

第 1 章 电机与拖动入门

本书以工程应用最为广泛的普通电机为例进行分析,分析变压器、直流电机、异步电动机、同步发电机等的基本结构与工作原理以及特性;分析异步电动机及直流电动机的电力拖动系统的运行性能及计算;培养使用实验设备的能力和运用实验方法研究电机与拖动的初步能力,具有理论性强、概念多、与工程实际联系密切等特点,其基本理论和分析方法对分析其他电气设备具有普遍意义,学习过程中要善于采用“归纳法”和“对比法”,从而提高学习的效率。

1.1 学习要求

- (1) 了解电机、电力拖动的概念与分类。
- (2) 掌握电机中所用的材料。
- (3) 掌握电机与拖动课程性质及学习方法。
- (4) 熟练掌握磁路及电机学中常用的电工定律。

1.2 学习指导

本章为学习各种电机、电力拖动打基础,首先要建立对电机、电力拖动的初步概念,熟悉电机中所用的材料,了解课程性质及学习方法,并具有较扎实的电、磁分析理论基础。学习本章需掌握的几个基本概念归纳如下:

1. 电机的概念

电机主要指发电机、电动机和变压器。电机的种类很多,但无论大型、中型、小型及控制电机都是电磁机械装置,是实现电能的生产、变换、使用和控制的电磁机械装置。

2. 电力拖动的概念

“电机学”中的内容是对电机其内部的结构、电磁关系、工作原理、工作特性进行分析的;

而电力拖动所分析的是包含电动机、工作机构（包括传动机构和生产机械）、控制设备、电源四个部分的系统特性。电力拖动系统中作为原动机的电动机（直流电动机或交流电动机）只是作为系统中的一个元件。

3. 电路和磁路的概念

作为电、磁、机械装置的电机，电与磁缺一不可，电与磁的路径分别被称为电路和磁路。电路和磁路在电机中泾渭分明，但又相互作用：电机中电生磁，磁感应电，电与磁的作用产生电磁转矩使电机得以发电或运转。

电机进行能量传递或转换的介质是主磁通。主磁通的路径是主磁路，主磁路主要由铁磁材料（铁心）构成，是非线性的；而主要由空气介质构成的路径走的是漏磁通，漏磁通不参与能量传递或交换，是线性的。需要注意的是，磁通可以通过导磁介质，也可以通过非导磁介质，磁阻是与磁导率成反比的。变压器的主磁路是闭合体，不含气隙；而旋转电机中含有的气隙则为主磁路的一部分，主磁通与漏磁通对比如表 1-1 所示。

表 1-1 主磁通与漏磁通对比

	路 径	量 值	作 用
主磁通	主要是铁心	大	传递能量
漏磁通	大多是空气	小	不传递能量

4. 磁动势的概念

对照电路中电流的来源是电源（电动势），而磁路中磁场的来源是磁源（磁动势）。普通电机分析中的磁场来源是由电流产生的，即产生磁场的电流称为励磁电流（激磁电流），安培环路定律说明了磁场由电流产生并可以进行磁路计算。

5. 表征磁场强弱的物理量

表征磁场的物理量有三个：磁通密度 B 、磁通 Φ 、磁场强度 H 。只有磁通密度 B 才是表征磁场强弱的物理量，磁通 Φ 表征磁场的存在，磁场强度 H 表示产生磁场所需的励磁电流的大小。

6. 铁磁材料的概念

（1）铁磁材料分软磁材料、硬磁材料两大类。软磁材料磁滞回线窄，是电机常用的铁心材料；硬磁材料磁滞回线宽，可作永久磁铁。

（2）铁磁材料在外磁场作用下磁畴排列整齐才呈现磁性。

（3）电机常用的磁化曲线是基本磁化曲线（平均磁化曲线）。

（4）铁磁材料具有高导磁性，即铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 足够大。根据 $B = \mu H$ 可见， μ_{Fe} 足够大，从而保证电机在较小的励磁电流（根据安培环路定律，励磁电流对应的是 H ）下产生较大的磁场（ B ），所以电机铁心采用铁磁材料起到增磁作用。

(5) 铁磁材料磁导率 μ_{Fe} 是非线性的，根据铁磁材料的磁化曲线的饱和现象，随着磁路饱和，磁导率 μ_{Fe} 是减小的。饱和现象会引起电流、磁通、电动势波形畸变。

(6) 交流磁路中铁磁材料有涡流、磁滞损耗，统称为铁耗 p_{Fe} 。铁耗与电源频率和磁通密度有关。交流磁路中的交变磁通除了引起铁耗外，还会在被磁通交链的线圈中感应电动势。

7. 磁路计算

磁路有无分支与有分支磁路之分。安培环路定律（全电流定律）是磁路计算的基础。磁路中的欧姆定律、基尔霍夫第一定律、基尔霍夫第二定律对应于电路中的相应定律，且磁路与电路有很多相似之处。在电机或变压器里作磁路计算时，一般已知的是磁路里各段的磁通 Φ 以及各段磁路的几何尺寸（即磁路长度与横截面），要求出所需的总磁动势 F 。

磁路计算步骤：

- (1) 把磁路按不同的材料、不同的截面积分成若干段。
- (2) 计算各段磁路的有效面积 S_k 和平均长度 l_k 。
- (3) 由通过各段磁路截面积的磁通量 Φ_k ，计算各段磁路的平均磁通密度 $B_k = \Phi_k/S_k$ 。
- (4) 根据 B_k 求出对应的磁场强度 H_k ，铁磁材料由基本磁化曲线查出 H_k ；对于空气隙，可直接按 $H_\delta = B_\delta / \mu_0$ 计算。
- (5) 计算各段的磁位降 $H_k l_k$ ，由 $F = \sum H_k l_k$ 求得给定磁通量时所需要的总励磁磁动势 F 。

8. 变压器电动势

如图 1-1 (a) 所示，匝数为 N 的线圈交链着磁通 Φ 。当 Φ 变化时，线圈 AX 两端感应电动势 e ，其大小与线圈匝数及磁通变化率成正比，方向由楞次定律决定。当 Φ 增加时，即 $d\Phi/dt > 0$ ，A 点为高电位，X 点为低电位；当 Φ 减小时，即 $d\Phi/dt < 0$ ，根据楞次定律，X 点为高电位，A 点为低电位。为了写成数学表达式，首先要规定电动势 e 的正方向，一般按右手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向，如图 1-1 (b) 所示。此时 e 的正方向从 A 指向 X。与实际情况比较，当 $d\Phi/dt > 0$ 时，实际上 A 点为高电位，X 点为低电位，而规定的 e 的正方向与实际方向相反，此时 $e < 0$ ；同理，当 $d\Phi/dt < 0$ 时， $e > 0$ 。这就是说， $d\Phi/dt$ 与 e 总是符号相反， e 与 Φ 的关系式就应写为 $e = -Nd\Phi/dt$ 。

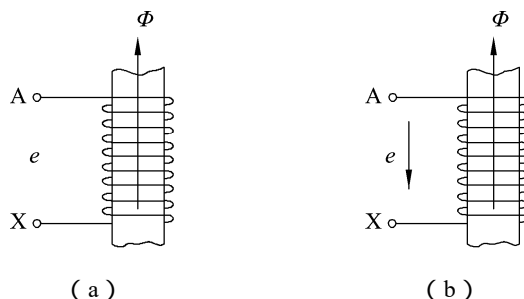


图 1-1 磁通及其感应电动势

9. 电感和电抗的概念

电感是沟通电、磁关系的一个重要参量。电磁感应定律的感应电动势可由电感来表达，于是，针对电机中的主磁通和漏磁通，引出了相对应的励磁电感 L_m 和漏电感 L_s ，表 1-2 对主磁通与漏磁通电感进行了对比。

表 1-2 主磁通与漏磁通电感对比

电感	$L_m = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \mu_{rc} \frac{S}{l}$	$L_s = \frac{\Psi_s}{i} = \frac{N\Phi_s}{i} = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \mu_0 \frac{S}{l}$
作用	主磁通	漏磁通
大小	较大的变数	较小的常数

可见，反映主磁通作用的励磁电感 L_m 为较大的变数（非线性参数）；反映漏磁通作用的漏电感 L_s 是较小的常数。而电机分析中常常把感应电动势用电抗电压降来处理，这样做易于建立电机的数学模型，于是，针对电机中的主磁通和漏磁通，引出了相对应的电抗 X ，表达式为式（1-1）。

$$X = \omega L = \omega \frac{N^2}{R_m} = \omega N^2 \Lambda = \omega N^2 \mu \frac{S}{l} \quad (1-1)$$

10. 磁路和电路概念的类比

本书的难点和重点就是磁部分，为了对抽象的磁路有深刻理解，采用磁路和电路“类比法”，如表 1-3 所示磁路和电路的类比关系，借助电路的概念把磁路理解透，电机这个电、磁、机械装置的概念就容易理解。

表 1-3 磁路和电路的类比关系

磁 路	电 路
磁动势 $F = \Phi R_m$	电动势 $E = IR$
磁通量 Φ	电流 I
磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$	电阻 $R = \frac{l}{rS}$
磁导 $\Lambda = \frac{1}{R_m}$	电导 $G = \frac{1}{R}$
磁导率 μ	电导率 r
欧姆定律 $\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{Ni}{l/\mu S}$	欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$
基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$	基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$
基尔霍夫第二定律 $\sum Ni = \sum_{k=1}^n H_k l_k$	基尔霍夫第二定律 $\sum e = \sum iR$

1.3 精选例题分析

1. 简述铁心材料的磁化过程。

答：铁磁物质未放入磁场之前，其内部磁畴排列是杂乱的，磁效应互相抵消，对外不呈现磁性；若将铁磁物质放入磁场中，在外磁场的作用下，磁畴的轴线将趋于与外磁场方向一致，且排列整齐形成一个附加磁场与外磁场叠加后，就呈现出磁性。

2. 什么是铁磁材料的基本磁化曲线？

答：对同一个铁磁材料，选择不同的磁场强度 H_m 进行反复磁化，可得一系列大小不同的磁滞回线，再将各个磁滞回线的顶点联接起来，所得到的曲线称为基本磁化曲线（或称为平均磁化曲线）。

3. 说明交流磁路与直流磁路的异同点。

答：直流磁路中磁通是不随时间变化的，故没有磁滞、涡流损耗，也不会无相对运动的线圈中感应产生电动势。而交流磁路中磁通是随时间变化的，会在铁心中产生磁滞、涡流损耗，并在其所交链的线圈中感应产生电动势，另外其饱和现象也会导致励磁电流、磁通、感应电动势波形的畸变。

4. 何谓电机饱和现象？饱和程度高低对电机有何影响？

答：电机的磁路由铁心部分和空气隙部分组成，当铁心的磁通密度达到一定程度后，铁心部分的磁压降开始不能忽略，此时随着励磁磁动势的增加，主磁通的增加渐渐变慢，电机进入饱和状态，即电机磁化曲线开始变弯曲。电机的饱和程度用饱和系数来表示，饱和系数的大小与电机的额定工作点在磁化曲线中可以分为三段，如图 1-2 所示为铁心材料的磁化曲线，a 点以下为不饱和段，ab 段为饱和段，b 点以上为高饱和段。将电机额定工作点选在不饱和段有两个缺点：材料利用不充分；磁场容易受到励磁电流的干扰而不易稳定。额定工作点选在过饱和段，有三个缺点：励磁功率大增；磁场调节困难；对电枢反应敏感。一般将额定工作点设计在 ab 段的中间，即所谓的“膝点”附近，这样选择的好处有：材料利用较充分；可调性较好；稳定性较好。

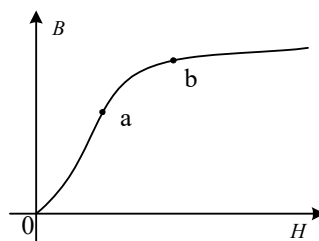


图 1-2 铁磁材料的磁化曲线

5. 两个线圈尺寸、形状、匝数均相同，一个是空气芯，另一个是铁磁材料铁心，欲产生相同的磁通时，两线圈中电流是否相同？为什么？

答：两线圈的电流不相同，空气芯线圈的电流比铁心线圈的大。因为根据磁路的欧姆定律，空气芯线圈的铁心磁阻大，产生一定量的磁通需要较大的磁动势，在线圈匝数不变的情况下，线圈电流较大。同理，铁心线圈因铁磁材料磁导率较高，磁阻小，产生同样大的磁通量所需磁动势较小，故铁心线圈中电流较小。

6. 变压器电动势、运动电动势（速率电动势）、自感电动势和互感电动势产生的原因有什么不同？其大小与哪些因素有关？

答：在线圈中，由于线圈交链的磁链（线圈与磁动势相对静止）发生变化而产生的电动势就叫变压器电动势。它与通过线圈的磁通的变化率成正比，与自身的匝数成正比。由于导

体与磁场发生相对运动切割磁力线而产生的感应电动势叫运动电动势，它与切割磁力线的导体长度、磁通密度、切割速度有关。由线圈自身的磁场与本身相交链的磁通发生改变而在本线圈内产生的感应电动势叫自感电动势，它与 L 有关。互感电动势是相邻线圈中，由一个线圈引起的磁通变化，使邻近线圈中的磁通发生变化而引起的其他线圈中的感应电动势。它与两线圈的匝数、相隔距离、磁通（互感磁通）变化率等有关。

7. 电磁转矩是怎样产生的？它在机电能量转换过程中起着什么作用？

答：电机中电磁转矩是由载流导体在磁场中受力而产生的，在机电能量转换中是机械能和电能转换的完成者。

8. 电机中的气隙磁场一般是根据什么原理和采用什么方法建立起来的？气隙磁场在机电能量转换过程中起着什么作用？

答：电机中的气隙磁场一般是根据载流导体周围产生磁场，采用绕组通以电流来产生的，建立起一定分布的气隙磁场。气隙磁场在机电能量转换中起着传递能量的媒介作用，使定、转子间磁的联系及机电能量转换得以实现。

9. 在图 1-3 中，(1) 当给线圈外加正弦电压 u_1 时，线圈内为什么会感应出电动势？当电流 i_1 增大和减小时，分别说明感应电动势的实际方向。(2) 如果电流 i_1 在铁心中建立的磁通是 $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，副线圈匝数是 N_2 ，试给出原、副线圈内感应电动势有效值的计算公式。

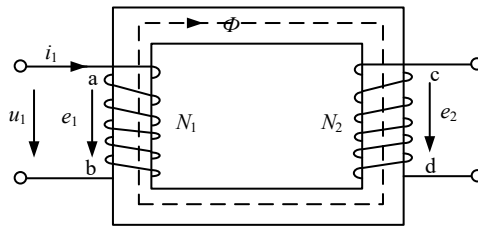


图 1-3 交流铁心线圈电路

答：(1) 在线圈 N_1 中外加 u_1 时，在线圈 N_1 中产生交变电流 i_1 ， i_1 在闭合铁心中产生交变磁通 Φ ， Φ 通过铁心在 N_2 中和 N_1 中均产生感应电动势 e_2 和 e_1 。

当 i_1 增大时 e_1 的实际方向从 b 到 a， e_2 的实际方向从 d 到 c；当 i_1 减小时 e_1 的实际方向从 a 到 b， e_2 的实际方向从 c 到 d。

(2) 原、副线圈中感应电动势的瞬时值

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \Phi_m \omega \cos \omega t$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \Phi_m \omega \cos \omega t$$

∴ 感应电动势 e_1 的有效值计算公式为

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_m \omega = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

∴ 感应电动势 e_2 的有效值计算公式为

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} N_2 \Phi_m \omega = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

10. 图 1-4 所示是一个简单的无分支磁路，如果铁心用硅钢片叠成，截面积 $S = 12.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，铁心的平均长度 $l = 0.4 \text{ m}$ ，空气隙 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，线圈的匝数 N 为 600 匝，试求产生磁通 $\Phi = 11 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时所需的励磁磁动势和励磁电流。其磁化曲线见附录 E。

解：图 1-4 简单无分支磁路的计算方法：它是由铁磁材料和气隙两部分串联而成的。铁心上绕了匝数为 N 的线圈，称为励磁线圈，线圈电流为 I 。进行磁路计算时，把这个磁路按材料及形状分成两段：一段是截面积为 S 的铁心，长度为 l ，磁场强度为 H ；另一段是气隙，长度为 δ ，磁场强度为 H_0 。

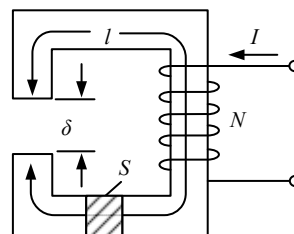


图 1-4 简单无分支磁路

在铁心叠片中的磁通密度为

$$B_{\text{Fe}} = \Phi / S = 11 / 12.25 = 0.9 \text{ (T)}$$

根据附录 E 硅钢片磁化曲线查出 $H_{\text{Fe}} = 248 \text{ A/m}$

在铁心内部的磁位降 $F_{\text{Fe}} = H_{\text{Fe}} l = 248 \times 0.4 = 99.2 \text{ (A)}$

在空气隙处，当不考虑气隙的边缘效应时

$$B_0 = B_{\text{Fe}} = 0.9 \text{ T}$$

所以 $H_0 = B_0 / \mu_0 = 0.9 / 4\pi \times 10^{-7} = 7.15 \times 10^5 \text{ (A/m)}$

故 $F_0 = H_0 \delta = 7.15 \times 10^5 \times 0.5 \times 10^{-3} = 357.5 \text{ (A)}$

根据安培环路定律，有 $H_{\text{Fe}} l + H_0 \delta = NI$

则励磁磁动势 $F = F_{\text{Fe}} + F_0 = H_{\text{Fe}} l + H_0 \delta = 99.2 + 357.5 = 456.7 \text{ (A} \cdot \text{匝)}$

励磁电流 $I_f = F / N = 456.7 / 600 = 0.761 \text{ (A)}$

由此可见，气隙虽然很短，仅为 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，但其磁位降却占整个磁路的 78%。

11. 一铁环的平均半径为 0.3 m ，铁环的横截面积为一直径等于 0.06 m 的圆形，在铁环上绕有线圈，当线圈中电流为 5 A 时，在铁心中产生的磁通为 0.0037 Wb ，试求线圈应有匝数。铁环所用材料为铸钢，其磁化曲线见附录 E。

解：铁环中磁路平均长度： $l = 2\pi R = 2\pi \times 0.3 = 1.89 \text{ (m)}$

圆环的截面积： $S = \pi D^2 / 4 = \pi \times 0.06^2 / 4 = 2.83 \times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$

铁环内的磁感应强度： $B = \Phi / S = 0.0037 / 2.83 \times 10^{-3} = 1.3 \text{ (T)}$

查附录 E 磁化曲线得磁感应强度： $H = 1500 \text{ (A)}$

$$F = Hl = 1500 \times 1.89 = 2835 \text{ (A)}$$

故线圈应有的匝数为 $N = F / I = 2835 / 5 = 567 \text{ (匝)}$

12. 在图 1-5 所示的有分支磁路中，磁路由硅钢片叠成，磁路各截面的净面积相等，为 $S = 2.5 \times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$ ，磁路平均长 $l_1 = 0.5 \text{ m}$ ， $l_2 = 0.5 \text{ m}$ ， $l_3 = 0.25 \text{ m}$ （不包括气隙 δ ）， $\delta = 0.2 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。已知空气隙中的磁通量 $\Phi = 4.6 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ ，又 $N_2 i_2 = 10300 \text{ A}$ ，求另外两支路中的 Φ_1 、 Φ_2 及 $N_1 i_1$ 。其磁化曲线见附录 E。

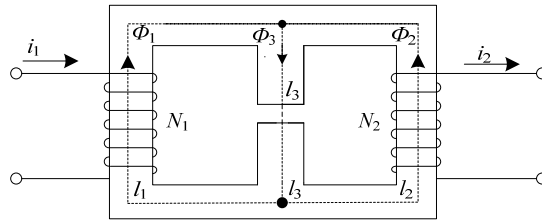


图 1-5 有分支磁路

解：在空气隙处，当不考虑气隙的边缘效应时：

$$B_3 = \Phi / S = 4.6 \times 10^{-3} / 2.5 \times 10^{-3} = 1.84 \text{ (T)}$$

$$H_0 = B_3 / \mu_0 = 1.84 / 4\pi \times 10^{-7} = 1.464 \ 968 \times 10^6 \text{ (A/m)}$$

中间磁路 l_3 中，根据硅钢片磁化曲线查出 $H_{Fe} = 14 \ 600 \text{ A/m}$

由右侧回路可求：

$$\begin{aligned} H_2 l_2 &= N_2 i_2 - (2H_{Fe} l_3 + H_0 \delta) \\ &= 10 \ 300 - (2 \times 14 \ 600 \times 0.25 + 1.464 \ 968 \times 10^6 \times 0.2 \times 10^{-2}) \\ &= 10 \ 300 - (7 \ 300 + 2 \ 929.94) = 70 \text{ (A)} \end{aligned}$$

$$H_2 = 70 / 0.5 = 140 \text{ (A/m)}$$

根据硅钢片磁化曲线查出 $B_2 = 0.75 \text{ T}$

$$\Phi_2 = B_2 S = 0.75 \times 2.5 \times 10^{-3} = 1.875 \times 10^{-3} \text{ (Wb)}$$

$$\Phi_1 = \Phi_3 - \Phi_2 = (4.6 - 1.875) \times 10^{-3} = 2.725 \times 10^{-3} \text{ (Wb)}$$

$$B_1 = \Phi_1 / S = 2.725 \times 10^{-3} / 2.5 \times 10^{-3} = 1.09 \text{ (T)}$$

根据硅钢片磁化曲线查出： $H_1 = 400 \text{ A/m}$

按由左侧回路可求：

$$\begin{aligned} N_1 i_1 &= H_1 l_1 + (2H_{Fe} l_3 + H_0 \delta) \\ &= 400 \times 0.5 + (2 \times 14 \ 600 \times 0.25 + 1.464 \ 968 \times 10^6 \times 0.2 \times 10^{-2}) \\ &= 10 \ 429.94 \text{ (A)} \end{aligned}$$

或按大回路可求： $N_1 i_1 = N_2 i_2 + H_1 l_1 - H_2 l_2 = 10 \ 300 + 200 - 70 = 10 \ 430 \text{ (A)}$

1.4 自测题

1. 电机和变压器常用的铁心材料为_____。
2. 恒压直流铁心磁路中，如果增大空气气隙，则磁通_____、电感_____、电流_____；如果是恒压交流铁心磁路，则空气气隙增大时，磁通_____、电感_____、电流_____。
3. 在磁路中与电路中的电动势作用相同的物理量是_____。
4. 铁磁材料的磁导率_____非铁磁材料的磁导率。
5. 在铁心中通过的磁通、并在能量传递或转换过程中起耦合场的作用，这部分磁通称为_____，这部分磁通一般很_____；而经过空气隙闭合的为_____。

的磁路，这部分磁通量一般很_____。

6. 通电螺线管电流方向如图 1-6 所示，请画出铁心磁力线方向。
7. 请画出图 1-7 所示磁场中载流导体的受力方向。

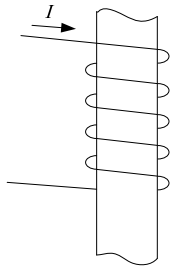


图 1-6 通电螺线管

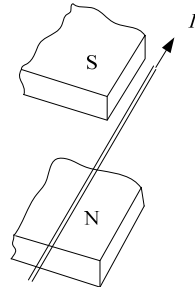


图 1-7 自测题 7 图

8. 请画出图 1-8 所示运动导体产生感应电动势的方向。
9. 螺线管中磁通与电动势的正方向分别如图 1-9 (a), (b) 所示，当磁通变化时，分别写出它们之间的关系式。

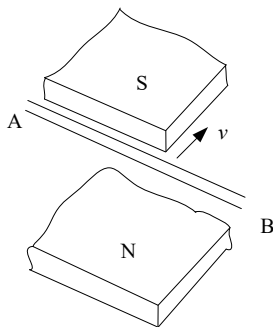


图 1-8 自测题 8 图

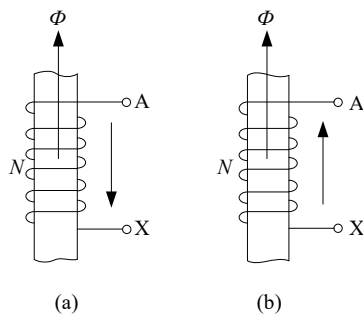


图 1-9 自测题 9 图

10. H 与 B 的主要区别是什么？
11. 电机中如何减小铁耗？
12. 交流磁路不同于直流磁路的特点有哪些？
13. 图 1-10 所示的磁路由两块铸钢铁心及它们之间的一段空气隙构成。各部分尺寸为 $l_0/2 = 0.5 \text{ cm}$, $l_1 = 30 \text{ cm}$, $l_2 = 12 \text{ cm}$, $S_0 = S_1 = 10 \text{ cm}^2$, $S_2 = 8 \text{ cm}^2$ 。线圈中的电流为直流电。如果要求在空气隙处的磁感应强度 $B_0 = 1 \text{ T}$ ，问需要多大的磁动势？

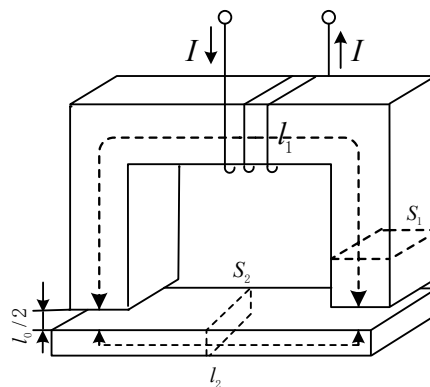


图 1-10 自测题 13 图

1.5 课后习题

1-1 电机的磁路常用什么材料构成？这种材料有哪些主要特征？

1-2 试比较磁路和电路的相似点与不同点。

1-3 在磁路计算中，全电流定律有什么用处？如何使用？

1-4 漏电感的物理意义？漏电感和励磁电感的大小和哪些量有关？

1-5 感应电动势 $e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt}$ 中的负号有什么意义？

1-6 变压器电动势、运动电动势产生的原因有什么不同？其大小与哪些因素有关？

1-7 有两个匝数相等的线圈，一个绕在闭合铁心上，一个绕在木质材料上，哪一个自感系数大？哪一个自感系数是常数？哪一个自感系数是变数？随什么原因变化？如果是空气芯线圈又如何？

1-8 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的？它们的大小与哪些因素有关？

1-9 一个铁心线圈，电阻为 $2\ \Omega$ ，当将其接入 $110\ \text{V}$ 交流电源时，测得输入功率为 $90\ \text{W}$ ，电流为 $2.05\ \text{A}$ ，试求此铁心的铁心损耗。

1-10 如图 1-11 所示，若线圈电阻为 R ，接到电压为 U 的直流电源上，如果改变气隙的大小，问铁心内的磁通 Φ 和线圈中的电流 I 将如何变化？若线圈电阻可忽略不计，但线圈接到电压有效值为 U 的工频交流电源上，如果改变气隙大小，问铁心内磁通和线圈中电流是否变化？

1-11 如图 1-11 所示，如果铁心用硅钢片叠成，截面面积 $S = 12.25 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$ ，铁心的平均长度 $l = 0.4\ \text{m}$ ，空气隙 $\delta = 0.5 \times 10^{-3}\ \text{m}$ ，线圈的匝数 $N = 500$ 匝，试求产生磁通 $\Phi = 10.9 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$ 时所需的励磁磁动势和励磁电流。

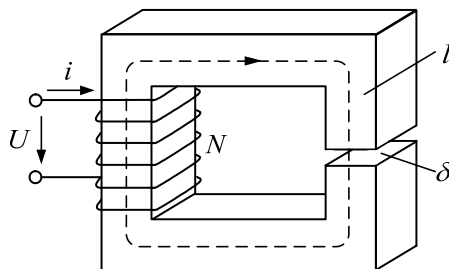


图 1-11 铁心线圈电路