



高等职业教育铁道供电技术专业“十三五”规划教材
全国高职院校专业教学创新系列教材——铁道运输类

电机与电气 控制技术

主编 ○ 赵 勇 胡建平
主审 ○ 程 波

DIANJI YU DIANQI
KONGZHI JISHU

 西南交通大学出版社

高等职业教育铁道供电技术专业“十三五”规划教材
全国高职院校专业教学创新系列教材——铁道运输类

电机与电气控制技术

主 编 赵 勇 胡建平

副主编 祁_瑒娟 吴晓燕

主 审 程 波

西南交通大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

电机与电气控制技术 / 赵勇, 胡建平主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2017.2

高等职业教育铁道供电技术专业“十三五”规划教材
全国高职院校专业教学创新系列教材. 铁道运输类

ISBN 978-7-5643-5202-8

I. ①电… II. ①赵… ②胡… III. ①电机学—高等
职业教育—教材②电气控制—高等职业教育—教材 IV.
①TM3②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 007459 号

高等职业教育铁道供电技术专业“十三五”规划教材
全国高职院校专业教学创新系列教材——铁道运输类

电机与电气控制技术

主编 赵勇 胡建平

责任编辑 宋彦博
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话 028-87600564 028-87600533
邮政编码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印	刷	四川森林印务有限责任公司
成 品 尺 寸		185 mm × 260 mm
印	张	17
字	数	421 千
版	次	2017 年 2 月第 1 版
印	次	2017 年 2 月第 1 次
书	号	ISBN 978-7-5643-5202-8
定	价	48.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

高等职业教育铁道供电技术专业“十三五”规划教材

编委会

主 任 陈维荣（西南交通大学）

副主任（以姓氏笔画为序）

王亚妮 邓 纘 张 辉 张刚毅

林宏裔 李学武 宋奇吼 程 波

委 员（以姓氏笔画为序）

邓 纘 邓小桃 王向东 王旭波 支崇珏

车焕文 龙 剑 李 壮 张 辉 张刚毅

张灵芝 张大庆 严兴喜 陈 刚 何武林

尚 晶 武永红 郭艳红 赵先堃 赵 勇

徐绍桐 常国兰 窦婷婷

出版说明

近年来,我国铁路建设快速发展,取得了令世人瞩目的成绩。到2015年年底,全国铁路运营里程达12.1万千米,居世界第二位。在铁路建设快速发展的当下,企业急需大量德才兼备的高技能型专业人才,这对铁路职业教育提出了更高的要求。

为适应新形势,同时为满足企业对人才培养的迫切需要,促进铁路专业课程体系与教材体系趋于完善,西南交通大学出版社与全国19所铁路高、中职学校共同策划、拟在今明两年内出版一套“十三五”规划教材——高等职业教育铁道供电技术专业“十三五”规划教材。这套教材包括:《安全用电》《高电压工程》《接触网施工》《牵引供电规程》《接触网实训教程》《电力线路施工与检修》《电机与电力控制技术》《接触网设备检修与维护》《变电所综合自动化技术》《牵引变电系统运行与维护》《继电保护装置运行与调试》《高压电气设备的检修与试验》等。

这套教材严格遵照教育部《普通高等学校高等职业教育专科(专业)目录(2015年)》与《高等职业学校专业教学标准》的文件精神编写,切合高职院校专业教学与铁路现场实际,具有创新性,是目前铁道供电技术专业的最新教材,能在为我国电气化铁路行业培养出更多高素质、专业技术强的接班人方面发挥重要作用。其编写特色体现在:

1. 针对性强

主要针对高职院校铁路行业技能型人才培养目标以及目前铁道供电技术专业教学与人才培养方案。书里的内容皆对应铁道供电技术专业的核心课程或主干课程。

2. 实用性强

在编写内容布局上,遵循高职院校教学的“必需、够用、实用”原则,充分体现高等职业教育的实用特征;在编写体系设置上,坚持以“夯实基础,贴近岗位”为准则,突出可操作性,使知识与技能较好融合。为便于教学,每本书皆配有教师可用、学生可学的资料、资源。

3. 编者基础厚实

担任本套教材的主编和其他编者(不少是双师型教师),既有丰富的实践经验与课堂教学经验,又有编写出版教材的经历。在铁路建设高速发展以及中国高铁迈向世界的背景下,他们仍在继续不断地学习与钻研现代铁路技术,走访企业、现场,搜集、掌握相关技术资料,这为编写出版高质量的教材奠定了坚实基础。

4. 立体化

本套教材的出版,在纸质出版时辅以数字出版,使教材表现形态多元化、立体化。学生

可通过扫二维码或使用网络媒体等多种手段,获得丰富的学习资源,提高学习效率。这样的教材,会使教学变得更加开放、便捷,从而实现更好培养高技能型人才的目标。

本套教材的出版,得到以下学校的积极响应和大力支持,我们在此表示衷心的感谢。他们是:包头铁道职业技术学院、辽宁铁道职业技术学院、北京铁路电气化学校、天津铁道职业技术学院、西安铁路职业技术学院、武汉铁路职业技术学院、山东职业学院、贵阳职业技术学院、四川管理职业学院、黑龙江交通职业技术学院、吉林铁道职业技术学院、昆明铁道职业技术学院、广州铁路职业技术学院、湖南铁道职业技术学院、湖南铁路科技职业技术学院、湖南高速铁路职业技术学院、郑州铁道职业技术学院、湖北铁路运输职业技术学院、南京铁道职业技术学院等。

同时,我们还要对在教材出版幕后做出积极贡献的相关领导及专家表示崇高的敬意。他们是:西南交通大学陈维荣教授,湖南铁路科技职业技术学院副院长石纪虎教授,黑龙江交通职业技术学院副院长宫国顺教授,包头铁道职业技术学院院长张澍东教授,广州铁路职业技术学院王亚妮教授、谢家的教授,北京铁路电气化学校林宏裔科长。此外,还要特别感谢以下做出重要贡献的老师,他们或建言献策、直抒己见,或主动担纲、揽承编写任务。他们是:杨旭清、祁瑒娟、刘德勇、郭艳红、林宏裔、谢奕波、赵先堃、江澜、支崇珏、于洪永、高秀梅、魏玉梅、曾洁、唐玲、严兴喜、袁兴伟、谢芸、杨柳、邓缙、王向东、张灵芝、龙剑、上官剑、饶金根、程波等。

教材是体现教学内容和教学方法的知识载体,是人才培养工作顺利开展的重要基础,需要社会关注与扶持。我社作为轨道交通特色出版社,一直坚持把服务高职院校教学与服务铁路企业人才培养作为出版社的重要工作之一,把规划、开发与出版更多的、更优质的轨道交通类教材作为首要任务并予以落实。希望本套教材的出版,能对高职院校的铁路专业教学与改革,对铁路企业、现场的职工培训与人才培养发挥重要作用,产生积极影响。

西南交通大学出版社

2016年12月

前 言

一、电机与电气控制在国民经济中的作用

电能是现代最常用且极为普遍的一种二次能源。电能具有许多优点，其生产、传输、控制和使用都比较方便，且效率较高，因而广泛用于工农业生产、交通运输、科学研究、信息传输及日常生活中，极大地推动了技术的进步和生产力的发展。

电机是与电能的生产、传输和使用有着密切关系的电磁机构。例如：将自然界的一次能源如水能、热能、风能和原子能等转换为电能需用发电机，它是电厂的主要电气设备；为了经济地使用和分配电能需用变压器，它是电力系统的主要电气设备；在其他各行各业各部门都大量使用各种电动机作为原动机，用以拖动各种机械设备，这称为电力拖动；在军事、信息领域和各种自动控制系统中，则应用大量的控制电机，作为检测、执行和计算等元件；在医疗、文教领域和日常生活中，电机的应用也十分广泛。

电力拖动系统按拖动电动机的不同，分为直流拖动系统和交流拖动系统，按有无反馈装置分为闭环电力拖动系统与开环电力拖动系统。闭环电力拖动系统往往采用控制电机等反馈装置来实现反馈功能。传统的控制设备多为继电器、接触器，因这类器件均带有触点，故应用继电器、接触器作为控制设备的电力拖动系统又称为有触点系统。为提高系统工作的可靠性，近年来出现了以数字电路为主的无触点系统。数字电路发展很快，先从分立元件发展到集成电路，现又发展到使用微型计算机控制的数字控制系统。本书以三相异步电动机控制及其电力拖动技术为重点，以继电器、接触器控制电路基本环节为主线，介绍了目前仍广泛使用的典型设备的经典电气控制技术。

二、电机与电力拖动系统的发展概况

1820 年，奥斯特发现了电流的磁效应。1831 年，法拉第发现了电磁感应现象，其后，电动机和发电机的雏形出现了。从电机形成一个工业部门至今不过一百多年，但经济发展的需要使电机获得迅速的发展。19 世纪末期，电动机逐渐代替了蒸汽机，出现了电力拖动。在其初期，常以一台电动机拖动多台设备，或一台设备上的多个运动部件由一台电动机拖动，称之为集中拖动。为了满足生产发展的需要，在 20 世纪 20 年代出现了单独拖动。为进一步简化机械传动机构，更好地满足生产机械各运动部件对机械特性的不同要求，在 20 世纪 30 年代出现了多电动机拖动，即生产机械各运动部件分别由不同电动机拖动，这使生产机械的机械结构大为简化。

随着生产的发展，人们对上述单电动机拖动系统及多电动机拖动系统提出了更高的要求，

例如：提高加工精度和运行速度，快速启动、制动及反转，实现很宽范围内的速度调节及整个生产过程的自动化等。要满足这些要求，除改进驱动装置——电动机外，必须加装自动控制设备，组成自动化的电力拖动系统。而这些自动化的电力拖动系统随着自动控制理论的发展，半导体器件和电力电子技术的应用，以及数控技术和计算机技术的发展和运用，正在不断地完善。

电力拖动具有许多其他拖动方式无法比拟的优点：启动、制动、反转和调速的控制简单方便；快速性好，效率高；电动机的类型很多，具有各种不同的运行特性，可满足各类生产机械的要求；电力拖动系统各参数的检测、信号的变换和传送很方便，易于实现最优控制等。因此，电力拖动成为现代工农业电气自动化的基础。

三、课程的性质和任务

“电机与电气控制技术”是铁道供电技术、电气工程及自动化、机电等专业的专业基础课。它由电机原理、电力拖动理论、牵引电机和电气控制四部分内容有机组合而成。在上述各专业的整个课程体系中，该课程起着承上启下的作用。本课程的任务是使学生掌握相关的基本理论，学会分析运算的基本方法与维修的技能，从而具有较高的专业技术应用能力。

本教材在内容上注重实践与理论相结合、强电与弱电相结合、使用与维修相结合，加强了实践教学和现场教学环节，加强了现代化教学手段的使用，突出了技能的培养，以求全面提高学生素质，增强其适应职业变化的能力。在搜集材料、讨论编写的过程中，我们注意做到：①综合是有机综合，而不是内容的简单叠加，如将交、直流电机的电气控制内容与电力拖动的内容融合到一起，更加便于读者的学习和实验。②简化纯理论性的原理叙述和公式推导，如交流绕组磁势是时间、空间的变化函数，牵涉到分布系数和短距系数等，不宜作过深介绍。③加强学习方法的训练，培养学生分析问题、解决问题的能力。特别是在教授该课程时，应注意教会学生工程上的近似分析方法，正确处理严密的理论推导和合理的工程近似的关系。每一种具体的工业装置，都受到许多条件的制约，因此必须将问题简化，找出主要矛盾，运用理论加以分析推导。如电机理论中许多公式的简化、T形等效电路等都做了这样的处理。

本书由山东职业学院赵勇和湖南高速铁路职业技术学院胡建平担任主编，由包头铁道职业技术学院祁瑒娟和昆明铁道职业技术学院吴晓燕担任副主编。其中赵勇编写了第一、三、五、七、九章，胡建平编写了第六、八章，祁瑒娟编写了第二章，吴晓燕编写了第四章。山东职业学院高秀梅和包头铁道职业技术学院张泽伟也参与了部分内容的编写及资料收集工作。

四川管理职业学院的程波在百忙之中认真审阅了本书，并提出了宝贵的修改意见，在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2016年10月

目 录

第一章 直流电机	1
第一节 直流电机的基本原理与基本结构	1
第二节 直流电动机电枢绕组的感应电动势和电磁转矩	5
第三节 他励电动机的运行原理与机械特性	6
第四节 他励直流电动机的启动和制动	11
第五节 他励直流电动机的调速	18
习 题	21
第二章 变压器	23
第一节 变压器的基本工作原理、用途及结构	23
第二节 单相变压器的空载运行	28
第三节 单相变压器的负载运行	31
第四节 三相变压器	36
习 题	42
第三章 三相异步电动机	44
第一节 三相异步电动机的结构与工作原理	44
扩展训练 1 三相异步电动机技能训练	52
第二节 三相异步电动机的空载运行	54
第三节 三相异步电动机的负载运行	55
第四节 三相异步电动机的工作特性	59
第五节 三相异步电动机的电磁转矩特性	61
第六节 三相异步电动机的机械特性	63
第七节 电力拖动基本知识	67
第八节 三相异步电动机的启动	71
第九节 三相异步电动机的制动	78
第十节 三相异步电动机的调速	82
扩展训练 2 三相异步电动机的运行维护与故障分析	91
习 题	95
第四章 常用控制电机	97
第一节 伺服电动机	97
第二节 测速发电机	101

第三节 步进电动机·····	105
习 题·····	109
第五章 牵引电机 ·····	110
第一节 电力牵引系统与牵引电动机·····	110
第二节 直流牵引电动机·····	114
第三节 脉流牵引电动机·····	121
第四节 异步牵引电动机·····	124
习 题·····	131
第六章 常用低压电器 ·····	132
第一节 低压电器基本知识·····	132
第二节 低压配电电器·····	135
扩展训练 1 低压配电电器识别与拆装·····	142
第三节 低压控制电器·····	143
扩展训练 2 低压控制电器识别与拆装·····	156
习 题·····	157
第七章 继电器-接触器控制电路 ·····	158
第一节 电气控制系统图·····	158
扩展训练 1 电气原理图的识读·····	168
第二节 三相异步电动机单向运行控制电路·····	170
第三节 三相异步电动机正反转控制电路·····	176
扩展训练 2 电机正反转电路安装·····	180
第四节 鼠笼式异步电动机的启动控制电路·····	181
扩展训练 3 Y- Δ 降压启动控制电路安装·····	188
第五节 三相绕线式异步电动机启动控制电路·····	190
扩展训练 4 三相绕线式电动机转子串电阻启动控制电路安装·····	196
第六节 三相鼠笼式异步电动机制动控制电路·····	198
扩展训练 5 笼型异步电动机能耗制动控制电路安装·····	203
第七节 多速异步电动机的启动控制电路·····	204
第八节 多台电动机的顺序控制电路·····	207
扩展训练 6 两台电动机的顺序启动控制电路安装·····	208
习 题·····	210
第八章 典型设备电气控制系统 ·····	214
第一节 电气控制系统识图分析·····	214
扩展训练 1 电气工程系统图的识读(原理图、接线图、施工图)·····	218
第二节 车床电气控制系统原理与维修·····	224
扩展训练 2 车床的常见故障排除训练·····	227
第三节 摇臂钻床电气控制系统原理与维修·····	227

拓展训练 3 Z35 型摇臂钻床的常见故障排除训练	231
第四节 万能铣床电气控制系统原理与维修	232
拓展训练 4 万能铣床的常见故障排除训练	239
第五节 平面磨床电气控制系统原理与维修	240
拓展训练 5 M7120 型平面磨床的常见故障排除训练	244
习 题	245
第九章 电气控制电路的设计	247
第一节 设计的基本原则和内容	247
第二节 电气控制电路的设计方法	249
第三节 电气控制电路设计的电动机选择	252
第四节 电气控制电路设计中的元器件选择	253
第五节 生产机械电气设备施工设计	257
拓展训练 车床主轴电动机与润滑油泵电动机的控制电路设计	259
习 题	260
参考文献	261

第一章 直流电机

直流电机是一种通过磁场的耦合作用实现机械能与直流电能相互转换的旋转式机械，包括直流发电机和直流电动机。将机械能转换为电能的是直流发电机，将电能转换为机械能的是直流电动机。

与交流电机相比，直流电机结构复杂，成本高，运行维护较困难。但直流电动机调速性能好，启动转矩大，过载能力强，在启动和调速要求较高的场合，仍获得广泛应用。作为直流电源的直流发电机虽已逐步被晶闸管整流装置所取代，但在电镀、电解行业中仍被继续使用。

第一节 直流电机的基本原理与基本结构

直流电机是根据导体切割磁感线产生感应电动势和载流导体在磁场中受到电磁力的作用这两条基本原理制造的。因此，从结构上看，任何电机都包括磁路和电路两部分；从原理上讲，任何电机都体现了电和磁的相互作用。

一、直流电机的工作原理

（一）直流发电机工作原理

图 1-1 所示两极直流发电机模型，可说明直流发电机的基本工作原理。图中，N、S 是一对固定不动的磁极。磁极可以由永久磁铁制成，但通常是在磁极铁心上绕制励磁绕组，在励磁绕组中通入直流电流，即可产生 N、S 极。在 N、S 磁极之间装有由铁磁性物质构成的圆柱体，在圆柱体外表面的槽中嵌放了线圈 $abcd$ ，整个圆柱体可在磁极内部旋转。整个转动部分称为转子或电枢。电枢线圈 $abcd$ 的两端分别与固定在轴上相互绝缘的两个半圆铜环相连接，这两个半圆铜环称为换向片，即构成了简单的换向器。换向器通过静止不动的电刷 A 和 B，将电枢线圈与外电路接通。

电枢由原动机拖动，以恒定转速按逆时针方向旋转，转速为 n (r/min)。若导体的有效长度为 l ，线速度为 v ，导体所在位置的磁感应强度为 B ，根据电磁感应定律，则每根导体的感应电动势为 $e = Blv$ ，其方向可用右手定则确定。当线圈有效边 ab 和 cd 切割磁感线时，便在其中产

生感应电动势。如图 1-1 所示瞬间，导体 ab 中的电动势方向由 b 指向 a ，导体 cd 中的电动势则由 d 指向 c ，从整个线圈来看，电动势的方向为 d 指向 a ，故外电路中的电流自换向片 1 流至电刷 A，经过负载，流至电刷 B 和换向片 2，进入线圈。此时，电流流出处的电刷 A 为正电位，用“+”表示；电流流入线圈处的电刷 B 为负电位，用“-”表示。电刷 A 为正极，电刷 B 为负极。

电枢旋转 180° 后，导体 ab 和 cd 以及换向片 1 和 2 的位置同时互换，电刷 A 通过换向片 2 与导体 cd 相连接。此时，由于导体 cd 取代了原来 ab 所在的位置，即转到 N 极下，改变了原来的电流方向，即由 c 指向 d ，所以电刷 A 的极性仍然为正。同时，电刷 B 通过换向片 1 与导体 ab 相连接，而导体 ab 此时已转到 S 极下，也改变了原来电流方向，由 a 指向 b ，因此，电刷 B 的极性仍然为负。通过换向器和电刷的作用，及时地改变线圈与外电路的连接，可使线圈产生的交变电动势变为电刷两端方向恒定的电动势，保持外电路中的电流按一定方向流动。实际的发动机，通常由多个线圈按一定规律连接构成电枢绕组。

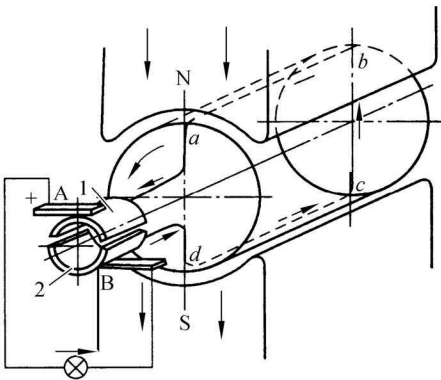


图 1-1 直流发电机工作原理示意图

（二）直流电动机工作原理

图 1-2 所示为直流电动机工作原理示意图，其基本结构与发电机完全相同，只是将直流电源接至电刷两端。当电刷 A 接至电源的正极，电刷 B 接至电源的负极时，电流将从电源正极流出，经过电刷 A、换向片 1、线圈 $abcd$ 到换向片 2 和电刷 B，最后回到负极。根据电磁力定律，载流导体在磁场中受电磁力的作用，其方向由左手定则确定。图 1-2 中，导体 ab 所受电磁力方向向左，而导体 cd 所受电磁力的方向向右，这样就产生了一个转矩。在转矩的作用下，电枢便按逆时针方向旋转起来。当电枢从图 1-2 所示的位置转过 90° 时，线圈磁感应强度为零，因而使电枢旋转的转矩消失，但由于机械惯性，电枢仍能转过一个角度，使电刷 A、B 分别与换向片 2、1 接触，于是线圈中又有电流流过。此时电流从正极流出，经过电刷 A、换向片 2、线圈到换向片 1 和电刷 B，最后回到电源负极。此时导体 ab 中的电流改变了方向，并且导体 ab 已由 N 极下转到 S 极下，其所受电磁力方向向右，同时，处于 N 极下的导体 cd 所受的电磁力方向向左，因此，在转矩的作用下，电枢继续沿着逆时针方向旋转。这样，电枢便一直旋转下去，这就是直流电动机的基本原理。

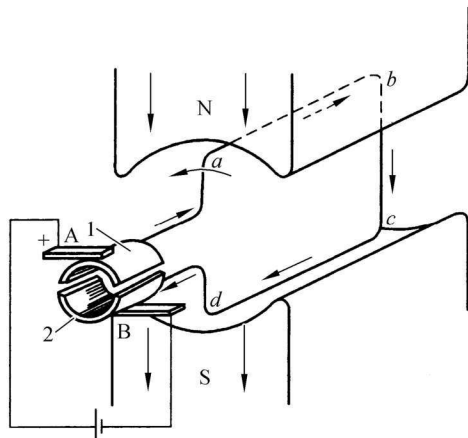


图 1-2 直流电动机工作原理示意图

由此可知：直流电机既可作为发电机运行，也可作为电动机运行，这就是直流电机的可逆原理。如果原动机拖动电枢旋转，通过电磁感应，便将机械能转换为电能，供给负载，这就是发电机；如果由外部电源给电机提供电能，由于载流导体在磁场中的作用产生电磁力，建立电磁转矩，拖动负载转动，又成为电动机了。

二、直流电机的基本结构

直流电机由定子（固定不动）与电枢（旋转）两大部分组成。定子与电枢之间有空隙，称为气隙。直流电机的结构示意图如图 1-3 所示。

（一）定子部分

定子是直流电机的静止部分，主要由主磁极、换向磁极、机座、端盖与电刷装置等组成。

1. 主磁极

主磁极由磁极铁心和励磁绕组组成。磁极铁心由 1~1.5 mm 厚的低碳钢板冲片叠压铆接而成。在励磁线圈中通入直流电流后，便产生主磁场。主磁极可以有一对、两对或者多对，它是用螺栓固定在机座上的。

2. 换向磁极

换向磁极由铁心和换向磁极绕组组成，位于两主磁极之间，是比较小的磁极。其作用是产生附加磁场，以改善电机的换向条件，减小电刷与换向片之间的火花。换向磁极绕组总是与电枢绕组串联，其匝数少，导线粗。换向磁极铁心通常都用厚钢板叠制而成。在小功率的直流电机中也有不装换向磁极的。

3. 机座

机座由铸钢或厚钢板制成，是电机的支架，用来安装主磁极和换向磁极等部件。它既是电机的固定部分，又是电机磁路的一部分。

4. 端盖

在机座的两边各有一个端盖，端盖的中心处装有轴承，用以支持转子的转轴。端盖上还固定有电刷架，利用弹簧把电刷压在转子的换向器上。

5. 电刷装置

电刷与换向器配合可以把转动的电枢绕组和外电路连接，并把电枢绕组中的交流量转换成电刷端的直流量。

（二）电枢部分

直流电机的转子又被称为电枢，主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。

1. 电枢铁心

电枢铁心通常用 0.5 mm 厚、表面涂有绝缘物的硅钢片叠压而成。其表面均匀开槽，用来嵌放电枢绕组。电枢铁心也是直流电机磁路的一部分。

2. 电枢绕组

电枢绕组由许多相同的线圈组成，按一定规律嵌放在电枢铁心的槽内，并与换向器连接，其作用是产生感应电动势和电磁转矩。

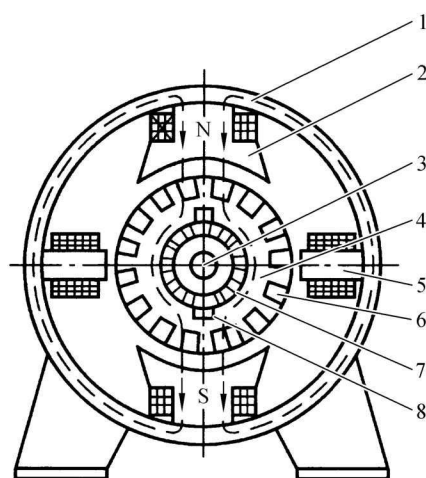


图 1-3 直流电机的结构示意图

1—机座；2—主磁极；3—转轴；4—铁心；
5—换向磁极；6—电枢绕组；7—换向器；
8—电刷

3. 换向器

换向器又称整流子，是直流电机的特有装置。它由许多楔形铜片组成，片间用云母或者其他垫片绝缘。其外观呈圆柱形，装在转轴上。每一换向铜片按一定规律与电枢绕组的线圈连接。在换向器的表面紧压着电刷，使旋转的电枢绕组与静止的外电路相通，其作用是将直流电动机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流，进而产生恒定方向的电磁转矩，或者将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换成输出的直流电压。

(三) 气 隙

气隙是电机磁路的重要部分。转子要旋转，定子与转子之间必须要有气隙，称为工作气隙。气隙路径虽短（对于小型电机一般为 $0.5 \sim 5 \text{ mm}$ ，对于大型电机一般为 $5 \sim 10 \text{ mm}$ ），但由于气隙磁阻远大于铁心磁阻，其对电机性能有很大影响。

三、直流电机的铭牌

电机制造厂按一定标准及技术条件要求，规定的电机高效长期稳定运行的经济技术参数，称为电机的额定值。每台直流电机的机座上都有一个铭牌，其上标有电机型号和各项额定值，用以表示电机的主要性能和使用条件。

1. 电机型号

型号表明了电机的系列及主要特点。知道了电机的型号，便可从相关手册及资料中查出该电机的有关技术数据。

直流电机应用广泛，型号很多。我国的直流电机的主要系列有：

Z 系列：一般用途的直流电动机。

ZF 系列：一般用途的直流发电机。

ZTD 系列：电梯用直流电动机。

ZZJ 系列：冶金及起重用直流电动机。

ZQ 系列：直流牵引电动机。

Z-H 系列：船用直流电动机。

ZA 系列：防爆安全用电动机。

2. 额定功率 P_N

额定功率指电机在额定运行状况下的输出功率。对于发电机，额定功率是指输出电功率， $P_N = U_N I_N$ ；对于电动机，额定功率是指轴上输出的机械功率， $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。

3. 额定电压 U_N

额定电压指额定运行状况下，直流发电机的输出电压或直流电动机的输入电压。

4. 额定电流 I_N

额定电流指额定电压和额定负载下允许电机长期输入（电动机）或输出（发电机）的电流。

5. 额定转速 n_N

额定转速指电动机在额定电压和额定负载下的旋转速度。

6. 电动机额定效率 η_N

电动机额定效率指直流电动机额定输出功率 P_N 与电动机额定输入功率 $P_1 = U_N I_N$ 比值的百分数。

此外，铭牌上还标有励磁方式、额定励磁电压、额定励磁电流和绝缘等级等参数。

第二节 直流电动机电枢绕组的感应电动势和电磁转矩

一、电枢绕组的感应电动势

电枢绕组的感应电动势是指电动机正、负电刷之间的电动势，它等于一个支路中所有串联导体感应电动势之和。当电枢转动时，电枢绕组中的导体在不断切割磁感线，因此每根载流导体中将产生感应电动势，其大小平均值为 $E = Blv$ ，其方向由右手定则确定。磁感应强度 B 与每极磁通 Φ 成正比，导体的运动速度 v 与电枢的转速 n 成正比，而导体的有效长度和绕组匝数都是常数，因此直流电动机两电刷间总的电枢电动势的大小为

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

式中 C_e ——与电动机结构有关的一常数，称为电动势系数；

Φ ——每极磁通 (Wb)；

n ——电动机转速 (r/min)；

E_a ——电枢电动势 (V)。

由此可知，直流电动机在旋转时，电枢电动势 E_a 的大小与每极磁通 Φ 和电动机转速 n 的乘积成正比，它的方向与电枢电流方向相反，在电路中起着限制电流的作用。

二、电磁转矩

根据电磁力定律，载流导体在磁场中受到电磁力的作用。每根载流导体在磁场中所受电磁力平均值为 $F = BIl$ 。对于给定的电动机，在线性磁路中，磁感应强度 B 与每个磁极的磁通 Φ 成正比，电磁力 F 与电枢电流 I 成正比，而导线在磁极磁场中的有效长度 l 及转子半径等都是固定的，仅取决于电动机的结构，因此直流电动机的电磁转矩 T 的大小可表示为

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-2)$$

式中 C_T ——与电动机结构有关的常数，称为转矩系数；

Φ ——每极磁通 (Wb)；

I_a ——电枢电流 (A)；

T ——电磁转矩 (N · m)。

由式 (1-2) 可知，直流电动机的电磁转矩 T 与每极磁通 Φ 和电枢电流 I_a 的乘积成正比。电磁转矩的方向由左手定则决定。直流发电机的电磁转矩是制动性转矩，其方向与电机旋转

方向相反；直流电动机的电磁转矩是拖动性转矩，其方向与电机旋转方向相同。

三、电磁功率

如果原动机带动直流发电机的电枢旋转，则电枢绕组切割气隙磁场而产生感应电动势 E_a 。在感应电动势 E_a 的作用下形成电枢电流 I_a ，其方向与感应电动势 E_a 相同。显然 I_a 与 E_a 的乘积表示发电机的总电功率，称为电磁功率 P_{em} 。

$$P_{em} = E_a I_a = C_e \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi I_a \times \frac{2\pi n}{60} = T \Omega \quad (1-3)$$

式中 a ——支路对数；

Ω ——角速度 (rad/s)；

N ——总导体数。

由式 (1-3) 可知，机械性质的功率 $T\Omega$ 与电性质的功率 $E_a I_a$ 相等，表明发电机把这部分机械功率转变为电功率。

第三节 他励电动机的运行原理与机械特性

图 1-4 所示为一台他励直流电动机的结构示意图和电路图。电枢电动势 E_a 为反电动势，与电枢电流 I_a 方向相反；电磁转矩 T 为拖动转矩，方向与电动机转子的旋转方向一致； T_L 为负载转矩； T_0 为空载转矩，方向与转子的旋转方向相反。

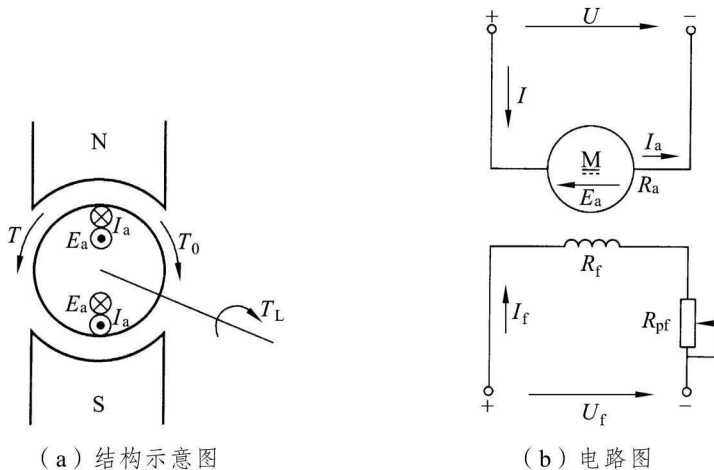


图 1-4 他励直流电动机结构示意图和电路图

一、直流电机的励磁方式

直流电机的励磁绕组的供电方式称为励磁方式。直流电机按励磁绕组与电枢绕组连接方式