

DIANJI YU TUODONG

电机与拖动



石光耀 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校教材

电机与拖动

石光耀 主编

中国铁道出版社

2013年·北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了交、直流电机及变压器的基本结构、工作原理。全书共分五篇,包括直流电机、变压器、交流绕组及其电势和磁势、异步电机、同步电机。书中重点讲述了直流电机、异步电机和变压器的工作原理、分析方法为适应铁道牵引技术的需要,对铁路牵引电机也作了一定的介绍。内容由浅入深,重点突出,重点章节内容配有例题,各章附有一定的思考题与习题。

本书可作为高等院校铁道机车车辆、电气工程及其自动化、机电一体化等专业本专科学生教材,也可选取部分章节作为职业教育的教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动 / 石光耀主编. —北京:中国铁道出版社,2013.7

高等学校教材

ISBN 978-7-113-16389-1

I. ①电… II. ①石… 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(2013)第 104554 号

书 名:电机与拖动
作 者:石光耀 主编

策 划:阚济存

责任编辑:阚济存

编辑部电话:010-51873133

电子信箱:td51873133@163.com

封面设计:崔 欣

责任校对:胡明锋

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.51eds.com>

印 刷:化学工业出版社印刷厂

版 次:2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷

开 本:787 mm × 1 092 mm 1/16 印张:17.5 字数:450千

印 数:1~3 000册

书 号:ISBN 978-7-113-16389-1

定 价:38.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

“电机与拖动”是铁道机车车辆、电类及自动化等专业重要的基础课之一，一般各高校相关专业都将其列为必修课，该课程在后续课程体系中起着承上启下的作用。随着科学技术的不断发展，电机的设计、制造技术水平不断提高，能适应各种不同工作条件、质量性能优良，品种齐全的电机不断涌现，由于现代控制理论的创立以及大功率电力电子器件、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，代替了许多直流调速系统，克服了直流电机的缺点，利用了交流电机结构简单、价格便宜、维护方便、惯性小等一系列优点，提高了经济效益和社会效益。如按国际电工委员会(IEC)标准自行设计的满足社会一般需求的Y系列中小型感应电机，取代了JO₂系列以及从Y系列派生的YX系列节能电机，在变极节能、变频调速方面也取得了可喜成绩。轨道机车车辆牵引电机由于上述原因，也开始由直流牵引电机(脉流电机)向交流牵引电机发展，其从设计、制造到控制都与计算机技术紧密结合，而这些都需掌握扎实的电机及其拖动的基本理论知识。

鉴于此，本书在讲述电机理论知识的同时，结合轨道机车车辆牵引电机的特点对在变频条件下交流电机的调速、非正弦电压下高次谐波对电机的影响等进行了较为详细的介绍，使其更加适应当代技术发展的需要。

本书“电机”部分，在讲述电机中的基本电磁理论的同时，重点讲述了直流电机、变压器、异步电机及同步发电机的基本结构、工作原理、运行性能，同时为适应变频技术日益发展的需要，对非正弦供电以及高次谐波对电机的影响作了一定的分析；“电力拖动”部分，在讲述交直流电机拖动的基本原理及实现方法、电机的选择等知识的同时，重点讲述了变频调速，电动机的软起动的概念及方法，以适应新技术发展的需要。在电机拖动的具体原理图中，加入了控制电路部分，以使读者全面了解掌握拖动的原理及实现方法。由于轨道机车车辆牵引电机的特殊性，对轨道机车车辆牵引电机的要求、结构、工作特点也作了一定的介绍，以满足铁路技术迅速发展的需要。本书中“*”部分内容可根据不同专业及学校具体教学要求适当选择。

本书由兰州交通大学石光耀主编。参加编写的有石光耀(绪论、第十二章~第十七章)，吕小红(第一章~第七章、第二十章)，兰宏伟(第八章~第十一章)，

王庆贤(第十八章),王保民(第十九章、附录 A、B、C、D)。本书在编写过程中得到了兰州交通大学机电工程学院商跃进、张喜全、朱喜峰、薛海、刘万选等老师的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

在本书的编写过程中,参考了大量文献资料,已在书后的参考文献中列出,在此谨对所有参考文献的作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,经验不足,书中定有不少缺点和错误,敬请前辈、同仁们以及广大读者原谅并不吝指正。

编者

2013年7月

主要符号表

A	线负荷、截面积	F_1	变压器一次绕组(电机定子绕组)磁势
a	并联支路数(交流绕组)、支路对数(直流绕组)	F_2	变压器二次绕组(异步机转子绕组)磁势
B	磁通密度	F_a	电枢反应磁势
B_δ	气隙磁密	F_{ad}	直轴电枢反应磁势
B_{ad}	直轴电枢磁场磁密	F_{aq}	交轴电枢反应磁势
B_{aq}	交轴电枢磁场磁密	F_δ	气隙磁势
b	宽度	F_k	换向极绕组磁势
C_T	转矩常数	F_c	线圈磁势
C_e	电动势常数	F_{q1}	q 个线圈所生的基波磁势
D_1	定子直径	$F_{\phi 1}$	单相绕组所生的基波磁势
D_a	电枢外径	$F_{\phi\nu}$	单相绕组所生的 ν 次谐波磁势
E	电动势(交流表示有效值)	f	频率、磁势的瞬时值
E_ϕ	相电动势	f_1	定子频率
E_0	空载电动势	f_2	转子频率
E_a	电枢电动势	f_ν	ν 次谐波频率
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的有效值	f_N	额定频率
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的有效值	I	直流电流或交流电流有效值
E'_2	E_2 的折算值	i	交流电流瞬时值
$E_{\sigma 1}$	变压器一次绕组(电机定子绕组)由漏磁通感应的电动势的有效值	I_N	额定电流
$E_{\sigma 2}$	变压器二次绕组(电机定子绕组)由漏磁通感应的电动势的有效值	I_0	空载电流
E_{ad}	直轴电枢反应电势	I_ϕ	相电流
E_{aq}	交轴电枢反应电势	I_1	变压器一次绕组(感应电机定子绕组)电流
e_x	电抗电势	I_2	变压器二次绕组(感应电机转子绕组)电流
e_k	换向电势	I'_2	I_2 折算到定子侧的值
F	磁势、磁压降、力	I_a	直流电机的电枢电流
F_f	励磁磁势	I_f	励磁电流
F_{f0}	空载励磁磁势	I_{f0}	空载励磁电流
F_{fN}	额定励磁磁势	I_{fN}	额定励磁电流
		I_k	堵转电流、短路电流
		I_{st}	起动电流

2 >>>> 电机与拖动

I_0	变压器(异步电动机)交流励磁电流	q	每极每相槽数
I_{op}	交流励磁电流的有功分量	r	电机、变压器绕组内部电阻
I_{oQ}	交流励磁电流的无功分量	R	外串电阻
J	转动惯量	r_1	变压器一次绕组(感应电机定子绕组)电阻
K	换向片数	r_2	变压器二次绕组(感应电机转子绕组)电阻
k	变压器的变比	r'_2	r_2 折算到变压器一次绕组(感应电机折算到定子绕组)的电阻
k_i	异步电动机定子与转子的电流比	r_f	励磁绕组电阻
k_e	异步电动机定子与转子的电势比	r_a	电枢电阻
k_y	绕组的短距系数	r_m	励磁电阻
k_p	绕组的分布系数	s	转差率
k_w	绕组的系数	s_N	额定转差率
$k_{w\nu}$	ν 次谐波绕组的系数[$\nu = 1$ (基波)、3、5……]	s_m	临界转差率
T	转矩、时间常数、周期	S	视在功率
T_k	换向周期	U	电压(交流表示有效值)
T_1	输入转矩	U_N	额定电压(交流表示有效值)
T_2	输出转矩	U_ϕ	相电压
T_0	空载转矩	I_ϕ	相电流
T_{st}	起动转矩	U_1	电源电压、定子相电压(变压器一次侧电压)
T_{em}	电磁转矩	U_2	转子相电压(变压器二次侧电压)
T_N	额定转矩	U_k	堵转电压、短路电压
T_L	负载转矩	U_0	空载电压
T_{max}	最大转矩	u	电压的瞬时值
m	相数	Δu	电压调整率
n	转速	N	绕组匝数、交流绕组的串联匝数、导体数
n_1	同步转速	N_f	励磁绕组匝数
n_N	额定转速	N_s	串励绕组匝数
n_0	空载转速	N_k	换向极绕组匝数
n_ν	ν 次谐波合成磁场转速	N_1	定子(变压器一次侧)绕组匝数
P	功率	N_2	转子(变压器二次侧)绕组匝数
P_1	输入功率	N_y	一个线圈的匝数
P_2	输出功率	x	电抗
P_Ω	机械总功率	x_1	定子(变压器一次侧)漏电抗
P_0	空载功率	x_2	转子(变压器二次侧)漏电抗
p_k	短路损耗	x_{ad}	直轴电枢反应电抗
p_Ω	机械损耗	x_{aq}	交轴电枢反应电抗
p_s	杂散损耗		
p_{Cu}	铜损耗		
p_{Fe}	铁损耗		
Q	无功功率		

x_a	电枢反应电抗	R_m	磁阻
x_d	直轴同步电抗	Λ_σ	漏磁导
x_q	交轴同步电抗	τ	极距
x_t	同步电抗	η	效率
x_m	励磁电抗	η_N	额定效率
x_k	短路电抗	η_{\max}	最大效率
γ	合成节距	Φ	线圈所交链的磁通
γ_1	第一节距	Φ_m	主磁通峰值、线圈交链的磁通的最大值
γ_2	第二节距	Φ_σ	漏磁通
γ_k	换向器节距	Φ_ν	ν 次谐波磁通
Z	槽数	Φ_0	空载磁通
Z_1	感应电机定子槽数	Φ_{ad}	直轴电枢反应磁通
Z_2	感应电机转子槽数	Φ_{aq}	交轴电枢反应磁通
z	阻抗	ψ	磁链、内功率因数角
z_m	励磁阻抗	φ	功率因数角、相角
z_k	短路阻抗	φ_0	空载功率因数角
α	合成节距角度、相邻两槽间的电角度	φ_k	短路功率因数角
β	夹角	ψ_0	E_0 和 i 的夹角
δ	气隙	ψ_2	感应电机转子内功率因数角
θ	温升、功角	Ω	机械角速度
μ	磁导率	Ω_1	同步机械角速度
Λ	磁导	ω	角频率、电角速度

目 录

绪 论	(1)
思考题与习题	(7)
第一篇 直流电机	
第一章 直流电机的基本原理和结构	(8)
第一节 直流电机的基本原理	(8)
第二节 直流电机的基本结构	(10)
第三节 直流电机的铭牌和主要系列	(12)
第四节 直流电机的励磁方式	(13)
思考题与习题	(14)
第二章 直流电机的电枢绕组	(15)
第一节 电枢绕组的构成原则和节距	(15)
第二节 单叠绕组	(17)
第三节 直流电枢绕组的对称条件*	(19)
第四节 均压线*	(19)
第五节 电枢绕组的感应电势	(21)
第六节 各种绕组的应用范围及电压功率的划分	(22)
思考题与习题	(22)
第三章 直流电机的运行原理	(24)
第一节 直流电机空载时的磁场和磁动势	(24)
第二节 直流电机负载时的磁场和磁动势	(26)
第三节 直流电机的电枢反应	(28)
第四节 直流电机的电磁转矩	(30)
第五节 直流电机的基本方程式	(31)
第六节 直流电机的可逆性	(34)
第七节 直流发电机的特性	(35)
思考题与习题	(38)
第四章 直流电机的换向	(40)
第一节 换向的电磁理论	(40)

2 >>>> 电机与拖动

第二节 火花及其产生的原因	(42)
第三节 改善换向的方法	(43)
第四节 电位差火花、环火及其防治方法*	(46)
思考题与习题	(47)
第五章 电力拖动系统基础	(49)
第一节 电力拖动系统的运动方程式	(49)
第二节 典型生产机械的运动形式和负载特性	(51)
第三节 电力拖动系统稳定运行的条件	(52)
思考题与习题	(54)
第六章 直流电动机的电力拖动	(55)
第一节 直流电动机的工作特性	(55)
第二节 直流电动机的机械特性	(58)
第三节 直流电动机的起动	(61)
第四节 直流电动机的调速	(62)
第五节 直流电动机的制动	(65)
第六节 各种直流电动机的应用范围及四象限运行	(68)
第七节 他励直流电动机过渡过程	(69)
思考题与习题	(73)
第七章 旋转电机的发热和冷却	(74)
第一节 电机常用绝缘材料等级和各部分温升限度	(74)
第二节 电动机工作制	(76)
第三节 旋转电机的通风冷却方式	(77)
思考题与习题	(79)

第二篇 变 压 器

第八章 变压器的分类和基本结构	(80)
第一节 变压器的分类	(80)
第二节 电力变压器基本结构	(81)
第三节 变压器的额定值	(86)
思考题与习题	(87)
第九章 变压器的运行原理与特性	(88)
第一节 变压器的空载运行	(88)
第二节 变压器的负载运行	(93)
第三节 变压器的参数测定	(98)
第四节 变压器的运行特性	(100)

思考题与习题	(104)
第十章 三相变压器	(105)
第一节 三相变压器的磁路系统	(105)
第二节 三相变压器的联结组	(106)
第三节 三相变压器空载运行时的电势波形	(109)
思考题与习题	(112)
第十一章 变压器的并联运行及其他用途的变压器	(113)
第一节 变压器的并联运行	(113)
第二节 其他用途的变压器	(116)
思考题与习题	(121)

第三篇 交流绕组及其电势和磁势

第十二章 交流绕组的感应电势	(122)
第一节 导体中的感应电势	(122)
第二节 槽电势星形图	(124)
第三节 线圈电势	(125)
第四节 分布绕组的电势	(127)
第五节 感应电势中的高次谐波	(129)
第六节 减少谐波电势的方法	(131)
思考题与习题	(133)
第十三章 交流绕组	(134)
第一节 交流绕组的构成原则和排列方法	(134)
第二节 三相单层绕组	(135)
第三节 三相双层绕组	(138)
思考题与习题	(141)
第十四章 交流绕组的磁势	(142)
第一节 单相绕组的脉振磁势	(142)
第二节 三相绕组的旋转磁势	(150)
第三节 时间相量和空间矢量	(157)
思考题与习题	(158)

第四篇 异步电机

第十五章 异步电机的基本结构和原理	(159)
第一节 异步电机的分类、基本结构和铭牌	(159)

4 >>>> 电机与拖动

第二节 异步电动机的基本作用原理	(162)
思考题与习题	(163)
第十六章 三相异步电动机的运行分析	(164)
第一节 三相异步电动机的空载运行	(164)
第二节 异步电动机的负载运行	(166)
第三节 异步电动机的等效电路	(169)
第四节 异步电动机的功率和转矩平衡关系	(174)
第五节 鼠笼式转子参数的折算	(175)
第六节 异步电动机的工作特性和参数测定	(178)
第七节 单相异步电动机	(182)
思考题与习题	(187)
第十七章 三相异步电动机的电力拖动	(189)
第一节 异步电动机的机械特性	(189)
第二节 三相异步电动机的起动	(194)
第三节 三相异步电动机的制动	(205)
第四节 三相异步电动机的调速	(210)
思考题与习题	(221)
第五篇 同步电机	
第十八章 同步电机的结构及运行原理	(223)
第一节 同步电机的基本结构和额定值	(223)
第二节 同步发电机的运行原理及运行特性	(226)
第三节 同步电动机的运行原理及运行特性	(237)
第四节 三相同步电动机的电力拖动	(242)
思考题与习题	(243)
第十九章 电动机的选择	(244)
第一节 电动机选择的主要内容	(244)
第二节 电动机容量的选择	(244)
第三节 电动机类型、额定电压、额定转速及外部结构形式的选择	(251)
思考题与习题	(253)
第二十章 铁路牵引电动机简介	(255)
第一节 牵引电动机	(255)
第二节 牵引变压器	(261)
思考题与习题	(263)
附 录	(264)
参考文献	(268)

绪 论

一、电机在国民经济中的作用和意义

能源是国民经济发展的重要命脉,由于电能具有适宜大量生产、集中管理、远距离传输、方便使用、灵活分配和便于自动控制等优点,因而成为现代社会最常用的一种能源。而电能产生、传输、分配和应用中与电机有着密不可分的关系,因此电机在国民经济中起着十分重要的作用,主要表现在以下几点。

(1) 电机是电能生产、传输和分配中的主要设备。

在发电厂中,发电机由汽轮机、水轮机、柴油机或其他动力机械带动,这些原动机将机械能传给发电机,再由发电机将机械能转换为电能。由于绝缘水平的限制,发电机的输出电压一般为 $10 \sim 20 \text{ kV}$,为减少输电中的能量损失,经济地传输电能,需提高电压,一般为 110 kV 、 220 kV 、 330 kV 、 500 kV 、 750 kV 等,因此需采用变压器将发电机发出的电压升高后,再进行电能的传输。到各用电区,为了安全使用电能,各用电设备又需要不同的低电压,因此还需要各种电压等级的降压变压器将电压降低,然后供给各用户。在电力工业中,发电机和变压器是发电厂和变电站的主要设备。

(2) 电机是各种生产机械和装备的主要动力设备。

在机械工业、冶金工业、化工工业、交通运输业以及其他各种工业企业中,都用电动机作为原动机;在农业生产、医疗、文教以及日常生活中,电机的应用也很广泛。

(3) 电机是自动控制系统中的重要元件。

随着科学技术的发展,工农业和国防设施的自动化程度越来越高,各种各样的控制电机被用作执行、检测、放大和解算元件。这类电机一般功率小,品种繁多,用途各异,精度要求较高。如雷达、航空、无线电、计算机技术和航天技术等,需要大量的控制电机作为自动化系统的元件。

二、电机工业的发展方向

(1) 发电机、变压器的单机容量不断提高。单机容量越大,单位容量的原料愈节省,电站的机组可减少,制造、运行、维护费用均可降低。世界上单机容量已突破 $1\,000 \text{ MW}$,我国已能制造出 600 MW 的汽轮发电机、 700 MW 的水轮发电机、 $1\,200 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的变压器和 $2\,000 \text{ kW}$ 的异步电机、 $4\,700 \text{ kW}$ 的直流电动机等。

(2) 中小型电机技术和经济指标不断改进。随着新材料、新技术、新工艺的不断出现,计算机对电机进行设计与分析的应用,产品更新的速度进一步加快,电机性能不断提高。

(3) 电机应用范围不断扩大,类型及品种愈来愈多。

总之,为了适应新的要求和科学技术的不断发展,不仅要求电机能适应各种不同的工作条件,而且要在品种、质量性能等方面满足特定的要求,特别是由于现代控制理论的创立,以及大功率电力电子器件、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,代替了许多直流调速系统,克服了直流电机的缺点,利用了交流电机结构简单、价格便宜、维护方便、惯性小等一系列优点,提高了经济效益和社会效益,如按国际电工委员会(IEC)标准自行设计的Y系列中小型感应电机,取代了JO₂系列以及从Y系列派生的YX系列节能电机,在变极节能、变频调速方面取得了可喜成绩。

三、电机的主要类型

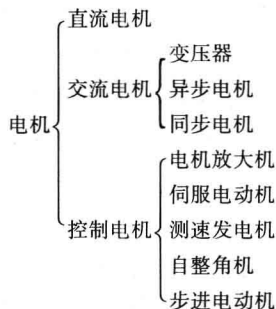
电机是一种动力机械,其主要任务是进行能量转换,按照能量的转换方式,电机可分为:

(1)将机械能转换为电能——发电机;

(2)将电能转换为机械能——电动机;

(3)将一种电能转换为另一种电能——用来将交流变为直流的换流机;用来变化频率的变频机;用来变化电压的变压器。

应当指出,从基本原理上看,发电机和电动机只是电机的两种运行方式,它们基本是可逆的。电机的主要类别如下所示。



分类不是绝对的,是为了便于分析研究,它们之间有着极密切的内在关系。

四、本课程的任务和电机的研究方法

电机与拖动是机电专业的技术基础课,它与电工基础课的性质不同,在电工基础课中所研究的问题总是理想化和单纯的,在电机与拖动中要求运用理论来解决实际问题,而在实际问题中,情况往往是复杂和综合的。因此,在分析时要将问题简化,找出主要矛盾,这样能够正确地反映客观规律。在学习中要从实际出发,注意把各种电机联系起来,这样才能对各种电机有深入的了解。

1. 分析和研究电机原理的方法

(1)分析电机在空载和负载运行时电机内部的物理情况(即磁势和磁场);

(2)列出电机的电势、磁势、功率和转矩平衡方程式;

(3)求解方程,求取运行特性并加以分析。

2. 分析和研究电机的磁场和基本方程式

(1)不计饱和时,常用叠加原理来分析电机的各个磁场及相应的电势。考虑饱和时,常把主磁通和漏磁通分开处理,前者用磁化曲线来确定,后者用其效果作为漏抗压降来处理;

(2)用等效电路来表示电机需用折算法;

(3)在分析交流电机的稳态运行时,常用等效电路和相量图;

(4)分析不对称运行时常用双旋转理论和对称分量法。

研究电机的另一重要方法是科学实验,其方法基本上分为两种:直接法和间接法。直接法是将电机带上负载,在接近实际情况下进行实验,并测得数据与理论计算的结果相比较,以判定理论计算是否正确。间接法是利用空载、短路试验,测得电机的参数,然后间接算出电机的性能。

本课程的主要任务是为培养学生的专业知识,为解决实际问题打下理论基础,并学习电机实验的操作技术。

五、电机中的铁磁材料及其特性

电机是以电磁感应为基础、以磁场作为耦合媒介实现机电能量转换的装置,它主要由两大系统组成:电路系统和磁路系统。铁磁材料是组成磁路的主要部分。

所谓铁磁材料是指导磁性能好的材料,包括铁、镍、钴等以及它们的合金。铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 要比非铁磁材料磁导率 μ 大得多,非铁磁材料磁导率接近真空磁导率 μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$),电机中常用铁磁材料的磁导率 $\mu_{Fe} = (2\ 000 \sim 8\ 000) \mu_0$,铁磁材料能在外磁场中呈现很强的磁性,该现象称磁化,这是因为铁磁材料内部存在许多很小的被称为磁畴的天然磁化区,每个磁畴可看作一微型磁铁,其示意图如图0-1所示。磁化前,磁畴随机排列,铁磁材料对外不呈磁性,如图0-1(a)所示;磁化后,在外磁场的作用下,磁畴沿磁场方向排列整齐,铁磁材料呈现较强的磁性,如图0-1(b)所示,形成了一个附加磁场叠加在外磁场上,使合成磁场显著增强。利用这种特性,电机和变压器的铁心由磁导率较高的铁磁材料制成,以获得在一定的励磁磁动势下产生较强的磁场。

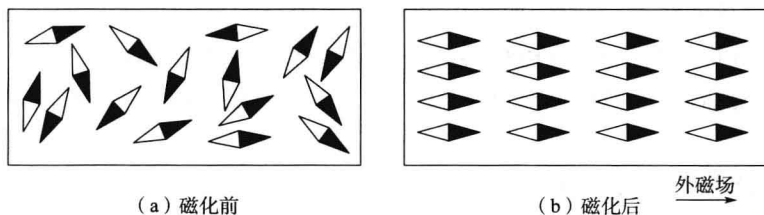


图0-1 磁畴示意图

1. 磁化曲线

在非铁磁材料中,磁通密度 B 和磁场强度 H 之间呈线性关系,即 $B = \mu_0 H$ 。对于铁磁材料,磁导率 μ_{Fe} 值除了比 μ_0 大得多以外,还与磁场强度以及物质磁状态的历史有关,所以铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 不是常数。在工程计算时,事先将各种铁磁材料用试验的方法,测得它们在不同磁场强度 H 下对应的磁通密度 B ,绘制成 $B-H$ 曲线,该 $B-H$ 曲线称为磁化曲线。将未经磁化的铁磁材料进行磁化,磁场强度 H 由零增大时,磁通密度 B 随之增大,所得的 $B=f(H)$ 曲线称为起始磁化曲线,如图0-2所示。

由图0-2可见,曲线分四段,oa段: H 增大使得 B 增大,但 B 增大速度较慢;ab段: B 随 H 迅速增大(呈直线段);bc段: B 随 H 增大的速度又较慢;cd段:磁饱和区(又呈直线段)。其中,a点称为跖点;拐弯点b称为膝点;c点为饱和点。过了饱和点c,铁磁材料的磁导率趋近于 μ_0 。

可以看出,铁磁材料具有如下特点:其磁化曲线具有饱和性,磁导率 μ_{Fe} 不是常数,且随 H 的变化而变化。

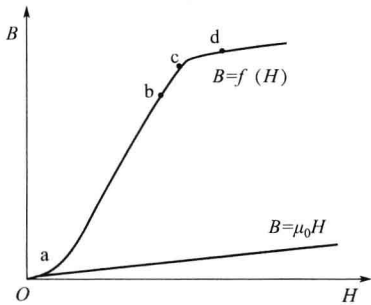


图 0-2 起始磁化曲线

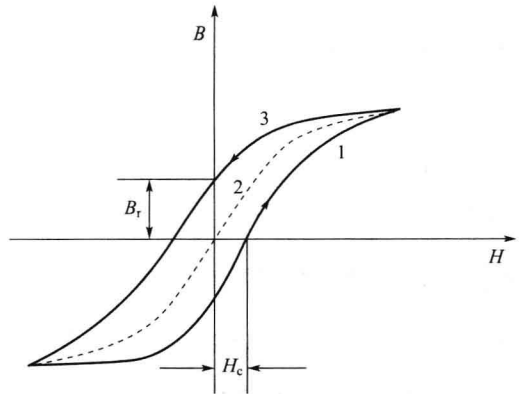


图 0-3 磁滞回线

2. 磁滞回线

铁磁材料被反复磁化时, $B-H$ 曲线不是单值, 而是一条磁滞回线, 如图 0-3 所示。同一 H 下, 有两个 B 值与之对应。当 $H=0$ 时, $B \neq 0$, $B=B_r$, B_r 称为剩磁; 当 $B=0$ 时, $H=H_c$, H_c 称为矫顽力。

剩磁的意义在于, 当没有外部励磁时, 也能在磁路中产生磁通。剩磁广泛用在扬声器和永磁电机等装置中。

不同的铁磁物质其磁滞回线宽窄是不同的, 当铁磁材料的磁滞回线较窄时, 可用其平均磁化曲线, 即基本磁化曲线进行计算, 如图 0-3 曲线 2 所示。

根据磁滞回线形状的不同, 铁磁材料可分为硬磁材料和软磁材料。

硬磁材料的磁滞回线胖宽, 剩磁、矫顽力大, 如钨钢、钴钢、镍铝钴合金、钕铁硼等。一般用来制造永久磁铁。

软磁材料的磁滞回线瘦窄, 剩磁、矫顽力小, 如硅钢片、铸钢等。

一般电机铁心采用软磁材料制成, 其磁滞回线瘦窄, 在进行磁路计算时, 为了简化计算, 不考虑磁滞现象, 而用基本磁化曲线来表示 B 与 H 之间的关系, 故通常所说的铁磁材料的磁化曲线是指基本磁化曲线。

3. 交流磁路中的铁心损耗

交流磁路中存在着铁心损耗, 铁心损耗又分为磁滞损耗和涡流损耗。

(1) 磁滞损耗

铁磁材料在交变的磁场中反复磁化, 磁畴间相互摩擦, 产生损耗, 该损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗与交变磁场的频率 f 、铁心的体积 V 、磁滞回线的面积成正比。磁滞损耗功率可用式 (0-1) 表示。

$$p_k = k_k f B_m^n V \quad (0-1)$$

式中, k_k 为磁滞损耗系数, 其数值大小取决于材料性质; f 为磁通交变频率; B_m 为磁通密度的最大值, 对一般电工钢片, $n=1.6 \sim 2.3$ 。

(2) 涡流损耗

铁心是导电、有阻值的, 当磁通交变时, 铁心中会感应交变电动势, 在导电的铁心中就会产生环流, 该电流在铁心构成的回路与磁通相环链, 故称涡流, 涡流产生的损耗称为涡流损耗。涡流损耗功率可用式 (0-2) 表示。

$$p_w = k_w f^2 B_m^2 \quad (0-2)$$

式中 k_w ——与材料有关的比例系数。

(3) 铁心损耗

铁心中的磁滞损耗和涡流损耗之和称为铁心损耗。铁心损耗可用式(0-3)表示。

$$P_{Fe} = P_k + P_w \quad (0-3)$$

六、研究电机时常用的基本定律

1. 电路定律

(1) 欧姆定律

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{U}{R}, & \text{直流电路} \\ i &= \frac{\dot{U}}{Z}, & \text{交流电路} \end{aligned} \right\} \quad (0-4)$$

(2) 基尔霍夫第一定律

电路中任意节点的电流代数和等于零,即

$$\left. \begin{aligned} \sum I &= 0 & (\text{直流电路}) \\ \sum i &= 0 & (\text{交流电路}) \end{aligned} \right\} \quad (0-5)$$

(3) 基尔霍夫第二定律

对电路中的任一回路,电压降的代数和等于电动势的代数和,即

$$\left. \begin{aligned} \sum U &= \sum E & (\text{直流电路}) \\ \sum \dot{U} &= \sum \dot{E} & (\text{交流电路}) \end{aligned} \right\} \quad (0-6)$$

(4) 电磁感应定律

匝数为 N 的线圈,在变化的磁场中产生的感应电动势的大小与线圈匝数和线圈所链的磁通对时间的变化率 $d\Phi/dt$ 成正比,当感应电动势的正方向与产生它的磁通正方向符合右手螺旋定则时,则有

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-7)$$

(4) 变压器电动势 若匝数为 N_1 的线圈不动,穿过线圈的磁通随时间变化,则线圈中感应的电动势称为变压器电动势。如图 9-1 中的 e_1, e_2 , 若与线圈交链的磁通是由线圈自身电流产生,则感应电动势称自感电动势,可表示为

$$e_1 = e_{L1} = -N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = -L \frac{di_1}{dt} \quad (0-8)$$

式中 L ——自感系数, $L = \frac{\Psi_1}{i_1} = \frac{N_1 \Phi_1}{i_1} = N_1^2 \times \frac{\Phi_1}{N_1 i_1} = N_1^2 \Lambda_m$ 。

若与线圈交链的磁通是由其他线圈电流产生,则感应电动势称互感电动势,可表示为

$$e_2 = e_M = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = -M \frac{di_1}{dt} \quad (0-9)$$

式中 M ——互感系数, $M = \frac{\psi_2}{i_1} = \frac{N_2 \Phi_1}{i_1} = N_1 N_2 \times \frac{\Phi_1}{N_1 i_1} = N_1 N_2 \Lambda_m$;