



普通高等教育“十二五”规划教材

电机学

林荣文 主 编

林 珍 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

电机学

主 编 林荣文
副主编 林 珍
编 写 黄灿水 杨明发
主 审 戈宝军



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材，书中以变压器、异步电机、同步电机和直流电机为研究对象，详细阐述了电机的基本原理、结构及运行性质，并对电机试验和电机控制的内容作了一定的介绍，使读者在掌握基本理论知识的基础上，学会试验方法、提高操作技能。书中附有大量例题、习题和实验原理，内容完整、主次分明，便于教学和自学。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业本、专科电机学主干课程教材，也可供相关专业学生和从事机电运行、设计、制造的工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/林荣文主编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2471-8

I. ①电... II. ①林... III. ①电机学—高等学校—教材
IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 260840 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.75 印张 525 千字

定价 37.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书作为普通高等教育“十二五”规划教材，福建省电机学精品课程建设项目，福建省电气工程类创新人才培养实验区建设项目规划教材而编写。本书根据电气工程及其自动化专业教学大纲的要求，适应教学改革的需要，内容编排在强化基础知识、拓宽专业口径的同时，顺序渐进、不断加深、推陈出新，力求夯实基础，培养和提高学生思考及解决问题的能力。本书的编写思路和特点为：

(1) 本着从一般到特殊的认识规律，注重基本概念、基本理论和基本分析方法的阐述，使学生建立牢固的物理概念，学会用工程观点分析和解决问题。

(2) 本书电机理论基于结构对称、稳定运行的分析基础，并辅以工作特性或机械特性的描述和定量分析；一些谐波、不对称、暂态等难点问题，以定性分析为主，突出叙述概念和分析方法。

(3) 为适应新的电机理论发展与科研、生产上的需要，本书增加永磁电机、直线电机等特种电机章节。

(4) 为了服务区域经济，考虑东南地区的电机产业特点和相关电气工程人才培养，电机理论知识和分析方法向中小型电机延伸。

(5) 本书各篇具有相对独立性，讲述次序可以根据具体情况进行调整；内容重点、难点层次分明，选学内容由教师根据学校具体情况选定，书中不再表明。

本书由福州大学电机教学团队合作编写。其中，林荣文教授主编，负责基础理论、第二篇和第三篇的编写；林珍副教授任副主编，并负责第四篇的编写；杨明发（博士）讲师负责第五篇的编写；黄灿水讲师负责第一篇的编写。全书由哈尔滨理工大学戈宝军教授担任主审，他对本书提出许多宝贵意见和建议，使我们受益匪浅，在此表示衷心的感谢。

由于编者的经验和水平有限，书中难免有不妥甚至错漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2011.9

主要符号表

符号	中文意义	符号	中文意义
A	A 相绕组；线负荷	E_0	空载电动势
a	交流绕组并联支路数；直流绕组并联支路对数；复数算子	E_1	一次电动势
B	B 相绕组；磁通密度	$E_{1\sigma}$	一次漏电动势
b	宽度长；弧长；气隙磁场瞬时值	E_2	二次电动势
B_{a1}	电枢反应基波磁通密度	E_{2S}	感应电机转子转动时每相电动势
B_{ad}	直轴（d 轴）电枢反应磁通密度	$E_{2\sigma}$	二次漏电动势
B_{ad1}	直轴（d 轴）电枢反应基波磁通密度	E_a	电枢反应电动势；交流电枢反应电动势
B_{aq}	交轴（q 轴）电枢反应磁通密度	E_{cl}	一根导体基波电动势
B_{aq1}	交轴（q 轴）电枢反应基波磁通密度	e_k	换向元件旋转电动势
B_{av}	平均磁通密度	e_L	自感电动势
B_f	励磁磁通密度	E_{L1}	三相绕组基波线电动势
B_{f1}	励磁基波磁通密度	E_m	电动势最大值
B_k	换向区域的气隙磁通密度	e_M	互感电动势
b_k	换向片宽度	E_q	q 个线圈合成电动势
B_m	磁通密度幅值	E_{q1}	一个线圈组基波电动势
B_{m1}	基波磁通密度幅值	e_r	换向元件电抗电动势
B_r	剩余磁通密度	E_{r1}	一匝线圈基波电动势
b_s	电刷宽度	E_{y1}	一个线圈基波电动势
B_δ	气隙磁通密度	E_s	合成电动势
c	简化电路修正系数；比热	E_{ph}	每相电动势
C	C 相绕组；每槽圈边数；电容；比热	E_{1ph}	一相绕组基波电动势
C_e	电动势常数；涡流损耗系数	E_{Nph}	额定相电动势
C_{Fe}	铁芯损耗系数	F	磁动势；力
C_h	磁滞损耗系数	f	频率；磁动势瞬时值；力瞬时值
C_T	转矩常数	F_1	三相定子合成磁动势基波振幅
D_a	电枢外径	f_2	转子感应电动势频率
D_i	电枢内径	F_2	三相转子合成磁动势基波振幅
D_k	换向器外径	F_a	电枢磁动势幅值
E	直流电动势；交流电动势	F_{ad}	直轴电枢磁动势幅值
e	电动势瞬时值	F_{aq}	交轴电枢磁动势幅值

符号	中文意义	符号	中文意义
F_{agd}	电枢反应等效去磁安匝数	K	直流电机换向片数
F_{cl}	线圈磁动势的基波振幅	k	变压器电动势变比；匝比
F_{D}	定子磁压降	k_{A}	自耦变压器变比
f_{e}	电磁力	k_{d}	交流绕组分布系数
F_{ml}	单相绕组磁动势的基波振幅	k_{e}	感应电机电动势变比
f_{N}	额定频率	k_{i}	感应电机电流变比
F_{ql}	线圈组磁动势的基波振幅	k_{k}	短路比
F_{S}	转子磁压降	K_{M}	感应电机降压启动绕组降压率
F_{δ}	气隙磁压降；气隙合成磁动势幅值	K_{m}	过载能力；最大转矩倍数
G	重量	k_{N}	交流绕组系数
g_{m}	电导	k_{p}	交流绕组短距系数
H	磁场强度	K_{st}	启动转矩倍数
H_{c}	矫顽磁力	k_{v}	电压波形正弦畸变率
h_{m}	主磁极计算高度	k_{μ}	饱和系数
h_{z}	电枢齿计算高度	k_{a}	主磁极漏磁系数
I	电枢电流；交流电流	L	自感
i	电流瞬时值	l	电机几何尺寸长度
$I_{2\text{s}}$	感应电机转子转动时每相电流	L_{av}	转子轭平均长度
i_{a}	电枢导体电流	L_{j}	定子轭平均长度
I_{a}	电枢电流	L_{σ}	漏磁电感
i_{c}	交流绕组线圈电流	m	场移；同步机定子相数
I_{e}	励磁电流中涡流损耗电流	M	互感
i_{f}	直流励磁电流瞬时值	m_{1}	定子相数
I_{f}	直流励磁电流	N	串联匝数；直流机绕组总导体数
I_{Fe}	励磁电流中铁耗电流	n	转速
I_{fN}	额定励磁电流	n_{1}	同步转速
I_{h}	励磁电流中磁滞损耗电流	N_{1}	变压器一次绕组匝数
I_{k}	短路电流	N_{2}	变压器二次绕组匝数
I_{N}	额定电流	n_{2}	转子磁动势相对转子速度
I_{s}	串励绕组电流	N_{c}	一个线圈匝数
I_{st}	起动电流	N_{f}	励磁绕组匝数
I_{μ}	励磁电流中磁化电流	P	有功功率
J	机组转动惯量	p	极对数
j	电流密度	P_{0}	空载功率（损耗）

符号	中文意义	符号	中文意义
P_1	输入有功功率	s	转差率; 秒
P_2	输出有功功率	s_m	临界转差率
p_{ad}	附加损耗	S_N	额定容量; 额定视在功率
p_{Cu}	铜损耗	T	电磁转矩; 时间常数; 周期
p_e	涡流损耗	t	时间; 温度
p_{Fe}	铁损耗	T_d''	超瞬变电流衰减时间常数
p_h	磁滞损耗	T_d'	瞬变电流衰减时间常数
P_i	机械功率	T_0	空载转矩
p_{kN}	变压器额定短路损耗	T_1	输入转矩
P_M	电磁功率	T_2	输出转矩
p_{mec}	机械损耗	T_a	非周期电流衰减时间常数
P_N	额定功率	T_J	加速转矩
Q	无功功率; 物体单位时间产生热量	T_L	负载转矩
q	每极每相槽数	T_m	最大转矩
r	电枢半径	t_{max}	最高容许温度
R	绕线式感应电机转子附加电阻	T_N	额定转矩
r_2'	变压器二次绕组电阻归算值; 感应电机转子绕组电阻归算值	T_{pi}	牵入转矩
r_1	变压器一次绕组电阻; 感应电机定子绕组电阻	T_{st}	启动转矩
r_2	变压器二次绕组电阻; 感应电机转子绕组电阻	U	直流电压; 交流电压
R_a	电枢回路电阻	u	电压瞬时值
R_{aj}	电枢回路外接电阻	U_f	励磁电压
r_f	励磁回路内电阻	U_{fN}	额定励磁电压
R_f	励磁回路总电阻	U_k	变压器短路电压
R_{fj}	励磁回路外接电阻	U_M	磁位差
r_k	变压器短路电阻	U_N	额定电压; 交流额定电压
R_L	负载电阻	U_{ph}	每相电压
r_m	变压器励磁电阻; 感应电机励磁电阻	U_{Nph}	额定相电压
R_m	磁阻	W	功率; 能量
S	视在功率; 面积; 每槽导体数; 线圈数	x_2'	变压器二次绕组漏抗归算值; 感应电机转子绕组漏抗归算值
		x_1	变压器一次绕组漏抗; 感应电机定子绕组漏抗
		x_2	变压器二次绕组漏抗; 感应电机转子绕组漏抗

符号	中文意义	符号	中文意义
x_{2s}	感应电机转子转动时每相电抗	ΔU_b	直流电机电刷接触压降
x_a	同步电机电枢反应电抗	ϵ	小于 1 的分数
x_{ad}	同步电机直轴电枢反应电抗	η	效率
x_{aq}	同步电机交轴电枢反应电抗	η_{max}	最大效率
x_d	同步电机直轴同步电抗	η_N	额定效率
x_k	变压器短路电抗	θ	功率因数角；温升
x_m	变压器励磁电抗；感应电机励磁电抗	θ_N	额定温升
x_p	同步电机保梯电抗	Δ	磁导
x_q	同步电机交轴同步电抗	λ	表面散热系数
x_s	同步电机同步电抗	μ	磁导率
x_σ	同步电机的定子（电枢）绕组漏抗	μ_{Fe}	铁芯磁导率
y	交流绕组节距；直流绕组合成节距	σ	电导率
y_1	第一节距	τ	极距；硅钢片厚度；温升
y_2	第二节距	τ_{∞}	稳态温升
y_k	换向器节距	τ_{max}	温升限度
Z	交流阻抗；直流机实槽数	Φ	磁通量
Z_-	负序阻抗	ϕ	磁通瞬时值
Z_+	正序阻抗	Φ_0	空载磁通
Z_0	零序阻抗	Φ_1	基波磁通
Z_1	变压器一次绕组阻抗；感应电机定子绕组阻抗	$\Phi_{1\sigma}$	变压器一次漏磁通
Z_2	变压器二次绕组阻抗；感应电机转子绕组阻抗	$\Phi_{2\sigma}$	变压器二次漏磁通
Z_b	阻抗基值	Φ_a	电枢反应磁通
Z_e	虚槽数	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
Z_k	短路阻抗	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
Z_L	负载阻抗	Φ_m	主磁通
Z_m	励磁阻抗	Φ_v	v 次谐波磁通
α	直流电机绕组槽距角	Φ_σ	漏磁通
α_{Fe}	变压器、感应电机铁耗角	Ψ	磁链
β	直流电机绕组短距角；交流机负载系数	ψ	内功率因数角
δ	功率角；气隙	Ω	机械角速度
ΔU	电压变化率；直流电机电刷接触压降	ω	电角频率
		Ω_1	同步角速度

目 录

前言

主要符号表

第一章 基础理论	1
第一节 概述.....	1
第二节 电机磁路及铁磁材料.....	2
第三节 电机主要制造材料	10
第四节 三相交流电路的有关概念	11
思考题与习题	14

第一篇 变 压 器

第二章 变压器工作原理和运行分析	15
第一节 变压器基本结构	15
第二节 变压器空载运行	20
第三节 变压器负载运行	26
第四节 标么值	31
第五节 变压器参数测定	31
第六节 变压器运行性能	34
本章小结	39
思考题与习题	39
第三章 三相变压器运行分析	43
第一节 三相变压器磁路	43
第二节 三相变压器联结组别	44
第三节 三相变压器空载电动势波形	48
第四节 变压器的并联运行	50
本章小结	53
思考题与习题	54
第四章 电力系统中的特种变压器	57
第一节 三绕组变压器	57
第二节 自耦变压器	59
第三节 互感器	60
本章小结	62
思考题与习题	62

第五章 变压器不对称运行和瞬态过程	65
第一节 对称分量法	65
第二节 三相变压器各序阻抗和等效电路	66
第三节 Yyn 接法三相变压器单相运行	69
第四节 三相变压器空载合闸过程	71
第五节 三相变压器二次侧突然短路过程	72
本章小结	74
思考题与习题	74

第二篇 交流电机共同部分

第六章 交流绕组理论	76
第一节 交流绕组构成原则	76
第二节 三相单层绕组	79
第三节 三相双层绕组	82
本章小结	84
思考题与习题	84
第七章 交流绕组电动势	86
第一节 交流绕组基波电动势	86
第二节 交流绕组谐波电动势	91
本章小结	94
思考题与习题	95
第八章 交流绕组磁动势	97
第一节 单相绕组磁动势	97
第二节 三相绕组基波合成磁动势	100
第三节 三相绕组谐波合成磁动势	105
本章小结	107
思考题与习题	107
第九章 电机的发热和冷却	109
第一节 电机的温升及温升限度	109
第二节 电机的定额	111
第三节 电机的发热和冷却	112
第四节 电机的冷却方式	115
第五节 电机的防护形式	119
本章小结	119
思考题与习题	120

第三篇 异步电机

第十章 异步电机的基本结构和工作原理	121
第一节 异步电机的用途与分类.....	121
第二节 异步电机的基本结构.....	121
第三节 异步电机铭牌和额定值.....	125
第四节 异步电机的工作原理.....	125
本章小结.....	128
思考题与习题.....	128
第十一章 异步电机的基本电磁关系	130
第一节 异步电机的磁路.....	130
第二节 转子静止时异步电动机的等效电路.....	131
第三节 转子转动时异步电动机的等效电路.....	134
第四节 异步电机等效电路的简化.....	137
第五节 异步电机的参数及测定.....	139
本章小结.....	142
思考题与习题.....	142
第十二章 异步电动机的功率和转矩	145
第一节 异步电动机的功率和转矩平衡式.....	145
第二节 异步电动机的机械特性.....	147
第三节 异步电动机的稳定运行条件.....	151
第四节 异步电动机的工作特性.....	153
本章小结.....	155
思考题与习题.....	155
第十三章 异步电动机的启动和调速	158
第一节 异步电动机的启动电流和启动转矩.....	158
第二节 异步电动机的启动.....	158
第三节 异步电动机的调速.....	166
第四节 异步电动机的电磁制动.....	171
本章小结.....	173
思考题与习题.....	173
第十四章 特种异步电机	175
第一节 单相异步电动机.....	175
第二节 直线感应电动机.....	179
第三节 异步发电机.....	181
本章小结.....	184
思考题与习题.....	185

第四篇 同步电机

第十五章 同步电机的基本结构和工作原理	187
第一节 同步电机的基本结构形式.....	187
第二节 同步电机的基本工作原理.....	191
第三节 同步发电机的励磁系统.....	192
第四节 同步电机的额定值.....	194
本章小结.....	195
思考题与习题.....	195
第十六章 同步电机的基本理论和运行特性	196
第一节 同步发电机的空载运行.....	196
第二节 对称负载时同步电机的电枢反应.....	198
第三节 隐极同步发电机的分析方法.....	203
第四节 凸极同步发电机的分析方法.....	208
第五节 同步发电机对称运行时的特性.....	214
第六节 同步发电机的参数测定和短路比.....	219
本章小结.....	225
思考题与习题.....	226
第十七章 同步发电机在大电网上运行	228
第一节 同步发电机的并联运行.....	228
第二节 同步电机的功率、转矩及功角特性.....	231
第三节 同步发电机的有功功率调节和静态稳定.....	238
第四节 无功功率的调节和 V 形曲线.....	241
第五节 同步电动机与同步补偿机.....	244
第六节 异步启动稀土永磁同步电动机.....	247
本章小结.....	251
思考题与习题.....	252
第十八章 同步发电机的不对称运行与突然短路	254
第一节 同步发电机不对称运行时各序阻抗与等效电路.....	254
第二节 三相同步发电机的不对称稳定短路.....	257
第三节 同步发电机突然短路的物理过程.....	261
第四节 同步电机的瞬态电抗和超瞬态电抗.....	264
第五节 同步发电机突然短路电流.....	266
本章小结.....	269
思考题与习题.....	269

第五篇 直 流 电 机

第十九章 直流电机的基本原理和电磁关系	271
第一节 直流电机的工作原理.....	271
第二节 直流电机的基本结构.....	273
第三节 直流电机的额定值.....	276
第四节 直流电枢绕组.....	276
第五节 直流电机磁场与电枢反应	284
第六节 感应电动势和电磁转矩.....	290
本章小结.....	291
思考题与习题.....	292
第二十章 直流发电机与直流电动机	294
第一节 直流电机的励磁方式.....	294
第二节 直流电机的基本方程式.....	295
第三节 他励直流发电机的运行特性.....	298
第四节 并励发电机的自励建压和外特性.....	301
第五节 直流电动机的工作特性.....	305
第六节 直流电动机的机械特性.....	308
第七节 直流电动机的启动.....	311
第八节 直流电动机的制动.....	313
第九节 直流电动机的调速.....	317
本章小结.....	320
思考题与习题.....	320
第二十一章 直流电机的换向	323
第一节 直流电机的换向过程.....	323
第二节 换向的电磁原理.....	324
第三节 产生火花的原因.....	327
第四节 改善换向的方法.....	328
本章小结.....	330
思考题与习题.....	331
参考文献	332

第一章 基础理论

第一节 概述

电能与石油、天然气、煤炭等能源相比,具有明显的优势,它适合于大量生产、调配、输送和控制。电能不仅在生产与生活中广泛得到应用,而且在未来必将成为主要能源。电机是一种机电能量转换或信号转换的电磁机械装置,在电力工业,电机作为电能生产、输送和应用的主要设备;在工矿企业、农业、交通运输业、国防、科学文化及日常生活等方面也都是十分重要的设备。

电机的种类很多,一般从功能上或理论上分类。

就能量转换的功能来看,电机分类如下。

(1) 发电机,它将机械功率转换为电功率。

(2) 电动机,它将电功率转换为机械功率。

(3) 变压器,它将电功率转换成电压不同的电功率,没有机电能量转换;类似的装置还有变流机、变频器、移相机。

(4) 控制电机,它在机电系统中不以功率传递为主,而是对信号进行调节、放大和控制等职能。

就电机的理论原理来看,可分为以下四类。

(1) 变压器,它是静止设备,输入与输出为交流电。

(2) 异步机,它是旋转电机,供电或发电为交流电,受负载影响,速度不固定。

(3) 同步机,它是旋转电机,供电或发电为交流电,速度等于同步速度,固定不变。

(4) 直流机,它是旋转电机,供电或发电为直流电,速度不固定。

电机的用途很广,在国民经济与日常生活各个行业中的作用如下。

(1) 电力工业中,生产电能作用的发电机;电网上输送、分配电能时起升压或降压作用的变压器。

(2) 工矿企业中,机床、起重机、轧钢机,高炉、水泵、风机等驱动电动机。

(3) 农业生产中,排灌、脱粒、碾米、榨油、抽水等生产机械的驱动电动机。

(4) 文教医疗中,特殊驱动、高精度微特电机。

(5) 交通运输中,电力机车、电动汽车驱动电机,船用、汽车用电机等。

(6) 国防工业中,各种控制电机、驱动电机。

(7) 日常生活中,民用驱动电机,如厨房电器、健身器械、音响电器、冷热空调、电动玩具及电动工具等驱动电动机。

总之,我国生产的中、小型和微型电机,已经有上百种系列,上千个品种,数千个规格。随着生产的发展和科学技术水平的提高,电机新材料和新技术不断创新,许多高效能永磁电机、电子微机控制等特种电机的出现,提高了电机的各种性能,电机在国民经济建设中的重要作用更加突出。

第二节 电机磁路及铁磁材料

根据电机结构形式不同,电机包括静止的变压器和旋转的各类电机。变压器是一种能量传递装置,旋转电机是机电能量转换装置,它们的工作原理都以电磁感应定律为基础,能量都是经过磁场耦合形式,实现传递或转换的。因为磁场在空气中的储能密度比电场大很多,所以电机不用电场而是用磁场作为耦合场,磁场的强弱和分布,不仅关系到电机的性能,而且还决定了电机的体积和重量。

一、电机磁路

电机的工作原理就是电产生磁,磁感应电,电磁相互作用产生转矩等关联的过程,所以电机理论离不开电和磁两大要素。电是指电机内部线圈中流通的电流,其闭合路径即电路,电路理论知识和分析方法,在之前的“电路”或“电工学”课程学习过,电路分析计算一般是线性的;磁是指磁性材料建立的或线圈中电流激励产生的磁场,其大小可以用磁通量描述。电机中分析计算磁场,已经常用有限元等数值解法,这些知识属于后续的专业课内容。传统的方法是将磁场简化为磁路来进行解析,本节主要介绍有关磁路方面的理论知识。

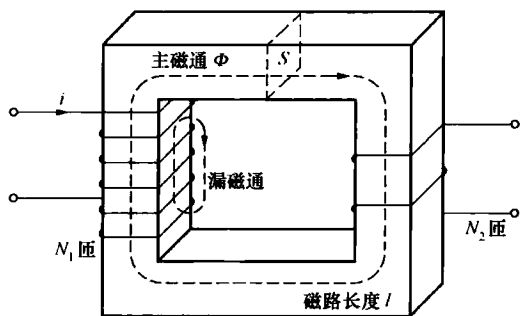


图 1-1 铁芯磁路

电机中磁通所通过的路径称为磁路。图 1-1 表示简单铁芯磁路。

电机和变压器内,常把线圈套在铁芯上。当线圈内通过电流时,在线圈周围空间会激励形成磁场,用磁力线分布描述磁场。任何一根磁力线都是闭合的,磁力线的轨迹就是磁路路径。磁路根据磁阻不同归类,图 1-1 所示磁路有两种,一个是主磁通路径,另一个是漏磁通路径。由于铁芯的导磁性能好,大部分磁通走铁芯回路

闭合,这部分磁通称为主磁通。正如电路有并联支路一样,部分磁通走另外并联回路闭合,即围绕线圈和部分铁芯周围的空间回路,这部分磁通称为漏磁通,它经过不导磁的空气,磁阻较大,所以磁通量较少。磁路分析和计算时,往往用到几条基本定律,以下结合电机结构分别介绍。

1. 安培环路定律

对磁场强度 H ,沿着任何封闭磁力线 l 积分值等于该封闭回线所包围的电流代数和 $\sum i$,这就是安培环路定律,又称全电流定律。用公式表示,有

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (1-1)$$

式中:若电流的正方向与闭合回线 l 的环形方向符合右手螺旋定则, i 取正号,否则 i 取负号。

图 1-1,沿主磁通路径和漏磁通路径,磁场强度闭合积分,包围的电流总和 ($\sum i$) 是一样的,磁路计算时往往不用漏磁通路径,而用几何尺寸容易计算的铁芯中心线,即主磁通路径。若沿着主磁通路径 l ,则磁场强度 H 方向与路径相同,大小处处相等,式 (1-1) 有

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = Hl = \sum i = F = Ni \quad (1-2)$$

式中： $F=Ni$ 为作用在铁芯磁路上的安匝数，称为磁路的励磁磁势，单位为安（A）； l 为主磁路的平均长度，单位为米（m）； N 为线圈匝数； i 为线圈电流。

2. 磁路欧姆定律

设铁芯磁导率为 μ ，截面积为 S ，穿过截面的磁通量为 Φ ，并认为截面上磁通密度 B 均匀分布，则有

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-3)$$

$$F = Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{\Phi}{\mu S}l = \Phi \frac{l}{\mu S} = \Phi R_m \quad (1-4)$$

式中： $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 为磁阻。

比较图 1-2 (a) 及图 1-2 (b)，磁动势 F 比拟电动势 E ，磁通 Φ 比拟电流 I ，磁阻 R_m 比拟电阻 R 。电路的欧姆定律是电势等于电流乘以电阻，磁路欧姆定律形式与其十分相似，即作用在磁路上的磁动势 F 等于磁路内的磁通量 Φ 乘以磁阻 R_m 。

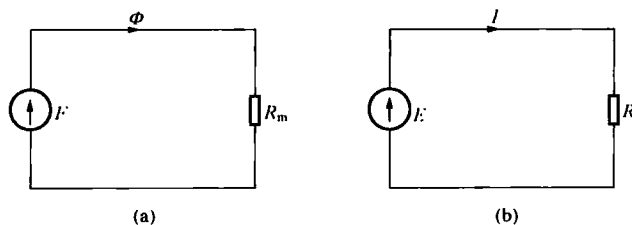


图 1-2 铁芯磁路欧姆定律
(a) 模拟磁路图；(b) 对应电路图

从式 (1-4) 可见，磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 与电阻 $R = \frac{l}{\sigma S}$ 形式一致，电阻表达式中 l 为线圈长度， σ 为线圈电导率， S 为线圈截面积。电路中电阻一般是常数，磁路中由于铁磁材料磁导率 μ 不是一个常数，所以由其构成的磁路，其磁阻也不是常数，而是随着磁路中的磁通密度的大小变化而变化，故磁路计算比电路计算难，因为它非线性。磁路和电路的对应比较见表 1-1。

表 1-1 磁路和电路的对应比较

电路	磁路	电路	磁路
电流： I (A)	磁通： Φ (Wb)	电导： $G = \frac{1}{R}$ (S)	磁导： $\Delta_m = \frac{1}{R_m}$ (H)
电流密度： J (A/m ²)	磁通密度： B (T) 或 (Wb/m ²)	基尔霍夫第一定律： $\sum i = 0$	磁路节点定律： $\sum \Phi = 0$
电动势： E (V)	磁动势： F (A)	基尔霍夫第二定律： $\sum u = \sum e$	全电流定律： $\sum H \cdot l = \sum i$
电阻： $R = \frac{l}{\sigma S}$ (Ω)	磁阻： $R_m = \frac{l}{\mu S}$ (1/H)	电路欧姆定律： $I = \frac{E}{R}$	磁路欧姆定律： $\Phi = \frac{F}{R_m}$

【例 1-1】 有一闭合铁芯磁路，如图 1-1 所示，铁芯的截面积 $S=8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，磁路的平均长度 $l=0.4 \text{ m}$ ，铁芯的磁导率 $\mu_{\text{Fe}}=4500\mu_0$ (μ_0 为真空磁导率， $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)，绕在铁芯上的线圈匝数 $N=480$ 匝，设磁通均匀分布在铁芯截面上，试求要在铁芯中产生磁通 $\Phi=9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，所需的励磁磁动势 F 和励磁电流 i 。

解 根据安培环路定律

$$\text{铁芯中磁通密度} \quad B = \frac{\Phi}{S} = \frac{9 \times 10^{-4}}{8 \times 10^{-4}} = 1.125 \text{ (T)}$$

$$\text{铁芯中磁场强度} \quad H = \frac{B}{\mu_{\text{Fe}}} = \frac{1.125}{4500 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 199 \text{ (A/m)}$$

$$\text{所需的励磁磁动势} \quad F = H \times l = 199 \times 0.4 = 79.6 \text{ (A)}$$

$$\text{所需的励磁电流} \quad i = \frac{F}{N} = \frac{79.6}{480} = 0.166 \text{ (A)}$$

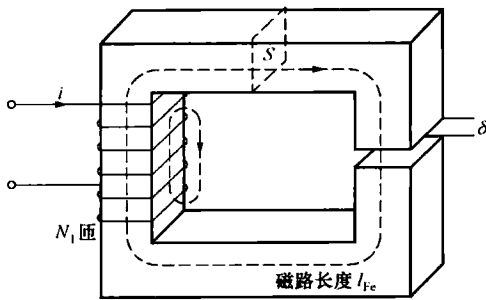


图 1-3 穿过气隙铁芯磁路

【例 1-2】 在 [例 1-1] 基础上，如图 1-3 所示，切掉一段铁芯，留下一个长度 $\delta=7 \times 10^{-4} \text{ m}$ 的气隙，不考虑漏磁和气隙磁场的边缘效应，试求要在铁芯中产生磁通 $\Phi=9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，所需的励磁磁动势 F 和励磁电流 I 。

解 根据安培环路定律

铁芯内磁通密度

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{9 \times 10^{-4}}{8 \times 10^{-4}} = 1.125 \text{ (T)}$$

铁芯内磁场强度

$$H_{\text{Fe}} = \frac{B}{\mu_{\text{Fe}}} = \frac{1.125}{4500 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 199 \text{ (A/m)}$$

$$\text{气隙内磁场强度} \quad H_{\delta} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1.125}{4\pi \times 10^{-7}} = 8.957 \times 10^5 \text{ (A/m)}$$

$$\text{铁芯磁压降} \quad F_{\text{Fe}} = H_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} = 199 \times (0.4 - 0.0007) = 79.46 \text{ (A)}$$

$$\text{气隙磁压降} \quad F_{\delta} = H_{\delta} \delta = 8.957 \times 10^5 \times 0.0007 = 627 \text{ (A)}$$

$$\text{励磁总磁动势} \quad F = F_{\text{Fe}} + F_{\delta} = 79.46 + 627 = 706.46 \text{ (A)}$$

$$\text{励磁电流} \quad I = \frac{F}{N} = \frac{706.46}{480} = 1.472 \text{ (A)}$$

可见，励磁总磁动势等于沿磁路各段磁压降之和。

【例 1-3】 一对称分支磁路如图 1-4 所示，铁芯材料的磁化曲线见表 1-2。中间支路的面积 $S=9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，旁边支路的面积为中间的一半，每个分支支路沿中心线磁通路径长 $l=0.4 \text{ m}$ ，气隙长 $\delta=0.001 \text{ m}$ ，要在中间支路产生磁通 $\Phi=12.78 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，求磁势应为多少？如果线圈电流为 1.5 A ，则线圈应绕多少匝？

表 1-2

铁芯材料的磁化曲线

H (A/m)	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	8000	11 000	14 000	18 000
B (T)	0.55	1.1	1.36	1.48	1.55	1.60	1.64	1.72	1.78	1.83	1.88