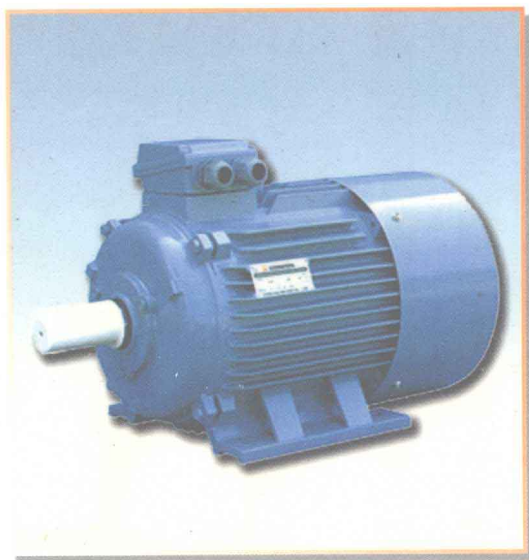


电机及控制技术

张永花 杨 强 主 编
孙在松 程麒文 副主编

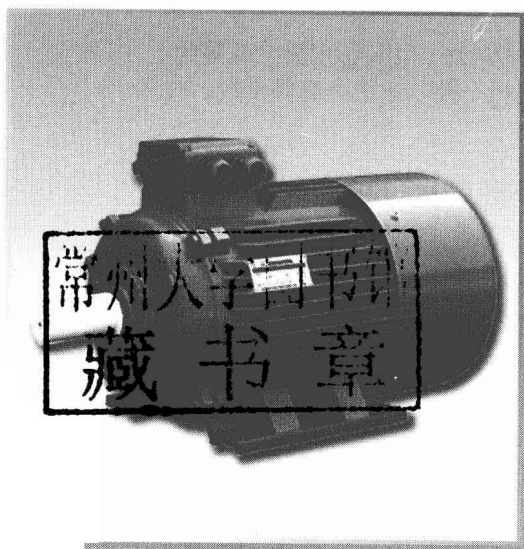


DIANJI JI KONGZHISHU

1424598

电机及控制技术

	张永花	杨 强	主 编
	孙在松	程麒文	副主编
边明杰	刘田茜	白雪玲	参 编
		田洪芳	



DIANJI JI KONGZHISHU

内 容 简 介

本书是教育部高职高专自动化技术类专业教学指导委员会推荐教材,是围绕高职教育倡导的能力目标为主线编写的。本书结合工程实际,注重电机的构造、控制及维护,并从工程中选出代表性的案例作为教学项目,强化学生的工程实践意识。

全书共 12 个单元,主要内容包括变压器基础知识,直流电动机构造、控制与维护、三相异步电动机构造、控制与维护,单相异步电动机应用,控制电机应用,电动机的选择与安装等。

本书可作为高职高专机电一体化、电气自动化、机械制造及自动化等相关专业的教学用书,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机及控制技术/张永花,杨强主编. —北京:
中国铁道出版社, 2010. 1
(全国高职高专院校机电类专业规划教材)
ISBN 978-7-113-10913-4

I. ①电… II. ①张…②杨… III. ①电机—高等学
校: 技术学校—教材①电机—控制系统—高等学校: 技术
学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 018509 号

书 名: 电机及控制技术
作 者: 张永花 杨 强 主编

策划编辑: 严晓舟 祁 云

责任编辑: 秦绪好

特邀编辑: 刘朝霞

封面设计: 付 巍

版式设计: 于 洋

编辑部电话: (010) 63560056

责任校对: 郝霁江

封面制作: 白 雪

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街 8 号 邮政编码: 100054)

印 刷: 三河市华丰印刷厂

版 次: 2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 12 字数: 286 千

印 数: 3 000 册

书 号: ISBN 978-7-113-10913-4

定 价: 22.00 元

版权所有 侵权必究

本书封面贴有中国铁道出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社计算机图书批销部联系调换

全国高职高专院校机电类专业规划教材

编审委员会

主任：吕景泉

副主任：严晓舟 史丽萍

委员：（按姓氏笔画排序）

王文义	刘建超	肖方晨	李向东	狄建雄
汪敏生	宋淑海	张耀	明立军	陈铁牛
钟江生	胡学同	凌艺春	秦绪好	梁荣新
常晓玲	程周	谭有广	钱逸秋	
王立	王龙义	王建明	牛云陞	关健
李文	李军	刘薇娥	朱凤芝	牟志华
陈丽	汤晓华	陆建国	张文明	张永花
宝爱群	金卫国	林嵩	姚吉	姚永刚
祝瑞花	徐国林	秦益霖	韩雨	曾照香

随着我国高等职业教育改革的不断深化发展,我国高等职业教育改革和发展进入一个新阶段。2006年,教育部下发的《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》的16号文件,旨在进一步适应经济社会发展对高素质技能型人才的需求,推进高职人才培养模式改革,提高人才培养质量。

教材建设工作是整个高等职业院校教育教学工作中的重要组成部分,教材是课程内容和课程体系的知识载体,对课程改革和建设既有龙头作用,又有推动作用,所以提高课程教学水平和质量的关键在于建设高水平高质量的教材。

出版面向高等职业教育的“以就业为导向的,以能力为本位”的优质教材一直以来就是中国铁道出版社优先开发的领域。我社本着“依靠专家、研究先行、服务为本、打造精品”的出版理念,于2007年成立了“中国铁道出版社高职机电类课程建设研究组”,并经过2年的充分调查研究,策划编写、出版本系列教材。

本系列教材主要涵盖高职高专机电类的公共平台课和6个专业及相关课程,即电气自动化专业、机电一体化专业、生产过程自动化专业、数控技术专业、模具设计与制造专业以及数控设备应用与维护专业,既自成体系又具有相对独立性。本系列教材在研发过程中邀请了高职高专自动化教指委专家、国家级教学名师、精品课负责人、知名专家教授、学术带头人及骨干教师。他们针对相关专业的课程设置融合了多年教学中的实践经验,同时吸取了高等职业教育改革的成果,无论从教学理念的导向、教学标准的开发、教学体系的确立、教材内容的筛选、教材结构的设计,还是教材素材的选择都极具特色。

归纳而言,本系列教材体现有如下几点编写思想。

(1) 围绕培养学生的职业技能这条主线设计教材的结构,理论联系实际,从应用的角度组织内容,突出实用性,并同时注意将新技术、新工艺等内容纳入教材。

(2) 遵循高等职业院校学生的认知规律和学习特点,对于基本理论和方法的讲述力求简单易于理解,多用图表来表达信息,以解决日益庞大的知识内容与学时偏少之间的矛盾。同时,增加相关技术在实际生产生活中的应用实例,引导学生主动学习。

(3) 将“问题引导式”、“案例式”、“任务驱动式”、“项目驱动式”等多种教学方法引入教材体例的设计中,融入启发式教学方法,务求好教好学爱学。

(4) 注重立体化教材的建设。本系列教材通过主教材、配套素材光盘、电子教案等教学资源的有机结合,提高教学服务水平。

总之,在本系列教材的策划出版过程中得到了教育部高职高专自动化技术专业教学指导委员会以及广大专家的指导和帮助,在此表示深深的感谢。希望本系列教材的出版能为我国高等职业院校教育改革起到良好的推动作用,欢迎使用本系列教材的老师和同学提出意见和建议,书中如有不妥之处,敬请批评指正。

中国铁道出版社

本书从高职教育的实际情况出发,注重理论联系实际;力求通俗易懂、深入浅出,突出实际应用环节。紧扣高职办学新理念,结合高职教学的基本要求,紧密结合生产实践,注重学生的实践能力培养,力求基本概念清晰明确,用项目强化概念的应用;理论推导简化,易于掌握,具有实用性。本书以常用电机为载体,力求使学生懂结构和原理、会选择和使用、能维护和修理。

本书是根据 2009 年 5 月《教育部高职高专自动化类教学指导委员会规划教材》北京研讨会精神编写的。在本次会议上,来自全国各个省(自治区、直辖市)多所高校的自动化类院系领导和具有丰富专业教学经验的骨干教师,以及自动化教育界专家对当前我国高职发展的形势与挑战进行了充分的讨论,一致认为本系列教材应贯彻国家教育部 16 号文件精神,针对学生就业以及社会要求,突出专业特色,着重专业基础知识以及技术应用,培养 21 世纪高级应用技术人员。

本书对一般理论进行了较为详尽的阐述,对较深的理论知识进行了适当删减,注重实际中常用技术的分析与应用;突出了教学研究中的一些成果与特色,特别是一些内容的新提法。强化学生的工程意识,培养学生掌握专业理论与解决实际问题的能力。

本书在内容取材及安排上具有以下特点:

1. 以培养学生能力为主线,以实际应用为目的,侧重培养学生解决实际工程问题的能力。
2. 注重学生的对电机的应用能力,每章开章均提出了能力目标与知识目标;正文中的知识点大多针对工程实际中遇到的问题,具有很高的工程实用性。
3. 培养学生的实际工作能力。每章结束均有相关的工程项目来巩固学生对电机的应用,每个项目是综合性的,是相对完整的工作过程。
4. 本书采用国际通用的图形符号、名词与术语。

本书由日照职业技术学院张永花任第一主编,并编写了单元五、单元九;日照职业技术学院杨强任第二主编,编写了单元一、单元十二;孙在松任第一副主编,编写了单元六~单元八;程麒文任第二副主编,编写了单元二~单元四;刘田茜、田洪芳编写了单元十,边明杰、白雪玲编写了单元十一。全书由张永花统稿并定稿。

在本教材的编写过程中,得到了日照海大自动化科技有限公司、日照金马集团有限公司、天津中德职业技术学院、济南铁道职业技术学院等单位的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于编写者水平所限,加上时间仓促,书中的错误及疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编者

2009年9月

单元一 变压器基础	1
任务 1 认识变压器的工作原理与结构	1
子任务 1 认识变压器的工作原理	1
子任务 2 了解变压器的应用与分类	2
子任务 3 识别变压器的结构	3
子任务 4 变压器的铭牌知识运用	4
任务 2 单相变压器的空载运行分析	5
任务 3 变压器的负载运行分析	7
子任务 1 认识负载运行的磁通势平衡方程式	8
子任务 2 认识负载运行的电动势平衡方程式	8
子任务 3 变压器的参数折算	9
子任务 4 变压器负载运行时的等效电路应用	10
任务 4 变压器的参数测定	11
子任务 1 空载试验	11
子任务 2 短路试验	12
任务 5 认识三相变压器	13
子任务 1 认识三相变压器的磁路系统	13
子任务 2 三相变压器的连接组识别	14
任务 6 变压器的应用	18
子任务 1 自耦变压器的认识与应用	18
子任务 2 仪用互感器的认识与应用	19
子任务 3 电焊机变压器的认识与应用	20
单元二 直流电动机的原理及应用	25
任务 1 直流电动机的分类	25
任务 2 认识直流电动机的工作原理	26
子任务 1 认识直流电动机的基本组成	27
子任务 2 直流电动机的结构识别	27
子任务 3 直流电动机工作原理	36
任务 3 直流电动机综合应用	37
任务 4 直流电动机的铭牌数据	39
子任务 1 直流电动机铭牌数据	39
子任务 2 直流电动机的选用原则	40
子任务 3 直流电动机计算的基本方程	41

单元三 他励直流电动机运行特性	44
任务 1 他励直流电动机的机械特性分析	44
子任务 1 机械特性表达式分析	44
子任务 2 固有机特性与人为机械特性分析	45
任务 2 他励直流电动机启动控制	47
子任务 1 直流电动机启动的基本要求分析	48
子任务 2 他励直流电动机启动方法运用	48
任务 3 他励直流电动机的制动控制	49
子任务 1 能耗制动控制	50
子任务 2 反接制动控制	51
子任务 3 回馈制动控制	53
任务 4 他励直流电动机的反转控制	54
任务 5 他励直流电动机的运行调速	54
子任务 1 调速评价指标认识	55
子任务 2 调速方法运用	56
单元四 直流电动机控制	61
任务 1 直流电动机控制认知	61
子任务 1 直流电动机控制原则认识	61
子任务 2 电气控制系统图认识	62
任务 2 直流电动机启动	62
子任务 1 通过电流控制直流电动机启动	62
子任务 2 通过时间继电器控制的直流电动机启动	63
子任务 3 直流电动机电枢串联电阻单向旋转启动控制	63
任务 3 直流电动机自动控制换向	64
任务 4 直流电动机制动控制	65
子任务 1 直流电动机单向旋转能耗制动	65
子任务 2 直流电动机可逆旋转反接制动	65
单元五 直流电动机维护	68
任务 1 电动机检测工具的使用	68
子任务 1 电动机修理常用量具的使用	68
子任务 2 电动机常用检测仪器仪表的使用	71
任务 2 直流电动机使用过程中注意事项认识	72
子任务 1 启动控制的注意事项认识	72
子任务 2 制动控制的注意事项认识	72
子任务 3 直流电动机日常应用维护认识	72
单元六 三相异步电动机基础	81
任务 1 三相异步电动机的结构与工作原理认识	81

子任务 1 三相异步电动机的结构认识.....	81
子任务 2 三相异步电动机的工作原理认识.....	83
任务 2 三相异步电动机铭牌数据及防护等级、防爆标记识别.....	86
子任务 1 三相异步电动机的铭牌数据识别.....	86
子任务 2 三相异步电动机的防护等级、防爆标记识别.....	88
任务 3 三相异步电动机的绕组认识.....	91
子任务 1 交流绕组的基本知识和基本量认识.....	91
子任务 2 三相异步电动机的单层绕组及双层绕组认识.....	93
单元七 三相异步电动机运行特征.....	98
任务 1 三相异步电动机转子静止时的电磁关系认识.....	98
子任务 1 转子不动（转子绕组开路）时的情况分析.....	98
子任务 2 转子不动（转子绕组短路并堵转）时的情况分析.....	100
任务 2 三相异步电动机转子旋转时的电磁关系认识.....	102
任务 3 三相异步电动机的功率和转矩应用.....	104
任务 4 三相异步电动机的工作特性认识和参数测定.....	106
子任务 1 三相异步电动机工作特性认识.....	106
子任务 2 三相异步电动机的参数测定.....	107
任务 5 三相异步电动机的机械特性分析.....	109
子任务 1 三相异步电动机机械特性的表达式认识.....	109
子任务 2 三相异步电动机的固有机机械特性分析.....	112
子任务 3 三相异步电动机的人为机械特性分析.....	112
单元八 三相异步电动机控制.....	115
任务 1 控制电路技术规范认识及控制元件的配置.....	115
子任务 1 三相异步电动机控制电路技术规范认识.....	115
子任务 2 三相异步电动机控制设备的配置、安装和操作.....	116
任务 2 三相异步电动机的启动控制.....	117
子任务 1 三相异步电动机直接启动控制.....	117
子任务 2 三相异步电动机降压启动控制.....	118
任务 3 三相异步电动机的变频调速应用.....	121
任务 4 三相异步电动机的制动控制.....	122
子任务 1 三相异步电动机的反转控制.....	122
子任务 2 三相异步电动机的制动控制.....	122
单元九 三相异步电动机维护与故障诊断.....	127
任务 1 三相异步电动机的维护.....	127
子任务 1 三相异步电动机启动前的准备.....	127
子任务 2 三相异步电动机启动时的注意事项认识.....	128
子任务 3 三相异步电动机运行中的监视.....	128



子任务 4 电动机的定期维修内容认识.....	129
任务 2 三相异步电动机常见故障及处理	130
子任务 1 三相异步电动机常见机械故障认识及处理.....	130
子任务 2 三相异步电动机常见电气故障认识及处理.....	134
单元十 单相异步电动机应用	142
任务 1 单相异步电动机的基本结构及工作原理认识	142
子任务 1 单相异步电动机的结构及其特点认识	142
子任务 2 单相异步电动机的工作原理认识	144
任务 2 单相异步电动机的主要类型及启动方法认识	145
任务 3 单相异步电动机的调速及应用	147
子任务 1 单相异步电动机的调速	147
子任务 2 单相异步电动机的应用	148
任务 4 单相异步电动机的常见故障识别	149
单元十一 控制电机应用	152
任务 1 伺服电动机认识与应用.....	152
子任务 1 直流伺服电动机认识与应用.....	152
子任务 2 交流伺服电动机认识与应用.....	156
任务 2 步进电动机认识与应用.....	158
子任务 1 步进电动机的结构和分类认识.....	158
子任务 2 反应式步进电动机的工作原理认识	159
子任务 3 反应式步进电动机的特性认识.....	161
子任务 4 步进电动机的驱动电源认识.....	163
子任务 5 步进电动机的选择.....	164
任务 3 测速发电机认识与应用.....	164
子任务 1 直流测速发电机认识与应用.....	164
子任务 2 交流测速发电机认识与应用.....	166
单元十二 电动机选择与安装	170
任务 1 电动机的选择	170
子任务 1 电动机的种类、形式、额定电压与额定转速的选择.....	170
子任务 2 电动机的发热与冷却认识	172
子任务 3 电动机的工作方式认识	172
子任务 4 电动机的额定功率选择	173
任务 2 电动机的安装.....	177

单元一

变压器基础

任务目标

- 能对小型变压器进行拆装。
- 识别变压器的型号,掌握变压器的基本结构和工作原理,掌握变压器的分类。
- 掌握变压器等效电路图换算方法。
- 掌握变压器空载运行和负载运行时有关电势、磁势平衡方程式并能进行计算。
- 了解机械人的功能、作用及特点。

变压器作为高低压转换的电气设备,广泛应用于电力系统及成套设备中。变压器是基于电磁感应定律而工作的,这一点与其他旋转的电机相似,故可视为静止的电机,与旋转电机的能量转换作用不同,它只能起到能量传递的功能。



任务 1 认识变压器的工作原理与结构

变压器是一种静止装置,它是依靠磁耦合的作用,将一种等级的电压与电流转换成另一种等级的电压与电流,起到传递电能的作用。

子任务 1 认识变压器的工作原理

下面以单相双绕组变压器为例分析其工作原理:在一个闭合的铁心上缠绕两个绕组,其匝数既可以相同,也可以不同,但一般是不同的。如图 1-1 所示,两个绕组之间只有磁的耦合,而没有电的联系。

与电源相连的绕组,接受交流电能,通常称为一次绕组(又称原边绕组、初级绕组),以 A 、 X 标注其出线端;与负载相连的绕组,送出交流电能,通常称为二次绕组(又称副边绕组,次级绕组),以 a 、 x 标注其出线端。与一次绕组相关的物理量均以下角标“1”来表示,与二次绕组相关的物理量均以下角标“2”来表示。例如,一次绕组的匝数、电压、电动势、电流分别以 N_1 、 u_1 、 e_1 、 i_1 来表示;二次绕组的匝数、电压、电动势、电流分别以 N_2 、 u_2 、 e_2 、 i_2 来表示。对一台降压变压器而言,一次绕组即为高压绕组,二次绕组则是低压绕组;与此相反,升压变压器的高压绕组指的是二次绕组。

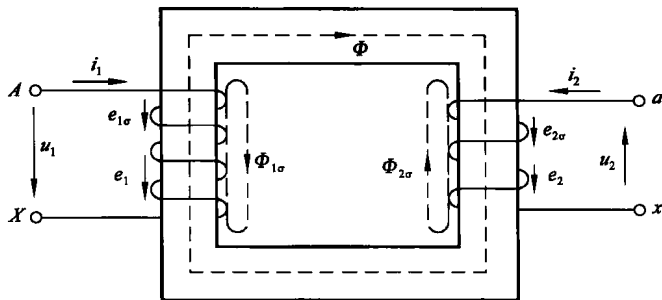


图 1-1 单相双绕组变压器原理图

当原边绕组接通电源时，便会在铁心中产生与电源电压同频率的交变磁通 Φ 。忽略漏磁，该磁通同时与原、副边绕组相交链，耦合系数 $k_c=1$ ，这样的变压器称为理想变压器。根据电磁感应定律，在原、副边绕组便会感应出电动势，分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

于是可得电动势比： $k = e_1/e_2$ 。若磁通、电动势均按正弦规律变化， k 称为变压器的变比，也称为匝比，通常用有效值之间的比值来表示： $k = E_1/E_2$ 。

当副边绕组开路（即空载）时，如忽略绕组压降（仅占 u_1 的 0.01% 不到），则有

$$u_1 = e_1 \quad (1-3)$$

$$u_2 = e_2 \quad (1-4)$$

不计铁心中由磁通 Φ 交变所引起的损耗，根据能量守恒定律，可得

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (1-5)$$

由此可以看出

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = k$$

式（1-5）表明，理想变压器的一次、二次绕组的视在功率相等，变压器的视在功率称为变压器的容量。

子任务 2 了解变压器的应用与分类

作为电能传输或信号传输的装置，变压器在电力系统和自动化控制系统中得到了广泛的应用，在国民经济的其他部门，作为特种电源或满足特殊的需要，变压器也发挥着重要的作用。

变压器的种类繁多，可按其用途、结构、相数、冷却方式等不同来进行分类：

① 按用途变压器可分为电力变压器（包括升压变压器、降压变压器、配电变压器等）、仪用互感器（电压互感器和电流互感器）和特种变压器（调压变压器、电炉变压器、电焊变压器、整流变压器等）。

② 按相数可分为单相变压器和三相变压器。

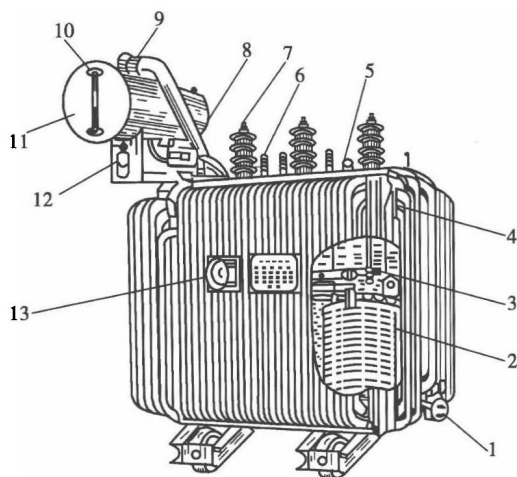
③ 按绕组的个数可分为自耦变压器、双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器。

④ 按铁心结构可分为心式变压器和壳式变压器。

⑤ 按冷却方式可分为干式（空气冷却）变压器、抽浸式变压器（包括油浸自冷式、油浸风冷式、油浸强迫抽循环式等）和充气式冷却变压器。

子任务3 识别变压器的结构

变压器的主要结构部件包括铁心和绕组两个基本部分组成的器身,以及放置器身且盛满变压器油的油箱。此外,还有一些为确保变压器运行安全的辅助器件。图 1-2 所示为一台油浸式电力变压器外形。



1—放油阀门 2—绕组 3—铁心 4—油箱 5—分接开关 6—低压套管 7—高压套管
8—气体继电器 9—安全气道 10—油位计 11—储油柜 12—吸湿器 13—湿度计

图 1-2 油浸式电力变压器外形

① 铁心：构成变压器磁路的主要部分。为减小交变磁通在铁心中引起的损耗，铁心通常用厚度为 $0.3\sim 0.5\text{mm}$ ，表面具有绝缘膜的硅钢片叠装而成，分为铁心柱和铁轭两部分。图 1-3 所示的变压器，从外面看，绕组包围铁心柱，称为心式结构；图 1-4 所示的变压器，从外面看，铁心柱包围绕组，则称为壳式结构。小容量变压器多采用壳式结构。交变磁通在铁心中引起涡流损耗和磁滞损耗，为使铁心的温度不致太高，在大容量的变压器的铁心中往往设置油道，而铁心则浸在变压器油中，当油从油道中流过时，可将铁心中产生的热量带走。

② 绕组：变压器的电路部分，用纸包或纱包的绝缘扁线或圆线绕成。其中输入电能的绕组称为一次绕组（原边绕组），输出电能的绕组称为二次绕组（副边绕组），它们通常套装在同一心柱上。一次、二次绕组具有不同的匝数、电压和电流，其中电压较高的绕组称为高压绕组，电压较低的称为低压绕组。对于升压变压器，一次绕组为低压绕组，二次绕组为高压绕组；对于降压变压器，情况恰好相反，高压绕组的匝数多、导线细；低压绕组的匝数少、导线粗。

从高、低压绕组的相对位置来看，变压器的绕组可分成同心式和交叠式两类。同心式绕组

的高、低压绕组同心地套装在心柱上,如图 1-3 所示。交叠式绕组的高、低压绕组沿心柱高度方向互相交叠地放置,如图 1-4 所示。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。交叠式绕组用于特种变压器中。

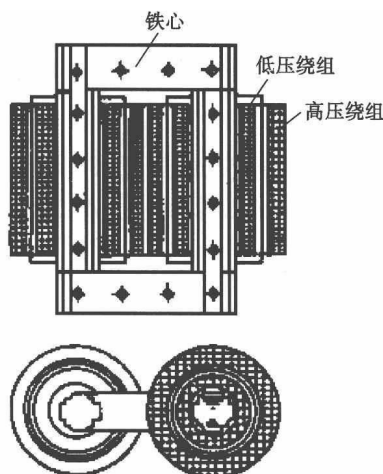


图 1-3 单相心式变压器

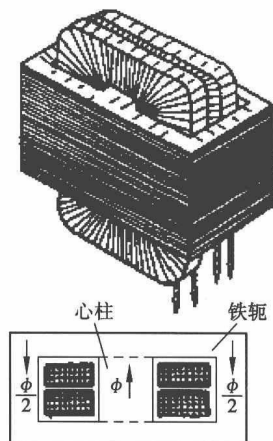


图 1-4 单相壳式变压器

③ 其他部件:除器身外,典型的油浸电力变压器还有油箱、变压器油、散热器、绝缘套管、分接开关及继电保护装置等部件。

子任务 4 变压器的铭牌知识运用

按照国家标准规定,标注在铭牌上的,代表变压器在规定使用环境和运行条件下的主要技术数据,称为变压器的额定值(又为铭牌数据),主要有:

① 额定容量是变压器在正常运行时的视在功率,通常以 S_N 来表示,单位为伏安(V·A)或千伏安(kV·A)。对于一般的变压器,一次、二次绕组的额定容量都设计成相等。

② 额定电压:在正常运行时,规定加在一次绕组上的电压,称为一次额定电压,以 U_{1N} 来表示;当二次绕组开路(即空载),一次绕组加额定电压时,二次绕组的测量电压,即为副边额定电压,以 U_{2N} 来表示。在三相变压器中,额定电压系 3 指线电压,单位为伏(V)或千伏(kV)。

③ 额定电流:指根据额定容量和额定电压计算出来的电流值。原、副边绕组的额定电流分别用 I_{1N} 、 I_{2N} 来表示,单位为安(A)。

④ 额定频率:我国以及大多数国家都规定 $f_N=50\text{Hz}$ 。额定容量、额定电压和额定电流之间的关系为如下:

单相变压器

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

三相变压器

$$S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$

此外,变压器的铭牌上一般还会标注效率、温升、绝缘等级等。

【例】一台三相双绕组变压器,额定容量为 $S_N=750\text{ kV}\cdot\text{A}$, $U_1/U_2=6000/400$,求变压器一次和二次绕组的额定电流。

$$\text{解: } I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} \text{ A} = 72.17 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} \text{ A} = 1082.56 \text{ A}$$



单相变压器在空载时
是如何运行的呢？

任务2 单相变压器的空载运行分析

本节以单相双绕组变压器为例，分析稳态运行时的电磁关系，从而了解变压器的运行原理及运行特性，所得结论同样适用于对称条件下运行的三相变压器。变压器的一次绕组接交流电源，二次绕组开路，负载电流为零（即空载）时的运行，称为空载运行。此时， $i_2=0$ ，变压器内部的物理过程比较简单，先从变压器这样一个最简单的情况来研究其电磁过程。

1. 正方向的规定

变压器运行时，内部各个物理量都是交变的，必须规定它们的正方向，才能研究各电磁量之间的关系。

正方向就是先规定一个参考方向。如果某个量的实际方向与参考方向相同，那么这个量就是正值，反之就是负值。从理论上讲，正方向可以任意选择，但习惯上以电工习偏方式（电工惯例）规定各量正方向。具体确定方法如下：

① 在负载支路（变压器的一次侧对电源而言相当于负载）中，电流的正方向与电压降的正方向一致；在电源支路（变压器的二次侧对负载而言相当于电源）中，电流的正方向与电动势的正方向一致。

② 磁通的正方向与产生它的电流的正方向符合右手螺旋定则。

③ 感应电动势的正方向与产生它的磁通的正方向符合右手螺旋定则。

根据这些原则，变压器各物理量的正方向如图 1-5 所示。

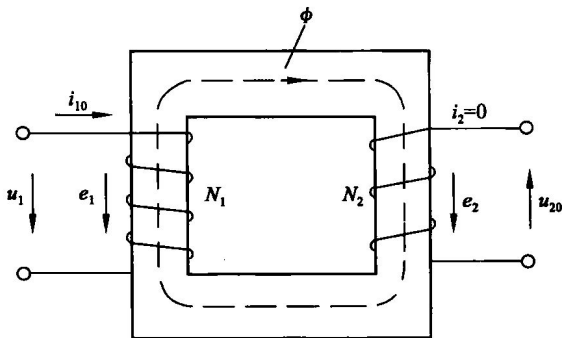


图 1-5 变压器的空载运行示意

2. 空载运行的电磁关系

(1) 主磁通和漏磁通

变压器空载运行时,一次绕组 N_1 接上电源,便有空载电流 i 通过,产生交变磁动势 $N_1 i_{10}$,建立交变磁通。该磁通分为两部分:一部分磁通沿铁心闭合,同时与一、二次绕组交链,称为主磁通 Φ ;另一部分磁通主要沿非铁磁材料(变压器油或空气)闭合,仅与一次绕组交链,称为一次绕组漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$,空载时,主磁通占总磁通的绝大部分,而漏磁通只大约占主磁通的1%。

(2) 感应电动势与电压比

根据电磁感应定律,当铁心中的磁通 Φ 和漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 变化时,将在一次和二次绕组内感应电动势 e_1 、 e_2 和 $e_{1\sigma}$ 。

设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 根据基尔霍夫定律和图 1-5 所示正方向,可得

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = -N_1 \Phi_m \omega \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (1-6)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = E_{2m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (1-7)$$

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma} \sin \omega t}{dt} = E_{1\sigma} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (1-8)$$

由此可见:当铁心中的磁通 Φ 和漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 按正弦规律变化时,由它们产生的感应电动势 e_1 、 e_2 和 $e_{1\sigma}$ 也按正弦规律变化,但均滞后于磁通 90° 相角。

以一次绕组为例,推导各感应电动势的有效值如下:

根据式 (1-1) 得出

$$\Phi = -\frac{1}{N_1} \int e_1 dt$$

空载时由于 $-e_1 \approx u_1$, 而电源电压通常为正弦波,故电动势 e_1 也可认为是正弦波,即

$e_1 = \sqrt{2}E_1 \sin \omega t$, 于是

$$\Phi = -\frac{1}{N_1} \int \sqrt{2}E_1 \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2}E_1}{\omega N_1} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t$$

式中, Φ_m 为主磁通的幅值,即

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E_1}{2\pi f N_1} = \frac{E_1}{4.44 f N_1} \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1} \quad (1-9)$$

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m$$

同理得出: $E_2 = 4.44 f_1 N_2 \Phi_m$; $E_{1\sigma} = 4.44 f_1 N_1 \Phi_{1\sigma m}$ 。

式中, $E_{1\sigma}$ 为一次绕组漏磁通磁感应电动势的有效值,且 $E_{1\sigma} = -j\omega \dot{I}_0 L_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 x_1$ 。

一、二次绕组电动势之比称为电压比,用 k 表示,是变压器的一个重要参数。

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-10)$$

上式表明：变压器的电压比也等于一、二次绕组的匝数之比，变压器电压与匝数成正比，要特别注意，对于三相变压器来说，电压比 k 是指额定相电动势的比值。因此，要使一次和二次绕组具有不同的电压，只要使它们具有不同的匝数即可，这就是变压器能够“变压”的原理。

3. 空载运行的电动势平衡方程

根据图 1-5 所示各电量的正方向，一次绕组的电动势平衡方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-11)$$

式中， $Z_1 = r_1 + jx_1$ 为一次绕组的漏阻抗。

变压器空载时， $\dot{I}_0$ 很小， $\dot{I}_0 Z_1$ 可忽略， $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$ 。二次绕组开路有

$$\dot{I}_2 = 0 \text{ 或 } \dot{U}_2 = \dot{E}_2 \quad (1-12)$$

根据以上对变压器一、二次绕组电磁关系的分析，可得出变压器空载运行时的基本方程式为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 \\ \dot{E}_1 = k\dot{E}_2 \\ -\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m \end{cases} \quad (1-13)$$

4. 空载运行的等效电路

变压器空载运行时，一次绕组电压为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (r_m + jx_m) + \dot{I}_0 (r_1 + jx_1) \quad (1-14)$$

由此可得出变压器空载时的等效电路，如图 1-6 所示。空载的变压器相当于两个阻抗值不等的线圈串联：一个是阻抗值为 $Z_1 = r_1 + jx_1$ 的空心线圈；另一个是阻抗值为 $Z_m = r_m + jx_m$ 的铁心线圈， $Z_m = r_m + jx_m$ 称为励磁阻抗， r_m 为励磁电阻，对应于铁损耗的等效电阻。 x_m 为励磁电抗，对应于主磁通的电抗。 r_m 和 x_m 可认为是常数，其数值可通过变压器的空载实验测出。

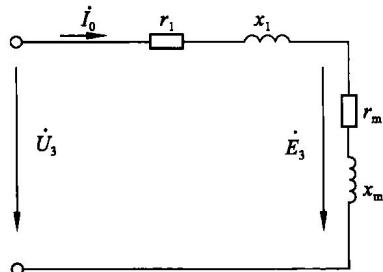
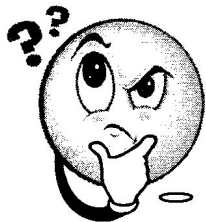


图 1-6 变压器空载时等效电路



单相变压器在负载运行和空载运行时有何不同呢？

任务 3 变压器的负载运行分析

变压器的负载运行，是指变压器的一次侧接在额定频率、额定电压的交流电源上，二次侧接负载时的运行状态。图 1-7 是单相变压器负载运行时的示意图。