



# 目 录

绪论.....	1
---------	---

## 第一篇 磁路与变压器

<b>第一章 磁路及磁路计算.....</b>	<b>5</b>
第一节 磁场的基本知识 .....	5
第二节 铁磁材料的磁性能.....	6
第三节 磁路与磁路定律.....	9
第四节 磁路计算方法.....	12
小结.....	14
思考题与习题.....	14
<b>第二章 变压器.....</b>	<b>15</b>
第一节 变压器的基本作用原理与分类.....	15
第二节 变压器的构造.....	16
第三节 变压器的额定值.....	19
小结.....	20
思考题与习题.....	20
<b>第三章 变压器的基本原理.....</b>	<b>20</b>
第一节 变压器的空载运行.....	21
第二节 变压器的负载运行.....	26
第三节 等值电路参数的测定.....	34
第四节 标么值.....	36
第五节 变压器的运行性能.....	37
小结.....	41
思考题与习题.....	41
<b>第四章 三相变压器和其他用途的变压器.....</b>	<b>42</b>
第一节 三相变压器.....	43
第二节 仪用互感器.....	47
第三节 自耦变压器.....	49
第四节 电焊变压器.....	51
小结.....	52
思考题与习题.....	53

## 第二篇 异步电动机

<b>第五章 异步电动机的构造及其基本作用原理.....</b>	<b>55</b>
----------------------------------	-----------

第一节	异步电动机的构造	55
第二节	异步电动机的基本作用原理	58
第三节	异步电动机的铭牌数据	59
第四节	异步电动机在船舶上的应用	62
小结		63
思考题与习题		63
<b>第六章</b>	<b>交流电机的绕组及其磁势和电势</b>	64
第一节	交流绕组的构成原理和接线方法	64
第二节	交流绕组的磁势和磁场	76
第三节	交流绕组的电势	89
小结		97
思考题与习题		97
<b>第七章</b>	<b>三相异步电动机的运行分析</b>	98
第一节	三相异步电动机的空载运行	99
第二节	三相异步电动机的负载运行	102
第三节	三相异步电动机的功率、转矩和运行特性	114
小结		125
思考题与习题		126
<b>第八章</b>	<b>电机的发热与冷却</b>	127
第一节	电机中常用的绝缘材料和容许温度	127
第二节	电机发热与冷却的一般规律	129
第三节	按发热条件确定电机的额定值	131
第四节	电机过热故障分析	133
小结		135
思考题		135
<b>第九章</b>	<b>三相异步电动机的起动、调速和制动</b>	135
第一节	三相异步电动机的起动	136
第二节	三相异步电动机的调速	144
第三节	三相异步电动机的制动	149
小结		153
思考题与习题		154
<b>第十章</b>	<b>三相异步电动机的单相运行与单相异步电动机</b>	154
第一节	三相异步电动机的单相运行	155
第二节	单相异步电动机	156
小结		159
思考题与习题		159

### 第三篇 同步电机

<b>第十一章</b>	<b>同步电机的主要类型和构造</b>	160
第一节	同步电机的主要类型及其结构特点	160

第二节	中、小型同步电机的构造	161
第三节	同步电机的铭牌数据与标么值	163
第四节	几种国产船用同步发电机简介	165
小结		166
思考题与习题		166
<b>第十二章</b>	<b>同步发电机的运行原理</b>	167
第一节	同步发电机的空载运行	167
第二节	对称负载时的电枢反应	170
第三节	隐极同步发电机的电压平衡方程、相量图和等值电路	173
第四节	凸极同步发电机的电压平衡方程和相量图	175
小结		179
思考题与习题		180
<b>第十三章</b>	<b>同步发电机的主要特性</b>	181
第一节	空载特性和短路特性	181
第二节	零功率因数负载特性	184
第三节	同步发电机的外特性和调整特性	188
第四节	用磁势—电势相量图求电压变化率和额定激磁电流	189
第五节	转矩、功率平衡方程、效率特性	191
小结		192
思考题与习题		192
<b>第十四章</b>	<b>同步发电机的三相突然短路</b>	194
第一节	超导体磁链守恒原理	194
第二节	三相突然短路的主要电磁过程	195
第三节	超瞬变电抗和瞬变电抗	196
第四节	不考虑绕组电阻时的突然短路电流	198
第五节	三相突然短路电流的衰减及其时间常数	199
小结		201
思考题与习题		201
<b>第十五章</b>	<b>同步发电机的并联运行</b>	201
第一节	投入并联的条件和方法	202
第二节	并联运行同步发电机的功角特性和有功功率的调节	204
第三节	并联运行同步发电机无功功率的调节和V形特性	208
第四节	同步发电机与相近容量的电网并联运行	209
小结		210
思考题与习题		211
<b>第十六章</b>	<b>同步电动机</b>	211
第一节	同步电动机的运行原理	211
第二节	同步电动机的起动	216
第三节	反应式同步电动机	217
小结		218

思考题与习题	218
--------	-----

## 第四篇 直流电机

<b>第十七章 直流电机的构造</b>	220
第一节 直流电机的基本作用原理和结构概述	220
第二节 直流电机空载时的磁场	224
第三节 直流电枢绕组及其感应电势	225
第四节 直流电机的原理图和按激磁方式分类	231
小结	231
思考题与习题	232
<b>第十八章 直流发电机</b>	233
第一节 直流发电机的空载运行	233
第二节 直流发电机的电枢反应	236
第三节 电压平衡方程、外特性和调整特性	237
第四节 电磁转矩、转矩平衡和功率平衡方程	241
小结	244
思考题与习题	244
<b>第十九章 直流电动机</b>	245
第一节 直流电动机的运行原理	245
第二节 直流电动机的主要特性	249
第三节 直流电动机的起动	254
第四节 直流电动机的调速	255
第五节 直流电动机的电磁制动	259
〔附录〕 双输出直流发电机的基本原理及其特点	262
小结	264
思考题与习题	264
<b>第二十章 直流电机的换向</b>	266
第一节 换向过程和换向火花	266
第二节 产生火花的电磁原因及改善换向的措施	268
第三节 产生火花的机械原因及排除方法	271
小结	272
思考题与习题	273

## 第五篇 控制电机

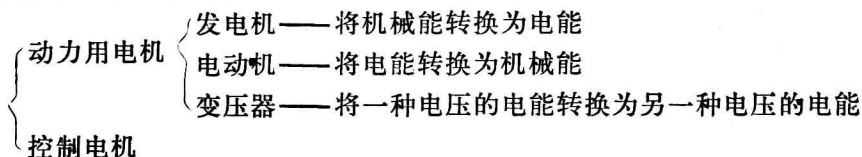
<b>第二十一章 伺服电动机</b>	274
第一节 伺服电动机的作用与分类	274
第二节 直流伺服电动机	275
第三节 交流伺服电动机	284
小结	297
思考题	297

<b>第二十二章 测速发电机</b> .....	298
第一节 测速发电机的作用与分类.....	298
第二节 直流测速发电机.....	300
第三节 交流测速发电机.....	302
小结.....	307
思考题.....	308
<b>第二十三章 自整角机</b> .....	309
第一节 自整角机的用途和分类.....	309
第二节 自整角机的结构特点.....	311
第三节 力矩式自整角机.....	313
第四节 控制式自整角机.....	319
第五节 差动式自整角机简介.....	324
第六节 自整角机的技术数据及其使用中的一些问题.....	325
小结.....	328
思考题.....	329
<b>第二十四章 旋转变压器</b> .....	329
第一节 旋转变压器的分类.....	329
第二节 旋转变压器的结构特点.....	330
第三节 正余弦旋转变压器的工作原理.....	330
第四节 线性旋转变压器.....	333
第五节 旋转变压器的应用举例.....	335
小结.....	335
思考题.....	336
<b>第二十五章 步进电动机</b> .....	336
第一节 反应式步进电动机的结构和工作原理.....	336
第二节 反应式步进电动机的基本特点.....	339
第三节 步进电动机的主要性能指标和运行中的一些问题.....	341
小结.....	343
思考题.....	344
主要参考书目.....	345

# 绪 论

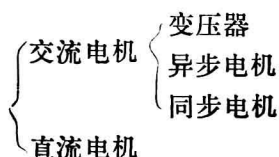
## 一、电机的分类及其在船舶上的应用

电机是一种利用电磁基本定律制成的能量转换装置，在国民经济的各个领域中都得到了广泛的应用。其种类是多种多样的，按其用途可分为：



控制电机的种类很多，其结构和基本作用原理与相应的动力用电机类似。它的作用是在控制系统中完成一定的控制任务——控制信号的转换、放大和执行。在结构和性能上有着与动力用电机不同的特殊要求，而各种不同的控制电机之间往往又有类似之处。因此，本书将专门讨论。

在讨论电机的结构和作用原理时，按照能量转换时涉及的电能种类分类更为方便。电机按电能的种类分为



以上各类电机在船舶上都得到了广泛的应用。一艘现代化的船舶使用的电机往往不下数百台。例如，船舶需要自备独立的发电站，发电机是船舶发电站中的主要设备之一；各种甲板机械——舵机、锚机、绞缆机、起货机等电力拖动系统，要用电动机作为原动机；电动机还作为各种主机、辅机服务的泵、通风机等原动机；控制系统和导航仪器中往往采用很多控制电机；船员生活中的电气用具要用到许多分马力电动机等等。

## 二、船用电机的特点

船用电机通常是相应的陆用电机的派生系列，它的特点主要是由船舶的特殊环境决定的。

船用电机必须适应高温、高湿、有盐雾、油雾和霉菌的环境。我国《钢质海船入级与建造规范》规定，对无限航区船舶上的电机应按环境温度为45℃（安装在机器处所的电机为50℃）来设计制造。船用电机的绝缘要用耐热、耐潮和耐油雾的材料，并应加强绝缘处理，使之在船舶环境中仍有良好的绝缘性能；导电部分要用铜或铜合金制造；对铭牌和机械零部件都要采取防腐蚀措施。船用电机必须通过“湿热试验”、“霉菌试验”和“盐雾试验”（俗称“三防”试验），以考核其防潮、防霉和防腐蚀性能是否合格。

船用电机必须能适应船舶在恶劣海况下的倾斜摇摆，能承受船舶正常营运所产生的振动

和冲击。规范规定，当船舶从正浮位置倾斜到下列各种情况时，电气设备应能有效地工作：

横倾 $15^\circ$ ；纵倾 $7.5^\circ$ ；横摇 $22.5^\circ$ 。

应急设备在船舶横倾 $22.5^\circ$ 或纵倾 $10^\circ$ 时，应能有效地工作。为此，对船用电机必须采取相应的措施。例如，所有机械部件要有足够的强度和刚度，轴承要能承受一定的轴向力；连接和紧固用的螺钉和螺母应有防止其受振动而松脱的措施。船用电机应通过“振动试验”、“冲击试验”和“倾斜试验”，以考验上述性能是否合格。

由于船舶电站的容量相对较小，且工况复杂，负载变化很大，所以电气设备(包括电机)应能在下列电压和频率变化的情况下可靠地工作：

直流电气设备：电压变化为额定电压的 $(+6\% \sim -10\%)$ 。

交流电气设备：电压变化为额定电压的 $(+6\% \sim -10\%)$ ；

频率变化为额定频率的 $\pm 5\%$ 。

这就要求船用电机要有一定的温升裕量、较高的过载能力和起动力能等。

要求船用电机产生的电磁干扰不危及通信、航行设备及其它有关安全航行设备的性能。例如应对直流电机换向火花产生的干扰进行屏蔽等。

### 三、研究电机的方法和步骤

电机作为一种进行机—电能量转换的电磁装置，所涉及的问题是多方面的，不仅有电、磁问题，而且涉及到机械运动、发热和冷却等问题，在分析时，将大致遵循以下步骤：

首先根据电机的构造(对掌握运行原理来说，主要是磁路和绕组)，分析电机的磁势与磁场。由于电机在实现机—电能量转换时，是以“磁场”为媒介的，所以了解磁场的性质是进一步分析的基础。在分析电机的磁场后，将利用物理学和电路等课程中学过的基本定律，列出电机的基本关系式，主要是电压平衡方程、磁势平衡方程、转矩平衡方程和功率平衡方程。此时将遇到性质不同的许多物理量，其中特别重要的是感应电势和电磁转矩，因为它们是分别联系电源方面和机械方面的重要物理量。最后，求解基本关系式，或利用这些关系式进行定性分析，得到电机的主要运行特性和重要的运行数据。

电机实验是研究电机的一个重要方面。通过实验可以测定电机的参数和运行特性；可以观察电机运行的许多现象，得到感性认识，培养分析能力，逐步熟悉电机的运行情况。

本书将采用传统电机学的分析方法，根据电机具体的结构型式，分别对各种电机进行分析，并且主要是研究电机的稳定运行规律。其它的问题，例如暂态分析，可作为专题来处理。这种方法的缺点是，要涉及各种不同型式电机的许多细节问题，显得较繁杂，而且稳定运行的分析方法大多不能用于暂态等等。但是能使读者对各种电机有更具体、更实用的知识，这对船电专业的读者是必要的。

### 四、研究电机的基本定律

研究电机运行原理的理论基础主要是：能量守恒原理、牛顿力学定律、电路和磁路的基本定律、电磁感应定律和电磁力定律。

能量守恒原理是指，在质量守恒的物理系统中，能量既不能产生，也不能消灭，仅能改变其存在的形式。在研究电机时，当然也必须遵循这一基本原理。

有关磁路的基本概念和磁路定律，将在第一章介绍。下面简单说明其余几个基本定律。

#### 1. 牛顿力学定律



旋转电机是一种涉及机械运动的电气设备，研究其运行原理时，需要应用牛顿力学定律，即牛顿第一定律（惯性定律）、第二定律（运动定律）和第三定律（作用力与反作用力定律）。

因为电机的转动部分（转子）是以固定轴线作旋转运动的，所以在电机学中，牛顿定律常以“转矩平衡”的形式出现。作用在转子上的转矩（ $M$ ），如果其方向与旋转方向相同，称为拖动（或称驱动）转矩，与转向相反的转矩称为制动转矩。当

$$\text{拖动转矩} = \text{制动转矩}$$

或

$$\Sigma M = \text{拖动转矩} - \text{制动转矩} = 0$$

时，电机保持原有的转速（ $n$ ）或角速度（ $\Omega$ ）不变。转矩平衡是电机稳定运行的必要条件之一。当拖动转矩（令其为正值）与制动转矩（令其为负值）的代数和  $\Sigma M \neq 0$  时，转子将加速或减速，即电机的角加速度  $\frac{d\Omega}{dt} \neq 0$ ，据牛顿第二定律有

$$\Sigma M = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (0-1)$$

式中： $J$ ——转动部分的转动惯量；

$J \frac{d\Omega}{dt}$ ——动态转矩（惯性转矩）。

上式表示拖动转矩与制动转矩的代数和等于动态转矩。

## 2. 电路定律

电路定律主要是指基尔霍夫第一定律和第二定律。

基尔霍夫第一定律（电流定律）是指，在电路的任一节点处，流入该节点的电流必定等于流出该节点的电流，电流的代数和恒等于零，即

$$\Sigma I_i = 0 \quad (0-2)$$

式中： $I_i$ ——连接到该节点的任一支路的电流。

在交流电路中， $I_i$ 可以是瞬时值或相量。列方程时，电流的正负由假定正方向（参考方向）是流入还是流出该节点来确定，如流出节点的电流为正，则流入节点的为负。

基尔霍夫第二定律（电压定律或回路定律）是指，电路中任一回路内各段电压的代数和为零，即

$$\Sigma U = 0 \quad (0-3)$$

当电压的参考方向与选用的绕行回路的方向一致时，电压前的符号为正，反之为负。上式用于交流电路时，可以是电压的瞬时值或相量。

我国电机学教科书中，习惯采用感应电势  $E$ （电压升），并用箭头表示电势和电压（降）的参考方向，如图 0-1 所示。这时，回路定律可写成电势的代数和等于电压（降）的代数和的形式，图 0-1 电路的回路方程为

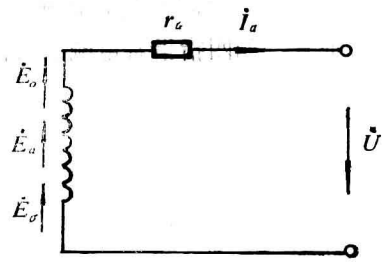


图0-1 说明回路定律的电路图

$$\dot{E}_o + \dot{E}_a + \dot{E}_e = \dot{U} + \dot{I} r_a \quad (0-4)$$

## 3. 电磁感应定律

电磁感应定律是指：匝链线圈的磁通如发生变化，便要在该线圈中感生电势。感应电势

的大小等于匝链该线圈的磁链的变化率。

上述感应电势的方向，可用楞次定律来判定。楞次定律是指：设想线圈闭合，那么，感应电势引起的电流(感生电流)所产生的磁通，总是反对引起感生电流的磁通的变化。当选用感应电势 $e$ 的参考方向与磁通 $\varphi$ 的参考方向符合右手螺旋关系时(参看图0-2)，可将电磁感应定律表示为

$$e = -W \frac{d\varphi}{dt} \quad (0-5)$$

式中： $W$ ——线圈的匝数；

$\frac{d\varphi}{dt}$ ——磁通的变化率， $Wb/s$ ；

$e$ ——感应电势， $V$ 。

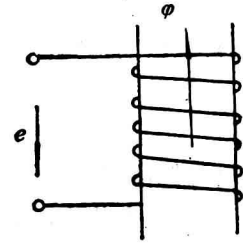


图0-2 电磁感应定律和楞次定律

电磁感应定律的另一种表达方式为：如果导体在磁场中作切割磁力线的运动，该导体中便将感生电势，其数值为

$$e = Blv \quad (0-6)$$

式中： $B$ ——导体所在处的磁感应强度， $Wb/m^2$ ；

$l$ ——导体在磁场中的长度， $m$ ；

$v$ ——导体在垂直于磁场方向上的速度， $m/s$ ；

$e$ ——感应电势， $V$ 。

这种运动电势的方向可用右手定则判定，即将右手掌心对着磁场( $B$ )的方向，大拇指与平伸的其余四指垂直，如大拇指指着导体垂直切割磁场的方向，则平伸的四指便指出了感应电势的方向。

#### 4. 电磁力定律

电磁力定律说明了载流导体在磁场中受到力的作用的规律，即磁场与导体中的电流作用产生电磁力，若磁场与导体相互垂直，则作用在导体上的电磁力为

$$f = Bli \quad (0-7)$$

式中： $B$ ——导体所在处的磁感应强度， $Wb/m^2$ ；

$i$ ——导体中的电流， $A$ ；

$l$ ——导体在磁场中的长度， $m$ ；

$f$ ——电磁力， $N$ 。

电磁力的方向可由左手定则确定：用左手掌心对着磁场( $B$ )的方向，大拇指与平伸的其余四指垂直，如四指指着电流的方向，则大拇指所指方向就是电磁力的方向。

# 第一篇 磁路与变压器

## 第一章 磁路及磁路计算

### 内 容 提 要

磁场的基本知识；铁磁材料的磁性能；磁路与磁路定律；磁路计算。

### 第一节 磁场的基本知识

电机是一种电磁机械。在分析中经常用到一些磁场的基本知识，下面简单重述物理学中的有关内容。

#### 一、磁感应强度、磁通和磁通连续性原理

磁场是电流产生的，或者说任何载流导体都要在其周围空间产生磁场。表征磁场的物理量是磁感应强度  $B$ ， $B$  的方向就是磁场的方向， $B$  的大小（单位正电荷以单位速度向与磁场垂直的方向运动时所受到的磁场力）表征磁场的强弱， $B$  的单位是韦伯/米<sup>2</sup>(Wb/m<sup>2</sup>)或特斯拉(T)。还常用磁力线(磁感应线)形象的表示磁场，这样，在空间任一点上磁力线的切线方向就表示该点磁感应强度  $B$  的方向，磁力线的疏密表示  $B$  的大小（单位面积上所穿过的磁力线根数正比于  $B$  的大小）。磁力线是环绕电流的闭合回线，其方向与电流方向符合右手螺旋关系，各磁力线既不相交，也不中断。如果磁力线是一组疏密均匀、方向一致的平行线，则各点的  $B$  相同，这种磁场称为均匀磁场。

通过面积  $S$  的磁感应强度的通量称为磁通，用  $\Phi$  表示，单位为韦伯(Wb)。在均匀磁场中，通过垂直于磁场的面积  $S$  的磁通是

$$\Phi = BS \quad (1-1)$$

从式(1-1)可以得到

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

因此磁感应强度  $B$  又称为磁通密度，简称磁密。如果穿过垂直于  $\vec{B}$  的单位面积的磁力线数等于  $B$ ，则磁通就是穿过整个面积  $S$  的磁力线的总数。在一般情况下，若通过面积元  $dS$  的磁通为

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

则通过面积  $S$  的磁通为

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1-3)$$

由于磁力线是闭合回线，因此穿入与穿出闭合曲面的磁力线数必然相等，通过任一闭合

曲面的总磁通为零(参看图1-1), 即

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (1-4)$$

这就是磁通连续性原理。

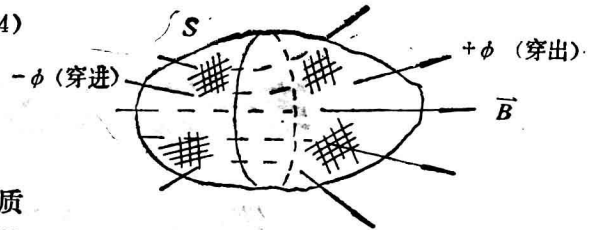


图1-1 磁通连续性原理

## 二、磁场强度、安培环路定律

实验表明, 同样大小的电流在不同的介质中将产生强弱不同的磁场, 为了更方便的计算

磁场, 引用了称为磁场强度的物理量  $\vec{H}$ 。在各向同性的介质中,  $\vec{H}$  与  $\vec{B}$  的关系是

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (1-5)$$

式中:  $\vec{H}$  的单位为安/米(A/m);  $\vec{B}$  为特斯拉(T);  $\mu$  是磁导率, 表征物质的导磁性能, 单位为亨/米(H/m)。真空的磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ , 物质的磁导率可以表示为

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-6)$$

$\mu_r$  叫相对磁导率, 是一个没有量纲的比例系数。

引用磁场强度  $\vec{H}$  后, 可得到磁场计算中的基本定律——安培环路定律, 用公式表达为

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \quad (1-7)$$

上式表示: 磁场强度沿任一闭合路径的线积分, 等于该回路包围的电流的代数和。电流的正负要看它的方向与回路的方向是否符合右手螺旋关系而定, 在图1-2中,  $I_2$  与  $I_3$  为正,  $I_1$  为负。安培环路定律也称为全电流定律, 是磁路计算的基础。

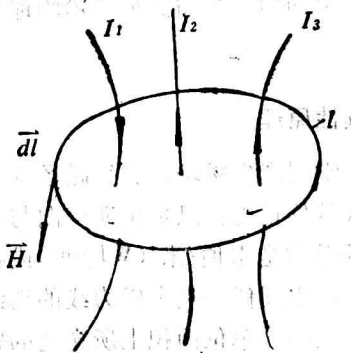


图1-2 安培环路定律

## 第二节 铁磁材料的磁性能

### 一、铁磁材料的导磁性能

物质按磁性能分为反磁物质、顺磁物质和铁磁物质三类。反磁物质的  $\mu_r < 1$ , 顺磁物质的  $\mu_r > 1$ , 但无论是反磁物质还是顺磁物质,  $\mu_r$  都接近 1, 用这些物质制成的材料统称为非铁磁材料(或非导磁材料), 例如铜、铝、绝缘材料、油类、空气等。铁磁物质(铁、钴、镍及其合金)则作为导磁材料, 其磁导率很高,  $\mu_r = 10^2 \sim 10^5$ , 变压器和电机铁芯所用的硅钢片的  $\mu_r = 2000 \sim 6000$ 。

铁磁材料之所以有高导磁性能, 是因为铁磁材料内部存在很多强烈磁化了的自发磁化区域, 称为磁畴。磁化前, 这些磁畴杂乱地排列着, 其磁场互相抵消, 不显示磁性。但在外磁场作用下, 这些磁畴沿着外界磁场的方向作有规则的排列, 顺着外磁场方向的磁畴扩大, 逆着外磁场方向的磁畴缩小, 从而形成一个附加磁场叠加在外磁场上。由于每个磁畴原来都是强烈磁化了的, 所以它们产生的附加磁场要比非铁磁材料在同一外磁场下所产生的强得多, 所以铁磁材料的磁导率很高。

铁磁材料的导磁性能的另一个特点是 $\mu \neq$ 常数,  $B$ 与 $H$ 的关系呈非线性,  $B = f(H)$ 为曲线, 称为磁化曲线, 如图 1-3 所示(非铁磁材料的 $\mu \approx \mu_0 =$ 常数,  $B \approx \mu_0 H$ ,  $B = f(H)$ 为直线)。磁化曲线大致可分为三段: 在磁化开始时, 即图中  $Oa$  段, 随着 $H$ 的增加 $B$ 缓慢增加;  $ab$ 段, 随着 $H$ 的增加 $B$ 迅速增加;  $H$ 增大到一定的数值, 即增到图中 $b$ 点(称为膝点)后, 随着 $H$ 的增加,  $B$ 的增加又缓慢下来。与此相对应,  $\mu = \frac{B}{H}$ 也随 $H$ 的变化而变化, 参看图中的 $\mu = f(H)$ 曲线。上述这种 $H$ 增加时,  $B$ 的增加变慢, 即 $B = f(H)$ 曲线的斜率减小, 导磁率变小的现象, 称为磁饱和。

磁饱和现象可用磁畴观点解释。在 $Oa$ 段, 外磁场微弱, 磁畴仅发生可逆的体积改变(与外磁场方向一致的磁畴体积扩大),  $B$ 值上升缓慢。在 $ab$ 段, 外磁场已足够强, 与外磁场方向一致的磁畴发生不可逆的体积扩大, 并且逆着外磁场方向的磁畴纷纷翻转到接近于外磁场的方向, 故 $B$ 迅速上升。在 $b$ 点以后, 因为大部分磁畴都已在接近外磁场方向取向, 所以即使大幅度增加 $H$ 值, 也只能使磁畴作较小的转向,  $B$ 值上升有限, 呈现饱和现象。

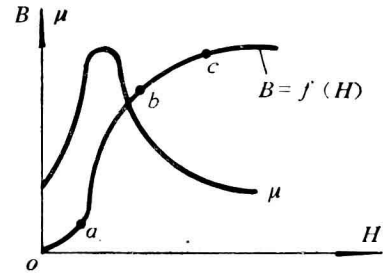


图1-3 铁磁材料的磁化曲线

上述 $B = f(H)$ 曲线是在初始磁化时,  $H$ 由零单调增大的情况下获得的, 称为起始磁化曲线。

## 二、磁滞现象

铁磁材料在交变磁化时, 即使磁场强度 $H$ 由零增加到某值 $+H_{max}$ , 然后降低到零, 反向到 $-H_{max}$ , 再经零回到 $+H_{max}$ , 所得到的 $B-H$ 曲线将是图 1-4 所示的闭合曲线, 称为磁滞回线。

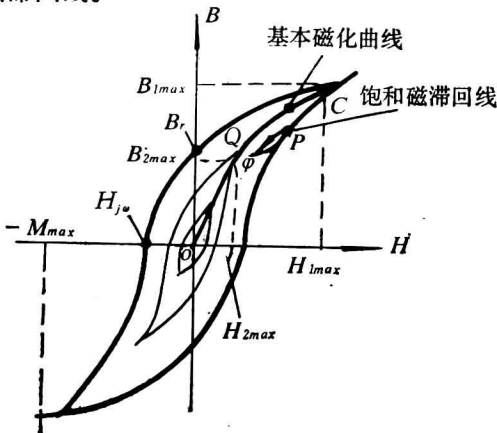


图1-4 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线

从磁滞回线可以看出, 上升磁化曲线(上升支)与下降磁化曲线(下降支)不重合。 $B$ 的变化总是滞后于 $H$ 的变化。当 $H$ 下降到零时,  $B$ 不是下降到零而是下降到 $B_r$ , 这种现象称为磁滞,  $B_r$ 称为剩余磁感强度, 简称剩磁。为使 $B$ 值回到零, 必须加以大小为 $H_{j0}$ 的反向磁场,  $H_{j0}$ 称为矫顽磁场强度, 俗称矫顽力。由于存在磁滞, 铁磁材料的磁化过程是不可逆的。 $B$ 与 $H$ 的关系不是单值的, 在某一 $H$ 下的 $B$ 值与以前的磁化过程有关。

产生磁滞现象的原因是, 磁畴在外磁场作用下发生扩大与转向时, 彼此之间产生摩擦。

由于这种“摩擦”的存在, 当外磁场停止作用后, 磁畴与外磁场方向一致的排列仍将部分地保留下来, 因此形成了剩磁。由于存在磁滞现象,  $H$ 在某一数值处增、减时, 也要形成局部磁滞回线, 如图1-4中的 $PQP$ 所示。

磁滞回线的大小与 $H_{max}$ 有关, 对应于不同的 $H_{max}$ 会形成不同的回线, 它们构成一组磁

滞回线族。图 1-4 中过  $C$  点的一条称为饱和磁滞回线， $H_{\max}$  大于  $C$  点数值时，回线基本不变。

根据磁滞回线的形状，一般将铁磁材料分为硬磁材料、矩磁材料和软磁材料。硬磁材料的磁滞回线宽，具有高的剩磁和高矫顽力如图 1-5b) 所示，由于硬磁材料一经磁化即能保持恒定磁性，所以又称为永磁材料。铝镍钴合金、稀土钴合金、永磁铁氧体等等都属于这一类，主要用作永久磁铁，永磁发电机的磁场和磁滞电动机的转子便是用这类材料制造的。矩磁材料(例如某些铁镍合金与软磁铁氧体)的磁滞回线接近正矩形，如图 1-5c) 所示。常用作计算机磁芯存储器，磁放大器中亦广泛应用。软磁材料的剩磁和矫顽力较小，磁滞回线狭窄，回线包围的面积较小，磁滞损耗小，磁导率高，如图 1-5a) 所示。变压器和电机铁芯的硅钢片便属于软磁材料。

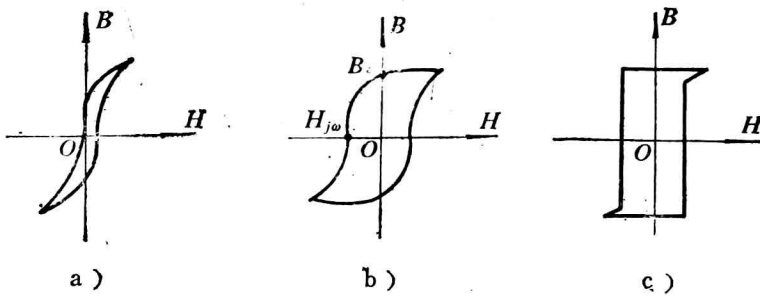


图1-5 三种不同的磁滞回线

硅钢片是钢中加入硅后轧制而成的。加硅可以增大钢的电阻率，减小损耗。含硅量多，损耗小，但变得脆而硬，不易加工。硅钢片有热轧和冷轧两种，我国目前生产的热轧硅钢片的型号有 D11、D12、D21、D22... D41、D42 等，型号中的字母 D 表示“电工钢片”，第一位数字表示含硅量的百分数(如 D21 含硅 2% 左右)；第二位数字表示铁耗的大小，数字大的表示铁耗小。

### 三、基本磁化曲线

在铁磁材料的磁滞回线族中，将一系列回线正顶点连接起来所得到的曲线，称为铁磁材料的基本磁化曲线，或称平均磁化曲线。

对于软磁材料来说，基本上可用基本磁化曲线来描述它的磁化情况，工程上所用的磁化曲线就是这种磁化曲线，因而一般把基本磁化曲线就称为磁化曲线，实际上基本磁化曲线与起始磁化曲线几乎重合。

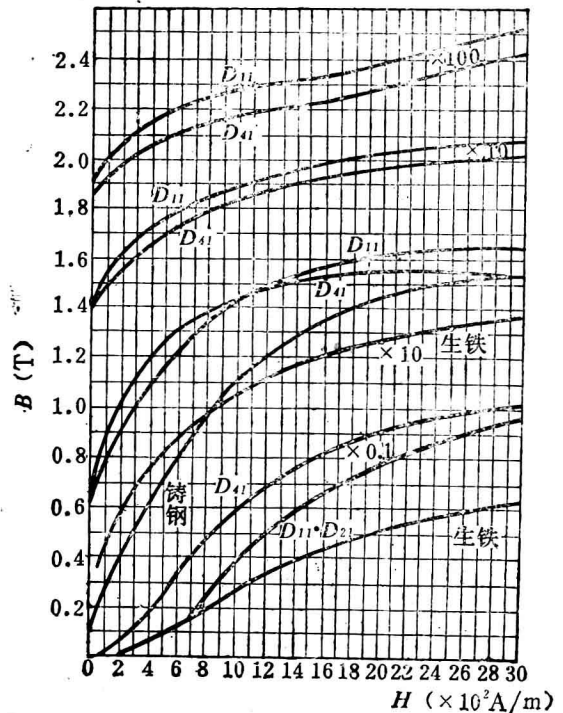


图1-6 几种材料的磁化曲线

磁化曲线在材料出厂时由制造厂提供，可以从有关的电工材料手册或电机设计手册中查到。图 1-6 表示了几种常用铁磁材料的磁化曲线。

#### 四、交变磁化时的能量损耗

铁磁材料在交变磁化时存在功率损耗，其中包括磁滞损耗和涡流损耗。

磁滞损耗是由磁滞现象引起的，与铁磁材料的磁滞回线面积成正比。试验表明，交变磁化时的磁滞损耗  $p_h$  与磁通交变频率成正比，与磁通密度幅值的  $\alpha$  次方成正比，即

$$p_h \propto f B^\alpha \quad (1-8)$$

对于硅钢片，当  $B_m = 1.0 \sim 1.6T$  时， $\alpha \approx 2$ 。为了减小磁滞损耗，电机的铁芯都采用磁滞回线狭窄的软磁材料，一般为硅钢片。

铁芯中的磁通交变时，根据电磁感应定律，铁芯内将感应电势，产生围绕磁通呈漩涡状流动的电流，称为涡流（参看图 1-7）。涡流在铁芯中引起的损耗叫涡流损耗。分析和试验表明，涡流损耗可表示为

$$p_\omega \propto \frac{f^2 B_m^2 d^2}{\rho} \quad (1-9)$$

式中： $f$ ——磁通交变的频率；

$B_m$ ——磁通密度幅值；

$d$ ——铁芯叠片的厚度；

$\rho$ ——铁芯叠片的电阻率。

式(1-9)说明：要减小涡流损耗，必须增大叠片的电阻率和减小叠片厚度。电机铁芯采用硅钢片，并且使钢片厚度较小（一般为  $0.35 \sim 0.5mm$ ），正是为了减少涡流损耗。

在电机和变压器中，通常把铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗合并在一起计算，统称为铁耗，以  $p_{Fe}$  表示，用下列经验公式计算：

$$p_{Fe} = p_{1/50} \left( \frac{f}{50} \right)^\beta B_m^2 G \quad (1-10)$$

式中： $p_{1/50}$ ——铁耗系数（或称比损耗），表示  $B_m = 1T$ ， $f = 50Hz$  时，每公斤硅钢片的损耗，可以从硅钢片产品目录中查得；

$\beta$ ——指数，一般取  $1.2 \sim 1.6$ ；

$G$ ——铁芯重量，kg。

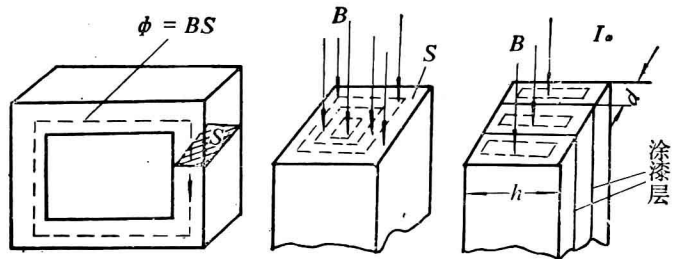


图 1-7 铁芯中的涡流和叠片方向  
a) 铁芯截面；b) 整块铁芯截面；c) 叠片铁芯截面

### 第三节 磁路与磁路定律

在电机和变压器中，为了获得较强的磁场，并且使磁通大部分局限在一定的区域之内，采用铁磁材料构成所谓磁路。由铁磁材料构成的、磁力线集中通过的路径称为磁路。图 1-8 为两种典型的磁路，其中，旋转电机的磁路中包含两段工作气隙。

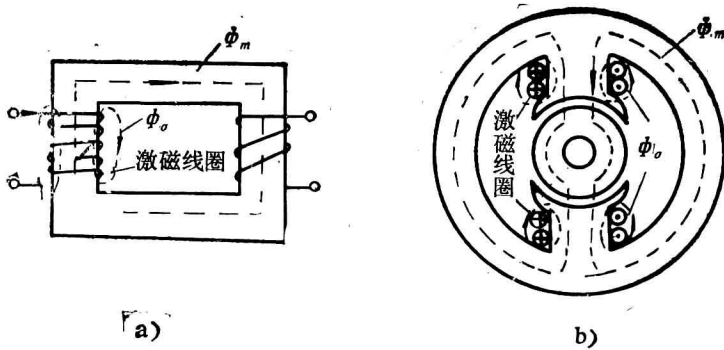


图1-8 两种典型的磁路  
a)单相变压器的磁路; b)旋转电机的磁路

电机的磁路通常用线圈通以电流的方式产生磁通,用以激励磁通的线圈称为激磁(或励磁)线圈,电流称为激磁电流。

在图1-8中:  $\Phi_m$ 为沿设计的磁路闭合的有效磁通,称为主磁通;还有一部分磁通  $\Phi_o$ 沿激磁线圈周围的非磁性物质闭合,称为漏磁通,漏磁通一般很小。但与电路相比,磁路中的漏磁现象远比电路中的漏电现象严重,这是因为铁芯材料的磁导率一般为非磁性物质的  $10^2 \sim 10^4$ 倍,而良导体的电导率与良好的绝缘材料的电导率之比,却可以高达  $10^{20}$ 倍。

下面介绍磁路定律,它们实际上是磁通连续性原理和安培环路定律在磁路中的简化的表达方式,是分析和计算磁路的基础。

### 一、磁路基尔霍夫第一定律

磁路基尔霍夫第一定律说明磁路节点处的磁通间的关系,其内容是:磁路节点处各支路的磁通的代数和恒等于零,即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-11)$$

若离开节点的磁通为正,则指向节点的磁通为负。

图1-9为一条有分支磁路,中间分支套有激磁线圈,称为铁柱(或铁芯),令其磁通为  $\Phi_1$ ;旁边的两条支路使磁路闭合,称为铁轭(或磁轭),令其磁通分别为  $\Phi_2$ 和  $\Phi_3$ ,分支处称为节点。对图中节点A运用磁路基尔霍夫第一定律,可得到各支路磁通间的关系为

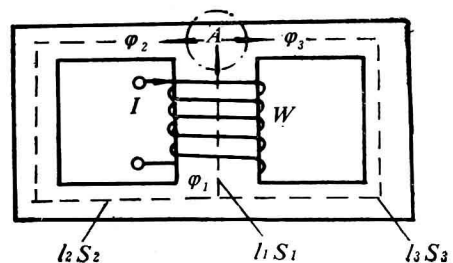


图1-9 有分支磁路

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

或写成

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$$

磁路基尔霍夫第一定律很容易由磁通连续性原理导出。对于图1-9节点A,设想作一个包围节点A的闭合曲面,根据磁通连续性原理,显然有

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \sum \Phi = -\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$



## 二、磁路基尔霍夫第二定律

磁路基尔霍夫第二定律可由安培环路定律导出，是安培环路定律应用于电机和变压器的多段磁路时的简化形式。

图 1-10 为一个带空气隙的铁芯线圈，具有多段磁路。根据材料和截面积的不同可分成三段：上下铁轭的截面积均为  $S_1$  可合为一段，平均长度为  $l_1$ ，左边铁柱为第二段，截面积为  $S_2$ ，平均长度为  $l_2$ ；空气隙为第三段，截面积为  $S_3$ ，长度为  $\delta$ 。不计漏磁通时，在同一磁路内，各截面的磁通相等，材料和截面积相同，因而各点的磁密和磁场强度相同。令三段磁路中的磁场强度分别为  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_\delta$ 。在应用安培环路定律 ( $\oint_1 \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum IW$ ) 时，取磁路中心线作积分路径，由于磁路中心线与平均磁力线重合，所以各点  $\vec{H}$  与  $d\vec{l}$  的方向相同，矢量线积分  $\oint_1 \vec{H} \cdot d\vec{l}$  可以用各段磁场强度与磁路长度的乘积的代数和代替，安培环路定律就可写成

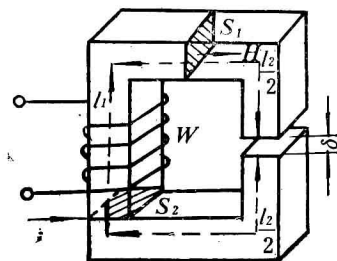


图1-10 多段磁路

推广到有几个激磁线圈，由  $n$  段磁路组成的闭合回路时，安培环路定律的形式为

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta \delta = IW \quad (1-12)$$

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum IW \quad (1-13)$$

式中： $IW = F$  称为磁(动)势，单位为安匝(A·t)， $\sum IW$  为作用在该磁路的总磁势； $H_k l_k$  称为第  $k$  段磁路的磁压降，也就是该段磁路消耗的磁(动)势。 $H_k$  为第  $k$  段单位长度的磁路上消耗的磁势。如果与电路类比，磁势  $F = IW$  对应于电势  $E$ ，磁压降  $Hl$  对应于电压降。 $H_k l_k$  与  $IW$  的正负按下述原则确定：当  $H$  与磁回路巡行方向一致时，该段磁路的磁压降  $H_k l_k$  为正，反之为负；当电流  $I$  的方向与回路巡行方向之间符合右手螺旋关系时，该线圈的磁势  $IW$  为正，反之为负。

式(1-13)便是基尔霍夫第二定律的表达式，它的含义是：在磁路的任一回路内，沿巡行方向的磁压降的代数和等于作用在该回路的磁势的代数和。

## 三、磁路欧姆定律

由于  $B = \mu H$ ，同时磁密等于磁通除以磁路截面积，即  $B = \frac{\Phi}{S}$ ，所以式(1-13)可以写成

$$F = IW = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu_k} \frac{\Phi}{S_k} l_k = \Phi \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu_k} \frac{l_k}{S_k} \quad (1-14)$$

令  $\frac{1}{\mu_k} \frac{l_k}{S_k} = R_{m_k}$ ， $R_{m_k}$  称为第  $k$  段磁路的磁阻。在与电路类比时，磁阻对应于电阻 ( $R =$

$\rho \frac{l}{S}$ ， $\rho$  为导体的电阻率， $l$  和  $S$  分别为导体的长度和截面积)。磁回路的总磁阻为