

21世纪高等学校规划教材



DIANJIXUE

电机学

鲁改凤 主 编
祁学红 马建华 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

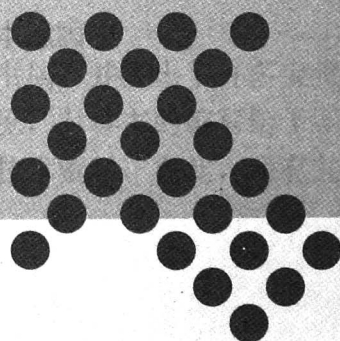
21世纪高等学校规划教材



DIANJIXUE

电机学

主 编	鲁改凤	
副主编	祁学红	马建华
编 写	张晋华	刘雪枫
	张鸿博	薛 原
主 审	辜承林	



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共五篇二十八章，主要内容包括：磁路、变压器、直流电机、交流电机理论的共同问题、感应电机、同步电机。重点讲解了几种主要电机的工作原理、基本结构、运行特性、一般的试验方法及操作技能。

本书可作为高等学校电气工程及自动化专业和其他相关专业的教材，亦可供从事相关专业的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/鲁改凤主编. —北京：中国电力出版社，2014. 1

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4778 - 6

I. ①电… II. ①鲁… 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 (2013) 第 178116 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](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 1 月第一版 2014 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 414 千字

定价 33.00 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

电机学是电气类专业必修的一门技术基础性课程,有很强的理论性和实践性。随着我国电力工业的迅猛发展和电力系统的不断扩大,电机理论也日益丰富。为适应新时期电气工程及其他电气类专业教学的需要,结合国内外电机学教材的发展情况,借鉴相关参考文献,融合教学中的研究成果,编写了本书。

本书的编写力求概念清晰,取材精炼,实用性强,适应面宽,便于教学。本书具有以下特点:

(1) 注意概念、基本理论和基本方法的阐述,重点讲解几种主要电机的工作原理、基本结构、运行特性、一般的试验方法及操作技能,建立牢固的物理概念,掌握分析电机的方法。

(2) 结合目前电机学发展状况,精选例子和习题,具有较强的针对性和实用性。同时尽量做到重点突出,有的放矢。

(3) 各章具有相对独立性,讲授次序可以根据具体情况进行调整。

本书由华北水利水电大学鲁改凤任主编,祁学红、马建华担任副主编。其中第一章至第七章由刘雪枫编写,第八章至第九章由祁学红编写,第十章至第十一章由马建华编写,第十二章由薛原编写,第十三章至第二十章由张晋华编写,第二十一章至第二十八章由张鸿博编写。本书由华中科技大学辜承林教授主审,提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,华北水利水电大学常继远老师阅读了本书书稿,并提出了许多宝贵意见和建议;张长富教授仔细审阅了全稿,提出了许多建设性的意见,对本书的编写给予了大力支持。本书编写过程中,还参阅了相关参考文献、国家标准等技术资料,在此,对有关作者一并表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

目 录

前言

第一篇 磁路与变压器

第一章 磁路	1
第一节 磁路的几个基本物理量	1
第二节 铁磁物质	2
第三节 磁路的基本定律	3
第四节 恒定磁通无分支磁路计算	4
第五节 交变磁通下的铁芯损耗	5
第六节 交变磁通磁路中电流及磁通的波形	6
第二章 变压器的分类与结构	9
第一节 变压器的工作原理、分类和结构	9
第二节 变压器的铭牌及额定值	11
第三章 变压器的运行分析	13
第一节 变压器的空载运行	13
第二节 变压器的负载运行	17
第三节 变压器的等效电路	18
第四节 等效电路参数的测定	20
第五节 标么值	24
第四章 三相变压器	29
第一节 三相变压器的磁路系统	29
第二节 三相变压器绕组的连接	30
第三节 三相变压器空载运行时的电动势波形	33
第四节 变压器的并联运行	35
第五章 三相变压器的不对称运行和变压器的瞬变过程	43
第一节 对称分量法	43
第二节 Yyn 连接的三相变压器的单相短路	44
第三节 V 形连接	50
第四节 变压器空载合闸时的瞬变过程和过电压现象	51
第五节 突然短路	54
第六节 机械应力	56
第六章 三绕组变压器、自耦变压器和仪用变压器	58
第一节 三绕组变压器	58

第二节	自耦变压器	61
第三节	仪用互感器	65

第二篇 直 流 电 机

第七章	直流电机的基本原理和结构	68
第一节	直流电机的用途	68
第二节	直流电机的工作原理	68
第三节	直流电机的主要结构部件	71
第八章	直流电机的电枢绕组	74
第一节	直流电枢绕组	74
第二节	电枢绕组的感应电动势	76
第九章	直流电机的气隙磁场	78
第一节	空载时直流电机的磁场	78
第二节	负载时直流电机的气隙磁场	79
第三节	直流电机的电磁转矩	84
第十章	直流发电机	87
第一节	直流发电机按励磁方式分类	87
第二节	直流发电机的功率、转矩和电动势平衡方程式	87
第三节	直流发电机的自励和自励条件	89
第四节	直流发电机的外特性	91
第五节	各种直流发电机应用范围	93
第十一章	直流电动机	95
第一节	直流电机的可逆原理	95
第二节	直流电动机的功率、转矩和电动势平衡方程式	96
第三节	直流电动机的工作特性和机械特性	98
第四节	直流电动机驱动机械负载时的稳定运行条件	103
第十二章	特殊直流电机	106
第一节	直流伺服电动机	106
第二节	直流测速发电机	108
第三节	交轴磁场电机放大机	108

第三篇 交流电机理论的共同问题

第十三章	交流绕组中的感应电动势	112
第一节	同步发电机的工作原理	112
第二节	导体中的感应电动势	112
第三节	线圈电动势	114
第四节	绕组的相电动势	115

第五节 高次谐波电动势及其削弱方法	117
第十四章 交流绕组	120
第一节 三相单层绕组	120
第二节 三相双层绕组	124
第十五章 交流绕组的磁动势	128
第一节 单相交流绕组的磁动势——脉动磁动势	128
第二节 三相交流绕组的磁动势——旋转磁动势	131
第三节 电机中的主磁通和漏磁通	135

第四篇 感 应 电 机

第十六章 感应电机的基本结构	138
第一节 感应电机的结构	138
第二节 三相感应电动机的分类	139
第三节 三相感应电动机的铭牌数据	140
第十七章 三相感应电动机的基本原理	142
第一节 三相感应电动机的相量关系	142
第二节 三相感应电动机的等效电路	151
第三节 笼型电动机的参数	155
第十八章 三相感应电动机的运行特性	159
第一节 三相感应电动机的功率	159
第二节 三相感应电动机的转矩及转矩平衡关系	161
第三节 电磁转矩公式的分析	162
第四节 三相感应电动机的起动转矩	164
第十九章 三相感应电动机的基本性能	169
第一节 感应电动机的工作特性	169
第二节 感应电动机的起动	170
第三节 感应电动机的调速	177
第二十章 特殊感应电动机	184
第一节 单相感应电动机	184
第二节 感应调压器	189
第三节 感应发电机	190

第五篇 同 步 电 机

第二十一章 同步电机的基本原理及结构	193
第一节 同步电机的基本原理	193

第二节	同步发电机的结构·····	193
第二十二章	同步电机的电枢绕组及电动势·····	196
第一节	单根导体电动势·····	196
第二节	线匝电动势·····	197
第三节	元件电动势和线圈组电动势·····	198
第四节	交流电机电枢绕组的构成·····	199
第二十三章	同步电机电枢绕组的磁动势·····	202
第一节	单相脉动磁动势·····	202
第二节	三相绕组的磁动势、旋转磁动势·····	203
第三节	漏磁通与漏电抗·····	205
第二十四章	同步发电机的电枢反应·····	207
第一节	概述·····	207
第二节	纯电阻负载时的电枢反应·····	207
第三节	纯电感负载时的电枢反应·····	209
第四节	纯电容负载时的电枢反应·····	209
第五节	一般情况下的电枢反应·····	210
第六节	时空统一相量图·····	211
第二十五章	同步发电机的对称运行·····	212
第一节	概述·····	212
第二节	同步发电机的电动势方程和相量图·····	212
第三节	同步发电机的电压变化率·····	216
第四节	同步发电机的特性曲线·····	218
第五节	同步电机参数的试验求法·····	223
第六节	同步电机的损耗和效率·····	224
第二十六章	同步发电机的并联运行·····	228
第一节	同步发电机并联运行的方法·····	228
第二节	有功功率的调节·····	231
第三节	无功功率的调节·····	234
第二十七章	同步电动机和补偿机·····	240
第一节	由发电机运行方式过渡到电动机运行方式·····	240
第二节	同步电动机的电动势方程和相量图·····	241
第三节	同步电动机的功率和转矩·····	242
第四节	同步电动机的运行特性·····	243
第五节	同步电动机的起动·····	245
第六节	反应式电动机·····	246
第二十八章	同步发电机的突然短路和不对称运行·····	250
第一节	概述·····	250

第二节	超导体磁链守恒原理.....	250
第三节	当 $\Psi_{(0)} = 0$ 时的三相突然短路	251
第四节	当 $\Psi_{(0)} = \Psi_{0m}$ 时的三相突然短路	255
第五节	突然短路电流对发电机和电力系统的影响.....	257
第六节	同步发电机的不对称运行分析.....	257
第七节	单相短路.....	260
参考文献.....		265

第一篇 磁路与变压器

第一章 磁路

第一节 磁路的几个基本物理量

运动电荷（电流）的周围空间存在着一种特殊形态的物质，人们称之为磁场。磁场的特性可用下列几个基本物理量来表征。

一、磁感应强度

磁感应强度 $\mathbf{B}$ 是表示磁场内某一点的磁场强弱和方向的物理量。磁感应强度是一个矢量，产生磁感应强度的电流与其之间的方向关系可用右手定则来确定。若用磁力线表示磁场的分布，则磁力线上的每一点的切线方向就是该点的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的方向。

如磁场内各点的磁感应强度大小相等、方向相同，这样的磁场称为均匀磁场。

B 的单位是 T，有时用 Gs 做单位，它们之间的关系是 $1\text{Gs}=10^{-4}\text{T}$ 。

二、磁通

磁通 Φ 为磁感应强度 B （如不是均匀磁场，则取 B 的平均值）与垂直于磁场方向的平面（面积为 S ）的乘积，即

$$\Phi = BS$$

在国际单位制中， B 的单位是 T， S 的单位是 m^2 ， Φ 的单位是 Wb。

磁感应强度的数值可以看成与磁场方向垂直的单位面积通过的磁通，亦称为磁通密度，即

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

若用磁力线来描述磁场，以磁力线的疏密反映磁感应强度的大小，则通过某一面积的磁力线总数反映了通过该面积磁通的大小。垂直于磁场方向的单位面积的磁力线数目反映了该点的磁感应强度大小。磁力线是连续的，是闭合的空间曲线。

三、磁场强度

磁场强度 $\mathbf{H}$ 是做磁场计算时引用的一个物理量，是一个矢量，可用来确定磁场与电流间的关系，即

$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I \quad (1-2)$$

式中： $\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l}$ 为磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 沿任意闭合回线 l （一般取磁力线作为闭合回线）的线积分； $\sum I$ 为穿过该闭合回线所围面积的电流代数和。

式（1-2）为安培环路定律（或称全电流定律）的数学表达式。它是磁路计算的基本公式。

电流的正负规定如下：任选定一个闭合回线的围绕方向，凡电流方向与闭合回线围绕方

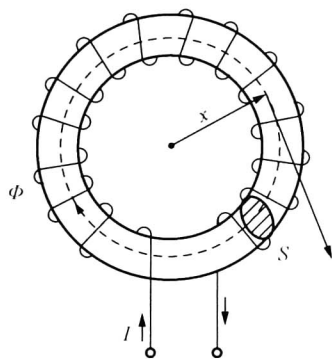


图 1-1 环形线圈

向之间符合右手定则的电流为正，反之为负。

以环形线圈（见图 1-1）为例，用式（1-2）计算其内部各点的磁场强度。以磁力线作为闭合回线，并以其方向作为回线的围绕方向，即

$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = H_r l_r = H_r \times 2\pi x$$

$$\sum I = IN$$

$$H_r \times 2\pi x = IN$$

$$H_r = \frac{IN}{2\pi x} = \frac{NI}{l_r}$$

式中： N 为线圈的匝数； $l_r = 2\pi x$ 为半径 x 处的圆周长，m； H_r 为半径 x 处的磁场强度，A/m。

四、磁导率

磁导率 μ 是表示磁场介质磁性的物理量，用来衡量物质的导磁能力。它与磁场强度 H 的乘积等于磁感应强度 B ，即

$$B = \mu H \tag{1-3}$$

磁场内某一点的磁场强度只与电流大小、线圈匝数及该点的几何位置有关，而与磁场介质的磁性（即磁导率 μ ）无关，即在一定电流值下，同一点磁场强度不因磁场介质的不同而不同。磁感应强度与磁场介质的磁性有关，在同样电流值时，同一点的磁感应强度的大小不同，线圈内的磁通也不同。

μ 的单位是 H/m。真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

第二节 铁 磁 物 质

物质按其导磁性能分为顺磁物质、反磁物质和铁磁物质三种。顺磁物质（如氧等）的磁导率比真空的磁导率略大。反磁物质（如铋）的磁导率略小于真空的磁导率。铁磁物质（如铁、钴、镍等）的磁导率是真空磁导率的几百倍甚至几千倍。

由于铁磁物质具有高导磁性能，工程上利用它使磁通尽量地约束在有限范围之内，以提高电磁设备的利用率，所以铁磁物质在电工方面有着广泛的用途。

铁磁物质的磁状态一般用磁化曲线（ $B-H$ 曲线）表示。不同磁性材料有不同的磁化曲线，磁化曲线对磁路计算极为重要。 $B-H$ 曲线可分成三段（见图 1-2）： $O-a$ 段， B 与 H 近似成正比地增加； $a-b$ 段， B 的增加缓慢； b 点以后， B 的增加很小，称为磁饱和。在有铁磁物质存在的磁路饱和时， B 与 H 不成正比。由此可见：不同的磁性材料有不同的磁导率，同一材料当其磁通密度不同时，亦有不同的磁导率；铁磁物质的磁导率 μ 不是常数，随 H 的变化而变化。

由于磁通 Φ 与 B 成正比，产生磁通的励磁电流 I 与 H 成正比，但在有铁磁物质的情况下 Φ 与 I 不成正比。

当铁芯线圈中通入交变电流时，铁芯就受到交变磁化。在电流变化一次时， B 随 H 变化的关系如图 1-3 所示。由图 1-3 可见，当 H 已减到零值时， B 并未回到零值。这种磁感应强度滞后于磁场强度的现象称为铁磁物质的磁滞现象。

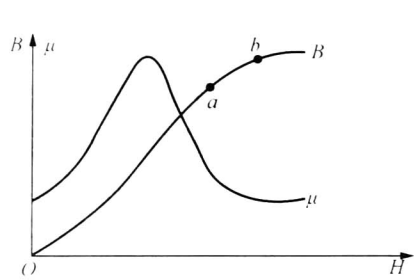


图 1 - 2 磁化曲线 (B—H 曲线)

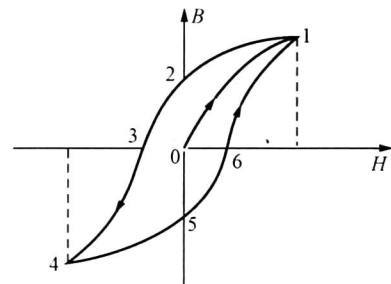


图 1 - 3 磁化曲线和磁滞回线

在线圈中电流减到零值 ($H=0$) 时, 铁芯在磁化时得到的磁性还未消失。这时铁芯中保留的磁感应强度称为剩磁感应强度 B_r (图 1 - 3 中 0—2 段、0—5 段)。

要使铁芯的剩磁消失, 须改变线圈中电流的方向, 即改变磁场强度的方向, 进行反向磁化。使 $B=0$ 时的 H 值, 称为矫顽磁力 H_c (图 1 - 3 中 0—3 段、0—6 段)。在铁芯反复交变磁化的情况下, 得出的 $B-H$ 曲线 1—2—3—4—5—6—1, 称为磁滞回线。

铁磁材料不同, 其磁滞回线和磁化曲线也不相同。根据矫顽磁力 H_c 的大小, 铁磁材料可分成两类:

- (1) 软磁材料。这类材料的矫顽磁力 H_c 小, 磁滞回线狭窄, 回线面积较小。软磁材料可用来制造电机、电器及变压器铁芯。常用的软磁材料有铸铁、硅钢、电工钢片等。
- (2) 硬磁材料。这类材料的矫顽磁力 H_c 大, 具有较大的矫顽磁力, 磁滞回线较宽。硬磁材料常用来制造永久磁铁。常用的硬磁材料有铁氧体、铝镍钴、碳钢等。

在电工技术中, 为了获得强磁场, 通常将线圈绕在铁芯上。由于铁芯的磁导率比周围空气或其他物质高得多, 因此磁通的绝大部分经过铁芯而形成一个闭合通路, 这种能使磁通集中通过的区域称为磁路。

第三节 磁路的基本定律

如同对电路进行分析与计算一样, 在磁路计算中也要用到三个基本定律。欧姆定律是最基本的定律。

设某一段均匀磁路长 l , 那么该段磁路上的磁位差 U_m , 即

$$U_m = Hl \tag{1 - 4}$$

因 $H = \frac{B}{\mu}$, 而 $B = \frac{\Phi}{S}$, 代入式 (1 - 4), 得

$$U_m = Hl = \frac{B}{\mu}l = \frac{l}{\mu S}\Phi = R_m\Phi \tag{1 - 5}$$

式中: $R_m = \frac{l}{\mu S}$, 称为磁阻。式 (1 - 5) 与电路中的 $U = RI$ 在形式上一样, 称为磁路欧姆定律。

磁阻的倒数是磁导 Λ , 即

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} \tag{1 - 6}$$

磁阻的实用单位是 $1/H$, 磁导的实用单位是 H 。

应当指出, 由于磁导率随磁场强度的变化而变化, 铁磁材料的磁导率不是一个常数, 故铁磁材料的磁阻是非线性的。

对于有分支磁路 (见图 1-4), 在左面铁芯柱上的线圈中通上电流, 则产生磁通, 其路径如虚线所示。全部在磁路中闭合的磁通称为主磁通。部分经过磁路, 部分经过磁路周围物质而闭合, 以及全部不在磁路中闭合的磁通, 称为漏磁通。磁路计算一般只计算主磁通。由磁通连续原理可知, 图 1-4 中, 有

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_2 + \Phi_3 \\ \text{或} \quad -\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 &= 0 \\ \text{即} \quad \sum \Phi &= 0 \end{aligned} \quad (1-7)$$

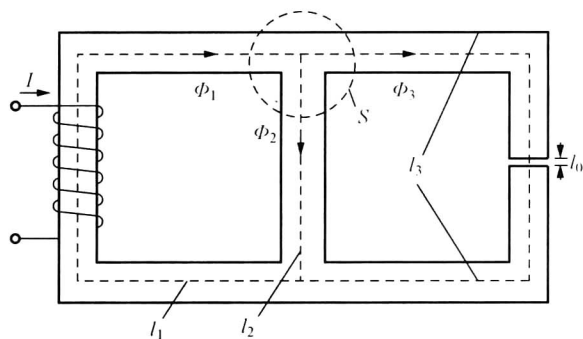


图 1-4 磁路基尔霍夫第一定律

也可认为: 在图 1-4 中取一闭合面 S , 设穿出闭合面 S 的磁通取正值, 进入闭合面 S 的磁通为负值, 则通过闭合面磁通的代数和为零。这就是磁路的基尔霍夫第一定律。

磁路由不同材料或不同长度和截面积的几段组成。凡是材料及截面均相同, 磁通数值亦相同的作为一段。在这段中, 各点的磁场强度是相等的。如图 1-4 所示, 磁路由一种铁磁物质和空气隙组成, 截面

是 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_0 , 对应长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_0 , 每一段上磁场强度分别为 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_0 。由安培环路定律可得

$$\begin{aligned} NI &= H_1 l_1 + H_2 l_2 \\ 0 &= -H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_0 l_0 \end{aligned}$$

如取顺时针方向为循行方向, 凡 H (即 Φ 的方向) 与循行方向一致者取正, 即 Hl 取正号, 反之取负号。 NI 与循行方向之间符合右手定则的 NI 取正, 反之取负。于是有

$$\sum Hl = \sum NI \quad (1-8)$$

式中: H 为单位长度的磁压降; Hl 为一段 l 长磁路上的磁压降; $\sum Hl$ 为一闭合回路上总的磁压降; $\sum NI$ 为磁通包围的总电流, 由它产生磁通称为磁动势。式 (1-8) 即为磁路基尔霍夫第二定律表达式。

磁路定律和电路定律在形式上相似, 但两者的物理本质是不一样的。磁路是有限范围内的磁场, 电路是有限范围内的电流场。如在电路中中断电流但电动势却存在; 在磁路中有磁动势必然伴有磁通, 尽管磁路中有气隙存在, 但磁通并不中断。电路中有电流一般有功率损失, 但在恒定磁通下磁路却无功率损失。

第四节 恒定磁通无分支磁路计算

在计算电机、电器等的磁路时, 要预给定磁通 (或磁感应强度), 再按照磁路各段的尺寸、材料, 求所需的磁动势。在计算时, 忽略漏磁通, 并认为磁路中处处均有相等的磁通。计算步骤如下:

(1) 按磁路中各部分的材料和截面分段, 要求每段磁路是均匀的 (即材料相同、截面相等)。

(2) 根据磁路尺寸算出各段的截面积和平均长度 (一般沿中心线计算)。根据涂有绝缘漆的硅钢片叠压的铁芯的几何尺寸计算出的截面积, 称视在面积 (见图 1-5)。

例如图 1-5 中, 有

$$S_1 = 60 \times 55 = 3300(\text{mm}^2)$$

$$S_2 = 40 \times 55 = 2200(\text{mm}^2)$$

磁力线通过的面积应按有效面积计算, 即要除去叠片间绝缘漆的厚度。令 $K = \frac{\text{有效面积}}{\text{视在面积}}$, 称 K 为填充系数, $K < 1$ 。在硅钢片厚度为 0.5mm 时, $K \approx 0.92$; 硅钢片厚度为 0.35mm 时, $K \approx 0.86$ 。

在空气隙中, 磁通向外扩张, 造成边缘效应, 增大了空气隙的有效面积。在空气隙长度 δ 很短时, 空气隙有效面积可用近似公式计算 (见图 1-6)。

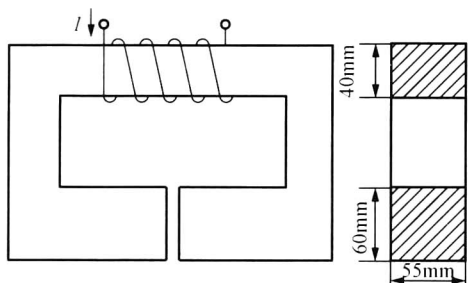


图 1-5 磁路计算

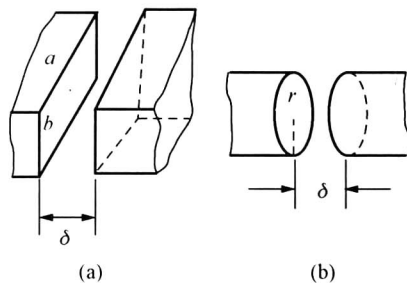


图 1-6 空气隙的边缘效应

1) 对于截面为矩形的铁芯, 它的长、宽分别为 a 、 b , 则空气隙的有效面积为

$$S_a = (a + \delta)(b + \delta) \approx ab + (a + b)\delta$$

2) 对于截面为圆形, 半径为 r 的铁芯, 空气隙的有效面积为

$$S_a = \pi \left(r + \frac{\delta}{2} \right)^2 \approx \pi r^2 + \pi r \delta$$

(3) 由已知的磁通计算各段的磁感应强度 B 。

(4) 由每一段的磁感应强度求其对应的磁场强度。对铁磁材料, 可通过查基本磁化曲线得到。对于空气隙可用如下公式计算

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0}$$

实用中, B 的单位用 Gs, H 的单位用 A/m, 那么

$$H_a = 0.8B_a$$

(5) 由每一段的磁场强度和中心线长度求每一段的磁压降 $H_1 l_1$, $H_2 l_2$, $H_3 l_3 \dots$

(6) 由磁路基尔霍夫第二定律求出所需的磁动势。

第五节 交变磁通下的铁芯损耗

在具有恒定磁通的磁路中无功率损失。如果磁通随时间变化, 那么磁路中就会产生各种

损耗。首先铁磁材料的磁滞现象会引起磁滞损耗，由于铁磁材料内部有许多很小的天然磁化区，称为磁畴，用小磁铁来代表，在外加交变磁场时，这些磁畴来回翻转彼此间摩擦引起损耗。其次，铁磁材料内由于电磁感应产生的涡流引起涡流损耗。一般把磁滞损耗和涡流损耗的总和称为铁芯损耗（简称铁损）。

通过试验研究发现，磁滞损耗与铁磁材料本身性质有关，即与铁磁材料的磁滞回线面积成正比。在电机、变压器中为了减小铁损耗，所采用的硅钢片主要是磁滞回线面积较小的材料，这种材料也称为软磁材料。在有些情况下，如制造永久磁铁和在特种微电机中就需要磁滞回线面积较大的材料，以获得较大的剩磁和矫顽力，这种材料称为硬磁材料。

对某一种铁磁材料，磁滞回线的面积还取决于最大磁密 B_m 的大小，磁滞回线的面积与最大磁密 B_m 的二次方近似成正比，即最大磁密 B_m 增加 1 倍，磁滞回线的面积约增大到 4 倍。磁滞损耗大小还和交变频率 f 有关， f 越大，单位时间内磁场交变越快，磁滞回线重复次数增加，损耗增大，因而磁滞损耗和频率成正比。

磁滞损耗大小可以表示为

$$P_c = C_1 B_m^2 f V$$

式中： C_1 为系数，由材料性质决定； B_m 为交变磁通的最大磁密； f 为频率； V 为铁磁材料总体积。

由于涡流是由铁芯中感应电动势所产生的环流，涡流损耗与涡流的二次方成正比，也就与感应电动势的二次方成正比。而感应电动势的大小取决于磁通的变化率，当磁通按正弦变化时，感应电动势的大小由最大磁密 B_m 和磁通交变频率的大小决定。因此涡流损耗与最大磁密 B_m 的二次方及频率 f 的二次方成正比。在最大磁密 B_m 和频率 f 一定时，为了减小涡流损耗，还可以采取其他措施。铁损均转化为热能使铁芯温度升高，为防止电机过热，一方面应采取散热降温措施，另一方面则应采用电阻率较大的铁磁材料（如硅钢片）以减小铁损。电机、变压器中常用硅钢片的电阻率比一般钢片的大，且随含硅量增加，硅钢片电阻率亦增大。因此，采用高磁导率硅钢片，可使涡流损耗较小。此外，为减少涡流损失，硅钢片越薄越好。在工频下硅钢片厚度为 $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。涡流损耗的大小可以表示为

$$P_w = C_2 B_m^2 f^2 V d^2$$

式中： C_2 为系数，取决于铁磁材料性质和铁芯材料的厚度； B_m 为最大磁密； f 为频率； V 为铁磁材料的总体积； d 为截面宽度。

在一般电机中，计算铁损（即包括磁滞损耗和涡流损耗）常用以下公式

$$p_{Fe} = p_{10/50} B_m^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} G$$

式中： $p_{10/50}$ 为比损耗， W/kg ，表示各种铁磁材料的性能； G 为电机中铁磁材料的总质量， kg 。

第六节 交变磁通磁路中电流及磁通的波形

从铁磁材料的磁化曲线中可看出，当铁芯中磁密较低时，磁化曲线呈直线，磁导率 μ 接

近常数, 且数值较大。因为此时铁芯磁密较低, 一般称为不饱和。因此, 常说当磁路不饱和时, 磁导率 μ 是个常数。

当铁芯中磁密较高时, 此时磁密如再略有增高, 磁场强度 H 将大大增加。即磁化电流迅速增大, 磁导率 μ 迅速降低, 并随磁路饱和而变小。

由于线圈中感应电动势 e 为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

由磁路欧姆定律可知, 磁通 Φ 和电流 i 有如下关系

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{iN}{R_m}$$

$$F = iN$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

式中: F 为磁动势; R_m 为磁阻; l 为磁路长度; S 为磁路的截面积; μ 为磁导率。

将 Φ 代入 e 得

$$e = -\frac{N^2}{R_m} \frac{di}{dt}$$

由线圈自感电动势关系可知 $e = -L \frac{di}{dt}$, 故

$$L = \frac{N^2}{R_m} \text{ 或 } L = \Lambda N^2$$

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l}$$

式中: Λ 为磁导。

对空心线圈, 其电感 L_0 为

$$L_0 = \Lambda_0 N^2 = \frac{\mu_0 S}{l} N^2$$

式中: μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 它是一个常数。

对于铁磁线圈, 其电感 L 为

$$L = \Lambda N^2 = \frac{\mu S}{l} N^2$$

当磁路不饱和时, 磁导率 μ 较大, 可认为此时磁路的磁导较大, 也即磁路的磁阻较小, 因而电感 L 较大。而当磁路饱和以后, 磁导率 μ 迅速减小, 可以认为此时磁路的磁导较小, 也即磁路的磁阻较大, 因而电感 L 也迅速减小。

由于铁磁物质的磁感应强度与磁场强度不成正比, 因此磁路中磁通与励磁电流也没有线性关系。磁通是正弦波时, 励磁电流为非正弦波; 励磁电流是正弦波时, 磁通为非正弦波。

设无分支磁路由某种铁磁物质组成, 平均长度为 l , 截面积为 S , 如图 1-7 (a) 所示。在交变电流作用下, 铁磁物质的磁状态将沿其磁滞回线周而复始地变化。为了分析简便起见, 认为磁状态是沿着基本磁化曲线变化的。由于 $\Phi \propto B$, $i \propto H$, 这样基本磁化曲线 $B-H$ 就可表示成 $\Phi-i$ 曲线。正弦磁通和正弦电流对应的电流和磁通的波形。

由图 1 - 7 可见，当磁通作正弦变化时，电流曲线为尖顶波形；而当电流作正弦变化时，则磁通为平顶波形（假定工作到饱和区）。电压波形根据磁通波形求出（ $u = N \frac{d\Phi}{dt}$ ），如图 1 - 7（c）中虚线所示。对电流或电压波形进行谐波分析，可看出它们含奇次谐波，主要是 3 次谐波，且随铁芯饱和程度的提高，3 次谐波也越显著。假设正弦磁通的最大值不大，铁芯工作在基本磁化曲线饱和点以下近似于直线段内，则电流的波形比较接近于正弦波。同样，在正弦电流的最大值不大时，磁通的波形亦比较接近正弦波。以上分析并未考虑磁滞回线的影响，如果考虑其影响，那么正弦磁通下的电流波形与图 1 - 7 中的有所不同。由此可见造成电流波形畸变的主要原因是铁磁物质的非线性。

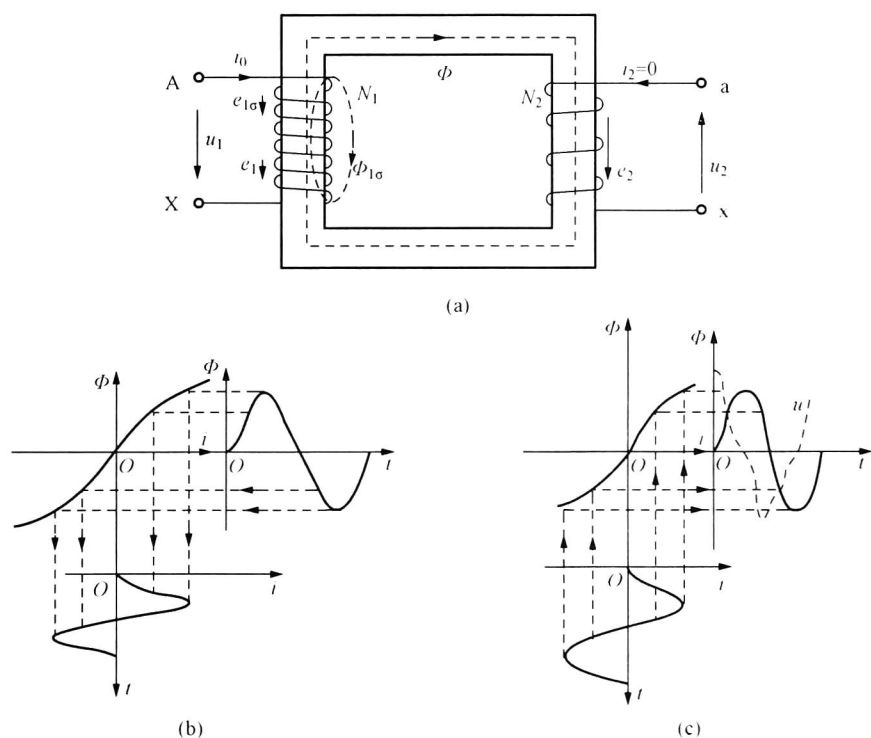


图 1 - 7 无分支磁路的电流和磁通波形

(a) 无分支磁路；(b) 磁通正弦变化时的波形；

(c) 电流正弦变化时的波形

习 题

- 1 - 1 磁路的磁阻如何计算？磁阻的单位是什么？
- 1 - 2 基本磁化曲线与起始磁化曲线有何区别？通常磁路计算时用的是哪一种磁化曲线？
- 1 - 3 铁芯中的磁滞损耗与涡流损耗是怎样产生的，它们各与哪些因素有关？