



普通高等教育 电气工程  
自动化 系列规划教材

Motor and Electric  
Drive Control System

# 电机与电力拖动 控制系统

◎ 主 编 张红莲

◎ 副主编 王立玲 刘崇伦 张军伟



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育  $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$  系列规划教材

# 电机与电力拖动控制系统

主 编 张红莲  
副主编 王立玲 刘崇伦 张军伟  
参 编 袁兴华 周颖昌 马红艳  
主 审 范孝良

机械工业出版社

本书主要讲述电机、电力拖动及其控制系统的基本理论,包含直流和交流两大部分。直流电机及拖动控制部分有:直流电机的原理、结构及运行特性;直流电动机的电力拖动,包括直流电动机的起动、制动、调速原理及各种运行方式分析;直流电动机调速控制系统,包括转速单闭环调速控制系统和转速电流双闭环调速控制系统的分析和设计;直流调速系统的建模与仿真。交流电机及拖动控制部分有:三相异步电动机的原理、结构及运行特性;三相异步电动机的电力拖动,包括三相异步电动机的起动、制动、调速的原理及各种运行方式分析;交流电动机调速控制系统,包括基于稳态模型的异步电动机的变频调速系统,基于动态模型的异步电动机的调速系统;交流调速系统的建模与仿真。最后介绍了电力拖动系统电动机的选择方法及应用。

本书可作为高等院校的自动化、电气工程及其自动化、机械工程及其自动化等专业,以及高等职业技术学院、高等专科学校、继续教育学院等专科学校的电气技术、工业自动化、机电应用技术等专业的教材,也可作为有关工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动控制系统 / 张红莲主编. —北京:机械工业出版社, 2013.9

普通高等教育电气工程自动化系列规划教材

ISBN 978-7-111-42908-1

I. ①电… II. ①张… III. ①电力传动—自动控制系统—高等学校—教材②电机—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第131270号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 贡克勤

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京汇林印务有限公司印刷

2013年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·505千字

标准书号:ISBN 978-7-111-42908-1

定价:39.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

电机与电力拖动、调速控制在国民经济各部门起着重要的作用，电气传动技术飞速发展。为了适应学科发展的需要，增强学生面向工程实际的适应能力，我们通过总结教师的教学经验及学生的反馈情况，参考多种版本教材并整合完善了相应内容和结构，将“电机学”、“电力拖动”和“运动控制系统”三门课程系统地、有机地融为一体，编写了这本《电机与电力拖动控制系统》教材，以满足教学改革、科技进步和人才培养的需要。

本书重点介绍直流电机和三相异步电动机的原理、结构及运行特性，直流电动机和异步电动机的拖动基础，以及直流电动机和异步电动机的调速控制系统的基本原理和典型应用，遵循理论和实际相结合的原则，使学生既掌握电力拖动和各种调速控制系统的基本原理，又掌握这类系统的分析方法及应用。本教材内容选材合理，理论联系实际，注重工程应用。

本书具有以下的特点：

- 1) 总体结构上体现了本领域知识的先进性和完整性。
- 2) 做到理论联系实际，从实际应用提出问题，进而解决问题。
- 3) 内容集中系统，重点突出，主次分明。
- 4) 每章最后都有小结，并结合实际情况给出相关的实例分析和习题，利于学生理解掌握所学内容，做到学以致用。
- 5) 利用 MATLAB/SIMULINK 软件对调速系统进行仿真实验，并给出仿真结果，使学生能够加深理解所学理论知识。

6) 使用面较宽，可作为电气、自动化、机械等相关专业的本科生的专业基础课教材。

全书共分7章，第1章介绍直流电机；第2章介绍直流电动机的电力拖动；第3章介绍直流电动机调速控制系统；第4章介绍三相异步电动机；第5章介绍三相异步电动机的电力拖动基础；第6章介绍异步电动机调速控制系统，包括基于稳态模型和基于动态模型的异步电动机调速控制系统；第7章介绍电力拖动系统电动机的选择。

本教材由张红莲任主编，由王立玲、刘崇伦、张军伟任副主编，参加本教材编写的还有袁兴华、周颖昌、马红艳，全书由张红莲统稿、定稿。华北电力大学范孝良教授对全书进行了认真的审阅，并提出了许多宝贵意见。在教材的编写过程中参阅和选用了许多相关教材和文献，在此向这些文献资料的作者表示衷心的感谢。

本书可作为高等院校的自动化、电气工程及其自动化、机械工程及其自动化等专业，以及高等职业技术学院、高等专科学校的电气技术、工业自动化、机电应用技术等专业的教材，也可作为从事电力拖动和运动控制系统研究设计的工程技术人员的参考用书。

由于编者的水平有限和编写时间仓促，书中存在的错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 绪论 ..... 1

0.1 电机及电力拖动系统概述 ..... 1

0.2 交直流调速控制系统概述 ..... 2

0.3 本课程的任务 ..... 5

## 第1章 直流电机 ..... 6

1.1 直流电机的工作原理和结构 ..... 6

1.1.1 直流电机的工作原理 ..... 6

1.1.2 直流电机的主要结构 ..... 8

1.2 直流电机的铭牌数据及主要系列 ..... 11

1.2.1 直流电机的铭牌数据 ..... 11

1.2.2 直流电机系列 ..... 12

1.3 直流电机的电枢绕组 ..... 12

1.3.1 直流电机电枢绕组的一般介绍 ..... 12

1.3.2 直流电机电枢绕组的基本形式 ..... 15

1.4 直流电机的磁场 ..... 19

1.4.1 直流电机的空载磁场 ..... 19

1.4.2 直流电机负载时的磁场及电枢反应 ..... 20

1.5 直流电机的电磁转矩和电枢电动势 ..... 22

1.5.1 直流电机的电枢电动势 ..... 22

1.5.2 直流电机的电磁转矩 ..... 23

1.6 直流电机的换向 ..... 23

1.6.1 换向概述 ..... 23

1.6.2 换向的电磁理论 ..... 24

1.6.3 改善换向的方法 ..... 26

1.6.4 防止环火与补偿绕组 ..... 26

1.7 直流电动机 ..... 28

1.7.1 直流电动机按励磁方式分类 ..... 28

1.7.2 直流电动机的基本方程式 ..... 28

1.7.3 他励(并励)直流电动机的工作特性 ..... 29

1.7.4 串励直流电动机的工作特性 ..... 31

1.7.5 复励直流电动机的工作特性 ..... 32

1.7.6 直流电动机的适用范围 ..... 33

1.8 直流发电机 ..... 33

1.8.1 直流发电机的励磁方式 ..... 33

1.8.2 直流发电机的基本方程式 ..... 34

1.8.3 他励直流发电机的特性 ..... 35

1.8.4 并励直流发电机 ..... 38

1.8.5 复励直流发电机 ..... 40

本章小结 ..... 40

习题 ..... 41

## 第2章 直流电动机的电力拖动 ..... 43

2.1 电力拖动系统的动力学基础 ..... 43

2.1.1 电力拖动系统的组成 ..... 43

2.1.2 电力拖动系统的运动方程式 ..... 43

2.1.3 多轴拖动系统的折算 ..... 44

2.2 负载的转矩特性 ..... 49

2.3 他励直流电动机的机械特性 ..... 51

2.3.1 他励直流电动机的机械特性方程 ..... 51

2.3.2 他励直流电动机的机械特性曲线 ..... 52

2.3.3 电力拖动系统稳定运行条件 ..... 56

2.4 他励直流电动机的起动 ..... 57

2.4.1 对起动的要求 ..... 57

2.4.2 电枢回路串电阻起动 ..... 58

2.4.3 减压起动 ..... 61

2.5 他励直流电动机的制动 ..... 61

2.5.1 能耗制动 ..... 61

2.5.2 反接制动 ..... 63

2.5.3 回馈制动(再生制动) ..... 65

2.5.4 他励直流电动机的四象限运行 ..... 67

2.6 他励直流电动机的调速 ..... 67

2.6.1 调速指标 ..... 67

2.6.2 他励直流电动机的调速方法 ..... 69

2.7 直流调速方式与负载的配合 ..... 74

2.7.1 电动机的容许输出与充分利用	74	3.6.1 双闭环直流调速系统的组成及静特性	117
2.7.2 他励直流电动机的调速方式	74	3.6.2 双闭环直流调速系统的数学模型	120
2.7.3 负载类型与电动机调速方式的匹配	75	3.6.3 双闭环直流调速系统的起动过程	121
2.8 串励和复励直流电动机的电力拖动	77	3.6.4 双闭环直流调速系统的动态抗扰性能	122
2.8.1 串励直流电动机的电力拖动	77	3.7 调速器的工程设计方法	123
2.8.2 复励直流电动机的电力拖动	81	3.7.1 工程设计方法的基本思路	123
2.9 电力拖动系统的过渡过程	82	3.7.2 典型系统及其参数与性能指标的关系	124
2.9.1 过渡过程概念	82	3.7.3 工程设计中的近似处理	133
2.9.2 电力拖动系统动态分析	82	3.8 转速电流双闭环直流调速系统的设计	137
本章小结	85	3.8.1 电流调节器的设计	138
习题	86	3.8.2 转速调节器的设计	141
<b>第3章 直流电动机调速控制系统</b>	<b>88</b>	3.9 弱磁控制的直流调速系统	147
3.1 直流调速系统的组成及数学模型	88	3.9.1 变压与弱磁的配合控制	147
3.1.1 直流调速系统的组成	88	3.9.2 励磁电流的闭环控制	147
3.1.2 可控直流电源	88	3.10 可逆直流调速控制系统	149
3.1.3 直流调速系统及数学模型	91	3.10.1 PWM 可逆直流调速控制系统	149
3.2 调速系统的控制要求和开环直流调速系统	99	3.10.2 V-M 可逆直流调速控制系统	150
3.2.1 调速系统的控制要求	99	3.11 直流调速系统与仿真	154
3.2.2 开环直流调速系统的特性及存在的问题	99	3.11.1 开环直流调速系统的仿真	155
3.3 转速负反馈单闭环直流调速系统	101	3.11.2 有静差转速负反馈直流调速系统的建模与仿真	156
3.3.1 单闭环直流调速系统的组成及静特性	101	3.11.3 单闭环无静差转速负反馈直流调速系统的建模与仿真	157
3.3.2 单闭环直流调速系统稳态参数的计算	106	3.11.4 电流截止负反馈直流调速系统的建模与仿真	158
3.3.3 单闭环直流调速系统的动态分析	107	3.11.5 转速电流双闭环直流调速系统的建模与仿真	159
3.4 无静差直流调速系统和积分控制规律	110	本章小结	161
3.4.1 比例调节器的特性	110	习题	161
3.4.2 比例积分调节器的特性	110	<b>第4章 三相异步电动机</b>	<b>165</b>
3.4.3 无静差直流调速系统及其稳态参数计算	113	4.1 三相异步电动机的工作原理和基本结构	165
3.5 单闭环直流调速系统的限流保护	114		
3.5.1 电流截止负反馈	114		
3.5.2 带电流截止负反馈的单闭环直流调速系统	116		
3.6 转速电流双闭环直流调速系统	117		

4.1.1	三相异步电动机的工作原理	165	表达式	201	
4.1.2	三相异步电动机的基本结构	166	5.1.2	三相异步电动机的固有机 特性和人为机械特性	203
4.1.3	三相异步电动机的铭牌数据及 主要系列	167	5.2	三相异步电动机的起动	207
4.2	三相交流电机的定子绕组	169	5.2.1	三相异步电动机的起动性能 分析	207
4.2.1	三相交流绕组的基本要求和 分类	169	5.2.2	三相异步电动机的起动方法	207
4.2.2	单层绕组	170	5.3	三相异步电动机的制动	219
4.2.3	双层叠绕组	174	5.3.1	三相异步电动机的能耗制动	219
4.3	绕组的感应电动势	176	5.3.2	三相异步电动机的反接制动	221
4.3.1	线圈的感应电动势	176	5.3.3	三相异步电动机的回馈制动	223
4.3.2	线圈组的电动势	178	5.4	三相异步电动机的调速	225
4.3.3	相电动势	178	5.4.1	转差功率消耗型异步电动机 调速方法	225
4.3.4	短距因数与分布因数	179	5.4.2	转差功率回馈型异步电动机 调速方法——串级调速	227
4.4	绕组的磁动势	179	5.4.3	转差功率不变型异步电动机 调速方法	229
4.4.1	单相绕组的磁动势——脉振磁 动势	179	本章小结	234	
4.4.2	三相绕组的磁动势——旋转磁 动势	183	习题	234	
4.5	三相异步电动机的空载运行	187	<b>第6章 异步电动机调速控制系统</b>	237	
4.5.1	空载运行时的电磁关系	187	6.1	变压变频调速的基础知识	237
4.5.2	空载运行时的定子电压平衡 关系	188	6.1.1	电压频率协调控制时的机械 特性	237
4.6	三相异步电动机的负载运行	189	6.1.2	交-直-交变压变频器	240
4.6.1	负载运行时的物理情况	189	6.2	变压变频脉宽调制(PWM)技术	243
4.6.2	异步电动机的等效电路及相 量图	191	6.2.1	正弦波脉宽调制(SPWM)控制 技术	244
4.7	三相异步电动机的功率和电磁转矩	194	6.2.2	电流跟踪PWM(CFPWM)控制 技术	246
4.7.1	功率转换过程和功率平衡方 程式	194	6.2.3	电压空间矢量PWM(SVPWM) 控制技术	247
4.7.2	转矩平衡方程式	195	6.3	基于异步电动机稳态模型的变压 变频调速	253
4.7.3	电磁转矩公式	196	6.3.1	转速开环变压变频调速系统	254
4.8	三相异步电动机的工作特性	197	6.3.2	转速闭环转差频率控制的变压 变频调速系统	256
本章小结		198	6.4	异步电动机的动态数学模型和坐标 变换	259
习题		199	6.4.1	异步电动机的动态数学模型	259
<b>第5章 三相异步电动机的电力拖动 基础</b>		201			
5.1	三相异步电动机的机械特性	201			
5.1.1	三相异步电动机的机械特性				

6.4.2	坐标变换和变换矩阵 .....	264	6.8.1	三相异步电动机直接起动情况下的仿真 .....	288
6.5	异步电动机在两相坐标系上的动态数学模型 .....	268	6.8.2	三相异步电动机开环VVVF系统的仿真 .....	289
6.5.1	异步电动机在两相任意旋转坐标系(dq坐标系)上的数学模型 .....	268	6.8.3	矢量控制系统的仿真 .....	292
6.5.2	异步电动机在两相静止坐标系( $\alpha\beta$ 坐标系)上的数学模型 .....	270	6.8.4	直接转矩控制仿真分析 .....	297
6.5.3	异步电动机在两相同步旋转坐标系上的数学模型 .....	271	6.9	电力拖动控制系统应用 .....	300
6.5.4	异步电动机在两相坐标系上的状态方程 .....	271	6.9.1	变频恒压供水系统 .....	300
6.6	异步电动机矢量控制变频调速系统 .....	274	6.9.2	多电动机同步调速系统 .....	301
6.6.1	矢量控制系统的基本思路和转子磁链模型 .....	274	6.9.3	卷绕机械恒张力控制 .....	302
6.6.2	转速磁链闭环的矢量控制系统——直接矢量控制系统 .....	280	本章小结 .....	303	
6.6.3	磁链开环转差型矢量控制系统——间接矢量控制系统 .....	281	习题 .....	303	
6.6.4	矢量控制系统的特点与存在的问题 .....	283	<b>第7章 电力拖动系统电动机的选择</b> .....	305	
6.7	异步电动机直接转矩控制变频调速系统 .....	283	7.1	拖动系统选择电动机的原则 .....	305
6.7.1	直接转矩控制的实质 .....	283	7.2	电动机的发热与冷却 .....	305
6.7.2	定子电压矢量对磁链和转矩的调节作用 .....	284	7.2.1	电动机的发热 .....	305
6.7.3	异步电动机直接转矩控制系统 .....	285	7.2.2	电动机的冷却 .....	307
6.8	三相异步电动机调速系统的仿真 .....	288	7.3	电动机的工作制 .....	307
			7.4	电动机负载功率的计算和额定功率的选择 .....	309
			7.4.1	电动机额定功率选择的步骤 .....	309
			7.4.2	负载功率的计算 .....	309
			7.4.3	电动机额定功率的选择 .....	310
			7.5	电动机种类、结构的选择 .....	316
			7.5.1	电动机种类的选择 .....	316
			7.5.2	电动机结构型式的选择 .....	317
			本章小结 .....	317	
			习题 .....	317	
			<b>参考文献</b> .....	319	



# 绪 论

## 0.1 电机及电力拖动系统概述

### 1. 电机的发展及应用

电能作为一种能量形式，由于其易于传输、变换、分配和控制，已成为使用最为广泛的现代能源，电能也是人们生产和生活中使用动力的主要来源。在电能的生产、传输、变换、分配、控制和管理中，电机是主要的机电能量转换装置。电机是利用电磁感应定律实现电能的转换或传递的一种电磁装置，从能量转换的角度看，电机可分为发电机、电动机和变压器三大类。在电能的生产过程中，发电机将机械能转换成电能；在电能的传输过程中，变压器是主要的传输设备；在电能的使用中，电动机将电能转换成机械能。

在现代工业和日常生活中，到处都有电机的存在。从以煤、天然气等为燃料的火力发电厂以及以核反应堆中核裂变所释放的热能进行发电的核能发电厂中的发电机，以水利资源为动力的水轮发电机，以风力为动力的风力发电机，到输电系统中的变压器，从工厂的自动化生产线、车间的机床、机器人到家用电器甚至电动玩具等，电机几乎无处不在。

目前，电机的发展主要有三种趋势：

- 1) 大型化。单机容量越来越大，如 60 万 kW 及以上的汽轮发电机。
- 2) 微型化。为适应设备小型化的要求，电机的体积越来越小，重量越来越轻。
- 3) 新原理、新工艺、新材料的电机不断出现，如无刷直流电机、直线电机、超声波电机等。

### 2. 电力拖动系统的组成

电力拖动又称为电气传动，电力拖动系统用电动机作为原动机，拖动各种生产机械的工作机构运动，以满足各种生产工艺的要求，完成一定的生产任务。电力拖动系统从最初的成组拖动，经过单电机拖动，已发展到现代拖动的基本形式——多电机拖动。现代的电力拖动都是采用多电机拖动。

电机拖动系统主要包括：电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源 5 个部分。它们之间的关系如图 0-1 所示。

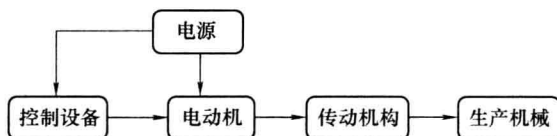


图 0-1 电力拖动系统的组成

由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点，因此现代化生产中，大多数生产机械都采用电力拖动。例如，在工农业生产和交通运输中，机床、轧钢机、起重机、卷扬

机、鼓风机、抽水机、纺织机、印染机、印刷机、电动工具和电动车辆等都采用电力拖动；在人们的日常生活中，各种家用电器大都使用微特电机作为驱动装置；在自动控制系统、计算机系统和机器人等高新技术中，大量使用控制电机作为检测、放大和执行元件。

电动机是电力拖动系统的核心，分直流和交流两大类，分别组成直流拖动系统和交流拖动系统。直流电动机具有良好的起动、制动性能，宜于在宽范围内平滑调速，在需要高性能可控的电力拖动领域中得到广泛应用；交流电动机，特别是异步电动机，结构简单、性能可靠，广泛应用于工农业生产及居民生活中。

因此，可以说电机与电力拖动系统已广泛应用到现代社会生产和人们生活的方方面面，如果没有发电机也就没有大量的电能产生，如果没有电动机也就没有用电力驱动的运动装置和设备。

### 3. 电力拖动的现状与发展趋势

电力拖动的现状可以概括为两点：

1) 电力拖动现已取代了其他拖动形式，成为主要的拖动形式。这是因为电动机与其他原动机相比有许多优点，如电能的获得和转换比较经济、传输和分配比较便利、操作和控制容易等，特别是易于实现自动与远程控制。因此，目前绝大多数的生产机械都采用电力拖动。而且，目前电力拖动的方式也几乎全部是单机或多机拖动。

2) 当代科学和技术的新成果广泛地应用于电力拖动系统之中，如电力电子学的发展使半导体变流装置广泛地用作电力拖动的电源、微电子学的发展使电子控制器件和微处理机成为电力拖动的主要控制手段、自动控制理论应用于电力拖动自动控制系统大大提高了系统的性能等。

随着现代电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展，电力拖动的发展趋势如下：

- 1) 用交流电力拖动取代直流电力拖动。
- 2) 从节能的角度改造电力拖动系统，如用交流调速系统拖动电动水泵。
- 3) 继续采用新技术不断提高电力拖动系统的性能和完善系统功能。
- 4) 通过系统集成和技术融合，组成综合自动化系统，以进一步提高生产效率。

## 0.2 交直流调速控制系统概述

### 1. 交直流调速控制系统组成

调速控制系统是通过对电动机的控制，使工作机械按照给定的运动规律运行的装置，其任务是通过控制电动机电压、电流、频率等输入电量的控制，来改变工作机械的转矩、速度、位移等机械量，使各种工作机械按人们期望的要求运行，以满足生产工艺及其他应用的需要。

交直流调速控制系统由电动机及负载、功率放大与变换装置、控制器、传感器及相应的信号处理等组成，如图 0-2 所示。交直流调速控制是以各类电动机为控制对象，以计算机和其他电子装置为控制手段，以电力电子装置为弱电控制强电的纽带，以控制理论为理论依据，以计算机数字仿真和计算机辅助设计为研究和开发工具的控制技术，因此它已成为电机学、电力电子技术、微电子技术、计算机控制技术、控制理论、信号检测与处理技术等多学科相互交叉的综合性学科。下面简要介绍交直流调速系统各部分的作用：



图 0-2 交直流调速系统及其组成

1) 电动机及负载。交直流调速系统的控制对象为电动机。电动机从类型上可分为直流电动机、交流异步电动机和交流同步电动机,从用途上可分为用于调速系统的驱动电动机和用于伺服系统的伺服电动机。电动机是调速控制系统的执行机构,电动机的结构和原理决定了运动控制系统的设计方法和运行性能,新型电动机的发明会带出新的运动控制系统。

2) 功率放大与变换装置。功率放大与变换装置有电机型、电磁型、电力电子型等,现在多采用电力电子型。电力电子器件经历了由半控型向全控型、由低频开关向高频开关、由分立元器件向具有复合功能的功率模块发展的过程。以电力电子器件为基础的功率放大与变换装置是弱电控制强电的媒介,在运动控制系统中作为电动机的可控电源,其输出电源质量直接影响运动控制系统的运行状态和性能。

3) 控制器。控制器分模拟控制器和数字控制器两类,也有模数混合的控制器,现在已越来越多地采用全数字控制器。计算机控制可以实现不同于一般线性调节的控制规律,达到模拟控制系统难以实现的控制功能和效果。计算机控制技术的应用使对象参数辨识、控制系统的参数自整定和自学习、智能控制、故障诊断等成为可能,大大提高了运动控制系统的智能化程度。各种高性能的大规模或超大规模的集成电路,方便和简化了调速控制系统的硬件电路设计及调试工作,提高了运动控制系统的可靠性。高速、大内存容量、多功能的微处理器或单片微机的问世,使各种复杂的控制算法在运动控制系统中的应用成为可能,并大大提高了控制精度。

控制理论是运动控制系统的理论基础,是指导系统分析和设计的依据。控制系统实际问题的解决常常能推动理论的发展,而新的控制理论的诞生,又为研究和设计各种新型的运动控制系统提供了理论依据。

4) 传感器与信号处理。运动控制系统中常用的反馈信号是电压、电流、转速和位置,为了真实可靠地得到这些信号,并实现功率电路(强电)和控制器(弱电)之间的电气隔离,需要相应的传感器。电压、电流传感器的输出信号多为连续的模拟量,而转速和位置传感器的输出信号因传感器的类型而异,可以是连续的模拟量,也可以是离散的数字量。

运动控制系统的本质是反馈控制,即根据给定与输出之间的偏差实施控制,最终缩小或消除偏差。运动控制系统需通过传感器实时检测系统的运行状态,构成反馈控制,并进行故障分析和故障保护。

## 2. 直流调速控制技术概况

用直流电动机作为原动机的传动方式称为直流拖动。由于直流调速系统具有良好的起制动、正反转及调速等性能,目前在传动领域中仍占有主要地位。虽然近年来交流电动机的调速控制技术发展很快,但就闭环控制的工作原理而言,直流电动机的调速控制理论和实现都是交流电动机调速控制的基础。从根本上说,由于电枢和磁场能独立进行激励控制,而且转速和输出转矩的描述是对可控电压(或电流)激励的线性函数,因此,对直流电动机容易

实现各种调速控制，也容易实现控制目标的“最佳化”，这也是直流电动机长期主导调速领域的原因。晶闸管供电的直流调速系统具有良好的技术经济指标，所以目前国内多数大容量调速系统还是沿用晶闸管-电动机的传动结构。由于晶闸管存在着控制的非线性及较低功率因数等缺点，因此，普通晶闸管系统难以实现高精度、宽范围的调速控制。随着 GTO 晶闸管、GTR、P-MOSFET、IGBT 和 MCT 等全控型功率器件的出现，利用这些有关断能力的器件，新型的电力电子变流装置取消了原来普通晶闸管系统必需的换相电路，简化了电路的结构，提高了效率和工作频率，降低了电路噪声，也缩小了装置的体积和重量。谐波成分大、功率因数差的相控变流器已逐步由斩波器或脉冲宽度调制型（PWM）变流器所代替，明显地扩大了电动机传动系统的调速范围，提高了工作效率和调速精度，改善了快速性、效率和功率因数。可以预见，PWM 变流器终将取代晶闸管相控式可控功率电源，成为可控直流电源的主流，一种称为软性的 PWM 变流器将主宰传动控制领域，成为理想化的功率电源。

### 3. 交流调速技术概况

直流电动机存在机械换向问题，最大供电电源受到限制，机械强度也限制了其转速的进一步提高，另外，结构的影响也使直流电动机不适合腐蚀性、易爆性和含尘气体的特殊场合。交流电动机以其众多的优点一直以来受到人们的重视，它体积小、重量轻、没有电刷和换向器、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠、易于维修，只是长期以来一直没有理想的调速方案，只能应用于恒速拖动领域。晶闸管等功率器件的出现，使交流电动机调速的发展产生了飞跃，并使得采用半导体变流技术的交流调速得以实现，但这个阶段的交流电动机调速系统的控制比较复杂，调速性能差，装置价格高，效率低，使交流调速未能广泛应用。自从微处理器出现，在绕线转子异步电动机串级调速、无换向器电动机调速、PWM 技术、笼型异步电动机的矢量控制、直接转矩控制等方面都获得重大突破与发展之后，交流电动机调速才真正进入应用阶段，并广泛应用于工业生产和交通运输部门。目前，由于大功率半导体器件、大规模集成电路的发展，交流电动机调速系统已具备了较宽的调速范围、较高的调速精度、较快的动态响应、较高的工作效率以及可以四象限运行等优异性能，其动静态特性均可以与直流电动机调速系统相媲美。可以说，交流调速逐步取代直流调速已成为明显的发展趋势。例如，在“节能型”交流调速技术方面，在大量应用的风机、水泵等拖动系统中（这类负载约占工业电力拖动总量的一半，其中有些并不是真的不需要变速，只是由于过去的交流电动机不能调速，因而不得不依赖挡板和阀门来调节流量，同时也消耗掉大量的电能），如果采用交流电动机调速来改变风量或流量，效率将会大大提高。从各方面看，改造恒速电动机为交流调速电动机，每台节能约 20% 以上，总体的节能效益是很可观的。因此，在这个领域，目前交流调速系统已占据了主导地位。

### 4. 电力拖动控制系统的发展趋势

随着电力电子技术的进步，微机控制技术、传感器技术、微电子技术的发展应用，以及新型控制策略的出现，电动机控制、电气传动发展到了新的阶段。电机运动控制系统的发展趋势如下：

- 1) 高频化。在功率驱动装置中，低频的半控器件在中小功率范围将被高频的全控型电力电子器件取代，变换技术由相位控制转变成脉宽调制，这样既可以提高系统性能，又可以改善电网的功率因数。
- 2) 交流化。由于交流电动机本身的优势，随着交流调速技术的提高和成本的降低，不

仅现有的直流调速将被交流调速取代，而且大量的原来恒速运行的交流传动系统将改为交流调速系统，原来直流调速所不能达到的高转速、大功率领域也将采用交流调速。

3) 数字化网络化。微处理器的发展，使数字控制器简单又灵活，模拟电子控制基本上让位于计算机数字控制，计算机仿真与辅助设计逐步融入运动控制系统的性能分析与设计中。随着系统规模的扩大和系统复杂性的提高，单机的控制系统越来越少，取而代之的是大规模的多机协同工作的高度自动化的复杂系统。在复杂系统中，传动设备和控制器作为节点连到现场总线或工业控制网上，可以实现集中的或分散的生产过程的实时监控。这些都需要计算机网络的支持。

4) 智能化。借助于数字和网络技术，智能控制已经深入到电动机运动控制系统的各个方面，如模糊控制、神经网络控制、解耦控制等，各种观测器和辨识技术应用于运动控制系统中，大大改善了控制系统的性能，为其走向复杂的多层的网络控制提供了可能。运动控制正由简单的单机控制系统走向多机多种控制过程协调的系统集成控制。

### 0.3 本课程的任务

本课程把“电机学”、“电力拖动”和“运动控制系统”三门课程的主要内容系统地有机地融为一体，内容结构完整，是应用性、实践性较强的专业基础课。

本课程的任务是使学生掌握电机的基本结构、工作原理和性能参数，电力拖动系统的各种运行方式、动静态性能分析，电机的选择和实验方法，以及直流电动机和交流异步电动机的调速控制系统的基本原理和典型应用的分析与设计，为进一步学习相关专业课及今后工作做必要的知识和技能准备，使学生能够从工程实用的角度提出问题、分析问题和解决问题，通过本课程的学习，能胜任对电气传动控制系统的使用、维护和管理工作的。

# 第1章 直流电机

电机是电动机和发电机的统称，是一种实现机电能量变换的电磁装置。电动机是将电能变换为机械能，而发电机是将机械能变换为电能。这种能量变换是可逆的，即从工作原理说，任何一台旋转电机既可以作电动机又可以作发电机。

由于电流分直流和交流，所以电机就分为直流电机和交流电机两大类。直流电动机有良好的起动性能和调速性能，广泛地应用于电力牵引、轧钢机、起重设备及要求调速广泛的切削机床中。在自动控制系统中，小容量直流电动机的应用也很广泛。直流发电机则作为各种直流电源使用。

本章主要讨论直流电机的基本结构和工作原理，讨论直流电机的磁场分布、感应电动势、电磁转矩、电枢反应及影响、换向及改善换向方法，从应用角度分析直流发电机的运行特性和直流电动机的工作特性。

## 1.1 直流电机的工作原理和结构

### 1.1.1 直流电机的工作原理

#### 1. 直流发电机的工作原理

图 1-1 所示为一台最简单的两极直流电机的模型。N、S 为定子磁极，由 A 和 X 两根导体连成的一个电枢线圈是放置在可旋转导磁圆柱体上（称为电枢铁心），线圈连同导磁圆柱体称为电机的转子或电枢。线圈的首端和末端分别连接到两个相互绝缘并可随线圈一同旋转的换向片 1 和 2 上。电枢线圈与外电路的连接是通过放置在换向片上固定不动的电刷  $B_1$  和  $B_2$  进行的。

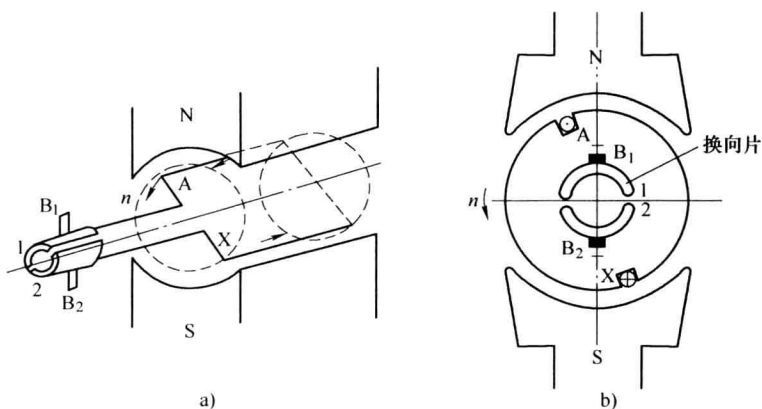


图 1-1 两极直流电机的模型

当原动机驱动电机转子以恒定的转速  $n$  逆时针方向转动时，设在图 1-1 所示瞬间，根据右手定则，可以判定导体 A 的电动势方向为穿出纸面，用  $\odot$  表示；导体 X 的电动势方向为进入纸面，用  $\otimes$  表示。

根据电磁感应定律，导体的感应电动势为

$$e = B_x l v \quad (1-1)$$

式中， $B_x$  为导体所处位置的径向磁通密度； $l$  为导体切割磁力线部分的长度，称为有效长度； $v$  为导体切割磁力线部分的速度，即电枢旋转的线速度。

那么，整个线圈从 X→A 的感应电动势为  $e_{XA} = 2B_x l v$ 。由于转速  $n$  是恒定的，故  $v$  为一定值；对于已制成的电机， $l$  也是一定的，所以电动势  $e_{XA}$  与磁通密度  $B_x$  成正比，这说明线圈电动势的变化规律与气隙磁场沿圆周的分布规律相同。知道了  $B_x$  的分布曲线，也就可以知道线圈电动势的变化规律。为此可以假想把电枢从外圆上某点切开，把圆周拉成一直线作为横坐标，并以磁通密度  $B_x$  为纵坐标，绘出  $B_x$  的分布曲线，如图 1-2 所示。一般以 N 极下的磁通密度为正值，S 极下的磁通密度为正值。

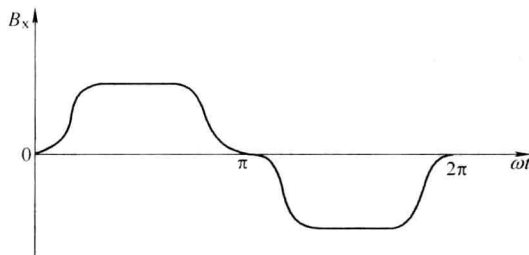


图 1-2  $B_x$  的分布曲线

有了  $B_x$  的分布曲线以后，因为  $e_{XA} \propto B_x$ ，所以只要改变坐标刻度，曲线就可以表示为线圈电动势随时间的变化规律。可以看出，线圈电动势是交变的。

当电枢转过  $180^\circ$  后，导体 X 到了原来导体 A 的位置，导体 A 则到了原来导体 X 的位置。根据右手定则，此时导体 X 的电动势方向为  $\odot$ ，导体 A 的电动势方向为  $\otimes$ 。由于电刷在空间是固定不动的，这时电刷  $B_1$  与换向片 2 相接触，电刷  $B_2$  与换向片 1 相接触，所以电刷  $B_1$  的极性仍为“+”，电刷  $B_2$  的极性仍为“-”，这样就在电刷  $B_1$  与  $B_2$  之间得到一个方向不变的电动势。若在  $B_1$ 、 $B_2$  之间接上一个负载，负载上就会流过一个方向不变的电流，这就是直流发电机的工作原理。

显然在一个线圈的情况下，电刷  $B_1$  与  $B_2$  之间的电动势的方向虽然不变，但在数值上却是变化的，因此在实际电机中，电枢绕组是由许多线圈按照一定规律连接起来而构成的，这就使电刷间电动势的脉动程度大大降低，实用时可以认为产生的是一个恒定直流。

如果电刷  $B_1$ 、 $B_2$  不是固定在空间，而是随着电枢一起转动，即电刷  $B_1$  始终和换向片 1 接触，电刷  $B_2$  始终和换向片 2 接触，那么电刷间的电动势就不可能是直流，而是成为交流了。这说明，直流电机电枢绕组所感应的电动势是交流的，通过换向器配合电刷的作用，才把交流电动势“换向”为直流电动势，所以人们常把这类电机称为直流换向器电机。

### 2. 直流电动机的工作原理

假如不用原动机去带动电枢旋转，而是由外电源从电刷  $B_1$ 、 $B_2$  输入直流电流，使电流从正电刷  $B_1$  流入，从负电刷  $B_2$  流出，则此时 N 极下的线圈电流总是由首端流向末端，S 极下的线圈电流总是由末端流向首端。利用左手定则，可知 N 极下导体受到的电磁力的方向向左，S 极下导体受到的电磁力的方向向右，那么产生的电磁转矩就使得线圈逆时针旋转。由此可见，N 极下和 S 极下的线圈受到的电磁力的方向是始终不变的，它们产生转矩的方向也就不变。这个转矩使电枢始终沿一个方向旋转，就把电能变换成机械能，使之成为一台直流电动机而带动生产机械工作。

### 3. 直流电机的可逆性

从上述直流电机的工作原理来看，一台直流电机若在电刷两端加上直流电压，输入电能，即可拖动生产机械，将电能变为机械能而成为电动机；反之，若用原动机带动电枢旋转，输入机械能，就可在电刷两端得到一个直流电动势作为电源，将机械能变为电能而成为发电机。这种一台电机既能作电动机又能作发电机运行的原理，在电机理论中称为电机的可逆原理。

## 1.1.2 直流电机的主要结构

直流电机由静止部分（定子）和转动部分（转子）组成。定子和转子之间有一定的间隙，称为气隙。定子的作用是产生磁场和作为电机的机械支撑，定子包括主磁极、换向极、机座、端盖、轴承、电刷装置等。转子上用来感应电动势而实现能量转换的部分称为电枢，它包括电枢铁心和电枢绕组，此外转子上还有换向器、转轴、风扇等。图 1-3 所示为一直流电机的结构。

下面简要介绍直流电机的主要零部件的基本结构、作用和材料。

#### (1) 定子部分

定子由机座、主磁极、换向极、电刷装置等组成，其剖面结构如图 1-4 所示。它的主要作用是产生主磁场和作为电机的机械支撑。

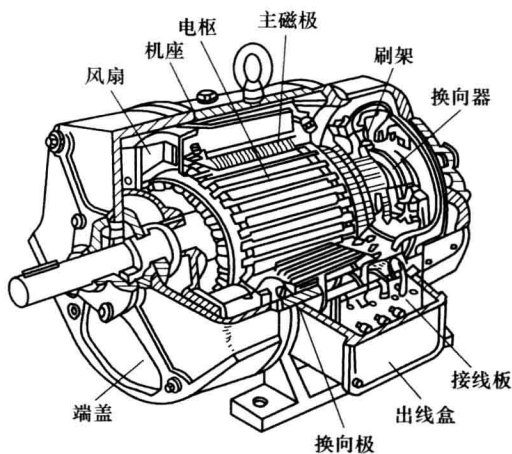


图 1-3 直流电机的结构

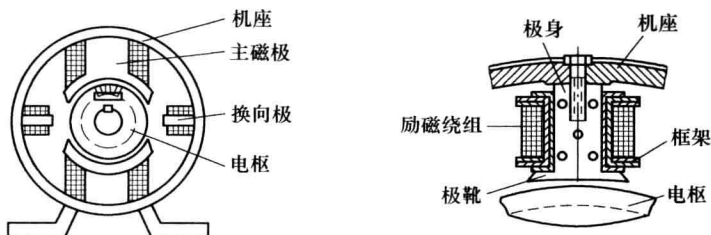


图 1-4 直流电机定子的剖面结构



1) 主磁极。简称主极, 用来产生主磁极恒定的气隙磁通, 由铁心和励磁绕组构成。在主极铁心上固定励磁绕组, 产生磁场并使电枢表面的气隙磁通密度按一定形状在空间分布。为了减少电枢旋转时极靴表面的涡流损耗, 主磁极铁心是由  $1 \sim 1.5\text{mm}$  的低碳钢板叠成, 主磁极上的励磁绕组是用圆截面或矩形截面的绝缘导线绕制成的集中绕组, 与铁心绝缘。

主磁极总是成对的, 相邻磁极的极性按 N 极和 S 极交替排列。

2) 换向极。又称附加极, 它的作用是用来改善换向, 也是由铁心和套在上面的换向极绕组构成的。大容量直流电机和换向要求高的电机, 其换向极铁心用相互绝缘的钢片叠装而成, 中小容量直流电机的换向极铁心则用整块钢制成。换向绕组一般由粗的扁铜线绕成, 且与电枢绕组相串联, 因此通过的电流较大, 一般用截面较大的矩形导线绕成, 而且匝数较少。

换向极的位置在两主磁极之间, 用螺杆固定在机座上。换向极数目一般等于主磁极数目, 帮助电枢换向并消除或减弱电枢反应。在功率很小的电机中, 换向极数目有时只有主磁极数目的一半, 也有不装换向极的。

3) 机座。直流电机的机座有两个作用, 一是用来固定主磁极、换向极、端盖, 并借助底脚将电机固定在基础上; 二是作为电机磁路的一部分。所以, 机座都是由导磁性能好的材料制成, 一般用铸钢件或用钢板卷焊而成, 且有一定的导磁截面积, 在机械强度和刚度上大有余。

4) 电刷装置。电刷的作用是把转动的电枢与外电路相连接, 使电流经电刷输入电枢或从电枢输出, 并且通过电枢和换向器的配合, 在电刷两端得到直流电压。为了使电刷与旋转的换向器有良好的滑动接触, 需要有一套电刷装置。电刷装置由电刷 (由石墨做成的导电块)、刷握、刷杆、刷杆座、刷辫 (将电动势或电流引出或引入电机, 由细铜丝编成) 等组成, 如图 1-5 所示。根据电流的大小, 每一刷杆上可以有由一个或几个电刷组成的电刷组。电刷组的数目 (也就是刷杆数) 一般等于主磁极数目, 并沿圆周均匀分布。电刷放在刷握的刷盒内, 用弹簧把它压紧在换向器的圆周表面上; 刷握固定在刷杆上, 刷握与刷杆之间应有良好的绝缘; 同极性的各刷杆上的电刷用汇流条连接在一起。刷杆座应该能够移动, 用来调整电刷位置。

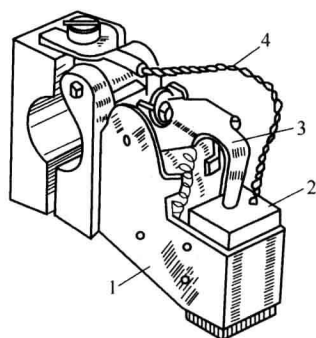


图 1-5 刷握与电刷

1—刷握 2—电刷  
3—压紧弹簧 4—铜丝辫

## (2) 转子部分

转子 (又称电枢) 由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成, 如图 1-6 所示。它的作用是产生电磁转矩或感应电动势, 实现机电能量的转换。

1) 电枢铁心。电枢铁心有两个作用: 一是作为磁的通路; 二是用来嵌放电枢绕组。电枢铁心通常用  $0.5\text{mm}$  厚的低碳硅钢片或冷轧硅钢片叠成, 片间涂有绝缘漆以减少损耗 (涡流和磁滞损耗), 每片冲片冲有嵌放电枢绕组的槽, 有的还冲有轴向通风孔。对于大容量的电机, 为了加强冷却, 把电枢铁心沿轴向分成数段, 段与段之间留有宽  $10\text{mm}$  的通风道, 整个铁心固定在转子支架或转轴上。电枢铁心冲片和装配好的电枢铁心如图 1-7 所示。