

面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

ELECTRIC MACHINERY

电机学

● 汤蕴璆 史乃 编著



机械工业出版社
China Machine Press

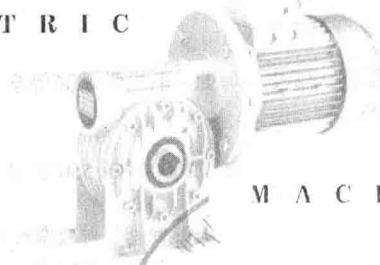
面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

电机学

汤蕴璆 史乃 编著

李仁定 主审

ELECTRIC



MACHINERY



机械工业出版社

本书共 10 章。前 8 章主要阐述磁路、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和电机的发热和冷却,后两章阐述交流电机的动态分析及控制电机。除第 8 章和第 10 章以外,每章后面附有习题和部分答案,书末编入 5 个附录。为引导学生用计算机来求解电机问题,针对稳态和动态的两个典型问题,编入相应的数值解法和计算机源程序。全书的编写方针是削枝强干,推陈出新。

本书可作为高等学校电气工程与自动化专业和其他强弱电结合专业的教材,亦可供有关科技人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机学 / 汤蕴璆, 史乃编著. —北京: 机械工业出版社,
2001. 4 (2009. 6 重印)

面向 21 世纪课程教材

ISBN 978-7-111-08500-3

I. 电… II. ①汤…②史… III. 电机学 - 高等学校 - 教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 55015 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王保家 刘 辉 版式设计: 张世琴 责任校对: 程俊巧

封面设计: 李雨桥 责任印制: 杨 曦

北京鑫海金澳胶印有限公司印刷

2009 年 6 月第 1 版 · 第 8 次印刷

169mm × 239mm · 23.25 印张 · 448 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-08500-3

定价: 26.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在 1999 年出版的“九五”国家级重点教材《电机学》的基础上,根据 1999 年 11 月武汉会议讨论通过的“电机学教材编写大纲”重新编写的。

全书共 10 章。总教学时数为 70~80 学时。对于一些选学内容,章、节前标有*号。除第 8 章和第 10 章以外,每章后面附有习题及部分答案。书末编有 5 个附录。本书可作为高等学校电气工程与自动化专业和其他强弱电结合专业的教材,亦可供科技人员作为参考用书。

本书是教育部立项的高等教育“面向 21 世纪课程教材”,其特点是:(1)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)阐明机电能量转换的机制和条件,为将来开发和研究新型电机建立准则;(3)为适应近年来电机理论的发展和科研、生产上的需要,除稳态分析外,书中进一步阐述了交流电机动态分析的步骤和方法,并用典型实例说明其应用;(4)对直流电机和其他过时、次要的内容,以及属于设计、工艺和结构方面的内容,进行较多的删减;(5)编入用计算机对稳态和动态问题进行数值计算的内容,适当加进一些学科前沿的内容;(6)各章具有相对独立性,讲授次序可以根据具体情况进行调整。

全书的编写方针是,削枝强干,推陈出新;目标是编写一本取材精、科学性、概念清,适应面宽和便于教学的简明教材。

本书由汤蕴璆教授和史乃教授编著,源程序由谢德馨教授提供。全书由上海交通大学李仁定教授主审。李仁定教授对许多问题的写法提出了宝贵意见,对此编者表示衷心感谢。

本书的编写得到了西安交通大学王兆安教授、鱼振民教授,山东工业大学肖如鸿教授,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,河北工业大学陈子痛教授,沈阳工业大学王凤翔、谢德馨教授,天津大学刘承榆教授,湖南大学吕兴熹教授,哈尔滨工业大学刘彦彬教授,哈尔滨理工大学梁艳萍教授等的关心和支持。哈尔滨电机厂、沈阳变压器厂、上海电机厂和大连电机厂等单位为本书提供了产品照片和资料,在此一并表示感谢。

编者

2000 年 9 月

主要符号表

A	面积; A 相	F_{q1}	q 个线圈的基波合成磁动势
a	交流绕组并联支路数; a 相; 120° 复数算子	f	频率; 力; 磁动势的瞬时值
a_m	直流电机并联支路对数	f_1	定子频率
B	磁通密度; B 相	f_2	转子频率
B_δ	气隙磁密	f_N	额定频率
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	f_ν	ν 次谐波频率
B_{aq}	交轴电枢磁场磁密	H	磁场强度
b	宽度; b 相; 磁通密度瞬时值	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
C	C 相	I_a	直流电机的电枢电流
C_T	转矩常数	I_m	交流激磁电流
C_e	电动势常数	I_f	直流励磁电流
c	比热容; c 相	I_μ	激磁电流中的磁化分量
D_1	定子内径	I_N	额定电流
D_a	电枢外径	I_0	空载电流; 零序电流
E	电动势 (交流表示有效值)	I_k	短路电流; 堵转电流
E_ϕ	相电动势	I_{st}	起动电流
E_0	空载电动势	I_1	变压器一次绕组 (感应电机定子) 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_2	变压器二次绕组 (感应电机转子) 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_2'	I_2 的归算值
E_2'	E_2 的归算值	I_+	电流的正序分量
E_q	q 个线圈的合成电动势	I_-	电流的负序分量
e	电动势的瞬时值	i	电流的瞬时值
e_c	换向电动势; 线圈电动势	J	转动惯量
F	磁动势	K	换向片数
F_a	电枢磁动势	k	变压器的电压比
F_m	感应电机的激磁磁动势	k_i	电流比
F_{ad}	直轴电枢磁动势	k_e	电动势比
F_{aq}	交轴电枢磁动势	k_{d1}	基波分布因数
$F_{\phi 1}$	单相绕组的基波磁动势	k_{p1}	基波节距因数
$F_{\phi \nu}$	单相绕组的 ν 次谐波磁动势	k_{w1}	基波绕组因数
		$k_{d\nu}$	ν 次谐波的分布因数
		$k_{p\nu}$	ν 次谐波的节距因数

$k_{w\nu}$	ν 次谐波的绕组因数	R_2	变压器二次绕组(感应电机转子)电阻
L	自感	R_2'	R_2 的归算值
$L_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子)的漏磁电感	R_f	励磁绕组电阻
$L_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子)的漏磁电感	R_s	电枢电阻
l	长度	R_k	变压器(感应电机)的短路电阻
M	互感	R_Ω	旋转阻力系数
m_1	交流电机定子相数	S	视在功率
m_2	感应电机转子相数	S_N	额定视在功率
N	每相串联匝数	s	转差率
N_c	每个线圈的匝数	s_N	额定转差率
n	转子转速	s_m	最大转矩时的转差率
n_N	额定转速	s_+	转子对正向旋转磁场的转差率
n_0	空载转速	s_-	转子对反向旋转磁场的转差率
n_s	同步转速	T	转矩; 时间常数; 周期
n_ν	ν 次谐波旋转磁场的转速	T_c	换向期
n_2	转子基波旋转磁场相对于转子的转速	T_d'	直轴瞬态时间常数
Δn	转速调整率	T_a	电枢时间常数
P	功率	T_f	励磁绕组时间常数
P_N	额定功率	T_N	额定转矩
P_e	电磁功率	T_0	空载转矩
P_Ω	转换功率	T_e	电磁转矩
P_k	堵转功率; 短路功率	$T_{\max}$	最大转矩
P_1	输入功率	T_{pi}	同步电动机的牵入转矩
P_2	输出功率	T_{st}	起动转矩
P_0	空载功率	T_2	负载转矩
p	损耗; 极对数; 时间的微分算子	t	时间; 温度
p_0	极对数	U	电压(交流表示有效值)
p_{Cu}	铜耗	U_N	额定电压
p_{Fe}	铁耗	U_ϕ	相电压
p_Δ	杂散损耗	U_1	电源电压; 定子端电压
p_Ω	机械损耗	U_+	正序电压
Q	槽数; 热量	U_-	负序电压
q	每极每相槽数	U_0	空载电压; 零序电压
R	电阻	U_k	短路电压; 堵转电压
R_m	激磁电阻; 磁阻	u	电压的瞬时值
R_1	变压器一次绕组(感应电机定子)电阻	Δu	电压调整率
		$2\Delta U_s$	每对电刷的电压降
		W	功; 能

W_m	磁场能量	α	角度; 相邻两槽间的电角度
X	电抗	β	夹角; q 个线圈的总夹角
X_a	电枢反应电抗	δ	气隙; 功率角
X_+	正序电抗	ϵ	小数; 短距角
X_-	负序电抗	η	效率
X_0	零序电抗	η_N	额定效率
X_{ad}	直轴电枢反应电抗	η_{max}	最大效率
X_{aq}	交轴电枢反应电抗	θ	温升; 角度
X_σ	定子漏抗	Λ	磁导
X_s	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; 导热系数
X_q	交轴同步电抗	μ	磁导率; 转子谐波次数
X_m	激磁电抗	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
X''_d	直轴超瞬态电抗	Φ_a	电枢反应磁通
y	绕组合成节距	Φ_m	变压器或感应电机的主磁通
y_1	第一节距	Φ_σ	漏磁通
y_2	第二节距	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
y_c	换向器节距	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
Z	阻抗; 电枢导体数	Φ_ν	ν 次谐波磁通
Z_m	激磁阻抗	ϕ	磁通量的瞬时值
Z_k	短路阻抗	φ	相角; 功率因数角
Z_+	正序阻抗	φ_0	空载功率因数角
Z_-	负序阻抗	φ_k	短路功率因数角
Z_0	零序阻抗	ψ	磁链; $\dot{E}$ 和 $\dot{I}$ 间的夹角
$Z_{1\sigma}$	变压器一次绕组(感应电机定子)的漏阻抗	ψ_0	内功率因数角
$Z_{2\sigma}$	变压器二次绕组(感应电机转子)的漏阻抗	ψ_2	感应电机转子的内功率因数角
$Z'_{2\sigma}$	$Z_{2\sigma}$ 的归算值	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

主要符号表

绪论 1

0.1 电机在国民经济中的作用 1

0.2 我国电机工业发展概况 2

0.3 本课程的任务 2

第一章 磁路 5

1.1 磁路的基本定律 7

1.2 常用的铁磁材料及其特性 10

1.3 磁路的计算 15

习题 20

第二章 变压器 23

2.1 变压器的基本结构和

额定值 25

2.2 变压器的空载运行 27

2.3 变压器的负载运行 31

2.4 变压器的基本方程和

等效电路 33

2.5 等效电路参数的测定 37

2.6 三相变压器 40

2.7 标么值 46

2.8 变压器的运行性能 50

2.9 变压器的并联运行 53

* 2.10 三绕组变压器、自耦变压器和

仪用互感器 56

* 2.11 空载投入电网时变压器的冲击

电流 61

习题 62

第三章 直流电机的稳态 分析 67

3.1 直流电机的工作原理和
基本结构 69

3.2 直流电枢绕组 74

3.3 空载和负载时直流电机的
磁场 81

3.4 直流电机的感应电动势和
电磁转矩 84

3.5 直流电机的基本方程 86

3.6 直流发电机的运行特性 89

3.7 直流电动机的运行特性 94

3.8 直流电动机的起动、调速和
制动 99

* 3.9 换向 105

习题 108

第四章 交流绕组及其电动势 和磁动势 111

4.1 交流绕组的构成原则和
分类 113

4.2 三相双层绕组 113

4.3 正弦磁场下交流绕组的
感应电动势 119

* 4.4 感应电动势中的高次谐波 124

4.5 通有正弦电流时单相绕组的
磁动势 129

4.6 通有对称三相电流时三相绕组的
磁动势 134

习题 138

第五章 感应电机的稳态

分析 141

- 5.1 感应电机的结构和运行
状态 143
- 5.2 三相感应电动机的磁动势和
磁场 146
- 5.3 三相感应电动机的电压方程和
等效电路 151
- 5.4 感应电动机的功率方程和
转矩方程 157
- 5.5 笼型转子的极数和相数 160
- 5.6 感应电动机参数的测定 162
- 5.7 感应电动机的转矩-转差率
曲线 165
- 5.8 感应电动机的工作特性 168
- 5.9 感应电动机的起动, 深槽和
双笼电动机 173
- 5.10 感应电动机的调速 178
- 5.11 单相感应电动机 183
- * 5.12 感应发电机和直线感应
电动机 187
- 习题 188

第六章 同步电机的稳态

分析 191

- 6.1 同步电机的基本结构和
运行状态 193
- 6.2 空载和负载时同步发电机的
磁场 198
- 6.3 隐极同步发电机的电压方程、
相量图和等效电路 202
- 6.4 凸极同步发电机的电压方程和
相量图 205
- 6.5 同步发电机的功率方程和
转矩方程 209
- 6.6 同步电机参数的测定 211
- 6.7 同步发电机的运行特性 215

- 6.8 同步发电机与电网的并联
运行 218
- 6.9 同步电动机与同步补偿机 228
- 6.10 同步发电机的不对称运行 236
- * 6.11 永磁式和自控式同步电动机,
开关磁阻电动机 244
- 习题 247

第七章 机电能量转换

原理 251

- 7.1 机电能量转换过程中的
能量关系 253
- 7.2 双边激励机电装置中的机电
能量转换 258
- 7.3 机电能量转换的条件 264
- * 7.4 产生恒定电磁转矩的条件 267
- 习题 269

第八章 电机的发热和

冷却 271

- 8.1 电机的温升和温升限度 273
- 8.2 电机的发热和冷却 274
- 8.3 电机的冷却方式 277

第九章 交流电机的动态

分析 281

- 9.1 交流电机动态分析的
步骤 283
- 9.2 在相坐标系中同步电机的
运动方程 284
- 9.3 在 dq0 坐标系中同步电机的
运动方程 286
- 9.4 同步电机的标幺值 291
- 9.5 同步电机的直轴、交轴等效
电路和运算电抗 295
- 9.6 同步发电机的三相突然
短路 298
- 9.7 阻尼绕组对三相突然短路

过程的影响	306	附录 B 笼型转子参数的归算	337
9.8 三相感应电动机的运动 方程	309	附录 C 谐波磁场对感应电动机 转矩-转差率曲线的 影响	339
9.9 三相感应电动机起动过程的 动态分析	313	C.1 异步寄生转矩	339
*9.10 三相感应电动机的矢量变换 控制	317	C.2 同步寄生转矩	340
习题	321	C.3 削弱寄生转矩的方法	341
*第十章 控制电机	323	附录 D 凸极同步电机定子绕组的 自感和互感	342
10.1 直流测速发电机	325	D.1 定子相绕组的自感	342
10.2 直流伺服电动机	325	D.2 定子相绕组间的互感	344
10.3 交流两相伺服电动机	327	附录 E 三相感应电动机起动过程 动态分析的源程序	345
10.4 旋转变压器	329	E.1 程序说明	345
10.5 自整角机	331	E.2 主程序和子程序	346
附录 A 三相单层绕组	334	参考文献	359
A.1 同心式绕组	334		
A.2 链式和交叉式绕组	335		

绪 论

0.1 电机在国民经济中的作用

电机是一种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,它把机械能转换为电能;通过原动机先把各类一次能源蕴藏的能量转换为机械能,然后通过发电机把机械能转换为电能,经输、配电网络送往城市各工矿企业、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,以满足不同的需求。电力变压器则是将一种交流电压、电流转换成同频率的另一种电压、电流的静止电器。

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;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。此外,还有利用风能、原子能、地热等能源的各类发电机。

到1999年,我国的电力总装机容量已达29.4万MW,年总发电量为12300亿kW·h。从发电量看,已居世界第二位。随着三峡水利电力工程的启动,大亚湾、秦山核电站的建成和发电,今后将会加强大型水电站和核电站的开发工作,并加大水电和核电的比重。

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,小至小功率电动机、乃至几瓦的微电动机。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控制电机和特种电动机。70年代以后,由于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条件,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,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。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,我国的电机制造工业得到快速发展。经过50年的努力,在大型交直流电机方面,已研制成功 $2 \times 5000\text{kW}$ 的直流电动机,4700kW的直流发电机和42MW的同步电动机。在大型发电设备方面,已研制出300MW和600MW水氢氢冷汽轮发电机,300MW双水内冷和全氢冷汽轮发电机,650MW核电机组;还相继研制出125、250、300、400和550MW的水轮发电机。电力变压器的最大容量已做到400MVA,电压最高为500kV。

在中、小型和微型电机方面,已开发和制成125个系列,900多个品种,几千个规格的各种电机。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、单片微型计算机相结合,出现了各种性能和形态迥异的“一体化电机”。

上述各种类型的电机,除了满足我国生产和生活领域中各种不同的需求外,尚有部分电机出口。

0.3 本课程的任务

本课程是一门专业基础课。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流铁心线圈的性能有基本的了解。
- (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间空间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,弄清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和复数来计算交流电机的性能。
- (4) 对电机中的能量关系、感应电动势、磁场储能、电磁转矩和机电能量转换过程,以及机电能量转换的条件有一个基本的了解。

(5) 对同步电机的不对称运行和交流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,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。

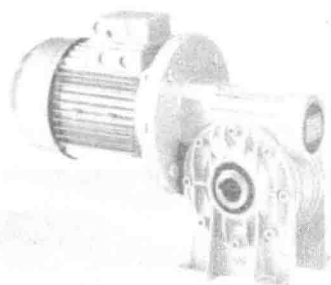
(7) 了解电机的有关工程性问题,例如发热和冷却,励磁系统,各种电机的应用范围,电机的额定值,主要电机的各种性能数据(效率、过载能力、起动性能数据、主要参数)范围等。

(8) 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。

总之,要通过认真学习、解算习题和实验课的训练,逐步使学到的知识融会贯通,并初步具有分析、解决实际问题的能力。

第一章

磁路



电机是一种机电能量转换装置，变压器是一种电能传递装置，它们的工作原理都以电磁感应原理为基础，且以电场或磁场作为其耦合场。在通常情况下，由于磁场在空气中的储能密度比电场大很多，所以绝大多数电机均以磁场作为耦合场。磁场的强弱和分布，不仅关系到电机的性能，而且还将决定电机的体积和重量；所以磁场的分析和计算，对于认识电机是十分重要的。由于电机的结构比较复杂，加上铁磁材料的非线性性质，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。

本章先说明磁路的基本定律，然后介绍常用铁磁材料及其性能，最后说明磁路的计算方法。

1.1 磁路的基本定律

一、磁路的概念

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 a 为变压器的磁路，图 b 为两极直流电机的磁路。

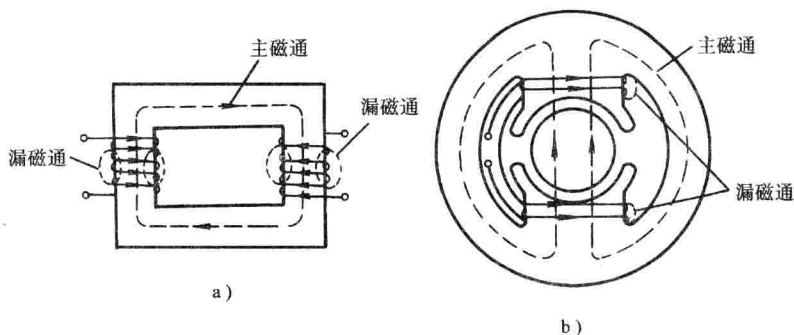


图 1-1 两种常见的磁路

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，并在能量传递或转换过程中起耦合场的作用，这部分磁通称为主磁通。围绕载流线圈、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（或称励磁绕组），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