

· 普通高等院校专业基础教材 ·

电机与拖动基础 DIANJI YU TUODONG JICHU

胡晓朋 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校专业基础教材

电机与拖动基础

胡晓朋 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是普通高等教育自动化专业新编专业基础教材,其内容除原有电力拖动系统动力学、直流电机原理、直流电机拖动、变压器原理、交流电机磁场、异步及同步交流电机原理和拖动内容外,为满足实际需要,增加了交流电机矢量控制及步进电机内容。为了减少学生的学习负担,本书在增设以上内容时,对传统教材部分内容进行了适当的压缩和简化。

本书除适合普通高校自动化专业外,也可作为普通高校机械电子工程及非电机相关专业的专业基础教材;对相关专业工程技术人员也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础 / 胡晓朋主编. —北京:国防工业出版社, 2007.7

普通高等院校专业基础教材
ISBN 978-7-118-05130-8

I. 电... II. 胡... III. ①电机—高等学校—教材②电力
传动—高等学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 056274 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

•

开本 787×1092 1/16 印张 15 字数 374 千字

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书是普通高等院校工业自动化、机电一体化等本科学生专业基础教材,也可作为其它相关专业的教学参考用书。内容分为四大部分:第一部分为拖动系统动力学,包括拖动系统构成、驱动器机械特性、负载特性等效计算以及过渡过程等内容;第二部分为直流电机,包括直流电机结构、工作原理、等效电路及拖动等内容,其中直流电机的拖动为该部分重点;第三部分为变压器,重点介绍了变压器的等效电路及其应用;第四部分为交流电机,该部分重点介绍了交流电机磁场、异步及同步电机原理及等效电路等内容。为了满足实际需要,简单介绍了交流电机矢量控制及步进电机等内容。

本书力求基本概念突出、内容新颖简化、理论与实际需求结合。与同类教材相比,取消了部分仅电机专业所需的术语及内容,并依据当前学生的能力减轻了某些习题难度。在精简原教材内容的同时,为了满足学生未来工作和学习的需要,强化了步进电机教学,增加了交流电机矢量控制内容。实践证明,该课程内容经改动后更符合上述专业学生的需求。由于目前市面销售的参考书和习题集多与传统教材一致,考虑到部分教师及学生需要,本书保留了传统教材及习题的重点内容,教师在授课和留作业时,可根据需要删除部分内容。希望本书能成为电力拖动知识领域的入门导论和参考资料。

本书由中国工程院钱清泉院士、深圳大学徐刚教授主审,由深圳大学胡晓朋主编。本书在编写过程中得到钱清泉院士的热情指导及国防工业出版社的大力支持,编者在此谨表谢意。

限于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者
2007年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 教材内容及课程性质	1
1.2 本课程常用的电学概念和定律	2
1.3 特殊磁性材料	7
小结	12
第2章 拖动系统动力学	13
2.1 拖动系统运动方程	13
2.2 拖动系统负载类型及等效负载计算	18
2.3 拖动系统综合计算	24
小结	30
习题	31
第3章 直流电机原理	34
3.1 直流电机结构及额定值	34
3.2 直流电机磁路	37
3.3 直流电机等效电路与电磁转矩	43
3.4 直流电机机械特性	48
小结	51
习题	51
第4章 他励直流电机拖动运行	53
4.1 他励直流电机的启动和工作	53
4.2 他励直流电机调速	58
4.3 他励直流电机制动	65
4.4 他励直流电机过渡过程	72
小结	82
习题	82
第5章 变压器原理	85
5.1 变压器的结构分类及额定值	85

5.2	变压器的磁路与等效电路	88
5.3	变压器的运行特性	95
	小结	104
	习题	104
第6章	交流电机定子磁场	107
6.1	交流电机定子绕组的构成及接线	107
6.2	单相交流电机定子磁通势	112
6.3	三相交流电机定子电动势	118
6.4	二相交流电机定子磁通势及电动势	120
	小结	122
	习题	123
第7章	同步电机原理	125
7.1	同步电机额定值及转子结构分类	125
7.2	同步电机的磁场及定子绕组感应电动势	126
7.3	同步电机的功率关系与矩角特性	128
7.4	同步电机的功率因数调节	130
	小结	132
	习题	132
第8章	异步电机原理	133
8.1	三相异步电机额定值及转子结构	133
8.2	三相异步电机转子磁势及工作原理	135
8.3	三相异步电机的向量图、转矩及机械特性	140
	小结	144
	习题	145
第9章	交流电机拖动运行	147
9.1	三相异步电机的机械特性	147
9.2	三相异步电机的启动、工作	154
9.3	三相异步电机的制动	162
9.4	三相异步电机的调速	172
9.5	电机热负荷计算	182
	小结	190
	习题	190
第10章	交流电机矢量控制	192
10.1	交流电机矢量控制理论基础	192

10.2	交流同步电机矢量控制简介	200
10.3	交流异步电机矢量控制简介	206
	小结	213
	习题	214
第 11 章	特种电机	215
11.1	交流磁阻式同步电机	215
11.2	步进电机	217
11.3	单相异步电机	222
11.4	旋转变压器和自整角机	227
	小结	232
	习题	233
参考文献		234

第1章 绪 论

1.1 教材内容及课程性质

电机与电力拖动是自动化专业及机电专业的重要技术基础理论课,是学好后续专业课程的重要前提。该课程是将电机学及电力拖动学结合成一门课程。现代大多数机动设备都采用电力拖动,而且伴随石油资源的短缺,这一趋势还将扩大。目前新的电机控制技术,尤其是中小型交流电机矢量控制技术已在生产及生活领域得到广泛应用。其应用范围大至电力机车、电动汽车,小至家庭电器、医疗电器、办公电器。为了适应我国目前机电行业的需要和目前生源的变化,本教材在传统教材基础上,作了比较大的修正,减少了部分复杂且陈旧的内容,增加了一些已被广泛使用的新概念、新方法及新技术。本教材改编的最终目的是希望本书能成为教师和学生有效入门参考书,而不是传统意义上的“教科书”。

1.1.1 教材内容

本教材主要有五部分内容:

(1) 电力系统拖动动力学原理 主要内容在第2章“拖动系统动力学”中。该章为本课程重点,其中的系统稳态方程、动态方程及负载计算属于学生应“掌握”内容。

(2) 直流电机原理及其电力拖动 主要内容在第3章“直流电机原理”及第4章“直流他励电机拖动运行”,其中第4章为本课程重点。第3章中的直流电机等效电路、他励直流电机参数定义,第4章中的直流电机机械特性、直流电机拖动稳态运行计算等,属于学生应“掌握”内容。

(3) 变压器原理 主要内容在第5章“变压器原理”中。第5章中的单相变压器原边侧等效电路、三相电源的线路连接属于学生应“掌握”内容。

(4) 交流电机原理及其电力拖动 主要内容在第6章“交流电机定子磁场”、第8章“异步电机原理”及第9章“交流电机拖动运行”中。其中第6章、第8章为本课程重点和难点。第6章中的三相交流基波旋转磁场、第8章中的三相异步电机等效电路、第9章中的三相异步电机简化机械特性等,属于学生应“掌握”内容。

(5) 特种电机及电机矢量控制原理介绍 主要内容在第10章“交流电机矢量控制”及第11章“特种电机”中。其中第10章属于学生应“理解”或“了解”的内容;第11章中的“步进电机”和“单相异步电机”基本性质,属于学生应“掌握”的内容。

第1章的内容主要为学生复习和补充学习本课程所需基础物理知识;第7章“同步电机原理”属于学生应“理解”的内容。

以上对课程内容的分类,不一定正确。正确的方法应根据学生的具体专业方向和实际知识水平,对部分课程内容有所舍弃,根据需要划分重点并对内容进行分类。

1.1.2 课程性质及教学方式

本课程是本科自动化专业的一门必修专业基础课,学不好该课程应掌握的内容会严重影

响后续课程学习,所以要求学生对应掌握的内容能灵活应用,做到举一反三。由于课时限制,教师授课时必须对课本部分内容做必要的删除;学生则应根据本人的具体情况,决定自学内容。

该教材的基本宗旨是:①列举出本课程应掌握的知识点;②列出相关的非重点知识点便于教师选择;③提供学生进一步深入学习的重要入门知识。希望本教材不再是传统意义的“教科书”,而成为学生手中的一本最有用的学习参考书。

1.2 本课程常用的电学概念和定律

1.2.1 磁场性质

1. 空间磁场特性

由普通物理学得知空间电流会产生磁场强度 H 。磁场强度与空间电流的关系满足全电流定理,表示为

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

空间中的任何磁力线都不相交,而且是闭合的;进入任意一个闭合体表面的磁力线数目,永远等于退出的磁力线数目。这就是磁通连续性定理,表示为

$$\oint_S B \cdot dS = 0 \quad (1-2)$$

式(1-1)和式(1-2)是分析磁场及磁性材料必须熟悉的基本知识。真空中,若某点的磁场强度为 H ,则意味该点的“磁密”或“磁感应强度”为

$$B_0 = \mu_0 H \quad (1-3)$$

式中 μ_0 为真空磁导系数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。本书采用 SI 国际单位,即 $[\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}]$ 制。非特殊说明,不再注明单位。多数磁性媒质满足 B 与 H 之间的线性关系,即

$$B = \mu H \quad (1-4)$$

式中 μ 为媒质材料的绝对磁导系数。

2. 磁力线分布规律

按空间磁能最大分布。由于空间磁能密度为

$$\frac{B \cdot H}{2} = \frac{\mu H^2}{2} \quad (1-5)$$

所以磁力线总是集中在 μ 值较大的媒质材料中。

3. “磁密”分布界面特性

若两种媒质的界面表面无电流流动(图 1-1),则界面两侧的 B 、 H 分量满足式(1-6):

$$\begin{cases} H_{t1} = H_{t2} \\ B_{n1} = B_{n2} \end{cases} \quad (1-6)$$

其中下脚标 1、2 为媒质代号;下脚标 t 、 n 分别代表界面切向分量和法向分量。式(1-6)可另写为

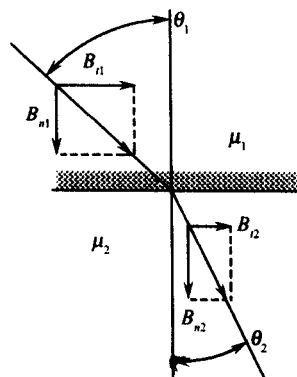


图 1-1 磁密分布界面特性

$$\begin{cases} \frac{B_{t1}}{\mu_1} = \frac{B_{t2}}{\mu_2} \\ B_{n1} = B_{n2} \end{cases} \quad (1-7)$$

由此可得

$$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (1-8)$$

由式(1-7)得知,若 $\mu_1 \gg \mu_2$,虽然磁媒质界面中的法向“磁密”分量可以向两方向自由传送,但切向“磁密”分量只能向媒质1传入,不能传出。所以媒质1内的磁力线密度不但大过媒质2,而且全都与界面平行分布。由式(1-8)得知,穿越界面的磁力线若在媒质2一侧,定与界面垂直。

1.2.2 磁路欧姆定理

1. 磁路定义

磁场中由若干磁力线构成的闭合管状圆环,被称为磁路。图1-2显示的是电机铁芯中的一个磁路。由图中可知,磁路通常由铁磁材料部件及空气隙构成。产生磁路的直接原因是由于空间存在与磁路交连的带电绕组。我们把与磁路交连的带电绕组叫磁势 F ,规定磁势的单位为 $A \cdot \text{匝}$ 。根据全电流定义,磁势和与其交连的磁路之间满足以下关系

$$F = iN = \sum_j H_j \cdot \Delta l_j \quad (1-9)$$

式中: N 为绕组匝数;下脚标 j 是该磁路的分段代号。

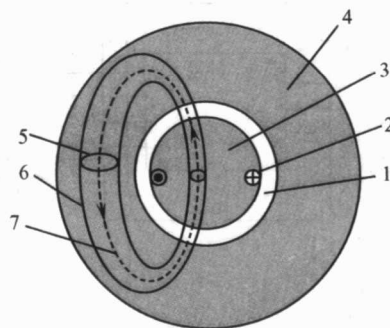


图1-2 电机铁芯中的一个磁路

1—空气隙;2—励磁电流;3—转子铁芯;4—定子铁芯;
5—磁路横截面;6—磁路外层磁力线;7—磁路中心线。

磁路中磁力线总根数称为该磁路的磁通 Φ ,显然磁路任一截面磁通都相等。表示空间某点磁力线密度的物理量叫磁感应强度,也叫磁密,即

$$B = \frac{d\Phi}{dS} = \mu H \quad (1-10)$$

式中: dS 是一个被 $d\Phi$ 穿透并与之垂直的微分截面; H 为磁场强度; μ 为材料绝对磁导率。显然磁密和磁场强度都是空间点函数矢量。磁路中某截面 S 若与所有磁力线垂直,则该磁路的平均磁密

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-11)$$

2. 磁路欧姆定律

根据式(1-9)的磁势定义,取积分渠道为磁路中心线,式(1-11)变为

$$\sum_j H_j \Delta L_j = \sum_j \frac{B_j}{\mu_j} \Delta L_j = \Phi \sum_j \frac{\Delta L_j}{\mu_j S_j} = Ni \quad (1-12)$$

定义磁路总磁阻 R_m 为磁路各路段磁阻 R_{mj} 之和,即

$$R_m = \sum_j R_j = \sum_j \frac{\Delta L_j}{\mu_j S_j} \quad (1-13)$$

对于通常遇到的磁路,总磁阻主要由铁磁材料磁阻及空气隙磁阻构成,即

$$R_m = R_{mFe} + R_{mA} \quad (1-14)$$

由于铁磁材料的绝对磁导率是空气的几千倍,所以常近似认为

$$R_m \approx R_{mA} \quad (1-15)$$

最后我们可以将常用磁路欧姆定律表示如下:

$$\Phi = \frac{Ni}{R_m} \approx \frac{Ni}{R_{mA}} \quad (1-16)$$

3. 带电绕组的磁路

现以单相变压器为例。带气隙的普通单相变压器的带电绕组及磁路,如图1-3所示。全系统由两个带电绕组及三个磁路构成。两个带电绕组分别为左、右两侧的1号及2号线圈,各有磁势 $N_1 i_1$ 及磁势 $N_2 i_2$ 。三个磁路的磁通分别叫1号绕组漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 、2号绕组漏磁通 $\Phi_{2\sigma}$ 、

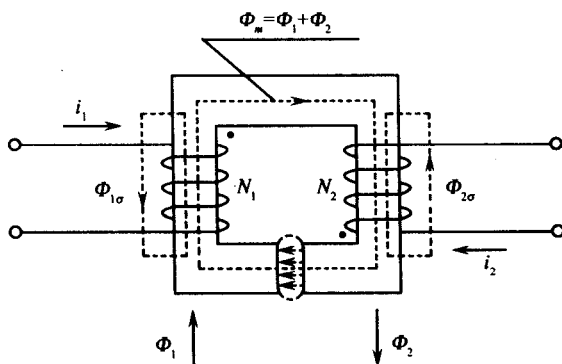


图1-3 单相变压器磁路

主磁通 Φ_m 。由图1-3得知,在该磁路里,主磁通磁力线一定要穿过1号、2号两个线圈,而漏磁通仅与一个绕组交连。另外漏磁磁路中气隙路段长,故磁阻 R_σ 比较大;而主磁路气隙通道比较短,故磁阻 R_m 比较小。利用磁路欧姆定律可得

$$\begin{cases} \Phi_{1\sigma} = \frac{N_1 i_1}{R_{1\sigma}} \\ \Phi_{2\sigma} = \frac{N_2 i_2}{R_{2\sigma}} \\ \Phi_m = \frac{N_1 i_1}{R_m} + \frac{N_2 i_2}{R_m} = \Phi_{1m} + \Phi_{2m} \end{cases} \quad (1-17)$$

式中: Φ_{1m} 为1号绕组主磁通; Φ_{2m} 为2号绕组主磁通。

对于1号绕组而言,过该绕组的磁链应该是

$$\Psi_1 = N_1 \Phi_{1\sigma} + N_1 \Phi_{1m} + N_1 \Phi_{2m} = \frac{N_1^2}{R_{1\sigma}} i_1 + \frac{N_1^2}{R_m} i_1 + \frac{N_1 N_2}{R_m} i_2 = L_{1\sigma} i_1 + L_{1m} i_1 + L_{12} i_2 \quad (1-18)$$

式中: $L_{1\sigma}$ 、 L_{1m} 、 L_{12} 分别为 1 号线圈漏感、1 号线圈主磁路自感、2 号对 1 号线圈的互感。同理,我们也可得到 2 号线圈漏感、2 号线圈主磁路自感、1 号对 2 号线圈的互感为

$$\begin{cases} L_{2\sigma} = \frac{N_2^2}{R_{2\sigma}} \\ L_{2m} = \frac{N_2^2}{R_m} \\ L_{21} = \frac{N_2^2}{R_m} \end{cases} \quad (1-19)$$

显然

$$L_{12} = L_{21} \quad (1-20)$$

1.2.3 载流导体在磁场中的安培力及感应电动势

1. 载流导体在磁场中的安培力

此安培力可用左手定则表示,如图 1-4 所示;用矢量公式可表示如下:

$$d\mathbf{f} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1-21)$$

若磁场和带电导体位置如图 1-4 所示,则载流导体受力为

$$f = Bli \quad (1-22)$$

2. 线圈的磁链

一个匝数为 N 的线圈如果与其交链的磁通为 Φ ,则该线圈的磁链被定义为

$$\Psi = N\Phi \quad (1-23)$$

3. 线圈的感应电动势

$$E = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (1-24)$$

4. 空间磁能密度

$$\frac{BH}{2} = \frac{\mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu} \quad (1-25)$$

5. 带电线圈 1 的总磁能

$$W_1 = W_{11} + W_{12} \quad (1-26)$$

其中 W_{11} 为自己电流产生的磁能, W_{12} 为外电流对线圈 1 产生的磁能。它们可分别表示为

$$\begin{cases} W_{11} = \frac{1}{2} \sum_j V_{1j} \cdot \frac{B_{1j}^2}{\mu_{1j}} = \frac{1}{2} \sum_j \frac{S_{1j} l_{1j}}{\mu_{1j}} \cdot \frac{N_1^2}{S_{1j}^2 R_{1j}^2} i_1^2 = \frac{L_1 i_1^2}{2} = \frac{\psi_{11} i_1}{2} \\ W_{12} = \psi_{12} i_1 = L_{12} i_2 i_1 \end{cases} \quad (1-27)$$

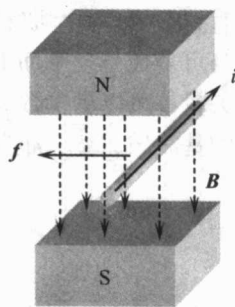


图 1-4 载流导体在磁场中受到的电磁力

6. 电机的电磁力矩

若带电线圈电流 i_1 保持不变,线圈受到外磁链作用后,其受到的总电磁力矩为

$$T_e = \frac{i_1^2 \partial L_1}{2 \partial \alpha_{1x}} + i_1 \frac{\partial \psi_{12}}{\partial \alpha_{1x}} \quad (1-28)$$

若 L_1 为常数,且外磁链方向与带电线圈轴向夹角为 α_{12} 时,外磁链在带电线圈中产生的磁链为

$$\psi_{12} = \frac{L_{12}}{L_2} \psi_2 \cos \alpha_{12} \quad (1-29)$$

则线圈将承受电磁力矩为

$$T_e = i_1 \frac{\partial \psi_{12}}{\partial \alpha_{1x}} = \frac{L_{12}}{L_2} i_1 \psi_2 \sin \alpha_{12} \quad (1-30)$$

1.2.4 电机气隙物理量的矢量和向量表达

1. 电机气隙物理量的复数矢量定义

电机的物理量,例如磁密 B 、磁场强度 H 等,其在电机气隙间的分布如果是电机轴向空间角的正弦或余弦函数,就称该物理量为电机的物理矢量。

有些电机物理矢量,其函数式中含有空间电角变量 α_{1x} ,有分布函数属性,则称其为分布函数矢量。例如电机气隙的磁密 B 及磁场强度 H 等。

有些物理矢量,其函数式中只含有空间电角常量,有点函数属性,则称其为点函数矢量。例如轴心位于 α_{1x0} 的带电线圈生成的磁势或穿过该线圈的磁通、磁链等。

因为电机的结构及物理属性具有沿电机转轴分布的一致性。所以,一个平面若与电机转轴垂直,则一极对电机气隙中的这些物理矢量可用该平面上的二维空间矢量来表达。因为复数本身可看成是复平面上的一个矢量,所以电机气隙物理矢量,不管是点函数矢量,还是分布函数矢量都可以用复数表达。例如轴线位于坐标 α_{1xA} 位置的带电线圈 A 中电流 i_A 以及由其生成的基波磁通 ϕ_{1A} 都应是 α_{1xA} 的点函数。所以二者均可用点函数复数矢量表达,被分别定义为

$$\begin{cases} i_A = i_A e^{j\alpha_{1xA}} \\ \phi_{1A} = \phi_{1A} e^{j\alpha_{1xA}} \end{cases} \quad (1-31)$$

又例如带电线圈 A 在电机气隙中生成的基波磁密 B 是一个与测量点空间电角变量 α_{1x} 以及带电线圈 A 的空间坐标 α_{1xA} 相关的物理量。所以 B 是分布函数复数矢量,可定义为

$$B = B_m e^{j\alpha_{1xA} - j\alpha_{1x}} \quad (1-32)$$

电机的部分气隙物理量采用复数矢量表达后,能为我们分析及计算电机力学及电学性能带来很大的方便。例如电机电磁力矩式(1-30)就可用复数表示为

$$T_e = \frac{L_{12}}{L_2} i_1 \times \psi_2 \quad (1-33)$$

2. 电机气隙物理量的复数向量定义

电机的部分气隙物理矢量,在复平面的位置是时间 t 的函数。例如交流电路理论中常用的电压、电流及磁通复数有效值矢量

$$\begin{cases} \dot{U} = U e^{j(\omega t + \alpha_{10})} \\ \dot{I} = I e^{j(\omega t + \alpha_{10})} \\ \dot{\Phi} = \Phi_m e^{j(\omega t + \alpha_{10})} \end{cases} \quad (1-34)$$

由于以上电压及电流矢量在复平面内不断转动,造成对其分析及比较时的不便。为解决这个问题,规定同步转动的复数矢量在复平面绘制时,可选择任一个矢量作为极坐标起始轴,进而绘制其余矢量。采用这种方式绘出的静止复数矢量图被称为复数向量图。

1.3 特殊磁性材料

在部分磁性材料中,由于构成这类磁性材料的分子电流与磁场之间有复杂的耦合作用, B 与 H 之间不再是简单的线性关系。它们可分为两大类,铁磁性材料和永磁性材料。

1.3.1 铁磁性材料性质

铁磁性材料的静态 $B-H$ 曲线如图 1-5(a) 所示。

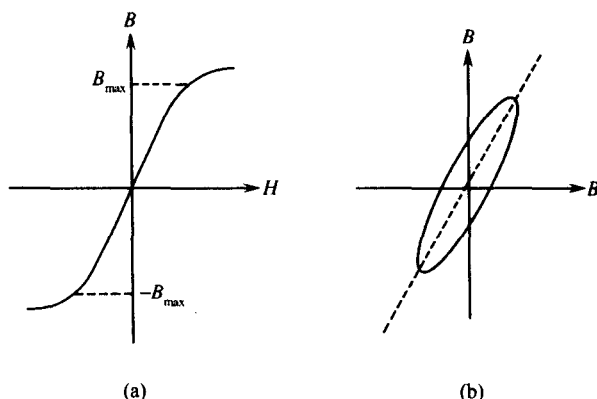


图 1-5 铁磁性材料磁化特性
(a) 静态 $B-H$ 关系; (b) 动态 $B-H$ 关系。

由图 1-5 中可以看出,铁磁性材料如果磁密值不超过磁密饱和点 $B_{\max}$,它基本上与磁场强度 H 呈线性关系,即

$$B = \mu_{Fe} H \quad (1-35)$$

式中: μ_{Fe} 为铁磁性材料的绝对磁导率。材料的绝对磁导率与真空磁导率之比被称作材料的相对磁导率。铁磁性材料的相对磁导率很大,为 2000 倍 ~ 6000 倍。

铁磁性材料虽然磁导率很大,但是它的电导率也很大。当磁场强度呈周期性变化时,材料本身会产生严重的涡流损耗及少量磁滞损耗。可以证明,若磁场强度为

$$H(t) = H_m \cos(\omega t) \quad (1-36)$$

则磁密为

$$B(t) = \mu H_m \cos(\omega t - \theta) \quad (1-37)$$

式中: μ 为材料磁导率; θ 为材料损耗角。图 1-5(b) 展示由式(1-37)计算出的铁磁性材料 $B-H$ 关系曲线,椭圆长轴的斜率为 μ 。

铁磁性物质包括铁、镍、钴以及它们的合金。常用的铁磁性材料有氧化硅钢片、纯铁及铸钢等,这些材料虽然磁导率高,但涡流损耗大,通常用于中低频设备。另一类材料为陶瓷软磁铁氧化体,它们的特点是涡流损耗小,但磁导率低,常用于脉冲变压器及高频电子原器件中。

1.3.2 永磁性材料性质

永磁性材料即便缓慢改变磁场强度 H , 其磁密 B 在磁场增强过程与减弱过程所对应的值并不相同, 细节见图 1-6(a)。永磁性材料这种滞后反应叫磁滞。磁滞是由于磁性材料内磁畴改变方向时, 需要消耗能量所致。通常我们把磁场增强过程的 $B-H$ 线段叫充磁曲线; 把磁场减弱过程画出的 $B-H$ 线段叫去磁曲线。去磁曲线与纵轴交点 B_r 值, 被称作永磁体剩磁。永磁体的最大剩磁是表征永磁体强弱的重要指标。去磁曲线与横轴交点 H_c 值, 被称作矫顽磁场强度。另外在 II 象限, 最大去磁曲线的 $(B \cdot H)_{\max}$ 值, 叫永磁性材料的最大磁能积。该值是表示永磁体磁场能量密度的重要指标, 它通常用凸出系数来表达, 其值为

$$\gamma = \frac{(B \cdot H)_{\max}}{B_r \cdot H_c} \quad (1-38)$$

B_r 、 H_c 和 $(BH)_{\max}$ 是永磁性材料最重要的三个参数, 它们的数值大小, 可以表达永磁性材料的好坏。

磁滞现象不但在磁场强度大幅度改变时发生, 即便在一个大循环过程中, 作局部小的磁场强度调整, 也会发生磁滞。在图 1-6(a) 中, 画出了两个局部磁滞回线。由于局部磁滞回线的中线近似直线, 而且回线包围面积很小, 所以可以用一段直线代替。图 1-6(b) 中的线段 K_1K_2 , 就是一个局部磁滞回线的中心线。通常我们称该线为去磁曲线 K_1 点的回复线, 回复线的斜率被称为回复系数, 表示如下:

$$\rho = \tan \beta \quad (1-39)$$

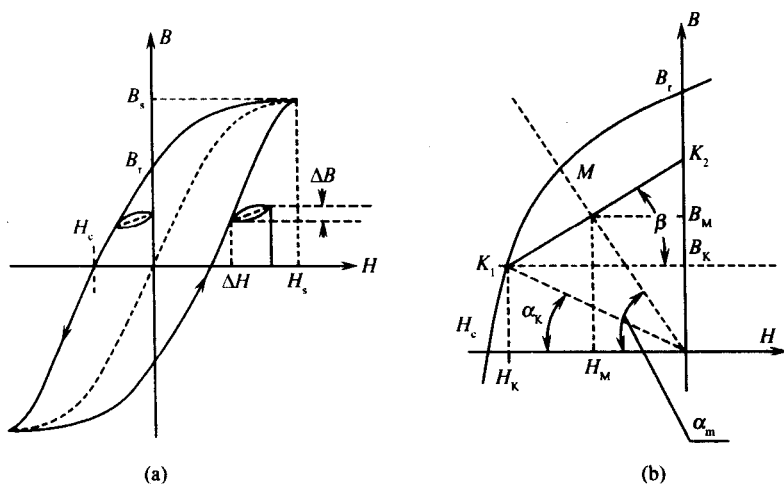


图 1-6 永磁性材料磁化特性
(a) 静态 $B-H$ 关系; (b) 永磁体工作特性。

要了解永磁体的工作特性, 必须首先了解永磁体的制备过程。永磁体的制备分三步, 如图 1-7 所示。

(1) 先将永磁体的最大工作气隙用磁性材料填满, 见图 1-7(a)。接着对磁路加电流充磁, 使磁体“磁密”达到允许最大值 B_s 。最后缓慢“去磁”, 当电流为零时, 磁体“磁密”应为最大“剩磁” B_r , 见图 1-6。此刻磁体内磁场强度应为零。

(2) 卸去最大气隙 δ_k 内的充填物, 见图 1-7(b)。此刻永磁体内的 B 、 H 值将沿最大去

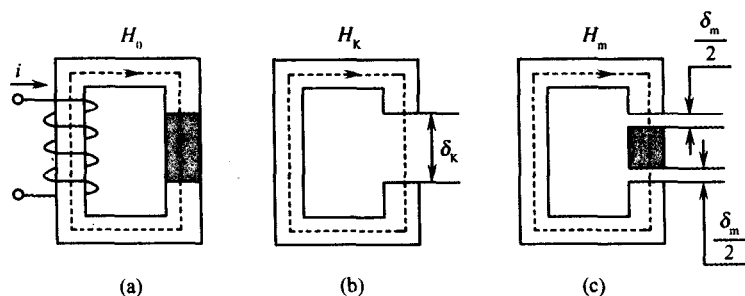


图 1-7 永磁体的制备过程

(a) 永磁体充磁; (b) 生成永磁体最大工作气隙; (c) 放入工作体。

磁曲线移动至 K_1 点, 变为 B_K 、 H_K , 见图 1-6(b)。依据磁通连续性定理和全电流定律, 若永磁体长 L_m 、气隙“磁密” B_{0K} 、气隙磁场强度 H_{0K} , 最大气隙工作点 $[B_K, H_K]$ 将满足如下关系:

$$\begin{cases} B_K = \eta B_{0K} \\ H_K = -\frac{H_{0K} \delta_K}{L_m} \\ \frac{B_{0K}}{H_{0K}} = \mu_0 \end{cases} \quad (1-40)$$

其中 η 为气隙边缘扩张系数, 为 $1 \sim 1.2$, 即

$$\frac{H_K}{B_K} = \text{arctan} \alpha_K = -\frac{\delta_K}{\mu_0 \eta L_m} \quad (1-41)$$

(3) 把长度为 L 、绝对磁导率为 μ 的工作体放入指定位置, 见图 1-7(c)。工作点 $[B, H]$ 将沿局部充磁曲线移动至 M 点, 变为 B_M 、 H_M , 见图 1-6(b)。用类似方法可得出机构正常工作点 $[B_M, H_M]$ 满足如下关系:

$$\frac{H_M}{B_M} = \text{arctan} \alpha_M = -\frac{\delta_M}{\mu_0 \eta L_m} - \frac{L_M}{\mu_0 L_m} \quad (1-42)$$

过 K 点的回复线可用直线表示为

$$B = B_K + (H - H_K) \cdot \rho \quad (1-43)$$

因为点 $[B_M, H_M]$ 在回复线上, 所以回复线也可以表示如下:

$$B = B_M + (H - H_M) \cdot \rho \quad (1-44)$$

容易证明; 回复线上永磁体内任意工作点的磁密与外磁路参数满足如下关系:

$$\frac{H}{B} = -\frac{\delta}{\mu_0 \eta L_m} - \frac{L}{\mu L_m} \quad (1-45)$$

如果机构使用过程中, 能保证永磁体内

$$B > B_K \quad (1-46)$$

则可以将永磁体作为恒定励磁电流源处理。在限定使用期间内, 不会明显出现去磁现象。若破坏以上条件, 永磁体的回复线会明显改变, 并产生退磁。

1.3.3 磁性材料的损耗对磁路的影响

如果不采取特殊措施铁磁性材料的损耗, 尤其是涡流损耗是相当严重的。铁磁性材料的实验表明, 其单位体积损耗的功率为

$$P_h \propto f B_m^\alpha \quad (1-47)$$

式中: f 为交变频率; B_m 为磁密幅值。若损耗全由涡流产生, 上脚标 α 应当取 2。平时为了简化计算, α 常取 2。

材料的涡流损耗常用以下电路模型计算, 见图 1-8(a)。图中绘有一个匝数为 N 、绕组电流为 i 的纯电感 L 。假如该电感为筒形螺管结构, 其内筒截面积为 S , 有效高度为 h , 该电感置于铁磁性材料之中。因为螺管形电感的磁力线集中在筒内, 所以材料损耗只需计算筒内部分。

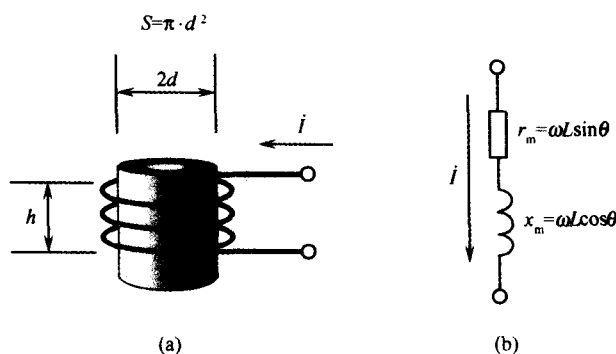


图 1-8 有铁损耗电感特性

(a) 电感模型; (b) 电感等效电路。

若该材料单位体积损耗功率为 $\gamma \omega B^2$, 其中 γ 是一个与材料电导率成比例的系数, 则电感筒内材料损耗总功率应为

$$P_m = V \cdot \gamma \omega B^2 = Sh \gamma \omega \left(\frac{NI\mu}{h} \right)^2 = \gamma \mu \cdot \omega \cdot \frac{N^2 \mu S}{h} \cdot I^2 = \gamma \mu \cdot \omega L \cdot I^2 \quad (1-48)$$

根据电磁材料损耗角 θ 定义, 纯电感置于损耗角为 θ 的电磁介质之中后, 其阻抗应为

$$Z_m = j\omega L \cdot e^{-j\theta} \quad (1-49)$$

当有效值为 I 的电流流过 Z_m 时, 其消耗的功率应为

$$P'_m = \omega L \sin \theta \cdot \left(\frac{U}{\omega L} \right)^2 = \sin \theta \cdot \omega L \cdot I^2 \quad (1-50)$$

对比式(1-48)和式(1-50), 可得

$$\gamma \mu = \sin \theta \quad (1-51)$$

所以铁磁介质中的电感等效电路如图 1-8(b)所示, 其等效阻抗应写为

$$\begin{cases} \dot{L} = \frac{N^2}{R_m} e^{-j\theta} \\ Z_m = j\omega \dot{L} = r_m + jx_m \end{cases} \quad (1-52)$$

1.3.4 永磁体的等效磁路

依照永磁体性质, 若确定工作点位于 $[B_m, H_m]$, 而外磁路可调磁阻为 R , 则永磁体机构的特性方程可写为

$$\begin{cases} B = B_m + \rho(H - H_m) \\ -\frac{HL_m}{\Phi} = R \end{cases} \quad (1-53)$$