

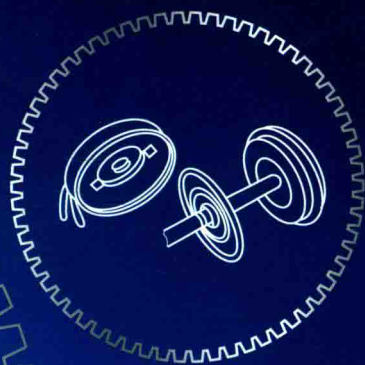
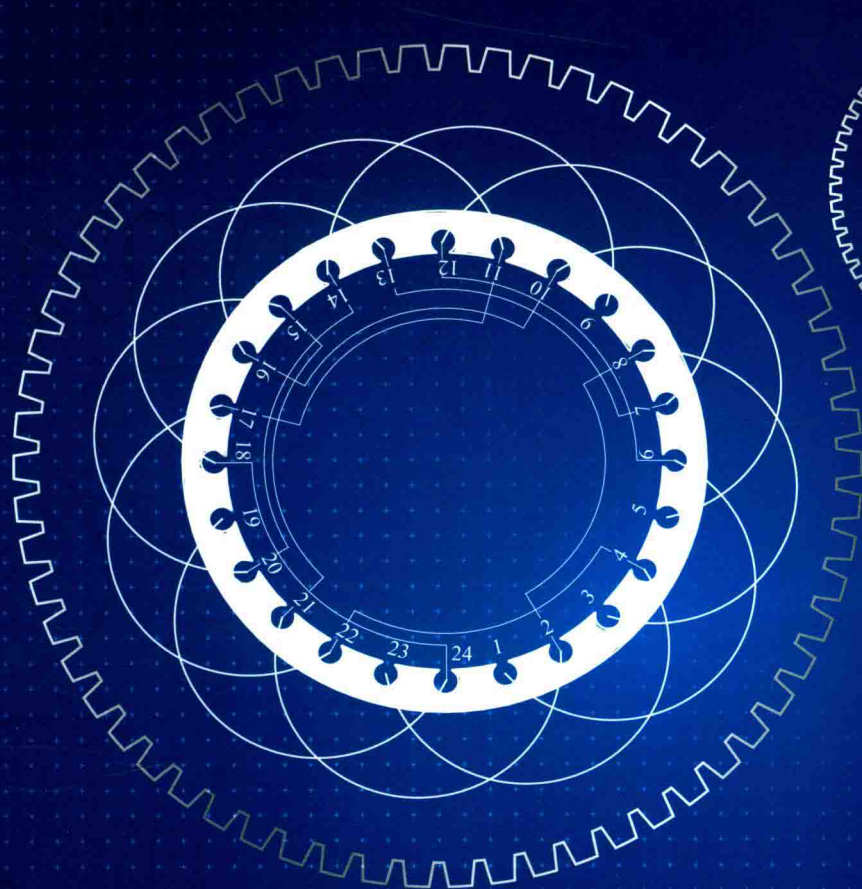


高职高专“十三五”规划教材

电机及其拖动



王旭元 主编
关玉琴 主审



DIANJI
JIQI
TUODONG



化学工业出版社

高职高专“十三五”规划教材

电机及其拖动

王旭元	主 编
牛海霞	王晓奇
刘 璐	李满亮
	关玉琴
	主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本教材为适应高职高专院校“电机拖动”课程的理论和实践教学一体化需要编写,共分5个学习任务,全面、系统地阐述电机学的基本知识,电机控制运行的基本技能,以及电机维修的基本技能,主要内容有:直流电机认知与运行控制,变压器认知与运行控制,三相异步电动机认知与运行控制,三相异步电动机维修工艺,其他电机认知与运行控制等。本书各学习任务设有知识要点、技能目标、关联知识、技能训练、任务小结、思考与练习题,便于学习者更好地掌握所学的知识和实践技能。

本教材的特点是将传统的电机拖动理论知识与实践技能训练紧密结合,以典型电机为例,突出电机拖动控制和电机维修的实践技能,通俗易懂,实用性较强。

本教材可作为高职高专机电一体化技术、数控设备应用与维护、电气自动化、机电设备维修等专业的教材,也可作为成人教育和中职教育、企业职工培训的教材,还可供从事电工技术、电力拖动技术、设备控制及电机维修的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机及其拖动/王旭元主编. —北京:化学工业出版社,
2016.8

高职高专“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-27549-3

I. ①电… II. ①王… III. ①电机-高等教育-教材②电力传动-高等教育-教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 153037 号

责任编辑:韩庆利
责任校对:宋 玮

文字编辑:张绪瑞
装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:三河市航远印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张13¼ 字数337千字 2016年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.80 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

随着科学技术的发展,电机在我们的生产和生活中得到越来越广泛的应用,在国民经济的各个领域、各种设备和系统运行中,大多数依靠电机拖动,我们所使用的电能绝大部分也由发电机产生,通过输配电线路以及变压器供给用户。电机设备的应用几乎触及我们周围的各个角落。为了使用、管理和维护好这些设备,社会需要大量掌握电机及知识并能够熟练应用电机拖动控制与维修的技能人才。电机的知识与技能,既涉及一定的理论基础,又涉及一定的工程实践,因此大家常常感觉到学习电机有一定的困难。

本教材基于编者长期的工程实践和教学工作经验,为适应高职高专院校“电机拖动”课程理实一体化教学的需要,也为能够给相关工程技术人员提供自学参考书而编写。在编写过程中,以任务导向的职业教育思想为指导,充分考虑高职高专教育的特点与特色,理论以必需、够用为度,以电机运行控制与维修基本技能为主线,融知识传授与能力培养于一体,着重培养学生素质和技能。

本教材将电机拖动与电机维修有机结合,并注重创新,重组和优化课程体系,实用性、针对性较强。书中较全面、系统地阐述直流电机、变压器、交流电机的知识,安排了相关电机的启动、正反转、制动、调速等控制运行技能训练,以异步电动机为例,有针对性地选择电动机维修中涉及的技能和方法,从而达到举一反三、以点带面的目的,使之具有广泛的适应性。

本教材共分5个学习任务,主要内容有:直流电机认知与运行控制,变压器认知与运行控制,三相异步电动机认知与运行控制,其他电机认知与运行控制,电动机维修。本书各学习任务设有知识要点、技能目标、关联知识、技能训练、任务小结、思考与练习,便于学生更好地掌握所学的知识和实践技能。

本书由王旭元主编,牛海霞、王晓奇、刘璐、李满亮任副主编,刘引弟参编。任务1由王旭元编写,任务2中的关联知识1和关联知识2由李满亮编写、任务2其余部分由刘引弟编写,任务3中的关联知识1、关联知识2和关联知识3由牛海霞编写、任务3中的关联知识4由王旭元编写,任务3其余部分由刘璐编写,任务4由牛海霞编写,任务5由王晓奇编写,附录由王旭元编写,全书由王旭元统稿,由关玉琴审定。

本书配套电子课件,可赠送给用书的院校和老师,如果需要,可登录 www.cipedu.com.cn 下载。

由于编者水平有限,疏漏和不妥之处恳请读者和同行批评指正。

编者

目录

CONTENTS

◎ 任务 1 直流电机认知与运行控制

1

关联知识 1 磁路	1
1.1.1 磁路中的基本概念	1
1.1.2 磁路的基本定律	4
1.1.3 铁芯线圈与电磁铁	6
关联知识 2 直流电机的结构与原理	8
1.2.1 直流电机的工作原理	8
1.2.2 直流电机的结构	10
1.2.3 直流电机的励磁方式	12
1.2.4 直流电机的换向	14
1.2.5 直流电机中的基本物理量	17
1.2.6 直流电机的铭牌数据	20
关联知识 3 直流电动机电力拖动	22
1.3.1 他励直流电动机的机械特性	22
1.3.2 直流电动机的启动	24
1.3.3 直流电动机的反转	25
1.3.4 直流电动机的制动	25
1.3.5 直流电动机的调速	28
关联知识 4 常用低压电器元件	31
1.4.1 接触器	31
1.4.2 继电器	34
1.4.3 熔断器	39
1.4.4 开关和按钮	41
技能训练 1 直流电动机拆装	45
技能训练 2 直流电动机启动与正反转控制	47
技能训练 3 直流电动机调速控制	48
技能训练 4 直流电动机制动控制	49
任务小结	50
思考与练习	51

◎ 任务2 变压器认知与参数测定

52

关联知识1 变压器的类别和结构	52
2.1.1 变压器的主要类别	52
2.1.2 电力变压器的基本结构	53
2.1.3 变压器的铭牌和额定值	56
关联知识2 变压器的运行原理和主要特性	58
2.2.1 变压器的空载运行	58
2.2.2 变压器的负载运行	64
2.2.3 变压器的标么值和运行特性	68
关联知识3 三相变压器	71
2.3.1 三相变压器的磁路系统	71
2.3.2 三相变压器的电路系统——连接组及连接法	72
2.3.3 变压器的并联运行	76
关联知识4 其他用途的变压器	77
2.4.1 自耦变压器	77
2.4.2 仪用互感器	78
2.4.3 电焊机变压器	79
技能训练1 变压器的空载和短路测试	81
技能训练2 单相变压器的损耗和效率实验	82
技能训练3 单相变压器绕组同名端的判别	83
任务小结	84
思考与练习	85

◎ 任务3 交流异步电动机认知与运行控制

87

关联知识1 三相异步电动机的工作原理与结构	87
3.1.1 三相异步电动机的工作原理	87
3.1.2 三相异步电动机的分类与结构	89
关联知识2 三相异步电动机的等效电路	98
3.2.1 空载电流	98
3.2.2 空载时的定子电压平衡关系	98
3.2.3 负载运行时的物理情况	99
3.2.4 异步电动机的等效电路	101
关联知识3 异步电动机的功率和电磁转矩	102
3.3.1 功率转换过程和功率平衡方程式	102
3.3.2 转矩平衡方程式	103
3.3.3 电磁转矩公式	103
关联知识4 三相异步电动机的电力拖动	104
3.4.1 三相异步电动机的工作特性	104

3.4.2	三相异步电动机的机械特性	105
3.4.3	三相异步电动机的启动	107
3.4.4	三相异步电动机的反转	110
3.4.5	三相异步电动机的制动	110
3.4.6	三相异步电动机的调速	112
关联知识 5	单相异步电动机	116
3.5.1	单相异步电动机基本工作原理	116
3.5.2	单相异步电动机的启动方法	117
关联知识 6	电气控制系统识图基础	119
3.6.1	图形符号和文字符号	119
3.6.2	绘制规则	119
技能训练 1	三相笼型异步电动机的参数测定	120
技能训练 2	三相异步电动机定子串电阻降压启动控制电路调试	124
技能训练 3	三相电动机 Y- Δ 降压启动控制电路装调	126
技能训练 4	三相异步电动机降压启动及反接制动控制电路装调	129
技能训练 5	异步电动机的工业实践应用 1——车床	131
技能训练 6	异步电动机的工业实践应用 2——铣床	135
任务小结		144
思考与练习		144

◎ 任务 4 其他电机认知与运行控制

145

关联知识 1	同步电机	145
4.1.1	同步电机的分类	145
4.1.2	同步电机的基本结构	146
4.1.3	同步电机的基本工作原理	147
4.1.4	同步电机的额定值及励磁方式	149
4.1.5	同步电动机的 V 形曲线和功率因素调节	150
4.1.6	同步电动机的启动	151
关联知识 2	伺服电动机	152
4.2.1	伺服电动机的分类	153
4.2.2	直流伺服电动机	153
4.2.3	交流伺服电动机	156
关联知识 3	步进电动机	160
4.3.1	步进电动机的原理	160
4.3.2	步进电动机的运行特性	162
4.3.3	驱动电源	165
4.3.4	步进电动机的应用	165
关联知识 4	测速发电机	166

4.4.1 直流测速发电机	166
4.4.2 交流测速发电机	167
4.4.3 测速发电机的应用	169
关联知识 5 旋转变压器	169
4.5.1 旋转变压器的分类	169
4.5.2 旋转变压器的结构	169
4.5.3 正余弦旋转变压器的工作原理	170
4.5.4 旋转变压器的应用	171
技能训练 1 步进电机基本特性的测定	172
技能训练 2 三相同步电动机的启动和 V 形曲线的测定	174
任务小结	175
思考与练习	176

◎ 任务 5 电动机维修

177

关联知识 1 测试仪表、修理工具和材料	177
5.1.1 测试仪器、仪表	177
5.1.2 电动机维修工具	181
5.1.3 维修中常用的材料	182
关联知识 2 修理项目和工艺程序	185
5.2.1 维修工作的一般要求	185
5.2.2 鼠笼式电动机小修方法及工艺要求	185
5.2.3 鼠笼式电动机大修方法及工艺要求	186
5.2.4 电动机修理工艺程序	186
技能训练 1 笼型异步电动机拆卸与基本数据测算	187
技能训练 2 制作电动机绕组	190
技能训练 3 电动机定子绕组嵌线	190
技能训练 4 定子绕组绝缘与绑扎	193
技能训练 5 绕组首末端的判别	194
技能训练 6 测量绝缘电阻	195
技能训练 7 测量直流电阻	195
技能训练 8 电动机装配	196
技能训练 9 绕组耐压试验	197
技能训练 10 电动机绕组故障的检修	198
技能训练 11 电动机定子绕组更换	200
拓展提高	202
任务小结	205
思考与练习	205

◎ 附录

206

附录 1 理实一体教学任务单	206
附录 2 电机与拖动实验的基本要求和安全操作规程	208

◎ 参考文献

211

任务1

直流电机认知与运行控制

知识要点

- 磁路中的基本概念
- 磁路的基本定律
- 铁芯线圈与电磁铁
- 直流电动机的工作原理
- 直流电机的分类与结构
- 直流电机的换向
- 直流电动机的机械特性
- 直流电动机的启动
- 直流电动机的反转
- 直流电动机的制动
- 直流电动机的调速

技能目标

- 能正确使用工具完成直流电动机拆卸与安装
- 能正确运用电器元件和导线及工具，完成直流电动机控制的接线，并试运行正常

关联知识 1 磁路

1.1.1 磁路中的基本概念

1.1.1.1 磁路

在通电螺线管内腔的中部，电流产生的磁力线平行于螺线管的轴线，磁场线渐进螺线管两端时变成散开的曲线，曲线在螺线管外部空间相接。如果将一根长铁芯插入通电螺线管中，并且让铁芯闭合，则泄漏到空间的磁力线很少。用永磁铁作磁源，也产生上述现象。

图 1-1 (a) 给出了永磁体单独存在时的情况，图 1-1 (b) 将永磁体放入软磁体回路的

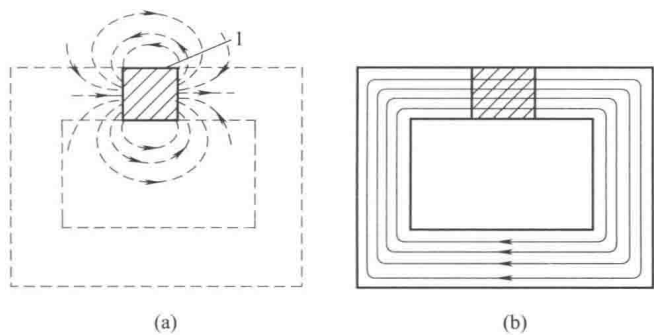


图 1-1 等效磁路

间隙中，大部分磁力线通过软磁体和永磁体构成的回路。图中磁力线密度表示磁通量的密度。广义地讲，磁通量所通过的磁介质的路径叫磁路。大多数磁路含有磁性材料和工作气隙，完全由磁性材料构成的闭合磁路的情况也有不少。

1.1.1.2 主磁通和漏磁通

在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，有一个面积为 S 且与磁场方向垂直的平面，磁感应强度 B 与面积 S 的乘积，叫做穿过这个平面的磁通量，简称磁通 (Flux)，符号 Φ ， $\Phi = BS$ ，磁通 Φ 的单位：韦伯 (Wb)， $1\text{Wb}=1\text{T}\times\text{m}^2$ 。

如图 1-2 所示，当线圈中通以电流后，大部分磁力线沿铁芯、衔铁和工作气隙构成回路，这部分磁通称为主磁通；还有一部分磁通，没有经过气隙和衔铁，而是经空气自成回路，这部分磁通称为漏磁通。

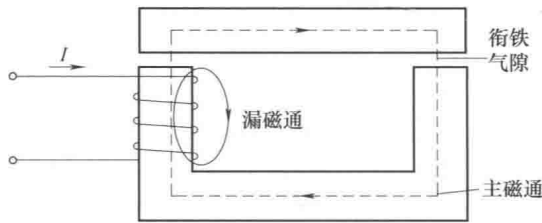


图 1-2 主磁通和漏磁通

1.1.1.3 磁感应强度、磁导率与磁场强度

磁感应强度是描述磁场强弱和方向的物理量，是矢量，常用符号 B 表示，国际通用单位为特斯拉 (T)， $1\text{T}=1\text{Wb}/\text{m}^2$ 。磁感应强度也被称为磁通量密度或磁通密度。在物理学中磁场的强弱使用磁感应强度来表示，磁感应强度越大，表示磁感应越强；磁感应强度越小，表示磁感应越弱。

磁导率是表征磁介质磁性的物理量，表示在空间或在磁芯空间中的线圈流过电流后产生磁通的阻力，或者是其在磁场中导通磁力线的能力，磁导率 μ 的单位：亨/米 (H/m)。其公式 $\mu=B/H$ ，其中 H 为磁场强度， B 为磁感应强度。

磁场强度是描写磁场性质的物理量。用 H 表示，磁场强度 H 的单位：安培/米 (A/m)。其定义式为 $H=B/\mu_0-M$ ，式中 B 是磁感应强度， M 是磁化强度， μ_0 是真空中磁导率， $\mu_0=4\pi\times10^{-7}\text{Wb}/(\text{m}\cdot\text{A})$ 。

1.1.1.4 磁动势

通电线圈产生的磁通 Φ 与线圈的匝数 N 和线圈中所通过的电流 I 的乘积成正比。把通

过线圈的电流 I 与线圈匝数 N 的乘积,称为磁动势,也叫磁通势,即

$$F = NI \quad (1-1)$$

磁动势 F 的单位是安培 (A)。

1.1.1.5 磁阻

磁阻就是磁通通过磁路时所受到的阻碍作用,用 R_m 表示。磁路中磁阻的大小与磁路的长度 L 成正比,与磁路的横截面积 S 成反比,并与组成磁路的材料性质有关。因此有

$$R_m = \frac{L}{\mu S} \quad (1-2)$$

式中, μ 为磁导率,单位为 H/m; 长度 L 和截面积 S 的单位分别为 m 和 m^2 。因此,磁阻 R_m 的单位为 1/亨 (H^{-1})。由于磁导率 μ 不是常数,所以 R_m 也不是常数。

1.1.1.6 铁磁物质磁化特性

铁磁物质包括铁、镍、钴等以及它们的合金。将这些材料放入磁场后,磁场会显著增强。铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性,此现象称为铁磁物质的磁化。铁磁物质能被磁化,是因为在它内部存在着许多很小的被称为磁畴的天然磁化区。在图 1-3 中磁畴用一些小磁铁来示意地标出。在铁磁物质未放入磁场之前,这些磁畴杂乱无章地排列着,其磁效应互相抵消,对外部不呈现磁性 [图 1-3 (a)]。一旦将铁磁物质放入磁场,在外磁场的作用下,磁畴的轴线将趋于一致 [图 1-3 (b)],由此形成一个附加磁场,叠加在外磁场上,使合成磁场大为增强。由于磁畴所产生的附加磁场将比非铁磁物质在同一磁场强度下所激励的磁场强得多,所以铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 要比非铁磁材料大得多。

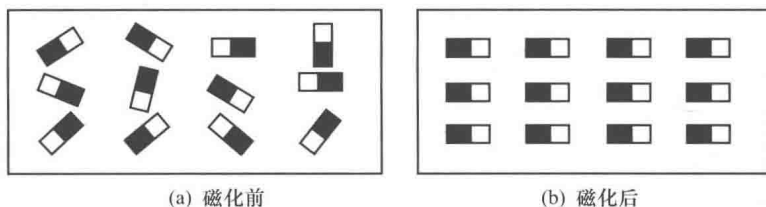


图 1-3 磁畴

高导磁性、磁饱和性和磁滞性是铁磁性材料的三大主要性能。

高导磁性即其相对磁导率 μ_r 很大,且随磁场强度 H 的不同而变化。利用优质的磁性材料可以实现励磁电流小、磁通足够大的目的,可以使同一容量的电机设备的重量和体积大大减小。

磁饱和性即磁性材料的磁化磁场 B (或 Φ) 随着外磁场 H (或 I) 的增强,并非无限地增强,而是当全部磁畴的磁场方向都转向与外磁场一致时,磁感应强度 B 不再增大,达到饱和值。亦即铁磁性材料的磁化曲线是非线性的,如图 1-4 所示。为了尽可能大地获得强磁场,一般电机铁芯的磁感应强度常设计在曲线的 $a \sim b$ 段。

磁滞性则主要表现在当磁化电流为交变电流使磁性材料被反复磁化时,磁化曲线为封闭曲线,称为磁滞回线。如图 1-5 所示,回线具有对称性, B_m 为饱和磁感应强度,当磁化电流减小使 H 为 0 时, B 的变化滞后于 H , 有剩磁 B_r 。为消除剩磁,须加反向磁场 H_c , 称为矫顽磁力。产生磁滞现象的原因是铁磁材料中磁分子在磁化过程中彼此具有摩擦力而互相牵制,由此引起的损耗叫磁滞损耗。

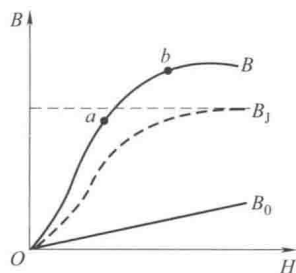


图 1-4 磁性材料的磁化曲线

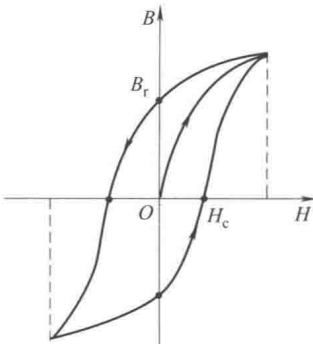


图 1-5 铁磁材料的磁滞回线

B_j —磁场内磁性物质的磁化磁场磁感应强度曲线；

B_0 —磁场内不存在磁性物质时的感应强度直线；

B — B_j 曲线和 B_0 直线的纵坐标相加即磁场的 B - H 磁化曲线

B_r —剩磁感应强度（剩磁），线圈中电流减小到零

（ $H=0$ ）时，铁芯中的磁感应强度；

H_c —矫顽磁力，使 $B=0$ 所需的 H 值

不同的铁磁性材料，其磁滞回线的面积不同，由此将铁磁材料分为三类：

第一类是软磁性材料，其回线呈细长条形， B_r 小， H_c 也小，磁导率高，易磁化也易退磁，常用作交流电器的铁芯，如硅钢片、坡莫合金、铸钢、铸铁、软磁铁氧体等；

第二类是硬磁性材料，回线呈阔叶形状， B_r 较大， H_c 也较大，常在扬声器、传感器、微电机及仪表中使用，是人造永久磁铁的主要材料，如钨钢、钴钢等；

还有一种回线呈矩形形状的铁磁材料， B_r 大，但 H_c 小，称为矩磁性材料，可以在电子计算机存储器中用作磁芯等记忆性元件。常见的铁磁性材料见表 1-1。

表 1-1 常用铁磁性材料

材料 \ 类别	$\mu_{\max}/(\text{H}/\text{m})$	B_r/T	$H_c/(\text{A}/\text{m})$
铸铁	200	0.475~0.500	800~1040
硅钢片	8000~10000	0.800~1.200	32~64
坡莫合金	20000~2000000	1.100~1.400	4~24
碳钢		0.800~1.100	2400~3200
铁镍铝钴合金		1.100~1.350	40000~52000

铁磁性物质被磁化的性能，广泛应用于电子和电气设备中，如变压器、继电器、电机等。在电机和变压器里，常把线圈套装在铁芯上。当线圈内通有电流时，在线圈周围的空间（包括铁芯内、外）就会形成磁场。由于铁芯的导磁性能比空气要好得多，所以绝大部分磁通将在铁芯内通过，并在能量传递或转换过程中起耦合场的作用。

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（或称激磁电流）。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；普通直流电机的磁路就属于这一类。若励磁电流为交流，磁路中的磁通随时间交变变化，这种磁路称为交流磁路；交流铁芯线圈、变压器和感应电机的磁路都属于这一类。

1.1.2 磁路的基本定律

1.1.2.1 安培环路定理

在磁路中沿任一闭合路径 l ，磁场强度 H 的线积分等于该闭合回路所包围的总电

流，即：

$$\oint_l H \mathrm{d}l = \sum i \tag{1-3}$$

电流的参数方向与闭合路径方向符合右手螺旋关系取正号，反之为负。

若沿长度 l ，磁场强度 H 处处相等，且闭合回路所包围的总电流是由通有电流 i 的 N 匝线圈提供，则上式可写成：

$$Hl = Ni \tag{1-4}$$

1.1.2.2 磁路的欧姆定律

若铁芯上绕有通有电流 i 的 N 匝线圈，铁芯的截面积为 A ，磁路的平均长度为 l ，材料的导磁率为 μ ，不计漏磁通，且各截面上的磁通密度为平均并垂直于各截面，则：

$$\Phi = \int B \mathrm{d}A = BA \tag{1-5}$$

因为 $Ni = Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{\Phi}{A\mu}l$ (1-6)

所以 $\Phi = \frac{Ni}{l/A\mu} = \frac{F}{R_m}$ (1-7)

得 $F = \Phi R_m \quad R_m = l/\mu A$

上式 $F = \Phi R_m$ 称为磁路的欧姆定律，与电路欧姆定律形式上相似。图 1-6 是相对应的两种电路和磁路。 R_m 与电阻 R 对应，两者的计算公式相似，但铁磁材料的磁导率 μ 不是常数，所以 R_m 不是常数。表 1-2 列出了电路和磁路对应的物理量及其关系式。

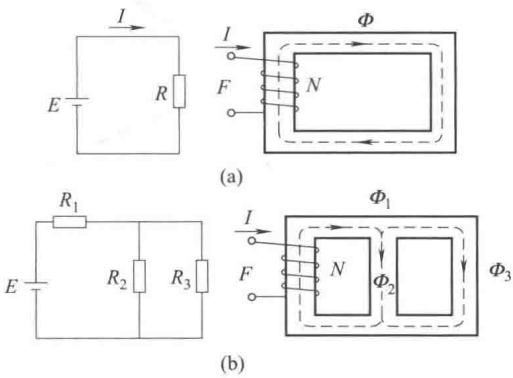


图 1-6 对应的电路和磁路

表 1-2 磁路和电路中对应的物理量及其关系式

电路	磁路	电路	磁路
电动势 E	磁动势 $F_m = Ni$	电压降 IR_i	磁压降 $H_i l_i = \Phi \frac{l_i}{\mu_i S_i}$
电流 I	磁通量 Φ	欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$	欧姆定律 $\Phi = \frac{F_m}{R_m}$
电导率 σ_i	磁导率 μ_i	基尔霍夫第一定律 $\sum I = 0$	基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$

1.1.2.3 磁路的基尔霍夫第一定律

对于有分支磁路，任意取一闭合面 A ，由磁通连续性的原则，穿过闭合面的磁通的代数和应为零，即：

$$\sum \Phi = 0 \tag{1-8}$$

1.1.2.4 磁路的基尔霍夫第二定律

沿任何闭合磁路的总磁动势 $\sum Ni$ 恒等于各段磁压降的代数和，即：

$$\sum Ni = \sum_{k=1}^n H_k l_k \tag{1-9}$$

1.1.3 铁芯线圈与电磁铁

1.1.3.1 铁芯线圈的电磁关系

铁芯线圈的电磁关系有两种：一种是用直流来励磁；另一种是用交流励磁。直流励磁的铁芯线圈，磁通恒定、电流 I 的大小只与线圈电阻 R 有关，功率损耗也只有 $I^2 R$ ，即所谓铜损。而交流铁芯线圈的功率损耗，除铜损 $\Delta P_{Cu} = I^2 R$ 外，还有铁芯被反复磁化而产生的所谓铁损 ΔP_{Fe} ，铁损是由磁滞性和铁芯中涡流产生的。交流铁芯线圈也是变压器与交流电机的基础。

如图 1-2 所示的交流铁芯线圈，其磁动势 Ni 产生的磁通大部分通过铁芯闭合，还有一小部分通过空气而闭合，前者称为主磁通或工作磁通 Φ ，后者称为漏磁通 Φ_σ ，这两个磁通都要在线圈中产生感应电动势，即主磁电动势 e 和漏磁电动势 e_σ ，其电磁关系可表示如下：

$$\begin{aligned} v \rightarrow i(Ni) & \begin{cases} \Phi \rightarrow e = -N \frac{d\Phi}{dt} \\ \Phi_\sigma \rightarrow e_\sigma = -N \frac{d\Phi_\sigma}{dt} = -L_\sigma \frac{di}{dt} \end{cases} \end{aligned}$$

其中， $L_\sigma = N\Phi_\sigma/i$ 是常数，叫漏电感。

而主磁通 Φ 全部通过铁芯， Φ 与 i 不存在线性关系，故其 L 不是常数。下面定量研究其电磁关系。

设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，则 $i = I_m \sin(\omega t + \alpha)$ ，其中 $\alpha > 0$ ，主要是由铁芯的磁滞性所致。则：

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N\omega\Phi_m \cos \omega t = 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-10)$$

式中， $E_m = 2\pi f N \Phi_m$ 。

其有效值：

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_m = 4.44 f N \Phi_m \quad (1-11)$$

考虑其相位关系，还可为

$$\dot{E} = -j4.44 f N \dot{\Phi}_m \quad (1-12)$$

$$\begin{aligned} e_\sigma &= -L_\sigma \frac{di}{dt} = -I_m \omega L_\sigma \cos(\omega t + \alpha) = I_m \omega L_\sigma \sin(\omega t + \alpha - 90^\circ) \\ &= E_{\sigma m} \sin(\omega t + \alpha - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-13)$$

其中， $E_{\sigma m} = I_m \omega L_\sigma$ ，定义 $\omega L_\sigma = X_\sigma$ ，称为漏感抗，并考虑其相位关系，可有：

$$\dot{E}_\sigma = -j \dot{I} X_\sigma \quad (1-14)$$

考察交流铁芯线圈的电路关系，由 KVL 可得：

$$\dot{V} = \dot{I} R - \dot{E} - \dot{E}_\sigma \quad (1-15)$$

代入式 (1-14) 可有

$$\dot{V} = \dot{I} (R + jX_\sigma) - \dot{E} \quad (1-16)$$

通常，线圈内阻 R 和漏感抗 X_σ 都很小，与 E 比较可忽略不计，则：

$$\dot{V} \approx -\dot{E} = j4.44 f N \dot{\Phi}_m \quad (1-17)$$

1.1.3.2 铁芯损耗

(1) 磁滞损耗

铁磁材料置于交变磁场中时,材料被反复交变磁化。与此同时,磁畴相互间不停地摩擦,消耗能量,造成损耗,这种损耗称为磁滞损耗。

实验证明,磁滞回线的面积与 B_m 的 n 次方成正比,故磁滞损耗亦可改写成

$$p_h = C_h f B_m^n V \quad (1-18)$$

式中, C_h 为磁滞损耗系数,其大小取决于材料性质;对一般电工钢片, $n = 1.6 \sim 2.3$ 。由于硅钢片磁滞回线的面积较小,故电机和变压器的铁芯常用硅钢片叠成。

(2) 涡流损耗

因为铁芯是导电的,故当通过铁芯的磁通随时间变化时,根据电磁感应定律,铁芯中将产生感应电动势,并引起环流。这些环流在铁芯内部围绕磁通作旋涡状流动,称为涡流。涡流在铁芯中引起的损耗,称为涡流损耗。经推导可知,涡流损耗 p_e 为

$$p_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V \quad (1-19)$$

式中, C_e 为涡流损耗系数,其大小取决于材料的电阻率; Δ 为钢片厚度。为减小涡流损耗,电机和变压器的铁芯都用含硅量较高的薄硅钢片 ($0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$) 叠成。铁芯中磁滞损耗和涡流损耗之和,称为铁芯损耗,用 p_{Fe} 表示,即

$$\Delta p_{Fe} = p_h + p_e = (C_h f B_m^n + C_e \Delta^2 f^2 B_m^2) V \quad (1-20)$$

对于一般的电工钢片,在正常的工作磁通密度范围内 ($1 \text{ T} < B_m < 1.8 \text{ T}$),式 (1-20) 可近似地写成

$$P_{Fe} = C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \quad (1-21)$$

式中, C_{Fe} 为铁芯的损耗系数; G 为铁芯重量。式 (1-21) 表明,铁芯损耗与频率的 1.3 次方、磁通密度的平方和铁芯重量成正比。

单位体积中的磁滞损耗正比于磁滞回线的面积。它将引起铁芯发热,故交流电器的铁芯常采用软磁性材料。硅钢便是回线面积狭小的磁性材料 (见图 1-7),为交流电机与变压器常用的铁芯材料。

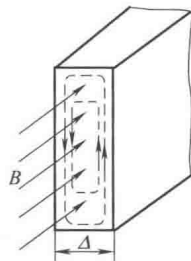


图 1-7 硅钢片中的涡流

涡流损耗是由交变电流在铁芯内产生的感应电流而引起的铁芯发热,涡流损耗的大小,不仅与单片铁芯的截面大小有关,而且与铁芯材料的电阻率、交变电流的频率有关,为了减小涡流损耗,在顺磁场方向上的铁芯采用彼此绝缘的薄叠形式,为增大铁芯电阻率,常在钢片中加入半导体材料 (如硅、硒等)。

当然,涡流也可以利用,如感应加热装置、高频冶炼炉等便是利用涡流的热效应来实现的。

综上所述,交流铁芯线圈的有功功率 (功率损耗) 为

$$P = UI \cos \alpha = I^2 R_{Cu} + \Delta P_{Fe}$$

其中, ΔP_{Fe} 的大小与铁芯中磁感应强度 B_m 的平方成正比,故 B_m 的选择不宜过大。 R_{Cu} 即线圈内阻,也可将铁损等效为一个电阻 R_{Fe} ,其值为 $R_{Fe} = \Delta P_{Fe} / I^2$,这样,铁芯线圈等效电阻便为: $R = R_{Cu} + R_{Fe}$ 。

(3) 电磁铁

利用铁芯线圈通电吸合衔铁或其他零件、断电便释放的一类电磁装置,是交、直流铁芯

线圈最简单的应用。如电磁起重机、电磁吸盘、电磁式离合器、电磁继电器和接触器等，此类装置主要包括铁芯、线圈及衔铁三部分，结构形式通常有图 1-8 所示的几种。

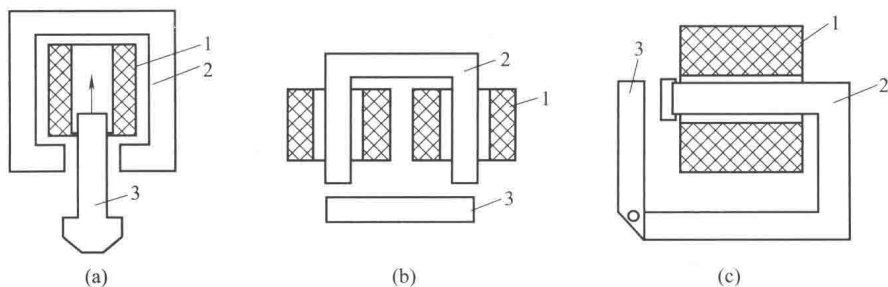


图 1-8 电磁铁的几种形式

1—线圈；2—铁芯；3—衔铁

此类装置的主要参数之一是它的吸力，吸力的大小与气隙的截面积 S_0 及气隙中磁感应强度 B_0 的平方成正比。

在交流电磁铁中，为了减小铁损，它的铁芯是由钢片叠成。而在直流电磁铁中，铁芯是用整块软钢制成的。交直流电磁铁除上述不同之处外，它们在吸合过程中电流和吸力的变化情况也是不一样的。

在直流电磁铁中，励磁电流仅与线圈电阻有关，不因气隙的大小而变。但在交流电磁铁的吸合过程中，线圈中电流（有效值）变化很大。因为其中电流不仅与线圈电阻有关，还与线圈感抗有关。在吸合过程中，随着气隙的减小，磁阻减小，线圈的电感增大，因而电流逐渐减小。因此，如果由于某种机械障碍，衔铁或机械可动部分被卡住，通电后衔铁吸合不上，线圈中就流过较大电流而使线圈严重发热，甚至烧毁。

关联知识 2 直流电机的结构与原理

直流电机是指能将直流电能转换成机械能（直流电动机）或将机械能转换成直流电能（直流发电机）的旋转电机，是能够实现直流电能和机械能互相转换的电机。

1.2.1 直流电机的工作原理

1.2.1.1 直流电动机的工作原理

直流电动机工作原理是基于安培定律。根据实验可知，磁场 B 与有效长度为 L 的载流导体相互垂直，且导体中通以电流 I ，作用在该导体上的电磁力 F 为：

$$F = BIL$$

图 1-9 是一台直流电动机的最简单模型。N 和 S 是一对固定的磁极，可以是电磁铁，也可以是永久磁铁。磁极之间有一个可以转动的铁质圆柱体，称为电枢铁芯。铁芯表面固定一个用绝缘导体构成的电枢线圈 $abcd$ ，线圈的两端分别接到相互绝缘的两个半圆形铜片（换向片）上，它们组合在一起称为换向器，在每个半圆铜片上又分别放置一个固定不动而与之滑动接触的电刷 A 和 B，线圈 $abcd$ 通过换向器和电刷接通外电路。

直流电动机将外部直流电源加于电刷 A（正极）和 B（负极）上，则线圈 $abcd$ 中流过电流，在导体 ab 中，电流由 a 指向 b ，在导体 cd 中，电流由 c 指向 d 。导体 ab 和 cd 分别处