



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电机及拖动

(第3版)

许晓峰 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电机及拖动

(第3版)

许晓峰 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),是在2004年6月第2版的基础上修订而成的。全书共分8章,主要内容有直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、交流异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机及同步电动机的电力拖动、微控电机和电力拖动系统中电动机的选择。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的电气自动化技术、生产过程自动化技术、供用电技术、机电一体化技术和电气化铁道技术等专业的“电机与拖动”课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动/许晓峰主编. —3版. —北京:高等教育出版社,2007.12

ISBN 978-7-04-022720-8

I. 电… II. 许… III. ①电机-高等学校:技术学校-教材②电力传动-高等学校:技术学校-教材
IV. TM3 TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第175945号

策划编辑 孙杰	责任编辑 王莉莉	封面设计 张志奇	责任绘图 朱静
版式设计 王艳红	责任校对 杨雪莲	责任印制 朱学忠	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 肥城新华印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 19.75
字 数 480 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>
版 次 2000年8月第1版
2007年12月第3版
印 次 2007年12月第1次印刷
定 价 24.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22720-00

第3版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),是在2004年6月第2版的基础上修订而成的。本书第1版作为教育部高职高专规划教材于2000年8月出版,于2002年荣获全国普通高等学校优秀教材二等奖。本书第2版被纳入普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)。

全书共分8章,主要内容有直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、交流异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机及同步电动机的电力拖动、微控电机和电力拖动系统中电动机的选择。和第2版相比,增加了电焊变压器和整流变压器等特种变压器内容,增加了全密封变压器和Y3系列异步电动机等新技术内容,增加了同步电动机的电力拖动内容,增加了各种控制电机的应用内容,同时还增加了例题的数量。在难度上有所降低,如对直流电机换向、串励及复励直流电动机的电力拖动和交流绕组等内容进行了删减,降低了思考题与习题的难度,在结构上进行了部分改动,例如,将单相异步电动机内容纳入到异步电机一章中讲授,将电机理论中常用的物理概念与基本电磁定律内容放到绪论中讲授等。

在教材编写过程中,力求体现如下特点:

1. 侧重于基本原理和基本概念的阐述,并强调基本理论的实际应用,体现实用性。
2. 编写教材时,部分内容采用提出问题、分析问题、解决问题,最后总结出概念并推广到一般的写作方法,体现创新性。
3. 教材中编入了一些新技术内容,体现先进性。
4. 在每章末附有自测题目,便于学生自检自测,体现创新性和实用性。
5. 书中配有大量的例题、思考题和习题,便于学生巩固应掌握的基本知识和引导应用,体现实用性。
6. 力争做到概念准确、内容精练,重点突出。在讲解上力求通俗易懂、便于自学,体现实用性。

本书还配有相应的学习指导书,编写时兼顾了教与学两个方面,既适合教师教学使用,又适合学生学习使用。书中内容包括内容提要、基本要求、重点与难点分析、典型例题分析、部分思考题与习题解答、自测题参考答案六个方面。另外,为方便使用本教材的教师,出版社还免费提供与本教材相配套的电子教案和微机试题库系统,力争使教材做到“立体化”。

书中带有“*”的内容为选学内容。

本书第2章、5章、8章由沈阳工程学院吕宗枢教授编写,第1章、第7章中的第7.1~7.4节和第7.6节由承德石油高等专科学校邹振春教授编写,第6章和第7.5节由南昌工程学院吕树清教授编写,其余部分由沈阳工程学院许晓峰教授编写,全书由许晓峰教授统稿并担任主编。

另外,与本书配套的电子教案由赵君有和许晓峰共同制作。与本书配套的微机试题库系统

由吕宗枢和许晓峰共同编写。

本书由北京工商大学郭兴朴教授主审，审阅过程中提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编写时间紧迫，编者水平有限，书中缺点和错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编者

第2版前言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),是在2000年8月第一版的基础上修订而成的。本书第一版于2002年获全国普通高等学校优秀教材二等奖。

全书共分8章,主要内容有直流电机、直流电机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机、驱动和控制微电机以及电力拖动系统中电动机的选择等。和第一版相比,在难度上有所降低(特别是降低了习题的难度),在内容与结构上进行部分改动,例如,将交流绕组及电动势和磁动势内容放到三相异步电动机一章中讲述,将各种微电机内容并入控制电机章节中。删掉了电机及拖动实验以及部分附录等内容,增加了直线电动机和开关磁阻电动机等内容。

另外,编者还为本书编写了配套的学习指导书,书中内容包括内容提要、基本要求、重点与难点分析、典型例题分析、部分思考题与习题解答、自测题参考答案等六个方面。

本教材力争做到概念准确、内容精练、重点突出、理论联系实际。在讲解上力求通俗易懂、便于自学。本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的工业电气自动化、供用电技术和电气技术等专业的“电机及拖动”课程的教材,也可供有关工程技术人员工作时参考。

书中带有*的内容为选学内容。

本书第2、5、8章由沈阳工程学院吕中枢教授编写,第1章和第7章中的第7.4~7.8节由承德石油高等专科学校邹振春副教授编写,第6章和第7章中的第7.3节由南昌水利水电高等专科学校吕树清教授编写,其余部分由沈阳工程学院许晓峰副教授编写,全书由许晓峰统稿并担任主编。

本书由北京交通大学武慧芳副教授主审。主审审阅过程中提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

本书第1、2、3、4、5、6、7章由沈阳工程学院吕中枢教授编写,第8章由承德石油高等专科学校邹振春副教授编写,第9章由南昌水利水电高等专科学校吕树清教授编写,其余部分由沈阳工程学院许晓峰副教授编写,全书由许晓峰统稿并担任主编。2004年1月出版。

本书由北京交通大学武慧芳副教授主审。主审审阅过程中提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

编者

2004年1月

第1版前言

本书是根据1999年6月在北京联合大学召开的“高职高专机械、电子类教材研讨会”确定的教材编写原则,参考了现行高等工程专科基础课程教学基本要求,并结合我国高等职业教育的现状和发展趋势,按照“三教统筹,协调发展”的思路编写,可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的工业电气自动化、电气技术、供用电技术和机电一体化等专业的“电机及拖动”课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

“电机及拖动”课程是高等职业技术学院、高等工程专科学校和部分成人高等学校工业电气自动化、电气技术、供用电技术和机电一体化等专业学生必修的一门技术基础课,它是将“电机学”、“电力拖动”和“控制电机”等课程有机结合而成的一门新课。

本书编写时注意体现如下特点:

1. 侧重于基本原理和基本概念的阐述,并强调基本理论的实际应用。
2. 编写教材时,部分内容采用提出问题、分析问题、解决问题,最后总结出概念并推广到一般的写作方法。
3. 教材中编入了一些工程中已经应用且较为成熟的新技术,力求取材新颖。
4. 为便于巩固应掌握的基本知识和引导应用,书中配有大量的例题、思考题和习题。
5. 教材中所反映的实验和试验等实践环节内容,采用单独列章的方式加以叙述。
6. 在每章末附有自测题目,以便于学生自检、自测。
7. 教学内容模块化,各模块教学目标明确,具有针对性、可组合性和可选择性,便于不同专业选修。为了满足各专业的需要,并考虑各专业讲授的学时数相差较大(60~120学时),本书按多学时情况编写,对于少学时情况,可根据专业需要进行删减或选择。书中带有*的内容为选学内容。

8. 内容叙述力求简明扼要,通俗易懂,深入浅出,富于启发性。

9. 书中符号和插图采用国家新标准。

全书共分10章,其中2、6和9章由沈阳电力高等专科学校吕中枢教授编写,1、8章由承德石油高等专科学校邹振春副教授编写,7、10章由南昌水利水电高等专科学校吕树清副教授编写,4章由沈阳电力高等专科学校吴志宏老师编写,其余部分由沈阳电力高等专科学校许晓峰副教授编写,全书由许晓峰统稿并担任主编。

本书由深圳职业技术学院曹家喆副教授主审,审阅过程中提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编写时间紧迫,编者水平有限,书中缺点和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2000年2月于沈阳

主要符号表

a ——直流电机电枢绕组并联支路对数；交流绕组并联支路数	e_a ——直流电机换向元件中的电枢反应电势
a_e ——有效信号系数	F ——电机磁动势；力
B ——磁通密度	F_a ——直流电机电枢磁动势
B_a ——电枢磁通密度	F_{ad} ——直轴电枢反应磁动势
B_{av} ——平均磁通密度	F_{aq} ——交轴电枢反应磁动势
B_0 ——空载磁通密度	F_f ——励磁磁动势
B_δ ——气隙磁通密度	F_δ ——气隙磁动势
C_E ——电动势常数	f ——频率；磁动势瞬时值
C_T ——转矩常数	f_N ——额定频率
D_a ——直流电机电枢铁心外径	f_1 ——异步电机定子电路频率
E ——感应电动势	f_2 ——异步电机转子电路频率
E_a ——电枢电动势	f_ν —— ν 次谐波频率
E_{ad} ——直轴电枢反应电动势	GD^2 ——飞轮矩
E_{aq} ——交轴电枢反应电动势	H ——磁场强度
E_0 ——空载电动势	I ——电流
E_1 ——变压器一次电动势；异步电动机定子绕组感应电动势	I_a ——电枢电流
E_2 ——变压器二次电动势；异步电动机转子不动时的感应电动势	I_f ——励磁电流
E_{2s} ——异步电动机转子旋转时的电动势	I_{fN} ——额定励磁电流
E_ν —— ν 次谐波电动势	I_s ——短路电流
E_σ ——定子漏磁电动势	I_N ——额定电流
E_δ ——气隙电动势	I_0 ——空载电流
E_p ——每相电动势	I_{0a} ——铁损耗电流
E_Q ——虚构电动势	I_{0r} ——空载励磁电流
$E_{1\sigma}$ ——变压器一次漏电动势	I_1 ——变压器一次电流；异步电机定子电流
$E_{2\sigma}$ ——变压器二次漏电动势	I_2 ——变压器二次电流；异步电机转子电流
e ——电动势瞬时值	I_{1L} ——定子电流或一次电流的负载分量
e_L ——直流电机换向元件中的自感电动势	I_{st} ——起动电流
e_M ——直流电机换向元件中的互感电动势	i_a ——绕组支路电流
e_r ——直流电机换向元件中的电抗电动势	J ——转动惯量
	K ——直流电机换向片数；系数
	k ——变压器的变比

k_a ——自耦变压器变比	P_{SN} ——额定短路损耗
k_E ——异步电机电动势变比	P_0 ——空载损耗
k_i ——异步电机电流变比	Q ——无功功率
k_I ——起动电流倍数	q ——每极每相槽数
k_{q1} ——交流绕组基波分布系数	R ——电阻
k_{qv} ——交流绕组谐波分布系数	R_a ——直流电机电枢回路电阻
k_{st} ——异步电动机起动转矩倍数	R_{cr} ——直流发电机励磁回路的临界电阻
k_{w1} ——交流绕组基波绕组系数	R_f ——励磁回路电阻
k_{wv} ——交流绕组谐波绕组系数	R_L ——负载电阻
k_{y1} ——交流绕组基波短距系数	R_m ——磁阻
k_{yv} ——交流绕组谐波短距系数	R_1 ——变压器一次绕组电阻；异步电机定子电阻
k_μ ——饱和系数	R_2 ——变压器二次绕组电阻；异步电机转子电阻
L ——自感系数	R_s ——变压器、异步电机的短路电阻
L_r ——换向元件等效合成漏电感	R_m ——变压器、异步电机的励磁电阻
l ——有效导体的长度	S ——直流电机元件数；变压器视在功率
M ——互感系数	s ——异步电动机转差率
m ——相数；直流电动机起动级数	s_m ——临界转差率
N ——直流电机电枢绕组总导体数	s_N ——额定转差率
N_1 ——变压器一次匝数；异步电机定子绕组每相串联匝数	T ——转矩；周期；时间常数
N_2 ——变压器二次匝数；异步电机转子绕组每相串联匝数	T_{em} ——电磁转矩
n ——转速	T_L ——负载转矩
n_N ——额定转速	T_m ——最大电磁转矩
n_1 ——同步转速	T_N ——额定转矩
n_0 ——直流电动机理想空载转速	T_{st} ——起动转矩
P_N ——额定功率	T_0 ——空载转矩，制动转矩
P_{em} ——电磁功率	T_1 ——输入转矩，拖动转矩
P_{MEC} ——总机械功率	T_2 ——输出转矩
P_1 ——输入功率	U ——电压
P_2 ——输出功率	U_f ——励磁电压
p ——极对数	U_s ——变压器短路电压
P_{ad} ——附加损耗，杂散损耗	U_N ——额定电压
P_{Cu} ——铜损耗	U_1 ——变压器一次电压；交流电机定子电压
P_{Fe} ——铁损耗	U_2 ——变压器二次电压；异步电机转子电压
P_{mec} ——机械损耗，摩擦损耗	U_{20} ——变压器二次空载电压
P_f ——励磁损耗	u_s ——短路电压百分值
P_s ——短路损耗	u_{sa} ——短路电压的有功分量

u_{Sr} ——短路电压的无功分量	α ——角度；槽距角
v ——线速度	β ——角度；变压器负载系数
X ——电抗	γ ——角度
X_a ——电枢反应电抗	δ ——气隙长度；功角(又称为功率角)
X_{ad} ——直轴电枢反应电抗	η ——效率
X_{aq} ——交轴电枢反应电抗	η_{max} ——最大效率
X_d ——直轴同步电抗	θ ——角度；温度
X_q ——交轴同步电抗	θ_{se} ——步进电机的步距角
X_s ——短路电抗	μ ——磁导率
X_L ——负载电抗	μ_{Fe} ——铁磁性材料磁导率
X_m ——励磁电抗	μ_r ——相对磁导率
X_t ——同步电抗	ν ——谐波次数
X_σ ——漏电抗	τ ——极距；温升
X_1 ——变压器一次漏电抗；交流电机定子漏电抗	τ_{max} ——绝缘材料允许的最高温升
X_2 ——变压器二次漏电抗；异步电机转子不动时的漏电抗	Φ ——主磁通；每极磁通
X_{2s} ——异步电动机转子转动时的漏电抗	Φ_m ——变压器主磁通最大值
y ——节距；直流电机电枢绕组的合成节距	$\Phi_{1\sigma}$ ——一次漏磁通
y_K ——直流电机换向器节距	$\Phi_{2\sigma}$ ——二次漏磁通
y_1 ——直流电机第一节距	Φ_1 ——基波磁通
y_2 ——第二节距	Φ_ν —— ν 次谐波磁通
Z ——电机槽数；阻抗	Φ_0 ——空载磁通；异步电动机气隙主磁通
Z_s ——短路阻抗	φ ——相位角；功率因数角
Z_L ——负载阻抗	φ_1 ——变压器一次功率因数角；异步电机定子功率因数角
Z_m ——励磁阻抗	φ_2 ——变压器二次功率因数角；异步电机转子电路功率因数角
Z_r ——步进电机转子齿数	Ψ ——磁链；内功率因数角
Z_1 ——变压器一次漏阻抗；异步电动机定子漏阻抗	Ω ——机械角速度
Z_2 ——变压器二次漏阻抗；异步电动机转子漏阻抗	Ω_1 ——同步机械角速度
	ω ——电角速度；角频率
	λ 或 λ_T ——过载能力

目 录

绪论	1
0.1 电机及电力拖动系统概述	1
0.2 电机理论中常用的物理概念与基本电磁定律	3
0.3 本课程的性质、任务和内容	8
0.4 本课程的特点及学习方法	8
第1章 直流电机	10
1.1 直流电机的基本工作原理与结构	10
1.2 直流电机的电枢绕组简介	16
1.3 直流电机的电枢反应	22
1.4 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	27
1.5 直流电机的换向	29
1.6 直流发电机	31
1.7 直流电动机	37
小结	39
思考题与习题	40
本章自测题	41
第2章 直流电动机的电力拖动	43
2.1 电力拖动系统的运动方程式和负载转矩特性	43
2.2 他励直流电动机的机械特性	46
2.3 他励直流电动机的起动	54
2.4 他励直流电动机的制动	55
2.5 他励直流电动机的调速	61
小结	68
思考题与习题	69
本章自测题	71
第3章 变压器	73
3.1 变压器的基本工作原理和结构	74
3.2 单相变压器的空载运行	79
3.3 单相变压器的负载运行	86
3.4 变压器参数的测定	92
3.5 标么值	96
3.6 变压器的运行特性	99

3.7 三相变压器	102
3.8 变压器的并联运行	110
3.9 特种变压器	114
小结	122
思考题与习题	123
本章自测题	125
第4章 交流异步电动机	128
4.1 三相异步电动机的基本工作原理与结构	129
4.2 交流电机的绕组	136
4.3 交流电机绕组的感应电动势	141
4.4 交流电机绕组的磁动势	147
4.5 三相异步电动机的空载运行	153
4.6 三相异步电动机的负载运行	156
4.7 三相异步电动机的等效电路和相量图	160
4.8 三相异步电动机的功率平衡、转矩平衡和工作特性	164
4.9 三相异步电动机的参数测定	169
4.10 单相异步电动机	171
小结	175
思考题与习题	176
本章自测题	178
第5章 三相异步电动机的电力拖动	181
5.1 三相异步电动机的机械特性	181
5.2 三相异步电动机的起动	187
5.3 三相异步电动机的制动	196
5.4 三相异步电动机的调速	200
小结	212
思考题与习题	213
本章自测题	215
第6章 同步电机及同步电动机的电力拖动	217
6.1 同步电机的基本工作原理与结构	217
6.2 同步发电机的空载运行	222

6.3	同步发电机的电枢反应	224	*7.8	直线异步电动机	283
6.4	同步发电机的负载运行	227	小结	286	
6.5	同步发电机的并联运行	232	思考题与习题	287	
6.6	同步电动机和同步调相机	238	本章自测题	288	
*6.7	同步电动机的电力拖动	242	*第8章 电力拖动系统中电动机的选择	290	
小结	245				
思考题与习题	246				
本章自测题	247				
第7章 微控电机	249				
7.1	伺服电机	249	8.1	电动机的发热和冷却	290
7.2	测速发电机	254	8.2	电动机的工作制分类	292
7.3	自整角机	258	8.3	电动机容量的选择方法	294
7.4	旋转变压器	262	8.4	电动机种类、形式、电压、转速的选择	297
*7.5	微型同步电动机	269	小结	298	
7.6	步进电机	274	思考题与习题	298	
*7.7	开关磁阻电动机	281	部分思考题与习题参考答案	299	
			参考文献	302	

绪论

0.1 电机及电力拖动系统概述

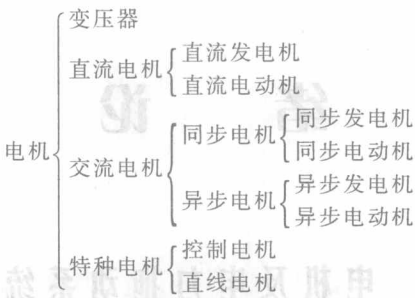
人类社会的生存和发展离不开能源。而能源则有多种形式,如热能、光能、化学能、机械能、电能和原子能等。其中,电能是最重要的能源之一,和其他能源形式相比具有明显的优点:适宜大量生产和集中管理、转换经济、传输和分配容易、便于自动控制;另外,它还是一种洁净能源,对环境的污染非常小。因此,电能工农业生产、交通运输、科学技术、信息传输、国防建设以及日常生活等各个领域获得了极为广泛的应用。

电机是生产、传输、分配及应用电能的主要设备。在现代化生产过程中,电力拖动系统是为了实现各种生产工艺过程所必不可少的传动系统,是生产过程电气化、自动化的重要前提。

电机是利用电磁感应原理工作的机械,它用途广泛,种类很多。常用的分类方法主要有两种:一种分类方法是按照能量转换职能来分,可分为发电机、电动机、变压器和控制电机四大类。发电机的功能是将机械能转换为电能。电动机的功能则是将电能转换为机械能,它可以作为拖动各种生产机械的动力,是国民经济各部门应用最多的动力机械,也是最主要的用电设备,各种电动机所消耗的电能占全国总发电量的60%~70%。变压器的作用是将一种电压等级的电能转换为另一种电压等级的电能。控制电机主要用于信号的变换与传递,在各种自动化控制系统中作为多种控制元件使用,如国防工业、数控机床、计算机外围设备、机器人和音像设备等均大量使用控制电机。

另一种分类方法是按照电机的结构、转速或运动方式分类,可分为变压器、旋转电机和直线电机等。变压器是一种静止的电机。旋转电机根据电源电流种类的不同又可分为直流电机和交流电机两大类。交流电机又分为同步电机和异步电机。同步电机转速恒为同步转速。电力系统中的发电机几乎都是同步电机。异步电机作为电动机运行时,其转速低于同步转速;作为发电机运行时,其转速高于同步转速。异步电机主要用作电动机。直线电动机就是把电能转换成直线运动的机械能的电机。直线电动机又可分为直线异步电动机、直线同步电动机、直线直流电动机和其他直线电动机。

综合以上两种分类方法,可归纳如下:



在现代化工业生产过程中，为了实现各种生产工艺过程，需要使用各种各样的生产机械。拖动各种生产机械运转，可以采用气动、液压传动和电力拖动。由于电力拖动具有控制简单，调节性能好，损耗小，经济，能实现远距离控制和自动控制等一系列优点，因此大多数生产机械均采用电力拖动。

用电动机作为原动机来拖动生产机械运行的系统，称为电力拖动系统。电力拖动系统包括：电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源五个部分，它们之间的关系如图 0.1.1 所示。

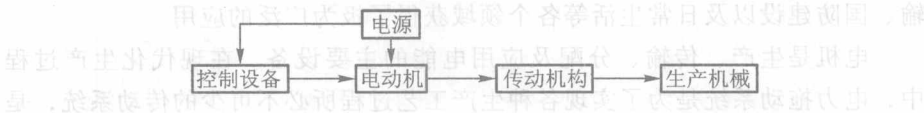


图 0.1.1 电力拖动系统示意图

电动机把电能转换成机械能，通过传动机构把电动机的运动经过中间变速或变换运动方式后，再传给生产机械驱动生产机械工作(有些情况下,电动机直接拖动生产机械,而不需要传动机构)。生产机械是执行某一生产任务的机械设备，是电力拖动的对象。控制设备是由各种控制电机、电器、电子元件及控制计算机等组成，用以控制电动机的运动，从而对生产机械的运动实现自动控制。为了向电动机及电气控制设备供电，电源是不可缺少的部分。

按照电动机的种类不同，电力拖动系统分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两大类。

电机是随着生产的发展而发展的，反过来，电机的发展又促进了社会生产力的不断提高。从 19 世纪末，电动机就逐渐代替蒸汽机作为拖动生产机械的原动机。一个多世纪以来，虽然电机的基本结构变化不大，但是电机的类型增加了许多，在运行性能、经济指标等方面也都有了很大的改进和提高，而且随着自动控制系统和计算机技术的发展，在一般旋转电机的理论基础上又发展出许多种类的控制电机，控制电机具有高可靠性、高精度度、快速响应的特点，已成为电机学科的一个独立分支。

纵观电力拖动的发展过程，交、直流两种拖动方式并存于各个生产领域。在交流电出现以前，直流电力拖动是唯一的一种电力拖动方式。19 世纪末期，由于研制出了经济实用的交流电动机，使交流电力拖动在工业中得到了广泛的应用。但随着生产技术的发展，特别是精密机械加工与冶金工业生产过程的进步，对电力拖动在起动、制动、正反转以及调速精度与范围等静态特性和动态响应方面提出了新的、更高的要求。由于交流电力拖动比直流电力拖动在技术上难以实现这些要求，所以 20 世纪以来，在可逆、可调速与高精度的拖动技术领域中，相当时期内几乎都是采用直流电力拖动，而交流电力拖动则主要用于恒转速系统。

虽然直流电动机具有调速性能优异这一突出优点,但是由于它具有电刷与换向器(又称整流子),使得它的故障率较高,电动机的使用环境受到限制(如不能在有易爆气体及尘埃多的场合使用),其电压等级、额定转速、单机容量的发展也受到限制。所以,在20世纪60年代以后,随着电力电子技术的发展,半导体变流技术的交流调速系统得以实现。尤其是70年代以来,大规模集成电路和计算机控制技术的发展,为交流电力拖动的广泛应用创造了有利条件。诸如交流电动机的串级调速、各种类型的变频调速、无换向器电动机调速等,使得交流电力拖动逐步具备了调速范围宽、稳态精度高、动态响应快以及在四象限做可逆运行等良好的技术性能,在调速性能方面完全可与直流电力拖动媲美。除此之外,由于交流电力拖动具有调速性能优良、维修费用低等优点,因此它今后将被广泛地应用于各个工业电气自动化领域中,并逐步取代直流电力拖动而成为电力拖动的主流。

0.2 电机理论中常用的物理概念与基本电磁定律

0.2.1 有关磁场的几个物理量

关于磁场的概念早在物理学、电工基础或电磁学等课程中就已学过,在此就有关磁场的几个基本物理量做简单叙述。

一、磁感应强度 B

磁感应强度又称磁通密度,用 B 来表示,它是描述磁场强弱及方向的物理量。通常用磁感线来形象地描绘磁场,即用磁感线的疏密程度表示磁感应强度 B 的大小,磁感线在某点的切线方向就是该点磁感应强度 B 的方向,如图 0.2.1 所示。

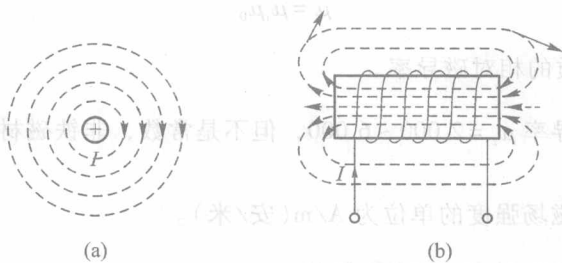


图 0.2.1 电流磁场中的磁感线

磁场是由电流产生的,磁感应强度 B 与产生它的电流之间的关系用毕奥-萨伐尔定律描述,磁感线的方向与电流的方向满足右手螺旋定则,如图 0.2.2 所示。

二、磁通量 Φ

磁通量简称磁通,用 Φ 表示,它是指穿过某一截面 A 的磁感应强度 B 的通量,通常用穿过某截面 A 的磁感线的数目来表示磁通的大小。其磁通与磁感应强度之间的关系可用下式表示

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (0.2.1)$$

设磁场均匀,且磁场与截面垂直时,上式可简化为

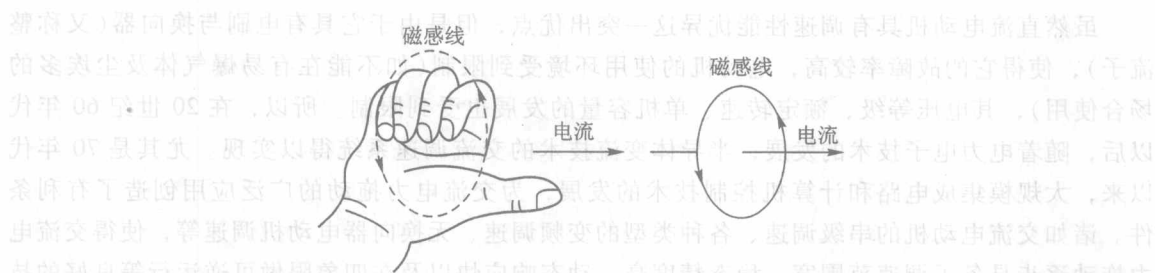


图 0.2.2 磁感线与电流的右手螺旋定则

$$\Phi = B \cdot A \text{ 或 } B = \frac{\Phi}{A} \quad (0.2.2)$$

为此,磁感应强度 B 又称磁通密度,简称磁密。在国际单位制中, Φ 的单位为 Wb (韦[伯]); B 的单位为 T (特[斯拉]), 则 $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ 。

三、磁场强度 H

磁场强度 H 是为建立电流与由其产生的磁场之间的数量关系而引入的物理量,其方向与 B 相同,其大小关系为

$$B = \mu H \text{ 或 } H = \frac{B}{\mu} \quad (0.2.3)$$

式中, μ 为磁导率,它是反映导磁介质导磁性能的物理量。磁导率 μ 越大的介质,其导磁性能越好。磁导率的单位是 H/m 。真空中的磁导率为

其他导磁介质的磁导率通常用 μ_0 的倍数来表示,即

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (0.2.4)$$

式中, $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 为导磁介质的相对磁导率。

铁磁材料的相对磁导率 $\mu_r = 2\,000 \sim 6\,000$, 但不是常数,非铁磁材料的相对磁导率 $\mu_r = 1$, 且为常数。

在国际单位制中,磁场强度的单位为 A/m (安/米)。

0.2.2 电机所用材料和铁磁材料的特性

一、电机中所用的材料

通常将电机所用的材料分为四大类。第一类是导电材料,用以构成电路,常用铝或铜制成。第二类是导磁材料,用以构成磁路,常用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚的两面涂有绝缘漆的硅钢片叠成。第三类为绝缘材料,用此把带电部分分隔开来,用云母、瓷等材料制成。按国际电工协会规定,绝缘材料的绝缘等级共分 Y、A、E、B、F、H、C 七级,常用的有五个等级,每个等级的极限允许温度详见表 8.1.1。目前,我国生产的变压器和电机多采用 A 级、E 级和 B 级绝缘,发展趋势是采用 F 级和 H 级绝缘。第四类为机械支撑材料,用钢铁或铝合金制成。

二、铁磁材料的磁化特性

各类电机都是以磁场作为媒介,通过电磁感应作用来实现能量转换的,所以在电机里必须

有引导磁能的磁路,为了在一定的励磁电流下产生较强的磁场,电机和变压器的磁路均用导磁性能良好的铁磁材料组成。

铁磁材料包括铁、镍、钴及其合金等,其铁磁特性简述如下。

1. 具有高的导磁性能

实验表明,所有非铁磁材料(如铜、铝和木材等)的导磁系数都接近于真空磁导率 μ_0 ,而铁磁材料的磁导率(系数) μ_{Fe} 比 μ_0 大成百上千倍。对于电机中常用的铁磁材料, $\mu_{Fe} = (2\ 000 \sim 6\ 000)\mu_0$ 。

2. 磁化曲线呈非线性(饱和特性)

铁磁材料的磁化特性可用磁化曲线来描述,即 $B = f(H)$ 曲线,如图 0.2.3 所示。

根据 $\mu_{Fe} = \frac{dB}{dH}$ 可得 $\mu_{Fe} = f(H)$ 曲线,如图 0.2.3 所示。由图

可知,当铁磁材料饱和时,其磁导率 μ_{Fe} 变小。

对于非铁磁材料,其 $B = \mu_0 H \propto H$,即 $B = f(H)$ 是一条直线。

3. 存在磁滞现象和磁滞损耗

磁滞损耗 P_h 与磁通的交变频率 f 及磁通密度的幅值 B_m 的关系为

$$P_h \propto f \cdot B_m^\alpha \quad (0.2.5)$$

对于常用的硅钢片,当 $B_m = (1.0 \sim 1.6)\text{ T}$ 时, $\alpha \approx 2$ 。

4. 存在涡流损耗

涡流损耗与磁通的交变频率、铁心中磁通密度幅值 B_m 、钢片的电阻 R_e 及钢片厚度 d 有关,其关系为

$$P_e \propto f^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 / R_e \quad (0.2.6)$$

由式(0.2.6)可知,为减少涡流损耗,必须减少钢片的厚度,所以电工钢片的厚度一般为 $(0.35 \sim 0.5)\text{ mm}$,且两面涂有绝缘漆。同时增加钢片的电阻率,所以电工钢片中常加入4%左右的硅,变成硅钢片。

通常把磁滞损耗和涡流损耗合在一起称为铁心损耗,用 P_{Fe} 表示。当硅钢片厚度及材料一定时,铁心损耗与磁通的交变频率及磁密幅度的关系如下

$$P_{Fe} \propto f^\beta \cdot B_m^2 \quad (0.2.7)$$

式中, $\beta = 1.2 \sim 1.6$ 。

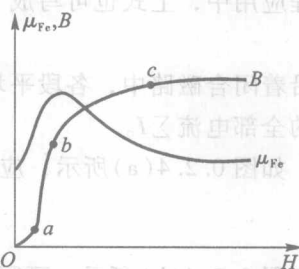


图 0.2.3 铁磁材料的磁化曲线

0.2.3 电机理论中常用的基本电磁定律

一、电路定律

电路定律有基尔霍夫第一、第二定律和欧姆定律,如表 0.2.1 所示。

二、磁路定律

1. 磁路基尔霍夫第一定律

磁路中的任一闭合面内,在任一瞬间,穿过该闭合面的各分支磁路磁通的代数和等于零,即