



“十三五”普通高等教育规划教材

DIANJI YU TUODONG JICHU

# 电机与拖动基础

刘学军 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

DIANJI YU TUODONG JICHU

# 电机与拖动基础

刘学军 编著

周振雄 主审



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育规划教材。全书共分 11 章,内容包括概述、直流电机、电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、变压器、交流电机的基本理论、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机及同步电机的电力拖动、控制电机及其他用途的电动机、电力拖动系统中的电机选择。书中列举了丰富的例题和提供大量的习题,并附有参考答案,具备易于讲授、便于自学、理解和掌握的特点。本书有配套教材《电机与拖动基础学习指导》,提出了学习要点,对教材的全部习题进行详细解答,并提供了实验指导书。

本书可作为电气工程及其自动化、自动化、机电一体化、测控技术与仪器等相关专业的本科教材,也可供成人高等教育和大专院校相关专业选用,还可供电气工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/刘学军编著. —北京:中国电力出版社, 2016.6

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5123-9346-2

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. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 111301 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>)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 488 千字

定价: 40.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
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

电机是利用电磁原理进行能量转换或信号传递的电气设备,或把与电能有关的能量转换成机械能,是实现电能的生产、变换、传输、分配、使用 and 控制的电磁机械装置。电机广泛应用于工业、农业、交通运输、日常生活、文教、医疗以及国防、人造卫星等领域。电机是自动控制系统中很重要的执行元件,是构成整个系统不可或缺的组成部分。要对控制系统进行研究,就必须对电机和电力拖动技术有足够的了解。电机与电力拖动课程是电气工程及其自动化专业和自动化专业的一门重要的专业基础课。课程内容是将电机学、电力拖动和控制电机等课程整合成一门课程。本课程的任务是使读者掌握交直流电机、控制电机和变压器的基本结构和工作原理,掌握电力拖动系统的运行性能、分析计算和电机的选择、实验方法,为学习后续专业课程奠定坚实的理论基础。

现代高等教育的任务是培养具有创新精神和实践能力的高级专门人才。培养具有创新精神和实践能力的高级专门人才,就必须强调实践教学的重要性。许多知识,只有在实践中才能心领神会,实践是能力培训的重要环节。现今社会是知识大爆炸的年代,在有限的时间里,学生们需要学习和了解的知识很多。作者在分析了当前教学现状和社会需求的基础,总结了多年的教学经验,结合电气工程及其自动化专业特点及兼顾“电机学”“电力拖动”及“控制电机”等学科体系的原则,对教材内容及体系结构重新进行科学的整合,将教学内容与实际应用相结合,以解决课时与知识容量之间的矛盾,便于自学。因此,本书对电气工程自动化和其他相关专业的专业技能培养以及后续课程的学习都有很大的帮助。

本书全面论述了电机与拖动基础的基本理论,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,并引进了本学科的先进成果,如三相鼠笼式异步电动机的软启动、无刷电机、直线电机、双馈电机等内容,使读者能了解电力拖动领域的最新研究动态和新成果。本书在内容叙述上由浅入深,通俗易懂,说理清楚,理论联系实际,加强工程应用。书中列举了丰富的例题并提供了大量的习题,具备易于讲授、便于自学、理解和掌握的特点。为了便于读者更好学习、理解、掌握电机与电力拖动的主要内容,提高分析问题和解决问题的能力,本书有配套教材《电机与电力拖动基础学习指导》,提出了学习要点,对教材的全部习题进行详细解答,并提供了实验指导书。

全书共分 11 章,包括概述、直流电机、电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、变压器、交流电机的基本理论、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动同步电机及同步电机的电力拖动、控制电机及其他用途的电动机、电力拖动系统中的电机选择。

本书由刘学军教授编著并统稿。本书在编写过程中,参考了有关专家、学者的一些文

献，北华大学周振雄教授审阅书稿并提出了许多宝贵意见。谨在此表示诚挚的感谢。本书的插图绘制和文字录入工作由马凤军女士完成，在此一并表示感谢。

由于作者水平和时间有限，书中不妥和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

刘学军  
2016年2月

## 目 录

## 前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第1章 概述                      | 1  |
| 1.1 电机及电力拖动简介               | 1  |
| 1.2 磁路定律和电磁感应定律             | 3  |
| 小结                          | 9  |
| 思考题                         | 9  |
| 计算题                         | 9  |
| 第2章 直流电机                    | 11 |
| 2.1 直流电机的用途和基本工作原理          | 11 |
| 2.2 直流电机的结构、额定值与型号          | 13 |
| 2.3 直流电动机的电枢绕组              | 17 |
| 2.4 直流电机的磁场                 | 23 |
| 2.5 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率的计算 | 29 |
| 2.6 直流发电机                   | 30 |
| 2.7 直流电动机                   | 35 |
| 2.8 直流电机换向                  | 38 |
| 小结                          | 41 |
| 思考题                         | 43 |
| 计算题                         | 43 |
| 第3章 电力拖动系统的动力学基础            | 45 |
| 3.1 电力拖动系统的运动方程式            | 46 |
| 3.2 多轴旋转系统的折算               | 47 |
| 3.3 平移运动系统与旋转运动系统的相互折算      | 50 |
| 3.4 升降运动系统的折算               | 51 |
| 3.5 生产机械的负载转矩特性             | 53 |
| 小结                          | 54 |
| 思考题                         | 54 |
| 计算题                         | 55 |
| 第4章 直流电动机的电力拖动              | 56 |
| 4.1 他励直流电动机的机械特性            | 56 |
| 4.2 他励直流电动机的启动              | 60 |
| 4.3 他励直流电动机的制动              | 65 |
| 4.4 他励直流电动机的调速              | 70 |
| 小结                          | 76 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 思考题 .....                            | 77  |
| 计算题 .....                            | 77  |
| <b>第 5 章 变压器</b> .....               | 80  |
| 5.1 变压器基本知识 .....                    | 80  |
| 5.2 变压器的运行分析 .....                   | 85  |
| 5.3 变压器的参数测定和标么值 .....               | 94  |
| 5.4 变压器的运行特性 .....                   | 99  |
| 5.5 三相变压器 .....                      | 102 |
| 5.6 其他变压器 .....                      | 108 |
| 5.7 三绕组变压器 .....                     | 112 |
| 5.8 小型单相变压器的电磁计算 .....               | 114 |
| 小结 .....                             | 127 |
| 思考题 .....                            | 128 |
| 计算题 .....                            | 129 |
| <b>第 6 章 交流电机的基本理论</b> .....         | 132 |
| 6.1 交流电机工作原理 .....                   | 132 |
| 6.2 交流电机绕组及感应电动势 .....               | 134 |
| 6.3 交流绕组的磁动势 .....                   | 144 |
| 小结 .....                             | 153 |
| 思考题 .....                            | 153 |
| 计算题 .....                            | 154 |
| <b>第 7 章 异步电动机</b> .....             | 155 |
| 7.1 异步电动机的结构 .....                   | 155 |
| 7.2 三相异步电动机的运行原理 .....               | 159 |
| 7.3 三相异步电动机的功率、转矩与工作特性 .....         | 167 |
| 7.4 三相异步电动机的参数测定 .....               | 171 |
| 小结 .....                             | 173 |
| 思考题 .....                            | 174 |
| 计算题 .....                            | 174 |
| <b>第 8 章 三相异步电动机的电力拖动</b> .....      | 176 |
| 8.1 三相异步电动机的机械特性 .....               | 176 |
| 8.2 三相异步电动机的启动 .....                 | 181 |
| 8.3 三相异步电动机的制动 .....                 | 190 |
| 8.4 三相异步电动机的调速 .....                 | 196 |
| 小结 .....                             | 206 |
| 思考题 .....                            | 207 |
| 计算题 .....                            | 207 |
| <b>第 9 章 三相同步电机及同步电动机的电力拖动</b> ..... | 209 |
| 9.1 三相同步电机的工作原理与分类 .....             | 209 |

|               |                           |            |
|---------------|---------------------------|------------|
| 9.2           | 同步电机的基本结构 .....           | 211        |
| 9.3           | 同步电机的额定值及励磁方式 .....       | 213        |
| 9.4           | 同步发电机 .....               | 216        |
| 9.5           | 同步电动机 .....               | 230        |
| 9.6           | 同步电动机的电力拖动 .....          | 239        |
|               | 小结 .....                  | 242        |
|               | 思考题 .....                 | 244        |
|               | 计算题 .....                 | 244        |
| <b>第 10 章</b> | <b>控制电机及其他用途电动机 .....</b> | <b>247</b> |
| 10.1          | 伺服电动机 .....               | 247        |
| 10.2          | 直流力矩电动机 .....             | 252        |
| 10.3          | 测速发电机 .....               | 253        |
| 10.4          | 自整角机 .....                | 255        |
| 10.5          | 旋转变压器 .....               | 258        |
| 10.6          | 单相异步电动机 .....             | 263        |
| 10.7          | 直线电动机 .....               | 266        |
| 10.8          | 步进电机 .....                | 269        |
| 10.9          | 无刷直流电动机 .....             | 272        |
| 10.10         | 双馈异步电机 .....              | 275        |
| 10.11         | 开关磁阻电机 .....              | 278        |
|               | 小结 .....                  | 280        |
|               | 思考题 .....                 | 281        |
|               | 习题 .....                  | 282        |
| <b>第 11 章</b> | <b>电力拖动系统中的电机选择 .....</b> | <b>284</b> |
| 11.1          | 电动机选择的基本内容 .....          | 284        |
| 11.2          | 电机的发热和冷却 .....            | 286        |
| 11.3          | 电机的工作制 .....              | 288        |
| 11.4          | 电机允许输出功率 .....            | 290        |
| 11.5          | 电动机容量选择方法 .....           | 291        |
|               | 小结 .....                  | 297        |
|               | 思考题 .....                 | 297        |
|               | 计算题 .....                 | 298        |
|               | 参考答案 .....                | 300        |
|               | 参考文献 .....                | 312        |

## 第1章 概述



### 知识目标

- 清楚电机的分类及用途。
- 清楚电力拖动系统的构成及发展情况。
- 知道铁磁材料的特性。
- 知道铁磁材料的损耗。



### 能力目标

- 掌握电机理论中的常用的基本定律（包括电路定律、磁路定律、电磁感应定律和电磁力定律）。

## 1.1 电机及电力拖动简介

### 1.1.1 电机的分类和用途

电能是最重要的能源之一，与其他能源相比具有明显的优越性，适宜于大量生产，集中管理，远距离输送、转换经济，分配容易和自动控制，并且是一种洁净能源，对环境污染小。电机是电动机和发电机的总称，电动机将电能转换为机械能，发电机将机械能转换为电能。电机是一种电磁装置，是生产、传输、分配及应用电能的主要设备。

电机的分类方法主要有两种。一种是按照能量转换职能分类，可以分为发电机、电动机、变压器和控制电机四大类；另一种是按照电机结构、转速或运动方式分类，可以分为变压器、旋转电机和直线电机。还可以按照电源性质分类，如采用直流电源供电的直流电机，采用交流电源供电的交流电机（同步电机、异步电机）等。还有其他分类方法，但不论哪种分类方法都不是绝对的。

### 1.1.2 电力拖动系统

用电动机作为原动机拖动生产机械运动的系统，称为电力拖动系统。如图 1-1 所示，电力拖动系统主要由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源组成。图 1-1 中虚线表示电动机直接与生产机械连接。

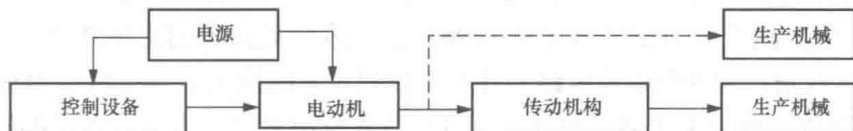


图 1-1 电力拖动系统示意图

电力拖动系统具有传动效率高、运行经济，电动机种类和规格多，具有良好的特性，能

满足不同生产机械的需要。电力拖动系统操作和控制方便,能实现自动控制和远距离控制。

在现代工业企业中,绝大多数的生产机械都是由电动机拖动的,因此电机和电力拖动技术在国民经济中具有极其重要的作用。

### 1.1.3 电机与电力拖动发展概况

#### 1. 电机发展概况

电机的发展已有一百多年的历史,可以分为直流电机和交流电机的产生及形成两个阶段。1820 年安培发现了电磁效应。1821 年法拉第首次发现载流导体在磁场中受力现象,不久便制造出原始的电动机。1831 年法拉第又发现了电磁感应。法拉第的电磁感应定律,揭示了电磁感应原理,奠定了电磁学基础。法拉第根据电磁感应定律制造出原始的直流电动机。

在 19 世纪 80 年代以前,直流电机的应用一直占主导地位。1834 年雅克比发明被世界公认的第一台功率为 15W 的棒状铁芯实用电动机。1837 年商业化直流电动机问世。1885 年费拉里斯提出了旋转磁场原理,并研制了两相异步电动机。1886 年尼古拉·特斯拉也独立研制了两相异步电动机。1889 年多里沃·多勃罗沃尔斯基成功研制第一台实用的三相交流单鼠笼异步电动机,并发明了第一台双鼠笼三相异步电动机。直到 20 世纪初,交流三相制在电力工业中占据了绝对统治地位。

我国电机制造业自新中国成立以来发展很快。建国后我国的电机制造业从仿制进入到自行试验研究和自行设计阶段。目前,我国已建立自己的电机工业体系,有了统一的国家标准和统一的产品系列。我国生产的各种类型的电机不仅可以满足国民经济各部门的需要,而且有的产品已经达到世界先进水平。

#### 2. 电力拖动发展概况

电力拖动系统最初的拖动方式是采用成组拖动,这种拖动方式传动损耗大、效率低、控制不灵活,容易出事故。这种陈旧落后的拖动方式已经被淘汰了。

从 20 世纪 20 年代起采用“单电动机拖动”,就是单台电动机拖动单台生产机械。这种拖动方式的缺点是机械传动机构复杂。

按电动机种类不同,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。在交流电机出现以前,直流电力拖动是唯一的一种电力拖动方式。

19 世纪末期,研制出交流电动机,使交流电力拖动在工业中广泛应用。但随着生产技术的发展,特别是精密机械加工与冶金工业生产过程中对于启动、制动、正反转及调速精度和调速范围等静态特性和动态响应方面都提出了更高要求。由于交流电力拖动比直流电力拖动技术上难以实现这些要求,因此,20 世纪以来在可逆、可调速与高精度的拖动技术领域,相当长时期内几乎全部采用直流拖动系统,而交流拖动系统主要用于恒转速系统。

直流拖动系统虽然具有调速性能优异这一突出优点,但由于它有电刷和换向器使得它故障率较高,电动机使用环境受到限制。其电压等级、额定转速、单机容量也受到限制。20 世纪 60 年代以后,随着电力电子技术的发展,半导体变流技术的交流调速系统得到实现。20 世纪 70 年代以来,大规模集成电路和计算机控制技术的发展,为交流电力拖动的广泛应用创造了有利条件。电力电子器件组成的大容量直流电源取代了大型直流发电机,使直流电动机具有更加优良的调速性能。与此同时,还出现了高性能价格比的变频电源,使交流电机得到高工作精度、宽调速范围等较高的性能指标。由于交流电力拖动系统具有调速性能优良,维护费用低等优点,因此,在主流上将取代直流拖动系统的势头。

1970年,勃拉希克提出异步电机磁场定向控制方法(矢量控制调速),使交流电机可得到与直流电机相媲美的调速性能。随着交流电机矢量控制理论和实践不断完善,电机控制理论技术得到了飞速发展。随着电力电子技术、计算机控制技术、微电子技术、信号检测与处理技术及控制理论的发展,电力拖动系统正朝着网络化、信息化及智能化方向迅速发展。

## 1.2 磁路定律和电磁感应定律

### 1.2.1 磁场的基本物理量

#### 1. 电流的磁效应

磁场是电流产生的。磁场可以用磁感应线,简称磁力线描述。如图1-2所示,电流通过直导线、环形导线和螺线管时产生的磁力线,磁力线都是围绕电流的闭合曲线,其回转方向和电流方向之间符合右手螺旋定则。

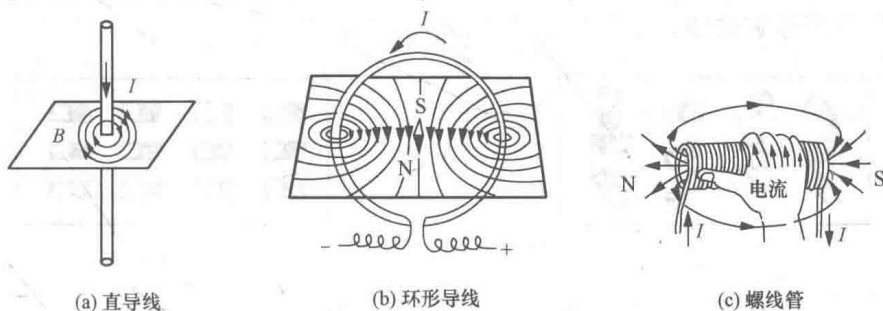


图 1-2 磁场中的磁力线

#### 2. 磁通量 $\Phi$ 与磁感应强度 $B$

磁场中穿过某一截面的总磁感应线称为通过该面积的磁通量,简称为磁通。磁感应强度是描述磁场强弱和方向的物理量,是一个矢量,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,若通过磁力线垂直于某面积  $S$  的磁通为  $\Phi$ ,则有

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

式中  $B$ ——磁感应强度, T (特、特斯拉);

$\Phi$ ——磁通量, Wb (伯、韦伯);

$S$ ——面积,  $\text{m}^2$  (平方米)。

磁感应强度在数值上等于与磁场方向垂直的单位面积上通过的磁通量,所以磁感应强度也称为磁通密度。

#### 3. 磁场强度 $H$

计算导磁物质的磁场时引入辅助物理量磁场强度,是一个矢量,用  $H$  表示,它与磁密  $B$  的关系为

$$B = \mu H \quad (1-2)$$

式中  $\mu$ ——导磁物质的磁导率, H/m (亨/米)。

$H$ ——磁场强度, A/m (培/米)。

$\mu$  是衡量物质导磁能力的物理量,真空的磁导率为常数,用  $\mu_0$  表示,  $\mu_0 = 4\pi \times$

$10^{-7} \text{ H/m}$ 。铁磁材料中  $\mu \gg \mu_0$ 。

1.2.2 铁磁材料的特性

自然界中物质按照磁导率不同，可以分为铁磁性物质和非铁磁性物质两大类。非铁磁性物质的磁导率  $\mu$  接近真空磁导率  $\mu_0$ 。它又分为顺磁性物质（如变压器油和空气），其  $\mu$  稍大于  $\mu_0$ ；反磁性物质（如铜和铋），其  $\mu$  稍小于  $\mu_0$ 。工程上可以认为非铁磁性物质的磁导率  $\mu$  等于  $\mu_0$ 。非铁磁性物质的  $B$  和  $H$  呈线性关系。

铁磁性物质（如铁、镍、钴等）的磁导率比真空磁导率大几千至几万倍。铁磁物质的这一特点主要是由于铁磁性物质的内部是由许多很小的磁畴构成的，如图 1-3 所示。在未磁化的材料中，所有磁畴随意排列，磁效应相互抵消，对外不显示磁性。当外部磁场施加到铁磁材料时，这些磁畴将沿外磁场方向重新作有规则排列，与外磁场同方向的磁畴不断增加，其他方向上的磁畴不断减少。当外磁场足够强时，所有磁畴方向与外磁场方向相同，这时说明铁磁材料被完全磁化。由磁畴产生的内部磁场与外加的磁场叠加使合成磁场大为增强。从而使铁磁材料具有高导磁性能。



图 1-3 铁磁材料的磁化

铁磁材料的磁化过程可以用磁化曲线描述，磁化曲线是指磁场的磁感应强度与磁场强度的关系即  $B = \mu H$ ，简称  $B-H$  曲线。

对于非铁磁性材料，有  $B = \mu_0 H$ ， $B$  和  $H$  呈线性关系，如图 1-4 中特性曲线 1。铁磁性材料的磁化曲线是非线性的，如图 1-4 中特性曲线 2 为未磁化过的铁磁材料进行磁化后的  $B-H$  曲线，称为起始磁化曲线。开始磁化时，由于外磁场较弱，所以  $B$  值增加较慢，对应曲线 2 的  $O-A$  段；随着外磁场逐渐增强，铁磁材料中大量磁畴的转向和外磁场一致方向， $B$  值增加很快，对应曲线 2 的  $a-b$  段；再增强外磁场，可以转向的磁畴越来越少， $B$  值增加越来越慢，对应曲线 2 的  $b-c$  段，这时铁磁材料逐渐饱和，到  $c$  点后所有磁畴都转向与外磁场

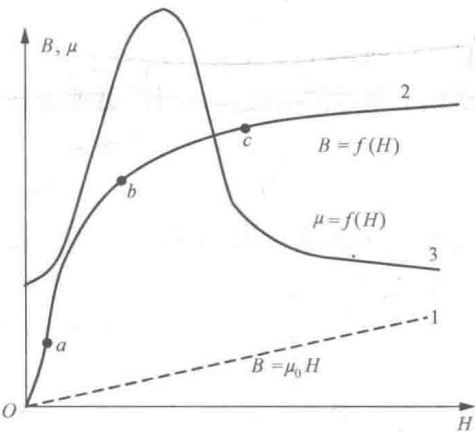


图 1-4 起始磁化曲线

方向一致，再增加  $H$ ， $B$  值增加很少，基本不变，铁磁材料深度饱和。为使铁芯得到充分利用而又不进入饱和区，电机和变压器的铁芯额定工作点设计在其磁化曲线的膝点（如曲线 2 的  $b$  点）。由式  $\mu = B/H$  可知磁导率  $\mu = f(H)$  的特性曲线是非线性的，如图 1-4 特性曲线 3 所示。

若铁磁材料进行反复磁化，则  $B-H$  曲线（如图 1-5 所示）为闭合的磁滞回线。从图 1-5 磁滞回线可知， $B$  的变化总是滞后于  $H$ ，这种现象称为磁滞现象。当  $H$  降为零时，铁芯磁性并未消失，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  $B_r$  产生的。当  $H$  反向增加到  $-H_c$  时, 铁芯的剩磁才能完全消失, 使  $B=0$  的  $H$  值  $H_c$  称为矫顽磁力。铁磁性材料的这一特点, 是由于磁畴在转向时遇到摩擦阻力的阻碍作用引起的。

对于同一铁磁性材料, 选取不同值的  $H_m$  多次交变磁化, 可以得到一系列磁滞回线, 如图 1-5 所示, 将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。通常用它表征材料的磁化特性。它是分析计算磁路的依据。图 1-6 给出了几种常用铁磁性材料的基本磁化曲线。

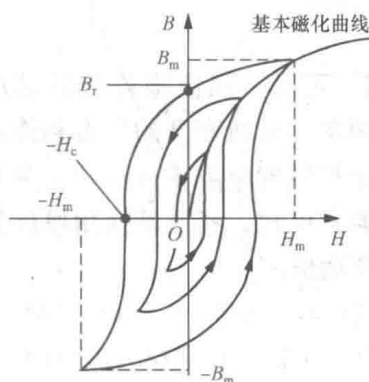


图 1-5 基本磁化曲线

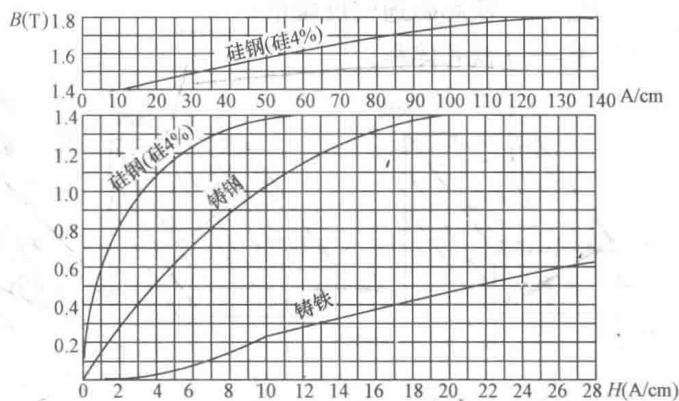


图 1-6 常用铁磁性材料的基本磁化曲线

按磁滞回线不同, 磁性材料可以分为硬磁性材料、软磁性材料和矩磁材料三种。硬磁性材料的磁滞回线比较宽, 如钴钢、钨钢、铝镍钴合金和铽铁硼合金等, 主要用来制造永久磁铁。软磁性材料磁滞回线较窄, 如铸钢、硅钢片、铁镍合金、铁氧体和坡莫合金等, 由于磁滞损耗小, 常用来制造电机、变压器的铁芯。矩磁性材料的磁滞回线接近于矩形, 如镁锰氧体(磁性陶瓷)和某些铁镍合金等, 常用于电子技术和计算机技术中。

### 1.2.3 铁磁材料的损耗

#### 1. 磁滞损耗

铁磁材料在交变磁场的反复磁化过程中, 磁畴会不停转动, 互相之间产生摩擦, 因此会产生功率损耗, 这种损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗与磁通的交变频率及磁通密度的幅值的关系为

$$P_h = k_h f \cdot B_m^\alpha V \quad (1-3)$$

式中  $f$ ——磁芯中磁铁交变频率, Hz;

$V$ ——铁芯体积;

$k_h$ ——不同材料的磁滞损耗系数;

$\alpha$ ——由试验确定的指数, 电工钢片  $\alpha = 1.6 \sim 2.3$ 。

由于硅钢片的磁滞回线面积很小, 而且导磁性能很好, 故磁滞损耗小, 因此电机、变压器的铁芯通常采用硅钢片制成。

#### 2. 涡流损耗

当通过导电铁磁性材料的磁通交变时, 根据电磁感应定律, 在铁芯中将产生围绕磁通呈现螺旋状的感应电动势和感应电流, 简称涡流。如图 1-7 所示, 涡流在其流电路径上的等效电阻中产生的损耗等于涡流损耗。

涡流损耗与磁通的交变频率、磁通密度幅值、硅钢片的电阻及硅钢片的厚度有关, 涡流损耗可以用下式计算

$$p_e = k_e b^2 f^2 B_m^2 V \quad (1-4)$$

式中  $k_e$  —— 涡流损耗系数, 与铁磁材料的电阻率成反比;

$b$  —— 铁芯厚度;

$f$  —— 磁场交变频率;

$B_m$  —— 铁芯磁通密度幅值;

$V$  —— 铁芯体积。

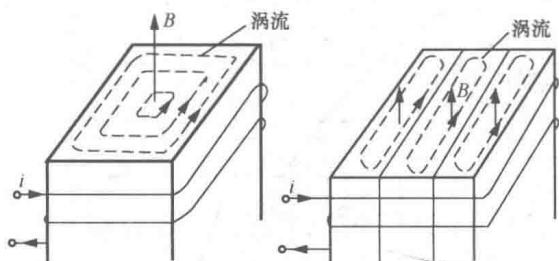


图 1-7 铁磁材料中的涡流损耗

由式 (1-4) 可见, 涡流损耗与铁芯厚度、磁场交变频率、磁通密度的平方和体积成正比, 与铁磁材料的电阻率成反比。为减少涡流损耗, 通常电机、变压器使用厚度较小的硅钢片叠压而成。

硅钢片厚度一般为 0.3~0.5mm, 为减少涡流损耗, 可以设法提高铁磁材料的电阻率, 在硅钢片之间和整个铁芯都要经过绝缘处理。

#### 1.2.4 电机理论中常用的基本定律

##### 1. 电路定律

电路定律有基尔霍夫第一定律和第二定律。

##### 2. 磁路定律

(1) 磁路基尔霍夫第一定律。在磁路中任一闭合面内, 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  $\sum \Phi = 0$ 。

(2) 磁路基尔霍夫第二定律 (安培环路定律)。在磁路中, 沿着任意一个闭合回路的磁场强度  $H$  的线积分等于该闭合回路所包围的所有电流的代数和, 即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I \quad (1-5)$$

式中  $\sum I$  —— 磁路所包围的全电流。

故该定律又称为全电流定律。式 (1-5) 也可以写成  $\sum Hl = \sum I$ 。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 (磁压降) 之和  $\sum Hl$  等于它所包围的全部电流  $\sum I$ 。

(3) 磁路的欧姆定律。由安培环路定律可得

$$F = IN = Hl = \frac{Bl}{\mu} = \frac{\Phi l}{\mu S} = R_m \Phi \quad (1-6)$$

式中  $R_m$  —— 磁路的磁阻,  $R_m = \frac{l}{\mu S}$ , 则磁通量  $\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{IN}{R_m}$ 。

##### 3. 电磁感应定律

变化的磁场会产生电场, 使导体产生感应电动势, 这就是电磁感应现象。在电机中电磁感应现象主要表现在当导体与磁场有相对运动, 导体切割磁力线, 导体内产生的电动势称为切割电动势; 另一种是线圈中磁通变化在线圈中产生的感应电动势, 称为变压器电动势。

(1) 切割电动势。由导体或线圈切割磁力线而感应的电动势称为切割电动势, 如图 1-8

所示, 当  $B$ 、 $l$ 、 $v$  三量互相垂直时, 其表达式为

$$e = Blv \quad (1-7)$$

式中  $B$ ——磁感应强度;

$l$ ——导体的有效长度;

$v$ ——导体相对与磁场运动的线速度。

(2) 变压器电动势。与线圈交链的磁通发生变化, 线圈感应出电动势, 其方向由楞次定律判定。如感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则, 则感应电动势的表达式为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-8)$$

式中  $\psi$ ——磁链,  $\psi = N\Phi$ ;

$\Phi$ ——磁通量;

$N$ ——线圈匝数。

根据楞次定律, 如图 1-9 所示, 当  $d\Phi/dt > 0$  时,  $e$  的实际方向为 A 端为正, X 端为负,  $e$  的实际方向与和正方向相反,  $e$  为负; 当  $d\Phi/dt < 0$  时, 则  $e$  为正。 $e$  的实际方向是 A 端为负, X 端为正。

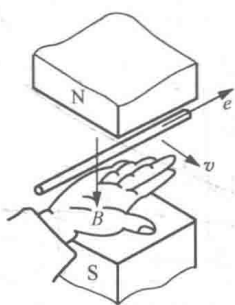


图 1-8 右手定则

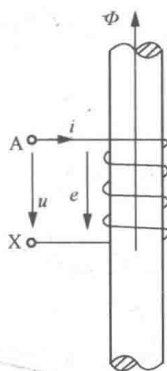


图 1-9 感应电动势与磁通的正方向

#### 4. 电磁力定律

载流导体处在磁场中会受到电磁力作用, 这个电磁力称为安培力。当磁力线与导体的方向相互垂直时, 载流导体所受电磁力  $f$  为

$$f = BIl \quad (1-9)$$

式中  $B$ ——载流导体处的磁感应强度;

$l$ ——导体的有效长度;

$I$ ——载流导体中流过的电流。

电磁力的方向由左手定则判断, 如图 1-10 所示, 磁力线从左手掌心穿过, 四指指向导体中电流方向, 则大拇指的指向就是导体所受电磁力的方向。

【例 1-1】如图 1-11 所示, 磁路由两块铸钢铁芯及一段空气间隙构成。各部分尺寸为:  $l_0/2 = 0.5\text{cm}$ ,  $l_1 = 30\text{cm}$ ,  $l_2 = 12\text{cm}$ ,  $S_0 = S_1 = 10\text{cm}^2$ ,  $S_2 = 8\text{cm}^2$ 。线圈中电流为直流电流。问: 要在

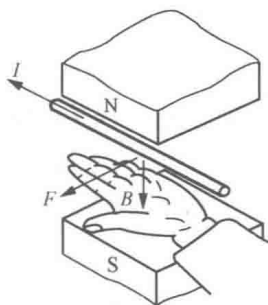


图 1-10 左手定则

空气间隙处的磁感应强度达到  $B_0 = 1.0\text{T}$ , 需要多大磁通势?

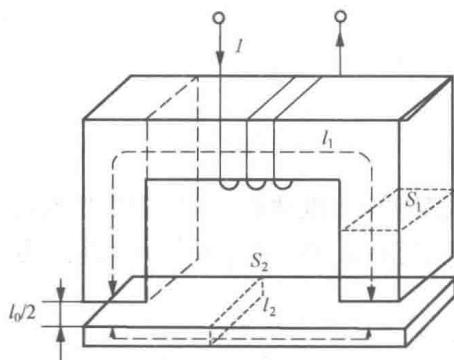


图 1-11 例 1-1 的磁路

解: (1) 磁路的磁通为

$$\Phi = B_0 S_0 = 1 \times 0.001 = 0.001 (\text{Wb})$$

(2) 各段磁感应强度为

$$B_0 = 1.0 (\text{T})$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{0.001}{0.001} = 1 (\text{T})$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{0.001}{0.0008} = 1.25 (\text{T}).$$

(3) 各段磁路磁场强度为

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \times 10^{-2} = 7962 (\text{A/cm})$$

由图 1-6 磁化曲线查得:  $H_1 = 9.2\text{A/cm}$ ,  $H_2 = 14\text{A/cm}$ 。

(4) 各段磁路磁压为

$$F_0 = H_0 l_0 = 7960 \times 1 = 7960 (\text{A})$$

$$F_1 = H_1 l_1 = 9.2 \times 30 = 276 (\text{A})$$

$$F_2 = H_2 l_2 = 14 \times 12 = 168 (\text{A})$$

(5) 磁通势为

$$\begin{aligned} F &= F_0 + F_1 + F_2 \\ &= 7960 + 276 + 168 \\ &= 8404 (\text{A}) \end{aligned}$$

**【例 1-2】** 磁路如图 1-12 所示, 截面积  $S_1 = S_2 = 6 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ,  $S_3 = S_4 = 10 \times 10^{-4}\text{m}^2$ , 平均长度  $l_1 = l_2 = 0.5\text{m}$ , 气隙长度  $\delta = 1.0 \times 10^{-4}\text{m}$ , 已知  $\Phi_3 = 10 \times 10^{-4}\text{Wb}$ ,  $F_1 = 350\text{A}$ , 求  $F_2$ 。

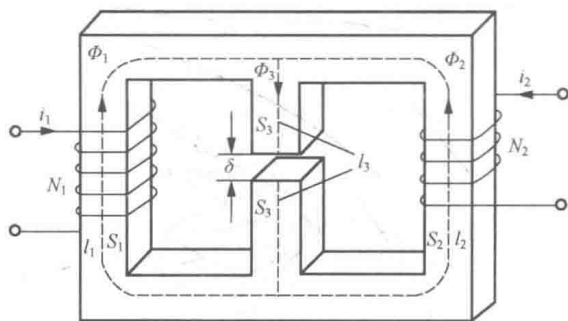


图 1-12 例 1-2 的磁路

(硅钢片技术数据查图 1-6)

解: (1) 磁路分为 3 段, 左段、右段、中间段。

(2) 三部分截面积已知。求中间柱铁芯的磁密为

$$B_3 = \frac{\Phi}{S_3} = \frac{10 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4}} = 1.0 (\text{T})$$

查图 1-6 硅钢曲线得  $H_3 = 300\text{A/m}$ 。由于  $B_\delta = B_3 = 1.0\text{T}$ , 中间柱磁密为

$$H_3 l_3 + B_\delta \delta / \mu_0 = 300 \times 0.14 + 1.0 \times 1.0 \times 10^{-4} / 4\pi \times 10^{-7} = 121.62 (\text{A})$$

对于左侧铁芯回路磁压降有

$$H_1 l_1 = F_1 - H_3 l_3 - B_\delta \delta / \mu_0 = 350 - 121.62 = 228.4 (\text{A})$$

从而得

$$H_1 = \frac{228.4}{0.5} = 456.8 (\text{A/m})$$

查图 1-6 曲线得  $B_1 = 1.15\text{T}$ ,  $\Phi_1 = B_1 S_1 = 1.15 \times 6 \times 10^{-4} = 6.9 \times 10^{-4} (\text{Wb})$

铁芯右侧回路中磁通

$$\Phi_2 = \Phi_3 - \Phi_1 = 10 \times 10^{-4} - 6.9 \times 10^{-4} = 3.1 \times 10^{-4} (\text{Wb})$$

故

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A_2} = \frac{3.1 \times 10^{-4}}{6 \times 10^{-4}} = 0.5167 (\text{T})$$

查图 1-6 曲线得

$$H_2 = 180 \text{ A/m}, H_2 l_2 = 180 \times 0.5 = 90 (\text{A})$$

最终有

$$F_2 = H_2 l_2 + H_3 l_3 + B_3 \delta / \mu_0 = 90 + 121.6 = 211.6 (\text{A})$$

## 小 结

本章介绍了电机用途和电力拖动系统的构成,介绍了当前电力拖动系统的发展概况。电机的工作原理及内部电磁关系和运行原理都要用到有关电和磁的基本知识和基本定律。

本章复习了电磁感应定律、磁路的欧姆定律、电路的基本定律、基尔霍夫电压定律和电流定律。电机和变压器的铁芯都是使用铁磁材料制造的,铁磁材料性能优劣将直接影响电机的运行性能。要充分理解铁磁材料的磁化曲线关系和铁芯损耗。

## 思考题

- 1-1 变压器感应电动势和电机中的切割电动势产生的原因有什么不同? 其大小与哪些因素有关?
- 1-2 磁路饱和对磁路的等效电感有何影响?
- 1-3 如何减少铁芯中磁滞和涡流损耗?
- 1-4 起始磁化曲线、磁滞回线和基本磁化曲线是如何形成的,它们有哪些要求?
- 1-5 螺线管中磁通与电动势的正方向如图 1-13 所示,当磁通变化时,分别写出它们之间的关系式。

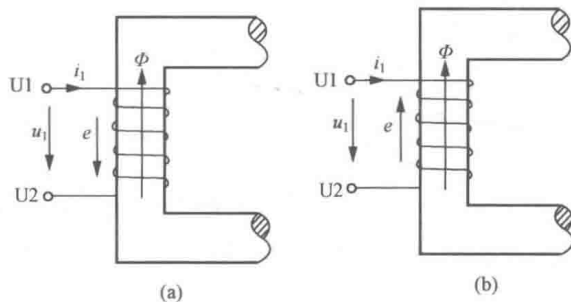


图 1-13 思考题 1-5 图

## 计 算 题

- 1-1 某铁芯的截面积  $S = 10 \text{ cm}^2$ , 当铁芯中的  $H = 5 \text{ A/cm}$  时,  $\Phi = 0.001 \text{ Wb}$ , 可以认为