

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

机电一体化系列教材

机电传动与控制

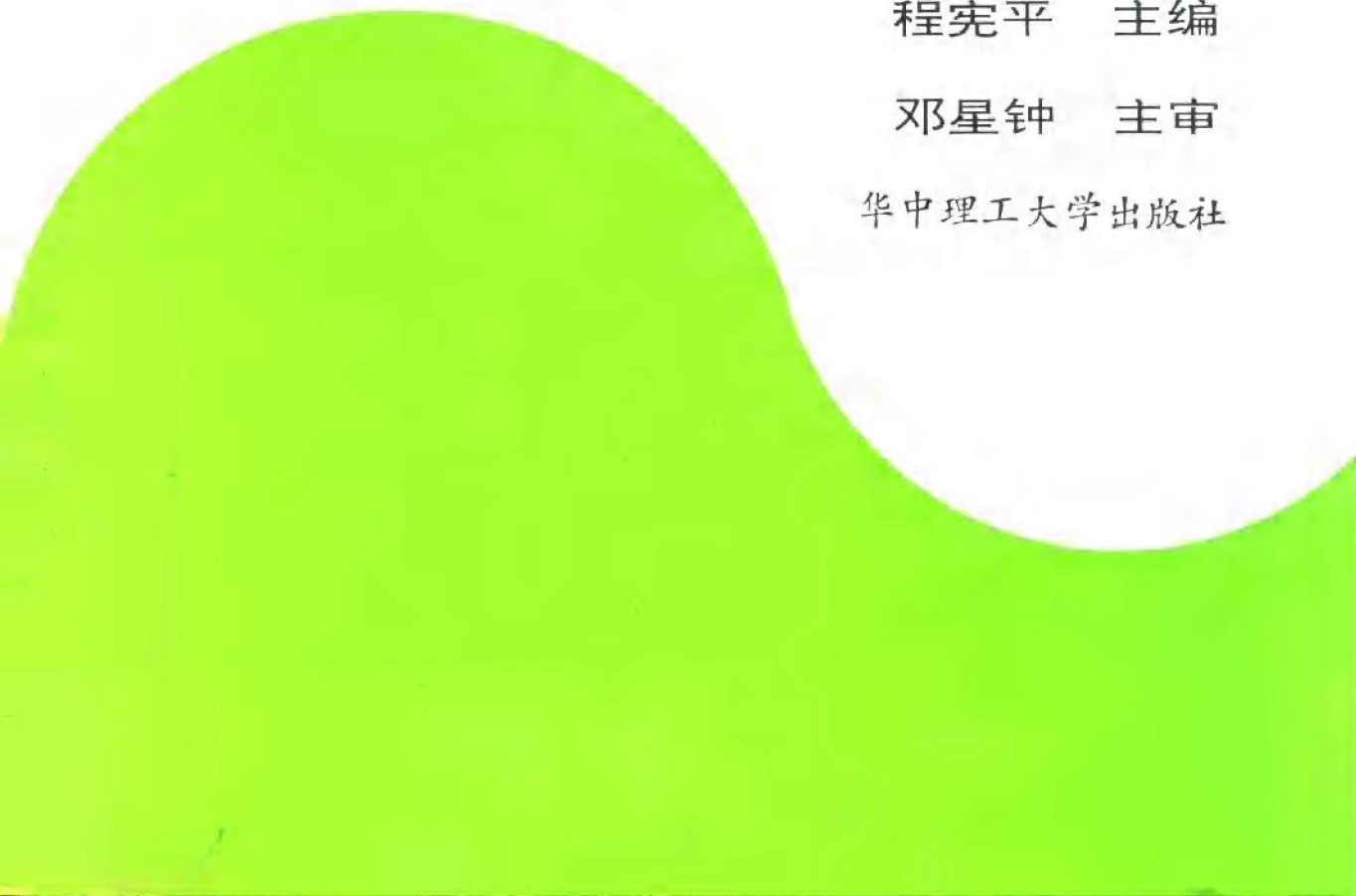
JIDIAN CHUANDONG YU KONGZHI

机械电子工程专业专科与相近专业本科适用

程宪平 主编

邓星钟 主审

华中理工大学出版社



机电一体化系列教材

机电传动与控制

(机械电子工程专业专科与相近专业本科适用)

1728-29

主编 程宪平
主审 邓星钟

华中理工大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机电传动与控制/程宪平主编
武汉：华中理工大学出版社，1999年4月

ISBN 7-5609-1437-3

- I. 机…
- II. 程…
- III. 电力传动控制设备
- IV. TM921. 5

机电一体化系列教材

机电传动与控制

主编 程宪平

主审 邓星钟

责任编辑：叶见欣

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编：430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学沔阳印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：19.25 字数：470 000

1997年3月第1版 1999年4月第2次印刷

印数：5 001—7 000

ISBN 7-5609-1437-3/TH·83

定价：18.50元

(本书若有印装质量问题，请向出版社发行科调换)

内 容 简 介

本书共分十章，内容包括：直流电机、交流电动机、控制电机、传动控制的基础理论，控制电器和继电-接触器控制系统，可编程序控制器，电力半导体器件，交、直流电动机以及步进电动机的开环和闭环控制系统等。

本书内容全面，突出机电结合，电为机用。尽量作到加强基础理论，注重实际应用，力求深入浅出，重点突出，以便于自学。

线路图和电气原理图的符号，均贯彻了新颁布的国家标准。

本书是机电一体化专科系列教材之一，也可作机械类专业及与之相近专业本科生的教材，也可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

序

机电一体化是一项将机械、电子、计算机、信息处理及自动控制等多种技术融为一体并综合运用的复合技术,近年来国内外在科技和生产领域都非常重视这一技术,竞相积极研究、应用和发展。我国用以设计开发了一些机电一体化产品和制造系统,使机械工业的振兴目标“三上一提高”(上品种、上质量、上水平、提高经济效益)实现了新的飞跃。

当今世界上国与国之间的竞争,说到底是在经济实力的竞争,而经济实力的竞争主要又是科学技术的竞争。

《党中央、国务院关于加速科学技术进步的决定》明确提出:“科教兴国,是指全面落实科学技术是第一生产力的思想,坚持教育为本,把科技和教育摆在经济、社会发展的重要位置,增强国家的科技实力及向现实生产力转化的能力,提高全民族的科技文化素质,把经济建设转移到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来,加速实现国家的繁荣昌盛。”“科技人才是第一生产力的开拓者,是社会主义现代化建设的骨干力量。为适应社会主义现代化建设的需要,提高经济、科技在国际上的竞争力,必须充分发挥现有科技人员的作用,培养造就千百万年轻一代科技人才,建设一支跨世纪的宏大科技队伍。”

近年来,我国有关高等院校为主动适应教育要面向现代化、面向世界、面向未来的需要,积极致力于培养机械技术与电子技术有机结合的机电一体化人才,改造原有相关专业,修订教学计划,国家教委决定增设“机电控制及自动化”专业。

随着教学改革的深入发展,必须更新教学内容和方法,编写出版作为师生进行教学活动重要依据的、符合专业培养目标和教学计划要求的教材。华中理工大学机械学院已率先陆续编写出版了本科专业用的机电一体化系列教材。为适应专科层次的教学需要,在华中理工大学出版社的积极倡导支持下,湖北工学院机械工程系邀请华中理工大学、武汉交通科技大学、武汉水利电力大学、武汉纺织工学院、武汉汽车工业大学、长沙铁道学院、广东工业大学、郑州工学院等11所院校的代表,于1995年1月共同商讨编写出版专科专业用机电一体化系列教材,成立了编审委员会,全面负责该系列教材编写出版的组织协调工作。经过这次会议和其后的几次会议的认真讨论和协商,决定结合各院校的教学需要,第一批编写机械制造基础、机电工程控制基础、机电传动与控制、工程测试基础、数控技术、单片机原理与接口技术、工业机器人以及CAD/CAM基础等八门课程的教材,各院校代表推荐并确定了学术水平较高、教学经验丰富的教师分工编写,由华中理工大学出版社出版。

该系列教材的编写是依据各院校代表提出并经讨论综合修订的教学大纲,遵

循保证基础、联系实际、反映现代、便于教学的原则。为保证书稿质量，决定实行各书主编负责制；聘请中科院院士华中理工大学校长杨叔子教授和湖北工学院院长宋尔涛教授为编委会顾问；聘请华中理工大学熊有伦（中科院院士）、廖效果、黄奇葵、卢文祥、邓星钟教授，武汉交通科技大学刘守善、陈定方教授，湖北工学院院长宋尔涛教授分别担任各书的主审。

该系列教材适用于普通高等学校机电一体化有关专科专业和非机械类本科专业，也可供函授大学、夜大学、广播电视大学、职工大学以及成人高等教育自学考试等有关专业使用，对广大工程技术人员和企业管理干部及职工自学机电一体化知识与技术也是一套较为适用的参考读物。

经过全体编审和出版人员的共同努力，这套系列教材的第一批八本书陆续出版了。在编审和出版过程中，得到了湖北工学院教务处长何金国副教授、机械系原系主任张建钢副教授及办公室负责同志，华中理工大学出版社领导及有关编辑的指导和支持；各参编院校的有关负责同志和工作人员，特别是参加编写的教师，做了大量的工作，付出了辛勤的劳动，给予了积极有效的支持和帮助。在此，谨向他们致以衷心诚挚的感谢。

由于编写的时间紧，编者的水平和经验有限，这次出版的八本书难免存在一些缺点和不足之处，恳请同行专家、学者和广大读者不吝指教，提出宝贵的批评和修改意见，为进一步提高该系列教材的质量而共同努力。

机电一体化系列教材编委会主任 席宏卓

1996年9月

前 言

将机械技术与电子技术有机地结合，用电子技术改造传统产业，借以振兴机械工业，进而促进国民经济的发展，这就需要一批机电一体化的复合型人才。本书是为适应机电一体化系列教材的市场需求而编写的。机电传动与控制课程是从机电一体化技术需要出发，集电机、控制电器、电力拖动、自动控制系统于一体的课程。它是培养机电一体化应用型人才所需电知识的主干课程。通过本课程的学习，学生能掌握电机、电器、拖动控制等必备的基础理论，掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点及应用场所，具备一定的分析及处理机电传动与控制系统的实际能力，并了解最新控制技术在机械设备中的应用。

本书根据机械电子工程专业的需要独自建立了内容比较全面的体系。书中的内容有作者从事科研工作的一些经验，也有近年从事教学工作的体会总结。在内容处理上，既注重基础理论知识，又注意与实际应用相结合；既描述了器件的外特性，又着重器件在控制系统中的应用；既结合当前的国情介绍当今广泛应用的机电传动与控制技术，又充分反映本领域的最新技术和发展趋势。在文字叙述上力求言简意赅，叙述清晰。在内容安排上由浅入深，便于自学、便于掌握。

全书共分十章。第一、二章对直流、交流电机的基本结构、工作原理、机械特性、启停和调速性能作了较详细的介绍，为系统应用作基础理论的准备；第三章较全面介绍了几种常用控制电机，以便正确选用和使用它们；在第四章机电传动控制基础理论的前提下，分别在后面五章中分析了各种传动控制系统。在内容安排上，首先介绍有触点逻辑控制系统，再介绍无触点连续控制系统。第五章较全面介绍各种常用的控制电器及继电器-接触器基本控制电路，分析了几种典型的控制系统实例，简介了基本设计方法；第六章可编程序控制器（PLC）是通过软件实现继电-接触器的控制。对一种型号（F—40型PLC）的指令、程序编制及实例的介绍，使读者能具备基本编程的能力。第七、八章首先对电力半导体器件及其基本电路进行了描述，然后分别介绍直流、交流调速系统，并加强了脉宽调制和交流变频调速的内容。第九章对步进电动机原理及其控制系统也作了较详细的叙述。第十章简述了电动机的选择。在第七、八、九章中都介绍了控制系统实例，并反映了当今本学科的新技术和新方法。

书中所采用的图形符号为中华人民共和国国家标准 GB4728—85，文字符号为 GB5094—85，GB71、57—87 等新标准。

本书可作为机械电子工程专业专科的教材，也可作为机械制造专业以及与之相近专业的本科教材，也可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

全书由程宪平统稿，其中第一、四、十章由余伟芦编写，第二、三、八章由

张忠夫编写，第七章由肖宏年编写。绪论及第五、六、九章由程宪平编写。

全书由华中理工大学邓星钟教授担任主审。他提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中的不足之处和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1995. 11.

绪 论

一、机电传动与控制的目的与意义

在现代化生产中，生产机械的先进性和电气自动化反映了工业生产发展的水平。现代化机械设备和生产系统已不再是单纯传统的机械系统，而是机电一体化的综合系统，电气传动与控制系统已成为现代生产机械的重要组成部分。因此，从广义上讲，机电传动与控制就是要使生产机械设备、生产线、车间甚至整个工厂都实现自动化。具体地讲，就是以电动机为原动机驱动生产机械，将电能转变为机械能，实现生产机械的启动、停止及调速，完成各种生产工艺过程的要求，实现生产过程的自动化。因此，机电传动与控制，既包含了拖动生产机械的电动机，又包含了控制电动机的一整套控制系统。

现代化生产要求提高生产自动化程度，提高加工效率，扩大工艺范围，加速产品更新换代和开发数字化、自动化、智能化的机电一体化的产品，这无疑对机电传动与控制系统提出了越来越高的要求。而今特别突出的是电子、航空、航天及汽车工业等新技术工业的发展，都依赖于机械工业制造技术，以及由“重大长厚”型转向“轻小短薄”型的工艺设备的发展。而每一次新技术的出现，都是同新型的加工方法、加工手段和测量控制手段的出现密切相关的。目前，我国正在加速制造技术领域的发展，引进了国外先进技术，吸收新技术成果，并发展了单机自动化、局部生产过程自动化、生产线自动化和全厂综合自动化。这些都离不开机电传动与控制。

随着计算技术、微电子技术、自动控制理论、精密测量技术的发展，随着电机及电器制造业及各种自动化元件的发展，机电传动与控制正在不断更新与发展。目前直流或交流无级调速控制系统代替了结构复杂、笨重的变速箱系统，简化了生产机械的结构，使机械向性能优良、运行可靠、重量轻、体积小、自动化发展。近 20 年来各种机电一体化产品如数控机床、工业机器人、电力机车、静电复印机、电动汽车、计算机磁盘光盘驱动器等都是现代生产机械自动化的成果，可见机电传动与控制在整个生产机械中占有极其重要的地位。为了培养跨世纪机电一体化的复合型实用人才，必须掌握机电传动与控制的理论和方法。

二、机电传动与控制系统的概况

（一）机电传动的发展

机电传动的发展是随着电动机的发展而发展的。20 世纪以前，电机的发展处于它的初级阶段，完成了由诞生到初步在工业上的应用，各种电机初步定型，完成了电机理论和电机设计的计算方法的建立和发展。20 世纪是自动化发展的时代，对电机也提出了越来越高的要求，并向性能良好、运行可靠、重量轻、体积小的发展方向发展。随着自动控制系统的发展及广泛应用，出现了多种高可靠性、高精度、快速性能好的控制电机。目前动力电机正在向大型、巨型化发展，而专用电机正在向着高精度、长寿命、微型化发展。由于各类电机已成为各种机电系统中的极为重要的元件，因此，机电传动将发展成为把电子学、电机学和控制论结合的新兴学科。

电动机的问世使电力拖动代替了蒸汽或水力的拖动。机电传动的发展大体经历了成组拖动、单电机拖动和多电机拖动三个阶段。所谓成组拖动就是一台电动机经天轴（或地轴）由皮带传动驱动一组生产机械。这种拖动方式传动路线长、生产效率低、结构复杂，一旦电动机发生故障，将造成成组生产机械的停车，现早已被淘汰。生产机械中广泛采用的单电机拖动，即一台电动机拖动一台生产机械，较成组拖动前进了一步，适合中小型机械，但生产机械的运动部件较多时，机械传动机构仍十分复杂。自30年代起，广泛采取了多电机拖动，即一台生产机械的每个运动部件分别由一台专门的电动机拖动，这样生产机械的结构就大为简化了。例如龙门刨床的刨台、左右垂直刀架与侧刀架、横梁及其夹紧机构，均分别由一台电动机拖动。在生产机械中也有一个运动部件采用多电动机拖动的。例如，链式输送机的工作机构是一条长的链式运输带，它往往采用多台电动机拖动。这种多电机拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构，而且控制灵活，为生产机械的自动化提供了有利的条件。

（二）控制系统的发展

随着生产的不断发展，现代机电传动要求实现局部或全部的自动控制。随着电机及各种自动控制器件的发展，机电传动控制系统也正在不断更新与发展。它主要经历了四个阶段：

继电器-接触器自动控制系统，这是借助继电器、接触器、按钮、行程开关等电器元件组成的控制系统，能实现对控制对象的启动、停车以及有级调速等控制，这是属于有触点的逻辑控制系统。它的结构简单、价格低廉、维修方便，广泛地应用在机床和其他机械设备上。但它的控制速度慢、控制精度差、灵活性差、可靠性不高。

40~50年代的交磁放大机-电动机控制系统，从断续控制发展到了连续控制，系统可随时检查控制对象的工作状态，对控制对象自动进行调整，它的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制，并简化了控制系统，生产效率提高了。但系统存在体积大、响应慢、噪声高等缺点。

60年代晶闸管的出现，组成了晶闸管-直流电动机无级调速系统，晶闸管具有功率大、体积小、效率高、动态响应快、控制方便等优点，使得控制系统得到了发展和广泛的应用，并正在向大容量方向发展。其后由于逆变技术的出现和高压大功率晶体管的问世，80年代以来，交流电动机无级调速系统有了迅速发展。由于交流电动机无电刷与换向器，较之直流电动机易于维护且寿命长，交流调速系统很有发展前途，至今用大功率晶体管逆变技术和脉宽调制技术（PWM）改变交流电的频率等实现电动机无级调速的系统在工业上逐渐得到应用。目前已出现了多种以微机为核心的变频器调速系统，使交流电动机的控制系统更简化，可靠性更高，拖动系统的性能优化了，为机电传动与自动控制开辟了新途径。

随着数控技术的发展，微计算机的发展，出现了具有运算功能和较大功率输出能力的可编程序控制器（PLC），用它的软件代替大量继电器，使硬件软化，实际上是一台按开关量输入的工业控制用的微型计算机。用它来替代继电器-接触器控制系统，提高了系统的可靠性和柔性，使控制技术又产生了一个飞跃。90年代的大型PLC正向着高速度、多功能、适应多级分布控制系统发展，同时微型PLC已发展成不仅具有开关型逻辑控制，定时/计数、逻辑运算功能，还具有处理模拟量I/O，数字运算功能，通信功能，可构成分布式控制系统，因此，它的应用越来越普遍，越来越广泛。它已是机电传动与控制的重要手段和发展方向。

随着微电子技术与计算技术的不断发展，机电传动与控制正向着计算机控制的生产过程自动化方向前进。它经历了单机数控（NC）→计算机群控（CNC）→柔性制造单元即加工中心（FMC）→柔性制造系统（FMS）→计算机集成制造系统（CIMS）的过程。80年代末出

现的由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统，是机械制造的自动化车间和自动化工厂的重要组成部分与基础。21世纪，将是计算机集成制造系统的时代，利用计算机辅助设计（CAD）与计算机辅助制造（CAM）形成产品设计和制造过程的一体化，使产品构思、设计、装配、试验和质量管理全过程实现自动化，也是当今世界机电一体化发展的新趋势。

目 录

绪论	(i)
第一章 直流电机	(1)
§ 1-1 直流电机的基本结构与工作原理	(1)
§ 1-2 直流发电机	(6)
§ 1-3 直流电动机的机械特性	(9)
§ 1-4 直流他励电动机的启动与调速	(14)
§ 1-5 直流他励电动机的制动	(18)
习题与思考题	(23)
第二章 交流电动机	(25)
§ 2-1 三相异步电动机的基本结构与工作原理	(25)
§ 2-2 三相异步电动机的定子电路和转子电路	(30)
§ 2-3 三相异步电动机的转矩与机械特性	(35)
§ 2-4 三相异步电动机的启动性能及方法	(39)
§ 2-5 三相异步电动机的调速方法	(47)
§ 2-6 三相异步电动机的制动	(49)
§ 2-7 单相异步电动机	(53)
§ 2-8 同步电动机	(56)
习题与思考题	(58)
第三章 控制电机	(61)
§ 3-1 伺服电动机	(61)
§ 3-2 微型同步电动机	(67)
§ 3-3 测速发电机	(70)
§ 3-4 自整角机	(75)
§ 3-5 旋转变压器	(79)
§ 3-6 感应同步器	(83)
习题与思考题	(87)
第四章 机电传动控制的基础理论	(89)
§ 4-1 机电传动系统的力学基础	(89)
§ 4-2 生产机械的机械特性	(93)
§ 4-3 机电传动系统的稳定运行	(95)
§ 4-4 机电传动控制系统的组成及方案选择	(96)
习题与思考题	(103)
第五章 控制电器与继电器-接触器控制系统	(105)
§ 5-1 常用控制电器	(105)
§ 5-2 生产机械电气设备的基本控制线路	(111)
§ 5-3 生产机械的继电器-接触器控制线路	(122)
§ 5-4 继电器-接触器控制线路的设计	(139)
习题与思考题	(144)
第六章 可编程序控制器	(146)

§ 6-1 可编程控制器的发展概况	(146)
§ 6-2 可编程控制器的结构与工作原理	(149)
§ 6-3 可编程控制器的指令系统与编程方法	(156)
§ 6-4 可编程控制器的应用	(164)
习题与思考题	(179)
第七章 直流传动与控制系统	(181)
§ 7-1 电力半导体器件	(182)
§ 7-2 可控整流电路	(187)
§ 7-3 逆变电路	(198)
§ 7-4 脉宽调制技术	(203)
§ 7-5 直流电动机单闭环调速系统	(206)
§ 7-6 直流电动机双闭环调速系统	(213)
§ 7-7 直流电动机可逆调速系统	(216)
§ 7-8 晶体管脉宽调速系统	(220)
习题与思考题	(225)
第八章 交流传动与控制系统	(227)
§ 8-1 晶闸管交流调压调速系统	(227)
§ 8-2 交流电动机变频调速系统	(233)
§ 8-3 其他交流调速系统	(244)
习题与思考题	(250)
第九章 步进电动机传动与控制系统	(251)
§ 9-1 步进电动机的基本结构与工作原理	(251)
§ 9-2 步进电动机的环形分配器	(257)
§ 9-3 步进电动机的驱动电路	(260)
§ 9-4 步进电动机传动与控制	(263)
§ 9-5 步进电动机的应用	(269)
习题与思考题	(270)
第十章 电动机的选择	(272)
§ 10-1 选择电动机额定功率的基本依据	(272)
§ 10-2 电动机的发热与冷却	(273)
§ 10-3 不同工作方式下电动机容量的选择	(276)
§ 10-4 电动机种类、额定电压、额定转速和形式的选择	(283)
习题与思考题	(284)
附录一 电气图形符号	(286)
附录二 电器文字符号	(290)
参考文献	(292)

第一章 直流电机

电动机可分为交流电动机和直流电动机两大类。

直流电机是机械能和直流电能互相转换的旋转机械装置。直流电机可作为电动机，将电能转换为机械能，也可作为发电机，将机械能转换为电能。

直流电动机虽然比三相异步电动机的结构复杂、维护也不方便，但由于它的调速性能较好，启动转矩较大，因此在速度调节要求较高、正反转和启制动频繁或多单元同步协调运转的生产机械上，广泛采用直流电动机来拖动。例如龙门刨床、镗床、轧钢机等均采用直流电动机作动力。

直流发电机可作为直流电源。例如供给直流电动机、同步电机励磁、蓄电池充电、汽车、船舶上的用电，电镀、电解、电焊等方面的直流电源。由于直流发电机的构造复杂、价格昂贵，目前已被晶闸管等整流设备逐渐取代。但从电源的质量与可靠性来说，直流发电机仍有其优点，至今直流发电机仍被广泛应用。

本章主要讨论直流电机的基本工作原理及其特性，特别是直流电动机的机械特性及启动、调速、制动的基本原理和基本方法。

§ 1-1 直流电机的基本结构与工作原理

一、直流电机的基本结构

直流电机可概括地分为静止和转动两大部分。静止部分称为定子；转动部分称为转子。定、转子之间由空气隙分开。其结构如图 1-1 所示。

1. 定子部分

定子由主磁极、机座、换向极、端盖和电刷装置等组成。

(1) 主磁极 它的作用是产生恒定的主极磁场，由主磁极铁心和套在铁心上的励磁绕组组成。铁心的上部叫极身，下部叫极掌。极掌的作用是减小气隙的磁阻，使气隙磁通沿气隙空间分布更均匀，并有支撑绕组的作用。为了保证各励磁电流严格相等，励磁绕组相互间一般采用串联，而且在连接时要保证 N、S 极交替出现。

(2) 换向极 换向极的作用是消除电机带负载时换向器产生的有害火花，以改善换向。换向极数目一般与主磁极数目相等，只有小功率的直流电机才不装换向极或装设只有主磁极一半的换向极。

(3) 机座 机座的作用有两个，一是作为各磁极间的磁路，这部分称为定子磁轭；二是作为电机的机械支撑。

(4) 电刷装置 其作用，一是使转子绕组能与外电路接通，使电流经电刷输入电枢或从电枢输出；二是与换向器相配合，获得直流电压。

2. 转子部分

转子是直流电机的重要部件。由于感应电势和电磁转矩都在转子绕组中产生，是机械能

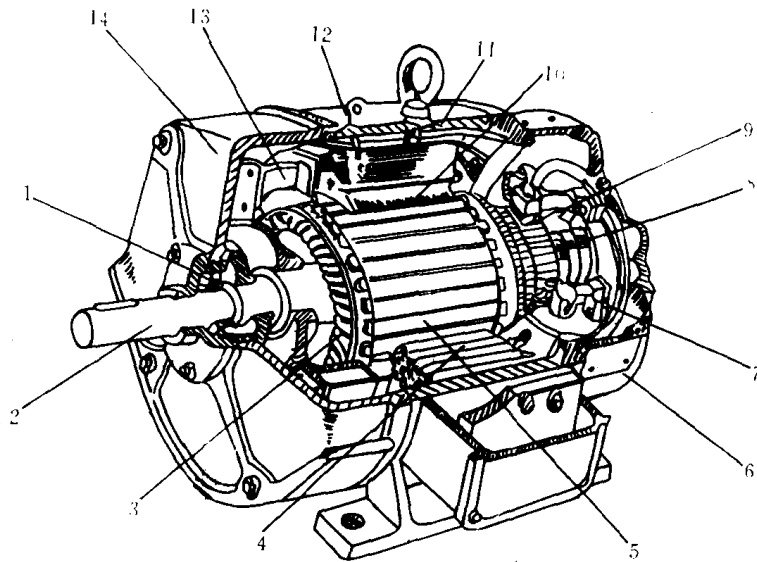


图 1-1 直流电机结构

1—轴承；2—轴；3—电枢绕组；4—换向极绕组；5—电枢铁心；6—后端盖；

7—刷杆座；8—换向器；9—电刷；10—主磁极；11—机座；12—励磁绕组；13—风扇；14—前端盖

与电能相互转换的枢纽，因此称作电枢。电枢主要包括电枢铁心、电枢绕组、换向器等。另外转子上还有风扇、转轴和绕组支架等部件。

(1) 电枢铁心 电枢铁心的作用有两个，一是作为磁路的一部分，二是将电枢绕组安放在铁心的槽内。

(2) 电枢绕组 电枢绕组的作用是产生感应电势和通过电流，使电机实现机电能量转换。它由许多形状完全相同的线圈按一定规律联接而成。每一线圈的两个边分别嵌在电枢铁心的槽里，线圈的这两个边也称为有效线圈边。

(3) 换向器 换向器的作用，在直流电动机中，是将电刷上的直流电流转换为绕组内的交变电流，以保证同一磁极下电枢导体的电流方向不变，使产生的电磁转矩恒定；在直流发电机中，是将绕组中的交流感应电势转换为电刷上的直流电势，所以换向器是直流电机中的关键部件。

此外，在静止的主磁极与电枢之间，有一空气隙，它的大小和形状对电机性能影响很大。空气隙的大小随容量不同而不同。空气隙虽小，但由于空气的磁阻较大，因而在电机磁路系统中有着重要的影响。

二、直流电机的基本工作原理

直流电机的工作原理是基于电磁感应定律和电磁力定律。下面借助一个简单的直流电机模型，分别说明发电机、电动机最基本的工作原理。

1. 直流发电机的工作原理

图 1-2 所示的为一台最简单的直流发电机模型。图中有一对在空间固定的永久性磁铁，在 N 极和 S 极之间有一个在外力作用下可转动的线圈 abcd。线圈的首、尾端分别连在两个相互绝缘的半圆形铜质换向片上，这两个换向片就是最简单的机械换向器。它固定在转轴上，可随轴转动，与轴也是绝缘的。为了增强磁极间的磁场，线圈安放在图 1-2 虚线所表示的铁心上。为了把线圈与外电路接通，换向片上放置了一对在空间静止不动的电刷 A 和 B。

当原动力拖动转子匀速逆时针方向转动时，线圈边 ab 和 dc 将分别切割 N 极和 S 极下的磁力线，根据法拉第电磁感应定律，各线圈边中将产生感应电势。感应电势的方向可用右手定则判断：将右手掌心迎向 N 极，拇指指向导体运动方向，与拇指垂直的其他 4 指的方向就是感应电势的方向。据此可判断图 1-2 所示的瞬间，运动在 N 极下的导体 ab 的感应电势方向为由 b 指向 a ，而运动在 S 极下的导体 dc 的感应电势方向由 d 指向 c 。当转子上的线圈逆时针向前转动 180° 时，导体 ab 与 dc 位置互换，转到 S 极下的导体 ab ，感应电势方向变为由 a 指向 b ；而转到 N 极下的导体 dc ，其感应电势方向变为由 c 指向 d 。转子连续转动，每转一周，导体 ab 和 dc 上的电势方向都要交变一次。

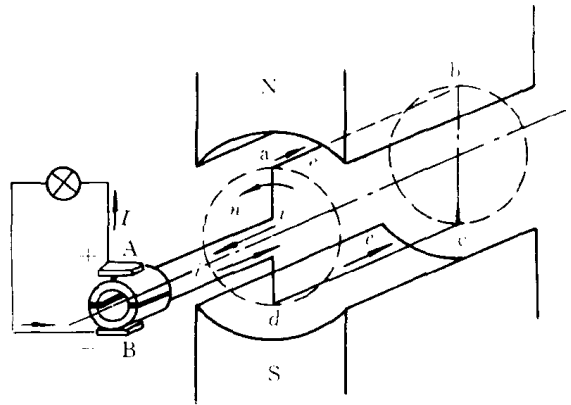


图 1-2 直流发电机的工作原理

图 1-2 所示的瞬间，由于线圈的两个线圈边分别位于 N 极和 S 极下，故两个线圈边中所感应的电势大小相等，方向相反，因而线圈首尾端的电势是两个线圈边电势之和，即为一个线圈边电势的二倍，方向为 $dcba$ 。当转子线圈逆时针转动 180° 时，由于每个线圈边中的电势方向都发生了改变，所以线圈端电势方向也发生改变，为 $abcd$ 。由此可见，转子转动时，线圈端电势也是交变的。由于电刷与磁极是相对静止的，电刷仅和运动在一定极性磁极下的线圈边相接触，因此虽然线圈内部感应电势是交变的，但电刷上输出的电势方向却是不变的。当电刷之间接上负载时，在感应电势的作用下，电路中就有电流产生，其方向与感应电势的方向一致，即将轴上的机械能变成了电能输出。

直流电机电刷间的电势常称为电枢电势，可用下式表示：

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

式中， E_a 为电枢电势 (V)； Φ 为主极磁通 (Wb)； n 为电枢转速 (r/min)； C_e 为与电机结构有关的常数，称为电势常数。

2. 直流电动机的工作原理

如果在图 1-2 所示结构中除去原动机，而在 A、B 电刷上接入直流电源 U ，这时该电机模型就成为电动机，如图 1-3 所示。

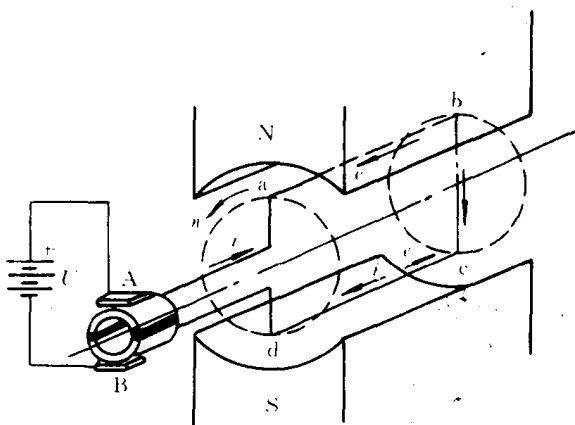


图 1-3 直流电动机工作原理

从图中可以看出，接入直流电源以后，电刷 A 为正极性，电刷 B 为负极性。电流从正电刷 A 经线圈 ab 、 cd ，到负电刷 B 流出。根据电磁力定律，在载流导体与磁力线垂直的条件下，线圈每一个有效边将受到一电磁力的作用。电磁力的方向可用左手定则判断，伸开左手，掌心向着 N 极，4 指指向电流的方向，与 4 指垂直的拇指方向就是电磁力的方向。在图示瞬间，导线 ab 与 dc 中所受的电磁力为逆时针方向，在这个电磁力的作用下，转子将逆时针旋转，即

图中 n 的方向。随着转子的转动，线圈边位置互换，这时要使转子连续转动，则应使线圈边中的电流方向也加以改变，即要进行换向。由于换向器与静止电刷的相互配合作用，线圈不论转到何处，电刷 A 始终与运动到 N 极下的线圈边相接触，而电刷 B 始终与运动到 S 极下的线圈边相接触，这就保证了电流总是由电刷 A 经 N 极下导体流入，再沿 S 极下导体经电刷 B 流出。因而电磁力和电磁转矩的方向始终保持不变，使电机沿逆时针方向连续转动。

在图 1-3 所示的电动机模型中，转子线圈中流过电流时，受电磁力的作用而产生的电磁转矩可用下式表示：

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

式中， T 为电磁转矩 ($N \cdot m$)； I_a 为电枢电流 (A)； C_m 为与电机结构有关的常数，称为转矩常数， $C_m = 9.55 C_e$ 。

当线圈在磁场中转动时，线圈的有效边也切割磁力线，根据对发电机所作的分析，显然其中也会出现感应电势。根据右手法则，由磁场及转动方向不难判断出有效边中感应电势的方向，总是与其中的电流方向相反，故该感应电势又常称为电枢反电势。这时电机将电能转换成了轴上输出的机械能。

从以上分析可看出，对一台直流电机究竟是作发电机运行还是作电动机运行，关键在于外加的条件，也就是输入功率的形式。如果从轴上输入机械功率，电机作发电机运行，向外输出直流电能。如果从电刷上输入电功率，电机即作电动机运行，向外输出机械功率。这种同一台电机在不同的外界条件下作发电机或电动机运行的原理，称为电机的可逆性原理。

三、他励直流电动机的基本方程式

1. 电压平衡方程式

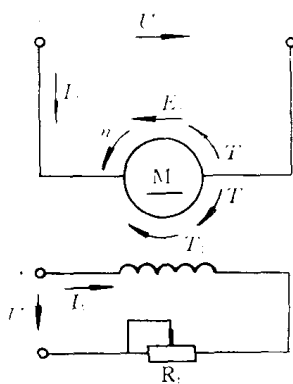


图 1-4 直流他励电动机原理电路

直流他励电动机的原理电路如图 1-4 所示。根据图中各物理量的参考正方向，若忽略电刷的压降，电枢电压平衡方程式为：

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-3)$$

式中， R_a 为电枢绕组的等效电阻。主极磁通的大小决定于励磁电流 I_f ， I_f 可以通过改变励磁电路的电阻 R_f 来调节。

2. 转矩平衡方程式

他励电动机的电磁转矩为拖动转矩，电枢的旋转方向与电磁转矩方向一致。当稳定运行时，电动机的转矩平衡方程式为：

$$T = T_0 + T_L \quad (1-4)$$

式中， T 为电动机电磁转矩； T_0 为空载转矩，它反映了电动机在没有带负载时内部损耗的一部分转矩； T_L 为轴上所带的负载静阻

转矩，电动机稳定运行时，轴上输出转矩 T_2 将与 T_L 相平衡，则有

$$T_2 = T_L \quad (1-5)$$

$$T = T_0 + T_2 \quad (1-6)$$

3. 功率平衡方程式

将式 (1-3) 两边同乘电枢电流 I_a ，有

$$U I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a \quad (1-7)$$

式中， $U I_a$ 是电源输入功率，用 P_1 表示； $I_a^2 R_a$ 是电枢铜损耗； $E_a I_a$ 是电枢反电势从电源吸收的电功率，即为电磁功率 P_M ，由