“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

山东省精品课程教材

电机学

ELECTRIC MACHINERY

王秀和 主编　孙雨萍 副主编

第3版

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ELECTRIC MACHINERY

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金书网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版

机工教育微信服务号

ISBN 978-7-111-61040-3

策划编辑◎于苏华 / 封面设计◎马精明

ISBN 978-7-111-61040-3
9 787111 610403 >

定价：59.80元

通高等教育本科国家级规划教材
山东省精品课程教材

电 机 学

第3版

主　编　王秀和
副主编　孙雨萍
参　编　李光友　徐衍亮
　　王建民　刘志珍
主　审　张凤阁

机械工业出版社

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、山东省精品课程教材，是高等学校电气工程类专业“电机学”课程的教学用书。全书共11章，前8章为电机的稳态分析，包括：电机的基本原理、变压器、直流电机、交流电机的共同问题、感应电机、同步电机、特殊电机、电机的发热与冷却；后3章为电机的动态分析与控制，包括：直流电机的动态分析与运动控制、感应电机的动态分析与矢量控制、同步电机的动态分析与矢量控制。

本书可作为高等学校电气工程及相关专业的教材，还可供有关科技人员参考。

本书配有电子课件等教学资源，向采用本书的授课教师免费提供，需要者可登录机工教育服务网（www. cmpedu. com）下载。

图书在版编目（CIP）数据

电机学/王秀和主编. —3版. —北京：机械工业出版社，2018. 9
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
ISBN 978-7-111-61040-3

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①王… 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（2018）第222064号

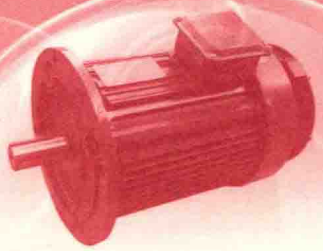
机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：于苏华 责任编辑：于苏华
责任校对：张晓蓉 封面设计：马精明
责任印制：孙 炜
保定市中画美凯印刷有限公司印刷
2019年1月第3版第1次印刷
184mm×260mm · 25印张 · 613千字
标准书号：ISBN 978-7-111-61040-3
定价：59. 80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649

网络服务
机 工 官 网：www. cmpbook. com
机 工 官 博：weibo. com/cmp1952
教育服务网：www. cmpedu. com
金 书 网：www. golden-book. com

封面无防伪标均为盗版



前言

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、山东省精品课程教材，是高等学校电气工程类专业“电机学”课程的教学用书。本书第1、2版分别于2009年、2013年出版，第3版是在第2版基础上修订而成。全书共11章，前8章为电机的稳态分析，包括：电机的基本原理、变压器、直流电机、交流电机的共同问题、感应电机、同步电机、特殊电机、电机的发热与冷却；后3章为电机的动态分析与控制，包括：直流电机的动态分析与运动控制、感应电机的动态分析与矢量控制、同步电机的动态分析与矢量控制。本书可作为高等学校电气工程及相关专业的教材，还可供有关科技人员参考。

为便于读者自主学习和复习，本书每章附有习题，扫描二维码可查看习题解答。

本书由山东大学王秀和教授、孙雨萍教授、王建民教授、李光友教授、徐衍亮教授和刘志珍教授共同编写。王秀和任主编，孙雨萍任副主编。王秀和编写了第1、7、8章，孙雨萍编写了第4、5章，王建民编写了第9、10、11章，李光友编写了第6章，徐衍亮编写了第2章，刘志珍编写了第3章。

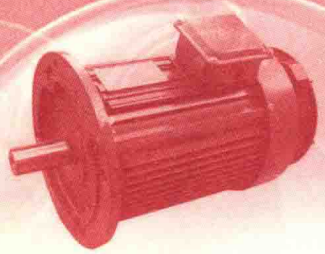
本书由沈阳工业大学张凤阁教授主审。张凤阁教授对本书提出了许多宝贵意见，编者对此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，得到了山东大学电机电器研究所各位老师的大力支持和帮助，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编　者

于山东大学



目录

前　言

第1篇　电机的稳态分析

第1章　电机的基本原理 …… 2
1.1　概述 …… 2
1.2　磁场与磁路 …… 3
1.3　铁磁材料的特性 …… 9
1.4　电感和磁场储能 …… 15
1.5　机电能量转换的基本原理 …… 17
习题 …… 22

第2章　变压器 …… 25
2.1　变压器的基本工作原理和结构 …… 25
2.2　变压器的空载运行 …… 27
2.3　变压器的负载运行 …… 32
2.4　变压器等效电路参数的测定 …… 40
2.5　标幺值 …… 44
2.6　三相变压器的磁路系统与联结组 …… 46
2.7　变压器的运行特性 …… 53
2.8　变压器的并联运行 …… 57
2.9　特殊变压器 …… 60
2.10　三相变压器的不对称运行 …… 66
习题 …… 71

第3章　直流电机 …… 74
3.1　直流电机的工作原理、结构和额定值 …… 74
3.2　直流电机的电枢绕组 …… 78
3.3　直流电机的磁场 …… 84
3.4　直流电机的感应电动势和电磁转矩 …… 88
3.5　直流发电机的基本方程与运行特性 …… 90
3.6　直流电动机的基本方程与运行特性 …… 95
3.7　直流电动机的起动和调速 …… 101
3.8　直流电机的换向 …… 105
3.9　特殊直流电机 …… 108
习题 …… 113

第4章　交流电机的共同问题 …… 116
4.1　交流绕组的基本概念 …… 116
4.2　三相双层绕组 …… 117
*4.3　三相单层绕组 …… 123
4.4　正弦磁场下交流绕组的感应电动势 …… 125

4.5 感应电动势中的谐波及其削弱方法 …… 130
4.6 正弦电流下单相绕组的磁动势 …… 134
4.7 正弦电流下对称三相绕组的旋转磁动势 …… 140
4.8 非正弦电流下交流绕组的磁动势 …… 146
习题 …… 146

第5章 感应电机 …… 148
5.1 感应电机的结构 …… 148
5.2 感应电机的工作原理和运行状态 …… 150
5.3 三相感应电动机的磁动势和磁场 …… 153
5.4 三相感应电动机的基本方程、相量图和等效电路 …… 157
5.5 三相感应电动机的参数测定 …… 164
5.6 笼型转子参数的计算 …… 166
5.7 感应电动机的功率关系、功率方程和转矩方程 …… 169
5.8 感应电动机的电磁转矩及机械特性 …… 171
5.9 感应电动机的工作特性及其计算 …… 174
5.10 感应电动机的起动及深槽和双笼电机 …… 178
5.11 感应电动机的调速 …… 184
5.12 特殊感应电动机 …… 188
5.13 感应电动机在不对称电压下的运行分析 …… 193
习题 …… 195

第6章 同步电机 …… 197
6.1 同步电机的基本结构和运行状态 …… 197
6.2 同步发电机的空载磁场和电枢反应 …… 202
6.3 隐极同步发电机的电压方程、相量图和等效电路 …… 206
6.4 凸极同步发电机的电压方程和相量图 …… 209
6.5 同步发电机的功率方程、转矩方程和功角特性 …… 213
6.6 同步发电机参数的测定 …… 217
6.7 同步发电机的运行特性 …… 223
6.8 同步发电机与电网的并联运行 …… 227
6.9 同步电动机与同步补偿机 …… 235
6.10 同步发电机的不对称运行 …… 243
6.11 同步发电机的三相突然短路 …… 248
6.12 永磁同步电机 …… 256
习题 …… 259

第7章 特殊电机 …… 262
7.1 步进电动机 …… 262
7.2 开关磁阻电机 …… 267
7.3 力矩电机 …… 269
7.4 磁滞电动机 …… 270
7.5 超导电机 …… 273
7.6 超声波电机 …… 275
习题 …… 278

第8章 电机的发热与冷却 …… 279
8.1 电机的发热与温升 …… 279
8.2 电机的散热 …… 282
8.3 电机的工作制、定额与额定容量 …… 284
8.4 电机的冷却 …… 286
习题 …… 289

第2篇 电机的动态分析与控制

第9章 直流电机的动态分析与运动控制 …… 294
9.1 直流电机的动态方程 …… 294
9.2 他励直流电动机的框图和传递函数 …… 295
9.3 他励直流电动机起动过程的分析 …… 298

9.4 直流电动机的运动控制 …… 300
习题 …… 313

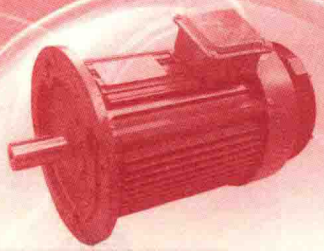
第 10 章 感应电机的动态分析与矢量控制 …… 314
10.1 三相坐标系中感应电机的动态方程 …… 314
10.2 坐标变换与空间矢量 …… 319
10.3 两相坐标系中感应电机的动态数学模型 …… 331
10.4 三相感应电动机起动过程的动态分析 …… 340
10.5 感应电动机的矢量控制 …… 344
习题 …… 355

第 11 章 同步电机的动态分析与矢量控制 …… 356
11.1 同步电机的动态数学模型 …… 356
11.2 同步电机的运算电抗和等效电路 …… 368
11.3 同步发电机三相突然短路的数学分析 …… 373
11.4 可控励磁同步电动机的矢量控制 …… 378
11.5 正弦波永磁同步电动机的矢量控制 …… 382
习题 …… 388

参考文献 …… 390

第1篇

电机的稳态分析



第1章 电机的基本原理

电机是根据电磁感应原理实现机电能量转换的电磁装置。作为能量转换媒介的磁场，其大小和分布直接关系到电机的性能、参数和经济性，磁场的分析和计算是电机性能分析的基础。由于电机内磁场分布复杂且存在铁磁材料，为便于分析，通常将磁场问题简化为磁路问题。

本章首先介绍电机的分类及其在国民经济中的作用，然后介绍磁路的概念和铁磁材料的特性，研究电感和磁场储能，最后介绍机电能量转换的基本原理。

1.1 概述

1. 电机在国民经济中的重要作用

在现代社会中，电能的应用非常广泛。与其他形式的能量相比，电能具有大量生产、来源广泛、集中管理、便于输送、使用方便等优点。电机是一种与电能密切相关的能量转换装置，可以实现电能和机械能、电能和电能之间的转换，在电力工业、工农业生产、交通运输、国防和日常生活中得到了广泛应用。

自然界里存在各种形式的能量，可以通过一定的方式释放出来，通过特定装置转换为机械能并驱动发电机运动，产生电能。在水电站，水流驱动水轮机，带动发电机旋转，产生电能；在火电厂，通过燃料的燃烧将水加热，产生高温高压蒸汽，驱动汽轮机旋转，将热能转换为机械能，带动发电机旋转，将机械能转换为电能。

大多数发电厂通常设在资源丰富的地区，往往地处偏僻，发出的电能需要远距离输送到电能大量使用的地区。为降低传输过程中的电能损失，通常采用高压输电，用变压器将发电机产生的电压升高，经过高压电力网传输到用户端，再用变压器将高电压降低到适于用户使用的电压等级。

在用户端，利用电能驱动电动机工作，带动生产机械，实现电能向机械能的转换。工业企业需要大量的电动机用作风机、泵、压缩机、纺织机、轧钢机、机床等的动力源；在农业生产中，随着农业生产技术的不断发展，电机的应用也日益广泛，农田灌溉、农产品加工、农业机械等都离不开电机；在国防工业中，电机用作武器装备的动力和电源，如装甲车辆上的电动机和发电机；在交通运输中，汽车、牵引机车、飞机、电动车辆等，都离不开电机，一台高级轿车上的电机就有几十台；电机在日常生活中的应用也非常广泛，如空调、电风扇、冰箱、录音机、洗衣机、食品加工机、吸尘器等。

随着自动化程度的不断提高，需要众多的精密控制电机作为自动控制系统的重要元件，

为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

在系统中起调节、放大和控制作用。

2. 电机的基本构成和分类

电机是基于电磁感应定律实现能量转换的装置。要实现能量转换，必须有一个闭合磁路产生磁场，磁场与两个或两个以上的电路耦合。电机中的能量转换，就是通过有关电路中磁链的变化来实现的。最常见的电机是旋转电机，它产生旋转运动，有一静止部分（称为定子）和一旋转部分（称为转子），两者之间有一空气隙。

电机的种类多种多样，下面介绍其分类情况。

1）按照能量转换方式的不同，电机可分为

电动机——将电能转换为机械能；

发电机——将机械能转换为电能；

电能转换装置——将一种形式的电能转换为另一种形式的电能，包括**变压器**（输入和输出的电压不同）、**变频机**（输入和输出的频率不同）、**变流机**（输入和输出的波形不同，将直流变为交流）和**移相器**（输入和输出的相位不同）；

控制电机——不以功率转换为主要职能，在电气、机械系统中起调节、放大和控制作用。

2）根据运动方式的不同，可将电机分为

旋转电机——产生旋转运动；

静止电机——不产生运动；

直线电机——产生直线运动。

3）根据供电电源的不同，电机可分为

直流电机——使用或产生直流电；

交流电机——使用或产生交流电。

在交流电机中，根据供电电源相数的不同，又可将电机分为单相电机和三相电机等。

4）根据同步速度的不同，电机可分为

没有固定的同步速度的电机——直流电机；

静止设备——变压器；

转速等于同步速度的电机——同步电机；

作为电动机运行时，速度总低于同步速度，作为发电机运行时，速度大于同步速度——感应电机；

速度可以从同步速度以下调至同步速度以上——交流换向器电机。

1.2 磁场与磁路

1.2.1 与磁场有关的基本概念

1. 磁感应强度、磁场强度和磁导率

磁场是由电流（运动电荷）或永磁体在其周围空间产生的一种特殊形态的物质，可用磁感应强度和磁场强度来表征其大小和方向。

磁感应强度定义为通以单位电流的单位长度导体在磁场中所受的力，是一个矢量，用 $\boldsymbol{B}$ 表示，单位为特斯拉（T），也称为磁通密度，或简称磁密。磁场强度也是一个矢量，用 $\boldsymbol{H}$

表示，单位为安每米（A/m），与磁感应强度之间满足

$$B = \mu H \tag{1-1}$$

式中，μ 为**磁导率**，决定于磁场所在点的材料特性，单位为亨每米（H/m）。

根据材料的导磁性能，可将其分为铁磁材料和非铁磁材料。铁磁材料包括铁、镍、钴以及它们的合金，除铁磁材料之外的材料为非铁磁材料。非铁磁材料的磁导率可认为与真空的磁导率 μ_0 相同，为 $4\pi \times 10^{-7}$H/m。铁磁材料的磁导率是非铁磁材料磁导率的几十倍至数千倍，随着材料的种类和其所处位置的磁场强度的变化而变化，不是常数。由于磁导率变化范围很大，常采用**相对磁导率** μ_r 来表征材料的导磁性能，μ_r 为材料的磁导率与真空磁导率的比值，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{1-2}$$

2. 磁通与磁通连续性定理

磁通是通过磁场中某一面积 A 的磁力线数，用 Φ 表示，单位为韦伯（Wb）。定义为

$$\Phi = \int_A B \mathrm{d}A \tag{1-3}$$

在图 1-1 所示的均匀磁场中，穿过面积 A 的磁通为

$$\Phi = BA\cos\theta \tag{1-4}$$

式中，θ 为面积 A 的法线方向与 B 之间的夹角。

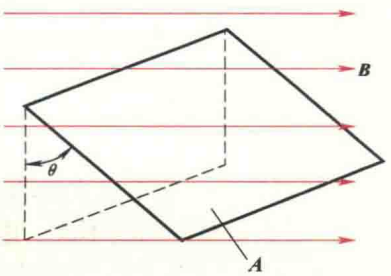


图 1-1 磁通

由于磁力线是闭合的，对于任何一个闭合曲面，进入该闭合曲面的磁力线数应等于穿出该闭合曲面的磁力线数。若规定磁力线从曲面穿出为正、进入为负，则通过闭合曲面的磁通恒为零，称为**磁通连续性定理**。

3. 磁动势和安培环路定律

磁场强度沿一路径 l 的线积分定义为该路径上的**磁压降**，也称为**磁压**，用符号 U 表示，单位为安（A），即

$$U = \int_l H \mathrm{d}l \tag{1-5}$$

磁场强度沿任一闭合路径的线积分等于该路径所包围的电流的代数和，即

$$\oint_l H \mathrm{d}l = \sum_{i=1}^{k} I_i \tag{1-6}$$

称为**安培环路定律**，如图 1-2 所示，电流的正方向与积分路径的方向之间符合右手螺旋关系。

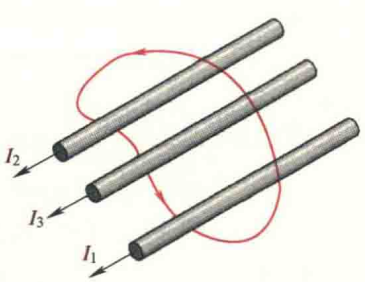


图 1-2 安培环路定律

由于磁场为电流所激发，式（1-6）中闭合路径所包围的电流数称为**磁动势**，用 F 表示，单位为安（A）。通常称磁路的磁压为该磁路所需的磁动势，隐去了磁压这一概念。

4. 磁链与电磁感应定律

处于磁场中的一个 N 匝线圈，若其各匝通过的磁通 Φ 都相同，则经过该线圈的**磁链** Ψ 为

$$\Psi = N\Phi \tag{1-7}$$

当线圈中的磁链发生变化时，线圈中将产生电动势，称为**感应电动势**。感应电动势的大小与磁链的变化率成正比；感应电动势的方向倾向于产生一电流，若该电流能流通，所产生的磁场将阻止线圈磁链的变化。若电动势、电流和磁通的正方向如图 1-3 所示，即电流正方向与磁通正方向符合右手螺旋关系，正电动势产生正电流，则感应电动势可表示为

$$e = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t} \tag{1-8}$$

式中，e 为感应电动势，单位为伏（V）。

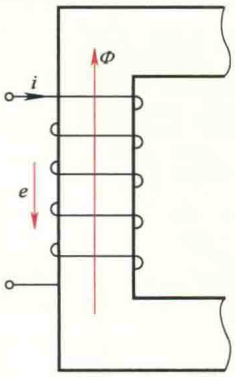


图 1-3　电动势、电流和磁通的正方向

式（1-8）称为**电磁感应定律**。

若磁场由交流电流产生，则磁通随时间变化，所产生的电动势称为**变压器电动势**。若磁场是恒定的，但线圈与磁场之间有相对运动，也会引起线圈磁链的变化，所产生的电动势称为**运动电动势**。运动电动势的大小可用另一种形式表示，即

$$e = Blv \tag{1-9}$$

式中，l 为导体在磁场中的长度，单位为米（m）；v 为导体与磁场之间的相对速度，单位为米每秒（m/s）。e、B、v 这三者之间互相垂直，电动势的方向用右手定则确定，如图 1-4 所示。

5. 电磁力与电磁转矩

若将一导体置于磁场中，导体中通以电流 i，则其将受到电磁力作用，**电磁力** F 的单位为牛（N），大小可表示为

$$F = Bil \tag{1-10}$$

电磁力的方向可用左手定则确定，即将左手伸开，使磁力线指向手心，拇指在手掌平面中与其他四指成 90°角，其他四指指向电流的方向，则拇指所指方向就是电磁力的方向，如图 1-5 所示。

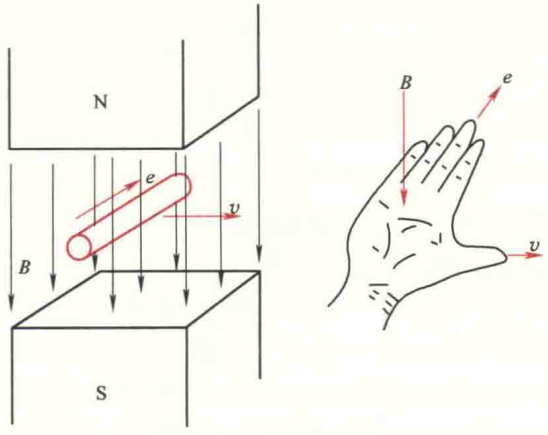


图 1-4　右手定则

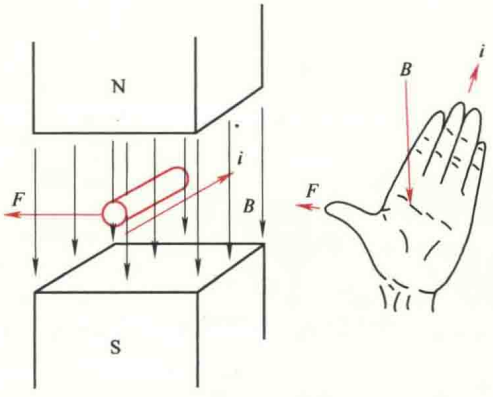


图 1-5　左手定则

在旋转电机中，假设载流导体位于转子上，则其所受的电磁力乘以导体与旋转轴中心线之间的距离 r（通常为转子半径），就是**电磁转矩** T，单位为牛米（N·m）。即

$$T = Bilr \tag{1-11}$$

1.2.2 磁路及其基本定理

麦克斯韦方程是描述电磁现象的普遍适用方程，但由于电机结构复杂且包含多种导磁性能不同的材料，难以直接利用麦克斯韦方程得到磁场的分布。在电机中，通常把复杂的三维磁场问题的求解简化为相应磁路的计算，在绝大多数情况下可以满足工程精度的要求。下面介绍与磁路有关的基本概念和基本定理。

1. 磁路

所谓**磁路**，就是磁通流过的路径。磁路的基本组成部分是磁动势源和磁通流过的物体，磁动势源为永磁体或通电线圈。图 1-6a 所示为带铁心的电抗器，由铁心和环绕其上的通电线圈组成，线圈匝数为 N，电流为 i，铁心的截面积均匀（为 A），铁心内磁力线的平均长度为 L，假设磁通经过该铁心的所有截面且在截面上均匀分布，该磁路上的磁通和磁动势分别为

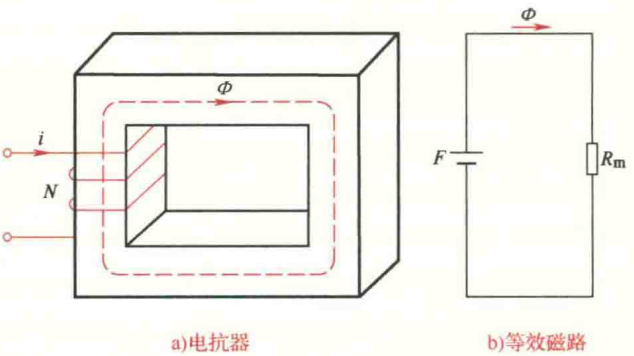


图 1-6 带铁心的电抗器及其等效磁路

$$\left.\begin{aligned} \Phi &= BA \\ F &= Ni = HL \end{aligned}\right\} \tag{1-12}$$

将磁通和磁动势的关系与电路中电流和电压的关系类比，定义

$$R_m = \frac{F}{\Phi} \tag{1-13}$$

为该段磁路的**磁阻**，单位为安每韦（A/Wb）。式（1-13）表征了磁通、磁动势和磁阻之间的关系，称为**磁路的欧姆定律**。因此，可将图 1-6a 的实际磁路简化为图 1-6b 所示的等效磁路。

将式（1-12）代入式（1-13），可得

$$R_m = \frac{HL}{BA} = \frac{L}{\mu A} \tag{1-14}$$

可以看出，磁阻与磁路长度成正比，与材料的磁导率和磁路截面积成反比。

磁阻的倒数称为**磁导**，用符号 Λ 表示，单位为韦每安（Wb/A），即

$$\Lambda = \frac{\mu A}{L} \tag{1-15}$$

可以看出，磁路方程与电路方程在形式上非常相似，其类比关系如表 1-1 所示。需要指出的是，**电路和磁路虽然形式上相同，但在物理上有如下本质的区别：**

1）电路中的电流是运动电荷产生的，是实际存在的，而磁路中的磁通仅仅是描述磁现象的一种手段。

2）电路中通过电流要产生损耗，但当铁心中的磁通不变时不产生损耗。

3）在温度一定的前提下，导体的电阻率是恒定的，而导磁材料的磁导率随其中磁场的变化而变化。

4）导体和非导体的电导率之比可达 10^{16}，电流沿导体流动；而常用铁磁材料的相对磁导率通常为 $10^3 \sim 10^5$，磁场不只在铁磁材料中存在，在非铁磁材料中也存在。

表 1-1　磁路方程与电路方程的类比关系

磁　路	单　位	电　路	单　位
磁动势 F	A	电压 U	V
磁通 Φ	Wb	电流 I	A
磁阻 $R_m = \dfrac{L}{\mu A}$	A/Wb	电阻 $R = \rho \dfrac{L}{A}$	Ω
磁导 $\Lambda = \dfrac{1}{R_m}$	Wb/A	电导 $G = \dfrac{1}{R}$	S
磁路方程 $F = \Phi R_m$	A	电路方程 $U = IR$	V
磁通密度 $B = \dfrac{\Phi}{A}$	T	电流密度 $J = \dfrac{I}{A}$	A/m^2

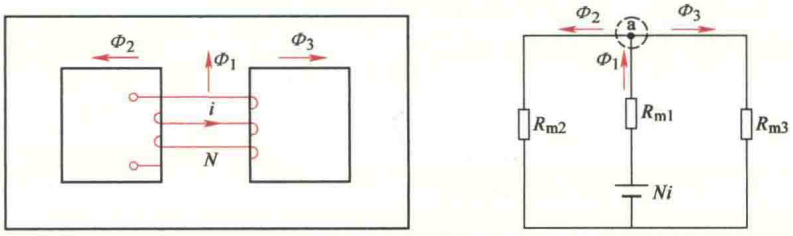
2. 磁路的基本定理

在进行磁路的分析与计算时，除了上面提到的磁路的欧姆定律、安培环路定律和磁通连续性定理外，还要用到以下定理。

（1）磁路的基尔霍夫第一定律

图 1-7 所示为一相通电的三相变压器及其等效磁路。对于图 1-7b 中的节点 a，在其周围取一闭合面，根据磁通连续性定理，流入该闭合面的磁通的代数和恒等于零，即

$$\sum \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0 \tag{1-16}$$



a)三相变压器　　b)等效磁路

图 1-7　一相通电的三相变压器及其等效磁路

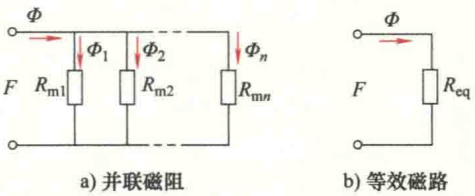
式（1-16）称为**磁路的基尔霍夫第一定律**，是磁通连续性定理在等效磁路中的具体体现。

从图 1-7b 可以看出，磁阻 R_{m2}、R_{m3} 上的磁压降相同，流过的不是同一磁通，二者之间的连接方式为**并联**。

若磁路中有 n 个磁阻 R_{m1}，R_{m2}，…，R_{mn} 并联，如图 1-8a 所示，则可将该磁路等效为图 1-8b 所示的简单磁路。等效的前提是：两个磁路流过相同的磁通 Φ，且磁压降 F 保持不变。根据磁路的基尔霍夫第一定律，有

$$\Phi = \frac{F}{R_{m1}} + \frac{F}{R_{m2}} + \cdots + \frac{F}{R_{mn}} = \frac{F}{R_{eq}} \tag{1-17}$$

则等效磁阻为



a) 并联磁阻　　b) 等效磁路

图 1-8　并联磁阻的等效

$$R_{eq}=\frac{1}{\frac{1}{R_{m1}}+\frac{1}{R_{m2}}+\cdots+\frac{1}{R_{mn}}} \tag{1-18}$$

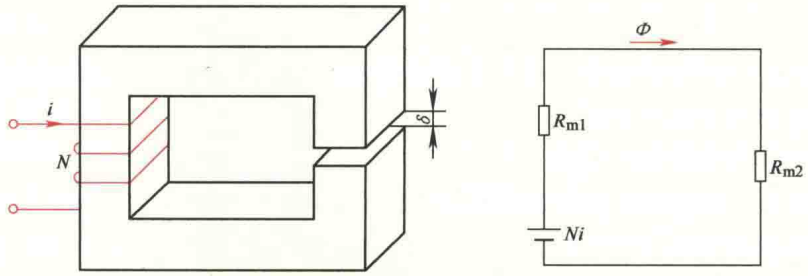
（2）磁路的基尔霍夫第二定律

图 1-9a 所示为一带开口铁心的电抗器，磁路中含有通电线圈、铁心和气隙。线圈匝数为 N，流过的电流为 i，取一条通过电抗器铁心和气隙中心线的闭合路径，根据安培环路定律，有

$$Ni = H_1 l_1 + H_\delta \delta \tag{1-19}$$

式中，H_1 和 H_δ 分别为铁心和气隙中的磁场强度；l_1 为铁心部分的磁路长度；δ 为气隙长度。铁心和气隙分别用等效磁阻 R_{m1} 和 R_{m2} 等效，F 为励磁线圈的磁动势，$F=Ni$，则其等效磁路如图 1-9b 所示。整理式（1-19），有

$$F = \Phi R_{m1} + \Phi R_{m2} \tag{1-20}$$



a)带开口铁心的电抗器　　b)等效磁路

图 1-9　带开口铁心的电抗器及其等效磁路

任何闭合磁路上的总磁动势等于组成该磁路的各磁阻上的磁压降之和，称为**磁路的基尔霍夫第二定律**，是安培环路定律在等效磁路中的具体体现。

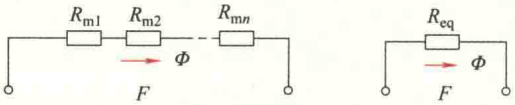
从图 1-9b 可以看出，磁阻 R_{m1}、R_{m2} 上的流过的磁通相同，且顺序连接，二者之间的连接方式为**串联**。

若磁路中有 n 个磁阻 R_{m1}，R_{m2}，…，R_{mn} 串联，如图 1-10a 所示，则可将该磁路等效为图 1-10b 所示的简单磁路。等效的前提与并联磁路的等效相同。根据磁路的基尔霍夫第二定律，有

$$F=\Phi(R_{m1}+R_{m2}+\cdots+R_{mn})=\Phi R_{eq} \tag{1-21}$$

则等效磁阻为

$$R_{eq}=R_{m1}+R_{m2}+\cdots+R_{mn} \tag{1-22}$$



a) 串联磁阻　　b) 等效磁路

图 1-10　串联磁阻的等效

[例 1-1]　有一铁心，其尺寸如图 1-11 所示，铁心的厚度为 0.1m，相对磁导率为 2000，上面绕有 1000 匝的线圈。当线圈内通以 0.8A 的电流时，能产生多大磁通？

解：用磁路的欧姆定律求解。

取通过铁心中心线的路径为平均磁路。铁心的上、下、左 3 边宽度相同，可取为磁路 1，右边取为磁路 2。

磁路 1 的平均长度 $l_1 = 1.3\text{m}$，截面积 $A_1 = 0.15\text{m} \times 0.1\text{m} = 0.015\text{m}^2$，则磁路 1 的磁阻为

$$R_{m1} = \frac{l_1}{\mu A_1} = \frac{1.3}{2000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.015}\text{A/Wb} = 34483.6\text{A/Wb}$$

磁路 2 的平均长度 $l_2 = 0.45\text{m}$，截面积 $A_2 = 0.1\text{m} \times 0.1\text{m} = 0.01\text{m}^2$，则磁路 2 的磁阻为

$$R_{m2} = \frac{l_2}{\mu A_2} = \frac{0.45}{2000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.01}\text{A/Wb} = 17904.9\text{A/Wb}$$

磁路的总磁阻为

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} = (34483.6 + 17904.9)\text{A/Wb} = 52388.5\text{A/Wb}$$

线圈的磁动势为

$$F = Ni = 1000 \times 0.8\text{A} = 800\text{A}$$

则产生的磁通为

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{800}{52388.5}\text{Wb} = 1.53 \times 10^{-2}\text{Wb}$$

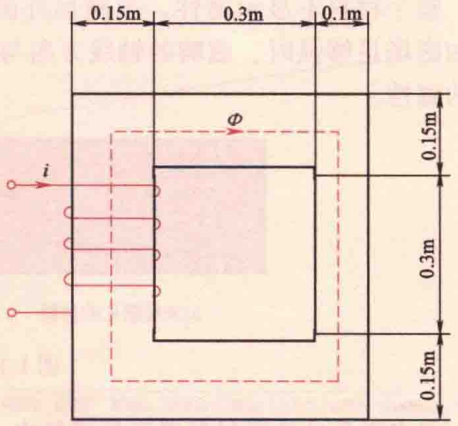


图 1-11　例 1-1 的铁心

1.3　铁磁材料的特性

铁磁材料包括：铁、镍、钴及它们的合金，某些稀土元素的合金和化合物，铬和锰的一些合金等。其特点是：将其放入磁场后，磁场会显著增强。下面介绍铁磁材料的特性。

1.3.1　铁磁材料的磁化曲线

铁磁材料的**磁化曲线**是磁通密度和磁场强度之间的关系 $B = f(H)$，是铁磁材料最基本的特性曲线。对于非铁磁材料，其磁导率接近于真空的磁导率 μ_0，磁化曲线为一直线 $B = \mu_0 H$。对于铁磁材料，由于磁导率随磁场强度的变化而变化，且存在磁滞现象，磁化曲线比较复杂。下面详细讨论。

1. 初始磁化曲线

初始磁化曲线是指将未经磁化的铁磁材料放入磁场中，磁场强度从零开始逐渐增大而得到的 $B = f(H)$ 曲线。典型的铁磁材料初始磁化曲线如图 1-12 所示。

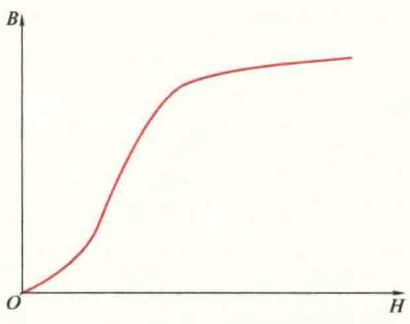


图 1-12　铁磁材料的初始磁化曲线

在无外加磁场时，铁磁材料就已经达到一定程度的磁化，称为自发磁化。自发磁化是分成许多小区域进行的，这些小区域称为磁畴。一个磁畴的体积大约为 10^{-15}m^3，每个磁畴内大约有 10^{15} 个原子，磁畴可用永磁体表示。未经磁化的铁磁材料中，各磁畴自发磁化的取向是杂乱的，磁效应相互抵消，如图 1-13a 所

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com