

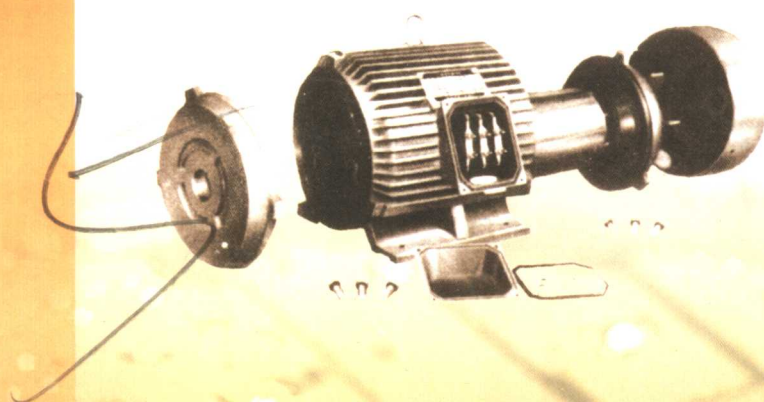


DIANQI
XINXILEI

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

电机学学习指导

■ 赵莉华 曾成碧 张代润 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM3/94

2008

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

电机学学习指导

赵莉华 曾成碧 张代润 编

机械工业出版社

本书系统地归纳和总结了“电机学”的主要内容,介绍了“电机学”的解题方法,精选了近 500 道题目,所选试题包含了学生应掌握的“电机学”的全部内容。本书的目的是帮助读者深入理解“电机学”的基本概念、基本理论,建立学习这门课程的思维方法,巩固所学知识,熟练掌握解题方法,开拓思路,提高应试水平。

本书内容丰富,可供高等院校电气信息类学生在学习“电机学”课程及考研复习时使用,也可供教师 and 自学者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学学习指导/赵莉华,曾成碧,张代润编. —北京:机械工业出版社, 2007. 10

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 22787 - 8

I. 电… II. ①赵…②曾…③张… III. 电机学 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 174728 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:于苏华 责任校对:张莉娟

封面设计:张 静 责任印制:邓 博

北京京丰印刷厂印刷

2008 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.25 印张 · 424 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 22787 - 8

定价: 28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

“电机学”是电工学科的重要组成部分，是基础研究及应用基础研究的重要应用领域，是电工领域科技发展的强大推动力。“电机学”课程是电气信息类专业的核心基础课，是从基础理论课、技术理论课走向专业课学习和工程应用研究的基础和纽带，在整个电气信息类专科、本科生教学和培养高质量本科、硕士学生计划中占有十分重要的地位。

为了帮助读者深入理解“电机学”的基本理论、基本概念，建立学习这门课程的独特的思维方法，熟练掌握解题方法，提高应试水平，编者根据十多年教学经验的总结，编写了这本《电机学学习指导》。

本书首先系统地对“电机学”各部分主要内容进行归纳与总结，突出章节重点和难点，再按填空题、问答题和计算题等形式列出题目和解答。选题包含了学生必须掌握的“电机学”全部内容，题型具有典型性，部分题目有一定的深度和广度。

本书第1~3章由赵莉华编写，第4、5章由曾成碧编写，第6、7章由张代润编写。

本书所选题目参考了教学习题、考研试题和国内外相关教材，精选了近500道题目，全部给出答案。根据历届学生对问答题解题的难度，重点突出“电机学”中间答题的解题方法。

在本书编写过程中，参考了许多其他资料中关于“电机学”及习题等方面的内容，在此向有关文献作者表示谢意。

本书可供高等院校电气信息类学生在学习“电机学”课程及考研复习时使用，也可供教师和自学者参考。

本书的名词术语采用我国国家标准，物理量单位采用法定计量单位。

由于编者水平的局限，加之时间仓促，书中难免出现一些错误和不当之处，欢迎选用本书的教师及广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 磁路 1

- 1.1 学习指导 1
- 1.2 习题及解析 3

第2章 变压器 10

- 2.1 变压器的基本运行原理 10
 - 2.1.1 学习指导 10
 - 2.1.2 习题及解析 16
- 2.2 三相变压器 41
 - 2.2.1 学习指导 41
 - 2.2.2 习题及解析 44
- 2.3 变压器的并联运行 56
 - 2.3.1 学习指导 56
 - 2.3.2 习题及解析 57
- 2.4 变压器的瞬变过程 62
 - 2.4.1 学习指导 62
 - 2.4.2 习题及解析 63
- 2.5 三绕组变压器和其他用途变压器 66
 - 2.5.1 学习指导 66
 - 2.5.2 习题及解析 68

第3章 交流电机绕组、绕组 电动势和磁动势 77

- 3.1 学习指导 77
- 3.2 习题及解析 79

第4章 异步电机 104

- 4.1 异步电动机的运行原理 104
 - 4.1.1 学习指导 104
 - 4.1.2 习题及解析 106
- 4.2 异步电动机的电磁转矩和机械特性 ... 119
 - 4.2.1 学习指导 119
 - 4.2.2 习题及解析 122
- 4.3 异步电动机运行分析与起动、
调速和制动 135

- 4.3.1 学习指导 135

- 4.3.2 习题及解析 140

第5章 同步电机 154

- 5.1 同步发电机的运行原理和运行特性 ... 154
 - 5.1.1 学习指导 154
 - 5.1.2 习题及解析 157
- 5.2 同步发电机的并网运行 168
 - 5.2.1 学习指导 168
 - 5.2.2 习题及解析 170
- 5.3 同步发电机的不对称运行与
突然短路 180
 - 5.3.1 学习指导 180
 - 5.3.2 习题及解析 180

第6章 直流电机 186

- 6.1 直流电机的基本原理 186
 - 6.1.1 学习指导 186
 - 6.1.2 习题及解析 192
- 6.2 直流电机的磁动势、电动势
和基本方程 195
 - 6.2.1 学习指导 195
 - 6.2.2 习题及解析 202
- 6.3 直流电机的运行特性 205
 - 6.3.1 学习指导 205
 - 6.3.2 习题及解析 211
- 6.4 直流电动机的起动、调速和制动 216
 - 6.4.1 学习指导 216
 - 6.4.2 习题及解析 223
- 6.5 直流电机的换向 228
 - 6.5.1 学习指导 228
 - 6.5.2 习题及解析 232

第7章 特种电机 234

- 7.1 步进电动机 234
 - 7.1.1 学习指导 234
 - 7.1.2 习题及解析 243

7.2 自整角机	248
7.2.1 学习指导	248
7.2.2 习题及解析	252
7.3 旋转变压器	254
7.3.1 学习指导	254
7.3.2 习题及解析	259
7.4 直线电动机	261

7.4.1 学习指导	261
7.4.2 习题及解析	265
7.5 超声波电动机	265
7.5.1 学习指导	265
7.5.2 习题及解析	267

参考文献	269
------------	-----

第 1 章 磁 路

1.1 学习指导

1. 磁场的几个基本物理量

(1) 磁感应强度——磁通密度

定义：表示磁场内某点磁场强弱的物理量，磁感应强度的大小是通过垂直于磁场方向单位面积的磁力线数目，磁感应强度的符号为 B 。

磁感应强度 B 的单位在国际单位制 (SI) 中是特斯拉，简称特，符号为 T，在电磁单位制 (CGS) 中为高斯，简称高，符号为 Gs。两者的关系为 $1\text{T} = 10^4\text{Gs}$ 。

(2) 磁通

定义：垂直通过一个截面的磁力线总量称为该截面的磁通量，简称磁通，符号为 Φ 。均匀磁场中，磁通 Φ 等于磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的面积 A 的乘积

$$\Phi = BA \quad (1-1)$$

磁通是一个标量，它的单位在 SI 中为韦伯，简称韦，符号为 Wb，在 CGS 中为麦克斯韦，简称麦，符号为 Mx， $1\text{Mx} = 1\text{Wb}$ 。

均匀磁场中，磁感应强度可以表示为单位面积上的磁通，由式 (1-1) 可得

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1-2)$$

所以磁感应强度也常称为磁通密度。

(3) 磁导率

定义：表示物质导磁性能的参数，单位是亨每米，符号为 H/m。

真空中的磁导率一般用 μ_0 表示， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ 。空气、铜、铝和绝缘材料等非铁磁材料的磁导率和真空磁导率大致相同。而铁、镍、钴等铁磁材料及合金的磁导率比 μ_0 大很多，为 $10 \sim 10^5$ 倍。

相对磁导率 μ_r ：物质磁导率与真空磁导率的比值。非铁磁物质的相对磁导率 μ_r 接近于 1，铁磁物质的 μ_r 远远大于 1。

(4) 磁场强度

定义：在任何介质中，磁场中某点的磁感应强度与该点磁导率的比值定义为该点的磁场强度 H ，即

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

磁场强度只与产生磁场的电流及电流的分布有关，与磁介质的磁导率无关，单位为安每米，符号为 A/m。引入磁场强度概念是为了简化计算。

2. 基本电磁定律

(1) 安培环路定律（全电流定律）

定律内容：在磁路中，沿任一闭合路径磁场强度 H 矢量的线积分，等于与该路径交链的电流的代数和，即

$$\oint H \cdot dl = \sum I \quad (1-4)$$

式中，若电流方向与积分路径方向符合右手螺旋定则，电流为正，否则为负。

在电机和变压器磁路计算中，式 (1-4) 可简化为

$$\sum Hl = \sum Ni \quad (1-5)$$

式中， N 是线圈匝数。

(2) 法拉第电磁感应定律

1) 电磁感应：当穿过线圈的磁通随时间发生变化时，闭合线圈会产生感应电动势和电流，这种现象叫电磁感应。

2) 电磁感应定律：电磁感应产生的感应电动势的大小与线圈匝数成正比，与单位时间内磁通的变化率成正比，即

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-6)$$

式中， Ψ 是穿过整个线圈的磁链， $\Psi = N\Phi$ 。感应电动势的方向与磁通方向应符合右手螺旋定则。

3) 变压器电动势：若线圈与磁场相对静止，穿过线圈的磁通随时间变化，在线圈中产生的感应电动势为变压器电动势

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-7)$$

4) 运动电动势：磁场本身是恒定的，穿过线圈磁通的变化是由于线圈运动而产生，则在线圈中感应的电动势为运动电动势

$$e = Blv \quad (1-8)$$

5) 自感电动势：当线圈中有交变电流通过时，穿过线圈的磁通也发生变化，在线圈中将产生感应电动势，这种由于线圈自身电流变化引起的感应电动势称为自感电动势。

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (1-9)$$

式中， L 是比例常数，称为线圈的自感系数，简称自感，单位为亨，符号为 H。

6) 互感电动势：线圈产生的感应电动势不是由于线圈自身电流变化引起，而是由于周围其他线圈中电流变化使穿过本线圈磁通变化而引起的，这种电动势称为互感电动势

$$e_{M1} = -M \frac{di_2}{dt} \quad (1-10)$$

$$e_{M2} = -M \frac{di_1}{dt} \quad (1-11)$$

式中， M 是比例常数，称为线圈 1 和 2 的互感系数，简称互感，单位为亨，符号为 H。

(3) 毕-萨电磁力定律

定律内容：载流导体在磁场中会受到力的作用，其所受力的大小为

$$f = Bli \quad (1-12)$$

受力方向应符合左手定则。

(4) 磁路欧姆定律

定律内容：作用在磁路上的总磁动势 F 等于磁路内磁通与磁路磁阻的乘积，即

$$F = \Phi R_m = \Lambda_m \Phi \quad (1-13)$$

式中， F 是磁路的磁动势，它是造成磁路中有磁通的根源，单位为安，符号为 A； R_m 是磁路磁阻， $R_m = \frac{l}{\mu A}$ ； Λ_m 是磁路磁导， $\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$ 。

(5) 磁路的基尔霍夫第一定律

定律内容：穿出（或进入）任一闭合面的总磁通恒等于零，或者说进入任一闭合面的磁通恒等于穿出该闭合面的磁通，即

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-14)$$

(6) 磁路的基尔霍夫第二定律

定律内容：沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁压降的代数和，即

$$\sum F = \sum Hl = \sum NI \quad (1-15)$$

式中，磁场方向与回路环行方向一致时， Hl 为正，否则为负；电流的方向与回路环行方向符合右手螺旋定则时， NI 为正，否则为负。

1.2 习题及解析

1-1 填空题

- (1) 用来产生磁通的电流叫_____，根据此电流性质不同，磁路可分为两种，一种是磁通恒定的磁路称为_____，另一种是磁通随时间变化的磁路称为_____。
- (2) 电机和变压器常用的铁心材料为_____。
- (3) 铁磁材料的磁导率_____非铁磁材料的磁导率。
- (4) 电机和变压器铁心常采用硅钢片，是因为硅钢片的磁滞回线面积_____。
- (5) 根据磁路欧姆定律，在磁路中与电路中的电动势源作用相同的物理量是_____。
- (6) 当外加电压大小不变而铁心磁路中的气隙增大时，对直流磁路，则磁通_____，电感_____，电流_____；对交流磁路，则磁通_____，电感_____，电流_____。
- (7) 磁性材料的铁损耗包括_____和_____。

1-2 选择题

- (1) 若硅钢片的叠片接缝增大，则其磁阻_____。
A. 增加 B. 减小 C. 基本不变
- (2) 电机和变压器运行时，在铁心材料周围的气隙中_____磁场。
A. 存在 B. 不存在 C. 不好确定
- (3) 磁路计算时如果存在多个磁动势，则对_____磁路可应用叠加原理。
A. 线性 B. 非线性 C. 所有的
- (4) 铁心叠片越厚，其损耗_____。
A. 越大 B. 越小 C. 与厚度无关

(5) 若线圈与磁场相对静止, 与线圈相交链的磁通随时间发生变化, 则在线圈中将

- _____。
- A. 产生运动电动势 B. 产生变压器电动势 C. 不产生感应电动势

1-3 判断题

- (1) 电机和变压器常用铁心材料为硅钢片, 是因为它们是软磁材料。()
- (2) 铁磁材料的磁导率小于非铁磁材料的磁导率。()
- (3) 在磁路中与电路中的电流作用相同的物理量是磁通密度。()
- (4) 在恒压交流铁心磁路中, 增大空气气隙时磁通不变。()
- (5) 磁通磁路计算时如果存在多个磁动势, 可应用叠加原理。()

1-4 基本磁化曲线与起始磁化曲线有何区别? 磁路计算时通常采用的是哪一种磁化曲线?

答: 如果铁磁材料以完全去磁的零状态放入磁场中进行磁化, 所得的 $B=f(H)$ 曲线为起始磁化曲线; 基本磁化曲线是对同一铁磁材料, 选择不同的磁场强度进行反复磁化, 得到一系列大小不同的磁滞回线, 再将各磁滞回线的顶点连接所得到的曲线。两者区别不大。工程上进行磁路计算时通常采用的是基本磁化曲线。

1-5 铁心中磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的? 它们的大小与哪些因素有关?

答: 磁滞损耗是由于铁磁材料在交变磁场作用下, 产生正、反向交替磁化过程, 在此过程中, 磁畴之间反复摩擦, 引起铁磁材料发热, 消耗能量而产生的损耗。它与通入线圈交流励磁电流的频率 f 、磁通密度幅值 B_m 及铁磁材料的体积等因素有关。

涡流损耗是由于通过铁心的磁通 Φ 发生变化时, 变化的磁通在铁心中产生感应电动势, 再由这个感应电动势引起电流 (涡流) 而产生的电损耗。它与磁通变化频率、铁磁材料电阻率、磁通密度幅值 B_m 及铁心硅钢片厚度等因素有关。

1-6 电机和变压器的铁心常采用什么材料制成, 这种材料有哪些主要特点?

答: 电机和变压器的铁心常采用硅钢片制成, 它的特点是磁导率高, 损耗小, 有饱和现象存在。

1-7 什么是软磁材料? 什么是硬磁材料?

答: 铁磁材料按其磁滞回线的宽窄可分为两大类: 软磁材料和硬磁材料。磁滞回线较宽, 即矫顽力大、剩磁也大的铁磁材料称为硬磁材料, 也称为永磁材料。这类材料一经磁化就很难退磁, 能长期保持磁性。常用的硬磁材料有铁氧体、钕铁硼等, 常用来制造永磁电机。磁滞回线较窄, 即矫顽力小、剩磁也小的铁磁材料称为软磁材料。电机铁心常用的硅钢片、铸钢、铸铁等都是软磁材料。

1-8 磁路的基本定律有哪些? 当铁心磁路上有几个磁动势同时作用时, 磁路计算能否用叠加原理, 为什么?

答: 磁路的基本定律有安培环路定律、磁路的欧姆定律、磁路的基尔霍夫第一定律和第二定律。当铁心磁路上有几个磁动势同时作用时, 磁路计算不能用叠加原理, 因为磁路是非线性的, 存在饱和现象, 叠加原理只能在线性情况下才可使用。

1-9 磁路的磁阻如何计算? 磁阻的单位是什么?

答: 磁路磁阻计算公式为

$$R_m = l/(\mu A)$$

式中, μ 是材料的磁导率; l 是材料的导磁长度; A 是材料的导磁面积。

磁阻的单位为 A/Wb 。

1-10 试比较磁路和电路的相似点和不同点。

答: 磁路和电路只是在形式上相似, 与电路比较, 磁路具有以下特点:

(1) 电流表示带电质点的运动, 它通过电阻时的功率损耗为 $I^2 R$ 。磁通不代表质点运动, $\Phi^2 R_m$ 也不代表功率损耗。

(2) 自然界存在着良好的对电绝缘的材料, 但尚未发现对磁通绝缘的材料。磁路没有断路情况, 即不存在有磁动势无磁通的现象。

(3) 空气也是导磁的, 磁路中存在漏磁现象。

(4) 含有铁磁材料的磁路几乎都是非线性的。一般地讲, 磁路问题是非线性的问题, 磁阻的概念和磁路欧姆定律只有在磁路中各段的材料都是线性的或可以作为线性处理的情况下才能适用。在精确的磁路计算中不用磁阻概念和磁路欧姆定律, 而是直接用全电流定律和各段材料的 $B-H$ 曲线。

1-11 变压器电动势、运动电动势、自感电动势和互感电动势产生的原因有什么不同? 其大小与哪些因素有关?

答: 在线圈中, 由于线圈交链的磁链 (线圈与磁动势相对静止) 发生变化而产生的电动势就叫变压器电动势。它与通过线圈的磁通的变化率成正比, 与自身的匝数成正比。由于导体与磁场发生相对运动切割磁力线而产生的感应电动势叫做运动电动势, 它与切割磁力线的导体长度、磁感应强度、切割速度有关。由线圈自身的磁场与本身相交链的磁通发生改变而在线圈内产生的感应电动势叫自感电动势, 它与自感系数 L 有关。互感电动势是由相邻线圈中电流的变化而引起本线圈所交链的磁通发生变化, 而在线圈所感应的电动势。它与两线圈的匝数、相隔距离、磁通 (互感磁通) 变化率等有关。

1-12 有两个匝数相等的线圈, 一个绕在闭合铁心上, 一个绕在木质材料上, 哪一个的自感系数大? 哪一个的自感系数是常数? 哪一个为变数? 它们受哪些因素影响?

答: 因为自感系数 $L = \Psi/i = N\Phi/i = N^2 \Phi/F = N^2/R_m$, 从上式可以看出自感系数 L 与线圈匝数 N^2 成正比, 与磁阻 R_m 成反比。对两个匝数相同的线圈, 铁的磁阻 R_m 远小于木质材料的磁阻 R_m , 所以铁心上绕组的自感系数大, 木质材料的自感系数小。因木质材料不存在饱和问题, 是线性的, 磁阻 R_m 不变, 铁的 R_m 随饱和程度要改变, 所以木质材料绕组的自感系数 L 为常数, 铁心绕组的自感系数 L 为变数。铁心绕组自感系数 L 为变数是因为当磁场强度 H 改变时 μ 变化而引起的, 即 $B-H$ 曲线不是线性关系。

1-13 在图 1-1 中, 当给线圈 N_1 外加正弦电压 U_1 时, 线圈内为什么会感应电动势? 当电流 i 增加和减小时, 感应电动势的实际方向是怎样的?

答: 当给线圈 N_1 外加电压 U_1 时, 在 N_1 线圈中产生交变电流 i , 此电流在 N_1 中产生交变磁通 Φ , 交变的磁通 Φ 通过线圈 N_2 , 在 N_2 线圈和 N_1 线圈中产生感应电动势 e_2 和 e_1 。根据楞次定律, 在电磁感应过程中, 感生电流所产生的磁通总是阻止原磁通的变化。即当磁通增加时, 感生电流所产生的磁通与原来磁通方向相反, 削弱原磁通的增长; 当磁通减少时, 感生电流产生的磁通与原来的磁通方向相同, 阻止原磁通减小。感生电流总是试图维持原磁通不变。所以, 当 i 增加时, 感生电流产生的磁通应该阻止磁通增加, 感应电动势 e_1 的方向是从 b 到 a , e_2 的方向是从 d 到 c ; 当 i 减小时, 感生电流产生的磁通应该阻止磁通减小,

感应电动势 e_1 的方向是从 a 到 b, e_2 的方向是从 c 到 d。

1-14 电磁感应定律有时写成 $e = -d\Psi/dt$, 有时写成 $e = -Ndi/dt$, 有时又写成 $e = -Ldi/dt$, 这 3 种写法之间有什么差别? 在什么情况下可以写成 $e = +d\Psi/dt$?

答: $e = -d\Psi/dt$ 是电磁感应定律的普遍表达式, 表示当通过线圈的磁通发生变化时, 将在线圈两端产生感应电动势, 习惯上规定感应电动势的正方向与感生电流产生的磁通的正方向符合右手螺旋定则; 当所有磁通与线圈全部匝数交链时, 则可写成 $e = -Ndi/dt$; 当磁路是线性, 且磁场是由电流产生时, 有 $\Psi = Li$, L 为常数, 则可写成 $e = -Ldi/dt$; 当 e 的假定正方向与 Φ 的正方向符合左手螺旋定则时, 电磁感应定律写成 $e = +d\Psi/dt$ 。

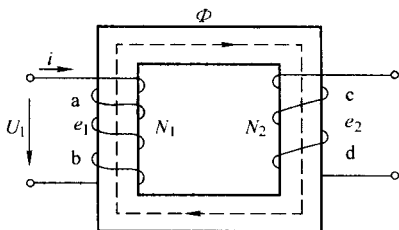


图 1-1 感应电动势及实际方向

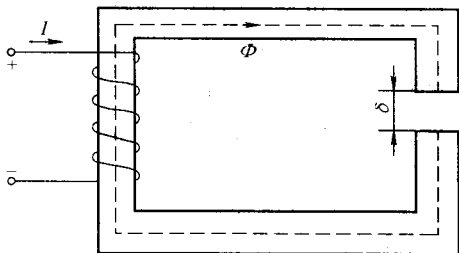


图 1-2 励磁磁动势和励磁电流

1-15 在图 1-1 中, 如果电流 i 在铁心中建立的磁通是 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 二次绕组匝数是 N_2 , 试求二次绕组内感应电动势有效值。

解: 二次绕组中感应电动势的瞬时值为

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \Phi_m \omega \cos \omega t$$

所以, 二次绕组感应电动势 e_2 的有效值为

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} N_2 \omega \Phi_m$$

1-16 在图 1-2 中, 铁心线圈截面积 $A_{Fe} = 12.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 铁心的平均长度 $l_{Fe} = 0.4 \text{ m}$, 铁心磁导率 $\mu_{Fe} = 5000\mu_0$, 空气隙长度 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, 线圈匝数为 600 匝, 试求产生磁通 $\Phi = 11 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时所需的励磁磁动势和励磁电流。

解: 线圈铁心中的磁通密度为

$$B_{Fe} = \frac{\Phi}{A_{Fe}} = \frac{11 \times 10^{-4}}{12.25 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.898 \text{ T}$$

线圈铁心中的磁场强度为

$$H_{Fe} = \frac{B_{Fe}}{\mu_{Fe}} = \frac{0.898}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 142.99 \text{ A/m}$$

铁心内部的磁位降为

$$F_{Fe} = H_{Fe} l_{Fe} = 142.99 \times 0.4 \text{ A} = 57.197 \text{ A}$$

在气隙处, 当不考虑气隙的边缘效应时, 气隙中和铁心中磁通密度相等, 即

$$B_0 = B_{Fe} = 0.898 \text{ T}$$

气隙处磁场强度为

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.898}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 7.15 \times 10^5 \text{ A/m}$$

故气隙处磁位降为

$$F_0 = H_0 \delta = 7.15 \times 10^5 \times 0.5 \times 10^{-3} \text{ A} = 357.5 \text{ A}$$

则总励磁磁动势为

$$F = F_{Fe} + F_0 = (57.197 + 357.5) \text{ A} = 414.697 \text{ A}$$

所需励磁电流为

$$I_f = \frac{F}{N} = \frac{414.697}{600} \text{ A} = 0.691 \text{ A}$$

从计算中可以看出,虽然气隙很小,但由于其磁场强度很大,大部分磁动势降落在气隙上;或者说,由于气隙磁阻较铁心磁阻大得多,所以其上的磁位降也大。

1-17 在图 1-3 中,铁心用 D23 型硅钢片叠成,铁心的叠片系数为 0.91,各部分尺寸单位为 cm, N 为 200 匝,试求产生磁通 $\Phi = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 时,所需的励磁电流。D23 型硅钢片的磁化曲线如表 1-1 所示。

表 1-1 D23 型硅钢片磁化曲线 (50Hz、0.5mm)

$H/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-1})$	1.38	1.81	2.5	3.83	6.52	12.6	37.6	122
B/T	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8

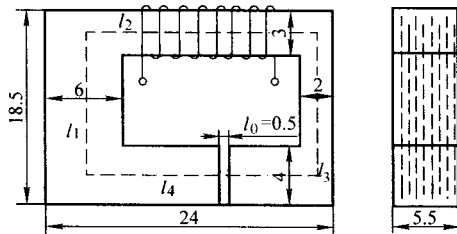


图 1-3 磁路和励磁电流

解: 根据磁路截面积和材料的不同,将磁路分为 5 段,并由磁路中心线计算出各段长度分别为

$$l_1 = l_3 = \left[18.5 - \frac{1}{2}(4 + 3) \right] \times 10^{-2} \text{ m} = 0.15 \text{ m}$$

$$l_2 = \left[24 - \frac{1}{2}(6 + 2) \right] \times 10^{-2} \text{ m} = 0.2 \text{ m}$$

$$l_0 = 0.5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$l_4 = l_2 - l_0 = (0.2 - 0.5 \times 10^{-2}) \text{ m} = 0.195 \text{ m}$$

铁心的叠片系数为 0.91,考虑叠片系数后磁路的有效厚度为

$$b = 5.5 \times 0.91 \times 10^{-2} \text{ m} = 0.05 \text{ m}$$

各段磁路截面积分别为

$$A_1 = 5 \times 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_2 = 5 \times 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_3 = 5 \times 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_4 = 5 \times 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_0 = (5 + 0.5) \times (4 + 0.5) \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2.475 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

计算气隙的有效截面积时, 考虑气隙磁场的边缘效应, 每边加长 l_0 。
各段磁路的磁通密度分别为

$$B_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{3 \times 10^{-3}} \text{ T} = 0.6 \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{1.5 \times 10^{-3}} \text{ T} = 1.2 \text{ T}$$

$$B_3 = \frac{\Phi}{A_3} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} \text{ T} = 1.8 \text{ T}$$

$$B_4 = \frac{\Phi}{A_4} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-3}} \text{ T} = 0.9 \text{ T}$$

$$B_0 = \frac{\Phi}{A_0} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{2.475 \times 10^{-3}} \text{ T} = 0.7273 \text{ T}$$

由磁化曲线求出各段铁心中相应的磁场强度分别为

$$H_1 = 181 \text{ A/m}$$

$$H_2 = 652 \text{ A/m}$$

$$H_3 = 12200 \text{ A/m}$$

$$H_4 = 306 \text{ A/m}$$

气隙中的磁场强度为

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.7273}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 579060 \text{ A/m}$$

各段磁路所需磁动势分别为

$$F_1 = H_1 l_1 = 181 \times 0.15 \text{ A} = 27.15 \text{ A}$$

$$F_2 = H_2 l_2 = 652 \times 0.2 \text{ A} = 130 \text{ A}$$

$$F_3 = H_3 l_3 = 12200 \times 0.15 \text{ A} = 1830 \text{ A}$$

$$F_4 = H_4 l_4 = 306 \times 0.195 \text{ A} = 59.67 \text{ A}$$

$$F_0 = H_0 l_0 = 579060 \times 0.5 \times 10^{-2} \text{ A} = 2895 \text{ A}$$

所需总磁动势为

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_0 \\ &= (27.15 + 130 + 1830 + 59.67 + 2895) \text{ A} \\ &= 4942 \text{ A} \end{aligned}$$

所需励磁电流为

$$I = \frac{F}{N} = \frac{4942}{200} \text{ A} = 24.71 \text{ A}$$

1-18 磁路结构如图 1-4 所示, 铁心截面积 $A = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 图中各部分尺寸单位为 mm, 欲在气隙中建立 $7 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 的磁通, 问需要多大的磁动势?

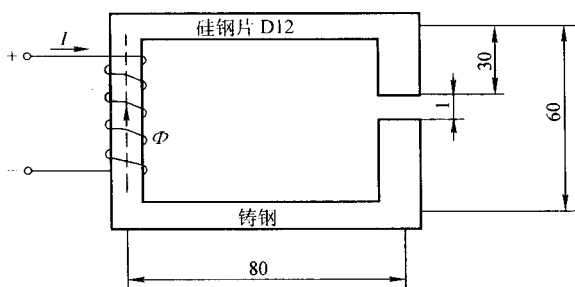


图 1-4 磁路结构

解：当在气隙处不考虑边缘效应时，各处的磁通密度为

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{7 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.4 \text{ T}$$

硅钢片磁路长度为

$$l_D = (30 + 80) \text{ mm} = 110 \text{ mm}$$

铸钢磁路长度为

$$l_r = (30 + 80 + 60 - 1) \text{ mm} = 169 \text{ mm}$$

查磁化曲线有硅钢片磁场强度为

$$H_D = 2.09 \text{ A/mm}$$

铸钢磁场强度为

$$H_r = 1.88 \text{ A/mm}$$

气隙中磁场强度为

$$H_0 = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1.4}{4\pi \times 10^{-4}} \text{ A/mm} = 1.11 \times 10^3 \text{ A/mm}$$

各段磁路上的磁位降分别为

$$F_D = H_D l_D = 2.09 \times 110 \text{ A} = 229.9 \text{ A}$$

$$F_r = H_r l_r = 1.88 \times 169 \text{ A} = 389.0 \text{ A}$$

$$F_0 = H_0 l_0 = 1110 \times 1 \text{ A} = 1110 \text{ A}$$

则总磁动势为

$$F = F_0 + F_D + F_r = (1110 + 229.9 + 389.0) \text{ A} = 1728.9 \text{ A}$$

故需要总磁动势为 1728.9 A。

参考答案

1-1 (1) 励磁电流, 直流磁路, 交流磁路。

(2) 软磁材料。

(3) 远大于。

(4) 小。

(5) 磁动势。

(6) 减小, 减小, 不变, 不变, 减小, 减小。

(7) 磁滞损耗, 涡流损耗。

1-2 (1) A (2) A (3) A (4) A (5) B

1-3 (1) ✓ (2) × (3) × (4) ✓ (5) ×

第2章 变 压 器

2.1 变压器的基本运行原理

2.1.1 学习指导

1. 主要内容

(1) 变压器主要额定参数

1) 额定容量 S_N : 变压器的额定视在功率, 单位为伏安 (VA) 或千伏安 (kV·A)。对三相变压器, 额定容量指三相总容量。

2) 额定电压 U_{1N}/U_{2N} : 单位为伏 (V) 或千伏 (kV)。注意: 二次额定电压指变压器一次侧施加额定电压 U_{1N} 时二次侧的空载电压。对三相变压器, 额定电压均为线电压。

3) 额定电流 I_{1N}/I_{2N} : 单位为安 (A) 或千安 (kA), 额定电流为线电流。

对单相变压器有

$$S_N = U_{1N}I_{1N} = U_{2N}I_{2N} \quad (2-1)$$

对三相变压器有

$$S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N} \quad (2-2)$$

(2) 变压器的空载运行

1) 几个基本概念

- 空载运行: 变压器一次绕组接交流电源, 二次绕组开路。

- 空载电流: 变压器空载运行时, 二次绕组开路, 二次电流为零, 此时一次绕组的电流叫空载电流。

- 主磁通和漏磁通: 同时交链一、二次绕组的磁通为主磁通, 只交链一次绕组或二次绕组的磁通为漏磁通。

2) 变压器空载运行的基本工作原理: 单相变压器空载运行原理如图 2-1 所示。当变压器一次绕组接入交流电源 u_1 , 一次绕组有交流电流 i_0 , 此交流电流产生交变磁通。交变磁通绝大部分同时交链一、二次绕组, 为主磁通 Φ , 一小部分只交链一次绕组为一次绕组的漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 。交变磁通在绕组中均感应电动势, 主磁通在一、二次绕组感应电动势 e_1 和 e_2 , 漏磁通只在一次绕组感应电动势 $e_{1\sigma}$ 。

所以, 变压器的基本工作原理是利用电磁感应定律, 将一次侧的电能通过电磁感应作用传递到二次侧, 而一、二次侧之间没有电的联系。由于直流电流不能产生交变磁通, 也就不能在绕组中感应电动势。

图 2-2 所示为变压器空载运行时的电磁关系。

3) 一、二次绕组感应电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44fN_1\phi_m \quad (2-3)$$

$$E_2 = 4.44fN_2\phi_m \quad (2-4)$$

一、二次绕组感应电动势分别滞后产生它们的主磁通 90° 。

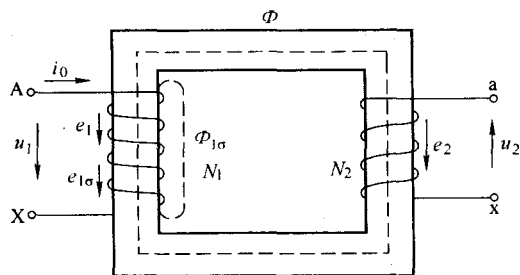


图 2-1 单相变压器空载运行原理

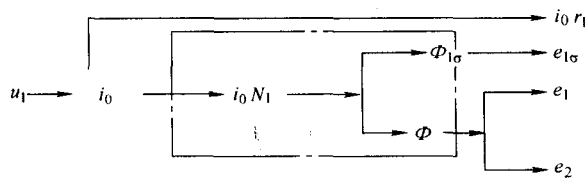


图 2-2 变压器空载运行时的电磁关系

4) 空载时电动势方程:

一次侧电动势方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (2-5)$$

式中, R_1 、 X_1 是一次绕组的电阻和漏电抗; Z_1 是一次绕组的漏阻抗。

对于一般电力变压器, 空载电流在一次绕组中引起的漏抗压降 $\dot{I}_0 Z_1$ 很小, 分析变压器空载运行时可忽略, 这样, 一次侧电动势方程可简化为

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (2-6)$$

式 (2-6) 表明, 变压器外施电压和感应电动势大小相等, 相位相反。根据公式 $E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ 可知, 在频率和绕组匝数一定时, 感应电动势大小决定于主磁通, 而由于 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$, 所以主磁通大小主要取决于外加电压的大小, 与变压器所用材料和尺寸等无关。对于已制成的变压器, 当 U_1 、 f 一定时, 其主磁通基本不变, 则产生主磁通的励磁电动势也基本不变。

二次侧电动势方程为

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (2-7)$$

变压器电压比 K 的定义: 一次侧电动势与二次侧电动势之比

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2-8)$$

变压器电压比也等于一、二次绕组匝数比, 在空载时, 可近似用一、二次电压之比来表示

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} \quad (2-9)$$

5) 变压器的空载电流: 空载电流又叫励磁电流, 主要用来建立主磁通, 它包括有功分量铁耗电流 $\dot{I}_{Fe}$ 和无功分量磁化电流 $\dot{I}_m$ 两部分。

在电力变压器中, 磁化电流 $\dot{I}_m$ 远远大于铁耗电流 $\dot{I}_{Fe}$, 所以可近似认为空载电流 $\dot{I}_0$ 即是磁化电流 $\dot{I}_m$ 。由于变压器铁心饱和的影响, 要产生正弦波的磁通, 变压器的励磁电