

高等学校教材

# 电机与拖动

唐介 主编

高等教育出版社

## 内容简介

本书是从 21 世纪初人才培养的要求出发,结合多年教学改革的经验 and 成果编写的。

全书分上、下两篇。上篇为电机与拖动基础,包括磁路、变压器、异步电机的基本理论、异步电机的电力拖动、同步电机的基本理论、同步电机的电力拖动、直流电机的基本理论、直流电机的电力拖动、控制电机、电动机的选择、电力拖动系统的动力学基础等。下篇为电机与拖动实验,包括单相变压器实验、三相变压器实验、笼型三相异步电动机实验、绕线型三相异步电动机实验、三相同步电动机实验、三相同步发电机实验、直流发电机实验、直流电动机实验等。

本书可作为高等学校自动化和电气工程等专业的教科书,也可作为成人高等教育的教材,还可以供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/唐介主编. —北京:高等教育出版社,  
2003.7

ISBN 7-04-011864-5

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 043453 号

---

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100011  
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 北京市朝阳区北苑印刷厂

开 本 787×960 1/16  
印 张 22.75  
字 数 420 000

版 次 2003 年 7 月第 1 版  
印 次 2003 年 7 月第 1 次印刷  
定 价 28.40 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

# 前 言

本书是从 21 世纪人才培养的要求出发,结合我校在本课程教学改革中的经验和成果编写的。供大学本科自动化和电气工程等专业使用。

随着社会、经济和科技的发展,人类认识和实践领域的扩大和加深,学生需要学习和了解的新知识明显增加。从人才培养的总体要求出发,知识的重新组织和分配势在必行,本课程的学时就不得不有所减少,面对这一新情况、新要求、新形势,在分析了当前教学的现状和社会需要的基础上,为贯彻和适应创新教育和素质教育的精神,我们确定以保证基础知识、降低理论深度、加强工程应用、更新内容体系作为本教材编写的基本依据和主要特点。

为了充分利用现代化科技手段,提高教学的现代化水平,我们还将编制与本教材配套的多媒体课件或电子教案,并通过教学手段的更新,促进教学方法的改革,以增加课堂的信息量,注重培养学生的自学能力和创新精神。

本教材包括上、下两篇。上篇为电机与拖动基础,教学时数为 64 学时左右。下篇为电机与拖动实验,教学时数为 12 学时左右。书中打 \* 号的部分是供选用的内容。

参加本书编写的有唐介(主编)、刘烧(上篇第 1、2 章)、徐占国(上篇第 3、4、10 章)、刘凤春(上篇第 5、6、9 章)、刘文琦(上篇第 7、8、11 章)、刘华毅(下篇)。

本书经大连理工大学马鉴教授仔细审阅,提出了宝贵的修改意见。在此,表示衷心感谢。

由于我们的水平有限,加之编写时间比较仓促,书中错误和不妥之处在所难免,殷切希望使用本教材的同仁、学生和其他读者给予批评指正。

编者

2003 年 1 月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>上篇 电机与拖动基础</b>	
<b>第1章 磁路 .....</b>	<b>5</b>
1.1 磁场的基本物理量 .....	5
1.2 物质的磁性能 .....	6
1.3 磁路的基本定律 .....	9
1.4 铁心线圈电路 .....	14
练习题 .....	17
<b>第2章 变压器 .....</b>	<b>19</b>
2.1 变压器的工作原理 .....	19
2.2 变压器的基本结构 .....	24
2.3 变压器的运行分析 .....	29
2.4 变压器的参数测定 .....	34
2.5 变压器的运行特性 .....	39
2.6 三相变压器的联结组 .....	42
2.7 三相变压器的并联运行 .....	46
2.8 自耦变压器 .....	50
2.9 三绕组变压器 .....	52
2.10 仪用互感器 .....	54
* 2.11 小容量变压器的设计 .....	56
练习题 .....	58
<b>第3章 异步电机的基本理论 .....</b>	<b>61</b>
3.1 三相异步电动机的工作原理 .....	61
3.2 三相异步电动机的基本结构 .....	66
3.3 三相绕组的电动势和磁通势 .....	76
3.4 三相异步电动机的电动势和磁通势平衡方程式 .....	83
3.5 三相异步电动机的运行分析 .....	86
3.6 三相异步电动机的功率和转矩 .....	92
3.7 三相异步电动机的运行特性 .....	96
3.8 单相异步电动机 .....	96
* 3.9 三相直线异步电动机 .....	99

* 3.10 三相异步发电机 .....	101
练习题 .....	103
<b>第 4 章 异步电机的电力拖动 .....</b>	<b>106</b>
4.1 三相异步电动机的机械特性 .....	106
4.2 电力拖动系统的稳定运行 .....	115
4.3 三相异步电动机的起动 .....	118
4.4 三相异步电动机的调速 .....	129
4.5 三相异步电动机的制动 .....	142
练习题 .....	147
<b>第 5 章 同步电机的基本理论 .....</b>	<b>149</b>
5.1 三相同步电机的工作原理 .....	149
5.2 三相同步电机的基本结构 .....	152
5.3 三相隐极同步电动机的运行分析 .....	155
5.4 三相凸极同步电动机的运行分析 .....	159
5.5 三相同步电动机的功率和转矩 .....	163
5.6 三相同步电动机的运行特性 .....	165
5.7 三相同步电动机功率因数的调节 .....	167
* 5.8 微型同步电动机 .....	169
5.9 三相隐极同步发电机的运行分析 .....	171
5.10 三相凸极同步发电机的运行分析 .....	174
5.11 三相同步发电机的功率和转矩 .....	176
5.12 三相同步发电机的运行特性 .....	178
5.13 同步发电机与电网的并联运行 .....	179
* 5.14 同步发电机的三相突然短路 .....	183
练习题 .....	184
<b>第 6 章 同步电动机的电力拖动 .....</b>	<b>187</b>
6.1 三相同步电动机的机械特性 .....	187
6.2 三相同步电动机的起动 .....	189
6.3 三相同步电动机的调速 .....	190
6.4 三相同步电动机的制动 .....	193
* 6.5 开关磁阻电动机 .....	194
练习题 .....	195
<b>第 7 章 直流电机的基本理论 .....</b>	<b>196</b>
7.1 直流电机的工作原理 .....	196
7.2 直流电机的基本结构 .....	199
7.3 直流电机的电枢反应 .....	204
7.4 直流电机的电磁转矩和电动势 .....	205
7.5 直流电动机的运行分析 .....	207

7.6 直流电动机的功率和转矩 .....	213
7.7 直流发电机的运行分析 .....	215
7.8 直流发电机的功率和转矩 .....	222
练习题 .....	224
<b>第 8 章 直流电动机的电力拖动</b> .....	<b>227</b>
8.1 他励直流电动机的机械特性 .....	227
8.2 他励直流电动机的起动 .....	230
8.3 他励直流电动机的调速 .....	235
8.4 他励直流电动机的制动 .....	239
8.5 他励电动机在四象限中的运行状态 .....	250
8.6 并励直流电动机的电力拖动 .....	251
* 8.7 串励直流电动机的电力拖动 .....	252
* 8.8 复励直流电动机的电力拖动 .....	254
练习题 .....	254
<b>第 9 章 控制电机</b> .....	<b>257</b>
9.1 伺服电动机 .....	257
9.2 直流力矩电动机 .....	263
9.3 步进电机 .....	264
9.4 测速发电机 .....	268
9.5 自整角机 .....	271
9.6 旋转变压器 .....	275
* 9.7 感应同步器 .....	281
练习题 .....	283
<b>第 10 章 电动机的选择</b> .....	<b>284</b>
10.1 电动机选择的基本内容 .....	284
10.2 电机的发热和冷却 .....	287
10.3 电机的工作制 .....	288
10.4 电机的允许输出功率 .....	291
10.5 恒定负载电动机额定功率的选择 .....	293
10.6 变动负载电动机额定功率的选择 .....	296
练习题 .....	301
<b>第 11 章 电力拖动系统的动力学基础</b> .....	<b>304</b>
11.1 电力拖动系统的组成 .....	304
11.2 典型生产机械的运动形式 .....	305
11.3 电力拖动系统的运动方程式 .....	306
11.4 多轴旋转系统的折算 .....	309
11.5 平移运动系统的折算 .....	312
11.6 升降运动系统的折算 .....	314

* 11.7 电力拖动系统的暂态过程 .....	317
练习题 .....	319
<b>练习题答案</b> .....	<b>321</b>

下篇 电机与拖动实验

<b>实验须知</b> .....	<b>329</b>
实验 1 单相变压器实验 .....	329
实验 2 三相变压器实验 .....	333
实验 3 笼型三相异步电动机实验 .....	336
实验 4 绕线型三相异步电动机实验 .....	341
实验 5 三相同步电动机实验 .....	343
实验 6 三相同步发电机实验 .....	345
实验 7 直流发电机实验 .....	347
实验 8 直流电动机实验 .....	351
<b>主要参考文献</b> .....	<b>354</b>

# 绪 论

电机是实现能量转换和信号转换的电磁装置。用作能量转换的电机称为动力电机,用作信号转换的电机称为控制电机。

动力电机中,将机械能转换成电能的称为发电机;将电能转换成机械能的称为电动机。任何电机,理论上既可作发电机运行,也可作电动机运行,所以电机是一种双向的机电能量变换装置,这一特性称为电机的可逆原理。

按电流种类的不同,动力电机又分交流电机和直流电机两大类。交流电机按工作原理的不同又分为异步电机(感应电机)和同步电机两种。每种又有单相和三相之分。直流电机按励磁方式的不同有他励电机、并励电机、串励电机和复励电机四种。

控制电机的种类也很多,在自动控制系统中常用作检测、放大、执行和校正等元件使用,容量和体积一般都比较小。

变压器虽然是一种静止的电器,但它也是一种能量转换的电磁装置,也属本课程的范畴。

拖动是指用电动机来拖动生产机械运动,以完成一定的生产任务。

电能的应用已遍及各行各业乃至人类的日常生活。在当今社会,没有电能是不可想象的。作为电能生产、输送、转换和应用的基本装置的电机在国民经济和社会生活中具有举足轻重的地位,因而本课程是一门重要的技术基础课。

本课程主要介绍电机的基本理论、拖动的基本方法以及实验的基本技能。本教材分为上、下两篇。上篇为电机与拖动基础;下篇为电机与拖动实验。课程的主要内容和重点放在基本知识、基本理论和基本技能上。





上篇

电机与拖动基础



# 第 1 章

## 磁 路

电机(包括变压器和旋转电机)是一种机电能量转换或信号转换的电磁机械装置,磁场是其实现能量转换、传递或储存的媒介。除某些容量很小的微型电机的磁场是由永久磁铁产生的以外,在大多数情况下,磁场都是用电流来产生的,而且把磁场集中在一定的范围之内,形成磁路。因而本章围绕磁路进行研究,先介绍磁场的基本概念,再讨论磁路的基本定律,进而讨论磁路的计算方法。

### 1.1 磁场的基本物理量

磁场可由电流产生,整个磁场的情况可形象地用磁感线来描述,磁感线是闭合的曲线,且与闭合电路相交链,其方向与产生该磁场的电流方向符合右手螺旋定则。磁感线上每一点的切线方向与该点磁场的方向一致,而磁场的强弱则可用磁感线的疏密程度显示。

若磁感线是一组间距相等的平行线时,这种磁场称为均匀磁场。

在对磁场进行分析和计算时,常用到以下几个物理量:

#### (1) 磁通 $\Phi$

磁场中穿过某一截面积  $A$  的总磁感线数称为通过该面积的磁通量,简称磁通(magnetic flux),用  $\Phi$  表示,其单位为韦[伯](Wb)。

#### (2) 磁感应强度 $B$

磁感应强度(flux density)是描述磁介质中实际的磁场强弱和方向的物理量,它是一个矢量,用  $B$  表示,其数值表示磁场的强弱,其方向表示磁场的方向。在均匀磁场中,若通过与磁感线垂直的某面积  $A$  的磁通为  $\Phi$ ,则

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1.1.1)$$

即磁感应强度在数值上就是与磁场方向垂直的单位面积上通过的磁通,所以磁感应强度也称为磁通密度。 $B$  的单位为特[斯拉](T), $A$  的单位为平方米( $\text{m}^2$ )。

### (3) 磁场强度 $H$

磁场强度(magnetic field intensity)是进行磁场计算时引进的一个辅助物理量。磁场强度是一个矢量,用  $H$  表示。其方向与  $B$  的方向相同,即磁场方向。它并非磁介质中某点磁场强弱与方向的实际值。在数值上  $H$  和  $B$  不相等,这可通过电流在无限大均匀介质中所产生的磁场为例来说明它们的区别。在该磁场中,除电流产生的磁场外,介质被磁化后还会产生附加磁场。 $H$  与  $B$  的主要区别是: $H$  代表电流本身产生的磁场的强弱,反映了电流的励磁能力,其大小只与产生该磁场的电流的大小成正比,与介质的性质无关; $B$  代表电流所产生的以及介质被磁化后所产生的总磁场的强弱,其大小不仅与电流的大小有关,还与介质的性质有关。 $H$  的单位为安每米(A/m)。

### (4) 磁导率 $\mu$

磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  之比称为磁导率(Permeability),用  $\mu$  表示,即

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.1.2)$$

它是衡量物质导磁能力的物理量,单位是亨每米(H/m)。

真空的磁导率为一常数,用  $\mu_0$  表示,其值为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (1.1.3)$$

## 1.2 物质的磁性能

自然界的物质按照磁导率的不同,大体上可分为两大类:磁性物质(magnetic material)和非磁性物质(non-magnetic material)。

非磁性物质亦称非铁磁物质,其磁导率  $\mu$  近似等于真空的磁导率  $\mu_0$ 。它又分为顺磁物质和反磁物质两种。顺磁物质(如变压器油和空气)的  $\mu$  稍大于  $\mu_0$ ,反磁物质(如铜和铋)的  $\mu$  稍小于  $\mu_0$ 。工程上将非磁性物质的  $\mu$  均视为等于  $\mu_0$ 。非磁性物质的  $B$  和  $H$  成线性关系。

磁性物质亦称铁磁物质,其磁性能主要有以下几点。

### 1. 高导磁性

磁性物质的  $\mu \gg \mu_0$ ,二者之比可达数百至数万。如铸钢的  $\mu$  约为  $\mu_0$  的 1 000

倍,硅钢片的  $\mu$  约为  $\mu_0$  的 6 000~7 000 倍,坡莫合金的  $\mu$  可比  $\mu_0$  大几万倍。

磁性物质的特点主要是由于铁磁物质内部存在着很多很小的强烈地沿同一方向自发磁化了的区域,称为“磁畴”。磁化前,无外磁场作用时,如图 1.2.1 所示,磁畴杂乱地排列,磁场互相抵消,对外界不显示磁性。若将铁磁物质放入磁场,则在外磁场作用下,磁畴的轴线趋于一致,形成一个附加磁场,叠加在外磁场上,从而使合成磁场大为增强,如图 1.2.2 所示。磁畴所产生的附加磁场比非磁性物质在同一磁场强度下所激励的磁场强得多,故铁磁物质的磁导率比非铁磁物质大得多。

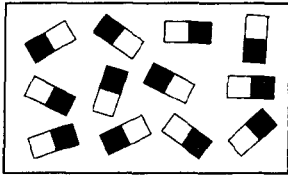


图 1.2.1 磁畴(磁化前)

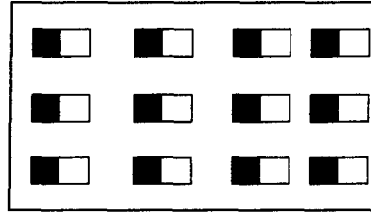


图 1.2.2 磁畴(磁化时)

磁性物质的这一性质被广泛应用于变压器和电机中,变压器和电机中的磁场大多是由通过线圈的电流来产生的,而这些线圈都是绕在磁性物质(称为铁心)上的,采用铁心后,在同样的电流下,铁心中的  $B$  和  $\Phi$  将大大增加且比铁心外的  $B$  和  $\Phi$  大得多,这样,一方面可用较小的电流产生较强的磁场,另一方面可使绝大部分磁通集中在由磁性物质限定的空间内。

## 2. 磁饱和性

磁性物质的磁导率  $\mu$  不但远大于  $\mu_0$ ,而且不是常数,即  $B$  与  $H$  不成正比。二者的关系称为  $B-H$  曲线或磁化曲线。当磁场强度  $H$  由零逐渐上升时,磁感应强度  $B$  从零增加的过程如图 1.2.3 所示,称为**初始磁化曲线**或**起始磁化曲线**(initial magnetization curve)。

在外界磁场  $H$  的作用下,磁性物质中的磁畴出现了两种过程:与外磁场同向的磁畴边界扩大的增大过程以及其他方向的磁畴顺外磁场方向转动的过程。图 1.2.3 曲线的  $Oa$  段,外磁场  $H$  较弱, $H$  的增加主要是与外磁场同方向的磁畴边界增大的过程, $B$  增加缓慢;在  $ab$  段,外磁场  $H$  较强,主要是磁畴沿外磁场方向转动过程, $B$  迅速增大;在  $bc$  段,外磁场增大时能够沿外磁场方向转动的磁畴越来越

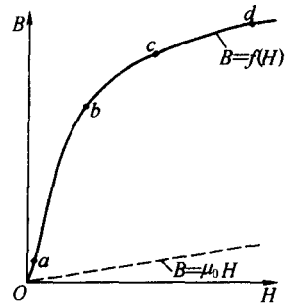


图 1.2.3 磁性物质的起始磁化曲线

少,  $H$  增加,  $B$  的增加渐渐变慢, 出现了磁饱和现象; 在  $cd$  段, 磁性材料内所有的磁畴都转到与外磁场一致的方向,  $B$  和  $H$  的关系类似于真空中的情况。

磁饱和现象的存在使得下一节磁路问题的分析成为非线性问题, 因而要比线性电路的分析复杂。

磁化曲线一般很难用准确的数学式来表达, 都是用实验方法测绘出来的, 它是进行磁路计算不可缺少的资料, 几种常用磁性材料的磁化曲线如图 1.2.4 所示。

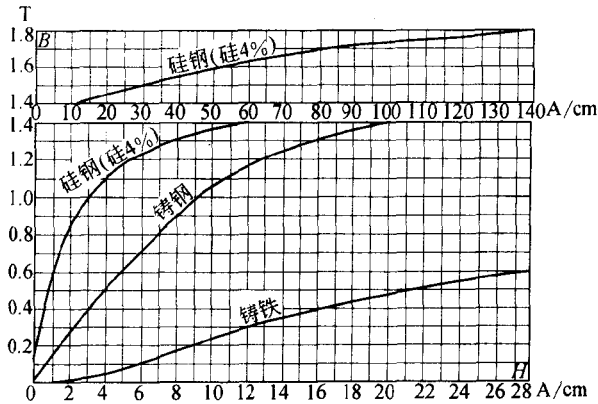


图 1.2.4 磁化曲线

### 3. 磁滞性

磁性物质都具有保留其磁性的倾向, 因而  $B$  的变化总是滞后于  $H$  的变化, 这种现象称为磁滞现象。当线圈中通入交流电流时, 若开始时铁心中的  $B$  随  $H$  从零沿初始磁化曲线增加, 最后随着与电流成正比的  $H$  反复交变,  $B$  将沿着图 1.2.5 所示的称为磁滞回线的闭合曲线变化。

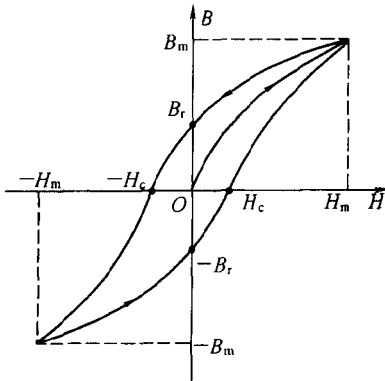


图 1.2.5 磁滞回线

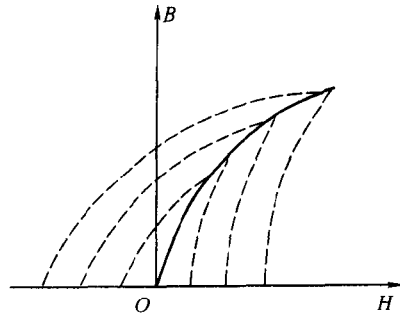


图 1.2.6 基本磁化曲线

当  $H$  降为零时,铁心的磁性并未消失,它所保留的磁感应强度  $B_r$  称为剩磁强度。永久磁铁的磁性就是由  $B_r$  产生的。当  $H$  反方向增加至  $-H_c$  值时,铁心中的剩余磁性才能完全消失,使  $B=0$  的  $H$  值  $H_c$  称为矫顽磁力。

对同一铁磁物质,选取不同值的一系列  $H_m$  多次交变磁化,可得到一系列磁滞回线,如图 1.2.6 中的虚线所示,由这些磁滞回线的正顶点与原点连成的曲线称为基本磁化曲线(fundamental magnetization curve)或标准磁化曲线(normal magnetization curve),它通常可表征物质的磁化特性,是分析计算磁路的依据。

按磁滞回线的不同,磁性物质又可分为硬磁物质、软磁物质和矩磁物质三种。

硬磁物质的磁滞回线很宽,  $B_r$  和  $H_c$  都很大,如钴钢、铝镍钴合金和钕铁硼合金等,常用来制造永久磁铁。

软磁物质的磁滞回线很窄,  $B_r$  和  $H_c$  都很小,如软铁、硅钢、玻莫合金和铁氧体等,常用来制造变压器、电机和接触器等的铁心。

矩磁物质的磁滞回线接近矩形,  $B_r$  大、 $H_c$  小,如镁锰铁氧体(磁性陶瓷)和某些铁镍合金等,常用在电子技术和计算技术中。

## 1.3 磁路的基本定律

如前所述,在利用磁场实现能量转换的装置中,常采用具有高导磁性的磁性物质做成铁心,将线圈绕于其上通以电流产生磁场。

于是,如图 1.3.1 所示,电流通过线圈时所产生的磁通可以分为以下两部分:大部分经铁心而闭合的磁通  $\Phi$  称为主磁通(main magnetic flux),小部分经空气等非磁性物质而闭合的磁通  $\Phi_0$  称为漏磁通(leakage magnetic flux)。漏磁通常可以忽略不计。大量磁通集中通过的路径,即主磁通通过的路径称为磁路(magnetic circuit)。在这种情况下,研究电流与它所产生的磁场的问题便可简化为磁路的分析和计算了。

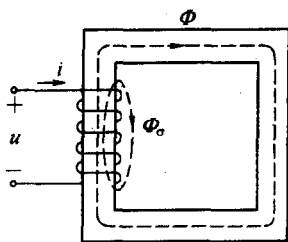


图 1.3.1 磁路

磁路的分析和计算同电路的分析和计算一样,可以通过一些基本定律来进行。磁路的基本定律是由物理学中已学过的磁通连续性原理和全电流定律导出的。

### 1. 磁路欧姆定律

磁路欧姆定律是分析磁路的基本定律。现以图 1.3.2 所示磁路为例来介绍



定律内容。

该磁路由铁心和空气隙两部分组成。设铁心部分各处材料相同、截面积相等,用  $A_c$  表示,它的平均长度即中心线的长度为  $l_c$ ;空气隙部分的磁路截面积为  $A_0$ ,长度为  $l_0$ 。由于磁感线是连续的,通过该磁路各截面积的磁通  $\Phi$  相同,而且磁感线分布可认为是均匀的,故铁心和空气隙两部分的磁感应强度和磁场强度的数值分别为

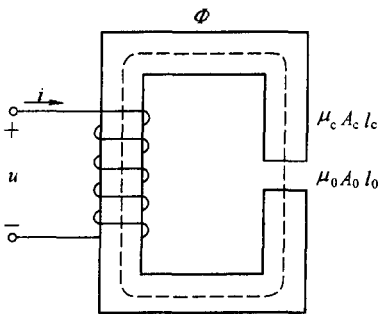


图 1.3.2 磁路欧姆定律

$$B_c = \frac{\Phi}{A_c}$$

$$B_0 = \frac{\Phi}{A_0}$$

$$H_c = \frac{B_c}{\mu_c} = \frac{\Phi}{\mu_c A_c}$$

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_0 A_0}$$

全电流定律指出:在磁路中,沿任一闭合路径,磁场强度的线积分等于与该闭合路径交链的电流的代数和。用公式表示,即

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I \quad (1.3.1)$$

当电流的方向与闭合路径的积分方向符合右手螺旋定则时,电流前取正号,反之取负号。将此定律应用于图 1.3.3 所示磁路,取其中心线处的磁感线回路为积分回路。由于中心线上各点的  $\mathbf{H}$  方向与  $\mathbf{l}$  方向一致,铁心中各点的  $H_c$  是相同的,空气隙中各点的  $H_0$  也相同,故式(1.3.1)左边为

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = H_c l_c + H_0 l_0 = \left( \frac{l_c}{\mu_c A_c} + \frac{l_0}{\mu_0 A_0} \right) \Phi$$

令

$$R_{mc} = \frac{l_c}{\mu_c A_c}$$

$$R_{m0} = \frac{l_0}{\mu_0 A_0}$$

$$R_m = R_{mc} + R_{m0} = \frac{l_c}{\mu_c A_c} + \frac{l_0}{\mu_0 A_0} \quad (1.3.2)$$

分别称为铁心、空气隙和磁路的磁阻(magnetic reluctance)。

式(1.3.1)右边的  $\sum I$  等于线圈的匝数  $N$  与电流  $I$  的乘积,即

$$\sum I = NI$$