Electric Machinery

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 电气牵引类

电机学

主　编　刘慧娟
副主编　郭　芳
主　审　范　瑜

北京交通大学出版社
http://press.bjtu.edu.cn

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·电气牵引类

电 机 学

刘慧娟 主 编
郭 芳 副主编
范 瑜 主 审

北京交通大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书是结合“成人（网络）教育系列规划”的特色，为适应21世纪教学改革的需要而编写的。

本书分5章。主要介绍直流电机、变压器、交流电机的共同理论感应电机和同步电机的基本工作原理、工作特性及其应用等。为加强学生对相关知识点的理解和自学，各章中备有相应的例题，为便于学生学习，每一节后附有相应的思考题，每一章后附有内容小结和相应的复习参考题。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化、电气信息工程专业和其他强弱电结合专业的教材，亦可供相关专业技术人员参考使用。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/刘慧娟主编. —北京:北京交通大学出版社,2012.10
(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)
ISBN 978-7-5121-1197-4

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①刘… Ⅲ. ①电机学-高等学校-教材 Ⅳ. ①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第215346号

责任编辑：吴嫦娥　　特邀编辑：李晓敏
出版发行：北京交通大学出版社　　邮编：100044　　电话：010-51686414
印 刷 者：北京鑫海金澳胶印有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185×260　　印张：13.75　　字数：344千字
版　　次：2012年10月第1版　　2012年10月第1次印刷
书　　号：ISBN 978-7-5121-1197-4/TM·44
印　　数：1~3 000册　　定价：29.00元

本书如有质量问题，请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评，我们表示欢迎和感谢。
投诉电话：010-51686043，51686008；传真：010-62225406；E-mail：press@bjtu.edu.cn。

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·电气牵引类

编　委　会

顾　　问：施仲衡

主　　任：司银涛

副 主 任：陈　庚　姜久春

委　　员：（按姓氏笔画排序）

王立德　方　进　刘文正

刘慧娟　吴俊勇　张晓冬

周　晖　黄　辉

编委会办公室

主　　任：赵晓波

副 主 任：孙秀翠

成　　员：（按姓氏笔画排序）

吴嫦娥　郝建英　徐　琤　高　琦

出版说明

为促进高等轨道交通专业电力牵引类教材体系的建设，满足目前轨道交通类专业人才培养的需要，北京交通大学电气工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师，并在有关单位领导和专家的大力支持下，编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材·电气牵引类”。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂，实操部分图文并茂”的原则，侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者，本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式，配套有教学课件、习题库、自学指导书，并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导，在此表示深深的敬意和感谢。本系列教材从2012年1月起陆续推出，首批包括：《电路》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《工程电磁场》、《电机学》、《电传动控制系统》、《电力系统分析》、《电力系统继电保护》、《高电压技术》、《牵引供电系统》、《城市轨道交通供电》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养，特别是轨道交通电气牵引专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会

2012年8月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整，大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力，同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业，铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势，是最快捷、最可靠的运输方式，是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来，中国铁路积极适应社会的改革和发展，狠抓制度改革，着力技术创新，抓住了历史发展机遇，铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视，根据国家《中长期铁路网规划》（2005—2020年）：到2020年，中国铁路网规模达到12万千米以上。其中，时速200千米及以上的客运专线将达到18万千米。加上既有线提速，中国铁路快速客运网将达到5万千米以上，运输能力满足国民经济和社会发展需要，主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具，但随着城市建设和经济的繁荣，城市人口大幅增加，近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市，仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠，是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络，轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是，在我国轨道交通进入快速发展的同时，解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加以及新技术的开发与引进，管理和技术人员的队伍需要不断壮大。企业不仅要对新的员工进行培训，对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校，拥有该学科一流的师资和科研队伍，为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来，学校非常重视轨道交通的研究和发展，建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室，“基于通信的列车运行控制系统（CBTC）”取得了关键技术研究的突破，并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题，北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”，以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和土木工程四个系列，涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域，每本教材都是由该领域的专家执笔，教材覆盖面广，内容丰富实用。在教材的组织过程中，我们进行了充分调研，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的谢意。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家予以不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会

2012 年 8 月

前　言

本书是“成人（网络）教育系列规划教材”之一，也是高等学校电气工程及其自动化、电气信息工程专业和其他强弱电结合专业主要技术基础课的教材，内容涉及本学科一些最基本的理论和分析方法。

本书是编者在总结多年教学工作经验的基础上，结合“成人（网络）教育系列规划教材”的特色，对教学内容和表述方法进行梳理和更新，以适应21世纪教学改革的需要而编写的。

本书具有以下特点。

（1）以直流电机、变压器、感应电机和同步电机四种典型通用电机为研究对象，着重讲解其工作原理和稳态运行特性，以及各类电机的共同性问题。突出本专业教学应掌握的基本概念、基本理论和基本分析方法。提高学生解决工程实际问题的能力。

（2）在讲述电机理论的基础上，加入交、直流电动机的电力拖动内容，为学习后续课程和解决今后遇到的工程问题打下相应的基础。

（3）将“磁路”等电机分析的基础知识放在绪论中，可供读者学习参考。

（4）每一节后都附有相应的思考题，各章之后都有本章小结和相应的复习参考题，以帮助读者加强对本节、本章内容的理解和掌握。

（5）各章的内容具有相对独立性，可根据实际需要和学时决定取舍，各章的次序在具体讲授时亦可以改变。

全书的编写方针是结合国情、博采众长、削枝强干、推陈出新。目标是编写一本取材精、科学性强、概念清、便于教学的简明教材。

本书由北京交通大学刘慧娟副教授、郭芳、张威和桂俊峰老师共同编写，刘慧娟任主编，郭芳任副主编。具体分工：刘慧娟编写绪论、第1章；桂俊峰编写第2章；张威编写第3章、第4章；郭芳编写第5章。由北京交通大学范瑜教授主审对全书的文稿作了非常仔细的审阅，并提出了许多宝贵的修改意见和建议，在此表示衷心的感谢！

本书的编写得到了北京交通大学运程与继续教育学院、教务处及电气学院领导的关怀和帮助，得到了各位同仁的热心帮助，在此一并表示谢意。

由于编者的水平有限，编写时间仓促，书中难免有不妥和错漏之处，恳请读者提出宝贵意见，以便在再版时修正。

编　者

2012年8月

目　录

绪论 …… 1

0.1 电机在国民经济中的作用…… 1
0.2 本课程的特点与分析方法…… 2
0.3 电磁学的基本知识与基本定律…… 3

第1章 直流电机…… 15

1.1 直流电机的工作原理、基本结构、励磁方式和额定值 …… 15
1.2 直流电机的电枢绕组 …… 21
1.3 直流电机的磁场 …… 25
1.4 直流电机的感应电动势和电磁转矩 …… 28
1.5 直流电机的基本方程 …… 31
1.6 直流发电机的运行特性 …… 34
1.7 直流电动机的运行特性 …… 38
1.8 他励直流电动机的起动 …… 45
1.9 他励直流电动机的制动 …… 47
1.10 他励直流电动机的调速…… 53
本章小结…… 56
复习参考题…… 57

第2章 变压器…… 60

2.1 变压器的工作原理与结构 …… 60
2.2 变压器的空载运行 …… 63
2.3 变压器的负载运行 …… 67
2.4 变压器的参数测定 …… 70
2.5 变压器的运行特性 …… 75
2.6 三相变压器 …… 77
2.7 变压器的并联运行 …… 81
2.8 自耦变压器和仪用互感器 …… 83
本章小结…… 86
复习参考题…… 86

第3章 交流电机的共同理论…… 88

3.1 三相同步发电机与三相感应电动机的工作原理 …… 88
3.2 交流绕组 …… 90
3.3 交流绕组的感应电动势 …… 96
3.4 交流绕组的磁动势…… 102
本章小结 …… 110
复习参考题 …… 110

第4章 感应电机 …… 112

4.1 感应电机的基本结构、运行状态和额定值…… 112
4.2 感应电动机内部的电磁关系…… 115
4.3 感应电动机的等效电路…… 120
4.4 感应电动机的功率方程、电磁转矩和转矩方程…… 125
4.5 笼型转子绕组的相数和极数…… 127
4.6 感应电动机的参数测定…… 129
4.7 感应电动机的工作特性…… 130
4.8 感应电动机的机械特性…… 131
4.9 三相感应电动机的起动…… 141
4.10 三相感应电动机的制动 …… 147
4.11 三相感应电动机的调速 …… 152
本章小结 …… 161
复习参考题 …… 164

第 5 章　同步电机 …… 167

5.1　同步电机的基本结构、运行状态和额定值及励磁方式…… 167
5.2　同步发电机的磁动势和磁场…… 172
5.3　同步发电机的电压方程、相量图和等效电路…… 177
5.4　同步发电机的功率方程、电磁功率和转矩方程…… 183
5.5　同步发电机的运行特性…… 184
5.6　同步发电机与电网的并联运行…… 188
5.7　同步电动机…… 197
本章小结 …… 202
复习参考题 …… 204

附录 A　模拟试题 …… 206

A1　模拟试题一 …… 206
A2　模拟试题二 …… 207

参考文献 …… 210

原书缺页

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

原书缺页

各类电机的特点。另外，本课程以定性分析为主，亦有一定的计算工作；学习时要勤于思考，钻研教材，认真思考章节后的习题和思考题，培养分析问题和解决问题的能力。最后，本课程与工程实际联系紧密，在分析工程实际问题时，常常需要用工程的观点和方法将问题进行适当简化，找出主要矛盾，再利用基本理论来解决实际问题。

0.2.2　分析方法和步骤

虽然电机类型较多，结构和性能各异，但其基本工作原理和分析方法具有共同之处。本课程常用的分析方法有：

① 不计磁路饱和时，用叠加原理分析各个磁动势产生的磁场；

② 对空间或时间的非正弦波，用谐波分析法；

③ 交流电机稳态运行时，用等值电路和相量图，并引入折算法；

④研究凸极电机时，用双反应理论。

对各类电机分析时的具体步骤：

① 介绍电机的实物模型，即电机的基本结构；

② 介绍电机的物理模型，即通过分析从空载到负载时电机内部的磁场，了解电机内部的物理情况；

③ 建立电机的数学模型，即应用基本电磁定律，建立电机的基本方程式，包括电系统的电压方程式、能量系统的功率方程式和机械系统的转矩方程式，并导出等效电路和相量图；

④ 利用电机的数学模型，分析电机的各种运行特性，以及电动机的起动、制动和调速等实际应用。

0.3　电磁学的基本知识与基本定律

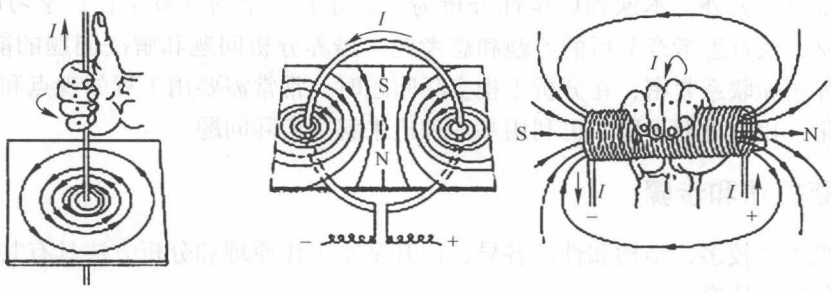
在实现机电能量转换过程中，电机必须借助磁场的媒介作用。在工程分析计算时，常将电机内的磁场的问题简化为磁路问题来处理。为了使较小的电流就能产生较强的磁场，在电机中必须采用铁磁材料作为磁路的主要部分。电机和变压器的工作原理，都是建立在电磁感应定律、电磁力定律、安培环路定律和电路定律等基本定律之上，因此有必要对这些基本知识作简要回顾，并给以适当延伸。

0.3.1　磁场和磁路分析中常用物理量

描述磁场的物理量主要有磁感应强度（或磁通密度）$\boldsymbol{B}$、磁场强度 $\boldsymbol{H}$、磁通 Φ、磁动势 F、磁阻 R_m、磁导 Λ_m、磁链 ψ 等，下面逐一介绍。

1. 磁感应强度（或磁通密度）

载流导体周围存在着磁场，描述磁场强弱和方向的物理量是磁感应强度 $\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{B}$ 是矢量。为了形象地描绘磁场，常采用磁力线。磁力线是闭合的曲线，在磁铁外部由 N 极指向 S 极；在磁铁内部，由 S 极指向 N 极。用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场分布如图 0-1 所示。



（a）载流长导线　　（b）线圈　　（c）螺线管

图 0-1　用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场分布

磁力线的方向与产生它的电流方向符合右手螺旋定则，如图 0-2 所示。磁力线上每一点的切线方向就是该点的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的方向，磁力线的疏密程度表示磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的大小，通过某点垂直于 $\boldsymbol{B}$ 的单位面积上磁力线的数量就等于该点 $\boldsymbol{B}$ 的数值。磁感应强度也称为磁通密度，单位为特斯拉（T）。

2. 磁场强度

磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 是表征磁场性质的另一个基本物理量，是矢量，其单位为安/米（A/m）。它与磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的关系为：

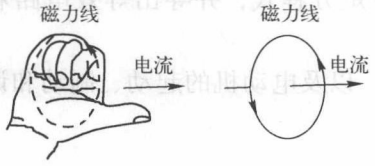


图 0-2　磁力线与电流的右手螺旋关系

$$\boldsymbol{H}=\frac{\boldsymbol{B}}{\mu} \tag{0-1}$$

式中，μ 为介质的磁导率。电机中所用的介质，主要是铁磁材料和非导磁材料。空气、铜、铝和绝缘材料等为非导磁材料，它们的磁导率可认为等于真空的磁导率 μ_0，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m。铁磁材料的磁导率远大于真空的磁导率，如铸钢的磁导率 μ 约为 μ_0 的 1 000 倍，各种硅钢片的磁导率 μ 约为 μ_0 的 6 000 ～ 7 000 倍。

3. 磁通 $\boldsymbol{\Phi}$

穿过某一截面 A 的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的通量称为磁通，用符号 $\boldsymbol{\Phi}$ 表示，即：

$$\boldsymbol{\Phi}=\int_A \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}A \tag{0-2}$$

在均匀磁场中，如果截面 A 与 $\boldsymbol{B}$ 垂直，如图 0-3 所示，则磁通 $\boldsymbol{\Phi}$ 和磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 之间的数值关系为：

$$\boldsymbol{\Phi}=BA \text{ 或 } B=\frac{\boldsymbol{\Phi}}{A} \tag{0-3}$$

因此，$\boldsymbol{B}$ 又是单位面积上的磁通，称为磁通密度，简称为磁密。在国际单位制中，磁通 $\boldsymbol{\Phi}$ 的单位为韦伯（Wb），磁通密度的单位为 T，$1\mathrm{T}=1\mathrm{Wb/m^2}$。

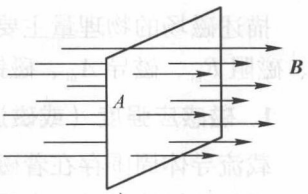


图 0-3　均匀磁场中的磁通

4. 磁动势 $\boldsymbol{F}$

线圈中通以电流就会产生磁场，若线圈的匝数为 N，电流

为 I，则线圈所产生的磁动势为：

$$F = NI \tag{0-4}$$

磁动势是产生磁通的“动力”，单位为安匝或安（A）。

5. 磁阻 R_m

磁阻类似于电路中的电阻，表示磁路对磁通所起的阻碍作用。磁阻与磁路的尺寸和磁路所用材料的导磁率有关。在磁路中取一段由磁导率为 μ 的材料构成的均匀磁路，其横截面为 A，长度为 l，如图 0-4 所示，则该段磁路的磁阻为：

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \tag{0-5}$$

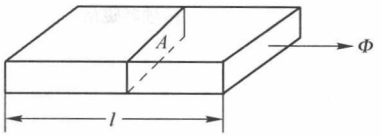


图 0-4　磁路段

磁阻 R_m 的单位为 1/亨（H^{-1}）。

空气的磁导率为常数，因此气隙的磁阻是常量；铁磁材料的 B—H 曲线是非线性的，磁导率不是常数，所以铁磁材料的磁阻不是常数，而是随着 B 的变化而变化。

6. 磁导 Λ_m

磁阻的倒数称为磁导，用 Λ_m 表示，即：

$$\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu A}{l} \tag{0-6}$$

磁导 Λ_m 的单位为亨（H）。

7. 磁链 Ψ

线圈的匝数 N 与通过线圈的磁通 Φ 的乘积，称为磁链，用 Ψ 表示，即：

$$\Psi = N\Phi \tag{0-7}$$

8. 边缘效应

当磁路中存在气隙，磁通经过气隙时，将由气隙段向外扩散，这种现象称为边缘效应，如图 0-5 所示。边缘效应增大了气隙的有效面积，在磁路计算中应加以考虑。气隙越大，边缘效应相应也越大。

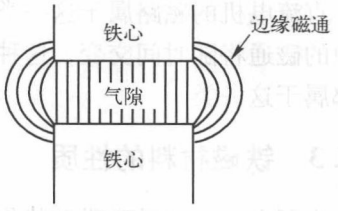
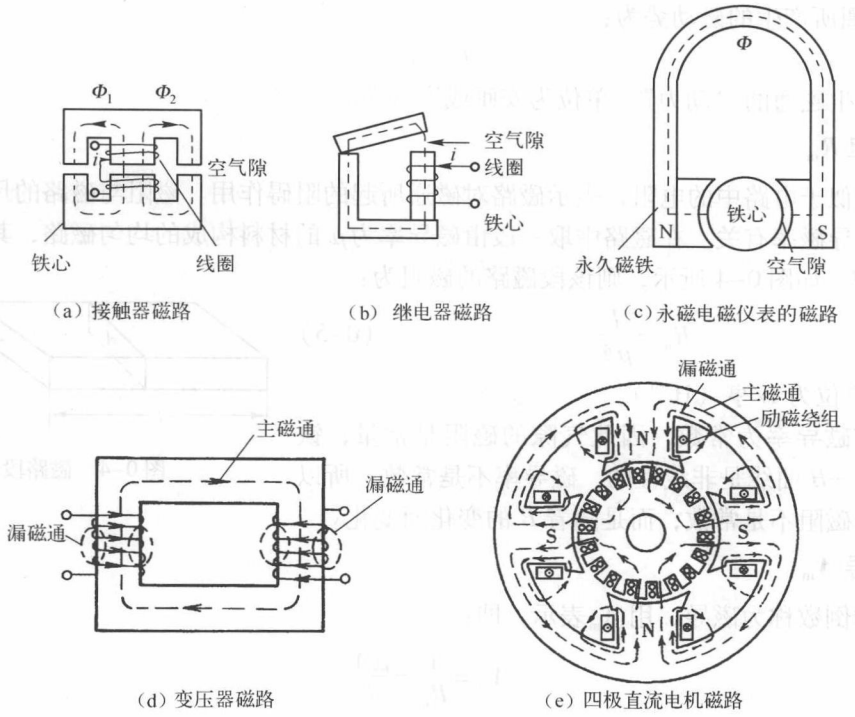


图 0-5　磁通通过气隙时的边缘效应

0.3.2　磁路的概念

磁通所通过的路径称为磁路。几种常见的磁路如图 0-6 所示，其中图（a）为接触器磁路；图（b）为继电器磁路；图（c）为永磁电磁仪表的磁路；图（d）为变压器磁路；图（e）为四极直流电机的磁路。

在电机和变压器中，常将线圈套装在铁心上。当线圈中有电流通过时，在线圈内部和周围就会产生磁场。由于铁心的磁导率比空气的磁导率高很多，即铁心的导磁性能好于空气的导磁性能，所以绝大部分磁通将在铁心内通过，这部分磁通称为主磁通；另外还有一小部分磁通经载流线圈和周围的空气闭合，这部分磁通称为漏磁通。主磁通和漏磁通所经过的路径分别构成主磁路和漏磁路，如图 0-6（d）、（e）所示。



（a）接触器磁路　（b）继电器磁路　（c）永磁电磁仪表的磁路

（d）变压器磁路　（e）四极直流电机磁路

图 0-6　几种常见的磁路

用以激励磁路中磁通的载流线圈称为励磁线圈（或励磁绕组），励磁线圈中的电流称为励磁电流。若励磁电流为直流，磁路中的磁通为恒定，不随时间变化，这种磁路称为直流磁路，直流电机的磁路属于这一类。若励磁电流为交流（常称交流励磁电流为激磁电流），磁路中的磁通将随时间交变，这种磁路称为交流磁路，交流铁心线圈、变压器和感应电机的磁路都属于这一类。

0.3.3　铁磁材料的性质

为了在一定的励磁磁动势作用下能激励较强的磁场，电机和变压器的主磁路常采用磁导率较高的铁磁材料制成。

1. 铁磁材料的磁化

铁磁材料包括铁、镍、钴等及它们的合金。铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性的现象称为铁磁材料的磁化。铁磁材料内部存在着许多很小的被称为磁畴的天然磁化区，在未放入磁场之前，这些磁畴杂乱无章地排列着，其磁效应相互抵消，对外部不呈现磁性；当铁磁材料放入外磁场后，在外磁场的作用下，磁畴的轴线将趋于一致，形成一个附加磁场，叠加在外磁场上，使合成磁场大大增强。由于磁畴所产生的附加磁场比非铁磁材料在同一磁场强度下所激励的磁场强得多，所以铁磁材料的磁导率要比非铁磁材料的磁导率大很多。电机中常用的铁磁材料，其磁导率 μ 一般为真空磁导率 μ_0 的 2 000 ～ 6 000 倍。磁化是铁磁材料的一种特性。

2. 磁化曲线和磁滞回线

铁磁材料的磁化特性可用磁化曲线和磁滞回线来表示。

1）起始磁化曲线

在非铁磁材料中，磁通密度 B 和磁场强度 H 之间呈线性关系，如图 0-7 中的虚线所示，其斜率就是 μ_0。铁磁材料的 B 和 H 之间呈非线性关系，把一块尚未磁化的铁磁材料进行磁化，当磁场强度 H 由零逐渐增大时，磁感应强度 B 将随之增大，此时的曲线 $B=f(H)$ 就称为起始磁化曲线，如图 0-7 所示的 $B=f(H)$ 曲线。

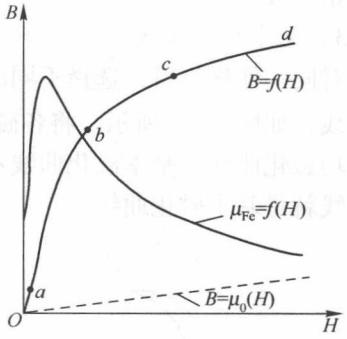


图 0-7　铁磁材料的起始磁化曲线和磁导率曲线

起始磁化曲线基本可以分为 4 段：开始磁化时，外磁场 H 较弱，磁通密度 B 增加较慢，如图中 Oa 段；随着外磁场的增强，材料内部大量磁畴开始转向，趋向于外磁场方向，此时磁通密度 B 增加较快，如图中 ab 段；若继续增大外磁场 H，由于大部分磁畴已经趋向于外磁场方向，可转向的磁畴越来越少，所以磁通密度 B 值增加得越来越慢，如图中 bc 段，这种现象称为饱和；达到饱和后，磁化曲线基本成为与非铁磁材料的 $B=\mu_0 H$ 特性相平行的直线，如图中 cd 段。磁化曲线开始拐弯的点（如图 0-7 所示中的 b 点）称为膝点。

由于铁磁材料的磁化曲线不是一条直线，所以 $\mu_{Fe}=B/H$ 也随 H 值的变化而变化，曲线 $\mu_{Fe}=f(H)$ 如图 0-7 所示。

设计电机和变压器时，为使主磁路内得到较大的磁通而又不过分增大励磁磁动势，通常把铁心内的工作磁通密度选择在膝点附近。

2）磁滞回线

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曲线 $Oabcdefa$，如图 0-8 所示。由图可见，当磁场强度 H 开始从零增加到 H_m 时，磁通密度 B 也相应从零增加到 B_m。若此时逐渐减小磁场强度 H，则磁通密度 B 将沿曲线 ab 下降。当 $H=0$ 时，B 值并不等于零，而等于 B_r。这种去掉外磁场之后，铁磁材料内仍然保留的磁通密度 B_r，称为剩余磁通密度，简称剩磁。要使磁通密度从 B_r 减小到零，必须加上相应的反向磁场，此反向磁场强度称为矫顽力，用 H_c 表示。B_r 和 H_c 是铁磁材料的两个重要参数。铁磁材料所具有的这种磁通密度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 0-8 中的曲线 $abcdefa$。

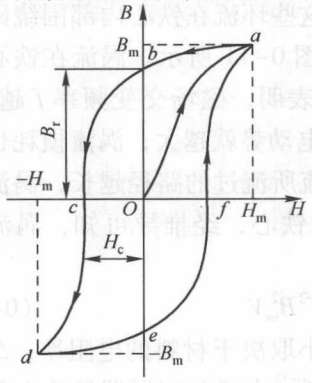


图 0-8　铁磁材料的磁滞回线

磁滞现象是铁磁材料的另一个特性。

磁滞回线窄、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小的材料，称为软磁材料，如图 0-9（a）所示。常用的软磁材料有铸铁、铸钢和硅钢片等，软磁材料的磁导率较高，故用于制造电机和变压器的铁心。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com