



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机及拖动基础

刘景林 罗 玲 付朝阳 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机及拖动基础

刘景林 罗 玲 付朝阳 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

电机及拖动基础是把“电机学”和“电力拖动”两门专业课程有机地结合为一体的教材。本书主要内容包括：绪论，电力拖动系统动力学，直流电机，直流电机的启动调速及四象限运行，变压器，交流电机电枢绕组的电动势与磁动势，异步电动机，异步电动机的各种运行方式分析，同步电机，现代交流电机调速技术，微特电机，电动机的选择等。

本书适合于普通高等学校的电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程及其自动化、机电一体化等专业作为教材使用，也可供有关科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机及拖动基础/刘景林, 罗玲, 付朝阳编著. —北京:
化学工业出版社, 2011. 6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-11159-3

I. 电… II. ①刘…②罗…③付… III. ①电机-高等学校-教材②电力拖动-高等学校-教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 076163 号

责任编辑: 唐旭华
责任校对: 郑捷

文字编辑: 余纪军
装帧设计: 韩飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 462 千字 2011 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

为适应高等院校电类专业人才培养目标,本书将“电机学”与“电力拖动”两门课程的主要内容系统地有机地融为一体,以满足教学改革、科技进步和人才培养的需要。

本书包含了上述两门课程的主要内容,兼顾了不同专业和不同深度的教学要求,根据不同的教学内容选用。

“电机及拖动基础”是电气类专业学时最长的专业理论课程,也是后续其他专业课程的基础。

本书具有以下特点:

(1) 本书总体结构上体现了本领域知识的系统性和完整性。

(2) 本书力图反映本领域的新科技。书中对近年来不断发展的交流电机调速技术进行了介绍,对引起广泛关注和应用最为广泛的矢量控制技术和直接转矩控制技术进行了较为详尽的分析。

(3) 微特电机在各种电力拖动系统和自动控制系统中发挥着越来越重要的作用,应用也越来越广泛,本书对各种类型的微特电机进行了较为系统的论述。

(4) 本书除了对电动机的相关内容进行系统的阐述之外,对发电机相关内容的介绍也有所加强,从而拓宽了知识的广度和适应性。

(5) 本书用简练和通俗易懂的语言对基本概念和原理进行了讲解和阐述,并借助丰富的图形辅助,力求言简意赅,深入浅出,富有启发性。

(6) 为了有助于对内容的理解、掌握和复习,本书提供了较多的典型例题和丰富的习题。

本书共有十二章,分别是:第一章绪论,第二章电力拖动系统动力学,第三章直流电机,第四章直流电机的启动调速及四象限运行,第五章变压器,第六章交流电机电枢绕组的电动势与磁动势,第七章异步电动机,第八章异步电动机的各种运行方式分析,第九章同步电机,第十章现代交流电机调速技术,第十一章微特电机,第十二章电动机的选择等。

本书第一章和第十二章由付朝阳老师编写;第二章、第五章和第六章由罗玲教授编写;第三章、第四章、第七章、第八章、第九章、第十章和第十一章由刘景林教授编写。本书由刘景林担任主编,并负责全书的规划及统稿工作。

本书相关电子教案可免费提供给采用本书作为教材的院校使用,如有需要请登录教学资源网(www.cip.edu.com.cn)。

本书得到了化学工业出版社、西北工业大学教务处的的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,欢迎批评指正。

作者

2010年12月于西北工业大学

目 录

第一章 绪论	1
第一节 课程内容简介	1
第二节 基本电磁定律	1
第三节 铁磁材料特性	3
第四节 磁路基本定律及计算方法	5
第二章 电力拖动系统动力学	11
第一节 单轴电力拖动系统	11
第二节 多轴电力拖动系统	12
第三节 电力拖动系统稳定运行的条件	17
习题	18
第三章 直流电机	20
第一节 直流电机的基本工作原理	20
第二节 直流电机的电枢绕组	24
第三节 直流电机的空载磁场	30
第四节 直流电机的电枢磁场	33
第五节 电枢电动势与电磁转矩	36
第六节 直流发电机工作原理	38
第七节 直流电动机工作原理	43
第八节 直流电动机的机械特性	45
第九节 串励和复励直流电动机	48
第十节 直流电机的换向	49
习题	53
第四章 直流电机的启动调速及四象限运行	55
第一节 直流电动机的启动	55
第二节 直流电动机的调速	56
第三节 直流电动机的四象限运行	63
第四节 电力拖动系统的过渡过程	66
习题	70
第五章 变压器	74
第一节 变压器的分类、基本结构及额定值	74
第二节 变压器的空载运行	76
第三节 变压器的负载运行	80
第四节 标么值	85
第五节 变压器参数的测定	86
第六节 变压器的运行特性	89
第七节 变压器的联结组别	92
第八节 变压器的并联运行	96
第九节 自耦变压器	99
第十节 电流互感器和电压互感器	101

习题	102
第六章 交流电机电枢绕组的电动势与磁动势	106
第一节 交流电机电枢绕组电动势	106
第二节 交流电机电枢绕组	111
第三节 单相绕组产生的磁动势	116
第四节 交流电机电枢绕组产生的磁动势	123
习题	127
第七章 异步电动机	129
第一节 异步电动机结构与工作原理	129
第二节 转子绕组开路的三相异步电动机	132
第三节 转子堵转的三相异步电动机	134
第四节 转子旋转的三相异步电动机	139
第五节 三相异步电动机的功率与转矩	143
第六节 三相异步电动机的机械特性	146
第七节 三相异步电动机的工作特性	151
第八节 三相异步电动机参数的测定	152
习题	153
第八章 异步电动机的各种运行方式分析	157
第一节 三相异步电动机的启动	157
第二节 高启动转矩的三相笼形异步电动机	161
第三节 绕线转子异步电动机的启动	163
第四节 三相异步电动机的制动	164
第五节 三相异步电动机的调速	169
习题	177
第九章 同步电机	181
第一节 概述	181
第二节 同步电机的双反应原理	182
第三节 同步电动机电压平衡方程式及相量图	184
第四节 同步电动机的功角特性	185
第五节 同步电动机的无功功率调节	188
第六节 同步电动机的启动	190
第七节 同步发电机原理	190
第八节 同步发电机的运行特性	193
第九节 同步发电机的并联运行	196
习题	198
第十章 现代交流电机调速技术	200
第一节 矢量控制技术	200
第二节 直接转矩控制	213
第三节 绕线转子异步电动机双馈调速及串级调速	223
习题	230
第十一章 微特电机	231
第一节 伺服电动机	231
第二节 力矩电动机	235
第三节 直流测速发电机	236

第四节	交流异步测速发电机	238
第五节	自整角机	240
第六节	旋转变压器	244
第七节	无刷直流电动机	248
第八节	步进电动机	256
第九节	小功率同步电动机	262
第十节	单相异步电动机	266
	习题	270
第十二章	电动机的选择	272
第一节	电动机的发热与冷却	272
第二节	电动机的工作制与额定功率	274
第三节	电动机额定功率的选择	276
	习题	280
参考文献		282

第一章 绪 论

第一节 课程内容简介

电机及拖动基础是把“电机学”和“电力拖动”两门专业课程有机地结合为一门课程的教材。

电能是现代能源的主要形式，易于转换、传输、分配和控制。电能的产生是由发电机完成的，发电机把从原动机输入的机械能转换为电能。而电能的生产集中在距离城市较远的发电厂进行，然后进行输送。为了减少长途输电过程中的电能损失，均采用高电压输电，到达目的地后再降压供给用户使用。电压的升高和降低都是由变压器完成的。电能转换为机械能主要由电动机完成，电动机拖动生产机械运转称为电力拖动。在现代生产中多数生产机械都采用电力拖动，各种生产机械包括：各种机床、轧钢机械、矿山机械、纺织机械、印刷机械、造纸机械、化工机械、石化机械、起重机械、电力机车、风机、水泵、电动工具、自动控制系统、家用电器等。在电力拖动中，大量应用各种类型的电动机。

为适应高等院校电气类专业宽口径的人才培养目标，本书将电机学及电力拖动的主要内容有机地相结合，从教材内容、课程重点及论述方法等方面强调基本理论，突出实用性。

“电机及拖动基础”是电气类专业最主要的专业理论课程，也是其他专业课程的基础。

第二节 基本电磁定律

基本电磁定律是各种电机运行原理的基础。

一、全电流定律（安培环路定律）

磁场和电流之间有着内在的联系，磁场是由电流的激励而产生的，即磁场与产生该磁场的电流同时存在。全电流定律就是描述稳定磁场中电与磁内在联系的基本电磁定律。

设空间有 n 根导体，导体中流过的电流分别为 $I_1, I_2, \dots, I_n$ ，则沿任意围绕 n 根导体的闭合路径 l 对磁场强度 H 的线积分就等于该闭合路径所包围的导体电流的代数和，即

$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (1.1)$$

这就是全电流定律，也称为安培环路定律。式 (1.1) 中电流的符号由右手螺旋法则确定，即当导体电流的方向与积分路径的方向呈右手螺旋关系时，该电流为正，反之为负。图 1.1 中，不同的积分路径 l_1 和 l_2 ，包围的载流导体相同，积分结果必然相等。用数学表达形式就是

$$\oint_{l_1} \mathbf{H} d\mathbf{l} = \oint_{l_2} \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_1 - I_2 \quad (1.2)$$

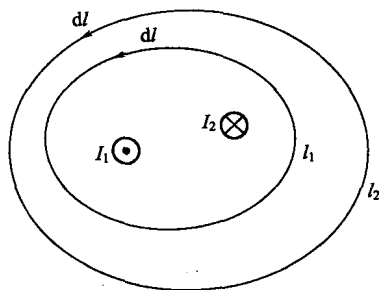


图 1.1 全电流定律

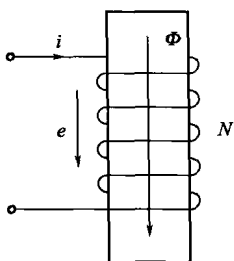


图 1.2 电磁感应定律

即积分与路径无关, 只与闭合路径包围的导体电流的大小和方向有关。

全电流定律的应用很广泛, 是电机磁路计算的基础。

二、电磁感应定律

变化的磁场会产生电场, 使导体中产生感应电动势, 这就是电磁感应现象。

将一个线圈置于磁场中, 与线圈交链的磁链为 ψ , 只要 ψ 发生了变化, 如线圈与磁场发生相对运动或磁场本身发生变化等, 线圈内就会感应出电动势。该电动势会在线圈内产生电流, 以阻止 ψ 的变化, 称为楞次定律。设电流的正方向与电动势的正方向一致, 而电流方向与磁通方向符合右手螺旋法则, 如图 1.2 所示, 则电磁感应定律的数学表达式为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1.3)$$

若线圈匝数为 N , 每匝线圈中通过的磁通量均为 Φ , 则磁链

$$\psi = N\Phi \quad (1.4)$$

那么, 式(1.3)即为

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

在电机中电磁感应现象主要表现在两个方面: ①线圈与磁场有相对运动, 导线切割磁力线时, 导线内产生感应电动势, 称为切割电动势或运动电动势; ②线圈中的磁通变化时, 线圈内产生感应电动势, 称为变压器电动势。下面介绍这两种情况下产生的感应电动势。

1. 切割电动势

长度为 l 的直导线在磁场中与磁场相对运动, 导线切割磁力线的速度为 v , 导线处的磁感应强度为 B 时, 若磁场均匀, 且 l 、 B 、 v 三者互相垂直, 则导线中感应电动势为

$$e = Blv \quad (1.6)$$

常用右手定则确定电动势 e 的方向, 即把右手手掌伸开, 大拇指与其余四指成 90° 角, 如图 1.3 所示, 如果让磁力线指向手心, 大拇指指向导线相对于磁场的运动方向, 则四指的指向就是导线中感应电动势的方向。

2. 变压器电动势

设线圈与磁场相对静止, 与线圈交链的磁通随时间变化, 假设按正弦规律变化, 即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1.7)$$

式中, Φ_m 为磁通幅值; $\omega = 2\pi f$ 为磁通交变角频率, 单位是 rad/s。

于是可得

$$e = -N\omega\Phi_m \cos \omega t = E_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.8)$$

式中, $E_m = N\omega\Phi_m$ 为感应电动势的幅值。

式(1.8)表明, 电动势的变化规律与磁通变化规律相同, 但相位滞后 90° , 如图 1.4 所示。

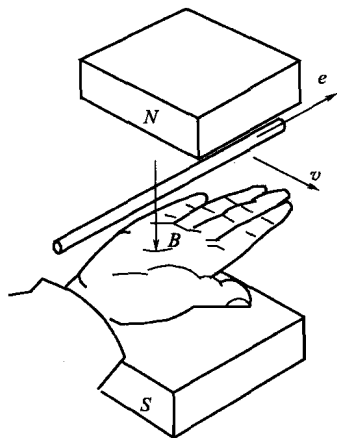


图 1.3 右手定则

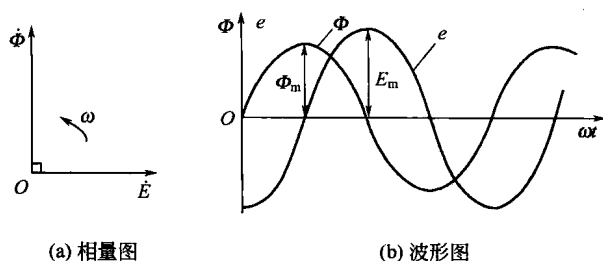


图 1.4 电动势与磁通的相位关系

在交流正弦分析中, 相量的大小用有效值表示。感应电动势的有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f N\Phi_m = 4.44 f N\Phi_m \quad (1.9)$$

三、电磁力定律

磁场对电流的作用是磁场的基本特征之一。将长度为 l 的导体放置在磁场 B 中, 通入电流 i 后, 导体会受到力的作用, 这种力就称为电磁力, 其表达式为

$$F = \sum dF = i \sum d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1.10)$$

对于长直载流导体, 若磁场与之垂直, 则计算电磁力的公式可简化为

$$F = Bli \quad (1.11)$$

即电磁力定律, 也称为毕奥-萨伐定律, 式中, 电磁力 F 、磁场 B 和载流导体 l 的关系由左手定则确定。

显然, 当磁场与载流导体相互垂直时, 由式(1.11)计算的电磁力有最大值。在电机学中常用左手定则确定 F 的方向, 即把左手伸开, 大拇指与其余四指成 90° 角, 如图 1.5 所示, 如果让磁力线指向手心, 四指顺着导线中电流的方向, 则大拇指指向就是磁场对载流导线作用力的方向。

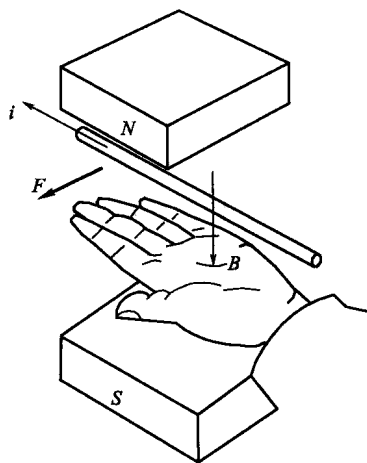


图 1.5 左手定则

第三节 铁磁材料特性

一、铁磁材料的磁导率

磁介质的磁导率为

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.12)$$

式中, B 为磁感应强度 (或称磁通密度) 矢量; H 为磁场强度矢量; μ 为磁导率。对于均匀各向同性磁介质, B 和 H 是同方向的。

铁磁材料包括铁、钴、镍以及它们的合金。实验表明, 所有非导磁材料的磁导率都是常数, 且都接近于真空磁导率 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。但铁磁材料却是非线性的, 即其中 B 与 H 的比值不是常数, 磁导率 μ_{Fe} 在较大的范围内变化, 且其数值远大于 μ_0 , 一般为 μ_0 的数百乃至数千倍。对电机中常用的铁磁材料来说, μ_{Fe} 在 $2000\mu_0 \sim 6000\mu_0$ 之间。

铁磁材料之所以有良好的导磁性能, 根据磁畴假说, 从微观角度看, 在铁磁材料内部存在着很多很小的具有确定磁极性的自发磁化区域, 并且有较强的磁化强度, 就相当于一系列超微型磁铁, 称为磁畴, 如图 1.6(a) 所示。磁化前, 这些磁畴的方向随机排列, 磁效应相互抵消, 宏观上对外不显磁性。但在外部磁场的作用下, 这些磁畴将沿外磁场方向重新作有规则的排列, 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, 直至在外磁场足够强时全部按照同一方向排列, 被完全磁化, 如图 1.6(b) 所示。结果内部磁效应不能相互抵消, 宏观上对外显示磁性, 也就相当于形成了一个附加磁场叠加在外磁场上, 从而使实际产生的磁场要比非铁磁材料中的磁场大得多, 用磁导率来表示, 就是 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ 。

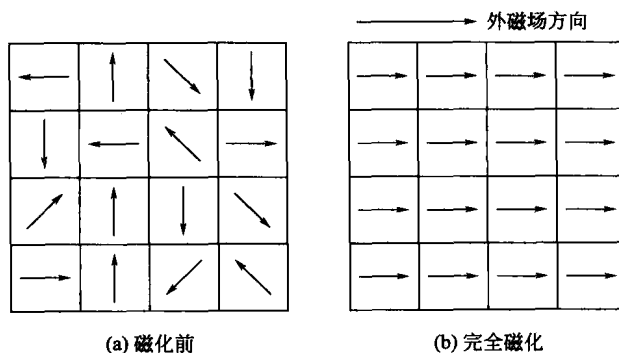


图 1.6 铁磁材料中的磁畴

下面结合铁磁材料的磁化特性具体介绍其磁化过程。

在外磁场 H 作用下, 磁感应强度 B 将发生变化, 二者之间的关系曲线称为磁化曲线,

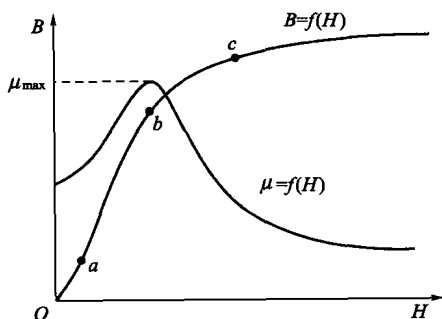


图 1.7 铁磁材料的基本磁化曲线

表示为 $B=f(H)$ 。相应地, 还可以描绘磁导率与磁场强度的关系曲线, 表示为 $\mu=f(H)$, 称为磁导率曲线。铁磁材料的基本磁化曲线如图 1.7 所示, 该曲线一般由材料生产厂家提供。

将图 1.7 中的磁化曲线分为四段。在 oa 段, 外磁场 H 较弱, 与外磁场方向接近的磁畴发生偏转, 沿着外磁场方向的磁畴缓缓增加, B 增长较为缓慢。在 ab 段, 随着 H 的不断增加, 绝大部分非顺磁方向的磁畴开始转动, 使 B 迅速增加。在 bc 段, 外磁场进一步加强, 非顺磁或逆磁方向的磁畴不断减少, B 的增加逐渐缓慢下来, 开始出现了所谓磁饱和现象。至 c 点以后, 所有磁畴都转到与外磁场一致的方向, H 再增加, B 的增加也很有限, 出现了深度饱和现象。

图 1.7 中还画出了磁导率曲线。由于饱和现象在 bc 段开始出现, 相应地, 磁导率随 H 的增加反而变小, 因此, 在磁导率曲线上有最大值 μ_{max} 存在。

二、磁滞现象

以上讨论了铁磁材料的单向磁化过程。事实上, 被磁化了的铁磁材料在外磁场消失后, 磁畴的排列将部分的向原始状态恢复, 但不可能完全恢复到原始状态, 即初始条件下的随机排列不复存在, 对外也就会显示出一定的磁性。铁磁材料中这种 B 的变化滞后于 H 的变化现象称为磁滞现象。

图 1.8 为铁磁材料循环磁化过程的磁滞回线, 由实验测定。分析如下: 外磁场 H 由 o 开始上升直至最大值 H_m , 铁磁材料的 B 沿 oa 上升至 B_m ; 接着 H 由 H_m 开始下降直至为 o , 但 B 不是沿 ao 下降到 o , 而是沿 ab 下降到 B_r , B_r 称为剩余磁感应强度, 简称剩磁。要使 B 进一步从 B_r 下降至 o , 就要求 H 继续反方向增大, 直至 $-H_c$ (曲线中的 c 点), H_c 称为矫顽力。 H 继续反向增加至 $-H_m$, 铁磁材料反向磁化, B 沿 cd 至 $-B_m$; 随后, H 再从 $-H_m$ 上升至 o , B 沿 de 变化至 $-B_r$, 进而 H 从 o 经 H_c 到 H_m , B 沿 efa 从 $-B_r$ 经 o 到 B_m 。这样经历了一个循环, 就得到了闭合回线 $abcdefa$, 称之为磁滞回线。

磁滞回线表明, 上升磁化曲线与下降磁化曲线不重合, 或者说, 铁磁材料的磁化过程是不可逆的。不同铁磁材料有不同的磁滞回线, 且同一铁磁材料, B_m 越大, 磁滞回线所包围的面积也越大。因此, 用不同的 B_m 值可测出不同的磁滞回线, 而将所有磁滞回线在第 I 象限内的顶点连接起来得到的磁化曲线就称为基本磁化曲线或平均磁化曲线, 如图 1.9 所示。基本磁化曲线解决了磁滞回线上 B 与 H 的多值函数问题, 在工程中得以广泛应用。一般情况下, 若无特别说明, 铁磁材料磁化曲线都是指基本磁化曲线。严格说来, 用基本磁化曲线代替磁滞回线是有误差的, 但这种误差一般不大, 可以满足工程需要。

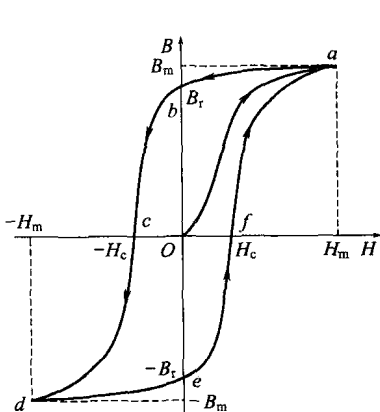


图 1.8 铁磁材料的磁滞回线

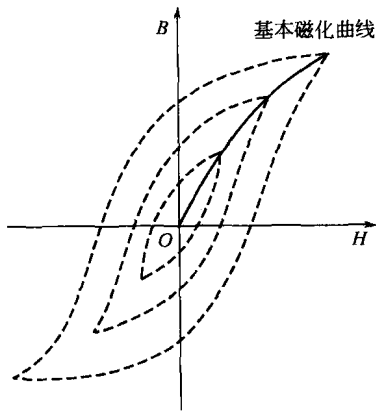


图 1.9 磁滞回线与基本磁化曲线

当 B_r 和 H_c 都很小, 即磁滞回线很窄的铁磁材料称为软磁材料, 在电机中常用的有硅钢片、铸铁、铸钢等。

当 B_r 和 H_c 都比较大, 即磁滞回线很宽的铁磁材料, 通常也形象地称为硬磁材料或永磁材料。电机中常用的永磁材料有铁氧体、稀土钴、钕铁硼等。

需要说明的是, 与软磁材料相比, 硬磁材料的磁导率很小, 如常用永磁材料的磁导率都接近于 μ_0 。

铁磁材料在交变磁场作用下的反复磁化过程中, 磁畴会不停地转动, 相互之间会不断摩擦, 因而就要消耗一定的能量, 产生功率损耗。这种损耗称为磁滞损耗。

第四节 磁路基本定律及计算方法

工程中对磁场的求解处理与电场类似, 也引进了磁路的概念, 将磁场求解简化为磁路求解, 并沿用电路分析的基本原理和方法。

与电路类比, 将磁通比拟为电流, 则磁路是电机、电器中磁通经过的路径。磁路一般由

铁磁材料制成,磁通也有主磁通和漏磁通之分。习惯上,主磁通经过的路径称为主磁路,漏磁通经过的路径为漏磁路。在电机中,主磁通为实现机电能量转换所需要的磁通,因此,磁路所研究的对象主要是主磁通经过的以铁磁材料为主的路径。

磁路计算的任务是确定磁动势 F 、磁通 Φ 和磁路结构(如材料、形状、几何尺寸等)的关系。类比于电路基本定律,表达这些关系的磁路基本定律有磁路欧姆定律、磁路基尔霍夫第一定律和第二定律等。由于磁路只是磁场的简化描述方式,因此有关磁路定律均可由磁场基本定律导出,下面分别予以讨论。

一、磁路基本定律

1. 磁路欧姆定律

图 1.10 是一个闭合铁芯磁路的示意图。铁芯上绕有 N 匝线圈,通以电流 i ,产生的主磁通为 Φ_m ,漏磁通为 Φ_s 。设铁芯截面积为 S ,平均磁路长度为 l ,铁磁材料的磁导率为 μ 。

由于漏磁通很小,可以忽略不计(即令 $\Phi_s=0$),并且认为磁路 l 上的磁场强度 H 处处相等,于是,根据全电流定律有

$$\oint H dl = Hl = Ni \quad (1.13)$$

因 $H=B/\mu$, 而 $B=\Phi_m/S$, 故可由式(1.13) 推得

$$\Phi_m = \frac{Ni}{l/\mu S} = \frac{F}{R_m} = \Lambda_m F \quad (1.14)$$

式中, $F=Ni$ 为磁动势; $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 为磁阻; $\Lambda_m = 1/R_m = \mu S/l$ 为磁导。

式(1.14) 即为磁路欧姆定律。它表明,磁通量 Φ_m 与磁动势 F 成正比,与磁阻 R_m 成反比。这与电路欧姆定律 $I=U/R=UG$ 是一致的,并且磁通与电流、磁动势与电动势、磁阻与电阻、磁导和电导相对应。

2. 磁路基尔霍夫第一定律

为简化起见,磁路计算时,一般都根据材料、截面积的不同而将磁路进行分段。图 1.11 所示主磁路可分为三段(下标分别为 1, 2, 3),各段的磁动势、主磁通、磁导率、截面积、平均长度分别定义如表 1.1 所示。

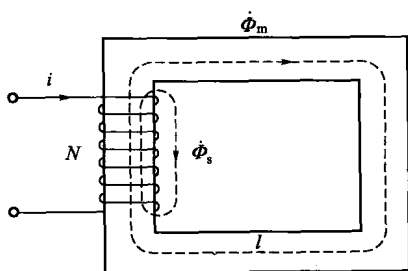


图 1.10 闭合磁路示意图

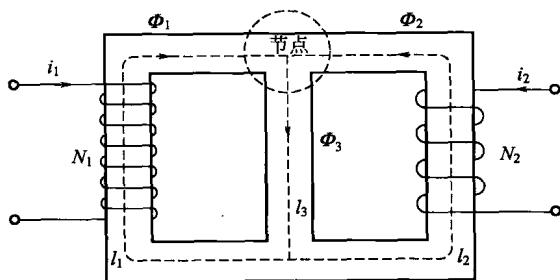


图 1.11 分段磁路示意图

表 1.1 各段磁路定义

分段磁路	磁动势	主磁通	平均磁场强度	磁导率	截面积	路径长
1	$F_1 = N_1 i_1$	Φ_1	H_1	μ_1	S_1	l_1
2	$F_2 = N_2 i_2$	Φ_2	H_2	μ_2	S_2	l_2
3	$F_3 = 0$	Φ_3	H_3	μ_3	S_3	l_3

忽略各部分的漏磁通, 在主磁通 Φ_1 、 Φ_2 和 Φ_3 的汇合处相当于磁路的节点, 由磁通连续性原理, 通过节点的总磁通的代数和为零, 即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1.15)$$

这就是磁路基尔霍夫第一定律。

对应于图 1.11 中的磁通正方向, 式(1.15) 可改写为

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_3 \quad (1.16)$$

综上所述, 磁路基尔霍夫第一定律表明, 进入或流出任一节点或闭合面的总磁通量的代数和等于零, 或进入任一闭合面的磁通量恒等于流出该闭合面的磁通量。

3. 磁路基尔霍夫第二定律

仍以图 1.11 为例, 针对由路径 l_1 和 l_3 构成的闭合磁路。忽略漏磁通, 根据全电流定律有

$$\oint H dl = N_1 i_1 = F_1 = H_1 l_1 + H_3 l_3 \quad (1.17)$$

而

$$H_1 = B_1 / \mu_1 = \frac{\Phi_1}{\mu_1 S_1}$$

$$H_3 = B_3 / \mu_3 = \frac{\Phi_3}{\mu_3 S_3}$$

故

$$F_1 = \frac{\Phi_1 l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{\Phi_3 l_3}{\mu_3 S_3} = \Phi_1 R_{m1} + \Phi_3 R_{m3} \quad (1.18)$$

式中, $R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1}$, 磁路 l_1 的等效磁阻; $R_{m3} = \frac{l_3}{\mu_3 S_3}$, 磁路 l_3 的等效磁阻。

同理, 由 l_1 和 l_2 组成的闭合磁路。取 l_1 绕行方向为正方向, 可得

$$F_1 - F_2 = N_1 i_1 - N_2 i_2 = H_1 l_1 - H_2 l_2 = \Phi_1 R_{m1} - \Phi_2 R_{m2} \quad (1.19)$$

根据式(1.17)、式(1.18) 和式(1.19), 有

$$\sum F = \sum Ni = \sum Hl = \sum \Phi R_m \quad (1.20)$$

这就是磁路基尔霍夫第二定律。它是全电流定律在分段磁路中的体现。

Hl 称为磁压降, $\sum Hl$ 为闭合磁路上磁压降的代数和。磁路基尔霍夫第二定律表明, 沿任一闭合磁路上磁动势的代数和等于磁压降的代数和, 这与电路基尔霍夫第二定律在意义上也是一样的。

为了更好地理解磁路基本定律及磁路中各物理量的基本定义, 准确把握磁路与电路的类比关系, 表 1.2 列出了磁路和电路中有关物理量及基本方程的对应关系。

表 1.2 磁路和电路的类比关系

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

虽然磁路和电路有着相似的对应关系,但在实际分析计算时仍有较大区别。这是因为,一般导电材料的电阻率 ρ 随电流变化不明显(不考虑温度变化时),即电阻 R 一般可作为常数处理。但铁磁材料却不然,其磁导率 μ 随磁感应强度 B 的变化而变化的幅度非常显著,如图1.7所示。即磁阻 R_m 是磁感应强度 B 和磁场强度 H 的函数,并且是非线性关系,一般很难用数学表达式进行描述,而这种非线性关系还因材料而异。因此,考虑非线性因素,磁路计算往往要比电路计算复杂得多。

二、磁路计算

磁路计算包含给定磁通 Φ 求磁动势 F 和给定磁动势 F 求磁通 Φ 两大类型。电机的磁路计算通常属于第一种类型的问题。对于第二种类型的问题,一般要用迭代法进行计算,只作简要介绍。

对于一般的磁路,给定磁通求磁动势的具体步骤如下:

- ① 将磁路分段,保证每段磁路的均匀性(即材料相同、截面积相同);
- ② 计算各段磁路的截面积 S_i 和平均长度 l_i ;
- ③ 根据给定磁通 Φ ,由 $B_i = \Phi/S_i$ 确定各段磁路的平均磁感应强度;
- ④ 由磁密 B_i 确定对应的磁场强度 H_i (由基本磁化曲线确定,对空气隙和非磁性材料,统一由 $H_i = B_i/\mu_0$ 计算);
- ⑤ 计算各段磁路上的磁压降 $H_i l_i$;
- ⑥ 由磁路基尔霍夫第二定律计算 $F = \sum H_i l_i$ 。

以上方法亦称为分段计算法。

下面简要讨论第二种类型的磁路计算问题,即给定磁动势求磁通。由于磁路的非线性关系,解决这类问题的常用方法为迭代法,即给定磁通初值 Φ' ,计算磁动势 F' ;若 F' 与给定磁动势 F 相等或二者之差小于给定误差 ϵ ,则 Φ' 即为所求;反之,根据前面计算结果,对 Φ' 进行适当修正,继续计算,直至 $|\Delta F| \leq \epsilon$ 为止。

由此可知,迭代法实质上是将第二类问题转化为第一类问题进行计算,然后根据结果进行修正,迭代计算,并逐步逼近理论结果。

三、永磁体磁路计算

由于永磁体类硬磁材料性能的不断提商,在电机中的应用日益广泛,并由此构成了永磁类电机分析设计的特定问题。下面对永磁体磁路计算方法进行介绍。

假设有一个环形永磁体,其气隙长度为 δ ,磁路截面积为 S ,平均磁路长度为 l 。如图1.12所示。

永磁体是利用剩磁 B_r 而工作的。永磁体工作于图1.13所示的磁滞回线的去磁段 CR ,称为退磁曲线。永磁体磁路的计算必须结合退磁曲线进行,这是与普通磁路计算截然不同的。

永磁体磁路计算也可分为已知磁路尺寸求磁通和给定磁通设计永磁体两类问题。下面分别予以讨论。为简单起见,假设磁路气隙较小,漏磁可以忽略不计。

1. 已知磁路尺寸,求解气隙中的工作磁通

由于气隙 δ 的影响,磁路总磁阻增大,气隙磁感应强度 B 将低于 B_r ,相当于产生了去磁作用,实际工作点下移为退磁曲线上的 D 点(见图1.13)。设永磁体内的磁场强度为 H ,气隙磁场强度为 H_δ ,因无励磁电流,即磁动势 $F=0$,故由磁路基尔霍夫第二定律有

$$Hl + H_\delta \delta = 0 \quad (1.21)$$

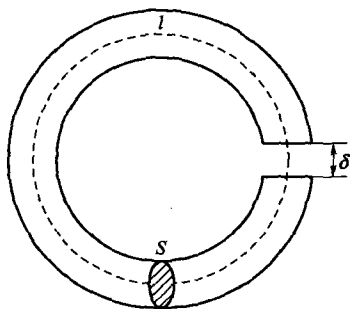


图 1.12 环形永磁体

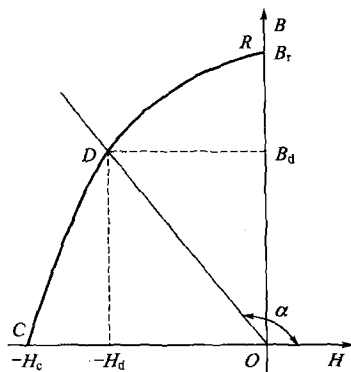


图 1.13 永磁体退磁曲线

不计边缘效应并忽略漏磁，有

即

故有

即

$$B_{\delta} = B$$

$$H_{\delta} = B/\mu_0$$

$$Hl + \delta B/\mu_0 = 0 \quad (1.22)$$

$$B = -\frac{\mu_0 l}{\delta} H \quad (1.23)$$

这是第Ⅱ象限内一条过原点、斜率为 $\tan \alpha = -\mu_0 l/\delta$ 的直线，其与退磁曲线的交点即为工作点 $D(H_d, B_d)$ 。相应地，气隙中的工作磁通为

$$\Phi = B_d S \quad (1.24)$$

D 点的磁场强度为负值，说明永磁体工作时，其内的实际磁场与原磁化场方向相反，称为自退磁场。

综上可知，已知永磁体磁路尺寸确定气隙工作磁通或磁体工作点的过程是一个结合材料退磁曲线而进行的图解过程。结果表明，永磁体的工作磁密 B_d 不但与所用材料的退磁曲线的形状有关，而且还与磁体长度 l 与气隙长度 δ 的比值有关。 l/δ 越大则 α 越小（极限 $\pi/2$ ）， B_d 就越接近于 B_r ；反之， l/δ 越小则 α 越大（极限为 π ）， B_d 偏离 B_r 越远，数值就越小，所以，增加永磁体长度，减少工作气隙能够使永磁体磁路获得较强磁场。

2. 已知气隙长度 δ 和工作磁通 Φ ，设计永磁体

这类问题属于逆问题，答案不唯一，一般是根据实际情况（工作条件、性能价格比等）综合考虑，选择最优方案。

首先是选择适当的永磁材料。可根据工作磁密的大小，选择永磁体的种类。同时也要考虑成本因素。

其次是合理选择永磁体的工作点。理论分析表明，为充分利用永磁材料，应使工作点 D 的磁能积 $H_d B_d$ 最大。这通常可由作图法确定。如图 1.14 所示，由 B_r 作水平线（平行于 H 轴）交由 $-H_c$ 所作的垂线（平行于 B 轴）于 P 点，连 OP 交退磁曲线于 D 点，则 D 即为所求最佳工作点。

求得 $D(-H_d, B_d)$ 后，永磁体设计如下：

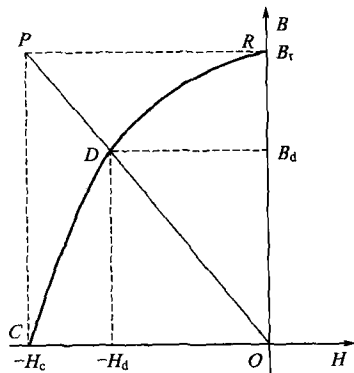


图 1.14 永磁体最佳工作点

截面积	$S = \Phi / B_d$	(1.25)
-----	------------------	--------

由于	$-H_d l + \delta B_d / \mu_0 = 0$	(1.26)
----	-----------------------------------	--------

故永磁体长度	$l = \frac{B_d \delta}{H_d \mu_0}$	(1.27)
--------	------------------------------------	--------

永磁体体积	$V = Sl = \frac{\Phi \delta}{H_d \mu_0}$	(1.28)
-------	--	--------

当然，实际永磁体磁路的结构可能很复杂，有时还需要进行分段处理，但上述设计方法是通用的。