

国家骨干高职院校项目规划教材

# 电机驱动与调速

DIANJI QUDONG YU TIAOSU

肖雪耀 主 编  
刘新逢 刘桂兰 副主编



化学工业出版社

# 电机驱动与调速

肖雪耀 主编

刘新逢 刘桂兰 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

电机控制及变频调速电路的合理设计、正常运行与维护、检修是电机可靠、连续运行的有力保证。本书结合电机控制技术的发展和应用,系统地介绍了电机控制常用的低压电器、直流电机控制电路、三相异步电机控制电路、电机调速相关的知识与计算,结合电机实际应用实例介绍了机床电机控制电路及故障检修、常见直流电机调速系统、常见交流调速系统。在电机控制电路的讲解上,采用图文结合的形式,电路实用,内容新颖。

本书可供电气自动化、机电一体化、数控专业师生使用,还可供从事电气设计、制造、试验及运行的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机驱动与调速/肖雪耀主编. —北京:化学工业出版社, 2015.7

ISBN 978-7-122-24509-0

I. ①电… II. ①肖… III. ①电机-控制系统  
②电机-调速 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 149845 号

---

责任编辑:刘丽宏  
责任校对:宋 玮

文字编辑:余纪军  
装帧设计:刘丽华

---

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:三河市延风印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张13 $\frac{3}{4}$  字数368千字 2015年7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: 58.00 元

版权所有 违者必究

# 国家骨干高职院校项目规划教材

## 编审委员会

顾 问 李文莲

主 任 雷立成

副主任 龙 伟 郭广军

委 员

娄底职业技术学院：游新娥 刘跃华 陈育新 胡治民

刘梅秋 夏高彦 刘罗仁 贺子龙

谭康银 熊叔湘 李宇才 刘 媛

罗正斌 王税睿 谢完成 李清奇

禹华芳 刘小明

湖南煤矿机械有限公司：王细文（高级工程师）

娄底市煤炭科学设计研究院：姚鸿飞（高级工程师）

湖南省畜牧兽医研究所：彭英林（研究员）

湖南科瑞特科技股份有限公司：张玉希（高级工程师）

娄底工程建设有限公司：石远松（高级工程师）

## 序

国家示范（骨干）高等职业院校建设是教育部、财政部为创新高等职业院校校企合作办学体制机制，提高人才培养质量，深化教育教学改革，优化专业体系结构，加强师资队伍建设，完善质量保障体系，增强高等职业院校服务区域经济社会发展能力而启动的国家示范性高等职业院校建设计划项目。2010年11月23日，教育部、财政部印发《关于确定“国家示范性高等职业院校建设计划”骨干高职院校立项建设单位的通知》（教高函〔2010〕27号），娄底职业技术学院被确定为“国家示范性高等职业院校建设计划”骨干高职院校立项建设单位，2012年12月，娄底职业技术学院“国家示范性高等职业院校建设计划”骨干高职院校项目《建设方案》和《建设任务书》经教育部、财政部同意批复，正式启动项目建设工作。

按照项目《建设方案》和《建设任务》的建设目标任务要求，为创新“产教融合、校企合作、工学结合”的高素质应用型技术技能人才培养模式，推进校企合作的高等职业教育精品课程建设、精品教材开发、精品专业教学资源库建设等内涵式特色项目发展，启动了重点支持建设的机电一体化技术、煤矿开采技术、畜牧兽医、建筑工程技术和应用电子技术专业（群）的国家骨干校项目规划教材开发建设。

三年来，为了把这批教材打造成精品，我院于2013年通过立项论证方式明确了教材三级目录、建设内容、建设进度，通过每个季度进行的过程检查和严格的“三审”制度确保教材建设的质量关；各精品教材负责人依托合作企业在充分调研的基础上，遵循项目载体、任务驱动的原则于2014年完成初稿的撰写，并先后经过5轮修改于2015年通过项目规划教材编审委员会审核，完成教材编著开发出版等建设任务。

此次公开出版的精品教材秉承“以学习者为中心”和“行动导向”的理念，对接地方产业岗位要求，结合专业实际和课程改革成果，开发了以学习情境、项目为主体的工学结合教材，在内容选取、结构安排、实施设计、资源建设等方面形成了自己的特色。一是教材内容的选取突显了职业性和前沿性特色。根据与职业岗位对接、中高职衔接的要求与学生认知规律来遴选和序化教材内容，理论知识够用，职业能力适应岗位要求和个人发展要求。同时融入了行业前沿最新知识和技术，适时反映出专业领域出现的新变化和新特点；二是教材结构安排突显了情境性和项目化特色。教材体例结构打破传统的学科体系，以工作任务为线索进行项目化改造，各个学习情境或项目细分成若干个任务，各个任务采用任务要求、知识链接、技能训练、巩固提高的顺序来安排教学内容，充分体现以项目为载体、以任务为驱动的高职教育特征；三是教材实施的设计突显了实践性和过程性特色。教材实施建议充分体现理论融于实践，动脑融于动手，做人融于做事。教学方法融“教、学、做”于一体、实施以真实工作任务或企业产品为载体的教学方法，真正突出了以学生自主学习为中心、以问题为导向的理念。考核评价着重放在考核学生的能力与素质上，同时关注学生自主学习、参与性学习和实践学习的状况；四是教材资源的建设突显了完备性和交互性特色。在教材开发的同时，各门课程建成了涵盖课程标准、教学项目、电子教案、教学课件、图片库、案例库、动画库、课题库、教学视频等在内的丰富完备的数字化教学资源，并全部上网。学习者可通过课堂学习与网上交互式学习相结合，达到事半功倍的效果，从而将教材内容和教学资源有机整合，

大大丰富了教材的内涵。

此次公开出版的系列精品教材适合高职专业教学使用，也可作为教学参考书，还可供相关技术和管理人员参考使用。在教材编写的过程中，我们尽管作出了开拓性的探索，也付出了不懈的努力，但是由于水平有限，书中难免存在错误与缺憾，我们诚恳地希望广大读者，特别使用本教材的师生们提出宝贵意见，以便今后进一步完善。

娄底职业技术学院

二〇一五年六月

# 前 言

电机广泛应用于各行各业及日常生活中的诸多方面,电机控制及变频调速电路的合理设计、正常运行与维护、检修是电机可靠、连续运行的有力保证。为此,要求工矿企业电气技术人员及电工必须掌握现代电机控制技术和实际操作技能。

本书结合电机控制技术的发展和應用,系统地介绍了电机控制常用的低压电器、直流电机控制电路、三相异步电机控制电路、电机调速相关的知识与计算,结合电机实际应用实例介绍了机床电机控制电路及故障检修、常见直流电机调速系统、常见交流调速系统。在电机控制电路的讲解上,采用图文结合的形式,电路实用,内容新颖。

本书的最大特点是以“项目导向式、任务驱动式和情景交融式相结合”为主线,注重学练同步,内容精炼实用。每个项目和任务都安排了适当的“工程实训”环节,真正做到教、学、练、研高度结合,既巩固了重点知识,又注重了对动手能力和实践能力的培养,提高学习效率,使读者能够学以致用。

本书编写团队有长期从事教学、实验与科研工作的一线教师,有长期从事工程建设与现场施工的工程技术人员,团队的理论功底扎实,实践经验丰富,教材融知识性、理论性、实践性、时代性、创新性于一体化。

书中内容都是笔者通过调研得到的企业实际工程项目,并归纳总结,每个学习项目下分为若干学习任务,学习任务下又分为若干学习情景,学习情景对应一个工程实际项目,形成一套知识体系框架与理实高度一体化的体系。

本书是娄底职业技术学院国家骨干院校“三精”项目的子项目,可供电气自动化、机电一体化、数控专业师生使用,还可供从事电气设计、制造、试验及运行的工程技术人员参考。

本书由娄底职业技术学院肖雪耀任主编,娄底职业技术学院刘新逢、刘桂兰任副主编。参加编写的还有刘炳良、禹劲草、雷立英、梁鸿、杨启军、马国伟、田长青。其中,任务1由娄底职业技术学院刘桂兰编写,任务2由娄底职业技术学院马国伟编写,任务3由娄底职业技术学院刘新逢编写,任务4由湖南三一公司梁鸿编写,任务5由娄底职业技术学院田长青编写,任务6、任务7由湖南理工职业技术学院刘炳良编写,任务8、任务9由肖雪耀编写,任务10由重庆高等电力学院杨启军编写,任务11由娄底职业技术学院雷立英编写,任务14、任务15由娄底职业技术学院禹劲草编写,任务16~19由肖雪耀编写。全书由肖雪耀统稿、定稿,由祖国建教授和罗正斌教授审定。

本书编写过程中得到诸多业内同仁的支持和帮助,对提供了不少工程实际资料的湖南三一公司、华菱涟钢机电设备公司熊菊芳高级工程师,对审稿中给予帮助的娄底职业技术学院祖国建教授、罗正斌教授,一并表示深切的感谢。

由于时间与编者水平有限,书中不足之处难免,敬请读者提出宝贵意见。

编者

# 目 录

项目 1 直流电动机及其驱动 .....	1
任务 1 直流电动机 .....	1
情景 1 直流电动机的结构与励磁方式 .....	1
情景 2 直流电动机的工作原理与电枢反应 .....	5
情景 3 直流电动机的电磁转矩与机械特性 .....	6
任务 2 直流电动机的电力驱动 .....	8
情景 1 他励直流电动机的启动 .....	8
情景 2 他励直流电动机的电力制动 .....	10
工程实训 1 直流电动机的认识与测试 .....	12
课后练习 1 .....	14
项目 2 电机驱动常用低压电器 .....	17
任务 3 常用低压主令电器 .....	17
情景 1 按钮和行程开关 .....	17
情景 2 万能转换开关和接近开关 .....	19
任务 4 常用低压控制电器 .....	22
情景 1 接触器 .....	22
情景 2 继电器 .....	24
情景 3 开关电器 .....	29
任务 5 常用低压保护电器 .....	32
情景 1 熔断器 .....	32
情景 2 热继电器 .....	33
工程实训 2 低压电器的拆装与调试 .....	35
课后练习 2 .....	35
项目 3 异步电动机及其检修 .....	38
任务 6 三相异步电动机 .....	38
情景 1 三相异步电动机的结构、原理与机械特性 .....	38
情景 2 三相异步电动机的选择、测试与故障维修 .....	44
工程实训 3 三相异步电动机的拆装与调试 .....	49
任务 7 单相异步电动机 .....	51
课后练习 3 .....	55
项目 4 三相异步电动机的电力驱动 .....	58
任务 8 三相异步电动机的启动 .....	58
情景 1 电动机点动启动与连续启动 .....	58
工程实训 4 点动启动与连续启动线路的接线 .....	60
情景 2 多地启动与顺序启动 .....	63



工程实训 5 多地启动线路的接线 .....	65
情景 3 电动机正反转启动 .....	67
工程实训 6 接触器联锁正反转启动线路的接线 .....	68
工程实训 7 双重联锁正反转启动线路的接线 .....	70
情景 4 行程控制与往复控制 .....	73
工程实训 8 自动往复控制线路的接线 .....	75
情景 5 定子绕组串电阻减压启动 .....	79
情景 6 启动补偿器减压启动 .....	80
情景 7 星形-三角形减压启动 .....	81
工程实训 9 Y- $\Delta$ 减压启动线路的接线 .....	83
情景 8 绕线电动机转子绕组串电阻启动 .....	84
<b>任务 9 三相异步电动机的电力制动</b> .....	87
情景 1 反接制动 .....	87
工程实训 10 反接制动线路的接线 .....	89
情景 2 能耗制动 .....	91
<b>课后练习 4</b> .....	92
<b>项目 5 机床电动机控制及其检修</b> .....	95
<b>任务 10 车床电动机控制及其检修</b> .....	95
工程实训 11 车床控制线路故障检修 .....	99
<b>任务 11 磨床电动机控制及其检修</b> .....	102
工程实训 12 磨床控制线路故障检修 .....	107
<b>任务 12 铣床电动机控制及其检修</b> .....	111
工程实训 13 铣床控制线路故障检修 .....	117
<b>任务 13 钻床电动机控制及其检修</b> .....	121
工程实训 14 钻床控制线路故障检修 .....	125
<b>课后练习 5</b> .....	129
<b>项目 6 三相交流电动机的调速</b> .....	131
<b>任务 14 电动机调速概论</b> .....	131
<b>任务 15 变极调速</b> .....	133
工程实训 15 双速电动机调速线路的安装调试 .....	135
<b>任务 16 滑差调速</b> .....	138
<b>任务 17 变频调速</b> .....	143
情景 1 变频调速的基础 .....	143
工程实训 16 变频器的认识与使用 .....	147
情景 2 变频调速的设置 .....	152
工程实训 17 变频器控制电动机开环运行 .....	154
情景 3 变频调速的检修 .....	155
工程实训 18 变频器的故障检修 .....	159
<b>课后练习 6</b> .....	162
<b>项目 7 典型调速系统</b> .....	165
<b>任务 18 典型直流调速系统</b> .....	165
情景 1 V-M 调速系统简介 .....	165
情景 2 小功率 PWM 直流脉宽调速系统 .....	168

情景 3 SG1731 控制的伺服电动机调速系统 .....	172
工程实训 19 单闭环直流调速系统静特性的研究 .....	174
<b>任务 19 典型交流调速系统 .....</b>	<b>176</b>
情景 1 异步电动机矢量控制变频调速系统 .....	176
情景 2 异步电动机转差功率馈送型调速系统 .....	178
情景 3 小容量同步电动机恒压频比群控调速系统 .....	180
情景 4 IR2233 驱动的三相 IGBT 逆变电路 .....	186
情景 5 小功率交流位置随动系统 .....	190
工程实训 20 三相异步电机双闭环调压调速系统的研究 .....	193
课后练习 7 .....	196
<b>附录：三菱变频器 FR-A700 功能一览表 .....</b>	<b>200</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>209</b>

# 项目 1 直流电动机及其驱动

## 【能力目标】

1. 了解直流电动机的结构与工作原理；
2. 熟悉直流电动机的励磁方式；
3. 掌握电枢电动势和电磁转矩的计算；
4. 掌握直流电动机的工作特性和机械特性；
5. 掌握直流电动机的启动；
6. 掌握直流电动机的制动。

## 【项目要求】

### 任务 1 直流电动机

#### 【任务目标】

1. 了解直流电动机的结构与工作原理；
2. 熟悉直流电动机的励磁方式；
3. 掌握电枢电动势和电磁转矩的计算；
4. 理解和掌握直流电动机的工作特性和机械特性；
5. 了解直流电动机的换向。

#### 【任务要求】

#### 情景 1 直流电动机的结构与励磁方式

##### 1. 直流电动机的结构

直流电动机主要组成为定子（磁极）和转子（电枢），两者之间的间隙叫做气隙。直流电动机的结构如图 1-1 所示。

（1）定子 定子的功能是产生磁场。定子的组成部分是基座、主磁极、换向器、电刷装置、端盖等。定子结构如图 1-2 所示。

① 基座 电动机定子的外壳称为机座。机座的功能有以下两个。

一是用于固定主磁极、换向器、端盖等，并起整个电机的支撑和固定作用；

二是其本身也是磁路的一部分，以构成磁极之间磁的通路，磁通通过的部分称为磁轭。

机座一般采用铸钢件或由钢板焊接而成，以保证足够的机械强度和良好的导磁性能。

基座的接线盒内有用于对外接线的励磁绕组和电枢绕组的接线端子。

② 主磁极 主磁极的功能是产生工作磁场。主磁极的结构如图 1-3 所示。

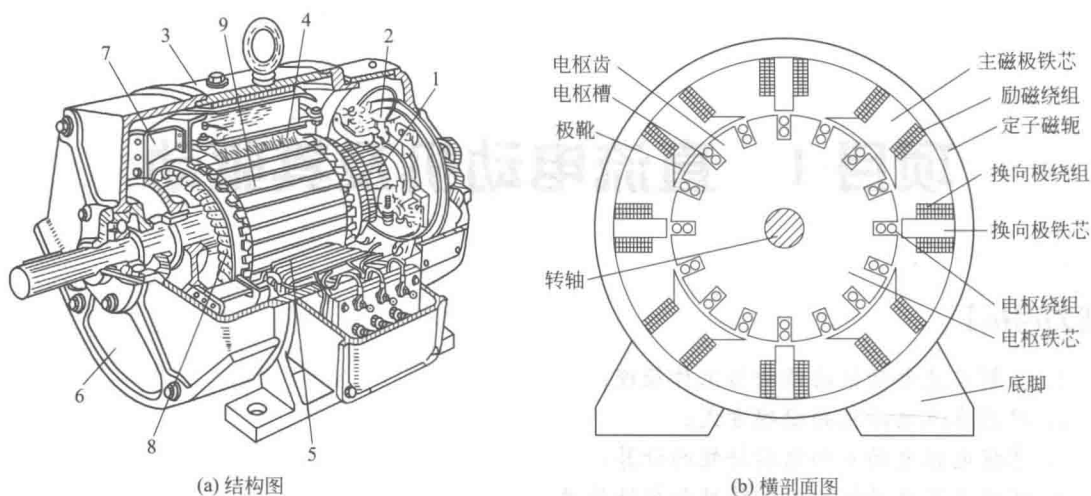


图 1-1 直流电动机的结构

1—换向器；2—刷架；3—基座；4—主磁极；5—换向磁极；6—端盖；7—风扇；8—电枢绕组；9—电枢

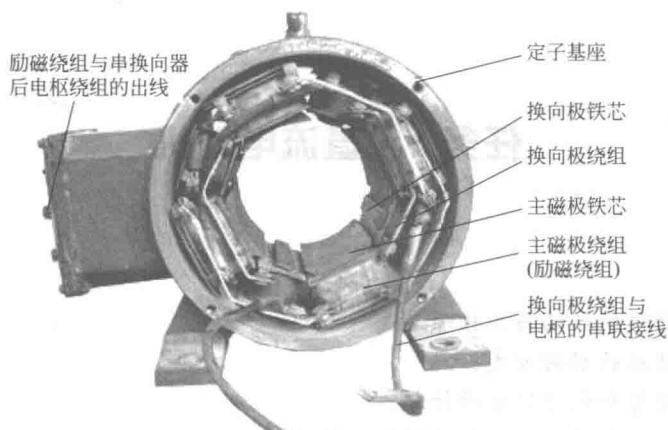


图 1-2 直流电动机定子结构图

主磁极由主磁极铁芯和励磁绕组两部分组成。铁芯一般用  $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$  厚的硅钢板冲片叠压铆紧而成，分为极身和极靴两部分，上面套励磁绕组的部分称为极身，下面扩宽的部分称为极靴，极靴宽于极身，既可以调整气隙中磁场的分布，又便于固定励磁绕组。

励磁绕组用绝缘铜线绕制而成，套在主磁极铁芯上。整个主磁极用螺钉固定在机座上。

③ 换向极 换向极的功能是改善换向，减小电机运行时电刷与换向器之间可能产生的换向火花，一般装在两个相邻主磁极之间，由换向极铁芯和换向极绕组组成。换向极绕组用绝缘导线绕制而成，套在换向极铁芯上，换向极的数目与主磁极相等。

④ 电刷装置 电刷装置的功能是引入或引出直流电压和直流电流。电刷装置由电刷、刷盒、刷杆和刷杆座等组成。

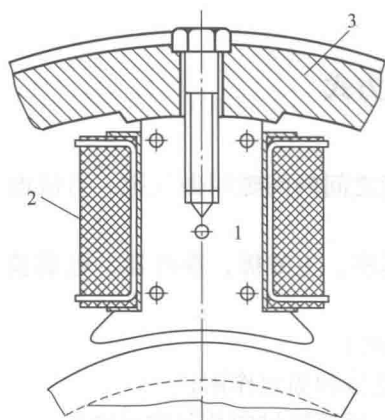


图 1-3 主磁极

1—主磁极铁芯；2—励磁绕组；3—机座

电刷装置的结构如图 1-4 所示。

电刷放在刷盒内，用弹簧压紧，使电刷与换向器之间有良好的滑动接触，刷盒固定在刷杆上，刷杆装在圆环形的刷杆座上，相互之间必须绝缘。刷杆座装在端盖或轴承内盖上，其圆周位置调整好以后加以固定。

(2) 转子(电枢) 转子的功能是产生感应电动势与电磁转矩。转子结构如图 1-5 所示。

① 电枢铁芯 电枢铁芯的功能是作为主磁路的主要部分且用于嵌放电枢绕组。电枢铁芯采用厚 0.5mm 的硅钢冲片叠压而成，以降低电机运行时电枢铁芯中产生的涡流损耗和磁滞损耗。叠成的铁芯固定在转轴或转子支架上。铁芯的外圆开有电枢槽，槽内嵌放电枢绕组。

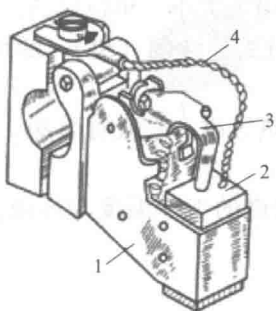


图 1-4 电刷装置

1—刷盒(刷握); 2—电刷;  
3—压紧弹簧; 4—导电绞线(刷辫)

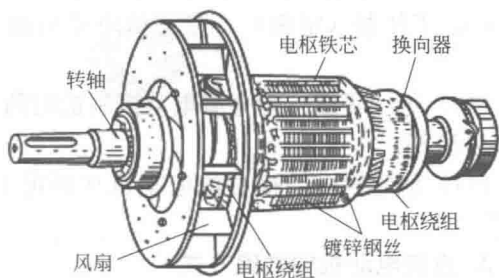


图 1-5 直流电动机的电枢

② 电枢绕组 电枢绕组的功能是产生电磁转矩和感应电动势，它是直流电机进行能量变换的关键部件，故名电枢。电枢绕组由许多采用高强度漆包线或玻璃丝包扁铜线绕成的线圈按一定规律连接而成，线圈与铁芯之间以及上下两层线圈边之间须妥善绝缘。槽口用槽楔固定线圈以防离心力将其甩出槽外。线圈伸出槽外的端接部分用热固性无纬玻璃丝带绑扎。

③ 换向器 换向器的功能将外加直流电源转换为电枢线圈中的交变电流，使电磁转矩的方向恒定不变。换向器是由许多换向片组成的圆柱体，换向片之间用云母片绝缘，其结构如图 1-6 所示。

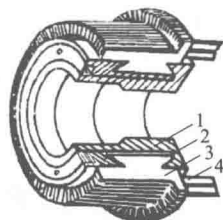


图 1-6 换向器结构

1—V形套管;  
2—云母片;  
3, 4—换向片

## 2. 直流电动机的铭牌

(1) 型号 国产电机型号一般采用大写拼音字母和阿拉伯数字表示。

第一部分用大写的拼音字母表示产品代号；第二部分用阿拉伯数字表示设计序号；第三部分用阿拉伯数字表示机座代号；第四部分用阿拉伯数字表示电枢铁芯长度代号。

第一部分字母符号含义如下：

Z 系列：一般用途直流电动机（如 Z2、Z3、Z4 等系列）；

ZY 系列：永磁直流电动机；

ZJ 系列：精密机床用直流电动机；

ZT 系列：广调速直流电动机；

ZQ 系列：直流牵引电动机；

ZH 系列：船用直流电动机；

ZA 系列：防爆安全型直流电动机；

ZKJ 系列：挖掘机用直流电动机；

ZZJ 系列：冶金起重机用直流电动机。

例如 Z4-112/2-1：Z—直流电动机，4—设计序号（第四次改型设计），112—机座中心高（mm），2—极数，1—电枢铁芯长度代号。

(2) 额定功率(容量) 指直流电动机长期使用时轴上允许输出的机械功率(kW)。

(3) 额定电压 指直流电动机在额定条件下运行时从电刷两端施加给电动机的输入电压 (V)。

(4) 额定电流 指直流电动机在额定电压下输出额定功率时长期运转允许输入的工作电流 (A)。

(5) 额定转速 指直流电动机在额定工况下 (额定功率、额定电压、额定电流) 运转时转子的转速 (r/min)。直流电动机铭牌有低、高两种转速, 低转速是基本转速, 高转速是最高转速。

(6) 励磁方式 指励磁绕组的供电方式。通常有自励、他励和复励三种。

(7) 励磁电压 指励磁绕组供电的电压值 (V)。一般有 110V、220V 等。

(8) 励磁电流 在额定励磁电压下, 励磁绕组中所流通的电流大小。单位是 A。

(9) 工作制 (定额) 指直流电动机的工作方式。一般分为连续制 (S1)、断续制 (S2-S10)。

(10) 绝缘等级 指直流电动机制造时所用绝缘材料的耐热等级。一般有 B 级、F 级、H 级和 C 级等。

(11) 额定温升 指直流电动机在额定工况下运行时所允许的工作温度与环境温度的差值 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 3. 直流电动机的励磁方式

直流电动机的励磁方式是指对励磁绕组供电而产生励磁磁动势从而建立主磁场的方式。

根据励磁方式的不同, 直流电机可分为以下四种类型, 如图 1-7 所示。

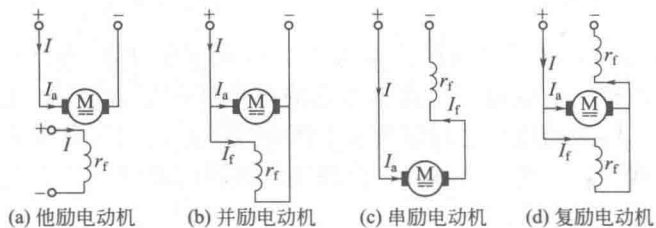


图 1-7 直流电动机的励磁方式

(1) 他励 由其他直流电源对励磁绕组供电而励磁绕组与电枢绕组无连接关系的直流电机称为他励直流电机, 接线如图 1-7 (a) 所示。图中 M 表示电动机, 若为发电机, 则用 G 表示。永磁直流电机也可看作他励直流电机。

(2) 并励 并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组相并联, 接线如图 1-7 (b) 所示。作为并励发电机来说, 是电机本身发出来的端电压为励磁绕组供电; 作为并励电动机来说, 励磁绕组与电枢共用同一电源, 从性能上讲与他励直流电动机相同。

(3) 串励 串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联后, 再接于直流电源, 接线如图 1-7 (c) 所示。这种直流电机的励磁电流就是电枢电流。

(4) 复励 复励直流电机有并励和串励两个励磁绕组, 接线如图 1-7 (d) 所示。若串励绕组产生的磁动势与并励绕组产生的磁动势方向相同称为积复励。若两个磁动势方向相反, 则称为差复励。不同励磁方式的直流电机有着不同的特性。直流电动机的主要励磁方式是并励式、串励式和复励式, 直流发电机的主要励磁方式是他励式、并励式和复励式。

(5) 永磁 永磁直流电动机采用永久磁铁作为励磁, 可用于直流伺服电机, 其体积小、结构简单、工作可靠, 目前永磁直流电机从小功率到大功率均有应用。其机械特性类似于并励电机。

## 情景 2 直流电动机的工作原理与电枢反应

### 1. 直流电动机的工作原理

把电刷 A、B 接到直流电源上，电刷 A 接正极，电刷 B 接负极。此时电枢线圈中将有电流流过。如图 1-8 (a) 所示。

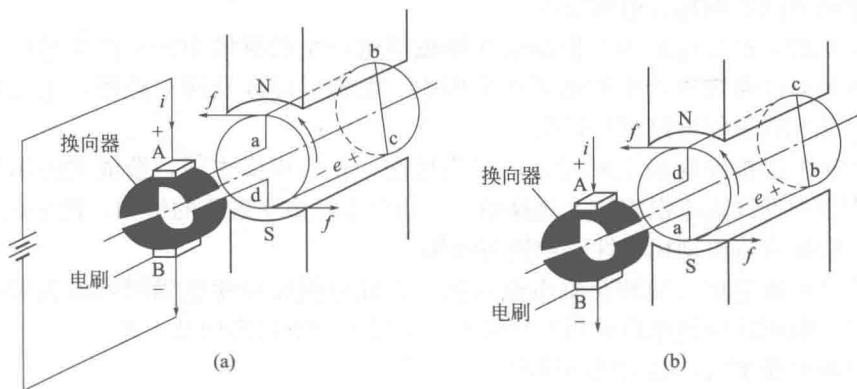


图 1-8 直流电动机原理图

在磁场作用下，N 极性导体 ab 电流由 a 到 b，受力方向从右向左，S 极性导体 cd 电流方向由 c 到 d，受力方向从左向右。该电磁力偶形成逆时针方向的电磁转矩。当电磁转矩大于阻转矩时，电动机转子逆时针方向旋转。当转到  $90^\circ$  时，导体中无电流而使磁场力为零，从而转矩亦为零。

当电枢旋转到图 1-8(b) 所示位置时，原 N 极性导体 ab 转到 S 极，电流方向由 b 到 a（与原来相反），受力方向从左向右，原 S 极性导体 cd 转到 N 极，电流方向由 d 到 c（与原方向相反），受力方向从右向左。该电磁力偶形成逆时针方向的电磁转矩，线圈在该电磁转矩作用下继续逆时针方向旋转。

可见，需要一个换向器才能完成工作。换向器的作用如图 1-9 所示。

直流电动机中换向器起逆变作用，即把电刷外电路中的直流电经换向器逆变为交流电而输入电枢绕组（元件）中。而直流发电机中换向器起整流作用，即把电枢绕组里的交流电整流为直流电而在正、负电刷两端输出。

### 2. 直流电机的可逆运行

一台直流电机既可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行，这称为可逆原理。

当原动机驱动电枢绕组在主磁极 N、S 之间旋转时，电枢绕组上产生感应电动势，经电刷、换向器装置整流为直流后，引向外部负载（或电网），对外供电，此时电机作直流发电机运行。

将外部直流电源经电刷、换向器装置引向电枢绕组，则此直流电流与主磁极 N、S 之间的磁场互相作用而产生转矩，驱动转子与连接于其上的机械负载工作，此时电机作直流电动机运行。

### 3. 直流电动机的电枢反应

(1) 空载时直流电机中的磁场 直流电机空载时，电枢电流为零，只有励磁绕组中存在电流。因此，空载时电机的气隙磁场完全由励磁绕组的电流所产生。

(2) 电枢磁场 直流电机带有负载时，电枢绕组中有电流通过，电枢绕组的电流产生磁

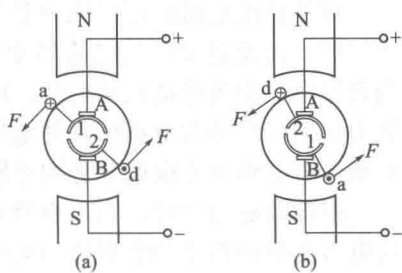


图 1-9 换向器在直流电动机中的作用

场称为电枢磁场。

电枢磁场沿电枢表面的分布情况,与电枢电流的分布情况有关。在直流电机中,电枢电流的分界线是电刷,在电刷轴线两侧对称分布,所以电枢磁场的分布情况与电刷的位置有关。

(3) 电枢反应 直流电动机带上负载后,电枢绕组就有电流流过,电枢电流将产生电枢磁动势;气隙磁场是由励磁磁动势和电枢磁动势两者的合成磁动势所建立的。负载时,电枢磁动势对气隙磁场的影响称为电枢反应。

直流电动机的电枢反应是指电枢绕组在励磁绕组产生的磁场中转动产生感应电流,而该电流产生的磁场对励磁绕组产生的磁场产生影响。电枢反应涉及两个磁场,正是这两个磁场的作用才使电能和机械能可以相互转化。

直流电动机的电枢反应使主磁场在前极尖增磁,在后极尖去磁,造成主磁场畸变,使气隙中磁场的物理中性线逆电枢旋转方向移动一个小角度。由于磁路的饱和,使总磁通减少。

电枢反应影响直流电机的性能和换向效果。

电枢反应分直轴电枢反应和交轴电枢反应,直轴电枢反应使电机增磁或去磁,从而影响电机转速,交轴电枢反应使电机磁场发生畸变,主要影响电机换向及火花。

电枢反应使火花增大,电动机的输出转矩下降。

### 情景3 直流电动机的电磁转矩与机械特性

#### 1. 直流电动机的电枢电动势和电磁转矩

(1) 电枢电动势 电枢绕组中的感应电动势称为电枢电动势。电枢电动势是指直流电机正、负电刷之间的感应电动势,也就是每个支路里的感应电动势。

电枢感应电动势计算公式为

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_E \Phi n \quad (1-1)$$

式中, $N$ 为电枢绕组; $p$ 为磁极对数; $a$ 为电枢绕组并联支路数;磁通 $\Phi$ 的单位为Wb;转速 $n$ 的单位为r/min;感应电动势 $E_a$ 的单位为V。

$C_E$ 为电动势常数,仅取决于电动机的结构。

可见直流电机的感应电动势与电机结构、气隙磁通和电机转速有关。

(2) 直流电动机的电磁转矩 直流电机运行时,其电枢中产生感应电动势和电磁转矩。当直流电机作为电动机运行时,电磁转矩为拖动转矩,通过电机轴带动负载,电枢感应电动势为反向电动势与电枢所加外电压相平衡;当其作为发电机运行时,电磁转矩为阻转矩,电枢感应电动势为正向电动势向外输出电压,供给直流负载。

根据电磁力定律,当电枢绕组有电枢电流流过时,在磁场内将受到电磁力的作用,该力与电机电枢铁芯半径之积称为电磁转矩。直流电机的电磁转矩计算公式为

$$T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_{\lambda d} \Phi I_a \quad (1-2)$$

电枢电流的单位为A,电磁转矩的单位为N·m。

可见直流电动机其电磁转矩仅与电枢电流和气隙磁通成正比。

#### 2. 直流电动机的机械特性

(1) 固有机械特性 他励直流电动机的机械特性指在一定电压和励磁电流条件下,电磁转矩与转速的关系。

直流电机的转速表达式为

$$n = \frac{U_N - R_a I_a}{C_E \Phi} = \frac{U_N}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E \Phi} I_a = n_0 - \beta' I_a \quad (1-3)$$



转矩的表达式为  $T=C_M I_a \Phi$ ，从而可得直流电机的机械特性表达式

$$n = \frac{U_N - R_a I_a}{C_E \Phi} = \frac{U_N}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_M \Phi^2} T = n_0 - \beta T \quad (1-4)$$

固有机械特性曲线如图 1-10 所示。

其中， $n_0$  叫做理想空载转速， $\beta$  叫做机械特性的斜率。因为  $R_a$  很小，所以  $\beta$  小，可见直流电动机固有机械特性硬。

(2) 人为机械特性

① 电枢回路串入电阻  $R$

机械特性变为如下的形式

$$n = \frac{U_N - R_a I_a}{C_E \Phi} = \frac{U_N}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R}{C_E C_M \Phi^2} T = n_0 - \beta T \quad (1-5)$$

电枢回路串入电阻  $R$  时机械特性曲线如图 1-11 所示。

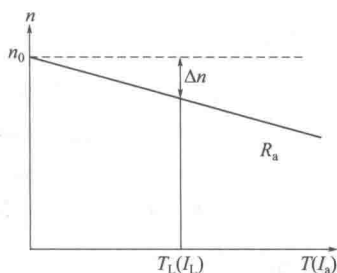


图 1-10 固有机械特性曲线

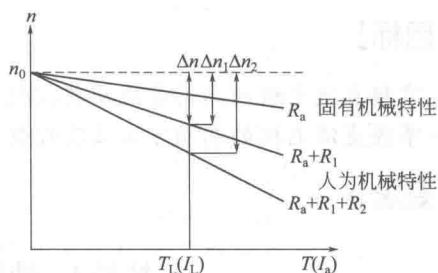


图 1-11 串接电阻时的机械特性曲线

可见电枢回路中串入一个电阻后，理想空载转速  $n_0$  保持不变；机械特性斜率  $\beta$  增加，特性变软；随  $R$  增大，转速降  $\Delta n$  增大，特性变得更软。

② 改变电压  $U$  改变电压  $U$  时的机械特性曲线如图 1-12 所示。

改变电压时的机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_M \Phi^2} T = n_0 - \beta T$$

通过比较发现，改变电枢电压时，空载转速  $n_0$  随着电压的降低而降低（或者随着电压的升高而升高），斜率保持不变。

可见改变电压时的人为机械特性是与固有机械特性平行的一簇斜线。

③ 弱磁  $\Phi$  一般情况下直流电机在额定磁通下运行时，电机已经接近饱和，改变磁通实际上是减弱磁通。对他励直流电动机，具体方法是在励磁回路中串接电阻来达到减弱磁通的目的。

弱磁时的机械特性方程为

$$n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_M \Phi^2} T = n_0 - \beta T \quad (1-6)$$

减弱磁通  $\Phi$  时的机械特性曲线如图 1-13 所示。

可见减弱磁通  $\Phi$  时，空载转速  $n_0$  升高，机械特性斜率  $\beta$  随着磁通的减小而增大，启动转矩随着磁通的减弱而减小。

以上三种人为接线特性实质上就是三种调速方式，故在项目 5 中不再赘述。