



全国高职高专教育“十一五”规划教材

# 电机拖动与控制

曾方 编



高等教育出版社  
Higher Education Press

全国高职高专教育“十一五”规划教材

# 电机拖动与控制

曾方 编



高等教育出版社

## 内容提要

本书按照工学结合人才培养模式的要求,以能力培养为主要教学目标,基于工作过程组织教材内容,以实习工程项目为教学载体,采用情境式教学来构建知识和技能平台,强调理论和实训一体化,做到“教、学、做”相结合,书中提供了大量的工程案例和实训项目,方便教师和学生从知识全面整体地认识。

本书内容包括三个部分、六个学习领域。第一部分交流电动机的日常维护,包括变压器的基本应用和交流电动机的基本应用两个学习领域;第二部分三相交流电动机的控制,包括三相交流电动机的基本控制和三相交流电动机的典型控制两个学习领域;第三部分直流电动机及控制电机,包括直流电动机及其应用和控制电动机的应用两个学习领域。

本书适合作为普通高等院校非电气控制专业和高职高专院校电气自动化及相关专业的专业基础课程教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机拖动与控制/曾方编. —北京:高等教育出版社,2009.6

ISBN 978-7-04-026671-9

I. 电… II. 曾… III. ①电机-电力传动-高等学校:技术学校-教材②电机-控制系统-高等学校:技术学校-教材 IV. TM30

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第065201号

策划编辑 孙杰 责任编辑 魏芳 封面设计 张志奇 责任绘图 尹莉  
版式设计 王艳红 责任校对 俞声佳 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印刷 涿州市星河印刷有限公司

开本 787×1092 1/16  
印张 17.5  
字数 430 000

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landracom.com>  
<http://www.landracom.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2009年6月第1版  
印次 2009年6月第1次印刷  
定价 20.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 26671-00

# 前 言

“电机拖动与控制”是高等职业技术学院电气工程类、应用电子类、机电一体化专业及计算机控制类专业必修的专项技能培训课程。

本书结合职业教育特点,以工作过程为导向,以行动领域的实践性知识为主、理论性知识为辅,教材内容按照实际的工作任务、工作过程和工作情境组织课程教学,形成围绕工作需求的新型教学与训练项目。

本书以“项目式”教学法、“任务驱动”教学法来引入问题,多以案例的形式组织教材编写,将过去传统教材中的系统性知识融会在一个个生动、有趣的案例中,并且按照教学规律将知识和能力培养由易到难、由浅入深地进行,将知识掌握和技能训练有效地结合在一起,通俗易懂,使学生便于课后复习和自学。摒弃了过去教材中学生很少阅读的绪论,取而代之的是课程导论中讲解的丰富多彩、引人入胜的故事片段,编写上就此做了一次大胆的尝试。

本书共由三个部分组成:第一部分交流电动机的日常维护;第二部分三相交流电动机的控制;第三部分直流电动机及控制电机。其中第二部分是本教材的核心内容,分为三相交流电动机的基本控制和三相交流电动机的典型控制。本书包含多个典型案例,且有大量的实训项目和习题,让学生在多个案例中学到知识,在实训中培养能力。

本书承蒙北京联合大学自动化学院窦晓霞担任主审,窦晓霞对教材修改提出了很好的建议和意见,在此表示衷心的感谢。

这种教材编写模式没有前人的经验可以借鉴,编者只是根据自己对新型高等职业教育的理解,做了一些初步的尝试和探索,限于编者的学识水平,书中错误及不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者  
2009年4月

# 目 录

课程导论 .....	1
<b>第一部分 交流电动机的日常维护 .....</b>	<b>3</b>
<b>学习领域一 变压器的基本应用 .....</b>	<b>5</b>
<b>学习情境 1.1 小容量电源变压器的检测 .....</b>	<b>5</b>
一、认识电源变压器 .....	5
二、电源变压器的使用 .....	6
三、变压器的工作过程 .....	7
四、电源变压器的检测 .....	9
<b>学习情境 1.2 调压器的使用 .....</b>	<b>10</b>
一、认识调压器 .....	11
二、使用调压器 .....	11
<b>学习情境 1.3 三相电力变压器的连接 .....</b>	<b>13</b>
一、认识电力变压器 .....	13
二、三相变压器的表示方法和工作过程 .....	14
三、三相变压器的连接方法 .....	14
<b>学习情境 1.4 识别变压器 .....</b>	<b>15</b>
一、变压器的铭牌 .....	15
二、变压器的分类 .....	18
<b>学习情境 1.5 用于其他场合的变压器 .....</b>	<b>19</b>
一、电流互感器的应用 .....	19
二、电压互感器的应用 .....	21
<b>学习情境 1.6 变压器各绕组引出端的标注和多绕组间的连接 .....</b>	<b>23</b>
一、双绕组单相变压器绕组引出端的标注 .....	23
二、多绕组单相变压器绕组引出端的标注 .....	24
三、三相变压器引出端名称的标注 .....	26
<b>学习情境 1.7 判断三相变压器的绕组联结组号 .....</b>	<b>27</b>
一、三相变压器同侧绕组相、线电动势之间的关系 .....	28
二、三相变压器不同侧绕组相、线电动势之间的关系 .....	28
<b>实训项目 1.1 常用变压器的认识及调压器的使用 .....</b>	<b>32</b>
<b>实训项目 1.2 三相变压器的连接及端点标注 .....</b>	<b>34</b>
<b>实训项目 1.3 单相电源变压器的故障判断及修复 .....</b>	<b>36</b>

习题与思考 .....	39
<b>学习领域二 交流电动机的基本应用 .....</b>	<b>41</b>
学习情境 2.1 认识单相交流电动机 .....	41
一、单相交流电动机的结构 .....	41
二、单相交流电动机的定子电路 .....	43
三、单相电动机的起动和运行 .....	44
学习情境 2.2 控制单相交流电动机 .....	45
学习情境 2.3 认识三相交流电动机 .....	49
一、认识三相交流电动机的定子 .....	50
二、认识三相交流电动机的转子 .....	51
三、认识三相交流电动机的起动过程 .....	52
四、认识三相交流电动机的铭牌 .....	52
学习情境 2.4 三相异步电动机的保养 .....	53
一、收到货品时的检查 .....	54
二、安装注意事项 .....	54
三、电动机的初次运转 .....	55
四、保养 .....	57
五、振动 .....	58
六、轴承的保养 .....	60
七、噪声 .....	61
学习情境 2.5 三相异步电动机的修理 .....	61
一、修理工作的一般规定 .....	61
二、异步电动机的拆装 .....	62
三、定子绕组的局部修理 .....	63
四、定子绕组接地故障的检修 .....	64
五、绕组接线错误与嵌反的检查 .....	65
六、笼型转子断笼的修理 .....	66
七、三相异步电动机的故障特点和维护处理 .....	67
实训项目 2.1 电风扇控制线路的制作与调试 .....	69
实训项目 2.2 三相异步电动机拆装及日常维护 .....	70
习题与思考 .....	71
<b>第二部分 三相交流电动机的控制 .....</b>	<b>73</b>
<b>学习领域三 三相交流电动机的基本控制 .....</b>	<b>75</b>
学习情境 3.1 起动三相交流电动机 .....	75
一、直接起动控制线路 .....	75
二、用接触器实现的直接起动控制线路 .....	79

三、直接起动控制线路实例 .....	89
学习情境 3.2 实现三相交流电动机转动方向的改变 .....	92
一、改变电动机电源相序的方法 .....	93
二、改变电动机转动方向的控制线路 .....	93
三、电动机正反转控制线路实例 .....	97
学习情境 3.3 改变交流电动机的转速 .....	101
一、调速性能 .....	101
二、调速方法 .....	101
三、调速控制案例 .....	109
学习情境 3.4 制作与设计交流电动机的基本控制线路 .....	113
一、电气元器件的布置 .....	113
二、电气线路的安装和接线 .....	114
三、交流电动机简单控制线路的设计 .....	116
实训项目 3.1 三相异步电动机的点动、直接起动控制线路的连接及调试 .....	119
实训项目 3.2 三相异步电动机的正反转控制线路连接及调试 .....	120
实训项目 3.3 工作台自动循环电动机的控制线路制作、调试与操作 .....	122
实训项目 3.4 双速电动机控制线路的连接、调试及故障排除 .....	123
习题与思考 .....	124
学习领域四 三相交流电动机的典型控制 .....	127
学习情境 4.1 降压起动三相交流电动机 .....	127
一、降压起动特性 .....	127
二、降压起动的方法 .....	127
三、起动方法的性能比较 .....	141
学习情境 4.2 三相交流电动机的制动 .....	143
一、反接制动 .....	144
二、能耗制动 .....	151
三、回馈制动(再生发电制动) .....	157
学习情境 4.3 典型设备的电气控制案例 .....	159
学习情境 4.4 机床设备电气控制案例 .....	167
学习情境 4.5 交流电动机复杂控制线路的设计 .....	195
一、电气控制设计的基本内容 .....	195
二、电力拖动方案的确定 .....	196
三、拖动电动机的选择 .....	197
四、电气控制线路的设计 .....	199
五、绘制电气原理图 .....	201
学习情境 4.6 电气设备故障与事故分析处理 .....	202
一、电气设备故障的发现 .....	203

二、电动机过载运行危害与性质的确定 .....	205
三、单方向转动的电动机控制回路常见故障现象及处理 .....	205
四、热继电器常见故障与处理方法 .....	208
五、使用电工仪表查找故障的方法 .....	208
实训项目 4.1 三相异步电动机星形-三角形降压起动控制线路的连接及调试 .....	209
实训项目 4.2 三相异步电动机反接制动线路的连接和调试 .....	210
实训项目 4.3 三相异步电动机能耗制动控制线路的连接及调试 .....	211
实训项目 4.4 两台交流电动机顺序起动、停止控制线路的连接和调试 .....	213
实训项目 4.5 绘制 CW6132 型普通车床的电器控制盘布置图 .....	214
习题与思考 .....	216
<b>第三部分 直流电动机及控制电机</b> .....	<b>219</b>
<b>学习领域五 直流电动机及其应用</b> .....	<b>221</b>
学习情境 5.1 认识直流电机 .....	221
一、认识直流电机的外观 .....	221
二、认识直流电机的内部结构 .....	222
三、认识直流电机的结构模型 .....	224
四、认识直流电动机的励磁方式及电路模型 .....	225
学习情境 5.2 起动他励直流电动机 .....	226
一、他励直流电动机的起动性能 .....	227
二、他励电动机的起动方法 .....	228
学习情境 5.3 改变他励直流电动机的转动方向 .....	230
学习情境 5.4 改变他励直流电动机的转速 .....	232
一、电枢回路串电阻调速 .....	232
二、降低电枢电压调速 .....	233
三、减弱励磁磁通调速 .....	233
学习情境 5.5 直流电动机的制动 .....	235
一、能耗制动 .....	235
二、反接制动 .....	237
三、发电回馈制动 .....	241
习题与思考 .....	242
<b>学习领域六 控制电动机的应用</b> .....	<b>243</b>
学习情境 6.1 伺服电动机的应用 .....	243
一、直流伺服电动机 .....	243
二、交流伺服电动机 .....	246
三、伺服电动机的应用案例 .....	248
学习情境 6.2 步进电动机的应用 .....	249



一、步进电动机的工作原理 .....	250
二、步进电动机的应用 .....	251
三、伺服电动机、步进电动机使用中常见问题 .....	254
学习情境 6.3 测速发电机的应用 .....	256
一、直流测速发电机 .....	257
二、交流测速发电机 .....	259
三、测速发电机的应用案例 .....	259
习题与思考 .....	261
<b>参考答案</b> .....	262
<b>参考文献</b> .....	269

# 课程导论

每一门课程都有它必须完成的任务和要解决的问题,那么本课程要完成的任务是什么呢?学完本课程以后,可以解决哪些问题呢?下面先讲三个故事。

一家大型企业接到了公司总部下发的重要通知,说是总公司的高层管理人员要到下属企业检查工作。为了迎接这次意义重大的检查,各生产车间特意停止全部设备运行,命令员工彻彻底底、上上下下地打扫卫生,整理环境。然后又命令员工换上整齐干净的工作服,站在自己操作的机器旁边,只等组长的一声开机命令。组长紧张地从门缝里不断地观察检查组人员是否到来,不断地通知操作工人做好开机的准备。终于,他看到检查人员向自己的车间走来,于是他大声喊道:“预备……开机!”。希望的景象是这样的:检查组的人员一到,机器轰鸣,工人们立刻整齐化一地投入生产。可是他希望的情景没有出现!取而代之的是车间一遍寂静,所有的机器集体罢工,工人们很茫然地站在机器旁边。这是为什么呢?一个略具喜剧色彩的故事,但却包含了本课程要解决的问题。

小王大学毕业以后在一家大型企业的一个重要车间做电气设备的维护和维修,平时的工作虽然不太繁忙但却非常重要。设备正常运行时,他很轻松无事可做,可一旦设备在运行时出了故障,他必须用尽可能短的时间来排除故障,让设备恢复正常运行,所以有时还是感觉压力较大。但最让他接受不了的是,他工作以后从来没有过休息日,因为别人的休息日也是设备的休息日,他必须抓紧时间对设备进行维护、保养和线路的检查。周周如此。虽然小王尽心尽力地工作,有一天厂里还是出事了。那是夏季的一天清早,他刚走进工厂大门就觉得有点异样,人们都在悄声地谈论着什么,一打听才知道厂里昨天晚上出了安全事故,死了一名女工。昨晚下了一夜的大雨,由于排水不畅,水眼看就要流入车间侵蚀机器,当时厂里各车间都有上班的工人,于是找来电气和机械维护人员紧急安装了几台抽水泵进行排水。水泵工作得很顺利,水也排走了。这时到了凌晨五点,下夜班的工人走出车间去食堂。天黑水多路滑,一个女工突然摔进一个水坑里,同伴立刻伸手去拉她,却被弹了回来,触电了!于是没有人敢再去拉她。等找来电气维护人员,拉断电闸,救出女工,再做人工呼吸,已经无济于事了。一个十七岁的年轻的生命,在上班工作的第一天永远地消失了。为什么会发生这种事故呢?这只是一个小小的失误造成的!马虎的电工接电机的电源线接头时,忘了多包上一层胶纸(因为有水),忘了把线的接头处挂在高处,忘了在电机运行时负责人不能离开现场太远,这三点中如果能记住一点,小女工也不会丧失年轻的生命。一个悲惨的故事里有知识,更提醒工程技术人员应具有强烈的责任感和严谨科学的工作作风。

百慕大三角的具体地理位置是大西洋上的百慕大群岛、迈阿密(美国佛罗里达半岛)和圣胡安(波多黎各岛)这三点连线形成的三角地带,面积达40万平方英里。提起百慕大,人们就会联想到恐怖而神秘的“百慕大三角海区”。相传,在这里航行的舰船或飞机常常神秘地失踪,事后不要说查明原因,就是连一点船舶和飞机的残骸碎片也找不到。现在,百慕大三角已经成为那些神秘的、不可理解的各种失踪事件的代名词。在我们熟悉的地球上,为什么独独有这么一个神奇

而无法解释的角落？为什么会发生这样不可思议的事情？究竟是什么在百慕大三角作祟？有一种最有说服力的解释是这一切都可能与电磁能量有关。一个诡异神秘的区域，这里有时间、空间以及把这两者连接到一起的神秘的磁场能量。

这三个故事里包含了本课程中的三类知识和能力的建立，通过以后的学习可以一一找出解答。

几乎所有的课程导论中都要谈到课程的学习方法，但编者想说的是：每个人都是独一无二、与众不同的自然之灵，都有一套自己的学习方法，所以只要适合自己的方法就是最好的学习方法！

编者想在这里谈一下学习这门课的目的是什么，由此想让学习者明白学习的目的是什么。答案绝对不是为了考试、分数和排名！学习只有两个目的，一个是学习知识，一个是培养能力。对于前者人人都能感受到。本课程的内容是后续“电机调速系统”、“变频技术”、“航空电子设备维修”等课程的基础知识，能够培养学习者具有电气设备、继电控制系统的维护、设计和管理的能力。本教材本着以能力培养为主、基于工作导向的学习原则，每一部分的丰富案例有利于学习者分析问题、解决问题能力的培养，每一部分都是不可忽视和缺少的。因此，就知识而言，没有什么重点、非重点之分。当然，这只是编者一家之言。

有一种说法，学习的最高境界是“行动”。编者认为这说的就是学习的第二目的即能力培养。所有接受过教育的人都有这样的感受，知识是学不完的，学过的知识是会被时间淘汰的，是需要随时更新的。在大多数学校学不到现实中最先进的技术，用不上其实也没有必要用上最好、最先进的实训设备，但这并不影响一个人能力的培养，而一个人的能力是受用终身的。具体来说，本课程能够培养学习者的工程实践能力。如元器件识别能力、工具仪表的使用能力、工程识图能力、工程设备的维护能力、工程中检查、排除线路故障的能力等。

最后说一下原理学习。几乎所有的学生都要问同一个问题，那就是为什么要学习原理，原理用在哪里。按照过去学科体系的教学方法，一般先讲原理再讲应用，在学习应用知识时早已将原理忘得一干二净，学习应用知识或者应用知识的能力差，其实就是把最重要的原理忘了，或根本没有学好原理。原理是规律、是基础、是道理。应用知识对有些人来说或许没用，但知识中的原理却是人人可用的。所以本教材在编写顺序上做了大的调整，通过一个个实际的案例由浅入深、由易到难地展示课程中每个原理是如何应用于实践当中、如何指导应用的。编者希望各位学习者通过这样的学习，能将所学习的原理应用到实践当中，做出大量的创新发明。

祝各位学有所获，学习愉快！

# 第一部分

## 交流电动机的日常维护



# 学习领域一 变压器的基本应用

电机是根据电磁学原理实现电能与机械能之间相互转换的设备。将机械能转变为电能的是发电机,将电能转变为机械能的是电动机。而变压器是利用电磁感应原理,从一个电路向另一个电路传递电能或传输信号的静止电气设备。变压器作为传递电能或作为传输信号的元件,从广义上讲,也属电机的范畴。变压器的基本应用知识,对于使用交流电动机,特别是异步电动机极为有用。

## 学习情境 1.1 小容量电源变压器的检测

教学目标:通过本节内容的学习,学生对常用小容量电源变压器的工作原理有一个初步认识,具有小容量电源变压器的应用能力,具有小容量电源变压器的检测和简单故障的排除能力。

我国生产和生活用电标准为工频 50 Hz,电压等级为三相 380 V、单相 220 V 的正弦交流电。但在实际生活中很多电子仪器和电子产品的电源电压等级低于这个电压值,这就需要利用变压器将统一标准的电压降低为用户个性化的电压等级,即应用非常广泛的电源变压器。

图 1-1 是低压系统中最常见的一种电源变压器,它的主要作用就是将 380 V 或 220 V 电压降低成各种用户所需要的电压,如 127 V、36 V、6 V 等。它的使用数量是相当可观的。

### 一、认识电源变压器

电源变压器中最主要的部分就是铁心和绕组,在图 1-1 中均清晰可见。

#### (1) 铁心

铁心由 0.35 mm 厚的涂有耐高温绝缘漆的硅钢片经过热轧或冷轧工艺叠装而成,作为变压器绕组的支撑骨架和磁路。当一侧绕组中通过电流时其产生的磁场沿铁心构成闭合回路,如图 1-2 中虚线所示。

#### (2) 绕组

绕组由涂有绝缘漆的铜线或铝线组成,通常由漆包线绕制而成。它们绕在铁心上,多为两套在电路中相互独立的绕组。匝数多的绕组一般接于高压侧,称为高压绕组。在低压系统中,一

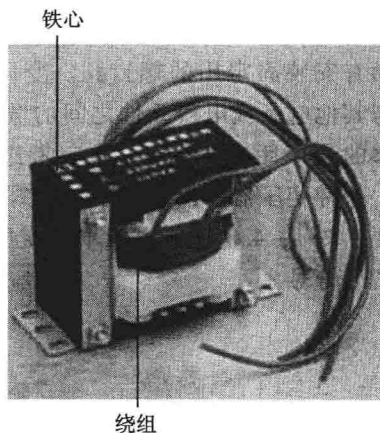


图 1-1 电源变压器

般把接在电源侧的绕组称为一次绕组,又称初级绕组、原边绕组、原方绕组、原绕组,绕在内层。匝数少、一般接于低电压侧的绕组称为低压绕组。在低压系统中,把接负载侧的绕组称为二次绕组,又称次级绕组、副边绕组、副方绕组、副绕组,绕在外层。一、二次绕组在电路上不连接,相互独立。

除此之外还有一次、二次绕组的引出线、变压器的外壳和支撑架等。

## 二、电源变压器的使用

变压器作为电源是如何接入电工、电子线路的呢?下面来观察图 1-3。这是一个在电子线路中用做电源的变压器。从图 1-3(a)中可以看出,变压器是独立于印制电路板安装的,因为变压器在工作时发热,且体积相对于印制电路板中的电子元器件较大,所以它的安装与印制电路板有一定的距离。变压器红色的接线端子为它的输入端,接在 220 V 的电源上,而蓝色接线端子为它的输出端,接在印制电路板上作为线路的低压电源,一般为 12 V。图 1-3(b)是接线原理图,注意变压器的图形符号。

再来观察图 1-4 所示的两种变压器。它们的接线端子标注得非常清楚,一目了然。变压器下面有安装固定用的螺钉孔。变压器安装时注意与其他电子或电气元件之间的散热问题,保持足够的通风距离,必要时还应考虑加装散热器。这种变压器的出线端子可用螺钉接入,较为方便。图 1-4 中还给出了单相变压器的另外一种图形符号。

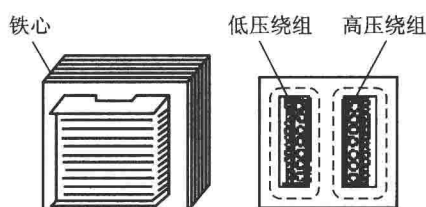
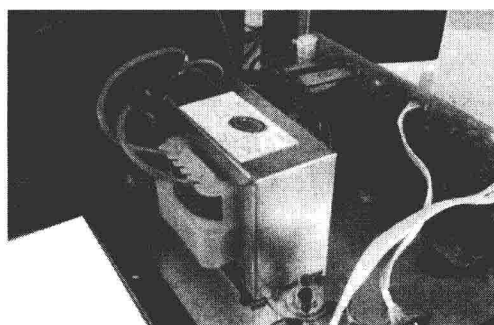
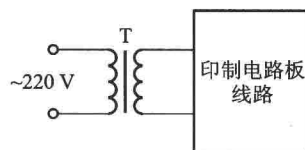


图 1-2 电源变压器结构示意图



(a) 实际线路



(b) 原理图

图 1-3 电子线路中的电源变压器

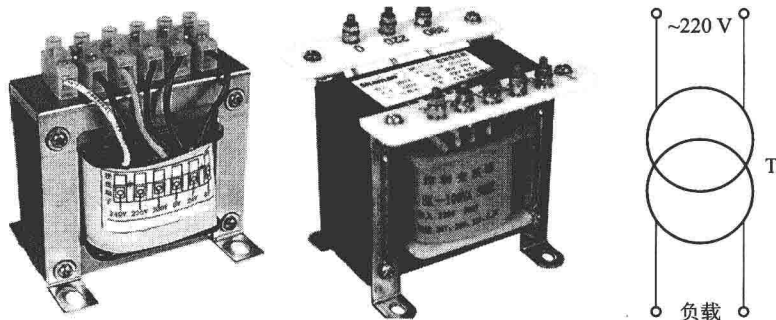


图 1-4 单相变压器的接线端及电气接线示意图

### 三、变压器的工作过程

通过对变压器的初步认识,知道变压器能够改变电压。它工作时必须有输入电压,把这个电压接入变压器的一次绕组端,称之为一次电压或输入电压;通过变压器变压以后的电压从二次绕组端获得,称为二次电压或输出电压。

#### (1) 变压器中的能量转换

仔细观察变压器的结构图 1-1、图 1-2 可知,变压器的一次绕组和二次绕组虽然结构上是绕制在同一个铁心上的,但在电路上却没有连接,它是如何将接在一次绕组上的电能传递给二次绕组呢?为了清楚地说明这个问题,把变压器的两个绕组分别绕在铁心的两边,如图 1-5 所示。图中将一次绕组绕在铁心的左边,绕组匝数用  $N_1$  表示;二次绕组绕在铁心的右边,匝数用  $N_2$  表示,以此强调变压器中这两个绕组在电路上的隔离。

在变压器中表示一次侧的物理量都带有下标 1,表示二次侧的量带有下标 2。将一次电压  $u_1$  接入一次绕组时,形成电流  $i_1$  流过一次绕组,根据电磁感应定律,一次绕组将其获得的电能大多转换成磁场能,这是第一次能量转换。

因为绕组绕在铁心上,而铁心又是由相互绝缘的硅钢片叠压而成,具有较好的导磁性,所以一次绕组产生的磁场 98% 以上都经铁心构成闭合路径,这就是磁场通过的路径,称为变压器中的磁路。因此,铁心是什么形状,磁路就是什么样的,如图 1-5 中虚线  $\Phi$  所示。

变压器的二次绕组与一次绕组是绕在同一铁心上的,所以,磁场既穿过一次绕组也穿过二次绕组。携带了能量的磁场在穿过二次绕组时,根据电磁感应定律又将磁场能大多转换成了电能。这是第二次能量转换。正是第二次能量转换使变压器的二次绕组获得了电能。

虽然变压器的一次、二次绕组在电路上没有连接,但由于它们接于同一个磁路上(铁心);即在磁路上是相互连接的,所以一次绕组中的电能可以传递到二次绕组中。

变压器的能量转换过程为:一次绕组接入电能→磁场能→二次绕组获得电能。这中间能量传递的路径就是铁心(磁路)。因此铁心传递能量的效率将直接影响变压器的工作效率。铁心由 0.35 mm 厚的硅钢片叠压而成就是为了减少涡流,减小能量传递中的损失。

由图 1-5 可以清楚地看出,磁场在穿过铁心时是沿其横截面构成闭合路径的,由于铁心很薄,所以形成的涡流很小。但即便如此,当变压器的容量增大以后,其硅钢片的数量增多,在其内部形成的涡流也不可小视。变压器工作时,除了绕组的等效电阻因有电流通过产生热量以外,铁心中的涡流也会引起发热,这就是大容量的电力变压器把铁心和绕组浸放在油箱里进行散热的原因。

#### (2) 变压器一次、二次电压的关系

由以上分析可以看出,电能的传递除了可以通过电路以外,还可以将电能转换成磁场能以后通过磁路传递。接下来将进一步分析各一次、二次物理量间的定量关系。

变压器空载运行时的一次回路可以等效为如图 1-6 所示的电路。

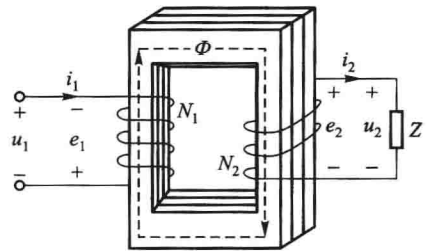


图 1-5 变压器工作示意图

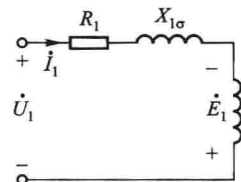


图 1-6 变压器一次回路等效电路



其中电阻  $R_1$  为一次绕组的等效电阻,  $X_{1\sigma}$  为漏磁通(没有穿过铁心的磁通)产生的感抗,  $E_1$  为磁通穿过铁心时产生的感应电动势有效值,  $U_1$  为电源电压有效值。根据基尔霍夫电压定律有

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 X_{1\sigma} - \dot{E}_1 \quad (1-1)$$

式(1-1)中  $\dot{I}_1 R_1$ 、 $\dot{I}_1 X_{1\sigma}$  分别为电阻  $R_1$ 、漏电感  $X_{1\sigma}$  上的电压降, 由于它们相对于电动势  $\dot{E}_1$  较小, 所以在做定量分析时为了工程计算简单, 往往忽略不计, 如果只考虑有效值则有

$$U_1 \approx E_1 \quad (1-2)$$

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad (1-3)$$

式(1-2)说明, 电源电压  $U_1$  的大部分都转换成了一次绕组上的电动势。也可以理解为一次电压多数都转换成了磁场能。

式(1-3)是由电磁感应定律推导得出的电动势的表达式。式中  $\Phi_m$  为变压器磁路中磁通的最大值,  $f$  为电源频率,  $N_1$  为一次绕组的匝数。

如果变压器的二次侧开路, 二次侧等效电路如图 1-7 所示。图中  $X_{2\sigma}$  为漏磁通在二次绕组中产生的漏感抗,  $R_2$  为二次绕组的等效电阻。由于二次绕组开路, 只考虑有效值则有

$$U_2 = E_2 \quad (1-4)$$

$$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad (1-5)$$

由式(1-2)、式(1-3)、式(1-4)、式(1-5)可得出

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k_u \quad (1-6)$$

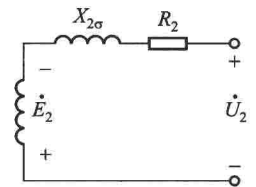


图 1-7 变压器空载时二次回路等效电路

由式(1-6)可以得出变压器一次、二次电压之比等于一次、二次绕组匝数之比, 称为变比, 用  $k_u$  表示。

如果变压器的一次侧接入 220 V 的交流电压, 在二次侧要想获得 12 V 的电压, 那么变压器的变比近似为 18.33, 也就是说电源变压器的一次与二次绕组的匝数之比近似为 18.33 就可以满足要求。而满足变比的一次、二次绕组的匝数有多种组合, 因此还是不能确定一次、二次绕组的具体匝数, 这将由变压器二次侧所接的负载大小确定, 即与变压器工作时一次、二次电流大小有关。

### (3) 变压器一次、二次电流的关系

变压器的一次、二次绕组构成了它的电路部分, 当二次侧接上负载后, 二次侧将构成闭合回路, 二次绕组中有电流  $I_2$  流过, 将产生磁通。磁通通过变压器的铁心构成闭合回路, 即形成变压器的磁路, 考虑一次、二次电流均会产生磁通, 推导得出以下表达式

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-7)$$

式(1-7)称为变压器的磁动势平衡方程。它的含义为, 在变压器一次电压有效值和电压频率不变的情况下, 变压器磁路中的磁动势将始终保持不变。式(1-7)中  $I_0$  为变压器空载时的一次电流, 称之为空载电流。空载电流与一次绕组匝数的乘积值决定了变压器工作时磁路中磁场的大小, 乘积越大, 磁场就越大, 因此又称此电流为励磁电流。