

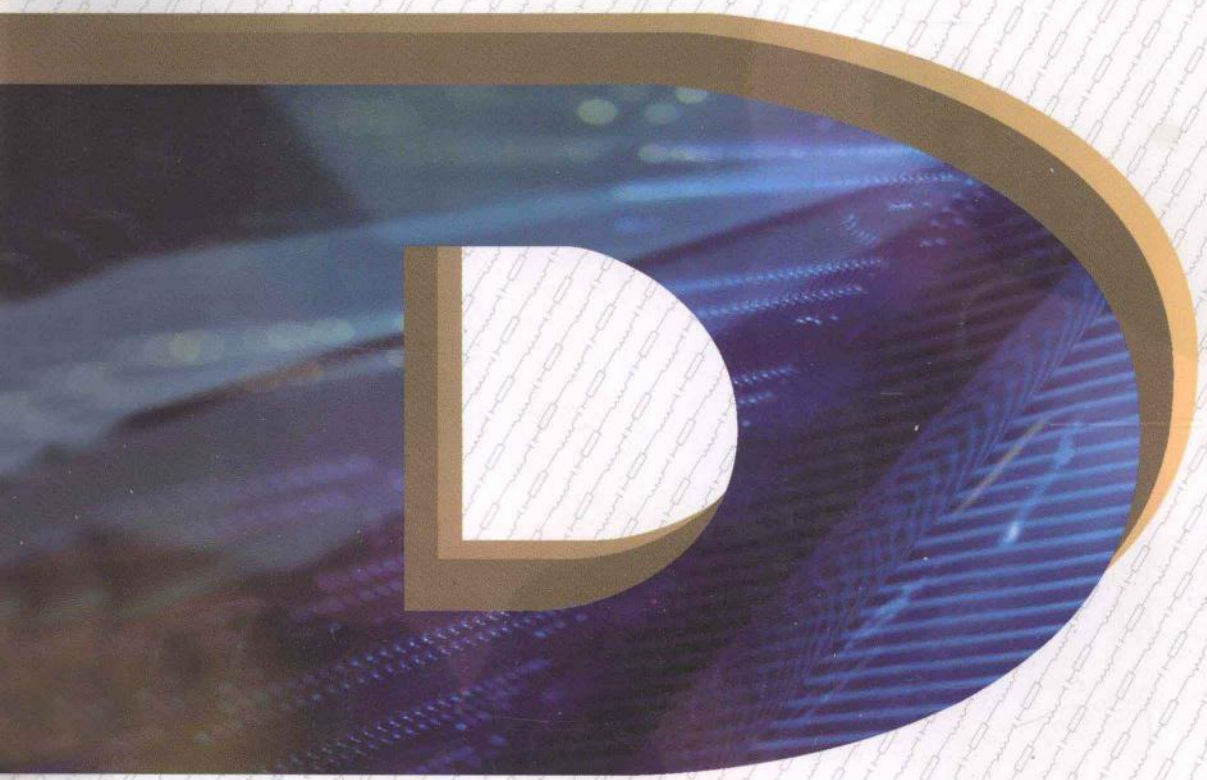
“十一五” 高职高专电气电子相关专业规划教材




DIANJI YU TUODONG JISHU

# 电机与拖动技术

● 许春香 员 莹 主编



 河南科学技术出版社

“十一五”高职高专电气电子相关专业规划教材

# 电机与拖动技术

许春香 员莹 主编

河南科学技术出版社

·郑州·

## 内 容 提 要

本教材是电工系列基础教材之一，是将电机学、电力拖动和控制电机等课程有机结合而成的。本教材是根据高职高专应用型人才培养目标的要求，始终坚持“以应用为目的，以必需、够用为度，以讲清概念、突出实际应用、强化技能培养为重点”的总原则来编写的。

本教材主要内容有磁路、变压器、直流电机、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机及微控电机、电力拖动系统中电动机的选择。

本教材可作为高等职业技术学校、高等工程专科学校和部分成人高等学校的机械、电子类相关专业的“电机及拖动”教材，也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动技术/许春香, 员莹主编. —郑州: 河南科学技术出版社,  
2010. 1

(“十一五”高职高专电气电子相关专业规划教材)

ISBN 978 - 7 - 5349 - 4286 - 0

I. 电… II. ①许…②员… III. ①电机 - 高等学校: 技术学校 - 教材  
②电力传动 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. TM3 TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 067872 号

---

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65737028 65788613

网址: www. hnstp. cn

策划编辑: 孙 彤

责任编辑: 张 恒

责任校对: 王晓红 崔春娟

封面设计: 李 冉

版式设计: 栾亚平

责任印制: 朱 飞

印 刷: 郑州美联印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 16 字数: 385 千字

版 次: 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

---

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

# 序

---

从20世纪90年代末开始,我国高等职业教育进入了快速发展时期。目前,我国高等职业教育的规模,无论是院校数量还是学生数量,都占据了高等教育总规模的半壁江山。高等职业教育是高等教育的一种新类型,承担着为我国走新型工业化道路、调整经济结构和转变增长方式培养高综合素质、高技能人才的任务。随着我国经济建设步伐的加快,特别是随着我国由制造大国向制造强国的转变,现代制造业对高综合素质、高技能专业人才的需求更为迫切。面对这一形势,高职高专院校的电气电子相关专业根据市场和社会需要,开展教学研究和改革,更新教学内容,改进教学方法,推进精品专业、精品课程和教材建设,取得了丰硕的成果。及时总结这些成果并以教材形式予以体现,推广至更多的院校,无疑是一件意义深远的事情。为了适应高职高专教学改革的需要,鼓励教师编写富有特色的教材,促进高职高专电气电子相关专业教学质量的不断提高,河南科学技术出版社根据共同参与、共同建设、共同发展的原则,组织编写了《“十一五”高职高专电气电子相关专业规划教材》。

本套教材涵盖了高职高专电气电子相关专业的专业基础课、主干专业课和实训课。本套教材按照高职教育“以服务为宗旨,以就业为导向”的指导思想和培养高综合素质、高技能人才的基本要求组织编写,对传统的课程体系和教学内容进行了整合和更新,精简了理论内容,突出了专业技能和理论知识应用能力的培养,缩短了学生专业技能与生产一线需求的距离,进一步体现了高职教育的人才培养特色。

参加本套教材编写的作者都是长期从事高职高专教学工作的教师,他们对高等职业技术人才的培养、对电气电子相关专业的课程体系和教学改革具有深刻的理解和思考,在教学实践中积累了丰富的经验。从某种意义上说,本套教材是有关高职高专院校电气电子相关专业多年教学改革成果的体现和凝练。相信这套教材将在高职高专教学工作中发挥积极的作用,并期待着它不断完善,成为高职高专教材中的精品体系。

刘宪林

2008年12月1日

## “十一五” 高职高专电气电子相关专业规划教材 编审委员会名单

主 任 刘宪林

副主任 (按姓氏笔画排序)

王玉中	宁玉伟	祁和义	杜建根
李新德	肖 珑	员 莹	宋海军
张惠敏	张新成	赵 军	赵章吉
耿长清	徐其兴	徐思成	高士忠
董作霖			

委 员 (按姓氏笔画排序)

上官同英	付 涛	刘素芳	许春香
牟光臣	李 伟	李德明	杨志帮
张伟敏	张志军	张桂香	张湘洁
周 铜	郑文杰	赵新颖	郝文玲
胡应占	姚 燕	梅 杨	雷万忠
蔡振伟			

# 前 言

---

《电机与拖动技术》是高职高专院校工业电气自动化技术、建筑电气工程技术、电力系统继电保护、机电一体化等专业的专业基础课，是将电机学、电力拖动和控制电机等课程有机结合而成的一门课，具有重要的地位和作用。

本教材在重点讲解基本原理和基本概念的基础上强调基本理论的实际应用。编写教材时，采用“从实践出发，提出、分析和解决问题，最后总结出概念并推广到一般”的写作方法。教材中编入了一些工程中已经应用的、较为成熟的最新技术，尽量做到取材新颖，特别注重电机理论与电力拖动的衔接，以必需、够用为度，避免过深的理论分析与公式推导。本教材中每章末配有充足的思考题和练习题，用于巩固应掌握的基本知识，以便于学生自检、自测。本教材做到内容模块化，各模块教学目标明确，具有针对性、可组合性和可选择性，便于不同专业选修。为了满足各相关专业的需要，并考虑各相关专业讲授的学时数相差较大，本教材以多学时情况编写，少学时情况可根据专业需要进行选择。内容叙述力求简明扼要，通俗易懂，深入浅出，富于启发性。本教材中的量符号采用新国家标准。

本教材由中州大学许春香和三门峡职业技术学院员莹担任主编，中州大学赵静和河南工程学院邓丽霞担任副主编。本教材共分8章，其中绪论和第7章由中州大学许春香编写，第1章和第3章由三门峡职业技术学院员莹编写，第2章由三门峡职业技术学院王永辉编写，第4章由河南广播电视大学王娜娜编写，第5章由河南工程学院邓丽霞和郭会平编写，第6章和第8章由中州大学赵静编写。

限于编者水平，教材中如有不足或错误之处，敬请读者批评指正。

编者

2009年3月

## 《电机与拖动技术》编写人员

主 编 许春香 员 莹

副主编 赵 静 邓丽霞

编 者 (按姓氏笔画排序)

王永辉 王娜娜 邓丽霞 许春香

员 莹 赵 静 郭会平

# 目 录

---

绪论	1
0.1 电能与电机	1
0.2 电机与电力拖动系统	2
0.3 本课程的性质、内容及任务	3
0.4 本课程的特点和学习方法	3
第1章 磁路	5
1.1 磁路的基本物理量	5
1.2 磁路的基本定律	6
1.3 电机所用材料和铁磁材料的特性	8
小结	10
思考与练习	11
第2章 变压器	12
2.1 变压器的基本工作原理和结构	12
2.2 单相变压器的运行	17
2.3 等效电路参数的测定	26
2.4 变压器的运行特性	29
2.5 三相变压器	31
2.6 其他用途的变压器	35
2.7 变压器常见故障分析与排除	38
小结	43
思考与练习	44
第3章 直流电机	46
3.1 直流电机的基本工作原理和结构	46
3.2 直流电机的励磁方式及磁场	53
3.3 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	57
3.4 直流电机的换向	59
3.5 直流电动机	61
3.6 直流发电机	65
小结	68



思考与练习 .....	69
<b>第4章 直流电动机的电力拖动 .....</b>	<b>71</b>
4.1 电力拖动系统的运动方程式和负载特性 .....	71
4.2 他励直流电动机的机械特性 .....	74
4.3 他励直流电动机的启动 .....	79
4.4 他励直流电动机的制动 .....	84
4.5 他励直流电动机的调速 .....	92
4.6 直流电动机常见故障分析与排除 .....	99
小结 .....	104
思考与练习 .....	106
<b>第5章 三相异步电动机 .....</b>	<b>108</b>
5.1 三相异步电动机的基本工作原理和结构 .....	108
5.2 三相异步电动机的空载运行 .....	118
5.3 三相异步电动机的负载运行 .....	121
5.4 三相异步电动机的功率平衡、转矩平衡和工作特性 .....	130
小结 .....	135
思考与练习 .....	136
<b>第6章 三相异步电动机的电力拖动 .....</b>	<b>139</b>
6.1 三相异步电动机的机械特性 .....	139
6.2 三相异步电动机的启动 .....	145
6.3 三相异步电动机的制动 .....	154
6.4 三相异步电动机的调速 .....	158
6.5 三相异步电动机常见故障分析与排除 .....	169
小结 .....	179
思考与练习 .....	180
<b>第7章 同步电机及微控电机 .....</b>	<b>182</b>
7.1 同步电机 .....	182
7.2 驱动和控制微电机 .....	195
小结 .....	228
思考与练习 .....	229
<b>第8章 电力拖动系统中电动机的选择 .....</b>	<b>231</b>
8.1 电动机的发热和冷却 .....	231
8.2 电动机的工作制分类 .....	232
8.3 电动机容量的选择方法 .....	234
8.4 电动机电流种类、型式、电压、转速的选择 .....	239
小结 .....	240
思考与练习 .....	241
<b>附录 主要符号表 .....</b>	<b>242</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>245</b>

# 绪 论

## 0.1 电能与电机

### 0.1.1 电能的特点及应用

电能是我国国民经济各部门中动力的主要来源，与其他形式的能量相比，它具有明显的优越性，在现代化工农业生产、交通运输、科学技术、信息传输、国防建设以及日常生活等各个领域中得到极为广泛的应用，已经成为现代社会不可缺少的能量形式。而电机是一种将电能与机械能相互转换的电磁机械装置，是电能生产、传输、分配及应用所必需的重要设备。

### 0.1.2 电机的概念和发展

电机是利用电磁感应原理工作的机械，它应用广泛、种类繁多、性能各异，分类方法也很多。电机常用的分类方法主要有两种。

一种是按用途分类，可分为电动机、发电机、变压器和控制电机四大类。电动机的功能是将电能转换为机械能，它可以作为拖动各种生产机械的动力，是国民经济各部门应用最多的动力机械，也是最主要的用电设备，各种电动机消耗的电能占全国总发电量的60%~70%。发电机的功能是将机械能转换为电能。变压器可以将一种电压等级的电能转换为另一种电压等级的同频率电能。控制电机作为控制系统中的检测和执行元件，主要用于信号的变换与传递，作为多种控制元件应用在自动化控制系统中。

另一种是按照电机的结构或转速分类，可分为变压器和旋转电机两大类。变压器为静止电机。旋转电机根据所用电源不同，又可分为直流电机和交流电机两大类。交流电机又分为同步电机和异步电机。电力系统中的发电机几乎都是同步电机，异步电机主要用作电动机。

综合以上分类方法，可归纳如图0-1所示。



图0-1 电机的常用分类

电机行业是一个传统行业。经过200多年的发展，它已经成为现代生产、生活中不可

或缺的核心部分，是国民经济中重要的一环。随着生产现代化程度的不断提高和人们对家用电器、汽车等消费的不断增长，市场对电机提出了性能良好、运行可靠、单位容量的质量更轻、体积更小等方面的要求，推动电机行业在类型、运行性能、经济指标等方面有了很大的改进和提高，对电机的需求也将越来越大。到目前为止，我国的电机制造业已经具有一定规模。大容量电机的生产进步显著，电机的类型日渐齐全，我国生产的微控电机已经占世界电机市场的60%以上，而且有的产品已经达到世界先进水平。

随着我国加入WTO和世界产业布局的调整，我国的电机行业正面临前所未有的机遇和挑战。近年来，我国电机行业发展保持快速增长势头，行业工业总产值、产品销售收入、利润都在逐年增长，从供求角度看，各类电机产品出口额均增长迅速。展望未来，一方面，电机产品在国内市场的有效需求会保持稳定发展，如电力、汽车、家电等消费行业的快速发展，以及它们技术的进步、产品的快速更新换代将扩大电机行业需求空间。另一方面，电机行业在产品结构调整、技术更新和管理水平方面不断提升竞争能力，已融入国际市场，而国际市场电机需求量处于高增长阶段。

## 0.2 电机与电力拖动系统

### 0.2.1 电力拖动系统概述

在现代化工业生产过程中，为了实现各种生产工艺过程，需要使用各种各样的生产机械。拖动各种生产机械运动，可以采用气动、液压传动和电力拖动。电力拖动具有控制简单、调节性能好、损耗小、经济、能实现远距离控制和自动控制等一系列优点，因此大多数生产机械均采用电力拖动。电力拖动系统是生产过程电气化、自动化的重要基础装置。

从19世纪末期开始，电动机开始逐步取代蒸汽机作为拖动生产机械的原动机。用电动机作为原动机来拖动生产机械运行的系统，称为电力拖动系统。电力拖动系统一般由控制设备、电动机、传动机构、工作机构和电源五部分组成。它们的关系如图0-2所示。

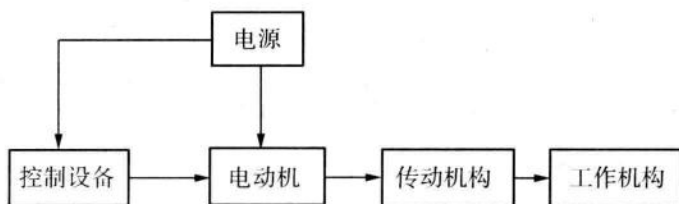


图0-2 电力拖动系统组成

电源向电动机输入电能，并给控制设备提供电力。控制设备由各种控制电机、电器、电子元器件及控制计算机等组成，用来控制电动机的运动，这样就实现了对生产机械运动的自动控制。电动机把电能转换为机械能，通过传动机构把电动机的运动经过中间变速或变换运动方式后，再传给生产机械，驱动生产机械的某一工作机构工作（有些情况下，电动机直接拖动工作机构而不需要传动机构）。工作机构是生产机械为执行某一任务的机械部分，是电力拖动的对象。

按照电动机的种类不同，电力拖动系统分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两大类。

### 0.2.2 电力拖动系统发展概况

最初的电动机拖动生产机械是通过天轴实现的,即用一台电动机通过天轴及机械传动系统拖动一组生产机械,称为“成组拖动”。能量传递以及能量分配完全用机械方法实现,能量损耗大,生产效率低,劳动条件差,而且容易出事故。如果电动机出现故障,则成组的生产机械将停车,直至影响整个车间的生产。这种落后的电力拖动方式已经被淘汰。

20世纪20年代起,生产机械采用“单电动机拖动系统”,省去了大量的中间传动机构,采用电气方式控制电机,来调节电动机的转速,提高了传动效率,增加了灵活性。

随着生产技术和生产规模的扩大,制造出各种大型的复杂机械设备,在一台生产机械上具有多个工作机构,运动形式也相应增多,因此在20世纪30年代,某些生产机械开始采用“多电动机拖动系统”,即每一个工作机构用单独的电动机拖动,每台电动机拖动一根主轴运动。这样,不仅大大简化了生产机械的机械结构,用电气控制线路及装置控制,而且使每一个工作机构各自采用最合理的运动速度,进一步提高生产效率。目前,较大型的生产机械,如龙门刨床、摇臂钻床、铣床等,都采用多电动机拖动系统。

工业生产的发展,对电动机拖动系统提出了更高的要求,比如更高的精度和速度,快速启动、制动和逆转,更宽范围的调速及整个生产过程的自动化等。因此,系统要与各种控制单元组成的自动控制设备联系起来,组成自动化电力拖动系统。这就是现代意义上的电力拖动系统。随着自动控制理论不断发展,现代电力电子技术、计算机技术以及数控技术的不断采用,以及这些高新技术在电力拖动系统中的深入,自动化电力拖动系统正在不断完善和提高。

综上所述,电力拖动系统发展至今,具有很多其他拖动系统无法比拟的优点:启动、制动和调速的控制简单、方便、快速且效率高;电动机的类型多,且具有各种不同的运行特性来满足生产机械的要求;整个系统各参数的检测和信号的变换与传递方便,易于实现最优控制等。因此,电力拖动已经成为国民经济电气自动化的基础。

## 0.3 本课程的性质、内容及任务

本课程是将电机学和电力拖动基础有机结合起来的一门课,是工业电气自动化、电气技术、电力自动化、机电一体化等专业的一门主要的专业基础课。

本课程的内容主要有磁路、变压器、直流电机、直流电动机的电力拖动、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机及微控电机以及电力拖动系统中电动机的选择等八个部分。

本课程从使用电机的观点出发,研究电机的基本结构、工作原理、内部电磁物理过程、功率关系和机械特性等问题,重点放在研究电动机的启动、制动和调速问题上。

本课程的任务是使学生从应用的角度掌握变压器、交直流电机及控制电机的基本工作原理和结构,对电力拖动系统的运行性能、分析计算有一个较全面的理解,掌握选择、使用和维护电机的一般理论和实践知识,从而为后续专业课的学习打好基础,并且有助于培养在电机和电力拖动方面分析和解决问题的能力。

## 0.4 本课程的特点和学习方法

《电机与拖动技术》既是一门理论性很强的技术基础课,又具有专业课的性质,涉及

的基础理论和实际知识面广，是电学、磁学、动力学、热学等学科知识的综合。它运用物理、电工基础等基础课的基本理论来分析电机内部的电磁物理过程，然而它与物理和电工基础的性质不同。首先，它所研究的对象是实物，是一个电、磁、机械的综合体；其次，本课程前后的连贯性很强，各类电机都存在共同点和不同点；最后，本课程以定性分析为主，综合具体条件，对电机的运行进行分析。

电机是一种具体的生产应用机械，它涉及结构、工艺、材料、应用等多方面。用理论分析电机及拖动的实际问题时，应结合电机的具体结构，采用工程观点和工程分析方法，综合考虑生产实际涉及的多种因素，抓住主要问题，简化分析过程，并准确得出结论。

因此，在本课程的学习过程中，要求学生应注意以下几点：

- (1) 要有良好的学习方法，课前预习，并且阅读相关的思考题，带着问题学习。
- (2) 注意观察实物、增加感性认识，在熟悉结构的基础上牢固掌握基本概念、基本原理和主要特性。
- (3) 要抓住主要矛盾，了解工程背景，从工程实际角度考虑，有条件地忽略一些次要因素，抓住问题的本质。
- (4) 要抓住重点，在掌握基本概念和基本原理的基础上去掌握电机和拖动系统的性能和应用。
- (5) 重视实验环节的训练和实习等实践环节的能力培养，加深理论知识理解，促进能力培养。
- (6) 大量阅读参考书籍，坚持在掌握基本概念、基本分析方法的基础上完成相关练习题。

# 第1章 磁路

电机是通过电磁感应原理实现能量转换的机械，因此，电机的工作原理不仅涉及电路问题还涉及磁路问题。本章主要介绍与磁路有关的基本物理量、电磁基本理论以及常用的铁磁材料及其性能。

## 1.1 磁路的基本物理量

### 1.1.1 磁感应强度 $B$

磁感应强度又称为磁通密度，用  $B$  表示，它是表示磁场内某点磁场强弱及方向的物理量，单位为特斯拉 (T)。磁场往往采用磁感线来描绘， $B$  的大小等于通过垂直于磁场方向单位面积的磁感线数目。磁感应强度  $B$  的方向为磁感线在某点的切线方向，如图 1-1 所示。

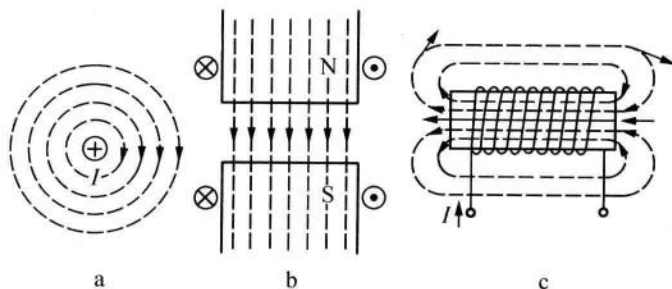


图 1-1 电流磁场中的磁感线

磁场是由电流产生的，磁感应强度  $B$  与产生该磁场的电流的方向满足右手螺旋定则，如图 1-2 所示。

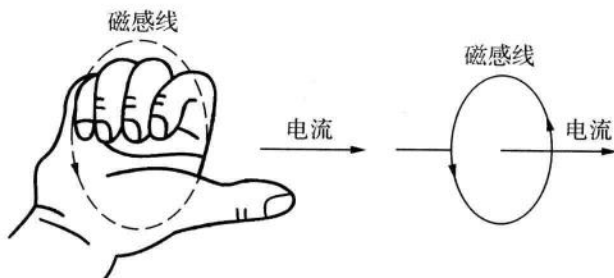


图 1-2 磁感线与电流的右手螺旋定则

### 1.1.2 磁通量 $\Phi$

磁通量简称磁通,用 $\Phi$ 表示,它是表示穿过某一截面 $S$ 的磁感应强度 $B$ 的通量,通常用穿过该截面 $S$ 的磁感线数目表示,即

$$\Phi = \int_S B dS \quad (1-1)$$

在均匀磁场中,且磁场与截面 $S$ 垂直时,式(1-1)可简化为

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

由式(1-2)可知,磁感应强度 $B$ 为单位截面上的磁通,因此称为磁通密度。在国际单位制中, $\Phi$ 的单位为韦伯(Wb); $B$ 的单位为特斯拉(T),则 $1\text{ T} = 1\text{ Wb/m}^2$ 。

### 1.1.3 磁导率 $\mu$

磁导率 $\mu$ 是表示导磁介质导磁性能的物理量,单位为亨/米(H/m)。磁导率 $\mu$ 越大的介质,其导磁性能越好。不同材料的磁导率是不同的,真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$ ,是一个常数,其他导磁介质的磁导率通常用 $\mu_0$ 的倍数表示,即

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-3)$$

式中, $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 为导磁介质的相对磁导率。

铁磁材料的相对磁导率 $\mu_r = 2\ 000 \sim 6\ 000$ ,但不是常数;非铁磁物质的相对磁导率 $\mu_r$ 近似为1,且为常数。

### 1.1.4 磁场强度 $H$

磁场强度 $H$ 是描述磁场与产生磁场的电流之间关系的物理量,单位为安/米(A/m)。它与磁感应强度 $B$ 的关系为

$$B = \mu H \quad \text{或} \quad H = \frac{B}{\mu} \quad (1-4)$$

磁场强度 $H$ 是一个矢量,只与电流大小、线圈匝数以及该点的几何位置有关,而与磁介质的磁导率 $\mu$ 无关,即在一定的电流作用下,同一点的磁场强度不因磁介质的不同而不同,其方向与该点的磁感应强度 $B$ 的方向相同。但磁感应强度 $B$ 与磁导率 $\mu$ 有关,当线圈内的磁介质不同时,同一点的磁感应强度大小不同,线圈内的磁通也不同。

## 1.2 磁路的基本定律

### 1.2.1 磁路定律

1. 磁路基尔霍夫第一定律 磁路中的任一闭合面内,在任一瞬间,穿过该闭合面的各分支磁路磁通的代数和等于零,即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-5)$$

2. 磁路基尔霍夫第二定律(安培环路定律) 安培环路定律又称为全电流定律,与电路中的基尔霍夫第二定律相对应,故又称为磁路基尔霍夫第二定律。

在磁场中,沿任一闭合磁回路磁场强度的线积分等于穿过该闭合回路所有电流的代数和,即

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (1-6)$$

式中,  $\Sigma I$  是该磁路所包围的全电流。电流的正负是这样规定的: 任意选定一个闭合回路的围绕方向, 凡是与闭合回路围绕方向之间符合右手螺旋定则的电流方向作为正, 反之为负。

在工程应用中, 式 (1-6) 可以写为

$$\Sigma Hl = \Sigma I \quad (1-7)$$

即沿着闭合磁路各段平均磁场强度与磁路平均长度的乘积  $Hl$  (称为磁压降) 之和等于它所包围的全部电流  $\Sigma I$ 。当  $H$  与闭合路径  $l$  的循行方向一致时,  $Hl$  取正, 反之为负。

若磁场由电流为  $I$ 、匝数为  $N$  的线圈产生 (图 1-3), 则式 (1-6) 也可以写为

$$\oint Hdl = NI \quad (1-8)$$

式中,  $N$  为线圈匝数;  $NI$  称为磁动势, 用字母  $F$  表示, 即

$$F = NI \quad (1-9)$$

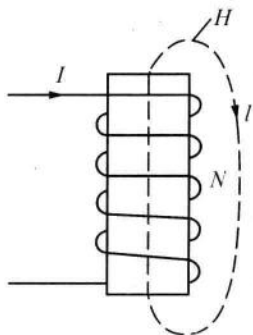


图 1-3 全电流定律的应用

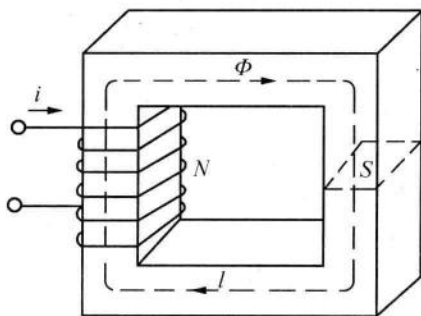


图 1-4 无分支磁路

3. 磁路欧姆定律 图 1-4 所示是一个无分支铁芯磁路, 铁芯上绕有  $N$  匝线圈, 线圈中通有电流  $i$ , 铁芯截面积为  $S$ , 磁路的平均长度为  $l$ , 材料的磁导率为  $\mu$ 。设铁芯柱截面上磁通密度均匀分布, 则

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

式中,  $F = Ni$  为铁芯磁路的磁动势;  $R_m = \frac{l}{\mu S}$  称为磁路的磁阻, 表示磁路对磁通的阻碍作用。磁阻  $R_m$  与磁路的平均长度  $l$  成正比, 与磁路的截面积  $S$  及构成磁路材料的磁导率  $\mu$  成反比。由于磁导率  $\mu$  不是一个常数, 所以磁阻也不是常数, 而是随着磁路中磁通密度的大小而变化。

式 (1-10) 与电路的欧姆定律在形式上相似, 因此称为磁路的欧姆定律。

### 1.2.2 电磁感应定律

变化的磁场会产生电场, 使导体中产生感应电动势, 这就是电磁感应现象。在电机中, 电磁感应现象有两种形式: ①与线圈交链的磁通发生变化时, 线圈内将产生感应电动势, 称为变压器电动势; ②与磁场有相对运动、切割磁感线时, 导体内将产生感应电动势, 称为切割电动势, 又称为运动电动势。



1. 变压器电动势 设线圈位于磁场中, 当与线圈交链的磁通发生变化时, 在线圈中将有感应电动势产生, 其方向由楞次定律判定。若感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则, 有

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad (1-11)$$

式中,  $\Psi$  为磁链;  $\Phi$  为磁通;  $N$  为线圈匝数。

式 (1-11) 表明, 由电磁感应产生的电动势大小与线圈所交链的磁链变化率成正比, 或者说, 与线圈的匝数和磁通的变化率成正比。当  $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ , 即穿过线圈的磁通增加时,  $e < 0$ , 表明感应电流产生的磁场要阻止原磁场的增强; 当  $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ , 即穿过线圈的磁通减少时,  $e > 0$ , 表明感应电流产生的磁场要阻止原磁场的减弱。

2. 切割电动势 当导体在恒定磁场中沿着与磁感线垂直方向运动时, 所产生的感应电动势的大小与导体的有效长度  $l$ 、导体相对于磁场的运动速度  $v$  和磁感应强度  $B$  成正比:

$$e = Blv \quad (1-12)$$

其方向可用右手定则确定, 即把右手伸开, 大拇指与其他四指垂直, 磁感线穿过手心, 大拇指指向导体运动方向, 其他四指的指向就是导体中感应电动势的方向。

### 1.2.3 电磁力定律

载流导体在磁场中会受到电磁力的作用, 若磁感线方向与导体方向相互垂直, 则载流导体所受电磁力  $f$  的大小为

$$f = BIl \quad (1-13)$$

式中,  $f$  为载流导体所受的电磁力;  $B$  为载流导体所在处的磁感应强度;  $I$  为载流导体中流过的电流;  $l$  为载流导体在磁场中的有效长度。

电磁力的方向由左手定则来判定, 即把左手伸开, 大拇指与其他四指垂直, 磁感线穿过手心, 其他四指指向导体中电流的方向, 大拇指的指向就是导体受力的方向。

## 1.3 电机所用材料和铁磁材料的特性

### 1.3.1 电机中所用的材料

电机是利用电磁感应原理实现能量转换的机械。电机所用的材料可分为以下四类:

1. 导电材料 导电材料起导电作用, 用于构成电机中的电路系统。为了减少损耗, 要求材料的电阻率小, 导电性能好, 常用的材料有铝和铜。

2. 导磁材料 导磁材料起导磁作用, 用于构成电机中的磁路系统, 要求材料具有较高的导磁率和较低的铁损耗。常用的材料有硅钢片、钢板和铸钢。

3. 绝缘材料 绝缘材料作为带电体之间及带电体与铁芯间的电气隔离, 要求耐热好, 介电性能高。按国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 规定, 绝缘材料的耐热能力可分为 Y、A、E、B、F、H、C 七级, 常用的有 A、E、B、F、H 五个等级, 每个等级的极限允许温度分别为 105℃、120℃、130℃、155℃和 180℃。绝缘材料的寿命受电机工作温度的影响很大, 若电机运行时温度超过允许值, 则其寿命将缩短。目前, 我国生产的变压器和电机多采用 A 级、E 级和 B 级绝缘, 发展趋势是采用 F 级和 H 级绝缘。