



普通高等教育
“十一五”国家级
规划教材



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十三五”规划教材

FUNDAMENTALS OF ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES

电机及拖动基础

上册

第5版

张晓江 顾绳谷 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

电机及拖动基础

上 册

第5版

张晓江 顾绳谷 主 编
合肥工业大学
唐海源 姚守猷 副主编

机械工业出版社

本书第4版由教育部批准为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

全书分为上、下两册,包括“电机学”和“电力拖动基础”两门课程的主要内容。本书为上册,主要为电机部分,体系仍参照首版,本着“电机理论”为“电力拖动”构建基础理论和专业知识平台的主旨,以电动机为切入点,并做了修订和增删。内容顺序为:磁路,直流电机,变压器,异步电机,同步电机,控制电机,附录以及电机实验等。电机的基本理论中,有些值得深思却又被遗漏的理论性问题,择要增写成附录,以供读者探索。本书是修订版第5版,内容有所增删,部分内容做了调整,增加了附录G、电机教学基本实验,对直线异步电动机一节做了充实。另附有部分习题参考答案。

本书配套有电子课件,并且单独出版了《电机及拖动基础实验》以及《电机及拖动基础习题解答与学习指导》。

本书可作为高校本科自动化、电气工程及其自动化等专业的教材,也可以作为电气类或与自动化类其他专业有关课程以及“运动控制”课程的基础教材,对广大工程技术人员也有重要的参考价值。

本书配套资源可登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础.上册/张晓江,顾绳谷主编.—5版.—北京:机械工业出版社,2016.11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-54604-7

I. ①电… II. ①张…②顾… III. ①电机—高等学校—教材②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第195504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:王雅新 责任编辑:王雅新 张利萍 刘丽敏

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:马精明

责任印制:李洋

中教科(保定)印刷股份有限公司印刷

2016年11月第5版第1次印刷

184mm×260mm·19.25印张·439千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54604-7

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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书的第1版(上、下册)于1980年问世,1982年获机械工业出版社三十周年优秀图书一等奖;1988年获全国机电类优秀教材二等奖。第1版在经过全国高校选用十余年后,进行了修订,于1997年出版了第2版,并被列为全国普通高等教育自动化专业的规划教材。2004年1月本书经过进一步修订后,作为“21世纪普通高等教育规划教材”,出版了第3版。第3版获得机械工业出版社2004年度科技进步二等奖。本书经过再次修订,2009年1月出版了第4版,与第3版相比较,第4版内容有所增删,部分内容做了调整。第4版由教育部批准为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。三十多年来,本书受到全国众多高校老师和同学的欢迎,选作教材使用,受到广泛好评。

为了便于组织教学,这次第5版在修订时仍将“电机”及“电力拖动”两部分内容相对集中,分别安排在上、下两册中。

上册在第4版的基础上,内容做了适当的调整。第5版的修改主要本着结合专业特点和适当兼顾电机学科体系的原则进行,以所谓传统四大电机加控制电机作为总体安排,仍以拖动系统中的主要元件——交、直流电机为主要分析对象。整体内容有所增加,部分内容做了调整,第五章中直线异步电动机一节做了充实。增加了附录G“两相异步电动机的不对称运行”。七个附录(附录A、B、C、D、E、F、G)旨在使读者在解读之后,能粗略地了解电机学科在历来的理论分析上的两种基本分析方法,合成磁场理论与动态耦合电路法,两者各有优点,又有“异曲同工”之妙(附录C),以及两相异步电动机不对称运行时的分析方法(附录G)。继而使读者又可认识到现有四大类电机均有“优势”与不足之处。进入20世纪80年代后,电机学科经过与电力电子学科的交叉与渗透,衍生出了一种调速特性良好的“电子控制电动机”,或称“自控式同步电动机”或“无换向器电动机”(第六章第二节详述)。与此同时,经众多学者努力探索和求真,初步揭示了电机中机电能量转换“之所以然”之谜(附录E、附录F)。在“回顾与展望”中,向读者展示了电机学科的广阔前景。

第5版下册中删除了一些过时的电机起动、调速方法;增加了近年来在工业领域广泛使用的直流电机PWM调速方式,软起动器-三相异步电动机组合、变频器-三相异步电动机组合等内容;作为应用实例,简要介绍了近年来高速发展的高铁动车组列车牵引电机系统的工作原理;有关MATLAB/Power System Blockset用于电力拖动系统的内容也得到进一步充实;还增加了涵盖电力拖动主要内容的教学参考实验,可供不同院校参考(注:带“*”的章节为选读内容)。

本书采用的常用文字符号和图形符号均已参照我国现行国家标准,在第5版(上、下册)中,分别列表,进一步统一了符号。

本书可以作为高校本科自动化、电气工程及其自动化等专业的教材，也可以作为电气类或自动化类其他专业有关课程及“运动控制”课程的基础教材，对工程技术人员也有重要的参考价值。本书上、下册均附有部分习题的参考答案。

与本书配套，已经出版了《电机及拖动基础习题解答与学习指导》和《电机及拖动基础实验》两本教材。

本书第5版由合肥工业大学张晓江、顾绳谷主编，唐海源、姚守猷为副主编。上册由唐海源（除第五章第八节、附录G外）编写和修订，中山大学陈鸣编写了上册第五章第八节及附录G；下册由张晓江编写和修订。

由于作者水平有限，谬误之处在所难免，欢迎广大读者不吝赐教。对在本书编写和出版过程中提出过意见、建议和帮助的同志表示衷心感谢。

为了配合课堂教学，本书上、下册均配有电子课件，欢迎使用本书作为教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

编 者

上册常用符号表

A	A 相	F_m	异步电机的励磁磁动势
A	面积; 线负荷	F_{ad}	直轴电枢磁动势
a	a 相	F_{aq}	交轴电枢磁动势
a	交流绕组的并联支路数; 直流电枢绕组的并联支路对数	$F_{\phi 1}$	单相绕组的基波磁动势
B	B 相	$F_{\varphi \nu}$	单相绕组的 ν 次谐波磁动势
B	磁通密度	F_{y1}	一个整矩线圈的基波磁动势
B_{δ}	气隙磁通密度	F_{q1}	q 个线圈的基波合成磁动势
B_{ad}	直轴电枢磁场磁通密度	$F_{q\nu}$	q 个线圈的谐波磁动势
B_{aq}	交轴电枢磁场磁通密度	f	频率
C	C 相	f_1	异步电动机定子频率
C	电容	f_2	异步电动机转子频率
C_T	转矩常数	f_ν	ν 次谐波频率
C_e	电动势常数	H	磁场强度
D_a	电枢外径	H_{δ}	气隙磁场强度
E	电动势 (交流表示有效值)	i	电流的瞬时值
E_{ϕ}	相电动势	I	电流 (交流表示有效值); 同步电机的电枢电流; 直流电机的线路电流
E_0	空载电动势, 励磁电动势	I_a	直流电机的电枢电流
E_1	变压器一次绕组 (电机定子绕组) 由主磁通感应的电动势有效值	I_m	交流励磁电流
E_2	变压器二次绕组 (电机转子绕组) 由主磁通感应的电动势有效值	I_f	直流励磁电流
E'_2	E_2 的归算值	I_{μ}	励磁电流中的无功分量
E_q	q 个线圈的合成电动势	I_N	额定电流
e	电动势的瞬时值	I_0	空载电流
e_x	换向时的电抗电动势	I_k	短路电流; 堵转电流
e_a	换向时的电枢反应电动势	I_1	变压器一次电流; 异步电机定子电流
F	磁动势, 力	I_2	变压器二次电流; 异步电机转子电流
F_a	电枢磁动势	I'_2	I_2 的归算值
		K	换向片数

k	变压器的电压比	p_{Cu}	铜耗
k_i	异步电动机的电流比	p_{Fe}	铁耗
k_e	异步电动机的电动势比	p_{Δ}	杂散损耗
k_{q1}	基波分布因数	p_{mech}	机械损耗
k_{y1}	基波节距因数	p_k	负载损耗
k_{w1}	基波绕组因数	Q	槽数
k_{qv}	ν 次谐波分布因数	q	每极每相槽数
k_{yv}	ν 次谐波的节距因数	R	电阻
k_{wp}	ν 次谐波的绕组因数	R_m	励磁电阻; 磁阻
L	自感	R_1	变压器一次绕组 (感应电机定子) 电阻
$L_{1\sigma}$	变压器一次绕组 (感应电机定子) 的漏磁电感	R_2	变压器二次绕组 (感应电机转子) 电阻
$L_{2\sigma}$	变压器二次绕组 (感应电机转子) 的漏磁电感	R'_2	R_2 的归算值
l	长度	R_f	励磁绕组电阻
M	互感	R_a	电枢电阻
m_1	交流电机定子相数	R_k	变压器 (异步电机) 的短路电阻
m_2	异步电机转子相数	S	视在功率
N	每相串联匝数	S_N	额定视在功率
N_y	每个线圈的匝数	s	转差率
n	转子转速	s_N	额定转差率
n_N	额定转速	s_m	最大转矩时的转差率
n_0	空载转速	T	转矩
n_s	同步转速	T_e	换向周期
n_ν	ν 次谐波旋转磁场的转速	T_N	额定转矩
Δn	转速差	T_k	堵转转矩
P	功率	T_0	空载转矩
P_N	额定功率	T_e	电磁转矩
P_e	电磁功率	T_{max}	最大转矩
P_{mech}	机械功率	T_2	负载转矩
P_k	堵转功率; 短路功率	t	时间
P_1	输入功率	U	电压 (交流表示有效值)
P_2	输出功率	U_N	额定电压
P_0	空载功率	U_ϕ	相电压
p	损耗; 极对数	U_1	电源电压; 定子端电压
		U_0	空载电压; 零序电压

U_k	短路电压; 堵转电压	$Z'_{2\sigma}$	$Z_{2\sigma}$ 的归算值
u	电压的瞬时值	Δu	电压调整率
$2\Delta u_s$	每对电刷的电压降	α	角度; 相邻两槽间的电角度
W	功; 能	β	负载系数
W_m	磁场能量	δ	气隙; 功率角
W_e	电能	ε	小数; 短距角
X	电抗	η	效率
X_a	电枢反应电抗	η_N	额定效率
X_{ad}	直轴电枢反应电抗	$\eta_{\max}$	最大效率
X_{aq}	交轴电枢反应电抗	θ	角度; 功率角
X_σ	定子漏抗	Λ	磁导
X_l	同步电抗	Λ_σ	漏磁导
X_d	直轴同步电抗	λ	单位面积的磁导
X_q	交轴同步电抗	μ	磁导率
X_m	励磁电抗	μ_0	空气磁导率
X_k	短路电抗	μ_{Fe}	铁心磁导率
$X_{1\sigma}$	变压器一次绕组 (感应电机定子) 漏抗	ν	谐波次数
$X_{2\sigma}$	变压器二次绕组 (感应电机转子) 漏抗	τ	极距
$X'_{2\sigma}$	$X_{2\sigma}$ 的归算值	Φ	磁通量
X'_d	直轴瞬态电抗	Φ_0	空载磁通; 同步电机的主磁通
y	绕组合成节距	Φ_m	变压器或异步电机的主磁通
y_1	线圈节距	Φ_σ	漏磁通
y_c	换向器节距	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
Z	阻抗; 电枢导体数	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
Z_m	励磁阻抗	Φ_ν	ν 次谐波磁通
Z_k	短路阻抗	ϕ	磁通量的瞬时值
$Z_{1\sigma}$	变压器一次绕组 (感应电机定子) 漏阻抗	φ	相角; 功率因数角
$Z_{2\sigma}$	变压器二次绕组 (感应电机定子) 漏阻抗	ψ	磁链; 内功率因数角
		Ω	转子的机械角速度
		Ω_s	同步机械角速度
		ω	角频率; 电角速度

目 录

前 言

上册常用符号表

绪 言 1

第一章 磁路 6

第一节 磁路的基本定律 6

第二节 常用的铁磁材料及其特性 10

第三节 直流磁路的计算 14

第四节 交流磁路的特点 16

小结 16

习题 17

第二章 直流电机 19

第一节 直流电机的工作原理及结构 19

第二节 直流电机的铭牌数据 24

第三节 直流电机的绕组 25

第四节 直流电机的励磁方式及磁场 32

第五节 感应电动势和电磁转矩的计算 37

第六节 直流电机的运行原理 40

第七节 直流电机的换向 51

小结 55

习题 56

第三章 变压器 59

第一节 变压器的工作原理、分类及结构 59

第二节 单相变压器的空载运行 64

第三节 单相变压器的基本方程式 68

第四节 变压器的等效电路及相量图 70

第五节 等效电路的参数测定 74

第六节 三相变压器 76

第七节 变压器的稳态运行 82

第八节 自耦变压器与互感器 87

小结 90

习题 92

第四章 异步电机（一）——三相异步电动机的基本原理 94

第一节 三相异步电动机的工作原理及

结构 94

第二节 三相异步电动机的铭牌数据 ... 101

第三节 三相异步电动机的定子绕组 ... 101

第四节 三相异步电动机的定子磁动势及磁场 109

第五节 三相异步电动机定子绕组的电动势 122

小结 127

习题 128

第五章 异步电机（二）——三相异步电动机的运行原理及单相异步电动机 130

第一节 三相异步电动机运行时的电磁过程 130

第二节 三相异步电动机的等效电路及相量图 138

第三节 三相异步电动机的功率和转矩 146

第四节 三相异步电动机的工作特性及其测取方法 150

第五节 三相异步电动机参数的测定 ... 153

第六节 三相异步电动机的转矩与转差率的关系 155

第七节 单相异步电动机 156

第八节 直线异步电动机 162

小结 165

习题 166

第六章 同步电机 168

第一节 三相同步电动机 168

第二节 自控式同步电动机——无换向器电动机 180

第三节 其他同步电动机 187

小结 191

习题 192

第七章 控制电机 193

第一节 伺服电动机 193

第二节 测速发电机 200

第三节 自整角机	205	附录 D 同步电动机的小振荡	237
第四节 旋转变压器	210	附录 E 机电能量转换简述	241
第五节 力矩电动机	214	附录 F 就耦合场中磁能变化, 试探机 电能量转换之端倪——附录 E 之补充	245
小结	215	附录 G 两相异步电动机的不对称 运行	247
习题	216	附录 H 电机教学基本实验	253
附录	218	上册部分习题参考答案	294
附录 A 小型单相变压器的计算	218	参考文献	295
附录 B 变压器的瞬变过程	223		
附录 C 用耦合电路法导出电机稳态运行 时的电动势平衡方程式	226		

绪 言

一、电机及电力拖动技术的发展概况

电能是现代大量使用的一种能量形式。这种能量形式有许多优点，如生产和变换比较经济、传输和分配比较容易、使用和控制比较方便等。人类自从使用了电能，便从繁重的体力劳动中得到了解放，劳动生产率大大提高，并能完成手工劳动不易或不能完成的生产任务。电能已成为国民经济各部门中动力的主要来源。

电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等，都必须利用电机作为能量转换或信号变换的机电装置。在电力工业中，发电机和变压器是电站和变电所中的主要设备。在工业企业中，大量应用电动机作为原动机去拖动各种生产机械。如在机械工业、冶金工业、化学工业中，机床、挖掘机械、轧钢机、起重机械、抽水机、鼓风机等都要用大大小小的电动机来拖动；在自动控制技术中，各式各样的小巧灵敏的控制电机作为检测、放大、执行和解算元件被广泛应用。

不论是旋转电机的能量转换，还是控制电机的信号变换，都是通过电磁感应作用而实现的，因此分析电机内部的电磁过程及其所表现的特性时，要应用有关电磁学的规律，如基尔霍夫第一、第二定律，全电流定律、电磁感应定律和电磁力定律等。但是，电机毕竟是一种机械，除电磁规律以外，还涉及结构、工艺、材料等方面的问题，所以电机在拖动系统中是一种综合性的装置或元件。

电机的发明至今已有 180 多年的历史，其发展大体上可以分成三个时期：①直流电机的产生和形成；②交流电机的形成；③电机理论、设计和制造工艺逐步达到完善。

电机是随着生产发展而产生和发展的，到 19 世纪末，各种交、直流电机的基本类型及其基本理论和设计方法，大体上都已经建立起来了，而电机的发展反过来又促进社会生产力的不断提高。以前，电机的发展过程是由诞生到在工业上初步应用、各种电机的初步定型以及电机理论和电机设计计算的建立和发展。在由电气化时代进入原子能、计算机及自动化时代的今天，不仅对电机提出了诸如性能良好、运行可靠、单位容量的质量小、体积小等方面越来越多的要求，而且随着自动控制系统和计算装置的发展，在旋转电机的理论基础上，发展出多种高精度、快响应的控制电机，成为电机学科的一个独立分支。与此同时，电力电子学等学科的渗透使电机这一较为成熟的学科得到新的发展。

新中国成立以来，我国的电机制造工业发生了巨大变化，经过工程技术人员努力，不仅建成了独立自主和完整的体系，而且有一些产品已经达到或接近世界先进水平。就各种拖动系统中的主要设备——电动机而言，已经研制成功 $2 \times 5000\text{kW}$ 的直流电动机、 4700kW 的直流发电机和 42MW 的同步发电机。电力变压器的最大容量已做到

840MV·A, 电压最高达 750kV。在中小型电机和控制电机方面, 亦自行设计和生产了 125 个系列, 上千个品种, 几千个规格的各种电机。由于生产上的需要, 最近几年, 对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新的运行方式和调试方法, 亦进行了许多摸索、研究和试验工作, 取得了不少成就。

当前科学技术突飞猛进, 因此电机在制造上也向着大型、巨型发展。中小型电机正向多用途、多品种方向发展, 向高效节能方向发展。在应用上, 由于计算机技术迅速发展, 将会出现由机器人工作的无人工厂, 以计算机作为这些工厂的“中枢神经”, 使实现无人化成为可能。在这个时代里, 某些特种电机必须具有快速响应、精确定位、快速启动和停止等比人的手脚更复杂而精巧的运动。理论上, 在电机中应用了控制技术, 使电机具有更良好的特性, 使各类电机成为各种机电系统中一种极其重要的执行元件。因此, 它将和电力电子学、计算机、控制论结合起来, 发展成一门新的学科。

上面简述了电机的发展概况。同样, 应用各种电动机拖动各种生产机械的电力拖动技术, 其发展也是有一个过程的。

最初, 电力拖动代替了蒸汽或水力的拖动。当时电动机拖动生产机械的方式是通过天轴实现的, 称为“成组拖动”。它是由一台电动机拖动一组生产机械, 从电动机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法, 靠天轴及机械传动系统来实现。电动机远离生产机械, 车间里有大量的天轴、长带和带轮等。能量传递过程中的损耗大, 效率低, 生产率低, 灰尘大, 劳动条件与卫生条件很差, 而且易出事故。另外, 如果电动机发生故障, 则成组的生产机械将停车, 甚至整个生产可能停顿。这是一种陈旧落后的电力拖动方式。

为了克服上述缺点, 自 20 世纪 20 年代以来, 生产机械上广泛采用一种“单电动机拖动系统”。在这一系统中, 一台生产机械用一台单独的电动机拖动。这样, 电动机与生产机械在结构上配合密切, 可以用电气方法调节每台生产机械的转速, 从而进一步简化机械结构, 而且易于实现生产机械运转的全部自动化。

但是, 如果用一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械, 则机械内部仍将保留着复杂的机械传动机构。因此, 自 20 世纪 30 年代起, 广泛采用了“多电动机拖动系统”, 即每一个工作机构用单独的电动机拖动, 因而生产机械的机械结构可大为简化。例如, 具有三个主轴的龙门铣床用三台电动机拖动, 每台电动机拖动一根主轴运动。某些生产机械的生产过程长而且连续, 如造纸、印刷、纺织、轧制等机械, 也都采用多电动机拖动系统。这些机械一般由多个分部组成, 每一分部可用单独电动机拖动。

必须指出, 在只有一个工作机构的生产机械上有时也采用多电动机拖动系统。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。

在多电动机拖动系统中, 各台电动机可在机械上采用刚性连接或摩擦连接等。很多情况下也采用电气方法联系, 如用电气控制线路及装置实现各电动机间的转速关系保持恒定(如电轴系统), 维持某一参数(如张力)在容许范围内(如造纸、纺织、印刷、轧制等生产机械)以及各电动机间互相连锁(保证一定的启动运转、停车程序)等。

随着生产的发展, 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, 如要求提高加工精度与工作速度, 要求快速启动、制动及逆转, 实现在很宽范围内调速及整个生产过程自动化等。要完成这些任务, 除电动机外, 必须有自动控制设

备,以组成自动化的电力拖动系统。

现代工业的电力拖动一般都要求局部或全部的自动化,因此必然要与各种控制元件组成的自动控制系统联系起来,而电力拖动则视为自动化电力拖动系统的简称。在这一系统中可对生产机械进行自动控制,如实现自动控制起动、制动、调速、同步,自动维持转速、转矩或功率为恒定值,按给定程序或者实时根据要求而改变速度、改变转向和工作机构的位置,以及使工作循环自动化等。

随着电机、电器制造业以及各种自动化元件的发展,自动化电力拖动系统得到不断的更新与发展。

最初采用的控制系统是继电器—接触器型的,属于有触点断续控制系统,称为继电器—接触器自动控制系统。

20世纪30年代初,出现了发电机—电动机组,使调速性能优异的直流电动机得到了广泛的应用。在直流电动机的拖动系统中,由于电机、电器、自动化元件及电力电子器件的不断更新与发展,在上述发电机—电动机组的基础上,发展成为采用交磁电机扩大机、磁放大器、可控离子变流器及晶闸管整流器等组成的自动化直流电力拖动系统。目前,晶闸管、IGBT等直流自动电力拖动系统已得到广泛的应用,自动化的直流电力拖动成套设备正在向大容量的方向发展,并做到集中控制、集中监视。在自动化元件方面已有整套标准控制单元,控制装置集成化、小型化、微型化,做到结构上组合安装积木化;微型化的自动化装置可直接装于电动机机座上,做到与电动机一体化,节省专用的控制柜;设备可靠性高,维护简便,许多设备都可做到锁门运行,不需监视与维护。

与直流电动机相比,交流电动机具有结构简单、价格便宜、维护方便、转动惯量小等一系列优点,单机功率比直流电机高得多,电压容易做成高压,还能实现高速运转。

20世纪40年代末到50年代,国外对串级及离子变频的交流调速系统进行了一些研究,并提出了无换向器电动机的原理。其后,晶闸管、大功率晶体管及IGBT等电力电子自关断器件的出现,为交流调速系统开辟了广阔的前途,目前已进入扩大应用及系列化阶段,性能指标进一步提高。串级调速系统、变频调速系统及自控式同步电动机(无换向器电动机)正在向大容量发展;控制系统已实现集成化,并且已经在工业中广泛应用;交流电力拖动已经逐渐取代直流拖动。

新中国成立以来,电力拖动自动化技术的发展有很大成绩,建立了一些有一定电力拖动自动化水平的工厂,成立了一批科研与设计机构。但是与国外先进国家相比,差距还是较大。目前正在急起直追,主攻成套,狠抓基础,开展一些关键技术的研究。如电力拖动自动化成套技术,它应用系统工程理论与计算机对工业自动化系统及成套设备的技术经济指标进行全面的分析研究,使系统各组成部分按全系统要求的最佳方式工作,达到全系统和整个成套设备综合技术经济指标最佳。

随着近代电力电子技术和计算机技术的发展以及现代控制理论的应用,自动化电力拖动正向着计算机控制的生产过程自动化的方向迈进。在一些现代化的工厂里,力求做到从原料进厂到产品出厂都是自动化或半自动化的,而且达到高速、优质、高效率地生产。但必须指出,在大多数综合自动化系统中,例如在计算机集成制造系统(CIMS)中,自动化的电力拖动系统仍然是不可缺少的组成部分。

我国与国外的发展情况相同,一些工厂企业的生产过程正从单机、局部自动化发展



到全盘、综合自动化,已经出现大批自动生产线。一些自动化车间和自动化工厂也已在我国出现。

另外,低成本自动化技术与设备的开发,越来越引起国内外的注意。特别对于中小型企业,应用适用技术的设备,不仅有利于获得经济效益,而且能提高生产率、可靠性与柔性,还有易于应用的优点。自动化的电力拖动系统更是低成本自动化系统的重要组成部分。

目前,世界已处于信息化的时代。以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,是我国实现现代化的道路。由于电力拖动是各类工业(特别是制造业)、各种生产机械的主要拖动方式,其理论与技术的发展,必将在我国实现现代化与工业化的进程中,起着十分重要的作用。

二、本课程的性质、任务与内容

本课程是自动化、电气工程及其自动化等专业的一门专业基础课。

本课程的任务是使学生掌握常用交流电机、直流电机、控制电机及变压器等的基本结构与工作原理以及电力拖动系统的运行性能、分析计算、电机选择与实验方法,为学习“电力拖动自动控制系统”“反馈控制理论”“计算机控制技术”等课程准备必要的基础知识。

本课程主要研究电机与电力拖动系统的基本理论问题,同时也联系到科学实验与生产实际的内容,具有原“电机学”及“电力拖动基础”的基本内容。在学完本课程之后,应达到下列要求:

- 1) 了解常用铁磁材料的特性,掌握磁路基本定律及计算方法。
- 2) 熟悉常用交、直流电机及变压器的基本结构和工作原理,对交、直流电机绕组的基本形式及其连接规律要有一定的认识。
- 3) 掌握交、直流电机及变压器稳态运行时的基本理论、运行性能及其分析方法。
- 4) 在对称运行时,熟练运用等效电路计算变压器和三相异步电动机的性能。
- 5) 掌握控制电机的工作原理、特性及用途。
- 6) 掌握分析电动机机械特性及各种运行状态(起动、反接制动、能耗制动、回馈制动)的基本理论。
- 7) 掌握电力拖动机械过渡过程的基本特性及其主要的分析方法,了解机械惯性和电磁惯性同时作用时对直流电力拖动过渡过程的影响。
- 8) 掌握电力拖动系统中电动机参数调速方法的基本原理和技术经济指标。
- 9) 掌握选择电机的原理与方法。
- 10) 掌握电机与电力拖动系统的基本实验方法与技能,并具有熟练的运算能力。
- 11) 了解电机与拖动今后发展的方向。

为了深入掌握本课程的有关内容,应在教学过程中选择适当份量的课外作业进行练习。习题内容可与实验内容结合起来。课外作业的主要内容为:

- 1) 直流磁路的正问题计算。
- 2) 直流电动机工作特性的计算。
- 3) 变压器运行特性的计算。
- 4) 交流绕组磁动势的计算。

- 5) 三相异步电动机工作特性的计算。
- 6) 运动方程式中各参数折算的计算。
- 7) 他励直流电动机调速特性的计算。
- 8) 他励直流电动机过渡过程的计算。
- 9) 三相异步电动机机械特性的计算。
- 10) 三相异步电动机起动设备的计算。
- 11) 三相异步电动机调速特性的计算。
- 12) 三相异步电动机过渡过程的计算。
- 13) 硬轴连接双电动机拖动系统机械特性的计算。
- 14) 长期变化负载下电动机功率的计算。
- 15) 短期工作方式电动机功率的计算。
- 16) 断续工作方式电动机功率的计算。

本课程在教学过程中,必须进行必要的实验,其主要目的和要求为:

1) 通过实验,对交、直流电动机的工作特性及机械特性的性质、基本原理和理论计算加以验证。

2) 通过进行独立的实验操作,学会测定各种电机(包括变压器)的工作特性、电力拖动的机械特性及电机参数的方法,提高实验技能和熟练程度。

下面列出本课程的主要实验内容供选做:

- 1) 直流电动机工作特性的测定。
- 2) 直流发电机实验。
- 3) 单相变压器实验。
- 4) 三相变压器极性和联结组的测定。
- 5) 三相异步电动机实验。
- 6) 三相同步电动机的起动和V形曲线的测定。
- 7) 交流伺服电动机的特性测定。
- 8) 交、直流测速发电机实验。
- 9) 自整角机实验。
- 10) 他励直流电动机在各种运转状态下机械特性的测定。
- 11) 他励直流电动机飞轮惯量的测定。
- 12) 三相异步电动机起动与调速实验。
- 13) 三相绕线转子异步电动机各种运转状态下机械特性的测定。
- 14) 电轴系统示范实验。

本课程与“电力拖动自动控制系统”“电力电子技术”“电器控制”等课程的分工必须明确,以免有些内容遗漏或重复。在交、直流电机的起、制动及调速部分,本书只介绍其基本原理、方法、特性,以及调速方法的技术经济指标,而如何实现自动起、制动及调速的电路以及分析系统的动态特性等问题,不属于本书介绍的范围。这些内容应在一些后续课程中讲授。

第一章

磁 路

内容提要

本章介绍磁路的基本知识和基本定律，并对无分支磁路和有分支磁路的计算方法作简要说明。另外，还介绍了铁磁物质的分类及其磁化特性。

第一节 磁路的基本定律

磁场作为电机实现机电能量转换的耦合介质，其强弱程度和分布状况不仅关系到电机的参数和性能，还决定电机的体积、重量。然而电机的结构、形状比较复杂，并有铁磁材料和气隙并存，很难用麦克斯韦尔方程直接求解。因此，在实际工程中，将电机各部分磁场等效为各段磁路，并认为各段磁路中磁通沿其截面积均匀分布，各段磁路中磁场强度保持为恒值，其意义是各段磁路的磁压降应等于磁场内对应点之间的磁位差。从工程观点来说，将复杂的磁场问题简化为磁路计算，其准确度是足够的。

一、磁场的几个常用物理量

1. 磁感应强度 B

磁场是电流通入导体后产生的，表征磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B ，它是一个矢量。磁场中各点的磁感应可以用闭合的磁感应矢量线来表示，它与产生它的电流方向可以用右手螺旋定则来确定，如图 1-1 所示。

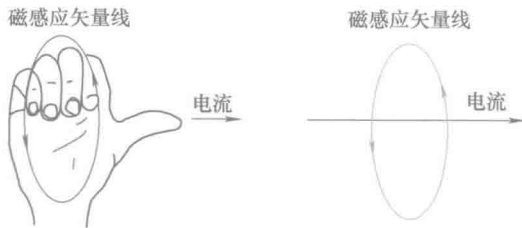


图 1-1 磁感应矢量线回转方向与电流方向的关系

国际单位制中， B 的单位为 T（特斯拉）， $1\text{T}=1\text{Wb}/\text{m}^2$ （韦伯/米²）。

2. 磁通 Φ

在均匀磁场中, 磁感应强度 B 与垂直于磁场方向面积 A 的乘积, 为通过该面积的通量, 称为磁通量, 简称磁通 Φ (一般情况下, 磁通则定义为 $\Phi = \int B dA$)。由于 $B = \Phi / A$, B 也称为磁通量密度, 或简称磁通密度。若用磁感应矢量线来描述磁场, 通过单位面积磁感应矢量线的疏密反映了磁感应强度 (磁通密度) 的大小以及磁通量的多少。

国际单位制中, Φ 的单位为 Wb (韦伯)。

3. 磁场强度 H

磁场强度 H 是计算磁场时所引用的一个物理量, 它也是一个矢量。用来表示物质磁导能力大小的量称为磁导率 μ , 它与磁场强度 H 的乘积等于磁感应强度, 即

$$B = \mu H$$

真空的磁导率为 μ_0 , 国际单位制中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 铁磁材料的磁导率 $\mu_{\text{Fe}} \gg \mu_0$ 。

国际单位制中, H 的单位为 A/m。

二、磁路的概念

如同把电流流过的路径称为电路一样, 磁通所通过的路径称为磁路。不同的是磁通的路径可以是铁磁物质, 也可以是非磁体。图 1-2 所示为两种常见的磁路。

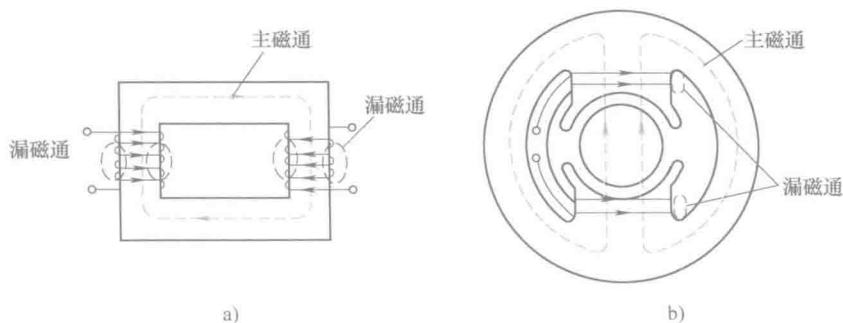


图 1-2 两种常见的磁路

a) 变压器磁路 b) 两极直流电机磁路

在电机和变压器里, 常把线圈套装在铁心上, 当线圈内通有电流时, 在线圈周围的空间 (包括铁心内、外) 就会形成磁场。由于铁心的导磁性能比空气要好得多, 所以绝大部分磁通将在铁心内通过, 这部分磁通称为主磁通, 是进行能量转换或传递的介质。围绕载流线圈, 在部分铁心和铁心周围的空间, 还存在少量分散的磁通, 这部分磁通称为漏磁通, 漏磁通不参加能量转换或传递。主磁通和漏磁通所通过的路径分别构成主磁路和漏磁路。图 1-2 中示意地表示出了这两种磁路。

用以激励磁路中磁通的载流线圈称为励磁线圈, 励磁线圈中的电流称为励磁电流。若励磁电流为直流, 磁路中的磁通是恒定的, 不随时间变化而变化, 这种磁路称为直流磁路, 直流电机的磁路就属于这一类。若励磁电流为交流, 磁路中的磁通是随时间变化而变化的, 这种磁路称为交流磁路, 交流铁心线圈、变压器、感应电机的磁路都属于这一类。