直流电动机中能将转子绕组中的交流电动势或交流电流变成电刷两端的直流电动势或直流电流,是直流电动机的关键部件。

1.1.3 直流电动机的分类

直流电动机按定子励磁绕组的励磁方式的不同可分为四类，即他励直流电动机、并励直流电动机、串励直流电动机和复励直流电动机，如图 1.5 所示。

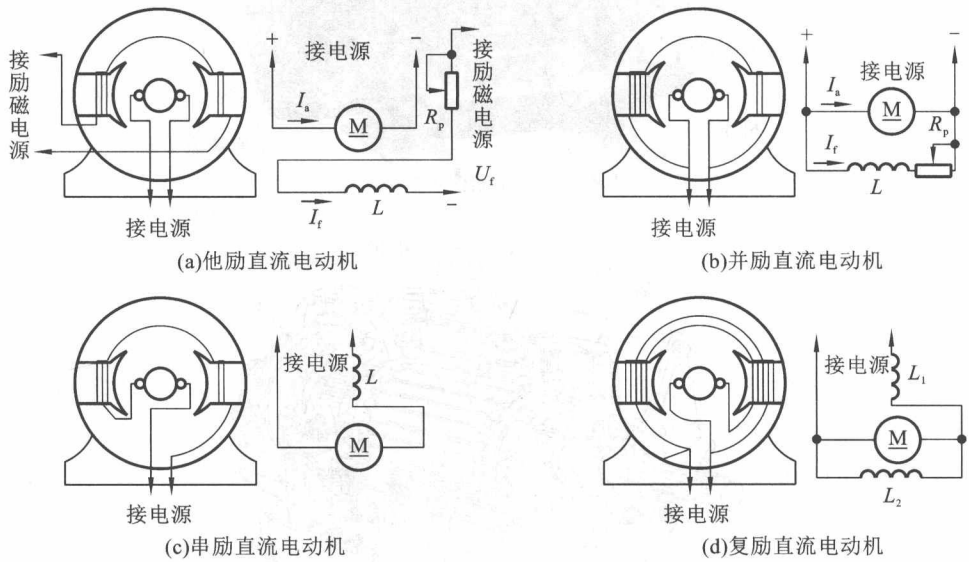


图 1.5 直流电动机按定子励磁绕组的励磁方式分类

一、他励直流电动机

励磁绕组由外加电源单独供电，励磁电流的大小与电枢两端电压或电枢电流的大小无关。定子线圈和转子线圈分别由不同的电源供电。在电气线路上，电源与定子构成一个回路，电源与转子构成另外一个回路，这样就可以采用两个彼此独立的电源，避免两个通电线圈之间的相互影响。

二、并励直流电动机

励磁绕组与电枢绕组并联，由外部电源一起供电，励磁电流的大小与电枢两端电压或电枢电流的大小有关。定子磁场以电磁铁代替永久磁铁，由这种定子组成的电动机称为绕线式有刷直流电动机；又因为定子线圈与转子线圈是并联的，所以又称其为并励直流电动机。

三、串励直流电动机

励磁绕组与电枢绕组串联，由外部电源一起供电，励磁电流的大小与电枢两端电压或电枢电流的大小有关。它的特点是，定子与转子内为同一电流。串励直流电动机的电流增加时，定子和转子磁场同时增强。也就是说，转矩与电流的平方成正比。与磁场恒定的电动机相比，串励直流电动机转矩增加的幅度可以很大，适合做大转矩输出的电动机。另外，它还

有空载转速高的特性。与并励直流电动机一样，串励直流电动机无法通过改变电源的正负接线来改变转向。

四、复励直流电动机

把励磁绕组分为两个部分，一部分与电枢绕组并联，另一部分与电枢绕组并联，这样就构成了复励直流电动机，其励磁电流的大小与电枢两端电压或电枢电流的大小有关。因为这种电动机的结构可以分解成并励和串励结构，所以它的特性也恰巧在两者之间。

1.1.4　直流电动机的机械特性

1. 感应电动势

根据电磁学原理，电刷 A、B 间的感应电动势为

$$E_a = K_E \Phi n \tag{1.1}$$

式中：E_a 为感应电动势(V)；Φ 为磁通量(Wb)；n 为电枢转速(r/min)；K_E 为电动势常数，与电机结构有关。

在直流发电机中，感应电动势的方向总是与电流的方向相同，所以直流发电机中的感应电动势常称为电源电动势。在直流电动机中，电动势的方向总是与电流的方向相反，所以直流电动机中的感应电动势常称为反电动势。

2. 电磁转矩

直流电机电枢绕组中的电流和磁通相互作用，产生电磁力和电磁转矩。电磁转矩的大小可用下式进行计算

$$T = K_T \Phi I_a \tag{1.2}$$

式中：T 为电磁转矩(N·m)；I_a 为电枢电流(A)；K_T 为电磁常数，与电机结构有关，$K_T \approx 9.55 K_E$。

直流发电机电磁转矩的作用和直流电动机是不同的。直流发电机的电磁转矩是阻转矩，它与电枢转动的方向或原动机驱动转矩的方向相反。因此，在等速转动时，原动机的转矩 T_1 必须与发电机的电磁转矩 T 和空载转矩 T_0 相平衡。当直流发电机的负载即电枢电流增加时，电磁转矩和所供给的机械功率必须相应增加，以保持转矩之间和功率之间的平衡，以及转速基本上不变。

直流电动机的电磁转矩是驱动转矩，它使电枢转动。因此，直流电动机的电磁转矩 T 必须与负载转矩 T_L 和空载转矩 T_0 相平衡。当轴上的机械负载发生变化时，直流电动机的转速、电动势、电流和电磁转矩将自动进行调整，以适应负载的变化，保持新的平衡。

从以上分析可知，直流电机做发电机运行和做电动机运行时，虽然都产生感应电动势 E_a 和电磁转矩 T，但二者的作用正好相反。

3. 电压平衡方程式

电枢回路中的电压平衡方程式为

$$U = I_a R_a + E_a \tag{1.3}$$

式中：U 为电枢供电电压(V)；R_a 为电枢回路总电阻(Ω)。