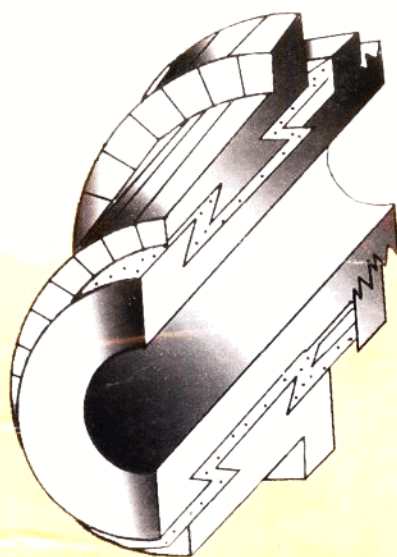


电 机 学

主 编 张长富



黄河水利出版社

电 机 学

主 编 张长富

副主编 许 强 刘永前

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书为高等院校动力工程专业、水电专业、电器专业与机电排灌工程专业的通用教材，也可作为水利水电工程技术人员、电力系统技术人员的培训教材。

全书共分五篇二十八章。第一篇论述变压器的类型、构造、原理、性能和工况等；第二篇论述直流电机的分类、构造、原理和性能等；第三篇为交流电机绕组、电势和磁势等内容；第四篇阐述异步电机的类型、结构、原理和性能等；第五篇论述同步电机的构造、原理、性能及同步电机励磁。

电 机 学

主 编 张长富

副主编 许 强 刘永前

责任编辑 雷元静 王才香

责任校对 赵宏伟

责任印制 郭 琦

出版发行 黄河水利出版社

地址：河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层

邮编：450003

印 刷：黄河水利委员会印刷厂

开 本：787mm×1092mm 1/16

版 别：1998 年 7 月 第 1 版

印 次：1998 年 7 月郑州第 1 次印刷

印 张：18.75

印 数：1—2000

字 数：433 千字

ISBN 7-80621-234-5/TM·2

定 价：25.00 元

前 言

本书选题是在 1990 年 5 月西安召开的水利水电电类专业教材会议上提出的,并根据 1982 年 10 月在西安召开的水利水电专业电类教材会议制定的电机学教学大纲而编写的。旨在通过本课程的教学,使学生掌握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,以期达到合理地使用电机以及满足后续专业课对该方面知识的要求。

本书力图内容充实,语言简练。

各专业在使用本教材时可做适当的增删。其中标 * 者为选读内容。

本书是由华北水利水电学院张长富主编,由许强、刘永前担任副主编。许强编写第一、二、三、四、五章,朱雪凌编写第七、八、九、十章,王治昆编写第十六、十七、十八、十九章,茹秀敏、张永华编写第十三、十四、十五章,李艳华、刘宇清编写第二十一、二十二、二十三章,其余由张长富编写并统稿。

对给予本书帮助的华北水利水电学院电工教研室的全体同志表示感谢。

由于水平有限,错误在所难免,希望读者多提宝贵意见。

作 者

1998 年 3 月于郑州

目 录

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	(5)
第五节 交变磁通下的铁芯损失	(6)
第六节 交变磁通磁路中电流和磁通的波形	(7)
第二章 变压器的类别和结构	(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	(10)
第三章 变压器的基本理论	(12)
第一节 变压器的空载运行	(12)
第二节 变压器的负载运行	(15)
第三节 变压器二次侧的归算	(17)
第四节 变压器的等效电路	(18)
第五节 变压器的参数测定	(20)
第六节 标么值	(25)
第七节 电压调整率	(26)
第八节 变压器的损耗与效率	(30)
第四章 三相变压器	(36)
第一节 三相变压器的磁路系统	(36)
第二节 三相变压器联接组	(37)
第三节 三相变压器空载运行时的电势波形	(40)
第四节 变压器的并联运行	(43)
第五节 变压器并联运行时的负载分配	(45)
第五章 三相变压器的不对称运行和变压器的瞬变过程	(50)
第一节 对称分量法	(50)
第二节 Y/Y_0 联接三相变压器的单相短路	(51)
第三节 V 形联接	(57)
第四节 变压器空载合闸时的瞬变过程和过电压现象	(58)
第五节 突然短路	(61)
第六节 机械应力	(63)

第六章 三绕组变压器、自耦变压器及其他变压器	(66)
第一节 三绕组变压器	(66)
第二节 变压比和等效电路	(67)
第三节 等效电路参数的测定	(68)
第四节 自耦变压器	(69)
第五节 仪用互感器	(73)

第二篇 直流电机

第七章 直流电机的基本原理和结构	(76)
第一节 直流电机的用途	(76)
第二节 直流电机的工作原理	(77)
第三节 直流电机的主要结构部件	(80)
第八章 直流电机的电枢绕组	(83)
第一节 直流电枢绕组	(83)
第二节 电枢绕组的感应电势	(85)
第九章 直流电机的气隙磁场	(87)
第一节 空载时直流电机的磁场	(87)
第二节 负载时直流电机的气隙磁场	(88)
第三节 直流电机的电磁转矩	(94)
第十章 直流发电机	(97)
第一节 直流发电机按激磁方式分类	(97)
第二节 直流发电机的功率、转矩和电势平衡方程式	(98)
第三节 直流发电机的自激和自激条件	(99)
第四节 直流发电机的外特性	(101)
第五节 各种直流发电机应用范围	(104)
第十一章 直流电动机	(106)
第一节 直流电机的可逆原理	(106)
第二节 直流电动机的功率、转矩和电势平衡方程式	(108)
第三节 直流电动机的工作特性和机械特性	(109)
第四节 直流电动机驱动机械负载时的稳定运行条件	(115)
第十二章 特殊直流电机	(119)
第一节 直流伺服电动机	(119)
第二节 直流测速发电机	(121)
第三节 交轴磁场电机放大机	(122)

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势	(125)
第一节 同步发电机的工作原理	(125)

第二节	导体中的感应电势	(126)
第三节	线圈电势	(127)
第四节	绕组的相电势	(128)
第五节	高次谐波电势及其削弱方法	(130)
第十四章	交流绕组	(134)
第一节	三相单层绕组	(134)
第二节	三相双层绕组	(137)
第十五章	交流绕组的磁势	(141)
第一节	单相交流绕组的磁势——脉动磁势	(141)
第二节	三相交流绕组的磁势——旋转磁势	(145)
第三节	电机中的主磁通和漏磁通	(148)

第四篇 异步电机

第十六章	异步电动机的基本结构	(151)
第一节	基本结构	(151)
第二节	三相异步电动机的分类及主要系列	(153)
第三节	三相异步电动机的铭牌数据	(153)
第十七章	三相异步电动机的基本原理	(155)
第一节	三相异步电动机的相量关系	(155)
第二节	三相异步电动机的等值电路	(165)
第三节	鼠笼式电机的参数	(170)
第十八章	三相异步电动机的运行特性	(173)
第一节	三相异步电动机的功率	(173)
第二节	三相异步机的转矩及转矩平衡关系	(175)
第三节	电磁转矩公式的分析	(176)
第四节	异步电动机的起动转矩	(179)
第十九章	三相异步电动机的基本性能	(183)
第一节	三相异步电动机的工作特性	(183)
第二节	异步电动机的起动性能	(185)
第三节	深槽式与双鼠笼式异步电动机	(190)
第四节	异步电动机的调速	(193)
第二十章	特殊异步电动机	(200)
第一节	单相异步电动机	(200)
第二节	感应调压器*	(205)
第三节	感应发电机*	(206)
第四节	自整角机	(209)
第五节	交流伺服电动机	(210)

第五篇 同步电机

第二十一章	同步电机的基本原理及其结构	(213)
第一节	同步电机的基本原理	(213)
第二节	同步电机的结构	(213)
第二十二章	同步电机的电枢绕组及电势	(216)
第一节	每根导体电势	(216)
第二节	线匝电势	(217)
第三节	元件电势和线圈组电势	(218)
第四节	交流电机电枢绕组的构成	(219)
第二十三章	电枢绕组的磁势	(221)
第一节	单相脉动磁势	(221)
第二节	三相绕组的磁势、旋转磁势	(222)
第三节	漏磁通与漏电抗	(225)
第二十四章	同步发电机的电枢反应	(226)
第一节	概述	(226)
第二节	发电机在纯电阻负载下的电枢反应	(226)
第三节	纯电感负载时的电枢反应	(228)
第四节	纯电容负载时的电枢反应	(228)
第五节	一般情况下的电枢反应	(229)
第六节	时-空统一相量图	(230)
第二十五章	同步发电机的对称运行	(231)
第一节	概述	(231)
第二节	隐极及凸极同步发电机的电势方程式和相量图	(231)
第三节	电压变化率	(236)
第四节	同步发电机的特性曲线	(238)
第五节	同步电机参数的试验求法	(243)
第六节	同步电机的损耗和效率	(244)
第二十六章	同步发电机的并联运行	(249)
第一节	同步发电机并联运行的方法	(249)
第二节	有功功率的调节	(253)
第三节	无功功率的调节	(256)
第二十七章	同步电动机和补偿机	(262)
第一节	由发电机运行方式过渡到电动机运行方式	(262)
第二节	同步电动机的电势方程式和相量图	(263)
第三节	同步电动机的功率和转矩	(264)
第四节	同步电动机的运行特性	(265)
第五节	同步电动机的起动	(267)

第六节	反应式电动机·····	(268)
第二十八章	同步发电机的突然短路和不对称运行·····	(272)
第一节	概述·····	(272)
第二节	超导体磁链守恒原理·····	(272)
第三节	当 $\psi_{(0)} = 0$ 时的三相突然短路 ·····	(273)
第四节	当 $\psi_{(0)} = \psi_{0m}$ 时的三相突然短路 ·····	(278)
第五节	突然短路电流对电机和电力系统的影响·····	(280)
第六节	同步发电机的不对称运行分析·····	(280)
第七节	单相短路·····	(283)

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

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 B 是表示磁场内某一点的磁场强弱和方向的物理量。它是一个矢量。它与产生它的电流之间的方向关系可用右螺旋定则来确定。

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 $1\text{GS} \triangleq 10^{-4}\text{T}$ 。

二、磁通

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 ,则磁通为

$$\Phi = BS$$

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。 B 的单位常采用 GS, S 的单位采用 cm^2 ,此时 Φ 的单位是 Mx ($1\text{Mx} = 10^{-8}\text{Wb}$)。

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就反映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。磁通是连续的,是闭合的空间曲线。

三、磁场强度

磁场强度 H 是做磁场计算时引用的一个物理量,是个矢量,由它来确定磁场与电流间的关系,即

$$\oint \vec{H} d\vec{e} = \sum I \quad (1-2)$$

此式为安培环路定律(或称全电流定律)的数学表达式。它是磁路计算的基本公式。

式中: $\oint \vec{H} d\vec{e}$ 是磁场强度矢量 $\vec{H}$ 沿任意闭合回线 l (一般取磁力线作为闭合回线) 的线积分; $\sum I$ 是穿过该闭合回线所围面积的电流代数和。电流的正负是这样规定的: 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向之间符合右螺旋定则的电流为正, 反之为负。

以环形线圈为例, 见图 1-1。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

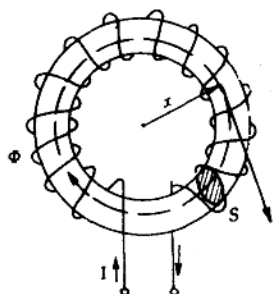


图 1-1

$$\oint \vec{H} d\vec{e} = H_x l_x = H_x \times 2\pi x$$

$$\sum I = IN$$

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

$$H_x = \frac{IN}{2\pi x} = \frac{NI}{l_x}$$

式中: N 为线圈的匝数; $l_x = 2\pi x$ 是半径为 x 的圆周长; H_x 为半径 x 处的磁场强度。

H 的单位是 A/m, 或用 Oe ($1\text{Oe} = \frac{1000}{4\pi} \text{A/m}$)。

四、磁导率

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

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

磁场内某一点的磁场强度 H 只与电流大小、线圈匝数, 以及该点的几何位置有关, 而与磁场介质的磁性 (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。但磁感应强度是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 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

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, 它的磁导率 μ 比真空的磁导率 μ_0 略大。反磁性物质, 如铍, 它的磁导率略小于真空的磁导率。铁磁物质, 如铁、钴、镍等, 它们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由磁化曲线 ($B \sim H$ 曲线) 表示。各种磁性材料有不同的磁化曲线, 它在磁路计算上极为重要。 $B \sim H$ 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

铁磁性物质存在的磁路饱和时, B 与 H 不成正比。所以, 铁磁性物质的磁导率 μ 不是常数, 随 H 而改变。

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。但在有铁磁性物质情况下 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, 磁感应强度 B 随磁场强度 H 变化的关系如图 1-3。由图中可见, 当 H 已减到零值时, 但 B 并未回到零值。称这种磁感应强度滞后于磁场强度的性质为铁磁性物质的磁滞性。

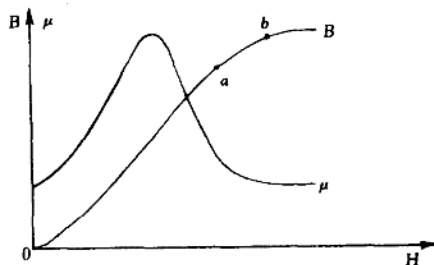


图 1-2

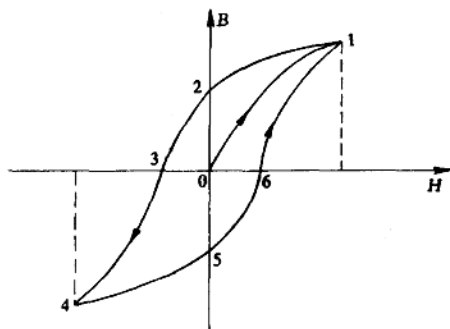


图 1-3 磁化曲线和磁滞回线

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 $0 \sim 2$, $0 \sim 5$ 段)。

如果要使铁芯的剩磁消失, 须改变线圈中电流方向, 即改变磁场强度 H 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 $0 \sim 3$ 段, $0 \sim 6$ 段)。在铁芯反复交变磁化的情况下, 得出的 $B \sim H$ 曲线 1、2、3、4、5、6、1, 称磁滞回线。

铁磁物质不同, 其磁滞回线和磁化曲线也不相同。铁磁性物质根据磁滞回线的形状及其在工程上的用途可分成两类。

(1) 软磁材料。它的磁滞回线狭窄, 回线面积较小。用来制造电机、电器及变压器铁芯。常用的有铸铁、硅钢等。

(2) 硬磁性材料。具有较大的矫顽磁力, 磁滞回线较宽。用来制造永久磁铁。常用的有碳钢、钴钢等。

在电工技术中, 为了获得强磁场, 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。称这种磁力线集中通过的整体为磁路。

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两个基本定律。欧姆定律是最基本的定律。

如果某一段均匀磁路长 l , 那么该段磁路上的磁位差 U_m , 即为

$$U_m = Hl \quad (1-4)$$

因 $H = \frac{B}{\mu}$, 而 $B = \frac{\Phi}{S}$, 代入上式, 得

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

式中 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 称磁阻。上式与电路 $U = RI$ 形式上一样, 亦称磁路欧姆定律。

磁阻的倒数是磁导 Λ , 即

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} \quad (1-6)$$

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 μ 随磁场强度 H 的大小而改变, 对于铁磁材料它不是一个常数, 故铁磁材料的磁阻是非线性的。

对于有分支磁路, 如图 1-4, 在左边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

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$$

或

$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-7)$$

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, 则通过闭合磁通的代数和为零。这就是磁路的基尔霍夫第一定律。

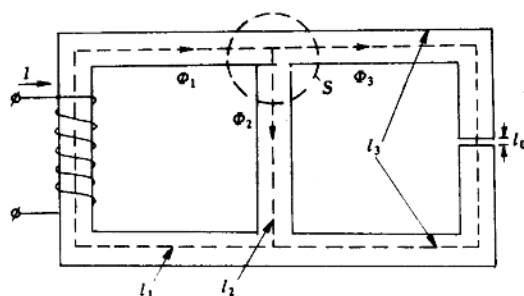


图 1-4 磁路基尔霍夫第一定律

如果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 是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 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 和 H_0 。由安培环路定律可得

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2$$

$$0 = -H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_0 l_0$$

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 HI 前面取正号, 反之取负号。 NI 与循行方向之间符合右螺旋者 NI 前取正, 反之取负。即

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

式中: H 是单位长度的磁压降, HI 便是一段 l 长磁路上的磁压降, $\sum HI$ 为一闭合回路上总的磁压降。 $\sum NI$ 是磁通包围的总电流, 由它产生磁通故称为磁动势, 简称磁势。上式

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势却存在;在磁路中有磁势必然伴有磁通,尽管磁路中有气隙存在,但磁通并不中断;电路中有电流一般就有功率损失,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,要预先给定磁通(或磁感应强度),再按照给定的磁通和磁路各段的尺寸、材料求所需的磁势。

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)。在涂有绝缘漆的硅钢片叠压的铁芯,由其几何尺寸计算出的截面积,称视在面积(如图 1-5)。

$$S_1 = 6 \times 5.5 = 33(\text{cm}^2)$$

$$S_2 = 4 \times 5.5 = 22(\text{cm}^2)$$

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。

$$K = \frac{\text{有效面积}}{\text{视在面积}}$$

称 K 为填充系数, $K < 1$ 。在硅钢片厚度 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(如图 1-6)。

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

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

对于截面为圆形,半径为 r 的铁芯,空气隙的有效面积为

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

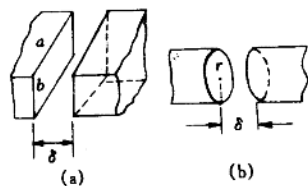


图 1-6

(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。如铁磁材料可查基本磁化曲线。对于空气隙要用下式计算

$$H_a(\text{A/m}) = \frac{B_a(\text{T})}{\mu_0(\text{H/m})}$$

实用中, B 的单位用 GS, H 的单位用 A/m, 那么

$$H_a(\text{A/m}) = 0.8B_a(\text{GS})$$

(5) 由每一段的磁场强度和中心线长度求每一段的磁压降 $H_1l_1, H_2l_2, H_3l_3, \dots$

(6) 由磁路基尔霍夫第二定律求出所需的磁势。

第五节 交变磁通下的铁芯损失

在具有恒定磁通的磁路中无功率损失。而如果磁通随时间变化, 那么磁路中就会产生各种损失。铁磁材料的磁滞现象会引起磁滞损耗, 它是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而引起的损耗。铁磁材料内由于电磁感应产生的涡流引起涡流损失。一般把磁滞损失和涡流损失的总和称为铁芯损失。

磁滞损耗的大小, 通过实验研究发现, 它和铁磁材料本身性质有关, 即与铁磁材料的磁滞回线面积大小成正比。在电机、变压器中为了减小铁损耗所采用的硅钢片就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。

就某一种铁磁材料说, 磁滞回线的面积还取决于最大磁密 B_m 的大小, 磁滞回线的面积约与最大磁密 B_m 的平方成正比, 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, 由材料性质所决定; 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势所产生的环流, 涡流损耗和涡流的平方成正比, 也就和感应电势的平方成正比, 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。因此涡流损耗和最大磁密 B_m 的平方及频率 f 的平方成正比。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。如设法增大铁磁材料的电阻率, 从而使涡流减小, 降低涡流损耗。在电机、变压器中常用的硅钢片就比一般钢片有较大的电阻率, 且随含硅量增加, 硅钢片电阻率亦增大。因此, 高硅钢片的涡流损耗减小。此外, 为减少涡流损失, 硅钢片越薄越好。在工频下钢片厚度为 0.35mm~0.5mm。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, 计算铁损耗(即包括磁滞损耗和涡流损耗)常用以下公式

$$P_{Fe} = P_{10/50} \left(\frac{B_m}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} G$$

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

第六节 交变磁通磁路中电流和磁通的波形

从铁磁材料的磁化曲线中看出, 当铁芯中磁密较低时, 磁化曲线是呈直线。导磁系数 μ 接近是常数, 并且数值较大。因为这时铁芯磁密较低, 我们一般称为不饱和。因此, 我们常说当磁路不饱和时, 导磁系数 μ 是个常数。

当铁芯中磁密较高时, 磁密如再略有增高而磁场强度 H 将大大增加。即磁化电流迅速增大, 导磁系数 μ 将迅速降低, 且随磁路饱和而变小。

由于线圈中感应电势 e 大小为

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

由磁路欧姆定律可知, 磁通 Φ 和电流 i 有如下关系

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

式中: F 为磁势, $F = iN$; R_m 为磁阻, $R_m = \frac{l}{\mu S}$, l 为磁路长度; S 为磁路的截面积, μ 为导磁系数。

将 Φ 代入 e 得

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

由线圈自感电势关系可知 $e = -L \frac{di}{dt}$, 故

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

式中: λ 为磁导, $\lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l}$ 。

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 为空气导磁系数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 它是一个常数。

对于一个铁芯线圈, 其电感 L 为

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

当磁路不饱和时, 导磁系数 μ 较大。因此, 可认为这时磁路的磁导较大, 也即磁路的磁阻较小, 因而电感 L 较大。而当磁路饱和以后, 导磁系数 μ 迅速减小, 可以认为这时磁路的磁导较小, 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,那么磁路中磁通也不与励磁电流有线性关系。在磁通是正弦形时,励磁电流则为非正弦形;反之励磁电流是正弦形时,磁通为非正弦形。

设无分支磁路由某种铁磁物质组成,平均长度 l , 截面积 S 。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改变着。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 $\Phi \propto B$ 和 $i \propto H$, 这样基本磁化曲线 $B \sim H$ 就可表示成 $\Phi \sim i$ 曲线。

图 1-7(b)(c)绘制了正弦磁通和正弦电流对应的电流和磁通的波形。

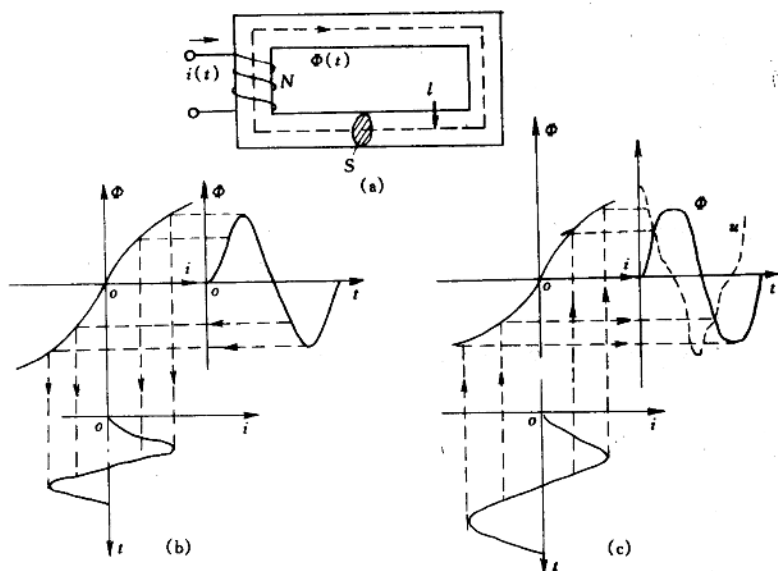


图 1-7 正弦磁通和正弦电流对应电流和磁通波形

图中可见,当磁通作正弦变化时,电流曲线具有尖顶波形,而当电流作正弦变化时,则磁通具有平顶波形(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 中虚线所示。如对电流或电压波形进行谐波分析,可看出它们含奇次谐波,主要是三次谐波,并随铁芯饱和程度的提高,三次谐波也越显著。假设正弦磁通的最大值不大,铁芯工作在基本磁化曲线的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,那么磁通的波形亦比较接近正弦波。以上分析并未考虑到磁滞回线的影响,如果考虑其影响,那么正弦磁通下的电流波形与图中的有所不同。故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。