



机电工程类专业“互联网+”创新型精品教材

电机与拖动

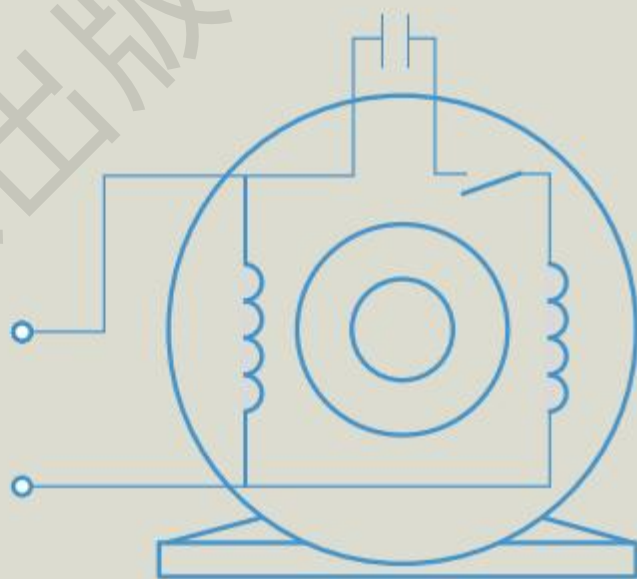
DIANJI YU TUODONG

主 编 宋 强

电机与拖动

主
编
宋
强

北京出版社



扫描二维码
共享立体资源

北京出版集团公司
北京出版社

北京出版集团公司
北 京 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动 / 宋强主编. —北京: 北京出版社,
2017.7 (2023 重印)
ISBN 978-7-200-13033-1

I. ①电… II. ①宋… III. ①电机—高等学校—教材
②电力传动—高等学校—教材 IV. ① TM3 ② TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 109345 号

电机与拖动

DIANJI YU TUODONG

主 编: 宋 强
出 版: 北京出版集团公司
北 京 出 版 社
地 址: 北京北三环中路 6 号
邮 编: 100120
网 址: www.bph.com.cn
总发行: 北京出版集团公司
经 销: 新华书店
印 刷: 定州市新华印刷有限公司
版 次: 2017 年 7 月第 1 版 2023 年 2 月修订 2023 年 2 月第 3 次印刷
开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16
印 张: 16
字 数: 273 千字
书 号: ISBN 978-7-200-13033-1
定 价: 35.00 元

质量监督电话: 010-82685218 010-58572162 010-58572393

目 录

1	绪论	
5	单元一 电机基本知识和定律	
5	1.1 磁路的基本知识	
6	1.2 磁场的基本知识	
8	1.3 电磁学的基本定律	
11	1.4 铁磁材料	
15	1.5 简单磁路及计算	
17	1.6 永磁材料的应用	
18	1.7 磁路计算 MATLAB 仿真	
23	小结	
24	思考与练习	
25	单元二 直流电机	
25	2.1 直流电机的结构及额定值	
30	2.2 直流电机的工作原理	
32	2.3 直流电机的基本理论	
35	2.4 直流电机的机电能量转换	
43	2.5 直流电机的换向	
45	2.6 直流电机的机械特性仿真	
48	小结	
48	思考与练习	
50	单元三 直流电动机的电力拖动	
50	3.1 电力拖动系统的运动方程式	
51	3.2 生产机械的负载机械特性	
53	3.3 他励电动机的机械特性	
57	3.4 他励直流电动机的启动	
59	3.5 他励直流电动机的过渡过程	
62	3.6 他励直流电动机的调速	
66	3.7 直流电动机的制动	
70	3.8 直流电动机启动仿真	
73	3.9 直流电动机制动仿真	
76	3.10 直流电动机调速仿真	
79	小结	
80	思考与练习	

82	单元四 变压器
82	4.1 变压器的结构及其工作原理
89	4.2 单相变压器的空载运行
96	4.3 单相变压器的负载运行
102	4.4 变压器的标么值
103	4.5 变压器的参数测定
106	4.6 变压器的运行特性
108	4.7 三相变压器
119	4.8 自耦变压器
121	4.9 仪用互感器
124	4.10 电焊变压器
125	4.11 三相变压器仿真的计算实例及结果分析
128	4.12 影响变压器励磁涌流的主要因素及结果分析
129	小结
130	思考与练习
132	单元五 异步电动机的基本结构和运行分析
132	5.1 异步电动机的基本结构、分类及铭牌
137	5.2 交流绕组
148	5.3 交流绕组的电势和磁势
151	5.4 三相异步电动机的工作原理及运行分析
157	5.5 基于 Simulink 的异步电动机模型
161	小结
161	思考与练习
163	单元六 三相异步电动机的电力拖动
163	6.1 三相异步电动机的机械特性
166	6.2 三相异步电动机的固有机械特性和人为机械特性
167	6.3 三相异步电动机的启动
170	6.4 转子串频敏变阻器启动
172	6.5 三相异步电动机的调速
177	6.6 三相异步电动机的制动
182	6.7 三相异步电动机仿真
191	小结
191	思考与练习
193	单元七 单相交流异步电动机
193	7.1 单相交流异步电动机的结构及应用
197	7.2 单相交流异步电动机的磁场

199	7.3 单相交流异步电动机的力矩特点
201	7.4 单相交流异步电动机的启动方法
205	小结
206	思考与练习
207	单元八 控制电机
207	8.1 伺服电动机
211	8.2 步进电动机
220	8.3 测速发电机
222	8.4 自整角机
225	8.5 旋转变压器
227	8.6 混合式步进电机的 Simulink 建模
230	小结
231	思考与练习
233	单元九 电动机容量的选择
233	9.1 电动机种类、电压、转速和结构形式的选择
236	9.2 电动机容量的选择
245	小结
246	思考与练习
247	参考文献

单元一 电机基本知识和定律

1.1 磁路的基本知识

电机是一种机电能量转换的装置，发电机将机械能转化为电能，电动机将电能转化为机械能，变压器是将一种电压的电能为另一种电压的电能为。无论是发电机、电动机还是变压器，其工作原理都是建立在电磁感应定律和电磁力定律基础上的。分析内部的电磁关系，则要经常使用磁场的基础知识、电路定律和铁磁材料的特性及损耗等基础知识。

1.1.1 电路与磁路

对于电路系统来说，在电动势 E 的作用下电流 I 从 E 的正极通过导体流向负极。构成一个完整的电路系统需要电动势和电导体，并可以形成电流。

在磁路系统中也有一个磁动势 F （类似于电路中的电势），在 F 的作用下产生一个 Φ （类似于电路中的电流），磁通 Φ 从磁动势的 N 极通过一个通路（类似于电路中的导体）到 S 极，这个通路就是磁路。由于铁磁材料磁导率比空气大几千倍，即空气磁阻比铁磁材料大几千倍，因而构成磁路的材料均使用磁导率高的铁磁材料。然而非铁磁物质如空气也能通过磁通，这就造成铁磁材料构成磁路的周围空气中也必然会有磁通 Φ_σ ，由于空气磁阻比铁磁材料大几千倍，因而 Φ_σ 比 Φ 小得多， Φ_σ 常常被称为漏磁通， Φ 被称为主磁通。因此，磁路问题比电路问题要复杂得多。

1.1.2 电机电器中的磁路

磁路系统广泛应用在电器设备之中，如变压器、电机、继电器等。并且在电机和某些电器的磁路中，一般还需要一段空气隙，或者说空气隙也是磁路的组成部分。

图 1-1 所示为电机电器的几种常用磁路结构。图 1-1（a）所示为普通变压器的磁路，它全部由铁磁材料组成；图 1-1（b）所示为电磁继电器磁路，它除了铁磁材料外，还有一段空气隙；图 1-1（c）所示为电机磁路，也由铁磁材料和空气隙组成。图 1-1（b）所示为无分支的串联磁路，由空气隙段和铁磁材料串联组成；图 1-1（a）是有分支的并联磁路。图中虚线表示磁通的路径。

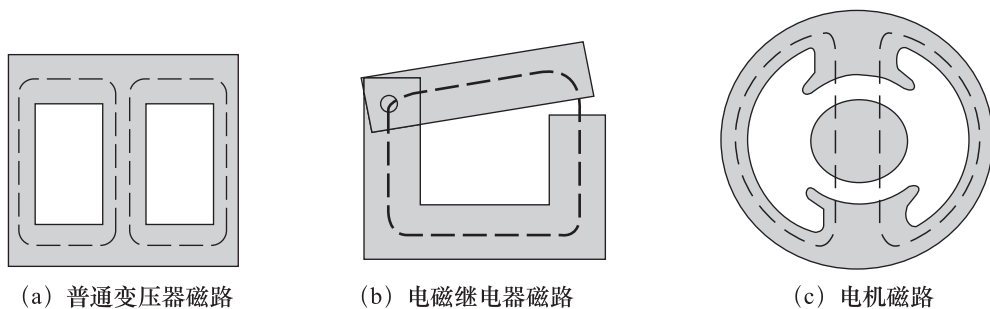


图 1-1 几种常用电器的典型磁路

1.1.3 电气设备中磁动势的产生

为了产生较强的磁场，在一般电气设备中都使用电流来产生磁场。电流产生磁场的方法是：把绕制好的 N 匝线圈套装在铁芯上，并在线圈内通入电流 i ，这样在铁芯和线圈周围的空间中就会形成磁场，其中大多数磁通通过铁芯，称为主磁通 Φ ；小部分磁通围绕线圈，称为漏磁通 Φ_σ ，如图 1-2 所示。套装在铁芯上用于产生磁通的 N 匝线圈称为励磁线圈，励磁线圈中的电流 i 称为励磁电流。若励磁电流为直流，磁路中的磁通是恒定的，不随时间变化，这种磁路称为直流磁路，直流电机的磁路属于这一类；若励磁电流为交流，磁路中的磁通是交变的，随时间变化，这种磁路称为交流磁路，交流电机、变压器的磁路属于这一类。

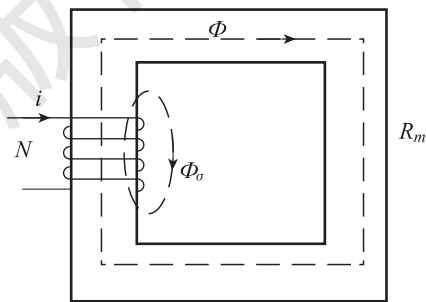


图 1-2 磁动势的产生和磁路欧姆定律

值得注意的是，除了用电流产生磁场外，在电机电器中还使用了大量的永久磁铁。而且随着科学技术的发展，永久磁铁的磁性将越来越强。可以预见，永久磁铁将在电机电器中得到广泛的应用。

1.2 磁场的基本知识

为了准确地描述磁场的大小、方向及其性质，便于分析、计算和设计磁路，常用如下物理量描述磁场。

1.2.1 磁感应强度（磁通密度） B

描述磁场强弱及方向的物理量称为磁感应强度 B 。为了形象地描绘磁场，往往采用磁感应线，常称为磁力线，磁力线是无头无尾的闭合曲线。图 1-3 中画出了直线电流及螺线管电流产生的磁力线。

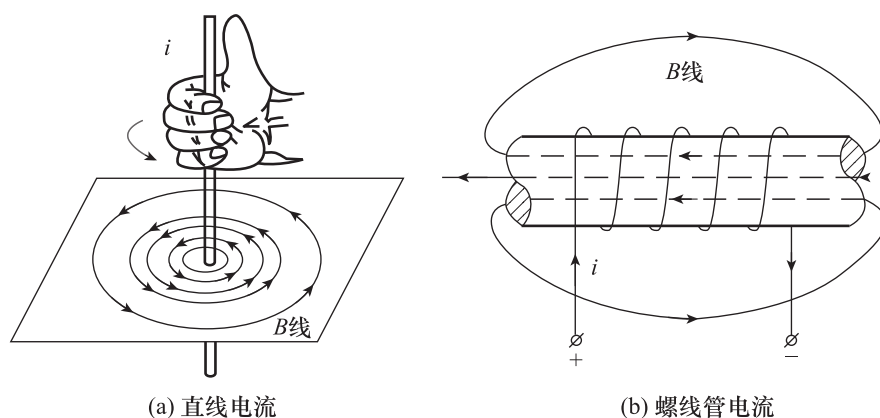


图 1-3 电流磁场中的磁力线

磁力线的方向与产生它的电流方向满足右手螺旋关系,如图 1-3 (a) 所示。

在国际单位制中,磁感应强度 B 的单位为特(特斯拉),单位符号为 T,即 $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ (韦伯/米²)。

1.2.2 磁通 Φ

穿过某一截面 S 的磁感应强度 B 的通量,即穿过截面 S 的磁力线根数称为磁感应通量,简称磁通,用 Φ 表示,即

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (1-1)$$

在均匀磁场中,如果截面 S 与 B 垂直,如图 1-4 所示,则上式变为

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-2)$$

式中, B 为磁通密度,简称磁密; S 为面积。

在国际单位制中, Φ 的单位名称为韦(韦伯),单位符号为 Wb。

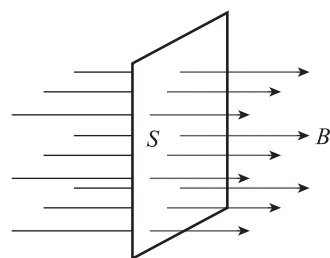


图 1-4 均匀磁场中的磁通

1.2.3 磁场强度 H

在计算导磁物质中的磁场时,引入辅助物理量磁场强度 H ,它与磁密 B 的关系为

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

式中, μ 为导磁物质的磁导率。真空的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。铁磁材料的 $\mu \gg \mu_0$,如铸钢的 μ 约为 μ_0 的 1 000 倍,各种硅钢片的 μ 约为 μ_0 的 6 000 ~ 7 000 倍。

在国际单位制中,磁场强度 H 的单位名称为安(安培)/米,单位符号为 A/m。

1.3 电磁学的基本定律

1.3.1 安培环路定律——描述电流产生磁场的规律

导体中有电流流过时，就会产生与该载流导体相交链的磁通。在磁场中，沿任意一个闭合磁回路的磁场强度线积分等于该回路所交链的所有电流的代数和，即

$$\oint_l H dl = \sum i \quad (1-4)$$

式中， $\sum i$ 就是该磁路所包围的全电流。因此，式 (1-4)

也称为全电流定律。

如图 1-5 所示，电流 i_1 、 i_2 、 i_3 产生的磁场，沿封闭曲线的磁场强度满足 $\oint_l H dl = i_1 + i_2 - i_3$ 。在图 1-5 中，磁力线（闭合回线）符合右手螺旋关系的电流取正号，反之取负号。

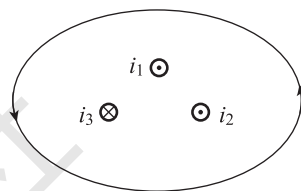


图 1-5 安培环路定律

1.3.2 电磁感应定律——描述磁场产生电势的规律

当导体处于变化的磁场（磁通）中时，导体中会产生感应电势，这就是电磁感应现象。这个感应电势的大小和磁通随时间的变化率的负值成正比，这就是电磁感应定律。例如，匝数为 N 的线圈所交链的磁通为 Φ ，当该磁通随时间发生变化时，线圈产生的感应电动势为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 为电磁感应定律的数学描述。在电机学中，电磁感应现象有两个方面。

一、变压器电动势

图 1-6 所示为变压器电动势产生原理。线圈 N_1 通入随时间而变的电流 i_1 ，这时由 i_1 所产生的磁通 Φ 也随时间而变，磁通 Φ 沿导磁材料闭合。这时线圈 N_1 和 N_2 同时交链磁通 Φ ，从而在线圈 N_1 和 N_2 中都会产生感应电动势 e_1 和 e_2 ，感应电动势的正方向如图 1-6 所示，其表达式如下

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-6)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-7)$$

在此例中，由线圈 N_1 中电流 i_1 的变化而在自身线圈 N_1 感应的电动势 e_1 称为自感电动势，而由线圈 N_1 中电流 i_1 的变化在另一线圈 N_2 内感应的电动势 e_2 称为互感电动势。

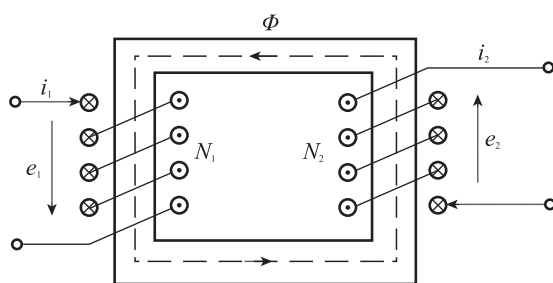


图 1-6 变压器电动势

感应电动势还可以表示为磁链的方式，如式（1-6）和式（1-7）可表示为 $e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt}$ 和 $e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt}$ ，其中 ψ_1 和 ψ_2 为磁链，分别为 $\psi_1 = N_1 \cdot \Phi$ ， $\psi_2 = N_2 \cdot \Phi$ 。

通常把单位电流产生的磁链定义为线圈的电感，用符号 L 表示，单位为 H，亨（亨利）。于是有 $L = \psi/i$ 。

二、旋转电动势

由于线圈（或导体）和磁场之间存在运动，使得线圈中的磁通发生变化而产生电动势，所以称之为旋转电动势。如果线圈（或导体）所处的磁通密度 B 为均匀磁密时，旋转电动势值的计算公式为

$$e = B \cdot v \cdot l \quad (1-8)$$

式中， v 为导体运动的线速度，单位为 m/s； B 为导体所处的磁通密度，单位为 T； l 为导体的有效长度，单位为 m； e 为导体中的感应电动势，单位为 V。

旋转电动势方向由右手定则决定，即伸开右手，使大拇指与其余四指互相垂直并在一个平面内，让磁力线穿过手心，大拇指指向导体相对于磁场的运动方向，则四指所指的方向为旋转电动势的方向。右手定则法如图 1-7 所示。

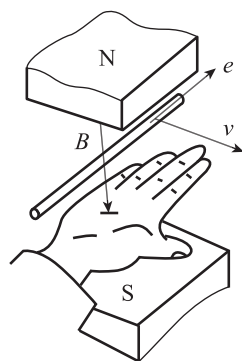


图 1-7 确定旋转电动势方向的右手定则

1.3.3 毕奥-萨伐尔定律——描述电磁作用产生力的规律

载流导体在磁场中会受到力的作用，这种力是磁场与电流相互作用所产生的，故称为电磁力。若磁场与导体相互垂直，则作用在导体上的电磁力值为

$$f = B \cdot i \cdot l \quad (1-9)$$

式中， B 为导体所处的磁通密度，单位为 T； i 为导体中的电流，单位为 A； l 为导体在磁场中的有效长度，单位为 m； f 为作用在导体上的电磁力，单位为 N·m。

电磁力的方向可用图 1-8 所示的左手定则确定，即伸开左手，大拇指与其余四指互相垂直并保持在一个平面内，让磁

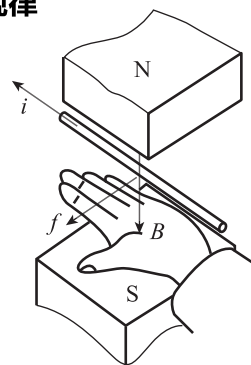


图 1-8 确定载流导体受力的左手定则

力线穿过手心，四指指向电流的方向，则大拇指所指的方向即为电磁力的方向。

1.3.4 磁路欧姆定律

图 1-2 所示为一个单框铁芯磁路的示意图。铁芯上绕有 N 匝线圈，通以电流 i 产生沿铁芯闭合的主磁通 Φ 和沿空气闭合的漏磁通 Φ_σ 。设铁芯截面积为 S ，平均磁路长度为 l ，铁磁材料的磁导率为 μ (μ 不是常数，随磁感应强度 B 变化)。

假设漏磁通可以不考虑 (令 $\Phi_\sigma = 0$ ，即假设磁通全部通过铁芯)，并且认为磁路 l 上的磁场强度 H 处处相等，于是根据全电流定律有

$$\oint_l H dl = Hl = Ni \quad (1-10)$$

因 $H = B/\mu$ ， $B = \Phi/S$ ，可得

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{F}{R_m} = \frac{Ni}{l/(\mu S)} = \Lambda_m F \\ \text{或 } F &= Ni = Hl = \frac{Bl}{\mu} = \Phi \frac{l}{\mu S} = \Phi R_m = \frac{\Phi}{\Lambda_m} \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中， $F = Ni$ 为磁动势， $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 为磁阻， $\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l}$ 为磁导。

式 (1-11) 即所谓的磁路欧姆定律，与电路欧姆定律相似。它表明，当磁阻 R_m 一定 (在确定磁路情况下) 时，磁动势 F 越大，所激发的磁通量 Φ 也越大；而当磁动势 F 一定时，磁阻 R_m 越大，则产生的磁通量 Φ 越小。在磁路中，磁阻 R_m 与磁导率 μ 成反比，空气的磁导率 μ_0 远小于铁芯的磁导率 μ_{Fe} ，这表明漏磁路 (空气隙) 的 R_σ 远大于铁芯的 R_m ，故在分析中可忽略漏磁通 Φ_σ 。

根据式 (1-11) 和 $L = \psi/i$ ，有 $L = N\Phi/i = N^2 \Lambda_m$ 。

1.3.5 磁路基尔霍夫第一定律

如果铁芯不是一个简单的回路，而是带有并联分支的磁路，从而形成磁路的节点，则当忽略漏磁通时，在磁路任何一个节点处，磁通的代数和恒等于零，即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-12)$$

式 (1-12) 与电路第一定律 $\sum i = 0$ 在形式上相似，因此称为磁路的基尔霍夫第一定律，就是磁通连续性定律。若令流入节点的磁通定为 (+)，则流出该节点的磁通定为 (-)。如图 1-9 所示的封闭面处有

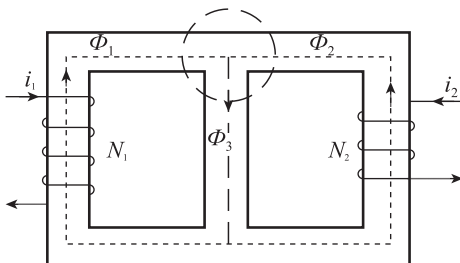


图 1-9 磁路欧姆定律

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

磁路基尔霍夫第一定律表明, 进入或穿出任一封闭面的总磁通量的代数和等于零, 或穿入任一封闭面的磁通量恒等于穿出该封闭面的磁通量。

1.3.6 磁路基尔霍夫第二定律

工程应用中的磁路, 其几何形状往往是比较复杂的, 直接利用安培环路定律的积分形式进行计算有一定的困难。为此, 在计算磁路时要进行简化。简化的办法是把磁路分段, 几何形状相同的分为一段, 找出它的平均磁场强度, 再乘上这段磁路的平均长度, 求得该段的磁压降 (也可理解为一段磁路所消耗的磁动势)。然后把各段磁路的磁压降相加, 结果就是总磁动势, 即沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁压降的总和, 称为磁路基尔霍夫第二定律

$$\sum_1^n H_k l_k = \sum i = iN \quad (1-13)$$

式中, H_k 为磁路中第 k 段磁路的磁场强度 (A/m); l_k 为第 k 段磁路的平均长度 (m); iN 为作用在整个磁路上的磁动势, 即全电流数 (安匝); N 为励磁线圈的匝数。

上式也可以理解为, 消耗在任一闭合磁回路上的磁动势等于该磁路所交链的全部电流。

图 1-10 所示的磁路可分为两段: 一段为铁磁材料组成的铁芯, 总长度为 $2l_1 + 2l_2 - \delta$, 磁场强度为 H_1 ; 另一段为气隙, 长度为 δ , 磁场强度为 H_δ 。铁芯上有两组线圈: 一组线圈的电流为 i_1 , 线圈的匝数为 N_1 ; 另一组线圈的电流为 i_2 , 线圈的匝数为 N_2 , 由磁路基尔霍夫第二定律可得

$$H_1(2l_1 + 2l_2 - \delta) + H_\delta \delta = i_1 N_1 + i_2 N_2$$

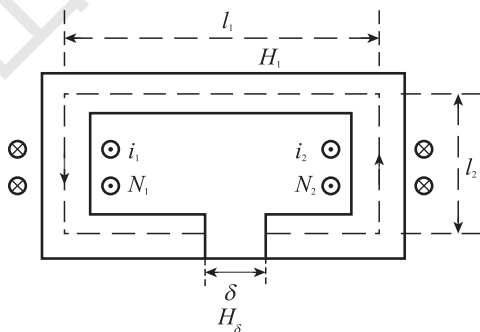


图 1-10 磁路基尔霍夫第二定律

1.4 铁磁材料

铁磁材料, 一般由铁或铁与钴、钨、镍、铝及其他金属的合金构成, 是迄今为止最常用的磁性材料。虽然这些材料的性能差异很大, 但决定其性能的基本现象却是共同的。

1.4.1 铁磁材料的磁化

研究发现, 铁磁材料由许许多多的磁畴构成, 每个磁畴相当于一个小永磁体, 具有较强的磁矩, 如图 1-11 所示。在未磁化的材料样品中, 所有磁畴摆列杂乱, 因而材

料对外不显磁性，如图 1-11 (a) 所示。当外部磁场施加这一材料时，磁畴就会沿施加的磁场方向转向，所有的磁畴平行，铁磁材料对外表现出磁性，如图 1-11 (b) 所示。因此，当外磁场施加铁磁材料时，铁磁材料产生的磁场比外部磁场单独作用所引起的磁场更强。随着外部磁场强度 H 的增加，这一现象会继续，直到所有的磁畴沿施加的磁场排列，此时，磁畴将不再能使磁通密度 B 增加，即材料完全饱和。这也是铁磁材料的磁导率比非铁磁材料大得多的原因。

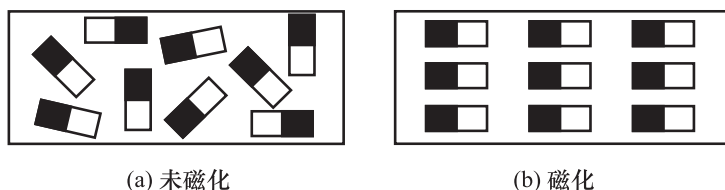


图 1-11 铁磁材料的磁化

1.4.2 起始磁化曲线、磁滞回线和基本磁化曲线

将一块没有磁化的铁磁材料进行磁化，当磁场强度由零逐渐增大时，磁通密度将随之增大，用 $B=f(H)$ 描述的曲线称为铁磁材料的起始磁化曲线，如图 1-12 所示。

由图 1-12 可见，在磁场强度从零增大初期，磁密 B 随磁场强度 H 增加较慢 (Oa 段)，之后，磁密 B 随 H 的增加而增大加快 (ab 段)，过了 b 点， B 的增加减慢 (bc 段)，在 cd 段又近似为直线。其中 a 称为跖点， b 点为膝点， 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 。在各种电机和变压器的主磁路中，为了获得较大的磁密，又不过分增大磁动势，通常把铁芯内的工作点磁通密度选择在膝点附近。

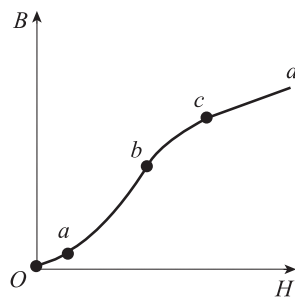


图 1-12 起始磁化曲线

若将铁磁材料进行周期性磁化， B 和 H 之间的变化关系就会变成图 1-13 中 $abcdefa$ 所示的形状。当 H 从零增加到 H_m ，以后逐渐减小磁场强度 H 时， B 值将沿曲线 ab 下降。当 $H=0$ 时， B 值并不为零，而等于 B_r ，称为剩余磁通密度，简称剩磁。要使 B 值从 B_r 减小到零，必须加上相应的反向外磁场，此反向磁场强度称为矫顽力，用 H_c 表示。铁磁材料所具有的这种磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度 H 变化的现象，叫作磁滞。呈现磁滞现象的 $B-H$ 闭合回线，称为磁滞回线，如图 1-13 中的 $abcdefa$ 所示。曲线段 $abcd$ 为磁滞回线下降分支， $defa$ 为磁滞回线上升分支。

对于同一铁磁材料，选择不同的磁场强度 H_m 反复磁化时，可得出不同的磁滞回线，将各条磁滞回线的顶点连接起来，所得的曲线称为基本磁化曲线或平均磁化曲线。起始磁化曲线与平均磁化曲线相差甚小，如图 1-14 中的虚线所示。

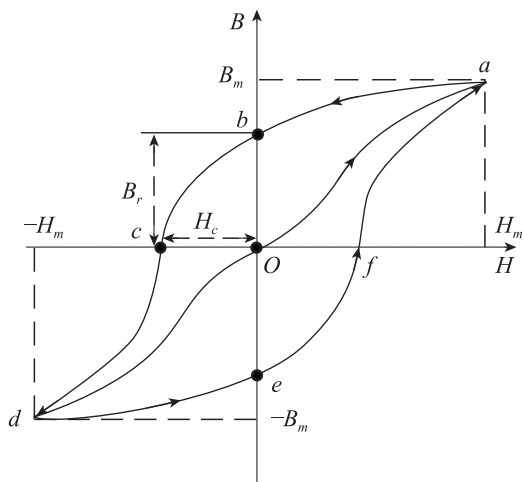


图 1-13 铁磁材料的磁化特性

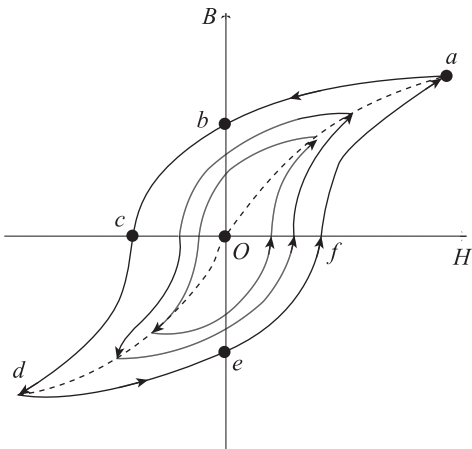


图 1-14 基本磁化曲线

铁磁材料，如铁、镍等的磁导率 μ 比空气的磁导率 μ_0 大几千到几万倍。磁导率 μ 与磁场强度及物质磁状态的历史有关，所以铁磁材料的 μ 不是一个常数。在工程计算时，不按 $H=B/\mu$ 进行计算，而是按铁磁材料的基本磁化曲线计算。

图 1-15 所示为电机中常用的硅钢片 DR530、铸铁、生铁的基本磁化曲线。

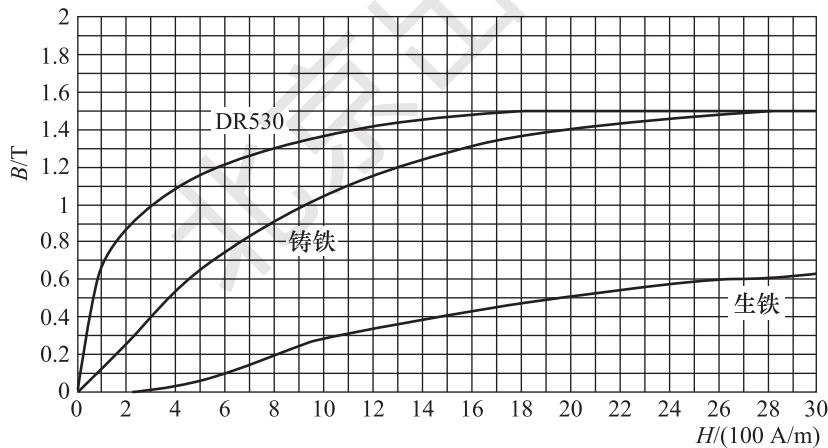


图 1-15 电机中常用的基本磁化曲线

1.4.3 软磁材料和硬磁材料

磁滞回线较窄，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 均小的铁磁材料属于软磁材料，如硅钢片、铁镍合金、铁淦氧、铸钢等。这些材料的磁导率较高，磁滞回线包围面积小，磁滞损耗小，多用于制作电机、变压器的铁芯。

磁滞回线较宽，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 均大的铁磁材料属于硬磁材料，如钨钢、钴钢、铝镍钴、铁氧体、钕铁硼等，硬磁材料主要用作永久磁铁。

1.4.4 磁滞损耗和涡流损耗

一、磁滞损耗

磁滞现象的产生是由于铁磁材料中的磁畴在外磁场作用下，发生移动和倒转时，彼此之间产生“摩擦”。由于这种“摩擦”的存在，在外磁场停止作用后，磁畴与外磁场方向一致的排列便被保留下，不能恢复原状，形成了磁滞现象和剩磁。

铁磁材料在交变磁场作用下反复磁化的过程中，磁畴之间不停地互相摩擦，消耗能量，因此引起损耗。这种损耗称为磁滞损耗。磁滞回线面积越大，损耗越大。磁通密度最大值 B_m 越大时，磁滞回线面积也越大。试验表明，交变磁化时，磁滞损耗 p_h 与磁通的交变频率 f 成正比，与磁通密度的幅值 B_m 的 n 次方成正比，与铁芯重量 G 成正比。

$$p_h = C_h f B_m^n G \quad (1-14)$$

式中， C_h 为磁滞损耗系数，对一般的电工用硅钢片， $n = 1.6 \sim 2.3$ 。由于硅钢片的磁滞回线面积较小，因而电机和变压器的铁芯都采用硅钢片。

二、涡流损耗

当通过铁芯的磁通发生交变时，根据电磁感应定律，在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呈旋涡状流动，如图 1-16 所示，称为涡流。涡流在铁芯中引起损耗，称为涡流损耗。

设涡流为 i_e ，涡流回路的电阻为 R_e ，涡流感应电动势为 $E_e \propto f \times B_m$ ，涡流损耗 $p_e = i_e^2 R_e = E_e^2 / R_e \propto f^2 \times B_m^2$ ，可见，频率越高，磁通密度越大，感应电动势就越大，涡流损耗也越大；铁芯的电阻越小，涡流损耗就越小。对电工钢片，涡流损耗还与钢片厚度 d 的平方成正比，经推导可知，涡流损耗为

$$p_e = C_e d^2 f^2 B_m^n G \quad (1-15)$$

式中， C_e 为涡流损耗系数。可见，为了减小涡流损耗首先是减小钢片的厚度，所以电工钢片的厚度做成 $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$ ；其次是增加涡流回路的电阻，所以电工钢片中常加入 4% 左右的硅，变成硅钢片，用以提高电阻。

在电机和变压器中，通常把磁滞损耗和涡流损耗合在一起，称为铁芯损耗，简称铁耗。

对于一般的电工钢片，正常工作点的磁通密度 B 为 $1 \text{ T} < B_m < 1.8 \text{ T}$ ，铁芯损耗可近似为

$$p_{Fe} = p_h + p_e \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \quad (1-16)$$

式中， C_{Fe} 为铁芯的损耗系数； G 为铁芯重量。可见，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。

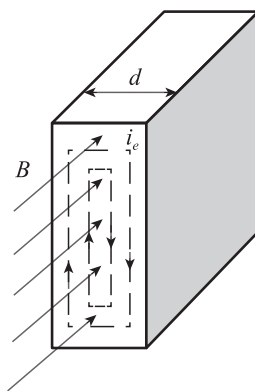


图 1-16 一片硅钢片中的涡流

1.5 简单磁路及其计算

1.5.1 直流磁路及其计算

直流磁路计算有已知磁通 Φ 求磁动势 F 和已知磁动势 F 求磁通 Φ 两类问题。直流电机的磁路计算属于第一类问题，所以我们主要介绍第一类问题，然后简单介绍第二类问题。

已知磁通 Φ 求磁动势 F 的计算步骤：

(1) 将磁路进行分段，每段磁路应是均匀的（材料相同，截面相同），算出各段的截面积 S （单位为 m^2 ），磁路的平均长度 l （单位为 m ）。

(2) 根据已给定的磁通 Φ （单位为 Wb ），由 $\Phi/S = B$ 计算出各段的磁通密度（单位为 T ）。

对于分支磁路，给定的 Φ 只是某一支路的，因此往往要结合磁路基尔霍夫第一、第二定律，以确定另外各支路的磁通。

(3) 根据各段的磁通密度 B ，求出对应的磁场强度 H （单位为 A/m ）。其有两种类型：① 对铁磁材料，由相应的基本磁化曲线（或表格）据 B 查出 H ；② 对空气隙或非磁性间隙，由 $H = B/\mu_0$ 算出，其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ （真空磁导率）。

(4) 根据各段的磁场强度 H 和磁路的平均长度 l ，计算各段磁压降 HI 。

(5) 由磁路基尔霍夫第二定律，求出 $F = IN$ （单位为 A ），并计算出线圈电流 I 。如果 F 是磁路磁场的源，线圈称为励磁线圈，算出的电流称为励磁电流。

将闭合磁路进行分段，分别求出各段磁路的磁压降，然后应用磁路基尔霍夫定律，将回路各段磁压降相加而得磁动势的方法，称为磁路的分段计算法。

对于磁路计算的第二类问题，即已知磁动势求磁通，常可用试探法，即先假定一个磁通量 Φ ，计算得 F 。如果算出的 F 与给定的磁动势相等，则 Φ 就是所求；如果 F 与给定的磁动势不等，则经分析决定 Φ 应增加还是减小后再计算磁动势，直至相等为止。试探法也称为逐次近似法，这种方法可用计算机求解。

【例 1-1】 在图 1-17 中，铁芯用 DR530 叠成，它的截面积 $S = 2 \times 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，铁芯的平均长度 $l_{\text{Fe}} = 0.3 \text{ m}$ ，空气隙长度 $\delta = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$ ，线圈的匝数 $N = 3$ 匝。试求产生磁通 $\Phi = 10.4 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时所需要的励磁磁动势 IN 和励磁电流 I 。

考虑到气隙磁场的边缘效应，在计算气隙有效面积时，通常在长、宽方向各增加一个 δ 值。

解： 铁芯内磁通密度为

$$B_{\text{Fe}} = \frac{\Phi}{S} = \frac{10.4 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{2 \times 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.3 \text{ T}$$

从图 1-15 中 DR530 的磁化曲线查得，与铁

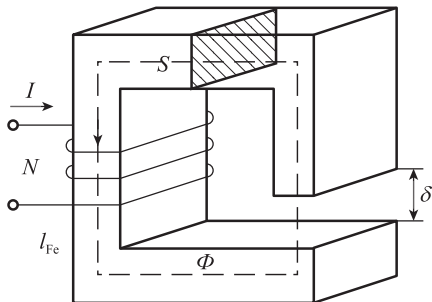


图 1-17 简单串联磁路

芯内磁通密度对应的 $H_{\text{Fe}} = 800 \text{ A/m}$,

$$\text{铁芯段的磁压降 } H_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} = 800 \text{ A/m} \times 0.3 \text{ m} = 240 \text{ A}$$

$$\text{空气隙的磁通密度 } B_{\delta} = \frac{\Phi}{S_{\delta}} = \frac{10.4 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{2.05 \times 4.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.253 \text{ T}$$

$$\text{空气隙的磁场强度 } H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{B_{\delta}}{4\pi \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 9.973 \times 10^5 \text{ A/m}$$

$$\text{空气隙的磁压降 } H_{\delta} l_{\delta} = 9.973 \times 10^5 \text{ A/m} \times 5 \times 10^{-4} \text{ m} = 498.7 \text{ A}$$

$$\text{励磁磁动势 } F = NI = H_{\delta} l_{\delta} + H_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} = 498.7 + 240 = 738.7 \text{ A}$$

$$\text{励磁电流 } I = \frac{F}{N} = \frac{738.7 \text{ A}}{3} = 246.2 \text{ A}$$

1.5.2 交流磁路

在交流系统中,电压和磁通的波形非常接近于时间的正弦函数。采用闭合铁芯磁路作为模型(没有气隙)描述磁性材料稳态交流工作的励磁特性,如图1-18所示的磁路。磁路长度为 l ,贯穿铁芯长的横截面积为 S 。此外,假设铁芯磁通 Φ 按正弦规律变化,因此

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t = B_m S \cos \omega t \quad (1-17)$$

式中, Φ_m 为铁芯磁通的幅值; B_m 为磁密的幅值; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$; f 为电源频率。

从式(1-6)知,在 N 匝绕组中感应的电动势为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} = \omega N \Phi_m \sin \omega t = 2\pi f N \Phi_m \sin \omega t \quad (1-18)$$

由于铁芯的磁化曲线的非线性,励磁电流 i_f 的波形不同于磁通的正弦波形。励磁电流随时间变化的函数曲线,可以用作图法描绘出来,如图1-19所示。

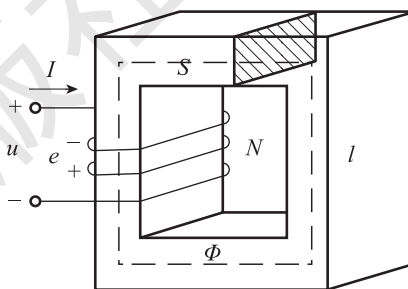


图 1-18 简单磁路

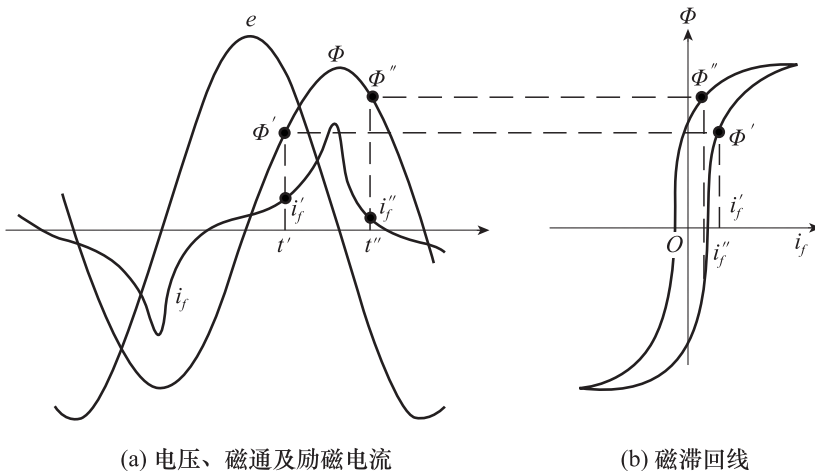


图 1-19 励磁现象

在时刻 t' ，磁通为 Φ' 而电流为 i_f' ；在时刻 t'' ，相应的值为 Φ'' 和 i_f'' 。注意：由于磁滞回线是多值的，需要从磁滞回线的磁通上升段仔细选取上升磁通值（图 1-19 中 Φ' ）；同样，在磁滞回线的磁通下降段，必须选取下降磁通值（图 1-19 中 Φ'' ）。可见，磁滞回线由于上升磁通和下降磁通的饱和效应而变平，故励磁电流的波形为尖顶波。

励磁电流提供产生铁芯磁通所需要的磁动势，部分能量作为损耗耗散，引起铁芯发热，其余能量以无功功率出现。无功功率在铁芯中不耗散，由励磁电源循环供给和吸收。

在直流磁路中，励磁电流是恒定的，在线圈和铁芯中不会产生感应电动势，在一定的电压下，线圈中的电流取决于线圈本身的电阻 R ，磁路中没有损耗。在交流磁路中，由于磁通在变化，将产生两种损耗，第一种是涡流损耗，第二种是磁滞损耗。

1.6 永磁材料的应用

剩磁的意义在于，当没有外部励磁存在时，它也能在磁路中产生磁通。对用小磁体把留言条贴在电冰箱上的人来说，这是一个很熟悉的现象。剩磁也广泛用在喇叭及永磁电机等装置中。

几种常用永磁材料的磁化特性如图 1-20 所示。铝镍钴 5 为一种广泛应用的铁、镍、铝及钴的合金。其最初被发现于 1931 年，它具有相对较大的剩余磁通密度。与铝镍钴 5 相比，铝镍钴 8 有较低的剩余磁通密度和较高的矫顽磁力，因此，比铝镍钴 5 更少去磁。铝镍钴合金的缺点是其有相对较低的矫顽磁力及它的机械脆性。

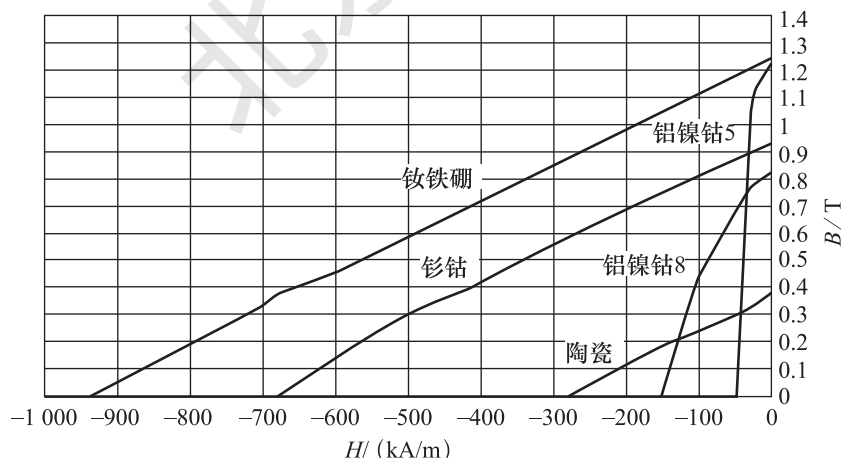


图 1-20 常用永磁材料的磁化曲线

陶瓷永磁材料用氧化铁及钡或碳酸锶粉末制成，比铝镍钴合金剩余磁通密度低，但矫顽磁力明显要高。因而，此类材料更少去磁。在图 1-20 中表示出了此类材料的一种——陶瓷，其磁化特性几乎为一条直线。陶瓷体具有良好的机械性能，制造成本也不高，因而广泛用于永磁应用场合。

随着稀土永磁材料的发现，永磁材料技术从 20 世纪 60 年代开始取得了重大进步，其中以钕钴为典型代表，从图 1-20 中看出，钕钴具有像铝镍钴合金那样的高剩余磁通密度，而同时又有更高的矫顽磁力及最大磁能积。最新的稀土磁性材料是钕铁硼材料。它表现出比钕钴更大的剩余磁通密度、矫顽磁力及最大磁能积。

最大磁能积是永磁材料性能的一个有效衡量标准。这对应于最大 $B-H$ 乘积 $(B-H)_{\max}$ ，相应于在磁滞回线第二象限的一点。 B 和 H 的乘积具有能量密度的量纲（焦耳每立方米）。若永磁材料工作于该点，将使得在气隙中产生一定的磁通密度所需要的材料体积最小。因而，选取具有最大可利用的最大磁能积的材料，可使需要的磁体体积最小。

1.7 磁路计算 MATLAB 仿真

磁路计算是电机、变压器设计和分析中的基本计算内容，使用 MATLAB 软件编制 M 文件的方法可以进行磁路分析。

【例 1-2】 图 1-21 所示为电工钢片叠压而成的磁路，叠片净长与包含绝缘的总长度即铁芯的叠压系数 $k_{Fe}=0.94$ ，各段铁芯的截面积相同，均为 $A=1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ，各段铁芯的平均长度分别为 $l_1=0.08 \text{ m}$ ， $l_2=0.1 \text{ m}$ ， $l_3=0.034 \text{ m}$ ， $l_4=0.04 \text{ m}$ ， $l_5=0.1 \text{ m}$ ，气隙长度 $\delta=0.006 \text{ m}$ ，已知铁芯的相对磁导率为 1 900，励磁绕组匝数 $N=2\,000$ ，若要在铁芯中产生 $1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 的磁通，需要多大的励磁电流？试用 M 语言编写计算程序。

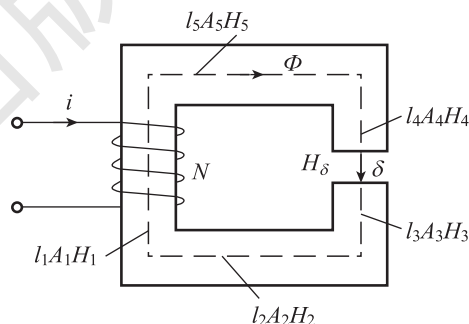


图 1-21 电工钢片叠压而成的磁路

解： 用 MATLAB 语言编写计算励磁电流的程序如下：

% 磁路计算求解励磁电流问题

clc

% 消除主程序窗口

clear

% 清除变量空间的变量

A=1*1e-3;

% 已知铁芯截面积

kFe=0.94;

% 已知铁芯叠片系数

Ph=1*1e-3;

% 需产生的磁通量

u0=4*pi*1e-7;

% 已知空气磁导率

l1=0.08; l2=0.1; l3=0.034; l4=0.04; l5=0.1;

% 已知气隙长度

N=2000;

% 已知励磁绕组系数

d=0.006;

% 已知气隙长度

Ak=kFe*A;

% 计算磁通密度

```

B = Ph * A; % 计算铁芯磁通密度
uFe = 1900 * u0; % 计算铁芯磁导率
He = B / uFe; % 计算铁芯磁导强度
Fe = He * (l1 + l2 + l3 + l4 + l5); % 计算铁芯的磁压降
Ha = Ph / u0 / A; % 计算气隙磁场强度
Fa = Ha * d; % 计算气隙的磁压降
F = Fe + Fa; % 计算总磁压降
i = F / N; % 计算励磁电流
s = num2str (i); % 将数字转换为字符串
s1 = '励磁电流为: '; % 定义字符串
s = strcat (s1, s, 'A '); % 合并字符串
disp (s); % 显示计算结果

```

显示, 励磁电流为 2.387 3 A。

【例 1-3】 已知某电感线圈匝数 $N=400$, 铁芯长度 $l=0.3$ m, 截面积 $A=8 \times 10^{-4}$ m², 真空磁导率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m, 气隙长度 $\delta=0.005$ m, 气隙截面积 $A_0=8 \times 10^{-4}$ m², 相对磁导率 $\mu_r=100 \sim 8\,000$, 试绘制电感系数 L 与相对磁导率之间的关系曲线。

解: 计算电感系数的公式为 $L=\mu_0\mu_rAN^2/l$, 用 M 语言编写绘制电感系数与相对磁导率之间的关系的程序如下:

```

% 绘制电感系数与相对磁导率之间的关系
clc
clear
u0 = pi * 4e - 7;
N = 400; l = 0.3;
d = 0.005;
A = 8e - 4;
A0 = 8e - 4;
R0 = d / (u0 * A0);
for n = 1: 80;
    ur (n) = 100 + (10000 - 100) * (n - 1) / 100;
    Rm (n) = l / (ur (n) * u0 * A);
    R = R0 + Rm (n);
    L (n) = N^2 / R;
end
plot (ur, L);
title ('{itL} ( {/it/mu} _ r ');

```

```
xlabel ( '铁芯相对磁导率 { /it /mu } _ r ');  
ylabel ( '电感系数 { itL } /H ');
```

运行上述程序，得到电感系数 L 与相对磁导率之间的关系曲线如图 1-22 所示。

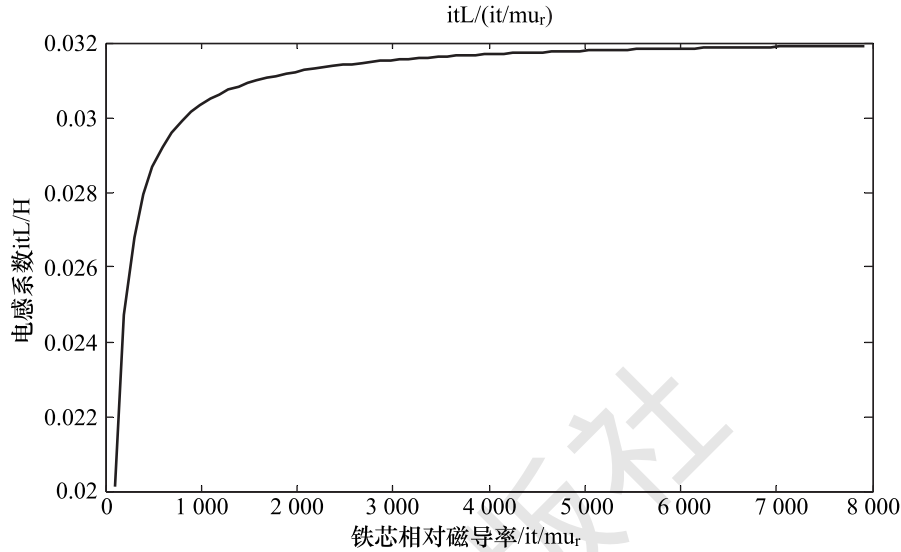


图 1-22 电感系数 L 与相对磁导率之间的关系曲线

【例 1-4】 已知某铁磁材料的磁化数据见表 1-1，试用 MATLAB 软件进行磁化曲线的拟合并绘制拟合的磁化曲线。

表 1-1 某铁磁材料的磁化数据

B/T	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	1.38	1.40	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56
0.5	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66	1.69	1.71	1.74	1.76	1.78
0.6	1.81	1.84	1.86	1.89	1.91	1.94	1.97	2.00	2.03	2.06
0.7	2.10	2.13	2.16	2.20	2.24	2.28	2.30	2.36	2.40	2.45
0.8	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.76	2.81	2.87	2.93	2.99
0.9	3.06	3.13	3.19	3.26	3.33	3.41	3.49	3.57	3.65	3.74
1.0	3.83	3.92	4.01	4.11	4.22	4.33	4.44	4.56	4.67	4.80
1.1	4.93	5.07	5.21	5.36	5.52	5.68	5.84	6.00	6.16	6.33
1.2	6.52	6.72	6.94	7.16	7.38	7.62	7.86	8.10	8.36	8.62
1.3	8.90	9.20	9.50	9.80	10.1	10.5	10.9	11.3	11.7	12.1
1.4	12.6	13.1	13.6	14.2	14.8	15.5	16.3	17.1	18.1	19.1
1.5	20.1	21.2	22.4	23.7	25.0	26.7	28.5	30.4	32.6	35.1
1.6	37.8	40.7	43.7	46.8	50.0	53.4	56.8	60.4	64.0	67.8
1.7	72.0	76.4	80.8	85.4	90.2	95.0	100	105	110	116
1.8	122	128	134	140	146	152	158	165	172	180

解： 用 M 语言编制拟合的磁化曲线的程序如下：

```
clc
clear
Hdata = [1.38, 1.40, 1.42, 1.44, 1.46, 1.48, 1.50, 1.52, 1.54, 1.56, ...
    1.58, 1.60, 1.62, 1.64, 1.66, 1.69, 1.71, 1.74, 1.76, 1.78, ...
    1.81, 1.84, 1.86, 1.89, 1.91, 1.94, 1.97, 2.00, 2.03, 2.06, ...
    2.10, 2.13, 2.16, 2.20, 2.24, 2.28, 2.30, 2.36, 2.40, 2.45, ...
    2.50, 2.55, 2.60, 2.65, 2.70, 2.76, 2.81, 2.87, 2.93, 2.99, ...
    3.06, 3.13, 3.19, 3.26, 3.33, 3.41, 3.49, 3.57, 3.65, 3.74, ...
    3.83, 3.92, 4.01, 4.11, 4.22, 4.33, 4.44, 4.56, 4.67, 4.80, ...
    4.93, 5.07, 5.21, 5.36, 5.52, 5.68, 5.84, 6.00, 6.16, 6.33, ...
    6.52, 6.72, 6.94, 7.16, 7.38, 7.62, 7.86, 8.10, 8.36, 8.62, ...
    8.90, 9.20, 9.50, 9.80, 10.1, 10.5, 10.9, 11.3, 11.7, 12.1, ...
    12.6, 13.1, 13.6, 14.2, 14.8, 15.5, 16.3, 17.1, 18.1, 19.1, ...
    20.1, 21.2, 22.4, 23.7, 25.0, 26.7, 28.5, 30.4, 32.6, 35.1, ...
    37.8, 40.7, 43.7, 46.8, 50.0, 53.4, 56.8, 60.4, 64.0, 67.8, ...
    72.0, 76.4, 80.8, 85.4, 90.2, 95.0, 100, 105, 110, 116, ...
    122, 128, 134, 140, 146, 152, 158, 165, 172, 180];
Bdata = 0.40: 0.01: 1.89;
len = length (Hdata);
Hmax = Hdata (len);
a = polyfit (Hdata, Bdata, 13);
for n = 1: 151
    Hfit (n) = Hmax * (n - 1) / 150;
    Bfit (n) = a(1) * Hfit(n)^13 + a(2) * Hfit(n)^12 + a(3) * Hfit(n)^11 + a(4) * Hfit(n)^10 + a(5) * Hfit(n)^9 + a(6) * Hfit(n)^8 + a(7) * Hfit(n)^7 + a(8) * Hfit(n)^6 + a(9) * Hfit(n)^5 + a(10) * Hfit(n)^4 + a(11) * Hfit(n)^3 + a(12) * Hfit(n)^2 + a(13) * Hfit(n) + a(14);
end
plot (Hdata, Bdata, '* ');
hold on
title ('磁化曲线')
xlabel (' $\{ /itC \}$  /A/cm ');
ylabel (' $\{ /itB \}$  /T ');
运行上述程序，得到图 1-23 所示的拟合曲线。
```

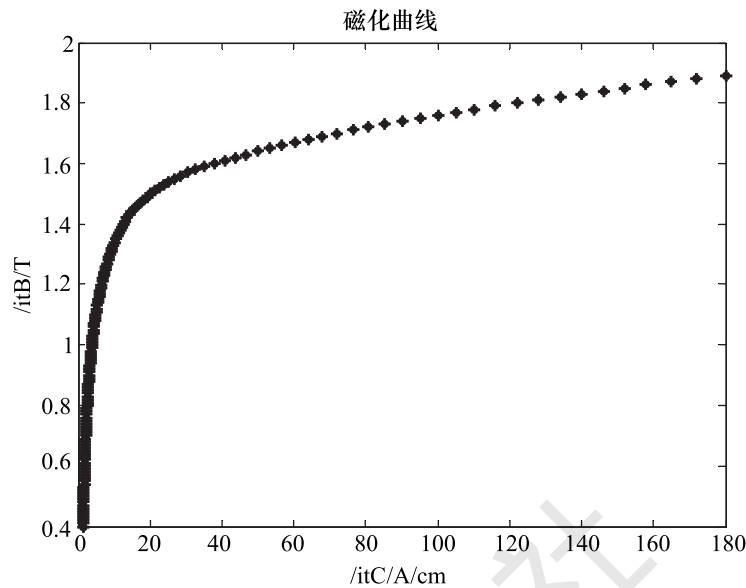


图 1-23 拟合的磁化曲线

【例 1-5】 已知对某种铁磁材料反复磁化，得到表 1-2（表中含有正、负两组数据），试用 MATLAB 软件进行磁化曲线的拟合并绘制拟合的磁化曲线。

表 1-2 某种铁磁材料反复磁化的数据

B	0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.95	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.2
H	48	52	58	73	85	103	135	193	80	42	2	-18	-29	-40	-45
B	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-0.95	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2
H	-48	-52	-58	-73	-85	-103	-135	-193	-42	-2	18	29	40	42	45

解： 用 M 语言编写绘制磁滞回线的代码如下：

```
Bdata = [0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 0.95, 0.9, 0.8...  
0.7, 0.6, 0.4, 0.2, 0, -0.2, -0.4, -0.6, -0.7, -0.8...  
-0.9, -1.0, -0.95, -0.9, -0.8, -0.7, -0.6, -0.4, -0.2,];  
Hdata = [48, 52, 58, 73, 85, 103, 135, 193, 80, 42, 2, -18, -29,  
-40, -45, -48, -52, -58, -73, -85, -103, -135, -193, -42, -2,  
18, 29, 40, 42, 45];  
plot (Hdata, Bdata, 'y ')  
xlabel ('H (A/m) ')  
ylabel ('B (T) ')  
title ('磁滞回线')  
hold on
```

```
plot ( [-250 250], [0 0], 'b -')
hold on
plot ( [0 0], [-1.5 1.5], 'r ')
运行上述程序，可得到图 1-24 所示的磁滞回线。
```

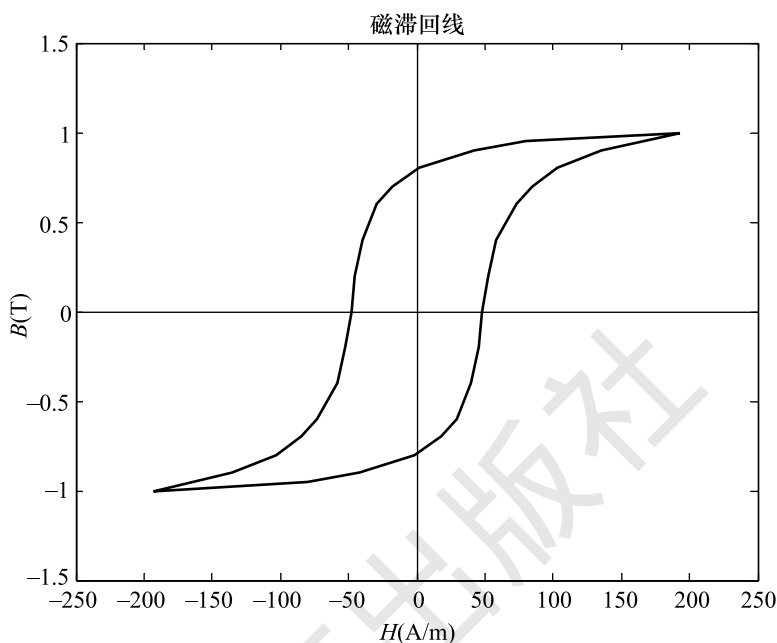


图 1-24 仿真的磁滞回线

小 结

本单元对电机学中遇到的电磁学的基本知识和基本定律做了一个简单的回顾，同时介绍了铁磁材料的基本知识。铁磁材料常常用来导向和集束磁场，形成磁路。因为铁磁材料的磁导率可以很大（达周围空间磁导率的好几万倍），大部分磁通就被限制在精心设计的路径中，这一路径由磁性材料的几何形状决定。因而，在这些磁结构中，磁场的求解可以直截了当地用磁路分析方法。不同铁磁材料的性能各异，一般而言，铁磁材料的特性为非线性，而其 $B-H$ 特性常常以磁滞回线族的形式表示。铁磁材料的损耗，指磁滞损耗及涡流损耗，与磁通量、工作频率、材料成分和所采用的制造工艺有关。通常，材料制造商以曲线形式提供材料的重要特性供使用。

永磁材料，表现为较大的剩磁和矫顽磁力。永磁体不但在交流电机和直流电机中广泛应用，在许多小装置包括扬声器、麦克风及模拟电气仪表等中也获得应用。最后，对磁路的计算进行 MATLAB 仿真分析。

思考与练习

- 1.1 电机中涉及哪些基本电磁定律？试说明它们在电机中的主要作用。
- 1.2 永久磁铁与软磁材料的磁滞回线有何不同？其相应的铁耗有何差异？
- 1.3 什么是磁路饱和现象？磁路饱和对磁路的等效电感有何影响？
- 1.4 铁芯中的磁滞损耗与涡流损耗是如何产生的？它们与哪些因素有关？
- 1.5 在实际的电机和变压器的铁芯中，一般不是采用整块铸钢或矽钢组成，而是采用矽钢片叠压而成，为什么？
- 1.6 如果感应电势的正方向与磁通的正方向符合左手螺旋关系，则电磁感应定律应写成 $e = N \frac{d\Phi}{dt}$ ，试说明原因。

北京出版社