



普通高等教育“十二五”规划教材



# 电机与拖动基础

张广溢 祁强 李伟 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电机与拖动基础

张广溢 祁 强 李 伟 编  
辜承林 主审



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，全书包括电机学、电力拖动基础和  
控制电机三门课程的主要内容，合并称为电机与拖动基础。本书是专为电气工程与  
自动化专业编写的，既考虑了电力系统及其自动化方向后续课程（电力系统分析、  
电力系统继电保护等）对同步发电机、变压器的分析要求较深入，又考虑了电气技  
术、自动化方向后续课程（电力拖动控制系统、现代电气控制技术等）对电力拖动  
知识要求较高的需要。全书共9章，从应用的角度出发，分析阐述了直流电机、变  
压器、异步电动机、同步电机、微特电机与控制电机的基本结构、工作原理、电磁  
关系和运行特性。为便于读者学习，每章后附有小结和习题，书后附有部分习题的  
参考答案。

本书可作为电气工程与自动化、自动化等专业电机与拖动基础课程教材，或者  
电气工程及其自动化专业电机学课程的教材，也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动基础/张广溢，祁强，李伟编. —北京：中国电力出版  
社，2011.10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2256-1

I. ①电… II. ①张…②祁…③李… III. ①电机—高等学校—教  
材②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 216094 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012年1月第一版 2012年1月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 19.25印张 469千字  
定价 33.00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

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。全书包括电机学、电力拖动基础和控制电机三门课程的主要内容，合并称为电机与拖动基础。

全书共分9章。第1、2章阐述了直流电机的运行原理、电力拖动系统动力学基础和直流电动机的电力拖动；第3章阐述了变压器的运行原理、变压器的不对称运行和瞬变过程；第4章阐述了交流电机电枢绕组的电动势与磁动势；第5、6章阐述了异步电动机的运行原理，三相异步电动机的电力拖动；第7章阐述了同步电机的运行原理和运行特性，同步发电机的不对称运行和突然短路；第8章介绍电动机的发热、冷却以及简单的选择方法；第9章介绍了各种微特电机与控制电机的基本结构、工作原理和运行性能。最后在附录中对MATLAB/Simulink 及其应用作了简单介绍。

本书具有如下主要特点。

(1) 针对性强，适应面宽。本书是专为电气工程与自动化专业编写的，它既考虑了电力系统及其自动化专业方向后续课程电力系统分析、电力系统继电保护等对同步发电机、变压器的分析要求较深入，又考虑了电气技术、自动化专业方向后续课程电力拖动控制系统、现代电气控制技术 etc 对电力拖动知识要求较高的需要。因此本书可作为电气工程与自动化、自动化等专业电机与拖动基础课程或电气工程及其自动化专业方向电机学课程的教材，也可供有关科技人员参考。

(2) 内容精简，学时少。对电气工程与自动化专业，参考学时为96学时，其中理论教学80~82学时，实验14~16学时。通过本课程的学习，可不再另开设电力拖动基础和控制电机等课程。若专为电气技术、自动化专业方向开设电机与拖动基础课程，第3章中的三绕组变压器、变压器的不对称运行和瞬变过程，第7章中同步发电机的不对称运行和突然短路(带\*号)可以不讲。若专为电力系统及其自动化专业方向开设电机学课程，第8章电力拖动系统电动机的选择、第9章微特电机与控制电机两章可以不讲。

(3) 为便于学习，书中精选了适量的例题，每章后有小结和大量习题，书末有部分习题的参考答案，对掌握本课程的基本理论和基本分析方法，培养解决工程实际问题的能力有一定帮助。

(4) 注重突出基本理论和基本分析方法，并尽可能反映国内外最新技术，如三相变压器的联结组采用IEC标准；三相异步电动机的起动增加了软起动的内容；微特电机与控制电机部分增加了无刷直流电动机、开关磁阻电动机的内容，以适应电机理论的发展和科学技术的进步。

(5) 将MATLAB/Simulink用于电机与拖动基础课程中，实现诸如各种复杂的计算、特性曲线的绘制、各种电机模型的仿真研究及实验、对实验数据进行处理和分析等功能，对有效提高学生对所学知识的掌握与理解程度，提高学生分析问题、解决问题的能力，培养学生对于本课程的学习兴趣具有示范作用。有关内容在附录中介绍。

(6) 为便于本书的使用，特制作《电机与拖动基础》多媒体课件，与本书同时发行。该

课件运用计算机多媒体工具，充分体现本书的教学思路和主要内容，同时增加一些动画和实物照片，以丰富教师的教学手段，并为学生学习 and 理解本书提供帮助。

本书由西华大学张广溢、祁强、李伟共同编写。具体分工为：张广溢编写绪论和第 3、5、6 章，祁强编写第 1、2、8、9 章，李伟编写第 4、7 章及附录。全书由张广溢教授统稿。

本书由华中科技大学辜承林教授审阅，辜承林教授对本书进行了认真审阅并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中不足和疏漏之处在所难免，希望广大读者批评指正。

编者

2011 年 11 月

## 目 录

前言

主要符号表

绪论	1
0.1 电机及电力拖动在国民经济中的作用	1
0.2 电机的主要类型及电机中所用的材料	2
0.3 研究电机时常用的基本电磁定律	3
0.4 本课程的性质和任务	6
习题	6
<b>第1章 直流电机的运行原理</b>	<b>8</b>
1.1 直流电机的基本工作原理	8
1.2 直流电机的主要结构与额定值	9
1.3 直流电机的空载磁场	11
1.4 直流电机的电枢绕组	14
1.5 直流电机的负载磁场和电枢反应	18
1.6 直流电机的电枢电动势与电磁转矩	20
1.7 直流发电机	22
1.8 直流电动机运行原理	26
1.9 他励直流电动机的机械特性	29
1.10 串励和复励直流电动机	32
1.11 直流电机的换向	33
小结	35
习题	36
<b>第2章 电力拖动系统动力学基础和直流电动机的电力拖动</b>	<b>38</b>
2.1 电力拖动系统动力学基础	38
2.2 他励直流电动机的起动	42
2.3 他励直流电动机的电动与制动运行	43
2.4 他励直流电动机的调速	48
小结	50
习题	51
<b>第3章 变压器</b>	<b>52</b>
3.1 变压器的基本结构与额定值	52
3.2 变压器的空载运行	55
3.3 变压器的负载运行	58

3.4	标么值	62
3.5	变压器的参数测定	62
3.6	变压器的运行性能	66
3.7	变压器的磁路、连接组和电动势波形	68
3.8	变压器的并联运行	73
3.9	自耦变压器和仪用互感器	75
* 3.10	三绕组变压器	79
* 3.11	三相变压器的不对称运行	80
* 3.12	变压器的瞬变过程	85
	小结	88
	习题	90
<b>第4章</b>	<b>交流电机电枢绕组的电动势与磁动势</b>	<b>93</b>
4.1	交流电机电枢绕组	93
4.2	交流电机电枢绕组的电动势	101
4.3	交流电机电枢单相绕组产生的磁动势	108
4.4	三相电枢绕组产生的磁动势	113
4.5	两相电枢绕组产生的磁动势	116
	小结	120
	习题	121
<b>第5章</b>	<b>异步电动机的运行原理</b>	<b>123</b>
5.1	异步电动机的结构、额定数据与工作原理	123
5.2	三相异步电动机转子不转、转子绕组开路时的电磁关系	126
5.3	三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	128
5.4	三相异步电动机转子旋转时的电磁关系	132
5.5	三相异步电动机的功率与转矩	139
5.6	三相异步电动机的机械特性	141
5.7	三相异步电动机的工作特性及其测试方法	148
5.8	三相异步电动机参数的测定	149
	小结	151
	习题	151
<b>第6章</b>	<b>三相异步电动机的电力拖动</b>	<b>154</b>
6.1	三相异步电动机的起动	154
6.2	深槽式和双笼型异步电动机	160
6.3	三相异步电动机的电动与制动运行	162
6.4	三相异步电动机的调速	169
	小结	181
	习题	182
<b>第7章</b>	<b>同步电机</b>	<b>184</b>
7.1	同步电机的主要结构和额定值	184

7.2	同步电机的磁场和电枢反应 .....	186
7.3	隐极同步发电机的电压方程和相量图 .....	191
7.4	凸极同步发电机的电压方程和相量图 .....	192
7.5	同步发电机的空载特性、短路特性和零功率因数负载特性 .....	193
7.6	同步发电机的外特性和电压调整率 .....	197
7.7	同步发电机与电网的并联运行 .....	199
7.8	同步电动机与同步补偿机 .....	208
* 7.9	同步发电机的不对称运行 .....	214
* 7.10	同步发电机的突然短路 .....	216
	小结 .....	222
	习题 .....	224
<b>第 8 章</b>	<b>电力拖动系统电动机的选择</b> .....	<b>227</b>
8.1	电动机的发热、冷却及电动机的工作制分类 .....	227
8.2	不同工作制电动机的功率选择 .....	230
8.3	电力拖动系统调速电动机的功率选择 .....	235
8.4	电动机的类型、电流种类、额定电压与额定转速的选择 .....	237
	小结 .....	239
	习题 .....	239
<b>第 9 章</b>	<b>微特电机与控制电机</b> .....	<b>241</b>
9.1	单相异步电动机 .....	241
9.2	伺服电动机 .....	244
9.3	微型同步电动机 .....	249
9.4	步进电动机 .....	252
9.5	旋转变压器 .....	259
9.6	自整角机 .....	263
9.7	测速发电机 .....	268
9.8	直线电动机 .....	272
9.9	无刷直流电动机 .....	275
9.10	开关磁阻电动机 .....	278
	小结 .....	280
	习题 .....	281
附录 A	MATLAB/Simulink 简介 .....	283
附录 B	MATLAB/Simulink 在电机与拖动基础教学中的应用 .....	287
	部分习题参考答案 .....	292
	参考文献 .....	296



## 绪 论

### 0.1 电机及电力拖动在国民经济中的作用

在自然界各种能源中,电能适宜于大量生产、集中管理、远距离传输、灵活分配及智能化自动控制,因而成为现代人类最常用的一种能源。电机是以电磁感应和电磁力定律为基本工作原理进行电能的传递或机电能量转换的机械装置,是电能的生产、传输、使用和电能特性变换的核心装备,因而在国民经济中有着重要的作用。

#### 0.1.1 电能的生产、传输和分配中的主要设备

在发电厂中,发电机由汽轮机、水轮机或其他动力机械带动,这些原动机将燃料燃烧的热能、水的位能、原子核裂变的原子能等转化为机械能传给发电机,由发电机将机械能转换为电能。发电机发出的电压一般为 $10.5\sim 20\text{kV}$ ,为了减少远距离输电中的能量损失,经济地传输电能,应采用高压输电,一般输电电压为 $110、220、330、500\text{kV}$ 或更高,因此采用升压变压器将发电机发出的电压升高再进行电能的传输。到各用电区,为安全使用电能,各用电设备又需要不同的低电压,因此还需要各种电压等级的降压变压器将电压降低,然后供给各用户。在电力工业中,发电机和变压器是发电厂和变电站的主要设备。为应对全球气候变暖,改善人类的居住环境,大力发展新能源是逐步改善我国当前以煤炭为主的能源结构的一项重大战略。水电是清洁能源之一,我国西部各水系蕴藏着丰富的水力资源,截至2010年7月底,全国水电装机已经从2002年的 $86.1\text{GW}$ 增加到 $182\text{GW}$ ,其中,三峡电站装机容量达 $18.2\text{GW}$ 。在清洁能源中,核电在节能减排方面的优势明显,统计数据显示,2008年我国核电发电量为 $68.4\text{TW}\cdot\text{h}$ ,与用煤炭发电发出同样电量的火电相比,相当于减排二氧化碳8000多万吨、二氧化硫40多万吨。此外,还有风能、太阳能、潮汐能、地热能等自然资源,我国也非常丰富,开发潜力巨大。

#### 0.1.2 各种生产机械和装备的动力设备

在机械、纺织、冶金、石油和化学工业中,广泛应用电动机作为原动机来拖动各种生产机械和装备,一个现代化的大型企业通常需要装备几百台以至几万台各种不同的电动机;在交通运输中,需要各种专用电机,如汽车电机、船用电机和航空电机,至于电车、电气机车需要具有优良起动性能和调速性能的牵引电动机,特别是近年来电动汽车和以直线电动机为动力的磁悬浮高速列车的开发,推动了新型电动机的发展;随着农业现代化发展,电力排灌、谷物和农副产品加工,都需要电动机拖动;在医疗器械、家用电器等的驱动设备都采用了各种交、直流电动机。总之,在现代社会中电机及电力拖动早已成为提高生产率和科学技术水平及提高生活质量的主要载体之一。

#### 0.1.3 自动控制系统中的重要元件

随着科学技术的发展,工农业和国防设施的自动化程度越来越高,各种各样的控制电机作为执行、检测、放大和解算元件,在电力拖动自动控制系统和其他自动控制系统中得到越来越广泛的应用。这类电机一般功率较小,品种繁多,用途各异,准确度要求较高。例如火炮和雷达的自动定位,人造卫星发射和飞行的控制,舰船方向舵的自动操纵,机床加工的自

动控制和显示, 电梯的自动选层与显示, 以及计算机、自动记录仪表、医疗设备、录音、录像、摄影和现代家用电器设备等的运行控制、检测或记录显示等。

随着社会的发展和科学技术的进步, 特别是近年来超导技术、磁流体发电技术、电子与计算机技术的迅猛发展, 为新的电机理论和电机技术的发展开辟了广阔的前景。

## 0.2 电机的主要类型及电机中所用的材料

### 0.2.1 电机的主要类型

电机的种类很多, 分类方法也很多。其按功能分类, 可分为以下几种。

(1) 发电机: 将机械能转换为电能。

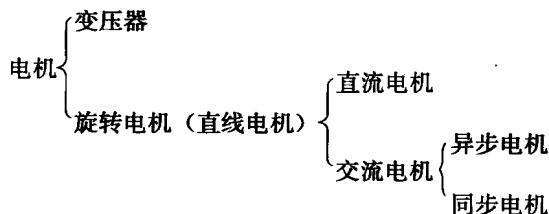
(2) 电动机: 将电能转换为机械能。

(3) 变压器、变频器、变流机、移相机: 分别用于改变电能的电压、频率、电流及相位。

(4) 控制电机: 作为自动控制系统中的元件。

应该指出, 从基本原理上看, 发电机和电动机只不过是电机的两种运行方式, 它们本身是可逆的, 这种特性称为电机的可逆性原理。

如按运动方式分, 可分为静止的变压器, 运动的直线电机和旋转电机。直线电机和旋转电机按电源性质分有直流电机和交流电机两种, 而交流电机按转速与电源频率的关系又可分为异步电机和同步电机, 归纳如下:



### 0.2.2 电机中所用的材料

电机一般是以磁场为耦合场, 利用电磁感应和电磁力的作用进行电能的传递或机电能量转换的。因此, 电机中所用的材料可分为以下四类。

(1) 导电材料: 作为电机中的电路系统。为减小电阻损耗, 要求材料的电阻率小, 常用紫铜及铝。

(2) 导磁材料: 作为电机中的磁路系统。为在一定励磁磁动势下产生较强的磁场和降低铁损耗, 要求材料具有较高的磁导率和较低的铁损耗系数, 常用硅钢片、钢板和铸钢。

(3) 绝缘材料: 作为带电体之间及带电体与铁心之间的电气隔离。要求材料的介电强度高且耐热强度好。按耐热能力可分为 A、E、B、F、H、C 六级, 其最高允许工作温度分别为 105、120、130、155、180°C 和高于 180°C。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, 则其使用寿命将缩短。

(4) 结构材料: 使各部分构成整体、支撑和连接其他机械。要求材料的机械强度好, 加工方便, 质量轻。常用铸铁、铸钢、钢板、铝合金及工程塑料。

### 0.3 研究电机时常用的基本电磁定律

#### 0.3.1 全电流定律 (安培环路定律)

在磁场中沿任一闭合回路  $l$ , 磁场强度  $H$  的线积分等于穿过该回路所有电流的代数和, 即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I = I_1 + I_2 - I_3 \quad (0-1)$$

其中, 电流方向与闭合回路环绕方向符合右手螺旋关系时为正, 反之为负, 如图 0-1 所示。

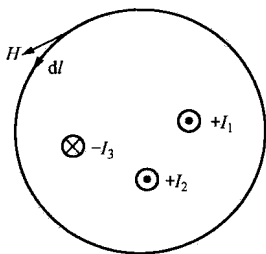


图 0-1 全电流定律

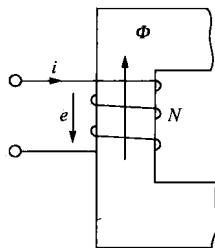


图 0-2 说明电磁感应定律

#### 0.3.2 电磁感应定律

无论何种原因, 当与线圈交链的磁链  $\psi$  随时间变化时, 线圈中将感应电动势  $e$ 。  $e$  的大小等于线圈所交链的磁链对时间的变化率,  $e$  的方向应符合楞次定律, 即若该电动势产生一个电流, 此电流产生的磁通将反对线圈中磁链的变化。若规定感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系 (见图 0-2), 则电磁感应定律的数学描述可表示为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-2)$$

式中:  $N$  为线圈的匝数;  $\Phi$  为穿过线圈的磁通。

##### 1. 变压器电动势

若线圈不动, 穿过线圈的磁通随时间变化, 则线圈中的电动势称为变压器电动势。

##### 2. 运动电动势 (速率电动势)

设磁场恒定, 构成线圈的导体切割磁力线, 使线圈交链的磁链随时间变化, 导体中的感应电动势称为运动电动势。若磁力线、导体和运动方向三者互相垂直, 则导体中感应电动势的大小为导体所在处的磁通密度  $B$  与导体切割磁力线的有效长度  $l$  及导体相对磁场运动的线速度  $v$  三者之积, 即

$$e = Blv \quad (0-3)$$

感应电动势的方向由图 0-3 所示的右手定则确定。

#### 0.3.3 电磁力定律

载流导体在磁场中要受到力的作用, 该力被称为电磁力。其大小在导体与磁力线相垂直时等于导体所在处磁场的磁通密度  $B$  与导体有效长度  $l$  及导体中的电流  $i$  三者乘积, 即

$$f = Bli \quad (0-4)$$

电磁力的方向由图 0-4 所示的左手定则确定。

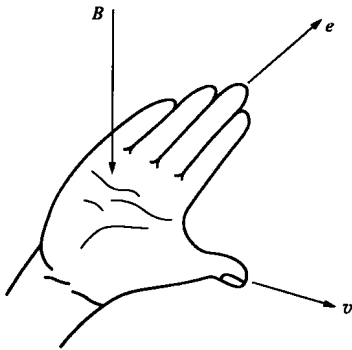


图 0-3 右手定则

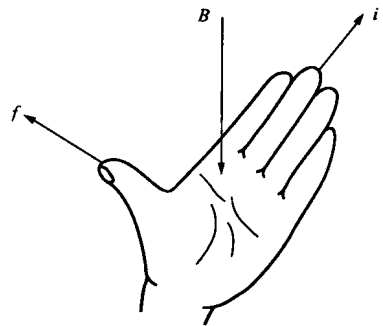


图 0-4 左手定则

在旋转电机中，作用在转子载流导体上的电磁力将使转子受到一个力矩（等于力乘转子半径），即电磁转矩。电磁转矩是电机实现机电能量转换的重要物理量。

### 0.3.4 电路定律

#### 1. 欧姆定律

一段电路上的电压降  $u$  等于流过该电路的电流  $i$  与电路的电阻  $R$  的乘积，即

$$u = iR \quad (0-5)$$

#### 2. 基尔霍夫第一定律（电流定律）

在电路中任一节点上，电流的代数和恒等于零，即

$$\sum i = 0 \quad (0-6)$$

#### 3. 基尔霍夫第二定律（电压定律）

在电路中，对任一回路，沿回路环绕一周，回路内所有电动势的代数和等于所有电压降的代数和，即

$$\sum e = \sum u \quad (0-7)$$

该定律是电机中电动势平衡方程式的理论依据。

### 0.3.5 磁路及磁路定律

电流在它周围的空间建立磁场，磁场的分布常用一些闭合线（磁力线）来描述，磁力线所经路径称为磁路。磁路的材料不同，其导磁性能不同。铁磁物质由于其内部结构特点，其磁导率  $\mu_{Fe}$  可达非铁磁物质磁导率  $\mu_0$  的数千倍，且  $\mu_{Fe}$  的大小随外磁场的大小而变化，存在磁饱和现象，其  $B = f(H)$ ， $\mu = f(H)$  关系曲线如图 0-5 所示。其次，在交变磁场作用下，存在磁滞和涡流现象，在铁磁物质内产生能量损耗，即铁损耗。而非铁磁物质的磁导率为常量， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，其  $B = f(H)$  为直线。

从磁场的基本关系可导出与电路定律相似的磁路定律。

#### 1. 磁路的欧姆定律

将全电流定律应用到图 0-6 所示材料相同截面相等的无分支闭合磁路上，则有

$$\oint_l H \cdot dl = Hl = \sum I = Ni$$

因为  $H = B/\mu$ ，而  $B = \Phi/A$ ，于是

$$\Phi = \frac{Ni}{l/(\mu A)} = \frac{F}{R_m} = F\Lambda_m \quad (0-8)$$

即磁路中的磁通  $\Phi$  等于作用在该磁路上的磁动势  $F$  除以磁路的磁阻  $R_m$  或乘以磁导  $\Lambda_m$ ，这就是磁路的欧姆定律。

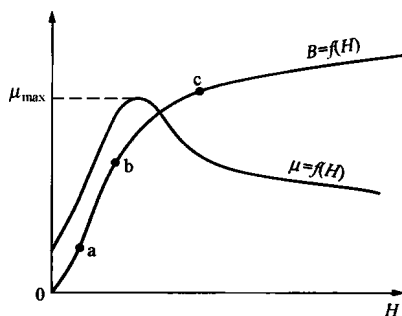


图 0-5 铁磁材料的磁化曲线

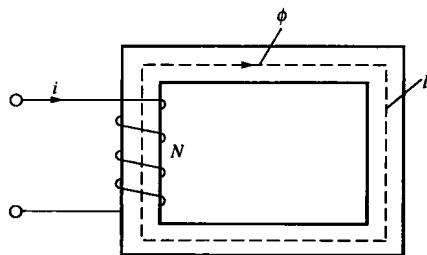


图 0-6 无分支磁路

## 2. 磁路的基尔霍夫第一定律

由于磁力线是闭合线，因此，对任一封闭面而言，穿入的磁通必等于穿出的磁通，这就是磁通连续性原理。对有分支的磁路而言，在磁通汇合处的封闭面上，磁通的代数和等于零，即

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-9)$$

在图 0-7 中有  $\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$ 。

## 3. 磁路的基尔霍夫第二定律

在磁路计算中，若构成磁路的各部分有不同的材料和截面，则应将磁路分段，每段有相同材料和截面，其  $B$ 、 $\mu$  相同。每段磁路上磁场强度  $H$  与磁路长度  $l$  的乘积  $Hl$  称为该段磁路的磁压降。将全电流定律应用到任一闭合磁路上，则有

$$\oint H \cdot dl = \sum Hl = \sum Ni = \sum F = \sum \Phi R_m$$

$$(0-10)$$

即沿任一闭合磁路，磁压降的代数和等于磁动势的代数和。

在图 0-7 中，对于沿  $l_1$ 、 $l_2$  组成的闭合磁路，有

$$F_1 - F_2 = N_1 i_1 - N_2 i_2 = H_1 l_1 - H_2 l_2 = \Phi_1 R_{m1} - \Phi_2 R_{m2}$$

可见，磁路与电路，其物理量和基本定律有一一对应的关系，见表 0-1。

应该指出，由于磁路与电路物理本质不同，即磁路是有限范围内的磁场，电路是有限范围内的电场，所以二者存在一定差别，具体表现为：① 电路中可以有电动势无电流，磁路中有磁动势必然有磁通；② 电路中有电流就有功率损耗 ( $I^2 R$ )；而在恒定磁通下，磁路中无损耗；③ 由于导体的电导约为绝缘体电导的  $10^{20}$  倍，而  $\mu_{Fe}$  仅为  $\mu_0$  的  $10^3 \sim 10^4$  倍，故可认为电流只在导体中流过，而磁路中除主磁通外还必须考虑漏磁通；④ 电路中电阻率  $\rho$  在一定温度下恒定不变，而由铁磁材料构成的磁路中，磁导率  $\mu$  随  $B$  变化，即磁阻  $R_m$  随磁路饱和度增大而增大。

### 0.3.6 能量守恒定律

电机是电能传递或机电能量转换的机械装置，在能量传递或转换过程中电机自身消耗的

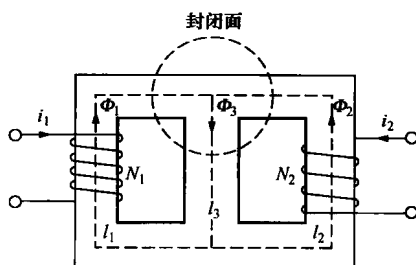


图 0-7 有分支磁路

功率称为损耗。稳态运行时,必然存在输入功率  $P_1$  等于输出功率  $P_2$  与所有损耗  $\sum p$  之和,即

$$P_1 = P_2 + \sum p \quad (0-11)$$

上述定律是建立电机运行时基本方程式的理论依据。

表 0-1 磁路和电路的对比

电 路		磁 路	
基本物理量及公式	单位	基本物理量及公式	单位
电流 $i$	A	磁通 $\Phi$	Wb
电动势 $e$	V	磁动势 $F$	A
电压降 $u=iR$	V	磁压降 $Hl=\Phi R_m$	A
电阻 $R=\rho l/A$	$\Omega$	磁阻 $R_m=l/(\mu A)$	1/H
电导 $G=1/R$	S	磁导 $\Lambda_m=1/R_m$	H
欧姆定律 $i=e/R$		$\Phi=F/R_m=F\Lambda_m$	
基尔霍夫第一定律 $\sum i=0$		$\sum \Phi=0$	
基尔霍夫第二定律 $\sum e=\sum u=\sum iR$		$\sum F=\sum Hl=\sum \Phi R_m$	

## 0.4 本课程的性质和任务

电机与拖动基础是电气工程与自动化(或电气工程及其自动化、自动化)专业的主要技术基础课。本课程的任务是在学习了高等数学、物理学和电路原理的基础上研究电机的工作原理、主要结构、基础理论、运行特性及电力拖动系统运行性能、分析计算、电动机选择与实验方法的一门课程。由于有具体的电机这一实际工程问题作为研究对象,而电机中各种电、磁、力、热等方面的定律同时起作用,互相影响又互相制约,故分析时其理论性和实践性都很强,且具有一定的复杂性和综合性。因此,在学习方法上要特别强调学生综合能力的培养;要注意掌握电机与拖动基础的基本概念和基本分析方法,如旋转磁场理论、时间相量与空间向量、电动势与磁动势平衡方程、电机的等效电路、折合算法与标幺值、对称分量法等。电机与拖动基础习题是巩固所学知识和培养分析问题能力所必需的,要独立认真地完成。实验是电机与拖动基础的重要环节,要求通过实验掌握电机的运行操作与测试等基本技能,并加深对电机运行性能和理论分析的认识。

本课程是为学习后续专业课做准备和打基础的,它既考虑了电力系统及其自动化专业方向后续课程电力系统分析、电力系统继电保护等对同步发电机、变压器的分析要求较深入,又考虑了电气技术、自动化等专业方向后续课程电力拖动控制系统、现代电气控制技术等对电力拖动系统运行性能、分析计算、电动机选择的要求。因此,学好电机与拖动基础,对后面专业课的学习至关重要,同时可为今后从事本专业方面的工作打下坚实基础。

## 习 题

0-1 电机和变压器的磁路常用什么材料制成?这类材料应具有哪些主要特性?

0-2 变压器电动势和运动电动势产生的原因有什么不同? 其大小与哪些因素有关?

0-3 感应电动势  $e = -\frac{d\psi}{dt}$  中的负号表示什么意思?

0-4 试比较磁路和电路的相似点和不同点。

0-5 在图 0-1 中, 已知磁力线  $l$  的直径为 10cm, 电流  $I_1 = 10\text{A}$ ,  $I_2 = 5\text{A}$ ,  $I_3 = 3\text{A}$ , 试求该磁力线上的平均磁场强度。

0-6 在图 0-8 所示的磁路中, 线圈  $N_1$ 、 $N_2$  中通入直流电流  $I_1$ 、 $I_2$ , 试问:

(1) 电流方向如图所示时, 该磁路上的总磁动势为多少?

(2)  $N_2$  中电流  $I_2$  反向, 总磁动势又为多少?

(3) 若在图中 a、b 处切开, 形成一空气隙  $\delta$ , 电流方向仍如图所示, 总磁动势又为多少?

(4) 比较 (1)、(3) 两种情况下铁心中的  $B$ 、 $H$  的相对大小, 及 (3) 中铁心和气隙中  $H$  的相对大小。(设铁心截面积均匀, 并不计漏磁通)

0-7 一个有铁心的线圈, 线圈电阻为  $2\Omega$ 。将其接入 110V 交流电源, 测得输入功率为 22W, 电流为 1A, 试求铁心中的铁损耗。

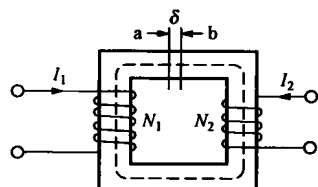


图 0-8 习题 0-6 图

## 第 1 章 直流电机的运行原理

### 1.1 直流电机的基本工作原理

#### 1.1.1 直流发电机的工作原理

直流电机的工作原理是建立在电磁力和电磁感应基础之上的。图 1-1 是一台直流发电机的物理模型。图中, N、S 是主磁极, 它是固定不动的, abcd 是装在可以转动的铁磁圆柱体上的一个线圈, 把线圈的两端分别接到两个圆弧形铜片上 (称为换向片), 两者相互绝缘, 铁心和线圈合称电枢, 通过在空间静止不动的电刷 AB 与换向片接触, 即可对外电路供电。

当原动机拖动电枢以恒速  $n$  逆时针方向旋转时, 在线圈中有感应电动势, 其大小为

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

式中:  $B$  是导体所在处的气隙磁通密度, 单位为 T;  $l$  是导体的有效长度, 单位为 m;  $v$  是导体与磁场的相对速度, 单位为 m/s。

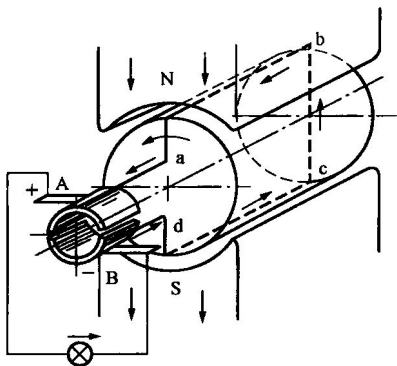


图 1-1 直流发电机工作原理示意图

感应电动势的方向可用右手定则确定。在图 1-1 所示时刻, 整个线圈的电动势方向是由 d 到 c、由 b 到 a, 即由 d 到 a。此时 a 端经换向片接触电刷 A, d 端经换向片与电刷 B 接触, 所以电刷 A 为正极性, 而电刷 B 为负极性。在电刷 AB 之间接上负载, 就有电流  $i$  从电刷 A 经外电路负载而流向电刷 B。此电流经换向片及线圈 abcd 形成闭合回路, 线圈中, 电流方向从 d 到 a。

当电枢转过  $180^\circ$  时, 线圈 abcd 中感应电动势的方向变为由 a 到 b、由 c 到 d, 即从 a 到 d。但此时 d 端与电刷 A 接触, a 端与电刷 B 接触, 所以 A 仍为正极性, B 仍为负极性。流过负载的电流方向不变。而线圈中电

流的方向改变了, 即从 a 到 d。

从以上分析可以看出, 线圈中的电动势  $e$  及电流  $i$  的方向是交变的, 只是经过电刷和换向片的整流作用, 才使外电路得到方向不变的直流电。直流发电机实质上是带有换向器的交流发电机。

实际上发电机的电枢铁心上有许多个线圈, 按照一定的规律连接起来, 构成电枢绕组, 从而, 发电机产生的电动势增大, 脉动程度降低。

在发电机中存在电磁反转矩, 当发电机接上负载, 绕组中便有电流通过, 此电流与气隙磁场作用, 产生电磁力  $f = Bli$ , 在电机的轴上形成一个制动力矩, 发电机要克服此力矩, 才能把机械能转变为电能。

#### 1.1.2 直流电动机的工作原理

在图 1-2 中的电刷 AB 上加上直流电源, 便成为直流电动机的物理模型, 这时线圈 abcd 中便有电流通过, 如图 1-2 所示, 其方向为从 a 到 d, 线圈中的电流  $i$  与磁场作用, 产



生电磁力  $f = Bli$ ，电枢在此电磁力的作用下，便旋转起来，进而带动生产机械运转。

电磁力的方向由左手定则确定，图 1-2 所示时刻，电流从 a 到 d，电磁力的方向是上面导体受力向左，下面导体受力向右，使电枢逆时针方向旋转。当电枢转过  $180^\circ$  时，外部电路的电流  $i$  方向不变，线圈中的电流方向则从 d 到 a，改变了方向，但此时电磁力方向不变，电机沿恒定方向旋转。

由此可见，在直流电动机中，外部电路的电流方向不变，经过电刷和换向片的作用，线圈中的电流随其所处磁极极性的改变而同时改变其方向，使电磁转矩的方向一直保持不变，电动机才能连续旋转。所以在这里，经过换向器作用将直流逆变成了交流电，是一个逆变过程。

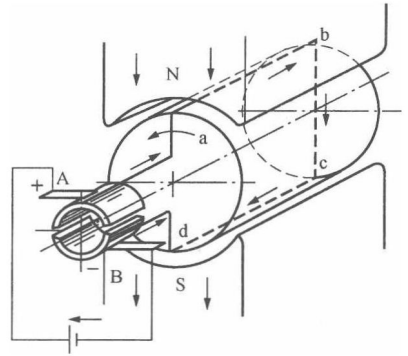


图 1-2 直流电动机工作原理示意图

### 1.1.3 直流电机的可逆原理

一台直流电机原则上既可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行，只是外界条件不同而已。如果用原动机拖动电枢恒速旋转，就可以从电刷端引出直流电动势而作为直流电源对负载供电；如果在电刷端外加直流电压，则电机就可以把电能转变成机械能，从而带动轴上的机械负载旋转。这种同一台电机既能作电动机运行，也能作发电机运行的原理，在电机理论中称为电机的可逆原理。

## 1.2 直流电机的主要结构与额定值

### 1.2.1 主要结构

直流电机的结构是多种多样的，但总体上不外乎由定子（静止部分）和转子（转动部分）两大部分组成。图 1-3 所示为一台常用的小型直流电机结构图。

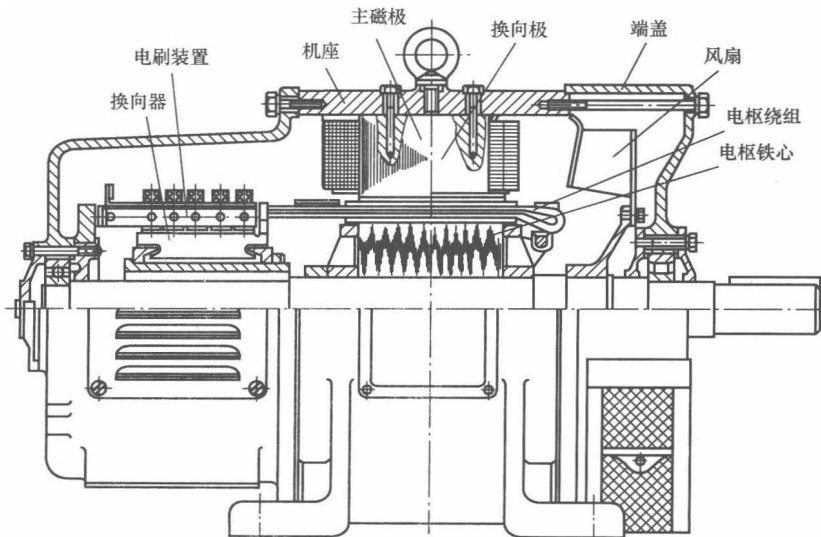


图 1-3 直流电机的剖面图