



国家电网公司  
电力科技著作出版项目



变电站

电气二次回路及抗干扰

BIANDIANZHAN  
DIANQIERCIHUILU  
JI KANGGANRAO

景敏慧 编著



中国电力出版社  
www.cepp.com.cn



国家电网公司  
电力科技著作出版项目

# 变电站 电气二次回路及抗干扰

景敏慧 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书主要介绍变电站的二次回路及相应的抗干扰措施等内容,全书分为三篇,即电流、电压互感器,变电站的二次回路和变电站二次回路抗干扰。具体又分为19章,分别是基础知识、互感器概述、电流互感器及接线、电压互感器及接线、电子式互感器、变电站直流系统、二次接线图的类型及识图、二次回路信号系统、传统变电站断路器控制回路、微机综合自动化变电站二次回路、智能变电站、隔离开关及其控制、同期及电压切换回路、电磁兼容基本概念、变电站常见的电磁干扰源、接地及使用、电磁干扰的传导路径、变电站的抗干扰措施和继电保护装置电磁兼容试验要求。

本书在编写过程中力求理论与实际相结合,讲述原理深入浅出,图文并茂,通俗易懂。

本书可供从事变电站二次回路工作的基建、运行、维护人员和继电保护工作者参考使用,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

变电站电气二次回路及抗干扰/景敏慧编著. —北京:中国电力出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-5123-0462-8

I. ①变… II. ①景… III. ①变电所-二次系统-抗干扰  
IV. ①TM645. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 092630 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 448 千字

印数 0001—3000 册 定价 50.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前言



随着微电子技术的发展，变电站二次回路及继电保护装置软硬件技术有了突飞猛进的发展。二次回路引入了网络技术，继电保护装置进入了智能化、快速化、小型化时代。与此同时，变电站的运行电压等级越来越高，运行环境也越来越严酷，强电磁环境给保护工作和测控工作带来了很大的困难。理论联系实际的书籍较少，因而很多员工在工作中往往是知其然而不知所以然，难免会因操作不当而引起事故。针对这种情况，作者结合多年的工作经验编写了这本《变电站电气二次回路及抗干扰》，旨在供各位同仁参考，并借此抛砖引玉，期待各位专家与学者发表更精彩的见解。

不论是继承传统，还是发展创新，了解技术发展的过程都是重要的。因为不管实现方式如何，基本要求总是不变的。就一般规律而言，传统的方法比较直观，容易建立起基本概念，在此基础上再谈发展，好学易懂，容易建立起完整的系统概念。加之目前运行状况是各种新旧方式均有存在的共同体，因此本书在这方面予以足够的关注。这是本书的编写特点之一。

二次回路及其设备与继电保护装置一样，在客观上具有两面性，一方面是它的基本性能，另一方面是它的实际使用性能。其实际使用性能包括在系统故障初始的暂态过程中、在二次回路受到实际可能出现的电磁干扰中，并且都应当尽可能接近对它要求的基本性能。这后一种性能的保证，要求现场工程师们必须经过大量的工程实践和工作积累才能完成，也是非常宝贵的。对二次回路和设备而言，这宝贵的内容就是对变电站设备工作环境的认识和对抗干扰措施的理解。本书对这些内容作了力所能及的系统介绍，也就是说这本书主要是为实际使用服务的。这是本书的编写特点之二。

为帮助大家学习和掌握这些知识，给读者提供一个加深理解、举一反三的机会，本书中介绍了由于违反 GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》而造成的故障资料 and 故障录波图，并进行了分析论证。这是本书的编写特点之三。

作为本书的作者，本人一直从事继电保护工作，并做到多年的基本建设、生产维护、厂方的技术支持、事故分析和培训工作。本书所用到的事例和素材，都是本人近年来与同仁们共同劳动的结晶。其中，周为民参加了第一篇第一、二章的编写，孔霄迪参加了第三篇第十九章的编写。在此，要特别感谢同仁们的帮助和鼓励。

由于时间和水平所限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大专家读者批评指正。

作者

2010年7月



前言

**第一篇 电流、电压互感器**

<b>第一章 基础知识</b> .....	3
第一节 电路的基本知识.....	3
第二节 磁路的基本知识.....	5
第三节 非线性磁路交变磁通与励磁电流的关系.....	9
<b>第二章 互感器概述</b> .....	13
第一节 互感器的作用 .....	13
第二节 全耦合理想变压器电量传变原理 .....	13
第三节 互感器的构成原理及分类 .....	15
第四节 互感器的端子及极性标志 .....	22
<b>第三章 电流互感器及接线</b> .....	24
第一节 电流互感器的等值电路及相量图 .....	25
第二节 电流互感器应用注意事项 .....	25
第三节 P类保护用电流互感器的稳态误差 .....	26
第四节 一次电流含有直流分量对互感器传变的影响 .....	29
第五节 剩磁对电流互感器传变的影响 .....	33
第六节 负荷性质对电流互感器二次电流波形影响实例分析 .....	35
第七节 暂态特性良好的 TP类保护用电流互感器 .....	39
第八节 电流互感器选择原则 .....	43
第九节 电流互感器二次负荷的计算 .....	44
第十节 电流互感器的性能验算 .....	45
第十一节 电流互感器的配置及接线方式 .....	47
<b>第四章 电压互感器及接线</b> .....	54
第一节 单相双绕组电压互感器 .....	54
第二节 单相多绕组电压互感器 .....	63
第三节 电容式电压互感器 .....	64

第四节	三相式电压互感器的工作原理	66
第五节	电压互感器的铁磁谐振及防谐振措施	70
第六节	电压互感器的配置、二次绕组和电压选择、二次负荷的计算	76
第七节	电压互感器回路的切换	79
<b>第五章</b>	<b>电子式互感器</b>	<b>82</b>
第一节	传统式互感器的缺点和存在的问题	82
第二节	电子式互感器的结构和基本原理	82
第三节	电子式互感器的生产与研究	92

## 第二篇 变电站的二次回路

<b>第六章</b>	<b>变电站直流系统</b>	<b>97</b>
第一节	概述	97
第二节	蓄电池组直流系统的运行方式	100
第三节	蓄电池的型式及组数	104
第四节	直流母线的接线方式	105
第五节	直流网络的供电方式	106
第六节	蓄电池的保护和监控	107
<b>第七章</b>	<b>二次接线图的类型及识图</b>	<b>112</b>
第一节	二次接线图的类型	112
第二节	二次接线图的文字符号及图形符号	114
第三节	识图	119
<b>第八章</b>	<b>二次回路信号系统</b>	<b>122</b>
第一节	信号系统	122
第二节	中央事故信号系统	123
第三节	中央预告信号系统	125
第四节	闪光信号系统	127
<b>第九章</b>	<b>传统变电站断路器控制回路</b>	<b>128</b>
第一节	控制信号传送过程	128
第二节	断路器	129
第三节	控制开关	131
第四节	控制回路应实现的功能	132
第五节	常规断路器控制回路原理	132
第六节	控制回路故障分析	135
<b>第十章</b>	<b>微机综合自动化变电站二次回路</b>	<b>138</b>
第一节	微机综合自动化变电站断路器控制回路	139
第二节	变电站综合自动化系统变电站控制层	151

<b>第十一章 智能变电站</b> .....	163
第一节 智能变电站的术语和定义.....	163
第二节 智能化变电站与传统变电站的比较.....	165
第三节 合并单元 (MU) .....	166
第四节 网络协议标准.....	168
第五节 过程层解决方案 (GOOSE 网络及 SV 网络) .....	170
第六节 二次回路的一些规定.....	172
第七节 继电保护及相关设备的配置原则.....	173
第八节 智能终端及智能化断路器.....	175
第九节 工程配置流程.....	180
第十节 智能化变电站站控系统 & 继电保护信息交互原则.....	181
<b>第十二章 隔离开关及其控制</b> .....	184
第一节 隔离开关及其位置信号.....	184
第二节 隔离开关控制回路.....	185
第三节 隔离开关闭锁回路.....	187
<b>第十三章 同期及电压切换回路</b> .....	190
第一节 同期并列.....	190
第二节 同期电压.....	191
第三节 同期闭锁措施与同期电压的引入.....	195
第四节 手动同期接线图及并列断路器合闸控制.....	196

### **第三篇 变电站二次回路抗干扰**

<b>第十四章 电磁兼容基本概念</b> .....	201
第一节 电磁干扰的本质及其传输途径.....	201
第二节 差模和共模干扰.....	204
<b>第十五章 变电站常见的电磁干扰源</b> .....	209
第一节 自然干扰源.....	209
第二节 系统内在干扰源.....	214
第三节 系统外部干扰源.....	226
<b>第十六章 接地及使用</b> .....	230
第一节 接地基本概念.....	230
第二节 接地的使用.....	232
<b>第十七章 电磁干扰的传导路径</b> .....	241
第一节 直接耦合干扰.....	241
第二节 电场耦合 (电容耦合) .....	243
第三节 磁场耦合 (互感耦合) 和无线电辐射耦合.....	244

第四节	高压输电线冲击电压经各种耦合干扰二次回路举例·····	246
<b>第十八章</b>	<b>变电站的抗干扰措施·····</b>	<b>249</b>
第一节	电磁场的屏蔽机理·····	249
第二节	继电保护室及控制室的屏蔽·····	253
第三节	网控室及变电站等电位面的构建·····	255
第四节	开关场到控制室使用屏蔽电缆的规定·····	258
第五节	高频同轴电缆屏蔽层接地·····	262
第六节	互感器接地·····	263
第七节	其他的抗干扰措施·····	270
<b>第十九章</b>	<b>继电保护装置电磁兼容试验要求·····</b>	<b>271</b>
第一节	电磁兼容的基本概念·····	271
第二节	保护装置电磁兼容试验要求·····	272
<b>附录</b> ·····		<b>281</b>
附录 1	电压互感器常用术语·····	281
附录 2	电压互感器额定电压因数标准值·····	281
附录 3	电压互感器的接线及使用范围·····	282
附录 4	保护用电压互感器的电压误差和相位差的限值·····	283
附录 5	非有效接地系统经高阻接地故障相的判断·····	284
附录 6	偏振光的吸收原理·····	285
<b>参考文献</b> ·····		<b>286</b>



# 第一篇

---

## 电流、电压互感器





# 基础知识

## 第一节 电路的基本知识

本节讨论电路基本元件电阻、电感、电容在正弦电路中的表现，并得出它们的电流、电压、阻抗及相量关系。

### 一、电流（或电压）相量

交流正弦电流  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$  可在复数平面上用一矢量来表示，见图 1-1。 $x$  轴为实轴， $y$  轴为虚轴。在时间上以正弦波变化的电流，可以表示为电流的复数量  $Ie^{j(\omega t + \varphi)}$ ，在复平面上从起始角  $\varphi$  开始，以角速度  $\omega$  逆时针方向旋转的旋转相量。在任意时刻  $t$ ，电

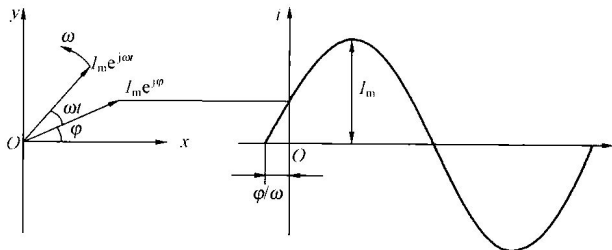


图 1-1 电流的相量表示

流的瞬时值等于电流旋转相量在虚轴上的投影分量。因此  $y$  轴也称为时间轴。

交流正弦电压的相量概念与电流类似，不再详述。

### 二、电阻

在交流正弦电路中，电阻的电流和电压为同频率同相位的正弦波，它们的有效值关系为  $U = IR$ ，相位关系为  $\varphi_i = \varphi_u$ ，其瞬时值、有效值均符合欧姆定律。

### 三、电感

当电感线圈中有电流通过时，就会产生与电流有关的磁通  $\Phi$ ，并产生相应的磁场。磁场能储存能量，因此电感线圈是一种能够储存磁能的部件。线圈有电阻，电流流过时会消耗能量，但因电阻阻值相对较小，常可忽略不计。磁通  $\Phi$  在线圈中与线匝相交链，若磁通  $\Phi$  与  $N$  匝交链，则磁链  $\psi$  为  $\psi = N\Phi$ 。显然  $\psi$  也是电流的函数。若磁链  $\psi$  与电流呈线性关系，则有  $\psi = Li$ ， $L$  称为电感。当通过理想无阻电感线圈的电流发生变化时，磁链也相应地变化。根据电磁感应定律，电感两端产生电压，当通过电流为不变化的直流时，磁链也不会变化，电感两端不产生电压。

在图 1-2 的电路中，示出了理想电感  $L$  的电流和电压的正方向。设流过电感线圈的电流为  $i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi_i)$  时，根据电磁感应定律，在图 1-2 所示方向下电感  $L$  上的电压为

$$u(t) = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} = L \frac{d[\sqrt{2}I\sin(\omega t + \varphi_i)]}{dt}$$

$$= \sqrt{2}LI \frac{d[\sin(\omega t + \varphi_i)]}{dt}$$

在  $u$ 、 $i$  与参考方向一致的前提下，上式正确地反映电压降与电流的真实关系，也就是说，把楞次定律的内容包含于内。

由高等数学知  $\frac{d}{dt}[\sin(\omega t + \varphi_i)] = \omega \cos(\omega t + \varphi_i)$ ，于是

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \sqrt{2}\omega LI \cos(\omega t + \varphi_i) = \sqrt{2}\omega LI \sin(\omega t + \varphi_i + 90^\circ) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi_u) \\ U &= \omega LI \\ \varphi_u &= \varphi_i + 90^\circ \end{aligned} \right\} (1-1)$$

图 1-3 示出了电感电流、电压的波形图和相量图。

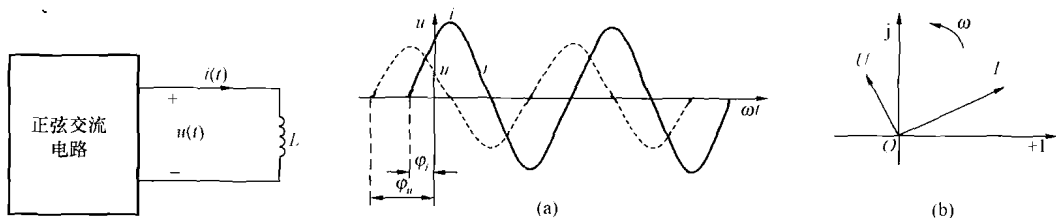


图 1-2 正弦交流电路中的电感

图 1-3 电感电流、电压的波形图和相量图  
(a) 电感电流电压波形；(b) 电感电流电压相量图

#### 四、电容

把两金属极板用介质隔开，就构成一个简单的电容器。由于介质不导电，在外电源的作用下，极板上就能分别聚集等量的异性电荷。外电源撤走后，极板上的电荷仍能依靠电场力的作用互相吸引，又因介质不能中和电荷，故电荷可长久地聚集下去在电容器内部产生电场，就储存了能量，因此电容器也是储能元件。若忽略漏电现象，这时的电容器则为理想电容器。在图 1-4 中，设正弦交流电路的电流和电压正方向如图示，电容端电压为  $u$ ，聚集电量为  $q$ ， $u$  与  $q$  成线性关系时，有  $q = Cu$ ， $i = \frac{dq}{dt}$ 。

设电容两端的电压为  $u(t) = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi_u)$ ，则依图 1-4 所示方向，电流为

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = C \frac{d[\sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi_u)]}{dt} = \sqrt{2}CU\omega \cos(\omega t + \varphi_u)$$

$$= \sqrt{2}CU\omega \sin(\omega t + \varphi_u + 90^\circ) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (1-2)$$

其中

$$I = \omega CU$$

$$\varphi_i = \varphi_u + 90^\circ$$

图 1-5 示出了电容器电流、电压的波形图和相量图。

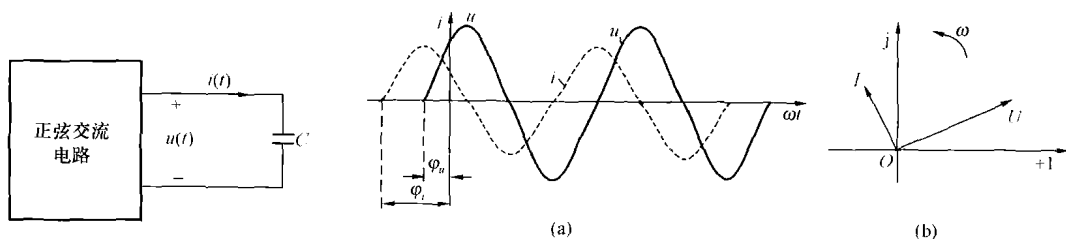
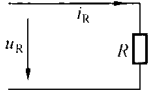
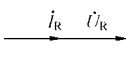
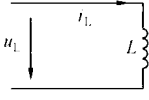
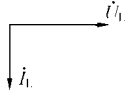
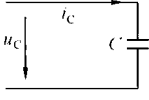
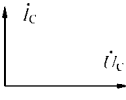


图 1-4 正弦交流电路中的电容

图 1-5 电容的电流、电压波形图和相量图  
(a) 电容电流电压波形；(b) 电容电流电压相量图

## 五、电阻、电感、电容上电流、电压及它们的相量关系（见表 1-1）

表 1-1 电阻、电感、电容上电流、电压及它们的相量关系

电路图	瞬时值关系	相量关系式	相量图	阻抗	导纳
	$u_R = Ri_R$	$\dot{U}_R = R\dot{I}_R$		$Z=R$	$Y = \frac{1}{R}$
	$u_L = \frac{di_L}{dt}$	$\dot{U}_L = j\omega L\dot{I}$		$Z = j\omega L$	$Y = -j\frac{1}{\omega L}$
	$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt$	$\dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C}\dot{I}_C$		$Z = -j\frac{1}{\omega C}$	$Y = j\omega C$

## 第二节 磁路的基本知识

## 一、铁磁物质的磁导率高

铁磁物质的磁导率比其他物质高得多，若令真空的磁导率为 1，则铁磁物质的磁导率一般为几百到几万，有的甚至超过  $10^5$ ，属于此类物质的有铸铁、铸钢、硅钢、铁镍合金等。铁磁物质在电气工程中得到广泛应用，如应用在各种机电能量变换设备、机电信号转换器件、静止系统的能量转换（如各种变压器、互感器）等。

二、铁磁物质的磁特性<sup>[2]</sup>

## (一) 铁磁物质的磁化过程

铁磁物质之所以有很强的导磁能力，是因为它们的内部结构与非铁磁物质有很大不同。由物理学得知，在铁磁物质内部，存在着很多自发磁化的小区域，称为磁畴。每个磁畴相当于一个自发磁化的小永久磁体，具有相当大的磁矩，这个磁矩比非铁磁物质中所谓分子电流磁矩要大得多。在没有外磁场作用时，磁畴在物质中杂乱排列，对外不显磁性。在外磁场的作用下，磁畴在不同的条件下将表现出不同的特性，主要有：①可以发生体积的变化，即其磁矩与外磁场方向接近相同的磁畴体积增大，其磁矩与外磁场方向接近相反的磁畴体积缩小；②可以发生翻转，即那些其磁矩与外磁场方向不接近的磁畴转动到与外磁场方向接近的方向；③还可以旋转，使磁畴逐渐转到使其磁矩与外磁场的方向一致起来，因而显示出很强的磁性。

物质的磁特性的外部表现，就是该物质的磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  的关系。这个关系可以由实验测得，其接线如图 1-6 所示。图中采用环形试样，线圈匝数为  $N$ 、试样平均磁路长度为  $L$ 、试样的截面积为  $A$ 。通过测量励磁电流  $I$  和铁心磁通  $\Phi$ ，利用  $H = NI/L$

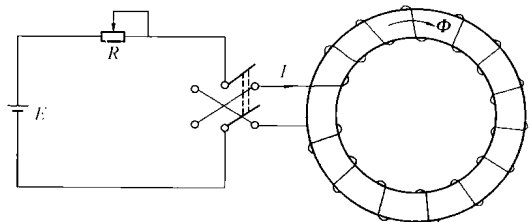


图 1-6 磁滞回线测试接线图

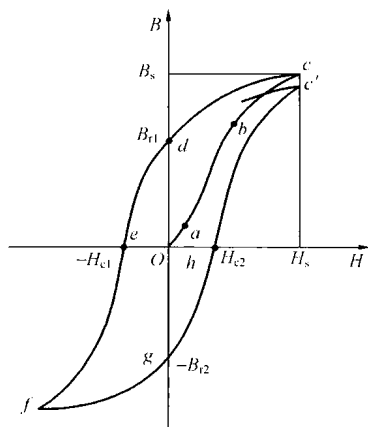


图 1-7 铁磁物质的磁化曲线

和  $B = \Phi/A$ ，绘制铁磁物质的磁化曲线，如图 1-7 所示。

### (二) 铁磁物质的磁化过程及其物理解释

用一个完全退磁的试样（即试前  $H=0, B=0$ ）来测试。当  $H$  值从零逐渐增加时， $B$  值也随之增加。但当  $B$  增加到某一较高数值后，其值虽仍随  $H$  的增加而增加，但增加的速度却小了，这就是铁心磁化到了饱和状态。这一变化情况如图 1-7 中的曲线  $Oabc$  所示。这条从试样完全退磁状态开始磁化所测得的  $B-H$  曲线，称为原始磁化曲线。这一曲线可分为如下 4 个部分：

**$Oa$  段：**此段  $H$ 、 $B$  都很小， $B$  随  $H$  的变化量也较小，而且基本上是可逆的，即如果把  $H$  值又减小到零， $B$  值可按原曲线回到零。此范围内的磁化是在较弱的外磁场作用下，

铁磁物质内部只发生磁畴体积变化，磁畴体积变化引起的附加磁场不强，当外磁场减小时，磁畴体积的变化可以还原，因此，此范围内特性是可逆的。该段曲线始点的斜率称为初始磁导率。

**$ab$  段：**此段中  $B$  值随  $H$  值的变化最快，即曲线斜率最大，而且这个变化是不可逆的。此范围内的磁化是在较强的外磁场作用下，在铁磁物质内部，其磁矩原与外磁场方向不同的磁畴都陆续发生转动，使其磁矩转动到与外磁场方向接近一致的方向上来了。磁畴的翻转使磁场大大增强，磁畴翻转时，相互间的摩擦要消耗能量，所以这个范围内的变化是不可逆的，即外磁场减小时  $B$  不能恢复原状。

**$bc$  段：**此段中虽外磁场更强，但值  $B$  随  $H$  增加却变化缓慢，即曲线斜率比  $ab$  段减小。这是由于在曲线  $b$  点时，物质中的磁畴已基本转到其磁矩接近外磁场的方向上。在此段中，随外磁场的增加，磁畴只是进一步进行旋转变化的，使其磁矩逐渐转到与外磁场方向完全一致的方向上来。

**$c$  点以上：**此段中， $B$  值随  $H$  值的增加而增加得更慢，接近于真空中的情况。这是因为在此阶段开始时，物质中的磁畴方向已完全转到与外磁场一致，不再发生变化， $B$  随  $H$  变化的情况与真空中相近，此段称为饱和段。此阶段的始点，即上段的终点  $c$  所对应的磁感应强度  $B_s$  和磁场强度  $H_s$  分别称为饱和磁感应强度和饱和磁场强度。显然此段特性也是可逆的，但工程上用途不大。

**$cde$  段：**当磁场强度  $H$  使曲线达到  $c$  点后，不再增加而是开始减小时， $B$  值也将随之减小，但不是按原来上升时的曲线减小，而是沿着比原来上升时的曲线稍高一些的曲线减小，如图 1-7 曲线中的  $cde$  段所示。当  $H$  减到零时， $B$  并不减小到零，而是大于零的  $B_{c1}$ ，这个  $H=0$  时的  $B$  值 ( $B_{c1}$ ) 称为剩余磁感应强度，简称剩磁。要使  $B$  继续减小，需要加反向磁场。加反向磁场后， $B$  随  $H$  沿  $de$  段下降，当  $B$  重新为零时，需要的反向磁场强度为  $-H_{c1}$  ( $H_{c1} > 0$ )，即曲线中的  $e$  点。这个使  $B=0$  的反向磁场强度  $H_{c1}$  称为矫顽力。

**$ef$  段：**如果继续加反向磁场， $B$  沿  $ef$  段下降，即反向磁化。 $f$  点以下和  $c$  点以上情况相同，也是饱和状态，称为反向饱和。

**$fgh$  段：**如果从  $f$  点逐渐减小反向磁场， $B$  值将沿  $fg$  段上升，当  $H=0$  时， $B$  为  $-B_{c2}$  ( $B_{c2} > 0$ )，对应于  $g$  点， $-B_{c2}$  也称为剩余磁感应强度。如果再把  $H$  从零往正向增加， $B$  沿

曲线  $gh$  段上升,  $h$  点对应的  $H_c$  也称为矫顽力。

$hc'$  段: 如果  $H$  从  $H_c$  继续增加到  $H_s$ ,  $B$  将沿  $hc'$  段上升到  $c'$  点, 即又进行正向磁化。 $c'$  点比  $c$  点稍低一些, 这是由于  $c$  点是当  $H=0$ 、 $B=0$  开始磁化的, 而  $c'$  点是当  $H=0$ 、 $B=-B_r$  时开始磁化而得到的。实际上, 这样反复磁化 10 多次, 便可得到差不多闭合的对称回线, 这个回线称为磁滞回线。

### (三) 铁磁物质磁化的特点

从上述磁化过程可以看出, 铁磁物质的磁化有这样几个特点:

(1) 具有饱和特性。即在外磁场增加到某一值后,  $B$  随  $H$  的变化缓慢, 并很快不再随  $H$  变化, 称为饱和状态。

(2) 具有不可逆性。即在不饱和阶段磁化过程是不可逆的,  $B$  的上升和下降过程不是沿同一条曲线, 下降的曲线高于上升的曲线, 即  $B-H$  曲线不是单值的。对应一个  $H$  有不同的  $B$  值, 究竟是哪个  $B$  值, 与磁化的历史有关。

(3) 在不饱和段,  $B$  随  $H$  变化很快, 即磁导率很高, 且  $B$  随  $H$  的变化是线性的。

应当指出, 铁磁物质的被磁化能力与温度有关, 温度增加, 磁化能力降低。每种铁磁物质都存在这样一个温度, 超过这个温度该物质就失去铁磁性, 这个温度称为铁磁物质的居里点。铁的居里点为  $750^{\circ}\text{C}$ 。

### (四) 极限磁滞回线和局部磁滞回线

实际上, 一个具体磁性器件在运行中, 铁心的磁化过程是随励磁条件的不同而不同的, 即随励磁电流的大小和变化情况的不同而不同。这些不同主要是由于铁磁物质的磁化在非饱和区具有不可逆性。例如, 当励磁磁场是交变的 (例如正弦波), 但其最大值  $H_m$  不同时, 其磁化过程将形成不同的磁滞回线, 如图 1-8 所示。应当指出, 当  $H_m$  大到一定程度时, 再增大  $H_m$ , 得到的磁滞回线的形状几乎不变 (只是增大饱和区的长度), 这样的磁滞回线称为极限磁滞回线。

又如, 反复单向磁化时 (如励磁磁场是正弦全波整流时), 其磁化过程所形成的  $B-H$  曲线如图 1-9 所示; 再如, 当恒定磁场与交变励磁同时励磁时 (例如, 一个直流成分再加一个交流成分), 其磁化过程形成的  $B-H$  曲线如图 1-10 所示。图 1-8~图 1-10 中的所有回线, 除极限磁滞回线外, 都称为局部磁滞回线。

## 三、铁磁物质特性的表征

如前所述, 铁磁物质的磁特性可用它的  $B-H$  曲线来表征, 但随着励磁条件的不同, 形成的  $B-H$  曲线的形状也不同。虽然如此, 但对同一种铁磁物质而言, 极限磁滞回线是确定的, 因此一般用极限磁滞回线作为该种材料磁特性的代表, 如图 1-11 所示。通常所说材料的磁滞回线就是指极限磁滞回线而言。反映铁磁物质的磁滞回线基本情况的几个典型数据是饱和磁感应强度  $B_s$ 、矫顽力  $H_c$ 、剩磁  $B_r$  和饱和磁场强度  $H_s$ 。

按其磁滞回线的宽窄不同, 铁磁材料可分为软磁材料和硬磁材料两大类。磁滞回线很窄的材料称为软磁材料; 磁滞回线很宽的材料称为硬磁材料, 如图 1-12 所示。软磁材料多用于制作电磁设备的磁导体, 硬磁材料主要用于制造永磁铁。

软磁材料中: 饱和磁感应强度  $B_s$  数值高的称为高饱和磁感应材料, 主要用作各种电机、变压器、电磁铁的磁导体; 剩磁感应强度  $B_r$  很低的材料称为低剩磁材料; 磁滞回线近于矩形的, 称为矩形材料。几种软磁材料的典型磁滞回线如图 1-13 所示。

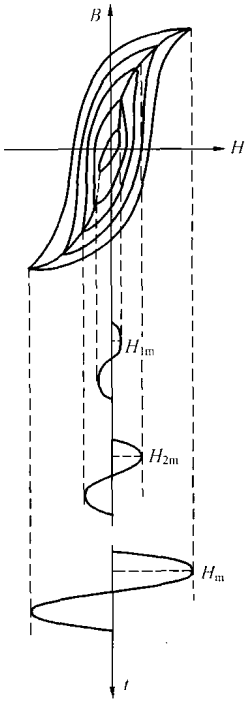


图 1-8 局部磁滞回线一

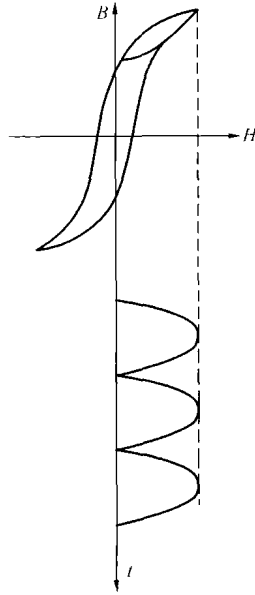


图 1-9 局部磁滞回线二

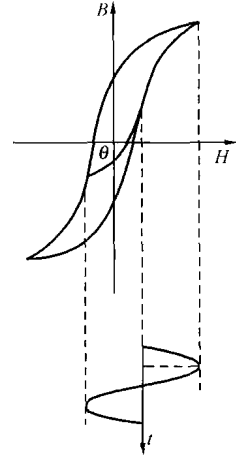


图 1-10 局部磁滞回线三

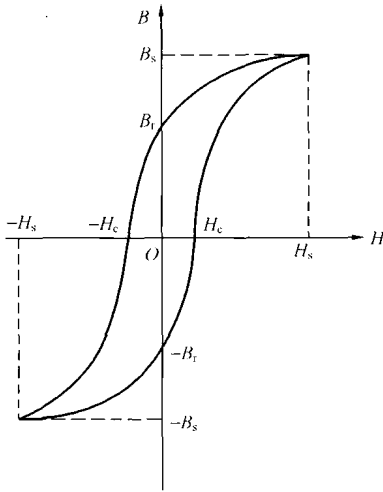


图 1-11 磁滞回线

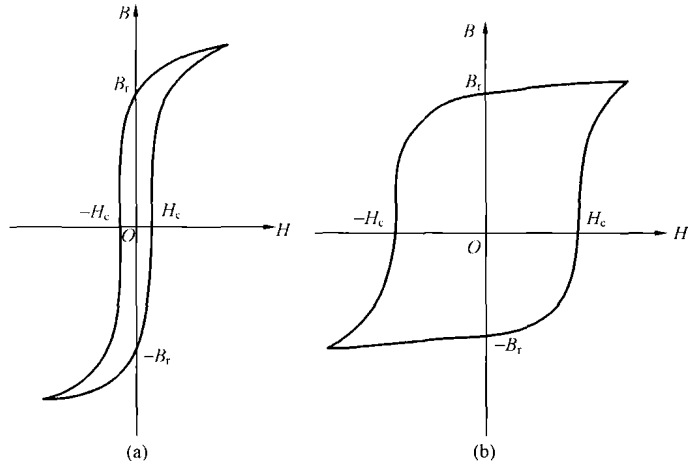


图 1-12 软磁材料与硬磁材料的磁滞回线  
(a) 软磁材料的磁滞回线；(b) 硬磁材料的磁滞回线

用磁滞回线表征铁磁材料的磁特性是比较精确的，但是利用磁滞回线进行分析是十分困难的。所以，对一种具体的由铁磁材料组成的电磁设备进行定量分析时，总要对表征其特性的磁滞回线作某种简化，以将分析的复杂性和结果的准确性进行折衷，达到适用目的。在一般的磁路计算中，常用的一种折衷方案是用所谓的基本磁化曲线来代替磁滞回线。在非饱和状态下，用不同幅度的周期性变化的磁场对铁磁材料反复磁化，将得到一系列的对称的局部磁滞回线，如图 1-8 所示。这些局部磁滞回线的顶点的连线，就称为基本磁化曲线。对某一铁磁物质而言，基本磁化曲线也是确定的。不难看出，基本磁化曲线可以理解为是略去铁磁物质特性的不



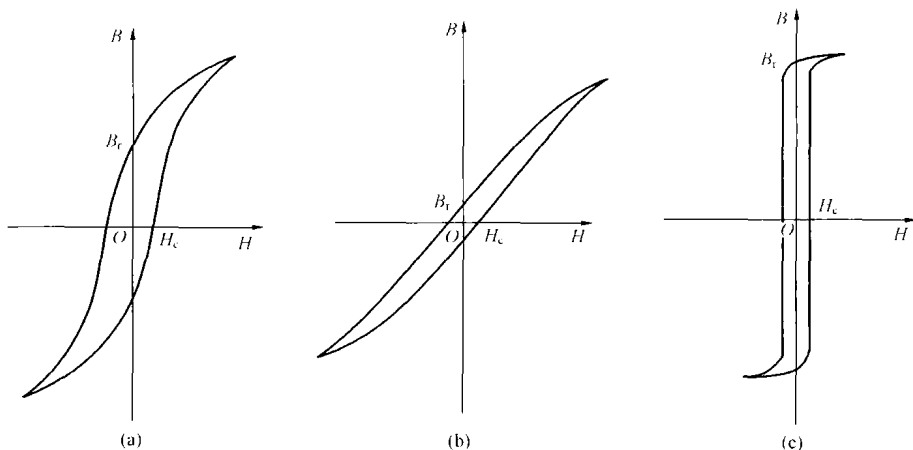


图 1-13 几种软磁材料的典型磁滞回线  
(a) P 级互感器铁心；(b) TPY 级互感器铁心；(c) 矩形材料

可逆性而保留了其饱和非线性特性的曲线。又由于这样构成的曲线有某种平均的意义，所以，基本磁化曲线也称为平均磁化曲线。工程上把基本磁化曲线简称为磁化曲线。应该指出，基本磁化曲线和初始磁化曲线是很相近的。

基本磁化曲线上各点的  $B$  与  $H$  的比值，称为各点磁导率。显然，不同的点磁导率是不同的。磁导率与磁感应强度的关系如图 1-14 所示。

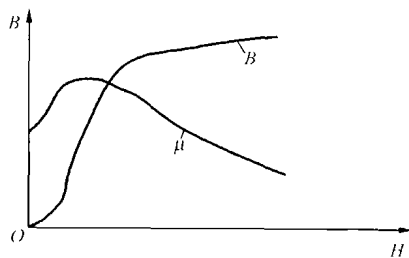


图 1-14 磁化曲线及磁导率

### 第三节 非线性磁路交变磁通与励磁电流的关系

#### 一、铁磁特性对线圈励磁电流的影响

铁心磁特性的非线性、磁滞和涡流，对线圈励磁电流均有影响。暂不考虑后两种影响，只考虑铁心磁特性的非线性影响，这时铁心磁特性可用基本磁化曲线来表征。图 1-15 (a) 示出了铁心线圈的磁通与电流的关系曲线 ( $\Phi-i$  曲线)，它的形状与  $B-H$  曲线相同。

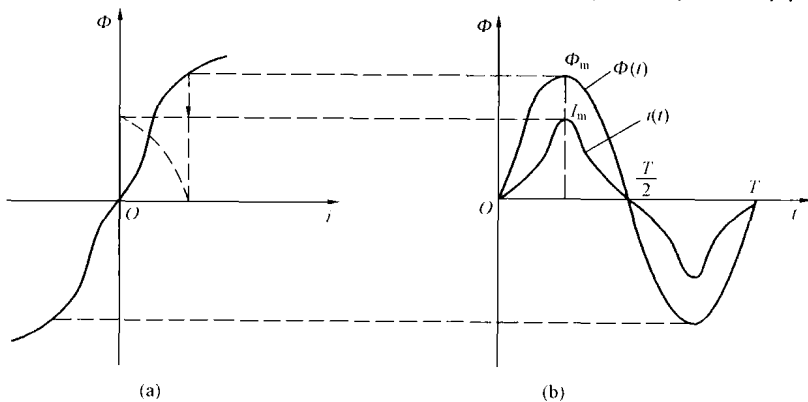


图 1-15 铁磁物质的  $\Phi-i$  曲线与  $\Phi(t)/i(t)$  曲线  
(a)  $\Phi-i$  曲线；(b)  $\Phi(t)/i(t)$  曲线