

国家示范院校重点建设专业

数控技术专业课程改革系列教材

数控机床电气控制

◎ 主 编 张 宁 汪永华
◎ 副主编 蒋永明 彭 伟 马光胜
◎ 主 审 陶有抗 余承辉



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

国家示范院校重点建设专业

数控技术专业课程改革系列教材

数控机床电气控制

- ◎ 主 编 张 宁 汪永华
◎ 副主编 蒋永明 彭 伟 马光胜
◎ 参 编 杨文杰 贾 芸 曹文霞
 汤 萍 王贤虎 缪传彬
 朱颖志 陶小川 黄 皖
◎ 主 审 陶有抗 余承辉



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是安徽水利水电职业技术学院国家示范院校重点建设专业——数控技术专业课程改革成果之一，内容包括变压器、三相异步电动机、直流电机、基本电气控制、机床电气控制等。

本书为高职高专、电大、职大、成人教育等院校机械类、机电类专业的通用教材，也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床电气控制 / 张宁, 汪永华主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2010.3

(国家示范院校重点建设专业、数控技术专业课程改革系列教材)

ISBN 978-7-5084-7308-6

I. ①数… II. ①张… ②汪… III. ①数控机床—电气控制—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第039542号

书 名	国家示范院校重点建设专业 数控技术专业课程改革系列教材 数控机床电气控制
作 者	主 编 张 宁 汪永华 副主编 蒋永明 彭 伟 马光胜 主 审 陶有抗 余承辉
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 8.25印张 200千字
版 次	2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	18.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是安徽水利水电职业技术学院国家示范院校重点建设专业——数控技术专业课程改革成果之一，由该学院教师和企业工程技术人员共同编写。

根据国家教育部对职业教育的有关指示精神，经过对机械加工电气技术岗位人员能力要求的广泛调研，以及在专业建设委员会和企业工程技术人员、技术骨干的共同指导和参与下，制定了数控技术专业工学结合优质核心课程标准，为适应数控加工行业快速发展和高等职业院校数控技术专业教学改革的需要，以培养技能型人才为出发点，实现工学结合“教、学、做一体”的教学模式，经过充分研讨与论证，精心编写了本书。

本书以工学结合“教、学、做一体”，把知识点贯穿于项目的编写思路，以培养学生能力为重点，理论联系实际，体现学以致用原则，应用性强。行文力求简练、易懂、图文并茂，使之更具直观性；在编辑的体系结构上，采用基于任务的教学体系结构，使学生在在学习过程中更具连贯性、针对性和选择性。

本书分为变压器、三相异步电动机、直流电机、基本电气控制、机床电气控制 5 个项目，共 11 个任务。在项目中采用技能目标、知识要点、知识准备、任务实施等引导学生学习。

本书由张宁、汪永华任主编，蒋永明、彭伟、马光胜任副主编，由陶有抗、余承辉主审。参加编写的还有杨文杰、贾芸、曹文霞、汤萍、王贤虎、缪传彬、朱颖志、陶小川、黄皖等。在编写教材过程中还得到学院有关领导的指导和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2010 年 1 月

目 录

前言

项目 1 变压器	1
任务 1.1 变压器的检查与维护	1
1.1.1 技能目标	1
1.1.2 知识要点	1
1.1.3 知识准备	1
1.1.4 任务实施 变压器的检查与维护	9
任务 1.2 变压器的检修	10
1.2.1 技能目标	10
1.2.2 知识要点	10
1.2.3 知识准备	10
1.2.4 任务实施 变压器的常见故障分析	16
项目 2 三相异步电动机	18
任务 2.1 三相异步电动机的选择	18
2.1.1 技能目标	18
2.1.2 知识要点	18
2.1.3 知识准备	18
任务 2.2 三相异步电动机的使用和维修	28
2.2.1 技能目标	28
2.2.2 知识要点	28
2.2.3 知识准备	28
2.2.4 任务实施 三相异步电动机的使用和维修	34
项目 3 直流电机	36
任务 3.1 直流电机的基础知识	36
3.1.1 技能目标	36
3.1.2 知识准备	36
3.1.3 知识要点	36
3.1.4 任务实施 直流电动机的认识	54
任务 3.2 直流电机的运行	55
3.2.1 技能目标	55

3.2.2	知识准备	55
3.2.3	知识要点	55
3.2.4	任务实施 并励直流电动机的调速	65
项目4 基本电气控制		67
任务4.1 常用低压电器的选用		67
4.1.1	技能目标	67
4.1.2	知识要点	67
4.1.3	知识准备	67
4.1.4	任务实施 常用低压电器的选用	85
任务4.2 电动机的基本电气控制电路		86
4.2.1	技能目标	86
4.2.2	知识要点	86
4.2.3	知识准备	86
4.2.4	任务实施 识读基本电气控制线路的方法	100
项目5 机床电气控制		102
任务5.1 普通车床的电气控制及常见故障分析		102
5.1.1	技能目标	102
5.1.2	知识要点	102
5.1.3	知识准备	102
5.1.4	任务实施 车床电气控制电路常见故障分析与检修	105
任务5.2 摇臂钻床的电气控制及常见故障分析		105
5.2.1	技能目标	106
5.2.2	知识要点	106
5.2.3	知识准备	106
5.2.4	任务实施 电气控制电路常见故障分析与检修	111
任务5.3 铣床的电气控制及常见故障分析		112
5.3.1	技能目标	113
5.3.2	知识要点	113
5.3.3	知识准备	113
5.3.4	任务实施 电气控制电路常见故障分析与检修	123

项目1 变 压 器

变压器是一种静止的电器，是根据电磁感应原理工作的，它可以把一种等级的交流电压或电流变换为频率相同、数值不同的另一种等级的交流电压或电流。因其主要用途是变换电压，故称之为变压器。

在电力系统中，变压器起着重要的作用。要将大功率的电能从发电厂（站）输送到远距离的用电区，需要用升压变压器把发电机发出的电压升高，再经过高压线路进行传输，以降低线路损耗；然后再用降压变压器逐步将输电电压降到配电电压，供用户使用。另外，变压器在其他领域也得到广泛的应用，如电子技术、测试技术、焊接技术等领域。

任务 1.1 变压器的检查与维护

1.1.1 技能目标

- (1) 掌握单相变压器电路的基础理论知识。
- (2) 掌握三相变压器电路的基础理论知识。

1.1.2 知识要点

- (1) 变压器的基本原理；掌握变压器的主要结构及其作用；理解变压器铭牌数据的意义。
- (2) 单相变压器空载和负载运行时的各主要物理量 U_1 、 E_1 、 Φ_0 、 I_0 间的因果关系。
- (3) 变压器绕组折算的目的、原则和方法。
- (4) 分析变压器运行的三个工具，即基本方程式、等效电路和相量图。
- (5) 变压器的运行特性——外特性和效率特性。

1.1.3 知识准备

1.1.3.1 变压器的基本结构和分类

1. 基本结构

变压器作为一种静止的电气设备，其基本结构主要由两部分组成：①铁芯——变压器的磁路；②绕组——变压器的电路。此外，还装有其他附件，对于不同种类的变压器，其结构也各不相同。下面着重介绍变压器铁芯和绕组的基本结构。

(1) 铁芯。铁芯是变压器的磁路部分，同时作为变压器的机械骨架。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成，铁芯柱上套装变压器绕组，铁轭起连接铁芯柱使磁路闭合的作用。对铁芯的要求是导磁性能要好，磁滞及涡流损耗要尽量小，因此铁芯一般采用厚度为 0.3mm 左右的硅钢片制成。国产硅钢片有热轧硅钢片和冷轧硅钢片。20 世纪 60~70 年代我国生产的电力变压器铁芯主要采用热轧硅钢片，由于其铁损耗较大，导磁性能相应的比较差，且铁芯叠装系数低（因硅钢片两面均涂有绝缘漆），现已不用。目前国产变压器铁芯主要采用冷硅钢片，其铁损耗低，且铁芯叠装系数高（因硅钢片表面有氧化膜绝缘，不必再涂绝缘漆）。随着新材料的出现，非晶合金材料正广泛应用于变压器和磁路。



根据铁芯的结构形式，变压器可分为壳式变压器和心式变压器两大类。壳式变压器是铁轭包围绕组的顶面、底面和侧面，在中间的铁芯柱上放置绕组，形成铁芯包围绕组的形状，如图 1.1 所示。图 1.1 (a) 为单相壳式变压器，图 1.1 (b) 为三相壳式变压器。心式变压器是在铁芯的铁芯柱上放置绕组，形成绕组包围铁芯的形状，而铁轭只靠着绕组的顶面和底面，如图 1.2 所示。图 1.2 (a) 为单相心式变压器，图 1.2 (b) 为三相心式变压器。壳式结构的铁芯机械强度较高，但制造工艺复杂，用材较多，通常用于低压、大电流的变压器或小容量的电源变压器。心式结构比较简单，绕组的装配及绝缘也较容易，国产电力变压器均采用心式结构。

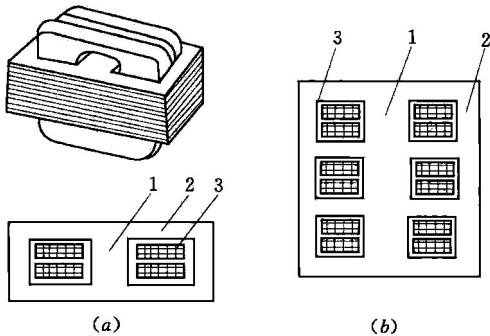


图 1.1 壳式变压器

(a) 单相壳式变压器；(b) 三相壳式变压器
1—铁芯柱；2—铁轭；3—绕组

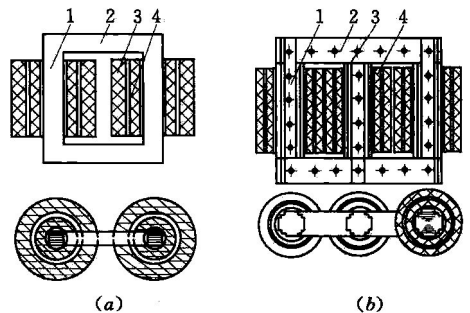


图 1.2 心式变压器

(a) 单相心式变压器；(b) 三相心式变压器
1—铁芯柱；2—铁轭；3—高压绕组；4—低压绕组

(2) 绕组。绕组是变压器的电路部分，一般用漆包圆铜线或具有绝缘的扁铜线绕制而成。接于高压电网的绕组称为高压绕组；接于低压电网的绕组称为低压绕组。根据高、低压绕组的相对位置，绕组可分为同心式和交叠式两种类型。

同心式绕组的高、低压绕组同心地套在铁芯柱上，如图 1.2 所示。为便于绝缘，一般低压绕组套在里面，但对大容量的低压大电流变压器，由于低压绕组引出线的工艺困难，往往把低压绕组套在高压绕组外面。高低压绕组与铁芯柱之间都留有一定的绝缘间隙，并以绝缘纸筒隔开。同心式绕组结构简单，制造方便，国产电力变压器均采用这种结构。在

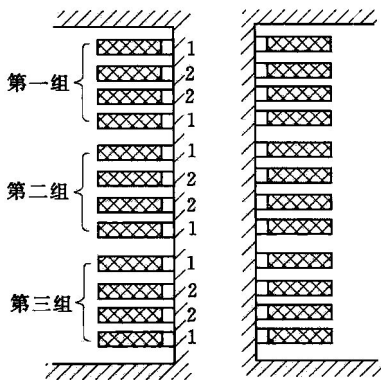


图 1.3 交叠式绕组

1—低压绕组；2—高压绕组

中小型电力变压器中，常见的同心式绕组形式有圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式等。

交叠式绕组是将高压绕组及低压绕组分成为若干个线饼，交替地套在铁芯柱上，为了便于绝缘靠近上下铁轭的两端一般都放置低压绕组，如图 1.3 所示，又称为饼式绕组。高、底压绕组之间的间隙较多，绝缘比较复杂，主要用于特种变压器中。这种绕组漏抗小，机械强度高，但高低压绕组之间的绝缘比较复杂。一般用于低电压大电流的变压器上，如电炉变压器、电焊变压器等。

2. 分类和用途

(1) 分类。变压器种类很多，通常可按其用途、



绕组数目、铁芯结构、相数和冷却方式等进行分类。

1) 按用途分类。有用于电力系统升、降压的电力变压器；有以电流为特征的变压器，如电焊变压器、电炉变压器和整流变压器等；以传递信息和供测量用的变压器，如电磁传感器、电压互感器和电流互感器等；在自控系统中还有脉冲变压器，音频和变频变压器等多种特殊变压器。

2) 按绕组数目分类。可分为电力系统中最常用的两绕组变压器、用以连接三种不同电压输电线的大容量三绕组变压器以及用在电压等级变化较小场合的自耦变压器等。

3) 按铁芯结构分类。可分为心式变压器、壳式变压器。

4) 按相数分类。可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器等。

5) 按冷却方式分类。可分为干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、充气式变压器和强迫油循环变压器等。

(2) 用途。在电力系统中，变压器是一种非常重要的电气设备。由发电厂发出的电能在向用户输送过程中，通常需用很长的输电线，输电线路上的电压越高，则流过输电线路中的电流就越小。这不仅可以减小输电线路的截面积，节约导体材料，同时还可减小输电线路上的功率损耗。因此，目前世界各国在电能的输送与分配方面都朝建立高电压、大功率的电力网系统方向发展，以便集中输送，统一调度与分配电能。这就促使输电线路的电压由高压（110~220kV）向超高压（330~750kV）和特高压（750kV 以上）不断升级。目前，我国高压输电的电压等级有 110kV、220kV、330kV 及 500kV 等多种。发电机本身由于其结构及所用绝缘材料的限制，不可能直接发出这样的高压，因此在输电时必须首先通过升压变电站，利用变压器将电压升高，再进行输送。

高压电能输送到用电区域后，为了保证用电安全和符合用电设备的电压等级要求，还必须经过各级降压变电站，通过变压器进行降压。例如工厂输、配电线路的高压有 35kV 及 10kV 等电压等级，低压有 380V、220V、110V 等电压等级。

综上所述，变压器在输、配电系统中起着非常重要的作用。在其他需要特种电源的工业企业中，变压器的应用也很广泛，如供电给整流设备、电炉等，此外在试验设备、测量设备和控制设备中也应用着各种类型的变压器。

3. 铭牌数据

为保证变压器的正确使用，保证其正常工作，在每台变压器的外壳上都附有铭牌，标志其型号和主要参数。变压器的铭牌数据主要有以下几项。

(1) 额定容量 S_N 。在铭牌上所规定的额定状态下变压器输出能力（视在功率）的保证值，称为变压器的额定容量。单位以 VA、kVA 或 MVA 表示。对三相变压器，额定容量是指三相容量之和。

(2) 额定电压 U_N 。标志在铭牌上的各绕组在空载额定分接下端电压的保证值，单位以 V 或 kV 表示。对三相变压器，额定电压是指线电压。

(3) 额定电流 I_N 。根据额定容量和额定电压计算出的线电流称为额定电流，单位以 A 表示。

对单相变压器，一、二次绕组的额定电流为

$$I_{N1} = \frac{S_N}{U_{N1}}; I_{N2} = \frac{S_N}{U_{N2}} \quad (1-1)$$



对三相变压器，一、二次绕组的额定电流为

$$I_{N1} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{N1}}; I_{N2} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{N2}} \quad (1-2)$$

(4) 额定频率 f_N 。我国规定标准工业用电的频率为 50Hz。

此外，额定运行时变压器的效率、温升等数据均为额定值。除额定值外，铭牌上还标有变压器的相数，连接方式与组别，运行方式（长期运行或短时运行）及冷却方式等。

1.1.3.2 单相变压器的工作原理

单相变压器是指接在单相交流电源上用来改变单相交流电压的变压器，其容量一般都比较小，主要用作控制及照明。它是利用电磁感应原理，将能量从一个绕组传输到另一个绕组而进行工作的。下面分别讨论单相变压器的两种不同工作情况。

1. 变压器的空载运行

变压器的一次绕组接在额定电压的交流电源上，而二次绕组开路时的运行状态称为变压器的空载运行。图 1.4 是单相变压器空载运行的示意图。 u_1 为一次绕组电压， u_{02} 为二次绕组空载电压， N_1 和 N_2 分别为一次、二次绕组的匝数。

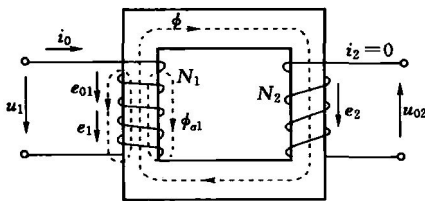


图 1.4 单相变压器空载运行示意图

(1) 变压器空载运行时各物理量的关系式。当变压器的一次绕组加上交流电压 u_1 时，一次绕组内便有一个交变电流 i_0 流过。由于二次绕组是开路的，二次绕组中没有电流。此时一次绕组中的电流 i_0 称为空载电流。同时在铁芯中产生交变磁通 Φ ，其同时穿过变压器的一次、二次绕组，因此又称其为交变主磁通，即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-3)$$

则变压器一次绕组的感应电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = N_1 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = 2\pi f \Phi_m N_1 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明， e_1 滞后于主磁通 $\frac{\pi}{2}$ 电角。其中 $2\pi f \Phi_m N_1$ 为感应电动势的最大值，用 E_{1m} 表示。把 E_{1m} 除以 $\sqrt{2}$ ，则可求出变压器一次绕组感应电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1 \quad (1-5)$$

同理，变压器二次绕组感应电动势的有效值为

$$E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2 \quad (1-6)$$

若忽略一次绕组中的阻抗不计，则外加电压几乎全部用来平衡电动势，即

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (1-7)$$

在数值上，则有

$$U_1 \approx E_1 \quad (1-8)$$

变压器空载时，其二次绕组是开路的，没有电流流过，二次绕组的端电压 U_{02} 、感应电动势 E_2 相等，则空载运行时二次侧电路电压平衡方程为

$$\dot{U}_{02} = \dot{E}_2 \quad (1-9)$$

在数值上，则有



$$U_{02} = E_2 \quad (1-10)$$

(2) 变压器的电压变换。由式 (1-5) 和式 (1-6) 可见, 由于变压器一次、二次绕组的匝数 N_1 和 N_2 不相等, 因而 E_1 和 E_2 大小是不相等的, 变压器输入电压 U_1 和变压器二次侧电压 U_2 的大小也不相等。

变压器一次、二次绕组电压之比为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_u \quad (1-11)$$

式中: K_u 为变压器的变压比, 这是变压器中最重要的参数之一。

由式 (1-11) 可见: 变压器一次、二次绕组的电压与一次、二次绕组的匝数成正比, 也即变压器有变换电压的作用。

由式 (1-5) 可知, 对某台变压器而言, f 及 N_1 均为常数, 因此当加在变压器上的交流电压有效值 U_1 恒定时, 则变压器铁芯中的磁通 Φ_m 基本保持不变。

2. 变压器的负载运行

当变压器的二次绕组接上负载阻抗 Z_L , 如图 1.5 所示, 则变压器投入负载运行。这时, 二次侧绕组中就有电流 I_2 流过, I_2 随负载的大小而变化, 同时一次侧电流 I_1 也随之改变。变压器负载运行时的工作情况与空载运行时将发生显著变化。

(1) 变压器负载运行时的磁动势平衡方程。二次绕组接上负载后, 电动势 E_2 将在二次绕组中产生电流 I_2 , 同时一次绕组的电流从空载电流 I_0 相应地增大为电流 I_1 , I_2 越大 I_1 也越大。

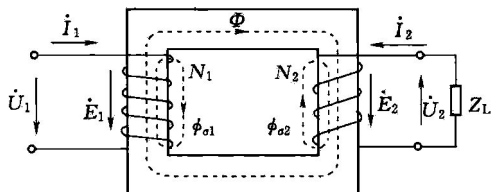


图 1.5 变压器负载运行示意图

从能量转换角度来看, 二次绕组接上负载后, 产生电流 I_2 , 二次绕组向负载输出电能。

这些电能只能由一次绕组从电源吸取, 通过主磁通 Φ 传递给二次绕组。二次绕组输出的电能越多, 一次绕组吸取的电能也就越多。因此, 二次侧电流变化时, 一次侧电流也会相应变化。

从电磁关系的角度来看, 二次绕组产生电流 I_2 , 二次侧的磁动势 $N_2 I_2$ 也要在铁芯中产生磁通, 即这时铁芯中的主磁通是由一次、二次绕组共同产生的。 $N_2 I_2$ 的出现, 将有改变铁芯中原有主磁通的趋势。但是, 在一次绕组的外加电压 U_1 及频率 f 不变的情况下, 由式 (1-5) 和式 (1-8) 可知, 主磁通基本上保持不变。因而一次绕组的电流由 I_0 变到 I_1 , 使一次绕组磁动势由 $N_1 I_0$ 变成 $N_1 I_1$, 以抵消 $N_2 I_2$ 。由此可知, 变压器负载运行时的总磁动势应与空载运行时的总磁动势基本相等, 都为 $N_1 I_0$, 即

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0$$

$$\text{或} \quad N_1 \dot{I}_1 = N_1 \dot{I}_0 - N_2 \dot{I}_2 \quad (1-12)$$

式 (1-12) 称为变压器负载运行时的磁动势平衡方程。它说明有载时一次绕组建立的 $N_1 \dot{I}_1$ 分为两部分: 其一是 $N_1 \dot{I}_1$, 用来产生主磁通 Φ , 其二是 $N_1 \dot{I}_1$ (或 $-N_2 \dot{I}_2$), 用来抵偿 $N_2 \dot{I}_2$, 从而保持磁通 Φ 基本不变。



(2) 变压器的电流变换。由于变压器的空载电流 \dot{I}_0 很小，特别是在变压器接近满载时， $N_1 \dot{I}_0$ 相对于 $N_1 \dot{I}_1$ 或 $N_2 \dot{I}_2$ 而言基本上可以忽略不计，于是可得变压器一次、二次绕组磁动势的有效值关系为

$$N_1 I_1 \approx N_2 I_2$$

即

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K_u} = K_i \quad (1-13)$$

式中： K_i 称为变压器的电流比或称变流比。

式(1-13)表明，变压器一次、二次绕组中的电流与一次、二次绕组的匝数成反比，即变压器也有变换电流的作用，且电流的大小与匝数成反比。因此，变压器的高压绕组匝数多，而通过的电流小，绕组所用的导线较细；反之低压绕组匝数少，通过的电流大，所用的导线较粗。

3. 变压器的匹配运行

变压器不但能具有电压变换和电流变换的作用，还具有阻抗变换的作用，如图 1.6 所示。

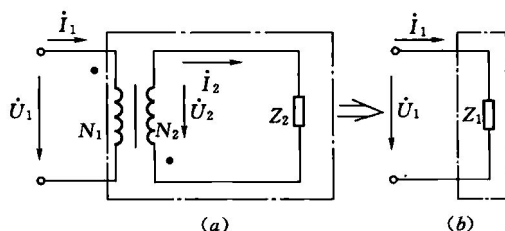


图 1.6 变压器的阻抗变换
(a) 变压器的电路；(b) 等效电路

变压器的阻抗变换是通过改变变压器的电压比 K_u 来实现的。当变压器二次绕组接上阻抗为 Z 的负载后，根据图 1.6 所示，阻抗 Z_1 为

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad (1-14)$$

从变压器的二次侧来看，阻抗 Z_2 为

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (1-15)$$

由此可得变压器一次、二次侧的阻抗比为

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1 I_2}{I_1 U_2} = \frac{U_1 I_2}{U_2 I_1} = K_u^2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (1-16)$$

由式(1-16)可知：

(1) 只要改变变压器一次、二次绕组的匝数比，就可以改变变压器一次、二次侧的阻抗比，从而获得所需的阻抗匹配。

(2) 接在变压器二次侧的负载阻抗 Z_2 对变压器一次侧的影响可以用一个接在变压器一次侧的等效阻抗 $Z_1 = K_u^2 Z_2$ 来代替，代替后变压器一次侧的电流 I_1 不变。

在电子线路中，为了获得较大的功率输出，往往对输出电路的输出阻抗与所接的负载阻抗之间有一定的要求。例如，对音响设备来讲，为了能在扬声器中获得最好的音响效果（获得最大的功率输出），要求音响设备输出的阻抗与扬声器的阻抗尽量相等。但实际上扬声器的阻抗往往只有几欧到十几欧，而音响设备等信号的输出阻抗往往很大，达到几百欧甚至几千欧以上，因此通常在两者之间加接一个变压器（称为输出变压器、线接变压器）来达到阻抗匹配的目的。

【例 1.1】 已知某音响设备输出电路的输出阻抗为 320Ω ，接去的扬声器阻抗为 5Ω ，现在需要接一输出变压器使两者实现阻抗匹配，试求：

(1) 该变压器的变压比 K_u 。



(2) 若该变压器一次绕组匝数为 480 匝, 问二次绕组匝数为多少?

解 (1) 根据已知条件, 输出变压器一次绕组的阻抗 $Z_1 = 320\Omega$, 二次绕组的阻抗 $Z_2 = 5\Omega$ 。由式 (1-16) 得变压器的变压比

$$K_u = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \sqrt{\frac{320}{5}} = 8$$

(2) 由式 (2-11) 得

$$K_u = \frac{N_1}{N_2}$$

则变压器二次绕组匝数为

$$N_2 = \frac{N_1}{K_u} = \frac{480}{8} = 60 \text{ (匝)}$$

1.1.3.3 变压器的工作特性

在实际应用中要正确、合理地使用变压器, 需了解其运行时的工作特性及性能指标。变压器的工作特性主要有:

(1) 外特性。是指电源电压和负载的功率因数为常数时, 二次侧端电压随负载电流变化的规律, 即 $U_2 = f(I_2)$ 。

(2) 效率特性。是指电源电压和负载的功率因数为常数时, 变压器的效率随负载电流变化的规律, 即 $\eta = f(I_2)$ 。

变压器的电压调整率和效率体现了这两种工作特性, 而且是变压器的主要性能指标。下面分别加以讨论。

1. 变压器的外特性和电压调整率

变压器负载运行时, 一方面, 由于变压器内部存在电阻和漏抗, 故当二次绕组中流过负载电流时, 变压器的二次绕组将产生阻抗压降, 使二次侧端电压随负载电流的变化而变化; 另一方面, 由于一次绕组电流随二次绕组电流的变化而变化, 故使一次绕组漏阻抗上的压降也相应改变, 一次绕组电动势和二次绕组电动势也会有所改变, 这也会影响二次绕组输出电压的大小。

变压器负载运行时的外特性 $U_2 = f(I_2)$ 可以通过实验的方法进行绘制, 如图 1.7 所示。由图可知, 当负载的功率因数 $\cos\varphi_2 = 1.0$ 时, U_2 随 I_2 的增加而下降得并不多; 当功率因数 $\cos\varphi_2$ 降低时, 即在纯电阻和感性负载时, U_2 随着 I_2 增加而下降的程度加大, 这是因为滞后的无功电流对变压器磁路中的主磁通的去磁作用更为显著, 而使 E_1 和 E_2 有所下降的缘故; 但当 $\cos\varphi_2$ 为负值时, 即在容性负载时, 超前的无功电流有助磁作用, 主磁通会有所增加, E_1 和 E_2 亦会相应加大, 使得 U_2 会跟随 I_2 的增大而增大, 外特性上翘。以上表明, 负载的功率因数对变压器外特性的影响是很大的。

在图 1.7 中, 纵坐标用 $\frac{U_2}{U_{2N}}$ 之比表示, 横坐标用 $\frac{I_2}{I_{2N}}$ 之比表示, 使得在坐标轴上的数值都在 $0 \sim 1.0$

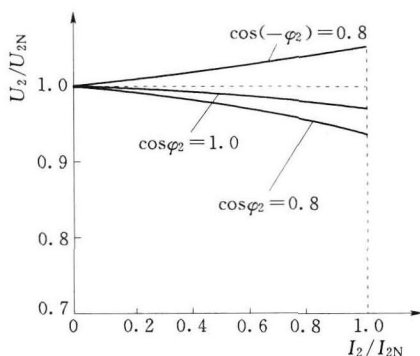


图 1.7 变压器的外特性



之间或稍大于 1.0, 这样做是为了便于不同容量和不同电压的变压器相互比较。

变压器的负载一般多为感性负载, 因此当负载增大时, 变压器的二次绕组电压总是下降的, 其下降的程度常用电压调整率来描述。

电压调整率是指当变压器的一次侧接在额定频率额定电压的电网上, 负载的功率因数为常数时, 变压器空载与负载时二次侧端电压变化的相对值, 用 ΔU 来表示, 即

$$\Delta U = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \quad (1-17)$$

式中: U_{2N} 为变压器空载时二次绕组的额定电压; U_2 为二次绕组输出额定电流时的电压。

电压调整率反映了供电电压的稳定性, 是变压器的一个重要性能指标。 ΔU 越小, 说明变压器二次绕组输出的电压越稳定, 因此要求变压器的 ΔU 越小越好。常用的电力变压器从空载到满载, 电压变化率约为 3%~5%。

2. 变压器的损耗与效率

变压器在能量传递过程中会产生损耗。变压器的损耗是指从电源输入的有功功率 P_1 与向负载输出的有功功率 P_2 之差, 即 $\Delta P_{\text{损耗}} = P_1 - P_2$ 。损耗主要包括铜损耗和铁损耗两部分。

(1) 铜损耗 P_{Cu} 。变压器的铜损耗包括基本铜损耗和附加铜损耗两部分。

基本铜损耗是电流在绕组中产生的直流电阻损耗。附加铜损耗包括因集肤效应、倒替中电流分布不均匀而使电阻变大所增加的铜耗以及漏磁通在结构部件中引起的涡流损耗等。在中小型变压器中, 附加铜损耗为基本铜损耗的 0.5%~5%, 在大型变压器中则达到 10%~20%。这些损耗都与负载电流的平方成正比, 因此铜损耗又称为“可变损耗”。

(2) 铁损耗 P_{Fe} 。变压器的铁损耗也包括基本铁损耗和附加铁损耗两部分。

基本铁耗是变压器铁芯中的磁滞和涡流损耗。磁滞损耗与硅钢片材料的性质、磁通密度的最大值以及频率有关。涡流损耗与硅钢片的厚度、电阻率、磁通密度的最大值以及频率有关。附加铁损耗包括铁芯叠片间由于绝缘损伤而引起的涡流损耗等。附加铁损耗难以准确计算, 一般取基本铁损耗的 15%~20%。变压器的铁损耗与一次绕组所加电压大小有关, 当电源电压一定时, 铁损耗基本不变, 因此铁损耗又称为“不变损耗”。

(3) 效率。变压器的效率 η 是指变压器的输出功率 P_2 与输入功率 P_1 之比, 用百分数表示, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_1}{P_2 + \Delta P_{\text{损耗}}} \times 100\% \quad (1-18)$$

由于变压器没有旋转部件, 不像电机存在有机机械损耗, 因此变压器的效率一般都比较高。

变压器在不同的负载电流 I_2 时, 输出功率 P_2 及铜损耗 P_{Cu} 都在变化, 因此变压器的效率 η 也随着负载电流 I_2 的变化而变化, 其变化规律通常用变压器的效率特性曲线来表示, 如图 1.8 所示, 图中 $\beta = \frac{I_2}{I_{2N}}$, 称为负载系数。

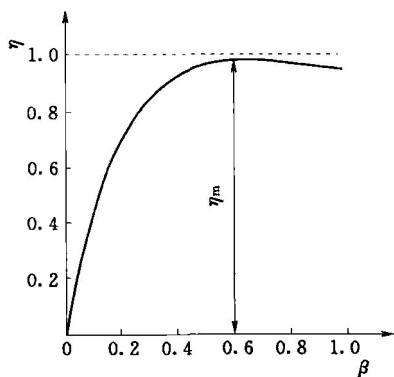


图 1.8 变压器的效率曲线

从效率特性曲线可以看出, 当负载变化到某一数



值时,将出现最大效率 η_{\max} ,与分析直流电机的最大效率一样,当变压器的可变损耗等于不变损耗时,效率达到最大值,一般变压器的最大效率在 $\beta=0.5\sim 0.7$ 范围内。

1.1.4 任务实施 变压器的检查与维护

电力变压器在运行过程中,需要进行经常性地检查、维护及保养,从而能够及时发现事故苗头,做出相应处理,达到防止出现严重故障的目的。其项目和检修方法如下。

1. 变压器的外部检查

(1) 变压器油的检查,采用目测法观察变压器油枕内、充油管内油的高度,观察油的颜色及透明度。通常,油位高度应适中(在标度范围内),油应是透明略带黄色。

(2) 用耳测法听电力变压器声音是否正常。正常情况下,声音轻、平稳,是均匀而轻微的“嗡嗡”声,这是在 50Hz 的交变磁通作用下,铁芯和线圈振动造成的。若变压器内有各种缺陷或故障,会引起以下音响:

- 1) 声音增大并比正常时沉重,对应变压器负荷电流大、过负荷的情况。
- 2) 声音中有尖锐声、音调变高,对应电源电压过高、铁芯过饱和的情况。
- 3) 声音增大并有明显杂音,对应铁芯未夹紧,片间有振动的情况。
- 4) 出现爆裂声,对应线圈和铁芯绝缘有击穿点的情况。

变压器以外的其他电路故障,如高压跌落式熔断器触头接触不良;无功磁调压开关接头未对正或接触不良等,均会引起变压器响声变化。

(3) 检查变压器运行温度是否正常。变压器运行中温度升主要是由器身发热造成的。一般情况下,变压器负载越重,线圈中流过的工作电流越大,发热越剧烈,运行温度越高。变压器运行温度升高,使绝缘老化过程加剧,绝缘寿命减少。同时,温度过高也会促使变压器油的老化。

变压器正常工作时,油箱内上层油温不应超过 $85\sim 95^{\circ}\text{C}$ 。运行中,可通过温度计测取上层油温。若小型电力变压器未设专门的温度计,也可用水银温度计贴在变压器油箱外壳上测温,这时允许温度相应为 $75\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 检查变压器绝缘套管是否清洁,有无破损或放电烧伤。若发生上述情况,将会使绝缘套管的绝缘强度下降,应及时更换。

(5) 检查变压器冷却装置运行情况。应无泄露,压力应符合规定。

(6) 检查防爆管、除湿器、接线端子是否正常。检查防爆管隔膜是否完好,有无喷油痕迹;除湿器中的硅胶是否已达到饱和状态;各接线端子是否紧固,引线和导电杆螺栓是否变色。

防爆管隔膜破裂的原因,若是意外碰撞所致,则更换新膜即可;若有喷油痕迹,说明发生了严重内部故障,应停运检修。硅胶呈红色,说明它已吸湿饱和失效,需要更换新硅胶。线头接点变色,是接线头松动,接触电阻增大造成发热的结果,应停电后重新加以紧固。

(7) 气体继电器无动作。应定期检查、测试及整定气体继电器、保证性能正常、工作可靠。

(8) 检查外壳接地线是否牢靠、完好。要保证其外壳接地良好(接地电阻值一般应为 4Ω 以下)。

2. 变压器的负荷检查

(1) 观察和记录负荷,检查是否超负荷。

(2) 观察电力变压器三相电流,检查是否平衡。



(3) 测量和记录电力变压器的运行电压。如果电源电压长期过高或过低,应对变压器进行检修,调整其分接开关(同时检测直流电阻)直至正常。

3. 变压器的保养

(1) 电力变压器运行环境的检查,要求防雨、通风、清洁。

(2) 清扫瓷套管及有关附属设备。

(3) 检查母线连接情况,保证连接紧密。

(4) 用兆欧(绝缘电阻)表摇测绕组的绝缘电阻,用接地测试仪测量电力变压器外壳的接地电阻,并记录测量值。

任务 1.2 变压器的检修

1.2.1 技能目标

- (1) 掌握单相变压器电路的接线。
- (2) 掌握三相变压器电路的接线。
- (3) 会检修变压器及进行故障分析。

1.2.2 知识要点

- (1) 三相变压器的连接。
- (2) 其他变压器的工作原理。

1.2.3 知识准备

1.2.3.1 三相变压器

在电力系统中,普遍采用三相制供电方式,因而三相变压器获得最广泛的应用。三相变压器在对称负载下运行时,各相电压、电流大小相等,相位彼此相差 120° ,各相参数亦相等。因此,单相变压器的分析方法完全适用于三相变压器,在此不再赘述。这里主要讨论三相变压器的组成、三相变压器的绕组连接及绕组的极性与测量等问题。

1. 三相变压器的组成

三相变压器按照其磁路系统的不同可以由三台同容量的单相变压器组成,称为三相变压器组;也可由三个单相变压器合成一个三铁芯柱的三相心式变压器。

(1) 三相变压器组。三相变压器组是把三个同容量的变压器根据需要将其一次、二次绕组分别接成星形或三角形连接。一般三相变压器组的一次、二次绕组均采用星形连接,如图 1.9 所示。

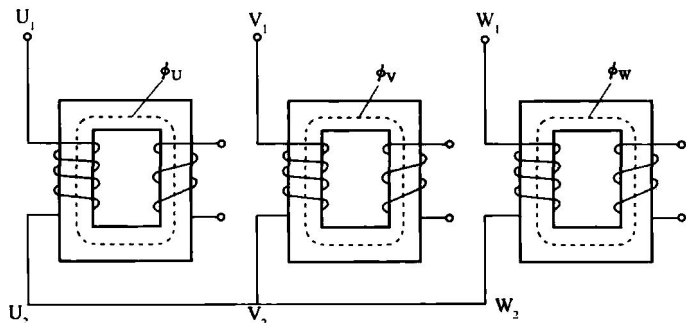


图 1.9 三相变压器组



三相变压器组由于是由三台变压器按一定方式连接而成，三台变压器之间只有电的联系，而各自的磁路相互独立，互不关联。当三相变压器组一次侧施以对称三相电压时，则三相的主磁通也一定是对称的，三相空载电流也对称。

(2) 三相心式变压器。三相心式变压器是由三相变压器组演变而来的。把三个单相心式变压器铁芯合并成如图 1.10 (a) 所示的结构，通过中间心柱的磁通为三相磁通的相量和。当三相电压对称时，则三相磁通总和 $\dot{\phi}_U + \dot{\phi}_V + \dot{\phi}_W = 0$ ，即中间心柱中无磁通通过，可以省略，如图 1.10 (b) 所示。为了制造方便和节省硅钢片将三相铁芯柱布置在同一平面内，演变成为如图 1.10 (c) 所示的结构，这就是目前广泛采用的三相心式变压器的铁芯。由图 1.10 可见，三相心式变压器的磁路特点为：三相磁路有共同的磁轭，它们彼此关联，各项磁通要借另外两相的磁通闭合，即磁路系统是不对称的。但由于空载电流很小，它的不对称对变压器的负载运行的影响极小，可忽略不计。

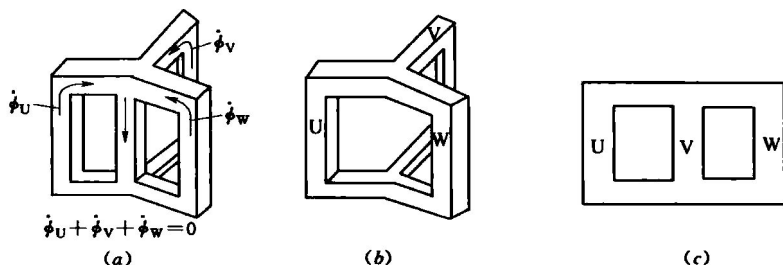


图 1.10 三相心式变压器铁芯

(a) 三相铁芯合并；(b) 去掉公共部分；(c) 实用铁芯

(3) 两类变压器的比较。比较上述两种类型磁路系统的三相变压器可以看出，在相同的额定容量下，三相心式变压器较之三相变压器组具有节省材料、效率高、价格便宜、维护方便、安装占地少等优点，因而得到广泛应用。但是对于大容量变压器来说，三相心式变压器就暴露出它的缺点。因为三相变压器组是由三个独立的单相变压器组成，所以在起重、运输、安装时可以分开处理，困难就大为减小，同时还可以降低备用容量，每组只要一台单相变压器作为备用就可以了。所以对一些超高压、特大容量的三相变压器，当制造及运输有困难时，有时就采用三相变压器组。

2. 三相变压器的绕组连接

三相变压器高、低压绕组的首端常用 U_1 、 V_1 、 W_1 标记和 u_1 、 v_1 、 w_1 ，而其末端常用 U_2 、 V_2 、 W_2 和 u_2 、 v_2 、 w_2 标记。单相变压器的高、低压绕组的首端则用 U_1 、 u_1 标记，其末端则用 U_2 、 u_2 标记，见表 1.1。

表 1.1 绕组的首端和末端的标记

绕组名称	单相变压器		三相变压器		中性点
	首端	末端	首端	末端	
高压绕组	U_1	U_2	U_1 、 V_1 、 W_1	U_2 、 V_2 、 W_2	N
低压绕组	u_1	u_2	u_1 、 v_1 、 w_1	u_2 、 v_2 、 w_2	n
中压绕组	U_{1m}	U_{2m}	U_{1m} 、 V_{1m} 、 W_{1m}	U_{2m} 、 V_{2m} 、 W_{2m}	N_m