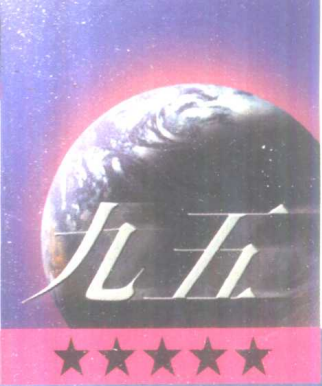




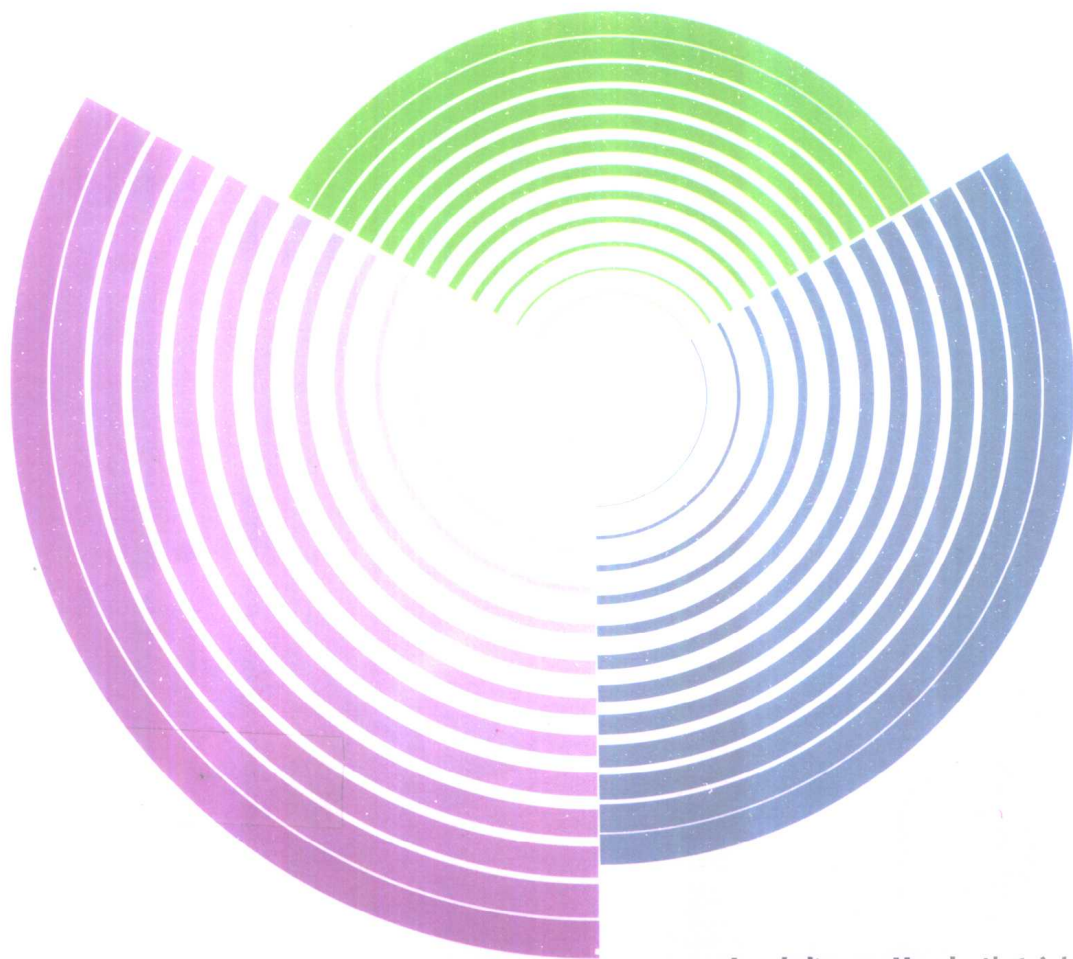
普通高等教育“九五”国家级重点教材

B

普通高等教育机电类规划教材

电机学

哈尔滨理工大学 汤蕴璆 史 乃 主编



机械工业出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

普通高等教育机电类规划教材

电 机 学

主 编	汤蕴璆	史 乃
参 编	陈子痛	肖如鸿
	谢德馨	
主 审	李仁定	



机 械 工 业 出 版 社

本书共13章。前8章主要阐述磁路的基本原理、变压器、直流电机、感应电机和同步电机的稳态分析,以及机电能量转换的原理,后5章阐述电机的一般分析方法和旋转电机、变压器的动态分析。每章后面附有思考题和习题,书末编入凸极同步电机定子绕组的自感和互感等3个附录。为引导学生用计算机来求解各种电机问题,针对几个典型问题,编入了相应的数值解法和计算机源程序。全书的编写方针是:结合国情,博采众长,削枝强干,推陈出新。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化和其他强电类专业的教材,亦可供有关科技人员作为参考用书。

电 机 学

哈尔滨理工大学 汤蕴璆 史 乃 主编

*

责任编辑:刘 辉 版式设计:霍永明

封面设计:姚 毅 责任校对:张莉娟

责任印制:何全君

*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆·印张 22.25·字数 540千字

1999年5月第1版第1次印刷

印数 0 001—2 000 定价:29.00元

*

ISBN 7-111-06862-9/TM·760(课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

前 言

本书是在 1993 年出版的高等学校教材《电机学》的基础上, 根据 1997 年 6 月济南会议制订的《电机学教材编写大纲》重新编写的。

全书共 13 章。前 8 章主要阐述磁路的基本原理、变压器、直流电机、感应电机和同步电机的稳态分析, 以及机电能量转换原理 (90 学时), 后 5 章阐述电机的一般分析方法和动态分析 (40 学时, 选学)。对于一些选学内容, 节前打有 * 号。每章后面附有习题, 书末编有凸极同步电机定子绕组的自感和互感等 3 个附录。本书可作为高等学校电气工程及其自动化和其他强电类专业的教材, 亦可供有关科技人员作为参考用书。

本书是“九五”机械部国家级重点立项教材, 其特点是: ①稳态部分注重基本概念, 基本理论和基本方法的阐述, 使学生掌握分析电机的基本方法, 建立牢固的物理概念, 为学习后继课程和今后解决日常遇到的工程问题作好准备。②阐明了机电能量转换的机制和条件, 这一方面是对各种电机运行机制的总结和提升, 对于将来从事各种新型电机的开发和研制, 也是十分重要和具有启发意义的。③为适应近 20 年来电机理论的发展和生产、科研上的实际需要, 除稳态分析外, 书中进一步阐明了电机分析的一般方法和动态分析。在动态分析中, 有针对性地选用一种方法来研究一种电机的典型问题, 例如用 $dq0$ 变换来研究同步电机的三相突然短路问题, 用状态方程法来研究感应电动机的起动动态过程等; 做到重点突出, 有的放矢。所有这些, 为今后解决各种电机的动态问题, 以及解决由变频非正弦电源供电时所引起的问题, 打下一定的基础。④对直流电机和其他次要、过时的内容进行了删减, 适当加进一些学科前沿的内容。⑤为了引导学生用计算机来求解各种电机问题, 书中编入针对稳态和动态问题的数值解法和对应的计算机源程序。⑥将“磁路”单独列为一章。⑦稳态分析和动态分析两大部分具有相对独立性, 可根据实际需要和学时多少决定取舍; 各章次序在具体讲授时亦可以改变。

全书的编写方针是: 结合国情, 博采众长, 削枝强干, 推陈出新。目标是编写一本取材精、科学性强、概念清、便于教学的简明教材。

本书由哈尔滨理工大学汤蕴璆教授、史乃教授, 河北工业大学陈子痛教授, 山东工业大学肖如鸿教授, 沈阳工业大学谢德馨教授等共同编写, 汤蕴璆教授、史乃教授担任主编。上海交通大学李仁定教授担任主审。李仁定教授对本书中许多问题的写法提出了宝贵意见, 对此编者表示衷心的感谢。

本书的编写得到了西安交通大学汪国梁教授、励鹤鸣教授、鱼振民副教授, 合肥工业大学姚守猷教授, 山东工业大学胡颂尧教授, 清华大学朱东起教授, 浙江大学林瑞光教授, 上海大学江建中教授, 沈阳工业大学王凤翔教授、王侠的副教授, 天津大学刘承榆教授, 湖南大学吕兴熹教授, 哈尔滨工业大学陆永平教授、刘彦彬教授, 哈尔滨理工大学梁艳萍副教授等的关心和支持。哈尔滨电机厂、沈阳变压器厂和大连电机厂等单位为本书提供了产品照片和资料, 在此一并表示谢意。

编者

1998 年 7 月

主 要 符 号 表

A	面积; A 相	f	频率; 力; 磁动势的瞬时值
a	交流绕组并联支路数; a 相; 120° 复数算子	f_1	定子频率
a_{-}	直流电机并联支路对数	f_2	转子频率
B	磁通密度; B 相	f_N	额定频率
B_g	气隙磁密	f_{ν}	ν 次谐波频率
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	H	磁场强度
B_{aq}	交轴电枢磁场磁密	h	高度
B_r	漏磁磁密	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
b	宽度; b 相; 磁通密度瞬时值	I_a	直流电机的电枢电流
b_s	槽宽	I_m	交流激磁电流
C	C 相	I_f	直流励磁电流
C_T	转矩常数	I_{μ}	激磁电流中的磁化分量
C_e	电动势常数	I_N	额定电流
c	比热容; c 相	I_0	空载电流; 零序电流
D_1	定子直径	I_k	短路电流; 堵转电流
D_a	电枢外径	I_{st}	起动电流
E	电动势 (交流表示有效值)	I_1	变压器一次绕组 (感应电机定子) 电流
E_{ϕ}	相电动势	I_2	变压器二次绕组 (感应电机转子) 电流
E_0	空载电动势	I_2'	I_2 的归算值
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_{+}	电流的正序分量
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_{-}	电流的负序分量
E_2'	E_2 的归算值	i	电流的瞬时值
E_q	q 个线圈的合成电动势	J	转动惯量
e	电动势的瞬时值	j	电流密度
e_c	换向电动势; 线圈电动势	K	换向片数
e_r	电抗电动势	k	常数; 变压器电压比
F	磁动势; 力	k_i	电流比
F_a	电枢磁动势	k_e	电动势比
F_m	感应电机的激磁磁动势	k_{d1}	基波分布因数
F_{ad}	直轴电枢磁动势	k_{p1}	基波节距因数
F_{aq}	交轴电枢磁动势	k_{w1}	基波绕组因数
$F_{\phi 1}$	单相绕组的基波磁动势	$k_{d\nu}$	ν 次谐波的分布因数
$F_{\phi \nu}$	单相绕组的 ν 次谐波磁动势	$k_{p\nu}$	ν 次谐波的节距因数
F_{q1}	q 个线圈的基波合成磁动势	$k_{w\nu}$	ν 次谐波的绕组因数
F_c	换向极绕组磁动势	K_c	短路比
		L	自感

$L_{1\sigma}$	变压器一次绕组（感应电机定子）的漏磁电感	R_n	旋转阻力系数
$L_{2\sigma}$	变压器二次绕组（感应电机转子）的漏磁电感	S	视在功率
l	长度	S_N	额定视在功率
M	互感	s	转差率
m	相数	s_N	额定转差率
m_1	交流电机定子相数	s_m	最大转矩时的转差率
m_2	感应电机转子相数	s_+	转子对正向旋转磁场的转差率
N	每相串联匝数	s_-	转子对反向旋转磁场的转差率
N_c	每个线圈的匝数	T	转矩；时间常数；周期
n	转子转速	T_c	换向周期
n_N	额定转速	T'_d	直轴瞬态时间常数
n_0	空载转速	T_a	电枢时间常数
n_s	同步转速	T_f	励磁绕组时间常数
n_r	ν 次谐波旋转磁场的转速	T_N	额定转矩
n_2	转子基波旋转磁场相对于转子的转速	T_0	空载转矩
Δn	转速调整率	T_e	电磁转矩
P	功率	T_{max}	最大转矩
P_N	额定功率	T_{pi}	同步电动机的牵入转矩
P_e	电磁功率	T_{st}	起动转矩
P_n	感应电动机的转换功率	T_2	负载转矩
P_k	堵转功率；短路功率	t	时间；温度
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；时间的微分算子 p	U_1	电源电压；定子端电压
p_0	极对数	U_+	正序电压
p_{Cu}	铜耗	U_-	负序电压
p_{Fe}	铁耗	U_0	空载电压
p_Δ	杂散损耗	U_k	短路电压；堵转电压
p_a	机械损耗	u	电压的瞬时值
Q	槽数；热量	Δu	电压调整率
q	每极每相槽数	$2\Delta U_s$	每对电刷的电压降
R	电阻	W	功；能
R_m	激磁电阻；磁阻	W_m	磁场能量
R_1	变压器一次绕组（感应电机定子）电阻	X	电抗
R_2	变压器二次绕组（感应电机转子）电阻	X_s	电枢反应电抗
R'_2	R_2 的归算值	X_+	正序电抗
R_f	励磁绕组电阻	X_-	负序电抗
R_a	电枢电阻	X_0	零序电抗
R_R	端环电阻	X_{ad}	直轴电枢反应电抗
R_B	导条电阻	X_{aq}	交轴电枢反应电抗
R_k	变压器（感应电机）的短路电阻	X_σ	定子漏抗

X_s	同步电抗	$\eta_{\max}$	最大效率
X_d	直轴同步电抗	θ	温升; 角度
X_q	交轴同步电抗	Λ	磁导
X_m	激磁电抗	Λ_o	漏磁导
X_k	短路电抗	λ	比漏磁导; 导热系数
X_{1o}	变压器一次绕组 (感应电机定子) 漏抗	μ	磁导率; 转子谐波次数
X_{2o}	变压器二次绕组 (感应电机转子) 漏抗	μ_o	空气磁导率
X'_{2o}	X_{2o} 的归算值	μ_{Fe}	铁心磁导率
X'_d	直轴瞬态电抗	ν	谐波次数
X_d^*	直轴超瞬态电抗	ρ	电阻率
y	绕组合成节距	τ	极矩
y_1	第一节距	Φ	磁通量
y_2	第二节距	Φ_o	空载磁通; 同步电机的主磁通
y_c	换向器节距	Φ_a	电枢反应磁通
Z	阻抗; 电枢总导体数	Φ_m	变压器或感应电机的主磁通
Z_m	激磁阻抗	Φ_o	漏磁通
Z_k	短路阻抗	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
Z_+	正序阻抗	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
Z_-	负序阻抗	Φ_ν	ν 次谐波磁通
Z_o	零序阻抗	ϕ	磁通量的瞬时值
Z_{1o}	变压器一次绕组 (感应电机定子) 的漏阻抗	φ	相角; 功率因数角
Z_{2o}	变压器二次绕组 (感应电机转子) 的漏阻抗	φ_o	空载功率因数角
Z'_{2o}	Z_{2o} 的归算值	φ_k	短路功率因数角
α	角度; 相邻两槽间的电角度	ψ	磁链; $\dot{E}$ 和 $\dot{I}$ 间的夹角
β	夹角; q 个线圈的总夹角	ψ_o	内功率因数角
δ	气隙; 功率角	ψ_2	感应电机转子的内功率因数角
ϵ	小数; 短距角	Ω	机械角速度
η	效率	Ω_s	同步机械角速度
η_N	额定效率	ω	角频率, 电角速度

目 录

第一部分 电机的基本原理和稳态分析

前言

主要符号表

绪论 3

0.1 电机在国民经济中的作用 3

0.2 我国电机工业发展概况 3

0.3 本课程的任务 5

第一章 磁路 6

1.1 磁路的基本定律 6

1.2 常用的铁磁材料及其特性 10

1.3 直流磁路 15

* 1.4 交流磁路的特点 20

第二章 变压器 22

2.1 变压器的基本结构
和额定值 22

2.2 变压器的空载运行 24

2.3 变压器的负载运行 26

2.4 变压器的基本方程、等效电路和
相量图 29

2.5 变压器等效电路参数的测定 36

2.6 三相变压器 38

2.7 标么值 45

2.8 变压器的运行特性 48

2.9 变压器的并联运行 51

* 2.10 三绕组变压器、自耦变压器和
其他用途的变压器 54

第三章 直流电机的稳态分析 62

3.1 直流电机的工作原理和
基本结构 62

3.2 直流电枢绕组 67

3.3 空载和负载时直流电机的
磁动势和磁场 73

3.4 直流电机的感应电动势和
电磁转矩 77

3.5 直流电机的基本方程 78

3.6 直流发电机的运行特性 82

3.7 直流电动机的运行特性 86

3.8 直流电动机的起动、调速和制动 90

3.9 换向 95

第四章 交流绕组及其电动势和

磁动势 101

4.1 交流绕组的构成原则和分类 101

4.2 三相双层绕组 101

* 4.3 三相单层绕组 107

4.4 正弦磁场下交流绕组
的感应电动势 109

4.5 感应电动势中的高次谐波 114

4.6 通有正弦电流时单相绕组
的磁动势 119

4.7 通有对称三相电流时三相绕组的
磁动势 123

* 4.8 不对称或非正弦电流下三相绕组的
磁动势 127

第五章 感应电机的稳态分析 131

5.1 感应电机的结构和运行状态 131

5.2 三相感应电动机的磁动势
和磁场 134

5.3 三相感应电动机的电压方程和
等效电路 138

5.4 感应电动机的功率方程和
转矩方程 143

* 5.5 笼型转子的极数、相数和
参数的归算 147

5.6 感应电动机参数的测定 149

5.7 感应电动机的转矩-转差率曲线 152

5.8 感应电动机的工作特性 155

5.9 感应电动机的起动，深槽和
双笼电动机 160

5.10 感应电动机的调速 165

5.11 单相感应电动机 171

* 5.12 感应发电机和直线感应
电动机 175

第六章 同步电机的稳态分析 180

- 6.1 同步电机的基本结构和运行状态 180
- 6.2 空载和负载时同步发电机的磁场 186
- 6.3 隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路 189
- 6.4 凸极同步发电机的电压方程和相量图 192
- 6.5 同步发电机的功率方程和转矩方程 195
- 6.6 同步电机参数的测定 197
- 6.7 同步发电机的运行特性 201
- 6.8 同步发电机与电网的并联运行 205
- 6.9 同步电动机与同步补偿机 214

6.10 同步发电机的不对称运行 221

* 6.11 永磁和自控式同步电动机 228

第七章 机电能量转换原理 233

7.1 机电能量转换过程中的能量关系 233

7.2 双边激励机电装置中的机电能量转换 238

7.3 机电能量转换的条件 244

* 7.4 产生恒定电磁转矩的条件 246

* 7.5 交流电机的功率因数 248

第八章 电机的发热和冷却 251

8.1 电机的温升和温升限度 251

8.2 电机的发热和冷却 252

8.3 电机的冷却方式 255

* 8.4 变压器的冷却方式 257

第二部分 电机的一般分析方法和动态分析

第九章 旋转电机分析的一般

方法 261

9.1 旋转电机的分析步骤 261

9.2 运动方程的建立方法 262

9.3 运动方程的解法 265

9.4 坐标变换 271

* 9.5 非正弦电源供电时电机的分析方法 278

* 第十章 直流电机的动态分析 280

10.1 直流电机的运动方程 280

10.2 他励直流电动机的框图和传递函数 281

10.3 直流电动机起动过程的动态分析 285

第十一章 同步电机的动态分析 288

11.1 在相坐标系中同步电机的运动方程 288

11.2 在 $dq0$ 坐标系中同步电机的运动方程 290

11.3 同步电机的标么值 295

11.4 同步电机的直轴、交轴等效电路和运算电抗 298

11.5 同步发电机的三相突然短路 301

11.6 阻尼绕组对三相突然短路过程的影响 309

第十二章 感应电机的动态分析 313

12.1 三相感应电动机的运动方程 313

12.2 三相感应电动机起动过程的动态分析 316

* 12.3 三相感应电动机的矢量变换控制 319

* 第十三章 变压器的过电流和过电压 323

13.1 变压器的过电流 323

13.2 变压器的过电压 325

附录 A 谐波磁场对感应电动机转矩-转差率曲线的影响 328

A.1 异步寄生转矩 328

A.2 同步寄生转矩 329

A.3 削弱寄生转矩的方法 330

附录 B 凸极同步电机定子绕组的自感和互感 331

B.1 定子相绕组的自感 331

B.2 定子相绕组间的互感 333

附录 C 三相感应电动机起动过程动态分析的源程序 334

C.1 程序说明 334

C.2 主程序和子程序 334

参考书目 346

第 一 部 分

电机的基本原理和稳态分析

绪 论

0.1 电机在国民经济中的作用

电机是一种进行机电能量转换或信号转换的电磁机械装置。就能量转换的功能来看,电机可分为两大类。第一类是发电机,它是把机械能转换为电能的装置,通过原动机先把各类一次能源蕴藏的能量转换为机械能,然后通过发电机转换为电能,经输、配电网送往各工矿企业、城市、家庭等各种用电场合。第二类是电动机,它把电能转换为机械能,用来驱动各种用途的生产机械和其他装置,以满足人类的不同需求。

由于一次能源形态的不同,可制成不同的发电机。利用水力资源,和水轮机配合,可制成水轮发电机;由于水库容量和水头落差高低的不同,可制成容量和转速各异的水轮发电机。利用煤、石油等资源的热能,和锅炉、汽轮机配合,可制成汽轮发电机,这种发电机多为高速电机(3 000 r/min)。此外,还有利用风能、原子能、地热等能源的各类发电机。

到1997年,我国的电力总装机容量已达25.4万MW,年总发电量为11000亿kW·h。从发电量看,已居世界第二位(其中以火、水电为主)。预计到2000年,总装机容量将超过30万MW。随着三峡水利电力工程的启动,大亚湾、秦山核电站一期工程的建成和发电,今后将会加强大型水电站和核电站的开发工作,并加大水、核电的比重。

电动机作为原动机,已广泛应用于各行各业,大至冶金企业使用的高达上万千瓦的电动机,小至小功率电机、乃至几瓦的微电机。在各类原动机中,电动机的容量已超过总容量的60%。

根据应用场合的要求和电源的不同,电动机有直流电动机、交流同步电动机、交流感应电动机,以及满足不同需求的特种电动机。40年代以后,由于受第二次世界大战的影响,自动控制技术得到很大发展,出现了一系列新的控制电机。70年代以后,由于现代控制理论的创立,以及大功率电力电子元件、微电子器件、变频技术以及微型计算机技术取得的一系列进展,为交流调速技术的发展创造了理论和物质基础,从而研制出多种调速性能优良、效率较高、能满足不同要求的交流电动机调速系统。

电力工业是一种先行工业,世界各国经济发展的经验表明,只有当电力工业的增长率高于其他工业的发展速度,才能促使整个国民经济的全面快速增长,并满足人民生活的各种需求。我国是一个拥有十多亿人口的大国,水力、煤炭等资源十分丰富,相信在今后,电力和电机制造工业将会得到更快的发展。

0.2 我国电机工业发展概况

解放前,我国的电机工业极端落后,全国只有少数几个城市有电机制造厂;这些厂规模小,设备差,生产能力低下,产品规格混乱,材料多依赖进口。解放前的最高年产量(1947

年),发电机为2万kW,电动机为5.1万kW,交流发电机的单机容量不超过200kW,交流电动机不超过230kW。

建国以来,我国的电机制造业发展得很快,已经逐步建成较为完整的电机制造业体系。在产量方面,1949~1952年国民经济恢复时期,各种主要产品就已达到和超过建国前的最高水平。到第一个五年计划结束时(1957年),年产量达到145万kW,是1949年的23.9倍。单机容量方面,1954年制成6000kW、1958年制成1.2万kW的汽轮发电机,1955年制成1万kW的水轮发电机。在此期间,我国的电机工业逐步掌握了一系列产品的设计方法和制造工艺,并进行了中、小型电机新产品的全国统一设计,改变了产品规格混乱的现象。到1957年年底,电机制造业的产品自给率已达到75%。

1958~1966年期间,电机制造业无论在发展品种、提高产品质量,还是在产品数量方面,都做出了巨大的成绩。在中、小型感应电动机方面,设计了J2、JO2系列并正式投产。与旧系列相比,该系列效率提高了1%~2%,体积缩小了25.6%,重量减轻了20.1%。在发电设备方面,1959年和1960年相继设计和制造出5万kW氢冷和10万kW氢内冷汽轮发电机,之后又进行了5万kW以下汽轮发电机新系列的统一设计。同时,1959年还制成了7.25万kW的水轮发电机,1964年又制成了大型22.5万kW水轮发电机组。在直流电机和中型交流电机方面,制成了1150初轧机用的4500kW和4930kW直流电动机-发电机组,6300kW大型感应电动机和10.8MW同步电动机。在这期间,还研制出1.2万kW双水内冷汽轮发电机。1960年又试制成功了10万kW的双水内冷汽轮发电机。在中、小型直流电机和微电机方面,设计出合乎我国国情的新的系列产品。还进行了许多调查研究和科学实验工作,建立了我国自己的电机国家标准。

1969~1984年间,又先后制成了12.5万kW和30万kW的双水内冷汽轮发电机。为适应生产的需要,还试制和生产了各种不同用途的交、直流电机,包括1700mm连轧机上使用的2×3000kW的大型直流电动机(1975年),用于晶闸管供电的GZ型(1975年)和GZ2型(1982年)中型直流电动机系列,以及新的中小型Y系列感应电动机(1984年)。并对电机的一些新原理、新结构、新工艺、新材料和新的测试方法进行了许多研究工作,取得了许多成果。

1985年后的十多年间,我国电机工业在引进、吸收和消化国外先进技术的基础上,对原有电机进行了改型和优化设计,并相继开发和研制出多种新系列电机,不仅基本满足了国内生产的需求,尚有部分产品出口。在发电设备方面,相继于1986年制成300MW双水内冷和全氢冷型汽轮发电机,1989年又试制成功优化型300MW水氢氢冷汽轮发电机,这些电机的一些主要性能已经达到当时的国际水平。在引进技术的基础上,1986年还试制出600MW水氢氢冷汽轮发电机,并投入运行。在此期间,还相继制成125、250、300、400和550MW的大型水轮发电机,并安装运行。在大型交、直流电机方面,研制成功了2×5000kW的直流电动机,4700kW的直流发电机和42MW的同步电动机。在中、小型和微型电机方面,已开发和制成125个系列、840多个品种、几千个规格的各种电机,其中达到80年代初期国际水平的约占50%左右。在特殊电机方面,由于新的永磁材料的出现,制成了许多高效节能、维护简单的永磁电机。由于电机和电力电子装置相结合,出现了各种性能和形态迥异的“一体化电机”,满足了生产和生活领域中各种不同的需求。

0.3 本课程的任务

本课程是一门技术基础课。通过本课程的学习,可获得电机的基本理论、基本知识和基本技能,为学习专业课做好准备,为今后从事有关的专业工作打下基础。

学习本课程后,应达到下列基本要求:

- (1) 对磁路的计算方法及交、直流磁路和铁心线圈的性能应有基本的了解。
- (2) 对变压器和三种主要电机(直流电机、感应电机和同步电机)的基本结构要有一定认识。对各种电机中气隙磁场的性质和时空关系要有深入的了解。
- (3) 对各种电机正常稳态运行时的分析方法和运行性能,要牢固掌握。要能正确地建立电压方程和转矩方程,明确电机中的能量转换关系;对稳态运行时电机的参数要有清晰的物理概念。能熟练地运用等效电路(相量图)和复数来计算电机的性能和主要运行数据。
- (4) 对机电装置中的能量关系,感应电动势、磁场储能、电磁转矩和机电能量转换过程,以及持续进行机电能量转换的条件有一个基本的了解。从长远来看,如能举一反三,就能触类旁通地分析、研制和开发各种不同的新型电机和特种电机。
- (5) 对同步电机的不对称运行和直流电机、同步电机以及感应电机在动态情况下的分析方法和相应的参数要有基本的物理概念;对一些典型的运行方式和动态过程要能作出正确的分析。
- (6) 初步掌握用计算机来计算电机中稳态和动态问题的方法。
- (7) 既要掌握各种电机的共性(例如电动势、磁动势和电磁转矩的产生和算法、旋转电机的分析方法等),使学到的知识能够融会贯通;又要掌握各种电机的个性和特点,以便结合实际,对具体问题进行分析,达到解决问题的目的。
- (8) 了解电机的有关工程性问题,例如发热和冷却,励磁系统,各种电机的应用范围,电机的额定值,主要电机的各种性能数据(效率、过载能力、起动性能数据、主要参数)范围等。
- (9) 通过实验,熟练掌握电机的基本实验方法和操作技能,如运行性能、损耗、稳态参数的求取和测定方法,电动机的起动和调速、发电机的建压和调频、调压等;能对实验结果进行分析和评定,并初步具有检查电机故障的能力。

第一章 磁 路

电机是一种实现机电能量或信号转换的机电装置，变压器是一种实现电能或电信号传递的电磁装置，它们的工作原理都是以电磁感应原理为基础，因此无论是电机还是变压器，都必须以电磁场作为其耦合场。严格地说，电磁场是电场和磁场的综合，但在电机中，电流频率不高，可动部件的运动速度大大低于光速，电磁辐射可以略去不计，可把电场和磁场分开处理，且绝大多数电机均以磁场作为耦合场。

电机中作为耦合场的磁场，其强弱程度和分布状况不仅关系到电机的参数和性能，而且还将决定电机的体积和重量。所以磁场的分析和计算，对于认识和掌握电机是十分重要的。然而电机的结构形状比较复杂，又有铁磁材料与气隙并存，很难用麦克斯韦方程直接解析求解；因此在实际工作中，常把磁场问题简化成磁路问题来处理。从工程观点来说，准确度已经足够。

1.1 磁路的基本定律

一、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。图 1-1 表示两种常见的磁路，其中图 1-1a 为变压器的磁路，图 1-1b 为两极直流电机的磁路。

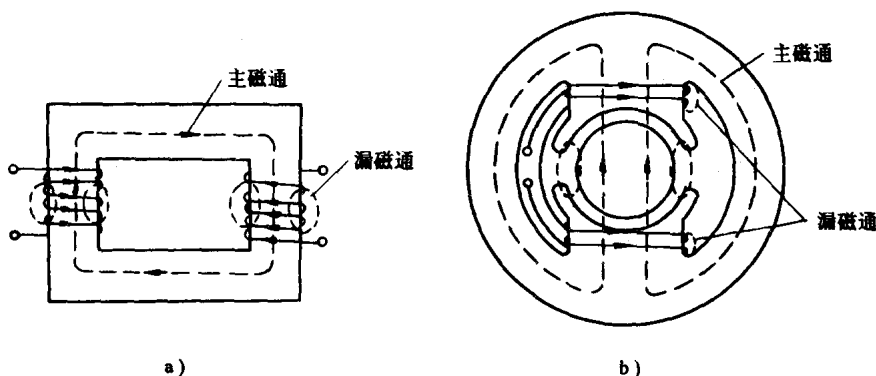


图 1-1 两种常见的磁路

a) 变压器的磁路 b) 两极直流电机的磁路

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。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。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 1-1 中示意地表示了这二种磁路。

用以激励磁路中磁通的载流线圈称为励磁线圈(或励磁绕组),励磁线圈中的电流称为励磁电流(或激磁电流)。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(为把交、直流激励区分开,本书中对交流情况以后称为激磁电流),磁路中的磁通随时间交变变化,这种磁路称为交流磁路;交流铁心线圈、变压器和感应电机的磁路都属于这一类。

二、磁路的基本定律

进行磁路分析和计算时,往往要用到以下几条定律。

安培环路定律 沿着任何一条闭合回线 L , 磁场强度 H 的线积分值 $\oint_L H \cdot dl$ 恰好等于该闭合回线所包围的总电流值 $\sum i$ (代数和), 这就是安培环路定律(图 1-2)。用公式表示, 有

$$\oint_L H \cdot dl = \sum i \quad (1-1)$$

式中,若电流的正方向与闭合回线 L 的环行方向符合右手螺旋关系时, i 取正号, 否则取负号。例如在图 1-2 中, i_2 的正方向向上, 取正号, i_1 和 i_3 的正方向向下, 取负号, 故有

$$\oint_L H \cdot dl = -i_1 + i_2 - i_3。$$

若沿着回线 L , 磁场强度 H 处处相等, 且闭合回线所包围的总电流是由通有电流 i 的 N 匝线圈所提供, 则式 (1-1) 可简写成

$$HL = Ni \quad (1-2)$$

磁路的欧姆定律 图 1-3a 是一个无分支铁心磁路, 铁心上绕有 N 匝线圈, 线圈中通有电流 i ; 铁心截面积为 A , 磁路的平均长度为 l , 材料的磁导率为 μ 。若不计漏磁通, 并认为各截面上的磁通密度为均匀、并且垂直于各截面, 则磁通量 Φ 将等于磁通密度乘以面积, 即

$$\Phi = \int B \cdot dA = BA \quad (1-3)$$

而磁场强度等于磁通密度除以磁导率, 即 $H = B/\mu$, 于是式 (1-2) 可改写成如下形式

$$Ni = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu A} \quad (1-4)$$

或

$$F = \Phi R_m = \frac{\Phi}{\Lambda} \quad (1-5)$$

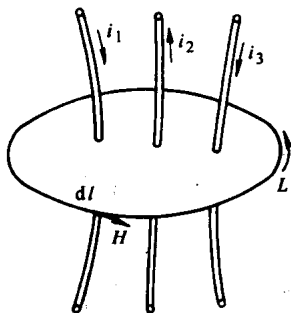
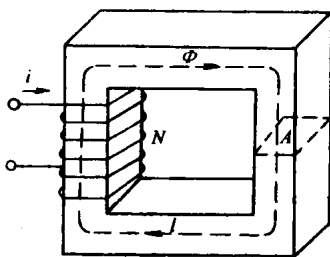
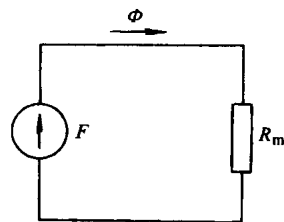


图 1-2 安培环路定律



a)



b)

图 1-3 无分支铁心磁路

a) 无分支铁心磁路 b) 模拟电路图

式中, $F=Ni$ 为作用在铁心磁路上的安匝数, 称为磁路的磁动势, 单位为 A; $R_m=\frac{l}{\mu A}$ 为磁路的磁阻, 它取决于磁路的尺寸和构成磁路所用材料的磁导率, 单位为 A/Wb; $\Lambda=1/R_m$ 为磁路的磁导, 它是磁阻的倒数, 单位为 Wb/A。

式 (1-5) 表明, 作用在磁路上的磁动势 F 等于磁路内的磁通量 Φ 与磁阻 R_m 的乘积, 或者说, 磁通量 Φ 等于磁动势 F 和磁导 Λ 的乘积。此关系与电路中的欧姆定律

$$E=IR=\frac{I}{G}$$

形式上十分相似, 因此式 (1-5) 亦称为磁路的欧姆定律。这里, 我们把磁路中的磁动势 F 比拟于电路中的电动势 E , 磁通量 Φ 比拟于电流 I , 磁阻 R_m 和磁导 Λ 分别比拟于电阻 R 和电导 G 。图 1-3b 表示相应的模拟电路图。

磁阻 R_m 与磁路的平均长度 l 成正比, 与磁路的截面积 A 及构成磁路材料的磁导率 μ 成反比, 这与导体电阻 R 的计算公式极为相似, 但是需要注意的是, 铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数, 所以由铁磁材料构成的磁路其磁阻不是常数, 而是随着磁路中磁通密度的大小而变化, 这种情况称为非线性。

[例 1-1] 有一闭合的铁心磁路, 铁心的截面积 $A=9\times 10^{-4}\text{m}^2$, 磁路的平均长度 $l=0.3\text{m}$, 铁心的磁导率 $\mu_{\text{Fe}}=5000\mu_0$, 套装在铁心上的励磁绕组为 500 匝。试求在铁心中产生 1T 的磁通密度时所需的励磁磁动势和励磁电流。

解 本题可用磁路的欧姆定律或安培环路定律求解。

(1) 用磁路的欧姆定律

$$\text{磁通量 } \Phi=BA=1\times 9\times 10^{-4}\text{Wb}=9\times 10^{-4}\text{Wb}$$

$$\text{磁阻 } R_m=\frac{l}{\mu_{\text{Fe}}A}=\frac{0.3}{5000\times 4\pi\times 10^{-7}\times 9\times 10^{-4}}\text{A/Wb}=5.3\times 10^4\text{A/Wb}$$

$$\text{磁动势 } F=\Phi R_m=9\times 10^{-4}\times 5.3\times 10^4\text{A}=47.7\text{A}$$

$$\text{励磁电流 } i=\frac{F}{N}=\frac{47.7}{500}\text{A}=9.54\times 10^{-2}\text{A}$$

(2) 用安培环路定律

$$\text{磁场强度 } H=\frac{B}{\mu_{\text{Fe}}}=\frac{1}{5000\times 4\pi\times 10^{-7}}\text{A/m}=159\text{A/m}$$

$$\text{磁动势 } F=Hl=159\times 0.3\text{A}=47.7\text{A}$$

$$\text{励磁电流 } i=\frac{F}{N}=\frac{47.7}{500}\text{A}=9.54\times 10^{-2}\text{A}$$

磁路的基尔霍夫第一定律 如果铁心不是一个简单回路, 而是带有并联分支的分支磁路, 如图 1-4 所示, 则当中间铁心柱上加有磁动势 F 时, 磁通的路径将如图中虚线所示。如令进入闭合面 A 的磁通为负、穿出闭合面的磁通为正, 从图 1-4 可见, 对闭合面 A , 显然有

$$-\Phi_1+\Phi_2+\Phi_3=0$$

或

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-6)$$

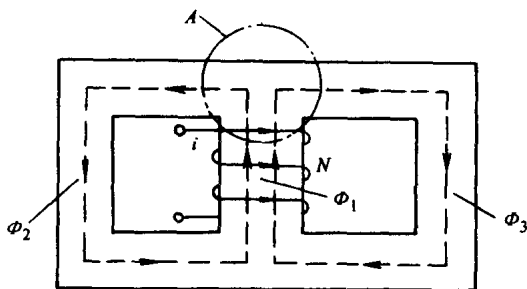


图 1-4 磁路的基尔霍夫第一定律