

21 世纪电 工 学 系 列 教 材

电机控制 与 供电基础

张继和 张润敏 梁海峰 编

1.2



西南交通大学出版社

21 世纪电工学系列教材

电机控制与供电基础

张继和 张润敏 梁海峰 编

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

电机控制与供电基础 / 张继和等编. —成都: 西南交通大学出版社, 2000.8

21 世纪电工学系列教材

ISBN 7-81057-488-4

I. 电... II. 张... III. ①电机—控制系统—高等学校—教材②供电—基本知识—高等学校—教材 IV. TM306

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 32234 号

21 世纪电工学系列教材

电机控制与供电基础

张继和 张润敏 梁海峰 编

*

出版人 宋绍南

责任编辑 张华敏

封面设计 肖 勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 18.75

字数: 281 千字 印数: 1~5000 册

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-488-4/TM · 210

定价: 24.00 元

内 容 提 要

本书介绍了变压器、异步电动机、同步电机、直流电机和控制电机等。从应用的角度出发讲解电机的工作原理和基本使用控制方法,重点放在电机的外特性上。借助经典的继电器接触器控制概念,详细地介绍当前普遍采用 PLC(可编程序控制器)控制技术。最后介绍了供配电基础知识。

本书共有八章,第一、二章介绍磁路的概念和变压器;第三章介绍三相异步电动机和单相异步电动机;第四章介绍直流电机工作原理;第五章介绍同步电机和控制电机;第六章介绍继电器接触器控制系统;第七章介绍可编程序控制器;第八章为供配电基础知识。全书授课约 40 学时,可根据各专业要求不同对某些内容删减。

本书可作为大学本科非电专业电工技术课教材,也可作为高等职业学校、电视大学、函授大学本科教材,同时可作为有关工程技术人员的参考资料。

前 言

1998年7月在北方交大召开铁路高校《面向21世纪电工电子系列课程教学改革》研讨会，与会同志根据教学改革的实际需要，对非电专业电子技术基础教材的体系和内容进行认真讨论和审定。面对21世纪全面素质教育和培养复合型人才的要求，各学科、各专业对电工电子技术要求越来越高，编写符合新的人才培养模式的电工电子技术教材势在必行。本书就是根据此次会议精神编写的。

在编写过程中，在力争保证内容的系统性前提下，尽量压缩传统知识，增加新知识内容。以三相异步电动机为重点，介绍了电动机的工作原理和控制方法。继电器接触器控制系统作为传统控制方法，为可编程序控制技术奠定了基础。供配电基础知识的引入，使本书的使用具有更大的选择性。可以根据不同的侧重面，对内容进行合理的取舍，也为同学增加知识面提供可能。

本书第一、二、三、六章由大连铁道学院张继和副教授编写，第四、五、八章由兰州铁道学院张润敏副教授编写，第七章由大连铁道学院梁海峰副教授编写。全书由张继和主编。大连铁道学院梁凤举副教授负责主审，参加校审的还有刘宗、付维胜、孙艳霞老师。

在本书的编写中还得到北方交通大学李守成、孙建老师，西南交通大学张雪、李春茂老师及其他兄弟院校有关同志的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，书中难免存在缺点和不足，敬请广大读者批评指教。

编 者

2000年5月

目 录

1 磁 路

1.1 磁场的基本物理量	1
1.2 磁性材料	4
1.3 磁路的计算	9
1.4 交流铁心线圈电路	14
1.5 电磁铁	17
习 题	20

2 变 压 器

2.1 变压器的结构及工作原理	22
2.2 变压器的功能及外特性	29
2.3 三相变压器及特种变压器	34
2.4 变压器使用中的问题	39
习 题	44

3 异步电动机

3.1 三相异步电动机的结构	46
3.2 三相异步电动机的工作原理	49
3.3 异步电动机的电磁转矩	54
3.4 异步电动机的机械特性	56
3.5 异步电动机的起动	60
3.6 异步电动机的调速	64
3.7 异步电动机的制动	67
3.8 三相异步电动机的铭牌数据	69
3.9 单相异步电动机	76
3.10 异步电动机的使用、维护和故障检查	81
3.11 异步电动机的选择	83
习 题	86

4 直流电机

4.1 直流电机的工作原理	89
4.2 直流电机分类和主要系列	92
4.3 直流电机构造	95
4.4 电枢电势和电磁转矩	98
4.5 直流电动机	99
4.6 并励发电机	110
习 题	112

5 同步电机及控制电机

5.1 同步电机	114
5.2 控制电机	127
习 题	134

6 继电接触器控制系统

6.1 常用控制电器	136
6.2 三相异步电动机的基本控制线路	146
6.3 行程控制	152
6.4 时间控制	155
6.5 速度控制	158
6.6 应用举例	160
习 题	163

7 可编程序控制器

7.1 可编程序控制器概况	167
7.2 可编程序控制器的内部继电器	170
7.3 可编程序控制器的指令	178
7.4 可编程序控制器的基本编程	188
7.5 可编程序控制器的应用	198
7.6 顺序控制的步进指令	210
7.7 编程器的功能介绍	217
习 题	224

8 供电与配电

8.1 供配电系统概述	231
8.2 电力负荷及其计算	236
8.3 变电所及其主结线	243
8.4 低压供配电线路的接线方式	249
8.5 配电导线截面的选择	251
8.6 电气照明	259
8.7 防雷与接地	274
习 题	286
主要参考文献	289

1 磁 路

在生产中和工程上广泛应用的许多电气设备，如电机、变压器、继电器、电磁阀等，都是依靠电与磁的相互作用而工作的。它们的工作原理既涉及到电路问题又涉及到磁路问题。为了解各种常用电气设备、电磁元件的原理和性能，需要掌握有关磁路的基本理论和分析方法。

磁路问题是局限在一定路径内的磁场问题，因此有关磁场的各种基本物理量都适用于磁路。磁路主要是由具有良好导磁性能的磁性材料构成，因此本章先对磁性材料的性能进行讨论，随后介绍与磁路有关的基本概念、定律及基本计算，最后来介绍用途广泛的电磁铁。

1.1 磁场的基本物理量

1.1.1 磁感应强度 B

磁感应强度 B 是表示磁场中某点的磁场强弱和方向的物理量，它定义为：单位正电荷以单位速度向垂直于磁场（方向）的方向运动时所受的机械力，即 $B = \frac{F}{qv}$ 。

对于磁路来讲，一般是通电线圈产生磁场，磁感应强度与激励电流之间的方向关系可用右手螺旋定则来确定。

1.1.2 磁通 Φ

磁通 Φ 是表示穿过某一截面 S 的磁感应强度通量，或者说是穿过该截面的磁力线总和。对于均匀磁场

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1.1.1)$$

由上式可见，磁感应强度在数值上可以看成为与磁场方向相垂直的单位面积所通过的磁通，故磁感应强度又称为磁通密度。

如果用磁力线来描述磁场，磁力线的疏密就反映磁感应强度的大小，则通过某一面积的磁力线总数就反映通过该面积的磁通大小。由于磁通的连续性，磁力线应该是闭合的空间曲线。

1.1.3 磁场强度 H

磁场强度 H 是计算磁场时引用的物理量，通过它来确定磁场与激磁电流之间的关系，即

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma I \quad (1.1.2)$$

上式是安培环路定律的数学表示，式中 $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$ 是磁场强度矢量 $\vec{H}$ 沿任意闭合路线 l 的线积分； ΣI 是穿过该闭合路线所围面积的电流代数和。电流的正负是这样确定的：任意选定一个闭合回线的绕行方向，凡是与该闭合回线绕行方向之间符合右手螺旋定律的电流作为正，反之为负。

图 1.1.1 是一个环形铁心线圈，应用式 (1.1.2) 来计算线圈内部各点的磁场强度。取磁力线作为闭合回线，并选顺时针方向绕行。于是

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H_x l_x = 2\pi x H_x$$

$$\Sigma I = NI$$

$$\text{所以 } H_x 2\pi x = \Sigma I = NI$$

$$H_x = \frac{IN}{2\pi x} = \frac{IN}{l_x} \quad (1.1.3)$$

上式中， N 是线圈匝数； $l_x = 2\pi x$ 是半径为 x 的圆周长； H_x 是半径 x 处的磁场强度。

式 (1.1.3) 中电流与线圈匝数的乘积 IN 称为磁动势，用 F 表示，即

$$F = IN \quad (1.1.4)$$

它是产生磁通的源，其单位是安（匝）。

1.1.4 磁导率 μ

磁导率 μ 是表示物质导磁性能的物理量，它与磁场强度的乘积就等

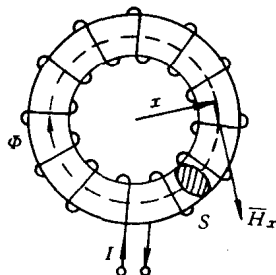


图 1.1.1 环形铁心线圈

于磁感应强度，即

$$B = \mu H \quad (1.1.5)$$

因此在图 1.1.1 中，线圈内部半径为 x 处各点的磁感应强度可由式 (1.1.5) 得出，即

$$B_x = \mu H_x = \mu H_z = \mu \frac{IN}{l_x} \quad (1.1.6)$$

由式 (1.1.3) 和式 (1.1.6) 可知，磁场内某一点的磁场强度 H 只与电流大小、线圈匝数、以及该点的几何位置有关，而与磁场媒质的磁性无关。就是说在一定电流值下，同一点的磁场强度不因媒质的不同而有异，但磁感应强度与磁场媒质的磁性有关。当线圈内的媒质不同，磁导率也就不同，在同样电流作用下，同一点的磁感应强度大小不同，线圈内的磁通也就不同了。

由实验测出，真空的磁导率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

任何一种物质的磁导率 μ 和真空的磁导率 μ_0 的比值，称为该物质的相对磁导率 μ_r ，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.1.7)$$

由式 (1.1.5) 可得，相对磁导率

$$\mu_r = \frac{\mu H}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}$$

上式说明，相对磁导率 μ_r 是在同样电流作用下，某点有媒质时的磁感应强度 B 与该点为真空时的磁感应强度 B_0 之比值。

物质按磁导率的大小，可分成磁性材料和非磁性材料两大类。

对非磁性材料而言， $\mu \approx \mu_0$ 、 $\mu_r \approx 1$ ，基本不具有磁化特性，其导磁能力很差。每一种非磁性材料的磁导率都是常数。因此，当磁场媒质为非磁性材料时， $B = \mu_0 H$ ， B 与 H 成正比，它们之间是线性关系。又因 $B = \frac{\Phi}{S}$ 、 $H = \frac{IN}{l}$ ，所以磁通 Φ 与产生此磁通的电流 I 也成正比，即它们之间也是线性关系。

表 1.1.1 列出了磁场基本物理量的定义、单位及单位换算，以备查阅。

磁场的基本物理量

表 1.1.1

物 理 量		意 义	SI 制单位		高斯制单位		单位制换算
名 称	符 号		名 称	符 号	名 称	符 号	
磁感应强度 (磁密)	B	表示空间某点磁场强弱与方向的物理量。它可定义为单位正电荷以单位速度向与磁场相垂直的方向运动时, 所受到的机械力。 $B = \frac{F}{qv}$	特斯拉	T	高斯	G	$1\text{T} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 10^4 \text{G}$ $1\text{G} = 10^{-4} \text{T}$
磁通量 (磁通)	Φ	表示穿过某一截面 S 的磁感应强度矢量的通量或者说穿过该截面的磁力线总数。在均匀磁场内 $\Phi = BS$	韦伯	Wb	麦克斯韦	M_x	$1\text{Wb} = 10^8 M_x$ $1M_x = 10^{-8} \text{Wb}$
磁场强度	H	它定义为介质中某点的磁感应强度 B 与介质磁导率 μ 之比。 $H = \frac{B}{\mu}$	安培每米	A/m	奥斯特	Oe	$1 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 4\pi \times 10^{-3} \text{Oe}$ $= 1.26 \times 10^{-3} \text{Oe}$ $1\text{Oe} = 80 \frac{\text{A}}{\text{m}}$
磁导率 (导磁系数)	μ	表示物质的导磁性。真空中的导磁系数为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$	亨利每米	H/m	高斯 奥斯特	$\frac{\text{G}}{\text{Oe}}$	$1 \frac{\text{H}}{\text{m}} = \frac{10^7}{4\pi} \text{G/Oe}$

1.2 磁性材料

1.2.1 磁性材料的磁化

无论磁性材料还是非磁性材料在无外界磁场的环境中都不显磁性, 一旦有外界磁场, 磁性材料就会显示很强的磁性, 即磁性材料被磁化了。

为什么磁性材料具有被磁化的特性，而非磁性材料却没有呢？这里用磁畴理论来解释。

物质的磁性来源于原子的磁性，原子的磁性来源于原子中电子绕原子核运动及自行旋转运动，这两种运动都产生电子磁矩。由于组成不同物质的原子结构不同，其合成磁矩也不同。强磁性材料的原子磁矩，在无外磁场作用的情况下，已经按某种方向在一个个小区内平行排列起来，也就是说在这些小区内原子磁矩是取向的，即已经达到一定程度的磁化。这样的磁化称为自发磁化，具有自发磁化的小区称为磁畴。

一块磁性材料可以分成许多磁畴，磁畴的磁矩取向各不相同，排列杂乱无章，磁性相互抵消，对外不呈现宏观的磁性。若将磁性材料置于外磁场中，则已经高度自发磁化的许多磁畴的磁矩，受外磁场的作用，会改变其磁矩方向，最终变到与外加磁场方向接近或一致。于是对外呈现很强的磁性。图 1.2.1 表示磁畴在无外磁场及有外磁场作用下的情况。

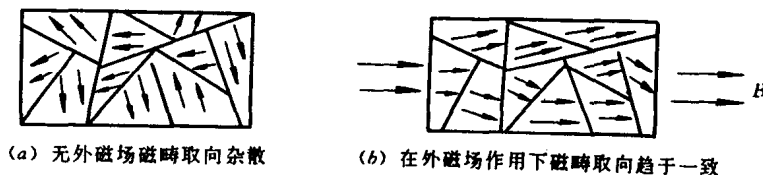


图 1.2.1 磁畴示意图

磁性材料的强磁化性被广泛地应用于电工设备中，例如电机、变压器及各种铁磁元件的线圈中都放有铁心。在这种具有铁心的线圈中通入不大的励磁电流，便可以产生足够大的磁通和磁感应强度。这就解决了既要磁通大，又要励磁电流小的矛盾。利用优质的磁性材料可使同一容量电机的重量和体积都大大减小。

非磁性材料没有磁畴结构，所以不具有磁化的特性。

1.2.2 磁化曲线

磁性材料在磁化过程中，磁感应强度 B 随磁场强度（外加磁场） H 变化的曲线称为磁化曲线，如图 1.2.2 所示。图中 B_0 表示非磁性材料或在空气中建立磁场时的磁化曲线； B_f 表示磁性材料的磁化曲线； B 表示合成的总磁场的磁化曲线。

从 $B-H$ 磁化曲线上看出, 它是非线性的, 当有磁性材料存在时, B 与 H 不成正比, 所以磁性材料的磁导率 μ 不是常数, 它随 H 而变化 (见图 1.2.3)。由于磁通 Φ 与 B 成正比, 而产生磁通的励磁电流 I 与 H 成正比, 因此在有磁性材料的情况下, Φ 与 I 也不成正比。

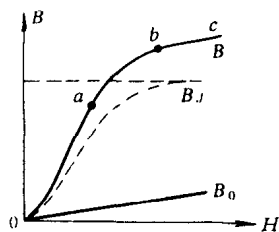


图 1.2.2 磁化曲线

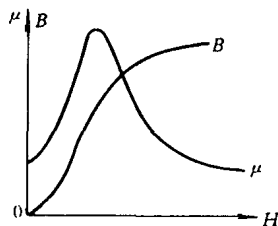


图 1.2.3 μ 与 H 的关系

下面来讨论磁性材料的磁饱和性与磁滞性。

1. 磁饱和性

从磁化曲线 (图 1.2.2) B 上看出, 当外加磁场 H 较小时, 磁感应强度 B 随外磁场的增加而快速增长 ($0a$ 段), B 与 H 基本上成正比。因为在这一段磁性材料中有足够多小磁畴的方向与外磁场方向不一致, 因而随外磁场的增加, 被扭转的磁畴数增加, 磁感应强度也就随之增加。到了 ab 段, 随外磁场的增加, B 的增加越来越慢, 这是因为与外磁场方向不同的小磁畴越来越少的原故。当外加磁场超过 b 点时, 几乎所有的磁畴都与外磁场的方向一致, 再增加外磁场 H , 磁性材料本身的磁感应强度 B_j 也不会增加, bc 段几乎是与 B_0 平行的直线。这就是磁性材料的磁饱和性。

2. 磁滞性

实际工作时, 磁性材料往往长期工作在交变磁场中, 当 H 增加到一定数值后就要减小, 那么 H 减小时, $B-H$ 曲线是按原磁化曲线 $0a$ 回降到零吗? 实验证明并非如此。如图 1.2.4 所示, 当磁场强度从 H_s 处开始减小时, 磁感应强度 B 并不沿原来曲线 $0a$ 回降, 而沿着比它高的曲线 ab 段缓慢下降。在 H 等于零时, B 并不等于零, 仍保留一定的磁性, 如图中 B_r 所示, 这个 B_r 值叫做剩磁。

为了消除剩磁, 即使 $B=0$, 需在反方向上外加磁场 H_c , 因此 H_c 称为

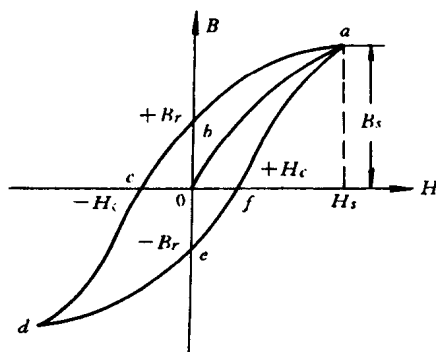


图 1.2.4 磁滞回线

矫顽力，它表示磁性材料反抗退磁的能力。如果磁场强度继续向反方向增加，使磁性材料反向磁化到饱和，如曲线上的 cd 段，然后在反方向减小磁场强度到零，出现反向剩磁 $-B_r$ ，再沿正方向增加磁场强度直到 H_s ，则磁感应强度又增加到 B_s 。在交变磁场作用下，形成了一个封闭的磁化曲线 $abcdefa$ ，它反映了磁感应强度 B 的变化滞后于磁场强度 H 的变化的磁滞性，因而称它为磁滞回线。

1.2.3 磁性材料的分类

不同的磁性材料，其磁滞回线和磁化曲线也不同。图 1.2.5 给出了几种常用磁性材料的磁化曲线；图 1.2.6 给出了三种不同磁性材料的磁滞回线。

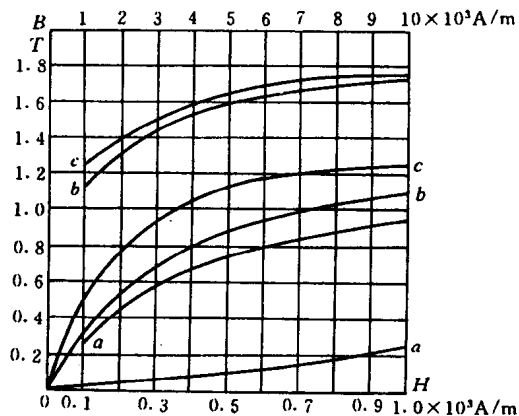


图 1.2.5 磁化曲线

a—铸铁；b—铸钢；c—硅钢片

磁性材料按其特性和用途通常分为硬磁材料、软磁材料和矩磁材料三大类。

1. 硬磁材料

硬磁材料的特点是：它经过深度饱和磁化后，具有较大的剩磁 B_r 、较高的矫顽力 H_c 和较大的磁滞回线面积。这样的特性可确保磁性能够长期保持恒定，不易消失。属于这一类的材料有铝镍钴、硬磁铁氧体、稀土钴等。

硬磁材料主要用来制造各种用途的永久磁铁。例如用于制造精密仪器、仪表、永磁电机、微电机、力矩电机、传感器、扬声器等。

2. 软磁材料

软磁材料的特点是：磁滞回线窄而长，回线面积小，即剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都很小，如图 1.2.6 (b) 所示。它具有很高的磁导率，易于磁化也易于去磁。属于软磁材料的品种很多，如电磁纯铁、铸钢、硅钢片、铁镍合金及软磁铁氧体等。

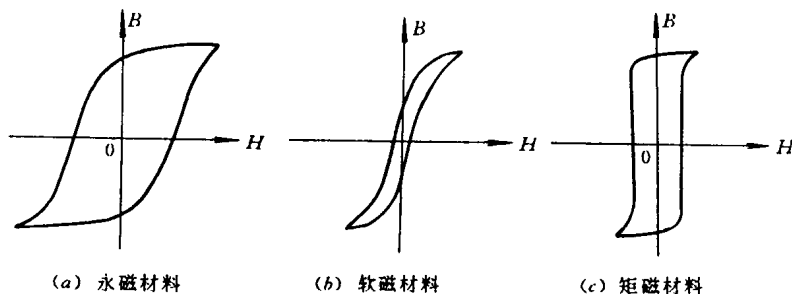


图 1.2.6 不同材料的磁滞回线

软磁材料主要用来做各种电磁铁和磁心，即通过励磁取得较强的磁场，用来转换能量或传递信息。一般电磁纯铁用于直流磁路的电磁元件，各种牌号的硅钢片经常用作各种电机、电器的铁心。

3. 矩磁材料

磁滞回线接近矩形的磁性材料称为矩磁材料，如图 1.2.6 (c) 所示。这种材料在两个方向上磁化后，剩磁都很大，接近饱和磁感应强度 B_s ，而且很稳定。但它的矫顽力较小，易于迅速翻转，即在很小的外磁场作用下能使它磁化达到饱和。由于矫顽力小，消除剩磁并不需要很强的外

磁场，只要反向磁场一超过矫顽力，磁化方向就立即翻转。

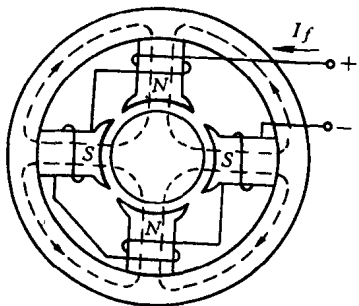
由于矩磁材料有两个非常分明的磁化状态，可以记为 $+B_r$ 和 $-B_r$ ，可用来代表二进制数“1”和“0”，即可以存储这两个信息。所以矩磁材料在计算机和自动控制中广泛用作记忆元件、开关元件和逻辑元件。属于这类材料的有镁锰铁氧体和某些铁镍合金等。

最后介绍磁性材料中的铁氧体，又名铁淦氧。它由三氧化二铁和某些二价金属氧化物的粉末烧结而成，是一种非金属磁性材料，由于含有铁和氧所以叫铁氧体。它具有很高的磁导率，但饱和磁感应强度不如金属软磁材料。又因含有大量气孔，电阻率高达 $10^{12} \sim 10^{14} \Omega \cdot m$ 。由于电阻率高到近似绝缘体，交变磁化过程中磁心损耗小，所以适于在高频范围工作。根据铁氧体成分的不同，磁滞回线形状也不同，它亦有硬磁、软磁和矩磁的区别。

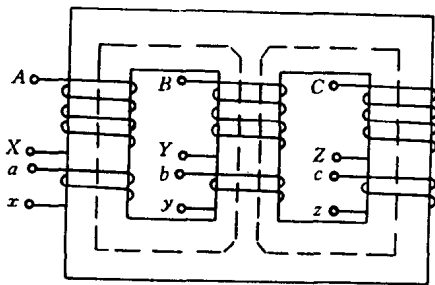
目前铁氧体在电子技术中应用很广泛，例如可做录音机的磁带、磁头、高频磁心及计算机中的磁心、磁鼓等。

1.3 磁路的计算

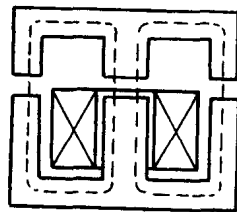
研究磁路的目的在于如何用较小的电流、较少的材料建立较强的符合要求的磁场。在电机、变压器及各种电磁元件中都用强磁性材料做成一定形状的铁心。铁心的磁导率比周围空气或其他物质的磁导率高得多，因此磁通的绝大部分经过铁心而形成闭合通路。这种人为造成的磁通的路径，称为磁路。图 1.3.1 是四极直流电动机、三相变压器及交流接触器的磁路示意图。



(a) 直流电机的磁路



(b) 三相变压器的磁路



(c) 交流接触器的磁路

图 1.3.1 典型磁路举例