



高等院校网络教育精品教材

——电气电子类

DIANJI YU TUODONG (I)

# 电机与拖动 (I)

刘 黎 主编



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等院校网络教育精品教材——电气电子类

# 电机与拖动（ I ）

刘 黎 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

---

图书在版编目 (C I P) 数据

电机与拖动.1 / 刘黎主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.10

高等院校网络教育精品教材. 电气电子类

ISBN 978-7-5643-0925-1

I. ①电… II. ①刘… 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 (2010) 第 194319 号

---

高等院校网络教育精品教材——电气电子类

电机与拖动 ( I )

刘 黎 主编

|       |                                                                   |
|-------|-------------------------------------------------------------------|
| 责任编辑  | 黄淑文                                                               |
| 封面设计  | 墨创文化                                                              |
| 出版发行  | 西南交通大学出版社<br>(成都二环路北一段 111 号)                                     |
| 发行部电话 | 028-87600564 87600533                                             |
| 邮 编   | 610031                                                            |
| 网 址   | <a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a> |
| 印 刷   | 成都蜀通印务有限责任公司                                                      |
| 成品尺寸  | 185 mm × 260 mm                                                   |
| 印 张   | 10                                                                |
| 字 数   | 250 千字                                                            |
| 版 次   | 2010 年 10 月第 1 版                                                  |
| 印 次   | 2010 年 10 月第 1 次                                                  |
| 书 号   | ISBN 978-7-5643-0925-1                                            |
| 定 价   | 18.00 元                                                           |

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

本书为网络教育教材。

“电机与拖动”是电气类专业的一门重要专业基础课,包含电机学和电力拖动两部分内容,既是研究电机及电力拖动系统基础理论的学科,为后续相关专业课程准备必要的基础知识,同时又可以作为一门独立的基础应用课,直接为工程生产服务。该课程具有抽象、理论性强、与工程实践紧密结合的特点,通常被学生认为是一门难学的课程。

本书结合网络教育特点,在编写过程中,重点对基本原理进行分析,着重阐述物理概念;从应用角度出发,精选内容,突出重点,不求面面俱到。例如直流电机只突出他励直流电动机,其他励磁方式的内容减少到最低限度,直流发电机内容可以作为电动机的制动状态来讲;电机部分重点突出机械特性有关内容,简化了电机的结构、绕组及电机的磁场分析。内容强调电磁过程和空间运动的结合,理论分析和电机结构的结合,材料对电、磁、力的影响等。着重培养学生应用基础理论分析、研究、解决实际工程问题的能力。

考虑到远程教学的特殊性,为方便自主学习,教材的每一章都给出了明确的学习指导,包括学习目标、重难点、学习方法建议、学习时间建议、典型例题分析等。

电机与拖动课程包括《电机与拖动(Ⅰ)》、《电机与拖动(Ⅱ)》两本教材。其中《电机与拖动(Ⅰ)》内容包括绪论、磁路、直流电机原理、电力拖动系统动力学、直流电机电力拖动和变压器。交流旋转电机、交流拖动、电力拖动系统电动机选择等内容包括在《电机与拖动(Ⅱ)》中。

本书由刘黎主编并统稿,其中第1、3、5章由刘黎编写,第2章和第4章由郭冀岭编写。由于编者学识有限,书中难免出现疏漏和不妥,恳请读者批评指正。

编 者

2010年9月

## 符 号 表

|                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| $A$ —面积;                  | $I_f$ —励磁电流;       |
| $a$ —并联支路对数;              | $J$ —转动惯量;         |
| $B$ —磁感应强度;               | $m$ —绕组相数;         |
| $B_r$ —剩磁感应强度;            | $n$ —电机转速;         |
| $B_\delta$ —气隙磁感应强度;      | $n_N$ —额定转速;       |
| $\cos \varphi_N$ —额定功率因数; | $n_1$ —同步转速;       |
| $e$ —感应电动势;               | $N_1$ —一次侧绕组匝数;    |
| $E_0$ —空载电势;              | $N_2$ —二次侧绕组匝数;    |
| $E_1$ —变压器一次侧电势;          | $p$ —电机极数;         |
| $E_2$ —变压器二次侧电势;          | $P_N$ —额定功率;       |
| $E_{2s}$ —转子旋转时转子感应电势;    | $P_1$ —输入功率;       |
| $E_a$ —电枢反应电势;            | $P_2$ —输出功率;       |
| $E_\sigma$ —漏磁通感应电势;      | $P_{Fe}$ —铁耗;      |
| $E_{ad}$ —直轴电枢电动势;        | $P_h$ —磁滞损耗;       |
| $E_{aq}$ —交轴电枢电动势;        | $P_0$ —空载损耗;       |
| $f_N$ —额定频率;              | $P_{Cu}$ —铜耗;      |
| $f_1$ —定子感应电动势频率;         | $P_{Cua}$ —电枢铜耗;   |
| $f_2$ —转子感应电动势频率;         | $P_{Cuf}$ —励磁铜耗;   |
| $F$ —磁动势;                 | $P_{Cu1}$ —一次绕组铜耗; |
| $F_f$ —励磁磁动势;             | $P_{Cu2}$ —二次绕组铜耗; |
| $F_m$ —磁动势最大值;            | $P_{mec}$ —机械损耗;   |
| $F_0$ —空载磁动势;             | $P_{ad}$ —附加损耗;    |
| $F_a$ —电枢磁动势;             | $q$ —每极每相槽数;       |
| $F_{ad}$ —直轴磁动势;          | $r_1$ —一次绕组的电阻;    |
| $F_{aq}$ —交轴磁动势;          | $r_2$ —二次绕组的电阻;    |
| $GD^2$ —飞轮矩;              | $r_m$ —励磁电阻;       |
| $H$ —磁场强度;                | $R_a$ —电枢电阻;       |
| $H_c$ —矫顽力;               | $R_m$ —磁阻;         |
| $I_a$ —电枢电流;              | $s$ —转差率;          |
| $I_N$ —额定电流;              | $S_N$ —额定容量;       |
| $i_0$ —空载电流;              | $T$ —转矩;           |
| $I_1$ —变压器一次电流;           | $T_{em}$ —电磁转矩;    |
| $I_2$ —变压器二次电流;           | $T_L$ —负载转矩;       |
| $I_d$ —直轴电枢电流;            | $T_0$ —空载转矩;       |
| $I_q$ —交轴电枢电流;            | $T_N$ —额定转矩;       |

$T_{\text{sys}}$ —比整步转矩;  
 $T_{\text{st}}$ —起动转矩;  
 $U$ —电压;  
 $U_1$ —变压器一次侧电压;  
 $U_2$ —变压器二次侧电压;  
 $U_{20}$ —变压器二次侧空载电压;  
 $X_1$ —一次绕组漏电抗;  
 $X_2$ —二次绕组漏电抗;  
 $X_d$ —直轴同步电抗;  
 $X_q$ —交轴同步电抗;  
 $y$ —电机节距;  
 $Z_1$ —变压器一次绕组漏阻抗;  
 $Z_2$ —变压器二次绕组漏阻抗;  
 $Z_k$ —短路阻抗;  
 $Z_m$ —励磁阻抗;  
 $Z_0$ —空载阻抗;  
 $Z_L$ —负载阻抗;

$\mu$ —磁导率;  
 $\mu_0$ —真空磁导率;  
 $\mu_r$ —相对磁导率;  
 $\Phi$ —磁通;  
 $\Phi_m$ —主磁通;  
 $\Phi_\sigma$ —漏磁通;  
 $\Phi_\delta$ —气隙磁通;  
 $\Phi_0$ —空载磁通;  
 $\Phi_{\text{ad}}$ —直轴电枢磁通;  
 $\Phi_{\text{aq}}$ —交轴电枢磁通;  
 $\Omega$ —角速度;  
 $\rho$ —惯量半径;  
 $\theta$ —功角;  
 $\varphi$ —功率因数角;  
 $\Psi$ —内功率因数角;  
 $\tau$ —极距。

## 目 录

|                    |    |
|--------------------|----|
| 1 绪 论              | 1  |
| 1.1 电机与拖动概述        | 2  |
| 1.2 电机分析常用的基本定律    | 3  |
| 1.3 电机常用材料及铁磁材料特性  | 7  |
| 1.4 磁路分析与计算        | 10 |
| 1.5 电机的机电能量转换过程与损耗 | 15 |
| 1.6 电机常用的分析方法和步骤   | 17 |
| 本章小结               | 18 |
| 2 直流电机原理           | 21 |
| 2.1 直流电机的基本工作原理    | 22 |
| 2.2 直流电机电枢绕组       | 28 |
| 2.3 直流电机的磁场        | 36 |
| 2.4 直流电机感应电动势和电磁转矩 | 42 |
| 2.5 直流电机的基本方程      | 44 |
| 2.6 直流电动机的工作特性     | 48 |
| 2.7 直流发电机的运行特性     | 52 |
| 2.8 直流电机换向         | 56 |
| 本章小结               | 60 |
| 3 电力拖动系统动力学        | 63 |
| 3.1 电力拖动系统概述       | 64 |
| 3.2 拖动系统的运动方程      | 64 |
| 3.3 拖动系统的简化        | 66 |
| 3.4 负载的转矩特性        | 71 |
| 3.5 拖动系统稳定运行的条件    | 73 |
| 本章小结               | 74 |
| 4 直流电动机电力拖动        | 78 |
| 4.1 直流电动机的机械特性     | 79 |
| 4.2 直流电动机的起动       | 81 |
| 4.3 直流电动机的调速       | 85 |
| 4.4 直流电动机的制动       | 92 |
| 4.5 直流电动机的过渡过程     | 99 |

|                     |            |
|---------------------|------------|
| 本章小结 .....          | 105        |
| <b>5 变压器 .....</b>  | <b>111</b> |
| 5.1 变压器的原理与结构 ..... | 112        |
| 5.2 变压器空载运行 .....   | 116        |
| 5.3 变压器负载运行 .....   | 120        |
| 5.4 变压器的参数测定 .....  | 126        |
| 5.5 标么值 .....       | 128        |
| 5.6 变压器的运行特性 .....  | 129        |
| 5.7 三相变压器 .....     | 132        |
| 5.8 变压器并联运行 .....   | 138        |
| 5.9 特种变压器 .....     | 141        |
| 本章小结 .....          | 147        |
| <b>参考文献 .....</b>   | <b>152</b> |

# 1 绪 论

## 【学习指导】

### 1. 学习目标

- (1) 了解本课程的性质及其学习方法；
- (2) 了解电机的基本概念及其常用的分类方法；
- (3) 掌握电机常用的基本定律；
- (4) 了解电机中使用的材料及其特性；
- (5) 掌握电机的各种损耗产生的原因及影响因素；
- (6) 了解电机的发热、冷却相关内容；
- (7) 掌握电机常用分析方法与步骤。

### 2. 学习建议

本章学习时间总共 7~8 小时，其中：

- 1.1 节建议学习时间：1 小时；
- 1.2 节建议学习时间：2 小时；
- 1.3 节建议学习时间：2 小时；
- 1.4 节建议学习时间：2 小时；
- 1.5 节建议学习时间：0.5 小时；
- 1.6 节建议学习时间：0.5 小时。

### 3. 学习重难点

- (1) 电机基本作用原理；
- (2) 铁磁材料及其特性；
- (3) 磁路定律及磁路计算；
- (4) 电机的损耗分析。

## 1.1 电机与拖动概述

### 1.1.1 电机的基本概况

#### 1. 电机的定义与分类

电机是以磁场为媒介，基于电磁感应原理实现机电能量转换或电能特性变换的电磁装置。

电机的分类方法很多，按运动方式来分，可以分为旋转电机和静止装置（即变压器）两种，其中旋转电机又可根据电流性质分为直流电机和交流电机，其中交流电机包括异步电机和同步电机两类。

按用途来分，电机可分为：

- ① 发电机：将其他形式的能量转换为电能。
- ② 电动机：将电能转换为机械能。
- ③ 变压器：按要求改变交流电压等级。
- ④ 控制电机等特种电机。

#### 2. 电机在国民经济中的应用

电能是现代社会中最重要、应用最广泛的能源，具有生产、传输经济，易于控制和使用等突出特点。电能的生产、传输、变换和使用都是由电机来完成的，电机在现代社会所有行业和部门中都占据着越来越重要的地位。

对电力工业本身来说，电机就是发电厂和变电站的主要设备。首先，火电厂利用汽轮发电机（水电厂利用水轮发电机）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，也都需要电动机驱动。

在机器制造业和其他所有轻、重型制造业中，电动机的应用也非常广泛。各类工作母机，尤其是数控机床，都须由一台或多台不同容量和型式的电动机来拖动和控制。各种专用机械，如纺织机、造纸机、印刷机等也都需要电动机来驱动。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动机。

在冶金工业中，高炉、转炉和平炉都须由若干台电动机来控制，大型轧钢机常由数千乃至数万千瓦的电动机拖动。近代冶金工业，尤其是大型钢铁联合企业的电气化和自动化程度都非常高，所用电机的数量和型式也就更多了。

在一切工农业生产、国防、文教、科技领域以及人们的日常生活中，电机的应用越来越广泛。一个工业化国家的普通家庭，家用电器中的电机总数在 50 台以上；一辆现代化的小轿车，其内装备的各类微特电机已超过 60 台。事实上，电机发展到今天，早已成为提高生产效率和科技水平以及提高生活质量的主要载体之一。

纵观电机发展，其应用范围不断扩大，使用要求不断提高，结构类型不断增多，理论研

究不断深入。特别是近 30 年来,伴随着电力电子技术和计算机技术的进步,尤其是超导技术的重大突破和新原理、新结构、新材料、新工艺、新方法的不断推动,电机发展更是呈现出勃勃生机,其前景是不可限量的。

### 1.1.2 课程性质、内容及学习方法

#### 1. 课程性质

“电机与拖动”是电气工程及其自动化专业必修的专业基础课,包含电机学、电力拖动两部分内容。它既是研究电机及电力拖动系统基础理论的学科,为后续相关专业课程准备必要的基础知识,同时又可以作为一门独立的基础应用课,直接为工农业生产服务。

#### 2. 课程内容及任务

本课程包含电机学、电力拖动两部分内容,系统地阐述了旋转电机(直流电机、异步电机及同步电机)及变压器的基本作用原理、基本结构、基本电磁关系、基本分析方法及基本特性,交、直流电力拖动系统运行性能、分析计算、电机选择及实验方法。

通过学习本课程,应该达到如下要求:

- (1) 掌握常用交、直流电机及变压器的基本理论(结构、工作原理、电磁关系、功率关系及基本特性)。
- (2) 掌握交、直流电动机的机械特性及各种运转状态(正反转、起动、制动)。
- (3) 掌握电力拖动系统的分析与计算。
- (4) 掌握交、直流电动机的调速方法及技术经济指标。
- (5) 掌握选择电机的原理与方法。
- (6) 掌握电机实验方法。

#### 3. 课程学习方法

由于本课程是专业基础课,兼具理论性和专业实用性特点,又与工程实际紧密结合,因此,学习过程中应注意以下几个问题:

- (1) 理论联系实际,重视科学实验和工程实践;
- (2) 抓住重点,牢固掌握基本概念、基本原理和主要特性;
- (3) 注重类比方法,分析电机的共性和特点,加深对原理和性能的理解;
- (4) 充分预习和复习,认真对待习题。

## 1.2 电机分析常用的基本定律

各种电机都是以电磁感应来实现基本工作原理的,本节简要介绍描述电、磁、动力学相关物理量之间关系的基本定律。

1.2.1 磁场的基本物理量

1. 磁感应强度 ( 磁通密度 )  $B$

磁感应强度  $B$  是描述磁场内某点的磁场强弱及方向的物理量, 单位为特 ( 特斯拉  $T$  )。

为了形象地描绘磁场, 往往采用磁力线来表示磁场。磁力线是无头无尾的闭合曲线, 其方向与产生它的电流方向之间满足右手螺旋关系, 如图 1.1 所示, 图中画出了直线电流及线圈电流产生的磁力线。

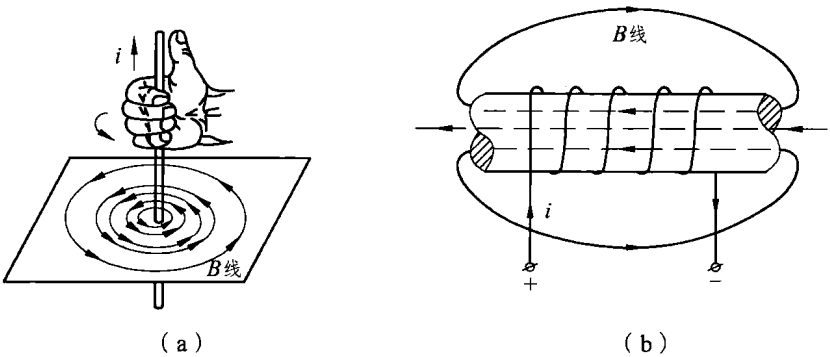


图 1.1 电流磁场中的磁力线

2. 磁通  $\Phi$

穿过某一截面  $S$  的磁感应强度  $B$  的通量, 即穿过截面  $S$  的磁力线根数称为磁感应通量, 简称磁通, 用  $\Phi$  表示, 单位为韦 ( 韦伯 ), 单位符号  $Wb$ 。

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \tag{1.1}$$

在均匀磁场中, 如果截面  $S$  与  $B$  垂直, 如图 1.2 所示, 则式 (1.1) 变为

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \tag{1.2}$$

式中,  $B$  为磁通密度, 简称磁密;  $S$  为面积。

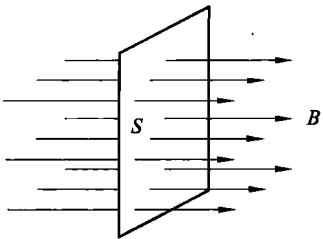


图 1.2 均匀磁场中的磁通

3. 磁场强度  $H$

磁场强度  $H$  是计算磁场时引入的辅助物理量, 单位为安 ( 安培 ) / 米,  $A/m$ 。它与磁通密度  $B$  的关系为

$$B = \mu H \tag{1.3}$$

式中,  $\mu$  为磁场媒介的磁导率。

1.2.2 安培环路定律 —— 描述电流产生磁场的规律

当导体中有电流流过时, 就会产生与该载流导体相交链的磁通。安培环路定律正是描述

电流与其产生磁场之间关系的定律。

安培环路定律：在磁场中，沿任意闭合磁回路的磁场强度线积分等于该回路所交链的所有电流的代数和，即

$$\oint_l Hdl = \sum i \quad (1.4)$$

式中， $\sum i$  就是该磁路所包围的全部电流的代数和，规定电流方向与闭合回路绕行方向符合右手螺旋关系的取正号，反之取负号。因此，式 (1.4) 也称全电流定律。

如图 1.3 所示，电流  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  产生的磁场，沿封闭曲线磁场强度满足关系  $\oint_l Hdl = i_1 + i_2 - i_3$ 。

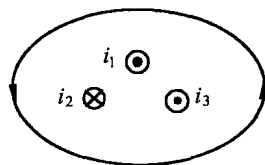


图 1.3 安培环路定律

### 1.2.3 电磁感应定律 —— 描述磁场产生电势的规律

#### 1. 线圈感应电动势

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， $e$  的方向符合楞次定律，数学描述为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.5)$$

#### 2. 运动导体感应电动势

导体在磁场中运动切割磁力线，导体中将产生感应电动势：

$$e = \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (1.6)$$

式中， $v$  为导体运动的线速度，单位为  $\text{m/s}$ ； $B$  为导体所处的磁通密度，单位为  $\text{T}$ ； $l$  为导体的有效长度，单位为  $\text{m}$ ； $e$  为导体中感应电动势，单位为  $\text{V}$ 。

若磁场均匀、导线为直线，且运动方向、磁场和导体三者相互垂直，则有

$$e = B \times v \times l \quad (1.7)$$

电动势方向由右手定则判定：伸开右手，磁力线从手心穿过，大拇指指向导体相对于磁场的运动方向，则四指所指的方向为感应电动势的方向，如图 1.4 所示。

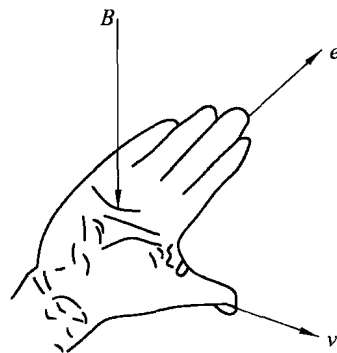


图 1.4 确定导体电动势方向的右手定则

### 1.2.4 电磁力定律 —— 描述电磁作用产生力的规律

载流导体在磁场中会受到力的作用，这种力是磁场与电流相互作用所产生的，故称为电磁力，其大小为

$$d\mathbf{f} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1.8)$$

式中,  $B$  为导体所处的磁通密度, 单位为 T;  $i$  为导体中的电流, 单位为 A;  $l$  为导体在磁场中的有效长度, 单位为 m;  $f$  为作用在导体上的电磁力, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

若磁场与导体相互垂直, 则有

$$f = B \times i \times l \quad (1.9)$$

电磁力的方向可用左手定则判定, 如图 1.5 所示, 伸开左手, 磁力线从手心穿过, 四指指向电流的方向, 则大拇指所指的方向即为电磁力的方向。

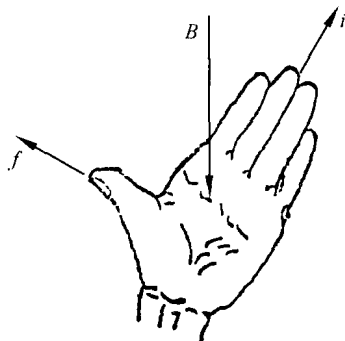


图 1.5 确定载流导体受力方向的左手定则

### 1.2.5 电路定律

电路定律大家相对熟悉, 这里只做简单总结, 详细分析请参考《电路分析》。

#### 1. 基尔霍夫电流定律

在集总参数电路中的任一广义节点, 所有支路电流的代数和恒等于零, 即

$$\sum i = 0 \quad (1.10)$$

式中,  $i$  为支路电流, 单位为 A。

#### 2. 基尔霍夫电压定律

在集总参数电路中的任一广义回路, 所有支路或元件电压的代数和恒等于零, 即

$$\sum u = 0 \quad (1.11)$$

式中,  $u$  为支路电压, 单位为 V。

### 1.2.6 牛顿第二运动定律

根据牛顿第二运动定律, 做直线运动的刚体, 作用在电动机轴上的电动力  $F$  与阻力  $F_L$  以及速度变化时产生的惯性力  $ma$  之间必须遵循下列基本运动方程式:

$$F - F_L = ma \quad (1.12)$$

式中,  $F$  为刚体上的作用力, 单位为 N;  $m$  为刚体质量, 单位为 kg;  $a$  为运动加速度, 单位为  $\text{m/s}^2$ 。

做旋转运动的刚体, 作用在电动机轴上的电动力  $F$  与阻力  $F_L$  以及速度变化时产生的惯性力  $ma$  之间必须遵循下列基本运动方程式, 即

$$F - F_L = ma \quad (1.13)$$

式中,  $F$  为刚体上的作用力, 单位为 N;  $m$  为刚体质量, 单位为 kg;  $a$  为运动加速度, 单位为  $\text{m/s}^2$ 。

## 1.3 电机常用材料及铁磁材料特性

### 1.3.1 电机常用材料

电机是依据电磁感应定律实现能量转换的, 因此, 电机中必须要有电流通道和磁通通道, 亦即通常所说的电路和磁路, 另外, 电机中还需要有能将电、磁两部分融合为一个有机整体的结构材料。

根据功能, 我们把电机常用的材料分为四类:

① 导电材料。导电材料作为电机中的电路, 常采用导电性能好、电阻损耗小的材料, 如紫铜或铝。

② 绝缘材料。绝缘材料作为电路(导电材料)和其余部分之间的电气隔离, 常采用介电强度高而且耐热强度好的材料, 如聚酯漆、环氧树脂、玻璃丝带、电工纸、云母片、玻璃纤维板等。

③ 导磁材料。导磁材料又称铁磁材料, 作为电机中的磁路, 常用磁导率极高(可达真空磁导率的数百乃至数千倍)的硅钢片、钢板和铸钢等。

④ 结构材料。结构材料使各部分构成整体, 支撑和连接其他机械。结构材料要求机械强度高、加工方便。常用铸铁、铸钢、铝合金及工程材料。

这四种材料中, 导磁材料的特性直接影响电机的磁场, 故这里做重点介绍。

### 1.3.2 铁磁材料的特性

#### 1. 铁磁材料的导磁性与饱和性

磁导率是用来衡量材料导磁性能的物理量, 它与磁场强度的乘积等于磁感应强度, 即

$$B = \mu H \quad (1.14)$$

式中,  $\mu$  为磁导率, 单位为亨/米 ( $\text{H/m}$ );  $H$  为磁场强度;  $B$  为磁密。

真空的磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ , 而铁磁材料的  $\mu \gg \mu_0$ , 一般电机所采用的铁磁材料的  $\mu$  为  $\mu_0$  的 2 000 ~ 8 000 倍。因此, 铁磁材料具有高的导磁性。

研究发现, 铁磁材料由许许多多的磁畴构成, 每个磁畴相当于一个小永磁体, 具有较强

的磁矩，如图 1.6 所示。在未磁化的材料中，所有磁畴排列杂乱，因此材料对外不显磁性，如图 1.6 (a) 所示。当外部磁场施加到这一材料时，磁畴就会沿施加的磁场方向转向，所有的磁畴平行，铁磁材料对外表现出磁性，如图 1.6 (b) 所示。因此，当外磁场加到铁磁材料时，铁磁材料会产生比外部磁场单独作用更强的磁场。这也是铁磁材料的磁导率比非铁磁材料大得多的原因。



图 1.6 铁磁材料的磁化

在磁性材料的磁化过程中，随着励磁电流的增大，外磁场和附加磁场都将增大，但当励磁电流增大到一定值时，几乎所有的磁畴都与外磁场的方向一致，附加磁场就不再随励磁电流的增大而继续增强，整个磁化磁场的磁感应强度接近饱和，这种现象称为磁饱和现象。

2. 铁磁材料的磁化曲线

磁性材料的磁化特性可用磁化曲线  $B = f(H)$  来表示，如图 1.7 所示。此曲线可分成三段： $Oa$  段的  $B$  与  $H$  差不多成正比地增加； $ab$  段的  $B$  增加较缓慢，增加速度下降； $c$  点以后部分的  $B$  增加很小，逐渐趋于饱和。

由此可见， $B$  与  $H$  不成正比，所以磁性材料的磁导率  $\mu$  不是常数，它将随着  $H$  的变化而变化，如图 1.7 中  $\mu = f(H)$  曲线。

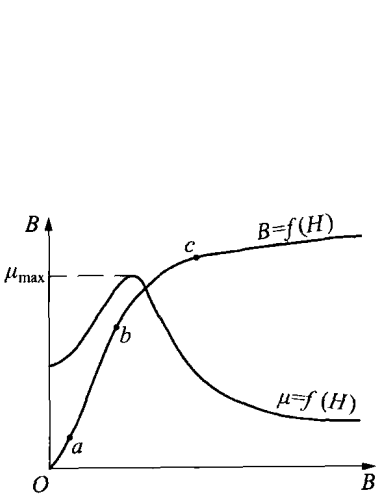


图 1.7 磁化曲线

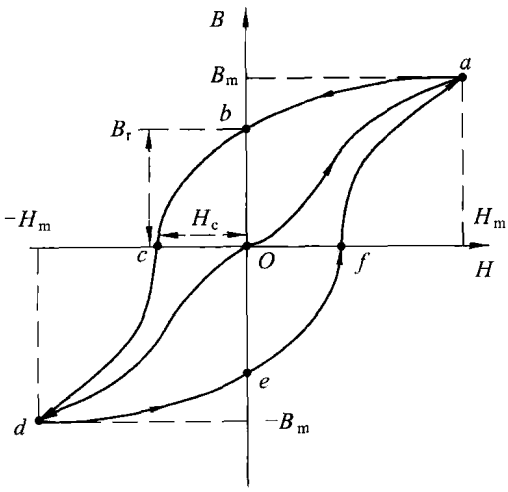


图 1.8 铁磁材料的磁化特性

若将铁磁材料进行周期性磁化， $B$  和  $H$  之间的变化关系就会变成如图 1.8 中的  $abcdefga$  所示形状。 $H$  开始从零增加到  $H_m$  时， $B$  值将沿  $Oa$  从零增加到  $B_m$ ；以后逐渐减小磁场强度  $H$ ， $B$  值将沿曲线  $ab$  下降。当  $H=0$  时， $B$  值并不为零，而等于  $B_r$ ， $B_r$  称为剩余磁通密度，简称剩磁。要使  $B$  值从  $B_r$  减小到零，必须加上相应的反向外磁场，此反向磁场强度称为矫顽力，

用  $H_c$  表示。铁磁材料所具有的这种磁通密度  $B$  的变化滞后于磁场强度  $H$  变化的现象, 叫做磁滞。呈现磁滞现象的  $B$ - $H$  闭合回线, 称为磁滞回线, 如图 1.8 中的  $abcdefa$  所示。曲线段  $abcd$  为磁滞回线下降分支,  $defa$  为磁滞回线上升分支。

对于同一铁磁材料, 选择不同的磁场强度  $H_m$  反复磁化时, 可得出不同的磁滞回线, 将各条磁滞回线的顶点连接起来所得的曲线称为基本磁化曲线或平均磁化曲线。起始磁化曲线与平均磁化曲线相差甚小, 如图 1.9 的虚线所示。

铁磁材料的磁导率  $\mu$  除了比  $\mu_0$  大得多外, 还与磁场强度以及物质磁化状态的历史有关, 所以铁磁材料的  $\mu$  不是一个常数。在工程计算时, 不按  $H = B/\mu$  进行计算, 而是按铁磁材料的基本磁化曲线计算。

磁滞回线较窄, 剩磁  $B_r$  和矫顽力  $H_c$  都小的铁磁材料属于软磁材料, 如硅钢片、铁镍合金、铁淦氧、铸钢等。这些材料磁导率较高, 磁滞回线包围面积小, 磁滞损耗小, 多用作电机、变压器的铁芯。

磁滞回线较宽, 剩磁  $B_r$  和矫顽力  $H_c$  都大的铁磁材料属于硬磁材料, 如钨钢、钴钢、铝镍钴、铁氧体、钕铁硼等, 硬磁材料主要用作永久磁铁。

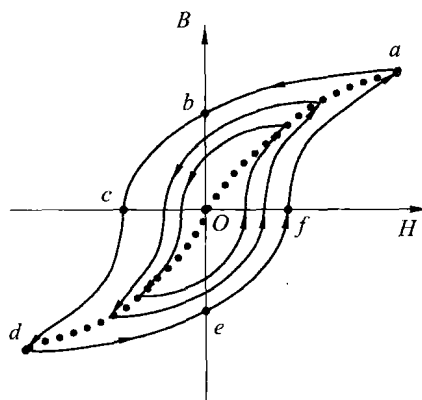


图 1.9 铁磁材料的基本磁化曲线

### 3. 铁磁材料的磁滞现象与磁滞损耗

铁磁材料中的磁畴在外磁场作用下, 发生移动和倒转时, 彼此之间产生“摩擦”。由于这种“摩擦”的存在, 当外磁场停止作用后, 磁畴与外磁场方向一致的排列便被保留下来, 不能恢复原状。铁磁材料这种磁通密度的变化滞后于磁场强度的变化的现象称为磁滞现象。

铁磁材料在交变磁场的作用下而反复磁化的过程中, 磁畴之间不停地互相摩擦, 消耗能量, 因此引起损耗。这种损耗称为磁滞损耗。磁滞回线面积越大, 损耗越大。磁通密度最大值  $B_m$  越大时, 磁滞回线面积也越大。试验表明, 交变磁化时, 磁滞损耗  $P_h$  与磁通的交变频率  $f$  成正比, 与磁通密度的幅值  $B_m$  的  $n$  次方成正比, 与铁芯重量  $G$  成正比, 即

$$P_h = C_h f B_m^n G \quad (1.15)$$

式中,  $C_h$  为磁滞损耗系数; 对一般的电工用硅钢片,  $n = 1.6 \sim 2.3$ 。由于硅钢片的磁滞回线面积较小, 所以电机和变压器的铁芯都采用硅钢片。

### 4. 铁磁材料的涡流

因铁芯是导电的, 当通过铁芯的磁通发生交变时, 根据电磁感应定律, 在铁芯中将产生感应电动势, 并引起环流。这些环流在铁芯内部围绕磁通呈旋涡状流动, 如图 1.10 所示, 称为涡流。涡流在铁芯中引起损耗, 称为涡流损耗。

设涡流为  $i_e$ , 涡流回路的电阻为  $R_e$ , 涡流感应电动势为  $E_e \propto f \times B_m$ , 则涡流损耗  $P_e = i_e^2 R_e = E_e^2 / R_e \propto f^2 \times B_m^2$ 。可见, 频率越高, 磁通密度越大, 感应电动势就越大, 涡流损耗也越大;

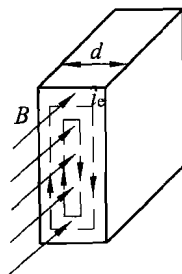


图 1.10 一片硅钢片中的涡流