

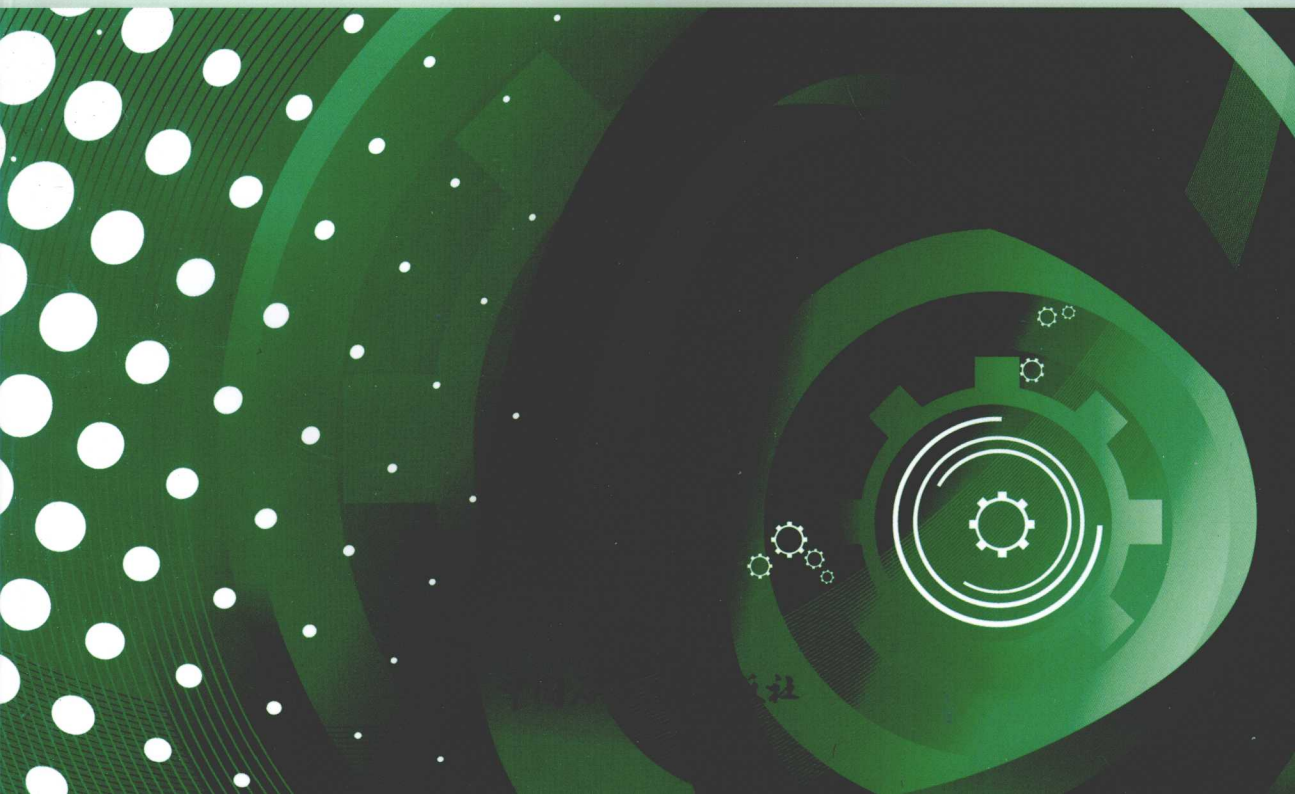



中国石油大学(华东)远程与继续教育系列教材

# 电机与拖动基础

FUNDAMENTALS OF ELECTRICAL  
MACHINERY AND ELECTRICAL DRIVE

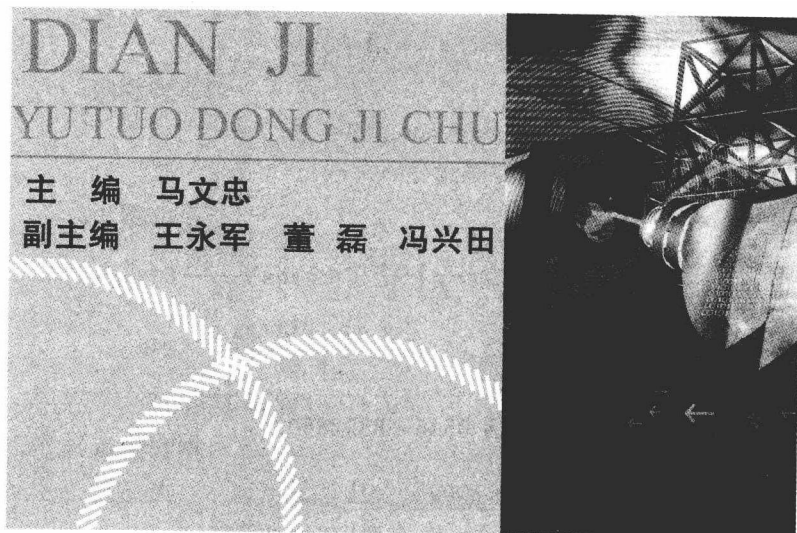
主编 马文忠 副主编 王永军 董磊 冯兴田



 中国石油大学（华东）远程与继续教育系列教材

# 电机与拖动基础

---



中国石油大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

电机与拖动基础/马文忠主编. —东营:中国石油大学出版社,2009.5

ISBN 978-7-5636-2314-3

I. 电… II. 马… III. ①电机 ②电力传动 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 078212 号

书 名: 电机与拖动基础  
作 者: 马文忠等

---

责任编辑: 高 颖 刘 洋(电话 0546—8392860)

封面设计: 王长皓

---

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257061)

地 址: 山东省东营市北二路 271 号

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

排 版 者: 青岛海讯科技有限公司

印 刷 者: 青岛双星华信印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392791)

开 本: 180×235 印张: 23.5 字数: 484 千字

版 次: 2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

中国石油大学(华东)  
远程与继续教育系列教材编审委员会

主任：王瑞和

副主任：齐高岱 刘衍聪

委员：戴俊生 邱正松 刘雪暖 崔学政 李雷鸣

署恒木 刘润华 梁 鸿 吕巍然 李书光

孙秀丽 王建军 王天虎 马国刚

# 总序

从1955年创办函授夜大学至今,中国石油大学成人教育已经走过了从初创、逐步成熟到跨越式发展的50载历程。50多年来,我校成人教育紧密结合社会经济发展需求,积极开拓新的服务领域,为石油、石化企业培养、培训了10多万名本专科毕业生和管理与技术人才,他们中的大多数已经成为各自工作岗位的骨干和中坚力量。我校成人教育始终坚持“规范管理、质量第一”的办学宗旨,坚持“为石油石化企业和经济建设服务”的办学方向,赢得了良好的社会信誉。

自2001年1月教育部批准我校开展现代远程教育试点工作以来,我校以“创新教育观念”为先导,以“构建终身教育体系”为目标,整合函授夜大学教育、网络教育、继续教育资源,建立了新型的教学模式和管理模式,构建了基于卫星数字宽带和计算机宽带网络的现代远程教育教学体系和个性化的学习支持服务体系,有效地将学校优质教育资源辐射到全国各地,全力打造中国石化大学现代远程教育的品牌。目前,办学领域已由创办初期的函授夜大学教育发展为今天的集函授夜大学教育、网络教育、继续教育、远程培训、国际合作教育于一体的,在国内具有领先水平、在国外具有一定影响的现代远程开放教育系统,成为学校高等教育体系的重要组成部分和石油、石化行业最大的成人教育基地。

为适应现代远程教育发展的需要,学校于2001年9月正式启动了网络课程研制开发和推广应用项目,斥巨资实施“名师名课”教学资源精品战略工程,选拔优秀教师开发网络教学课件。随着流媒体课件、WEB课件到网络课程的不断充实与完善,建构了内容丰富、形式多样的网络教学资源超市,基于网络的教学环境初步形成,远程教育的能力有了显著提高,这些网上教学资源的建设与研发为我校远程教育的顺利发展起到了支撑和保障作用。相应地,作为教学资源建设的一个重要组成部分,与网络教学课件相配套的纸质教材建设就成为一名愈来愈重要的任务。根据学校现代远程教育发展规划,在“十

“一五”期间,学校将推进精品课程、精品网络课件和教材的建设工作,通过立项研究方式启动远程与继续教育系列教材建设工作,选聘石油石化行业和有关石油高校专家、学者参与系列教材的开发和编著工作,计划用5年的时间,以石油、化工等主干专业为重点,陆续推出成人学历教育、岗位培训、继续教育三大系列教材。系列教材将充分吸收科学技术发展和成人教育教学改革最新成果,体现现代教育思想和远程教育教学特点,具有先进性、科学性和远程教育教学的适用性,形成纸质教材、多媒体课件、网上教学资源互为补充的立体化课程学习包。

为了保证远程与继续教育系列教材编写出版进度和质量,学校成立了专门的远程与继续教育系列教材编审委员会,对系列教材进行严格的审核把关,中国石油大学出版社也对系列教材的编辑出版给予了大力支持和积极配合。目前,远程与继续教育系列教材的编写还处于探索阶段,随着我校现代远程教育的进一步发展,新课程的开发、新教材的编写将持续进行,本系列教材的体系也将不断完善。我们相信,有广大专家、学者们的共同努力,一定能够创造出体现现代远程教育教学和学习特点的,体系新、水平高的远程与继续教育系列教材。

编委会

2006年10月

# 前 言

“电机与拖动基础”是电气工程专业一门重要的专业基础课,它既是掌握后续专业课的关键性课程,本身又是电气工程专业实际应用的重要内容,与科研和工程实际密切相关,所以在电气工程专业课程中的地位极其重要;同时,“电机与拖动基础”在整个专业课程体系中既是重点又是难点,具有理论性强、知识抽象的特点,学生学习的难度较大。根据以上特点,编者总结多年来从事本课程教学、实际现场应用及科研工作的经验,从加强能力培养、注重基础知识、面向实际应用等方面出发编写了本书。在本书的编写工作中,针对远程教育的特点,尽量简化复杂的理论分析和公式推导,着重分析各种电机的结构、工作原理和运行特性,侧重于阐述电力拖动中电动机满足不同工艺要求进行起动、调速、制动中的实际问题和解决方法,力求深入浅出,既便于教学,也便于学生理解,立足培养学生的工程观点和处理一些实际问题及工程分析的能力,体现鲜明的实用特色,满足远程教育的需要。

本书由马文忠担任主编,具体参与编写的有王永军(第2章、第3章)、董磊(第4章、第7章)、马文忠(第5章、第6章)、冯兴田(第1章、学习指导及习题)。另外,研究生李新瑞进行了部分章节的编写、整理及图表的绘制工作,在此表示感谢。

限于编者水平,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2009年1月

# 目 录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	(1)
§ 1.1 概述 .....	(1)
§ 1.2 电磁定律基础知识 .....	(3)
§ 1.3 铁磁材料的特性 .....	(10)
§ 1.4 磁路计算 .....	(15)
§ 1.5 电磁感应定律及电磁力定律 .....	(20)
§ 1.6 本教材的学习方法 .....	(22)
<b>第 2 章 直流电机</b> .....	(27)
§ 2.1 直流电机的工作原理 .....	(28)
§ 2.2 直流电机的基本结构 .....	(31)
§ 2.3 直流电机的额定值 .....	(37)
§ 2.4 直流电机的电枢绕组 .....	(39)
§ 2.5 直流电机的磁场 .....	(44)
§ 2.6 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率 .....	(51)
§ 2.7 直流电动机运行的基本方程式和工作特性 .....	(53)
§ 2.8 直流电机的换向 .....	(60)
<b>第 3 章 直流电机的电力拖动</b> .....	(67)
§ 3.1 电力拖动概述 .....	(67)
§ 3.2 电力拖动系统的运动方程式 .....	(68)
§ 3.3 生产机械的负载转矩特性 .....	(70)
§ 3.4 直流电动机的机械特性 .....	(72)
§ 3.5 他励直流电动机的起动 .....	(78)
§ 3.6 他励直流电动机的制动 .....	(80)
§ 3.7 他励直流电动机的调速 .....	(91)
§ 3.8 串励和复励直流电动机的电力拖动 .....	(96)
<b>第 4 章 变压器</b> .....	(108)
§ 4.1 变压器的分类 .....	(109)



§ 4.2	变压器的工作原理和结构 .....	(110)
§ 4.3	变压器的空载运行 .....	(116)
§ 4.4	变压器的负载运行 .....	(122)
§ 4.5	变压器参数的试验测定 .....	(129)
§ 4.6	标么值 .....	(134)
§ 4.7	变压器的工作特性 .....	(135)
§ 4.8	三相变压器 .....	(143)
§ 4.9	特殊变压器 .....	(151)
<b>第 5 章</b>	<b>三相感应异步电动机 .....</b>	<b>(161)</b>
§ 5.1	异步电动机的类型、原理和基本结构 .....	(162)
§ 5.2	交流电机的电枢绕组 .....	(172)
§ 5.3	交流绕组的感应电动势 .....	(181)
§ 5.4	交流绕组建立的磁动势 .....	(191)
§ 5.5	三相异步电动机转子静止时的运行分析 .....	(202)
§ 5.6	三相异步电动机转子转动时的运行分析 .....	(209)
§ 5.7	三相异步电动机的功率和转矩 .....	(220)
§ 5.8	三相异步电动机的工作特性 .....	(225)
§ 5.9	三相异步电动机的参数测定 .....	(227)
<b>第 6 章</b>	<b>三相异步电动机的电力拖动 .....</b>	<b>(240)</b>
§ 6.1	三相异步电动机的机械特性 .....	(241)
§ 6.2	三相异步电动机的起动 .....	(249)
§ 6.3	三相异步电动机的制动 .....	(262)
§ 6.4	三相异步电动机的调速 .....	(270)
<b>第 7 章</b>	<b>三相同步电机 .....</b>	<b>(287)</b>
§ 7.1	同步电机的基本工作原理和结构 .....	(288)
§ 7.2	同步电机的电枢反应 .....	(293)
§ 7.3	同步电动机的电动势平衡方程式、等效电路和相量图 .....	(297)
§ 7.4	同步电动机的功率、功角特性、矩角特性和有功功率的调节 .....	(302)
§ 7.5	同步电动机的无功功率调节和 V 形曲线 .....	(308)
§ 7.6	同步电动机的起动 .....	(312)
§ 7.7	同步发电机 .....	(317)
<b>答 案</b>	.....	<b>(334)</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>(366)</b>

# 第1章 绪论

## 本章导学

### 1. 教学要求

磁路是整个电机学的基础,也是电气工程专业其他后续课程知识,如控制电机、传感器和执行器、自动化电磁元件、电力系统等的理论基础。为此,要求通过磁路部分的学习牢固掌握:

(1) 磁路的基本定律:安培环路定律及均匀磁路的欧姆定律、铁磁材料的特性、电磁感应定律。

(2) 铁磁物质的基本磁化曲线与磁滞回线。

(3) 直流与交流磁路的共同特点及各自的分析方法。

### 2. 知识要点

(1) 本章重点:电机的定义、分类,电磁感应定律,铁磁材料的特性。

(2) 本章难点:电势的正方向、磁路分析、磁路欧姆定律、磁路计算。

## § 1.1 概述

### 1.1.1 课程简介

“电机与拖动基础”是电气工程专业一门重要的专业基础课。一方面,只有掌握扎实的电机及其控制知识,才能够顺利学习后续的“电力拖动自动控制系统”、“交流调速系统”、“电力系统分析”等一系列专业课,可以说“电机与拖动基础”课程是整个专业课程体系中的关键性课程,承担着承上启下的重要作用;另一方面,课程本身的内容是电气专业在工程实际应用和科研工作中所必需的重要知识,常用于解决大量的实际问题,其作用丝毫不逊色于任何其他后续的专业课程,因此,它在电气专业课程中的地位极其重要。

本课程将详细论述直流电机、变压器、交流异步电机、交流同步电机等的结构及工作原理,同时对各种电机的起动、制动、调速方法等电力拖动的理论知识进行深入的讲解,对各种电机的不同性能、适用场合、控制方法等进行分析。另外,本课程也对电机技术的最新发展及应用进行了介绍。

### 1.1.2 电机的概述

电机(motor)是指各种依据电磁感应定律和电磁力定律实现机电能量转换和信号传递与转换的装置。电机在电力工业、工矿企业、农业、交通运输业、国防、科学文化及日常生活等方面都是十分重要的设备。

在电力工业中,电机是发电厂和变电站的主要设备。发电厂利用发电机将机械能转换为电能,然后电能经各级变电站利用变压器改变电压等级,再进行传输和分配。此外,发电厂的多种辅助设备,如给水泵、鼓风机、调速器、传送带等,也都需要电机驱动。在工矿企业中,各种工作动力机、压缩机、起重机、水泵、风机等都需要电机驱动和控制。无论企业大小,都离不开电机设备,一个现代化的大中型企业通常要装备几千乃至几万台不同类型的电机。另外,石油的钻探、采油、注水及各种加压泵送过程,煤炭的开采和输送过程,化工生产的提炼和加工设备,交通运输中的汽车电气、电力机车、磁悬浮列车、飞机舰船,农业中的电力排灌、农产品加工,日常生活中的各种电动工具、电动玩具、家用电器,科教文化中的各种办公自动化设备和计算机外部设备,国防高科技领域的航空、航天、制导、跟踪、定位等自动控制系统以及脉冲大功率电磁发射技术等都离不开电机,电机的应用越来越广泛。因此,电机在国民经济建设中起着重要的作用,并且伴随着电力电子技术和计算机控制技术的发展,电机设计制造及控制技术不断向前突破,是一门充满无限活力与发展前景的学科。

### 1.1.3 电机的分类

电机的种类很多,分类方法也有很多,一般采用以下几种:

- ① 按运动方式分:静止的有各种变压器等,运动的有直线电机和旋转电机等。
- ② 按电源性质分:可以分为直流电机和交流电机两大类。
- ③ 按功能用途分:该分类方法是目前普遍采用的,也是大部分电机学课程采用的分类方法,如图 1-1 所示。

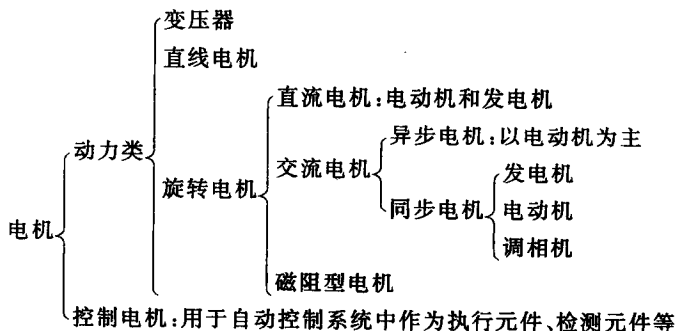


图 1-1 电机按功能用途分类

本书按功能用途分类,主要分析直流电机、变压器、异步电机、同步电机的原理、结构及控制方法。在分析这些内容之前,我们有必要首先熟悉相关的电磁基础知识。

## 思考题?

了解电机的各种分类方法及相应的电机种类。

## § 1.2 电磁定律基础知识

电机是通过电磁感应原理实现能量转换的机械,因此,电和磁是构成电机的两大要素,它们相互关联,缺一不可。电在电机中主要以路的形式出现,即由电机内的线圈(或绕组)构成电机的电路。有关电机电路的理论知识在“电路”中已进行了详细的讲授,这里就不再介绍。磁在电机中是以场的形式存在的,其分析以麦克斯韦方程组为基础,计算起来比较复杂,因此在一般的工程分析计算时常把磁场简化为磁路来处理,而且其准确度已满足要求。与电路相比,磁路方面的理论知识有必要进行总结和补充。本节主要介绍磁路的基本概念、基本定律及分析方法。

### 1.2.1 磁场的基本物理量

#### 1) 磁场、磁感应强度

我们知道,运动电荷(电流)的周围空间存在着磁场。在电机中除了采用永磁材料产生磁场外,常用线圈套装在铁心上,当线圈中有电流通过时,在线圈周围的空间就会形成磁场,称为电磁场。电磁场是由电流产生的。描述磁场中某点的磁场强弱和方向的物理量称为磁感应强度  $B$ ,它是一个矢量。

在给定的磁场中某一点的磁感应强度  $B$  的大小和方向都是确定的。若用假想的曲线来表示磁场的分布,则规定曲线上每一点的切线方向就是该点的磁感应强度  $B$  的方向。这样的曲线叫做磁感应线或磁力线。

磁感应线总是闭合的,且围绕着产生它的电流,其方向则与产生它的电流的方向符合右手螺旋定则。

磁场中各点的磁感应强度的大小可以通过磁感应线的疏密来表示。磁场强的地方,磁感应强度大,磁感应线密;磁场弱的地方,磁感应强度小,磁感应线疏。

若磁场内各点的磁感应强度大小相等,方向也相同,则称该磁场为均匀磁场。

在国际单位制中,磁感应强度的单位为 T(特斯拉),即  $\text{Wb}/\text{m}^2$ 。

#### 2) 磁通

穿过某一截面  $S$  的磁感应强度  $B$  的总量称为磁通,用  $\Phi$  表示,它定义为:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-1)$$

即磁感应强度  $\mathbf{B}$  在某截面  $S$  上的面积分就是通过该截面的磁通。

在均匀磁场中,若截面  $S$  与磁感应强度  $\mathbf{B}$  垂直,如图 1-2a 所示,则上式变成:

$$\Phi = BS \quad (1-2a)$$

或

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

由式(1-2)可知,磁感应强度的大小等于与磁场方向垂直的单位面积上的磁通,所以磁感应强度又称磁通密度。



图 1-2 均匀磁场中通过某截面的磁通示意图

如果截面  $S$  与磁感应强度  $\mathbf{B}$  不垂直,它的法线与  $\mathbf{B}$  的方向之间的夹角为  $\alpha$ ,如图 1-2b 所示,则:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (1-3)$$

在国际单位制中, $\Phi$  的单位为 Wb(韦伯)。

### 3) 磁链

将一个匝数为  $N$  的线圈置于磁场中,与线圈交链的磁链为  $\Psi$ ,若  $N$  匝线圈中通过的磁通均为  $\Phi$ ,则:

$$\Psi = N\Phi \quad (1-4)$$

式中, $\Psi$  的单位为 Wb。

### 4) 磁场强度与磁导率

在磁场计算中,还引入了一个物理量——磁场强度  $\mathbf{H}$ ,它也是一个矢量。它与磁感应强度  $\mathbf{B}$  满足如下的关系式:

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

式中, $\mu$  为磁场中导磁物质的磁导率,它是表征物质导磁能力的物理量。在国际单位制中, $\mu$  的单位为 H/m, $H$  的单位为 A/m。真空磁导率为  $\mu_0$ , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m。一般来说,导磁物质的磁导率  $\mu \gg \mu_0$ 。

某物质的磁导率  $\mu$  与真空磁导率  $\mu_0$  的比值,称为该物质的相对磁导率  $\mu_r$ ,即:

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

## 1.2.2 磁路和磁路定律

### 1) 磁路的基本概念

磁通所通过的路径称为磁路。图 1-3 表示两种常见的磁路,其中图 1-3a 为变压器的磁路,图 1-3b 为两极直流电机的磁路。

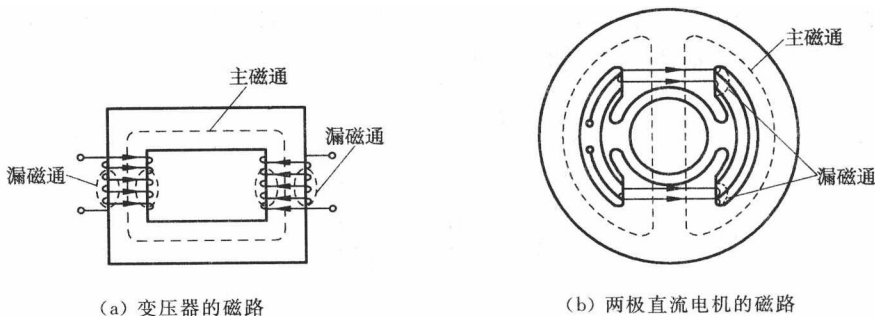


图 1-3 两种常见的磁路

在电机和变压器设计时,常把线圈套装在铁心上。当线圈内通有电流时,在线圈周围的空间(包括铁心内、外)就会形成磁场。由于铁心的导磁性能比空气要强得多,所以绝大部分磁通将在铁心内通过,并在能量传递或转换过程中起耦合场的作用,这部分磁通称为主磁通。围绕载流线圈、部分铁心和铁心周围的空间,还存在少量分散的磁通,这部分磁通称为漏磁通。主磁通和漏磁通所通过的路径分别构成主磁路和漏磁路,图 1-3 中示意地表示出了这两种磁路。

用以产生磁路中磁通的载流线圈称为励磁线圈(或称励磁绕组),励磁线圈中的电流称为励磁电流(或激磁电流)。若励磁电流为直流,则磁路中的磁通是恒定的,不随时间而变化,这种磁路称为直流磁路,直流电机的磁路就属于这一类;若励磁电流为交流,则磁路中的磁通随时间交变变化,这种磁路称为交流磁路,交流铁心线圈、变压器和交流电机的磁路都属于这一类。

虽然利用铁磁材料可把磁通尽量地约束在磁路中,但与电路相比,漏磁现象远比漏电现象严重。这是因为磁路中铁磁材料的磁导率与磁路周围非铁磁材料的磁导率的比值一般约为  $10^3 \sim 10^4$  (空气中的磁导率近似等于真空中的  $\mu_0$ ),而电路中铜的电导率却为周围绝缘物质(例如橡胶)电导率的  $10^{200}$  倍,因此和漏磁相比漏电要轻得多。

考虑漏磁通的磁路计算是相当复杂的,所以为简便起见一般在漏磁通不严重的情况下忽略不计漏磁通的影响,只计算主磁通。

### 2) 磁路的基本定律

进行磁路分析和计算时常用以下几条定律:

### (1) 安培环路定律

在磁路中,沿任意一闭合路径  $l$ , 磁场强度  $H$  的线积分  $\oint_l H dl$  恒等于该闭合路径所包围的电流的代数和  $\sum i$ , 这就是安培环路定律或全电流定律(见图 1-4), 用公式表示, 即:

$$\oint_l H dl = \sum i \quad (1-7)$$

式中,若电流的正方向与闭合回线  $l$  的环行方向符合右手螺旋定则,则  $i$  取正号,否则  $i$  取负号。在图 1-4 中,根据安培环路定律得:

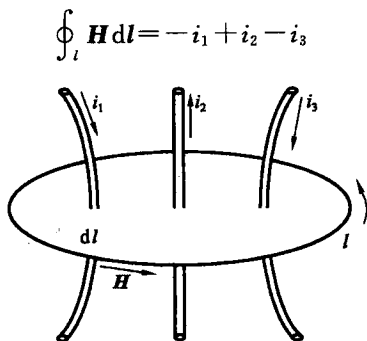


图 1-4 安培环路定律

若沿着回线  $l$ , 磁场强度  $H$  的方向总是沿切线方向, 且大小处处相等, 闭合回线所包围的总电流是由通有电流  $i$  的  $N$  匝线圈所提供的, 则安培环路定律的公式将简化为:

$$Hl = Ni \quad (1-8)$$

安培环路定律确定了磁场与产生磁场的电流之间的关系, 是一条极为重要的磁场定律。

### (2) 磁路的欧姆定律

磁路的欧姆定律是由描述磁场性质的磁路连续性原理和安培环路定律得出的。设无分支磁路由某种铁磁材料构成, 其截面积为  $S$ , 磁路的平均长度为  $l$ , 如图 1-5a 所示, 若平均长度远比横截面的线性尺寸大得多, 则可近似地认为磁通在横截面上的分布是均匀的, 亦即:

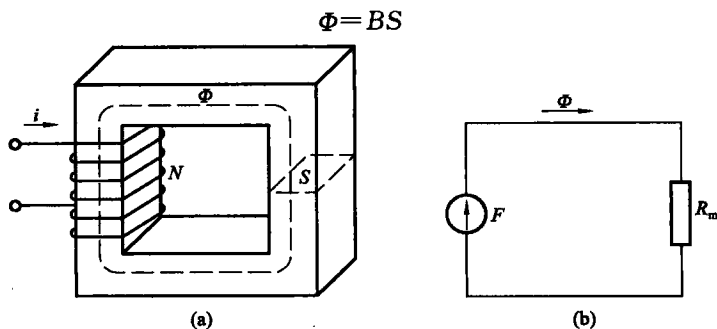


图 1-5 无分支磁路

式中,  $B$  是中心线(即平均长度线)上的磁感应强度。另外, 根据安培环路定律, 有:

$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = Hl = Ni \quad (1-9)$$

式中,  $N$  为励磁绕组的匝数,  $l$  为磁路的平均长度。由于中心线上各点磁场强度矢量的大小相等, 而方向又处处与中心线长度单元  $d\mathbf{l}$  的方向一致, 故在上式中  $H$  可以移到积分号的外面。又因为  $B = \mu H$ , 则由以上两式可得:

$$\Phi = BS = \mu HS = \mu \frac{Ni}{l} S = \frac{Ni}{\frac{l}{\mu S}} \quad (1-10)$$

上式在形式上与电路的欧姆定律相似, 磁路中的磁通  $\Phi$  对应于电路中的电流  $i$ ; 磁路中的  $Ni$  对应于电路中的电动势  $E$ , 因而  $Ni$  称为磁动势, 用  $F$  表示; 磁路中的  $\frac{l}{\mu S}$  对应电路中的电阻  $R = \frac{l}{\gamma S}$  ( $\gamma$  为电导率), 因此  $\frac{l}{\mu S}$  ( $\mu$  为磁导率) 称为磁阻  $R_m$ 。这样就得到:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-11)$$

上式称为磁路的欧姆定律。

应当指出, 由于磁导率  $\mu$  随磁场强度  $H$  的大小而变, 不是一个常数, 所以磁阻是非线性的。

若令  $G_m = \frac{1}{R_m}$ , 则上式又可写成:

$$\Phi = G_m F \quad (1-12)$$

式中,  $G_m$  称为磁导。

在国际单位制中, 磁动势的单位为 A, 磁导的单位为 Wb/A, 磁阻的单位为 A/Wb。

**【例 1-1】** 有一闭合铁心磁路, 磁路的平均长度  $l = 0.3 \text{ m}$ , 铁心的磁导率  $\mu_{Fe} = 5000\mu_0$ , 套在铁心上的励磁绕组为 500 匝。试求在铁心中产生 1 T 的磁通密度时所需的励磁磁动势和励磁电流。

解: 用安培环路定律来求解。

$$\text{磁场强度: } H = \frac{B}{\mu_{Fe}} = \frac{1}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 159 \text{ (A/m)}$$

$$\text{磁动势: } F = Hl = 159 \times 0.3 = 47.7 \text{ (A)}$$

$$\text{励磁电流: } I = \frac{F}{N} = \frac{47.7}{500} = 9.54 \times 10^{-2} \text{ (A)}$$

### (3) 磁路的基尔霍夫第一定律

根据磁通连续性原理, 在磁路中任取一闭合面  $S$ , 则闭合面磁通的代数和必为零, 亦即进入闭合面的磁通等于离开闭合面的磁通, 故有:

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-13)$$

上式称为磁路的基尔霍夫第一定律, 与电路的基尔霍夫电流定律相对应。

式(1-13)中, 如果把穿出闭合面  $S$  的磁通前面取正号, 则穿进闭合面的磁通前面取



负号,反之亦可。

如图 1-6 所示的有分支的磁路,任取一封闭面  $S$ ,则有:

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

或

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

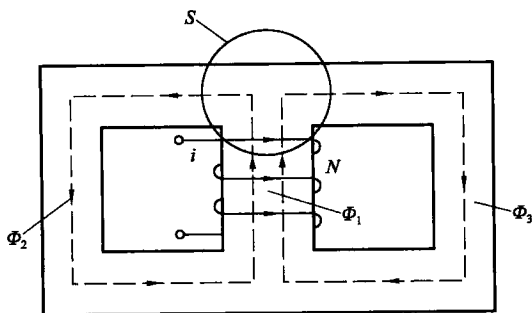


图 1-6 磁路基尔霍夫第一定律示意图

#### (4) 磁路的基尔霍夫第二定律

在磁路中,由于不同截面磁感应强度  $B$  不一定相同,而不同材料的磁导率也不相同,因此各部分的磁场强度  $H$  就会有所不同。

在磁路计算中,我们将磁路分成若干段,凡是材料及截面积相同,其中磁通的数值亦相同的作为一段。在这一段中,各点的磁场强度是相等的。图 1-7 所示的磁路由三段组成,其中两段为截面不同的铁磁材料,一段为空气隙,两段铁磁材料的截面积分别为  $S_1$  和  $S_2$ ,各段的平均长度分别为  $l_1, l_2, l_3$ ,每段上的磁场强度分别为  $H_1, H_2, H_3$ ,铁心上的励磁磁动势为  $NI$ ,根据安培环路定律,可得:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = NI$$

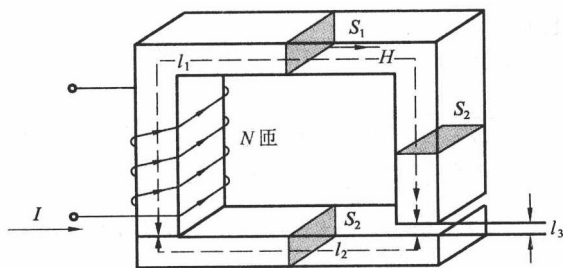


图 1-7 磁路基尔霍夫第二定律

若铁心上有多个磁动势,则:

$$\sum Hl = \sum NI \quad (1-14)$$

式中,若  $H$  的方向与  $l$  的方向一致, $Hl$  前取正号,否则取负号;若电流  $I$  的方向与闭合磁力线的方向符合右手螺旋定则,则  $NI$  前面取正号,否则取负号。式(1-14)为磁路的基尔