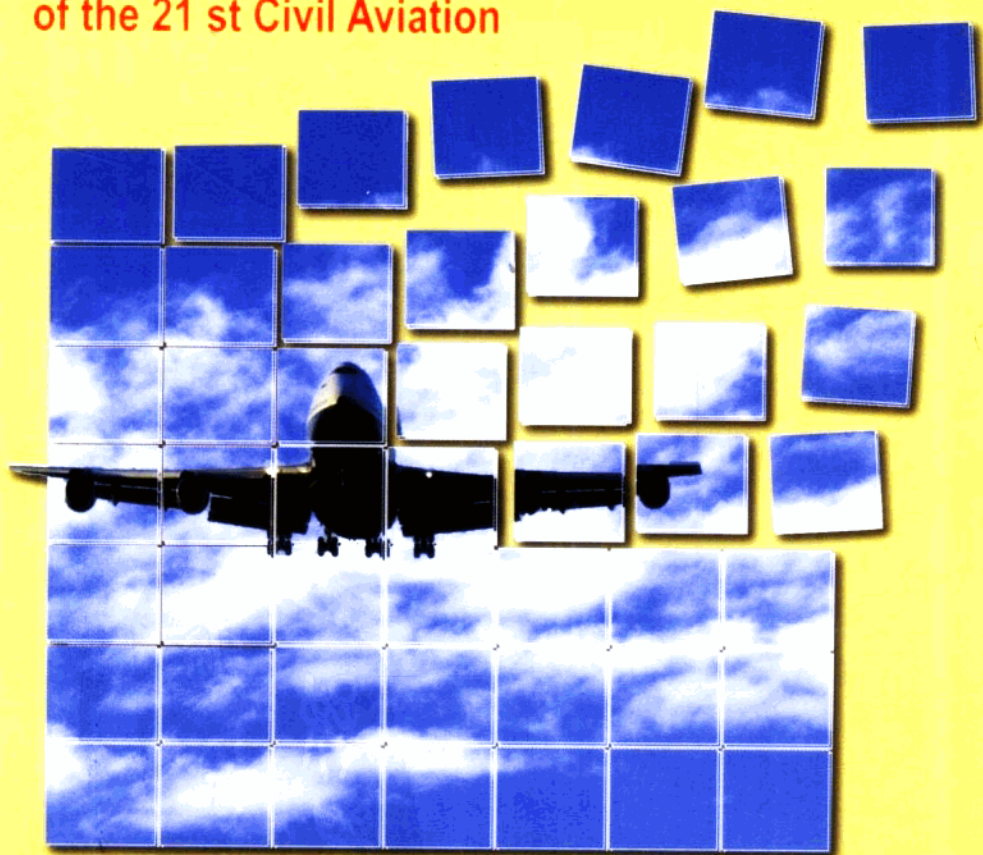


21 世纪民航高等教育系列教材

航空电机及电气传动

刘荣林 彭若梅 编

Textbook Series of the Higher Education
of the 21 st Civil Aviation



兵器工业出版社

航空电机及电气传动

刘荣林 彭若梅 编

兵器工业出版社

内 容 简 介

全书共9章,主要包括航空电机理论和航空电气传动两部分。第一部分主要介绍航空变压器、航空直流电机、航空感应电机和航空同步电机。由于电路课是电专业的通用课程,一般只讲电路不讲磁路,故在本书中加入了磁路一章;第二部分主要介绍电器传动的基础知识、直流电器传动和交流电器传动等内容。

本书重点突出,联系实际,内容简练,易于自学。在介绍航空电机及电气传动的同时,兼顾地面设备的分析,以适应当前拓宽航空院校学生知识面的需要。

图书在版编目(CIP)数据

航空电机及电气传动/刘荣林,彭若梅编. —北京:
兵器工业出版社, 2005. 10

ISBN 7-80172-513-1

I. 航... II. ①刘... ②彭... III. ①航空电气设备
- 电机学②航空电气设备 - 电力传动 IV. V242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 082814 号

出版发行: 兵器工业出版社
发行电话: 010-68962596, 68962591
邮 编: 100089
社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京瑞达方舟印务有限公司
版 次: 2005 年 10 月第 1 版第 1 次印刷
印 数: 1—1050

责任编辑: 朱丽均
封面设计: 底晓娟
责任校对: 赵春云
责任印制: 王京华
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 17.5
字 数: 402 千字
定 价: 40.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

按照新的教学计划编写的《航空电机及电气传动》一书是航空院校电气工程及自动化专业教材，主要供本科学生使用，也可供航空院校的高等职业技术学院、成人教育学院的学生使用，对于航空维修专业人员以及专业培训人员是一本非常实用的参考书。

全书包括航空电机理论基础和航空电气传动两部分。第一部分主要介绍航空变压器、航空直流电机、航空感应电机和航空同步电机。由于现行电路课是电专业的通用课程，一般只讲电路不讲磁路，故在书中加入了磁路一章。第二部分主要介绍电气传动的基础知识、直流电气传动和交流电气传动。讲述时可以按书中的顺序，也可以在讲完每一种电机的理论知识之后接着讲述适应这种电机的电气传动内容。

本书编写力求突出重点，联系实际，内容简练，易于自学。在介绍航空电机及电气传动的同时，兼顾地面设备的分析，以适应当前拓宽航空院校学生知识面的需要。

书中第1、2、3、4、5、6章由刘荣林编写，第7、8、9章由彭若梅编写，臧小杰教授和罗云林教授详细地审阅了书稿，并做了精心的修改。

本书编写过程中，杨芳春教授提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。对书中的错误和不妥之处，殷切希望读者指正。

本书为行业用书，为与实践相适应，书中个别地方仍保留了原单位量的使用。

编 者

2005年3月于天津

目 录

第1章 磁路	(1)
第1.1节 磁路的基本定律	(1)
第1.2节 材料的磁性及磁性材料	(4)
第1.3节 恒定磁通磁路的计算	(6)
思考题与习题	(8)
第2章 航空变压器	(9)
第2.1节 变压器的基本结构和额定值	(9)
第2.2节 变压器的空载运行	(12)
第2.3节 变压器负载运行的电磁关系	(16)
第2.4节 变压器的基本方程和等效电路	(18)
第2.5节 变压器参数的测定及标么值	(24)
第2.6节 变压器的运行特性	(28)
第2.7节 三相变压器	(30)
第2.8节 变压器的并联运行	(32)
第2.9节 自耦变压器	(34)
第2.10节 仪用互感器	(35)
思考题与习题	(37)
第3章 航空直流电机	(39)
第3.1节 直流电机的工作原理和结构	(39)
第3.2节 直流电机的绕组	(44)
第3.3节 直流电机的空载磁场及电枢电动势	(51)
第3.4节 直流电机的电枢反应和电磁转矩	(52)
第3.5节 直流发电机	(55)
第3.6节 直流电动机	(61)
第3.7节 直流电机的换向	(66)
思考题与习题	(70)
第4章 交流电机的绕组及磁动势	(72)
第4.1节 交流绕组的分类和构成原则	(72)
第4.2节 三相双层绕组	(72)

第4.3节 三相单层绕组	(75)
第4.4节 交流绕组的联接及感应电动势	(77)
第4.5节 交流绕组的磁动势	(84)
思考题与习题	(92)
第5章 航空感应电机	(93)
第5.1节 感应电机概述	(93)
第5.2节 三相感应电机的运行原理	(96)
第5.3节 感应电机的参数测定	(100)
第5.4节 感应电动机的功率、转矩和特性	(102)
第5.5节 单相感应电动机	(106)
思考题与习题	(110)
第6章 航空同步电机	(112)
第6.1节 航空同步发电机的基本结构和额定数据	(112)
第6.2节 同步发电机的空载特性及电枢反应	(114)
第6.3节 同步发电机的电压方程、等效电路和相量图	(119)
第6.4节 同步发电机的功率、转矩	(123)
第6.5节 航空单相同步发电机	(124)
第6.6节 同步发电机的并联运行	(125)
思考题与习题	(132)
第7章 电气传动基础知识	(134)
第7.1节 电气传动系统的运动方程	(134)
第7.2节 负载机械特性与电机工作制	(142)
第7.3节 电气传动系统稳定性	(146)
第7.4节 电动机调速的概念和指标	(149)
思考题与习题	(151)
第8章 直流电气传动	(153)
第8.1节 他励直流电动机的机械特性	(153)
第8.2节 他励直流电动机的起动	(159)
第8.3节 他励直流电动机的制动	(164)
第8.4节 电气传动系统的过渡过程	(172)
第8.5节 串励直流电动机的机械特性	(184)
第8.6节 他励直流电动机调速	(187)
第8.7节 单、双闭环直流调速系统	(194)
思考题与习题	(201)

第9章 交流电气传动	(204)
第9.1节 三相异步电动机的机械特性	(204)
第9.2节 三相异步电动机的起动	(210)
第9.3节 三相异步电动机的制动	(222)
第9.4节 三相异步电动机的调速	(229)
第9.5节 三相异步电动机变频调速	(237)
第9.6节 矢量变换调速	(240)
思考题与习题	(243)
参考文献	(245)

第 1 章 磁 路

电机和变压器都是能量或信号转换的电磁装置，以磁场为媒介：电动机将电能转换成机械能；发电机将机械能转换为电能；变压器将一种电压等级的电能转换为另一种电压等级的电能。在这些电磁装置中，磁场最大限度地被约束在磁路中，绝大多数的分析和计算都是以磁路为基础。因此，在本章中只以路的观点引出磁路分析和计算问题，而不是去精确地分析复杂的磁场分布问题。

第 1.1 节 磁路的基本定律

1.1.1 磁场与磁路

磁极受到作用力的空间称为磁场。磁场可以由磁极产生也可由电流产生，当一个无限细长的螺线管，每米 W 匝，通入电流 i 时，在螺线管中心处的磁场强度 H 为：

$$H = Wi \quad (1-1)$$

电流的单位是安培 (A)，磁场强度的单位用安培每米 (A/m) 来表示。

磁感应强度 B (亦称磁通密度) 的大小与介质特性有关：

$$B = \mu H \quad (1-2)$$

式中 μ 是介质的磁导率，单位是亨每米 (H/m)。

磁场在三维空间符合安培环路定律和磁通连续性定律

$$\oint_L H dL = \sum i \quad (1-3)$$

$$\oint_S B ds = 0 \quad (1-4)$$

式 (1-3) 是安培环路定律：沿着任何一条闭合路径上磁场强度的线积分，等于穿过该闭合路径内的导体电流的代数和，物理意义如图 1-1 所示。式 (1-4) 说明：通过任意闭合曲面的磁通量必为零，即磁通量处处连续。

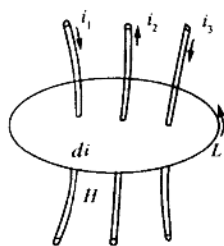


图 1-1 安培环路定律

在电机和变压器里，常把线圈装在铁心上。当线圈内通有电流时，在线圈周围的空间就会形成磁场。为了让磁通按照我们所设计的路径走，铁心选用高导磁性能的铁磁性物质，这样一来，绝大部分磁通将在铁心内通过，这部分磁通称为主磁通。主磁通走过的路径称为磁路。如果忽略漏磁通，三维空间的磁场问题简化为磁路问题。本书主要从路（电路及磁路）的观点分析电机及变压器运行时所发生的物理过程，所以分析和计算时所用到的主要知识是电路和磁路。

1.1.2 磁路的基本定律

一、磁动势

电生磁是一种物理现象，产生磁通的源称为磁动势，用 F 表示。假设一个铁磁性闭合磁路，如图 1-2 (a) 所示，一侧绕有 W 匝线圈，线圈中通有电流 i ，则磁路内必有磁通，磁动势的大小为 $F = Wi$ ，单位为安培 (A)。

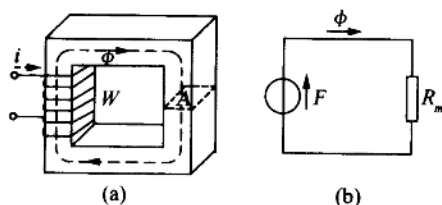


图 1-2 无分支铁心磁路

(a) 无分支铁心磁路；(b) 等效磁路图

由安培环路定律，沿着磁通回线 L ，若磁场强度处处相等，且闭合回线所包围的总电流是 $Wi = F$ ，所以

$$F = Wi = HL \quad (1-5)$$

上式可以理解为由激磁线圈所建立的磁动势与降落在磁路内的磁压降相等。

二、磁路的欧姆定律

若单闭合磁路 [见图 1-2 (a)] 铁心截面积为 $S(\text{m}^2)$ ，磁路的平均长度为 $L(\text{m})$ ，材料的磁导率为 μ ；不计漏磁通，并认为各截面上的磁通密度均匀、且垂直于各截面，则磁通量 $\Phi(\text{Wb})$ 与磁感应强度 B 的关系式为：

$$\Phi = SB \quad (1-6)$$

再考虑式 (1-2) 和式 (1-5) 可得：

$$F = HL = \frac{B}{\mu} L = \Phi \frac{L}{\mu S} \quad (1-7)$$

定义磁阻 R_m (A/Wb) 为:

$$R_m = \frac{L}{\mu S} \quad (1-8)$$

可得磁路的欧姆定律

$$F = \Phi R_m = \frac{\Phi}{\Lambda} \quad (1-9)$$

式中 Λ 为磁路的磁导, 单位为 (Wb/A), 它是磁阻的倒数。

式 (1-9) 表明, 作用在磁路上的磁动势 F 等于磁路内的磁通量 Φ 与磁阻 R_m 的乘积, 或者说, 磁通量 Φ 等于磁动势 F 和磁导 Λ 的乘积。此关系与电路中的欧姆定律十分相似, 因此式 (1-9) 亦称为磁路的欧姆定律。这里, 我们把磁路中的磁动势 F 比拟于电路中的电动势 E , 磁通量 Φ 比拟于电流 I , 磁阻 R_m 和磁导 Λ 分别比拟于电阻 R 和电导 G 。图 1-2 (b) 所示为无分支磁路的等效磁路图。

磁阻 R_m 与磁路的平均长度 L 成正比, 与磁路的截面积 S 及构成磁路材料的磁导率 μ 成反比, 这与导体电阻 R 的计算公式极为相似, 但是需要注意的是, 铁磁材料的磁导率 μ 不是常数, 所以由铁磁材料构成的磁路其磁阻亦非常值, 而是随着磁路中磁感应强度的大小而变化, 故 F 与 Φ 为非线性关系, 若考虑非线性, 通常利用查磁化曲线求解较为方便。

三、磁路的基尔霍夫定律

如果是多分支磁路, 如图 1-3 所示。假设中间铁心柱上加有磁动势 F , 磁通的路径将如图中虚线所示。令进入闭合面 S 的磁通为负、穿出闭合面的磁通为正, 对于图 1-3 中的闭合面 S 可写出等式:

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

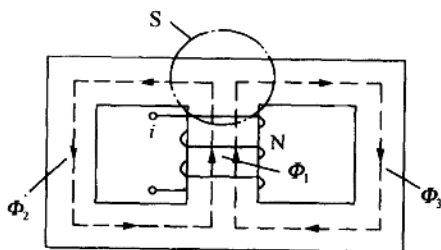


图 1-3 有分支磁路

不难证明, 对于具有 k 个分支路汇集成的磁路节点, 一定有

$$\sum \Phi_k = 0 \quad (1-10)$$

式 (1-10) 表明, 穿出 (或进入) 任一闭合面的总磁通量恒等于零 (或者说, 进入任一闭合面的磁通量恒等于穿出该闭合面的磁通量), 这是磁通连续性定律在磁路中的表示。它与电路中的基尔霍夫第一定律极其相似, 该定律亦为磁路的基尔霍夫第一定律。

电机和变压器的磁路总是由数段不同截面、不同铁磁材料的铁心和气隙组成。磁路计算时, 总是根据磁通的走向, 把整个磁路分成若干段, 每段为同一材料、相同截面积、假设同段内磁通密度处处相等 (磁路计算的基本假设), 从而磁场强度亦处处相等。当积分环路由磁路段的中心线组成时, k 段磁路组成的磁回路的安培环路定律变为如下形式:

$$\begin{aligned}
 \oint H dl &= H_1 L_1 + H_2 L_2 + \cdots + H_k L_k \\
 &= \sum H_k L_k \\
 &= \sum W_i
 \end{aligned}$$

或写成如下形式:

$$\sum HL = \sum F \quad (1-11)$$

式(1-11)称为磁路的基尔霍夫第二定律,可叙述为:磁路中由磁路段的中心线组成的环路上各磁路段的 HL 的代数和等于中心线(环路)交链的磁动势的代数和。它与电路中的基尔霍夫第二定律形式类同,也是安培环路定律的另一种表达形式。

第 1.2 节 材料的磁性及磁性材料

电机里常用两种磁性能差异较大的材料:磁性材料和非磁性材料。

一、非磁性材料

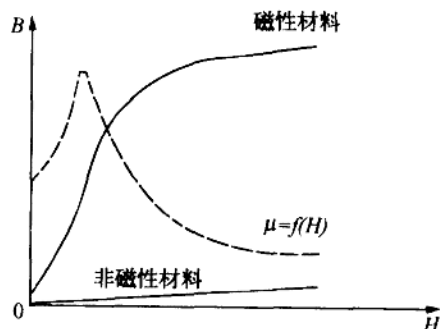


图 1-4 材料磁特性

如空气隙、绝缘材料以及铜、铝等都是非磁性材料。它们的磁导率很小,与真空的磁导率 μ_0 近似

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

这是一个恒定不变的常量,所以这类材料的磁性是线性的,如图 1-4 所示。

二、磁性材料

工程上常用的磁性材料主要是指铁、钴、镍等元素及其合金,所以也称“铁磁材料”。它可分两类:一类是软磁材料,如纯铁、电工钢;另一类是硬磁材料,如永久磁铁。

磁性材料的磁导率比空气大很多,是良导体,因此广泛用于电机磁路,以大大减小磁化电流。这种材料具有非线性特性,典型的磁化特性曲线 $B=f(H)$ 如图 1-4 所示。由曲线可见其磁导率 μ 随磁场强弱而变化,当 H 较大时,磁导率将随 H 增大而减小,这称为“饱和现象”。电机所采用的电工钢,其饱和磁感应强度大约为 1.8~2.4T,最大磁导率可达 μ_0 的 2000 倍以上。

铁磁材料完整的磁化特性还具有磁滞现象,如图 1-5 所示。磁性材料在往返磁化过程中特性不重复,交变磁化一周就要消耗一定的能量,通常称为“磁滞损耗”。磁滞回线的面积愈大则磁滞损耗愈大,损耗的大小与回线的面积成正比。

按照磁滞回线形状的不同,铁磁材料可分为软磁材料和硬磁材料两大类。

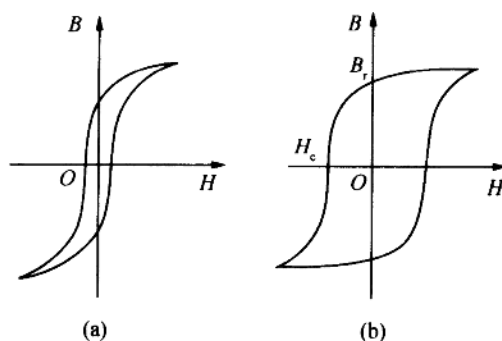


图 1-5 磁滞回线

(a) 软磁材料; (b) 硬磁材料

软磁材料磁滞回线窄、剩磁和矫顽力都小，回线如图 1-5 (a) 所示。常用的软磁材料有铸铁、钢和硅钢片等。软磁材料的磁导率较高，常用以制造电机和变压器的铁心。为了减小涡流损耗，铁心轧成薄钢片（厚度常为 0.5 或 0.35mm），这样可以限制涡流损耗。磁滞损耗和涡流损耗合在一起称为“铁损耗”。材料铁耗的大小可由一定频率和一定幅值的磁感应强度下单位体积的铁耗（即铁耗系数）来表示。不同的软磁材料有不同的铁耗系数，它是材料性能的重要指标。航空电机磁负荷大，且转速高、频率多为中频，因此一般采用铁耗系数小的软磁材料，厚度在 0.35mm 以内。另外，在一些小型航空变压器和微电机中需要高导磁材料，因此常常选用很薄的铁镍合金片。

硬磁材料的特点是磁滞回线宽，如图 1-5 (b) 所示，由于剩磁大，可用以制成永久磁铁，因而硬磁材料也称为永磁材料。一经充分磁化后，就有相当高的剩余磁感应强度 B_r 和很大的矫顽磁场强度 H_c ，因此可以作为磁动势源，做成永磁电机的主磁极。

三、磁性材料的损耗

铁磁材料置于交变磁场中时，材料被反复交变磁化，与此同时，磁畴相互间不停地摩擦、消耗能量，这种损耗称为磁滞损耗。

磁滞损耗与磁场交变的频率 f 、铁心的体积 V 和磁滞回线的面积成正比。对同一铁心，磁感应强度的最大值 B_m 越大，磁滞回线面积越大，通常，此面积与磁感应强度的 n 次方成正比，磁滞损耗可以写成：

$$p_h = C_h f B_m^n V \quad (1-12)$$

磁滞损耗系数 C_h 取决于材料的性质， n 也与材料有关，对于电工钢，一般在 1.6 ~ 2.3 左右。

涡流损耗是由于交变磁通在铁心内部产生的涡电流而引起的损耗，它的大小与频率的平方、磁感应强度的平方、钢片厚度的平方成正比，还与材料有关：

$$p_e = C_e d^2 f^2 B_m^2 V \quad (1-13)$$

式中 C_e ——涡流损耗系数；

d ——钢片厚度。

磁滞损耗与涡流损耗之和，称为铁心损耗，用 p_{Fe} 表示，在近似计算中也可用下式：

$$p_{Fe} = p_h + p_e \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \quad (1-14)$$

式中 C_{Fe} ——铁心的损耗系数；

G ——铁心重量。

上式表明，铁心损耗与频率的 1.3 次方、磁通密度的平方和铁心重量成正比。

第 1.3 节 恒定磁通磁路的计算

通常把计算电机和变压器的磁路问题分为两大类：（1）先给定磁通（或磁感应强度），然后按照所给定的磁通及磁路各段的尺寸和材料去求所需要的磁动势。（2）已知磁动势，根据要求，求出磁路中的磁通或磁感应强度。

恒定磁通磁路是指磁路中各励磁线圈的电流是直流，就是说磁路中的磁通和磁动势都是恒定的。

首先介绍无分支恒定磁通磁路的计算。无分支磁路的主要特点是在不计漏磁通时，磁路中主磁通处处相等，其计算可按下述步骤进行：

（1）根据磁路中各部分的材料和截面积进行分段，要求每一段磁路是均匀的，即具有相同材料和截面积。

（2）根据磁路尺寸算出各段的截面积 S 和平均长度 L （一般沿中心线计算）。在计算截面积时，必须注意由涂有绝缘漆的硅钢片叠压成的铁心，根据几何尺寸计算出来的面积是视在面积。磁通过去的面积应按有效面积来计算，所以应除去叠片间绝缘漆的厚度。设填充系数为 K ，则有效面积 $= K \times$ 视在面积。 K 值的大小与绝缘漆厚度有关，一般约在 0.9 左右。

（3）根据已知的磁通 Φ 计算各段的磁感应强度 $B = \Phi/S$ 。

（4）根据每一段的磁感应强度 B 求磁场强度 H 。对于铁磁材料可查基本磁化曲线，对于空气隙，用公式 $H = B/\mu_0$ 计算。

（5）根据每一段的磁场强度 H 和平均长度 L 求出每一段的磁压降 HL 数值。

（6）按照磁路的基尔霍夫第二定律求出所需要的总磁动势。

如果是先给定磁动势 F_m ，要求出该磁动势在磁路中产生的总磁通 Φ ，这类问题通常可以采用试探法或图解法，若采用试探法，计算步骤如下：

（1）先假定一个磁通量的预估值 Φ' ；

（2）按上例计算顺序求出相应的励磁磁动势 F' ；

（3）将 F' 与给定的磁动势 F 比较，如果不相等，重新假定一个磁通量 Φ'' ；

（4）重新计算相应的磁动势 F'' ，再与 F 比较，如果 $F'' = F$ ，则 Φ'' 就是待求的磁通量；否则继续试探，直到求出相应的总磁通。

图 1-6 所示为一个有分支的恒定磁通磁路，它的计算比无分支磁路要复杂一些，以该图为例，简述计算方法和思路。

如果给定的为通过空气隙的磁通为 Φ_2 ，则可直接求出所需磁动势。

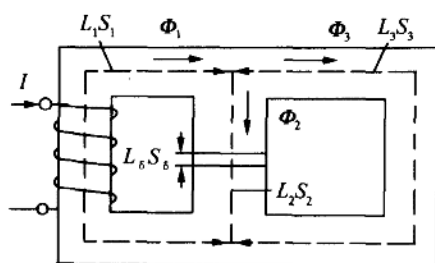


图 1-6 有分支磁路

根据磁路基尔霍夫第二定律，要明确其磁动势平衡关系式：

$$F_m = Wi = H_1 L_1 + H_3 L_3 \quad (1-15)$$

$$H_3 L_3 = H_2 L_2 + H_\delta L_\delta \quad (1-16)$$

主要求解步骤如下：

- (1) 从给定的 Φ_2 可以求得 B_2 和 B_δ ， $B_2 = \Phi_2 / S_2$ ；
- (2) 从相应的基本磁化曲线查出 H_2 ， H_δ 也可求得；
- (3) 求出 H_3 ， $H_3 = (H_2 L_2 + H_\delta L_\delta) / L_3$ ；
- (4) 由磁化曲线查出 B_3 ，并可求得 $\Phi_3 = B_3 S_3$ ；
- (5) 根据磁路基尔霍夫第一定律，求出 Φ_1 ， $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$ ；
- (6) 由式 $B_1 = \Phi_1 / S_1$ ，求出 B_1 ，再查磁化曲线求出 H_1 ；
- (7) 最后求得磁动势 F_m ， $F_m = H_1 L_1 + H_3 L_3$ ，即所需的励磁安匝数 $Wi = F_m$ 。

如果给定的是其他支路的磁通，则有一部分要采用试探法计算。如果给定的是磁动势求各支路磁通，则必须用试探法或图解法来求。

有关交变磁通磁路（交流磁路）的分析和计算将在变压器的章节里叙述，因为变压器是典型的具有交变磁通磁路的设备。

思考题与习题

1. 简述全电流定律、电磁感应定律。
2. 试述磁路基尔霍夫第一定律和第二定律。
3. 简述磁性材料的分类和特性。
4. 铁心损耗是怎样产生的？其大小都与哪些因素有关？

第2章 航空变压器

在航空配电系统中,有时需要改变交流电的电压、电流或阻抗,这项任务通常由航空变压器来完成。变压器通过磁路的耦合作用把交流电从原边输送到副边,利用绕制在同一铁心上的原绕组和副绕组匝数的不同,把原绕组的电压和电流从某种电压等级改变为副绕组的另外一种等级。

现代飞机大多采用了交流供电,主电网为 208/115 V、400 Hz。但飞机上的用电设备种类繁多,所需的电源电压也各不相同,如陀螺仪及机上照明为 36 V,通讯、雷达、控制保护等设备所用的电压种类则更多了,此外还需要用变压整流器获得各种电压的直流电。这些都要依靠变压器来完成。

变压器在国民经济各部门广泛应用。例如在输电工程中,由于发电机是旋转机械,电压不宜过高,大容量发电机一般为 10.5 ~ 20 kV,而要把大功率的电能从发电厂输送到远距离的用电区,最好采用高电压输电,以减小输电线路的用线量和功率损耗,为此必须用输电变压器将发电机发出的电压升高到输电电压(例如可高达 500 kV),但一般用电装置并不需要如此高的电压,如大型动力用电为 10 kV 或 6 kV,小型动力用电为 380/220 V,电扇、照明、收音机等用 220 V 或 110 V,车床照明用灯为 36 V 低压。所以必须用配电变压器把电压降低到用户所需的电压。

本章重点介绍单相变压器和三相变压器,简单介绍自耦变压器和电流、电压互感器。

第 2.1 节 变压器的基本结构和额定值

2.1.1 变压器的基本结构

变压器是电磁设备,它主要由铁心和绕组两部分组成,此外还有其他部件。最简单的变压器如图 2-1 所示。

一、铁心

变压器中最主要的部件是铁心和绕组,它们是变压器中磁通和电流的路径。

变压器的铁心既是磁路,又是套装绕组的骨架。通常铁心用硅钢片叠装而成,这种钢片不仅导磁性好,而且磁滞、涡流损耗小。钢片厚度一般为 0.3 ~ 0.5 mm,航空变压器则用更薄的钢片。钢片表面有氧化膜或绝缘漆作为片间绝缘以减少涡流。当工作频率高,要求损耗特别小的情况下,也有用铁镍合金片作铁心的。铁心结构大致分下面三种。

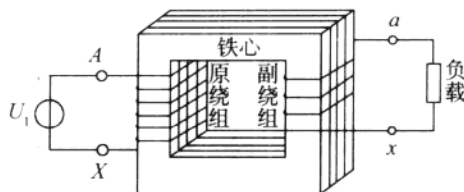


图 2-1 变压器的基本结构

1. 心式

对小容量的变压器常用两边不等长的钢片，交错叠成图 2-2 (a) 所示的形式，其相邻两片间的接缝是错开的，这可减少钢片接缝处的磁阻。绕组就绕在两个铁心柱上，故称铁心式。对较大容量的变压器为使下料经济合理，则用条形硅钢片交错叠成。

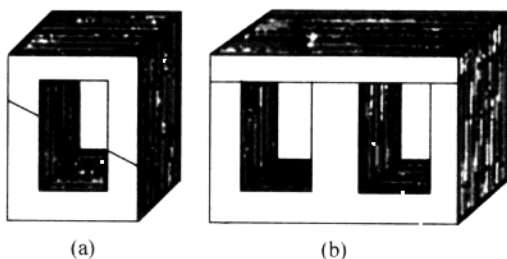


图 2-2 变压器的铁心结构

(a) 铁心式；(b) 铁壳式

2. 壳式

如图 2-2 (b) 所示，这种变压器的绕组是绕在中间芯柱上的，因为绕组两侧有铁心柱，故称壳式。磁通从中间芯柱出来分左右两路而闭合，可见两侧铁心柱的截面积仅需中间心柱截面积之半。铁壳式一般用于小功率变压器。

3. 卷环式

如图 2-3 和图 2-4 所示，目前很多变压器采用卷环式，因为一般冷轧硅钢片顺着轧压方向的导磁性能最好，而以上两种型式变压器很难做到全部磁路都顺着轧压方向。如果把冷轧钢片顺着轧压方向剪成长条，卷成环状，这样磁路可全部顺着轧压方向。所以在同样条件下，卷环式中的磁感应强度值可比叠片式的大 20% ~ 30%，因而卷环式的铁心比叠片式的轻 20% ~ 30%。制造过程是把卷成环状的铁心经过浸漆、烘烤等处理，再从两铁心柱中间切开成为图 2-3 所示形状，称 C 形卷环式铁心。然后在铁心的两柱上套入绕组，再用钢带固紧在底座上，即成单相 C 形卷环式铁心变压器。卷环式也可以做成 E 形卷环铁心，与铁壳式类似。图 2-4 所示即为 E 形铁心变压器。

为进一步减少体积和重量，简化结构，小功率变压器也有采用圆形卷环式铁心的。即圆形铁心不切开，以减少磁阻，并避免了切缝处钢片相遇引起的涡流损耗，使铁磁材料得到更好的利用。同样情况下圆环形铁心比 C 型又轻 20% 左右。但圆形铁心绕线困难，一般用环形绕线机绕制，当导线较粗时，只能手工绕制。所以只在小功率、中频、低压变压器中应