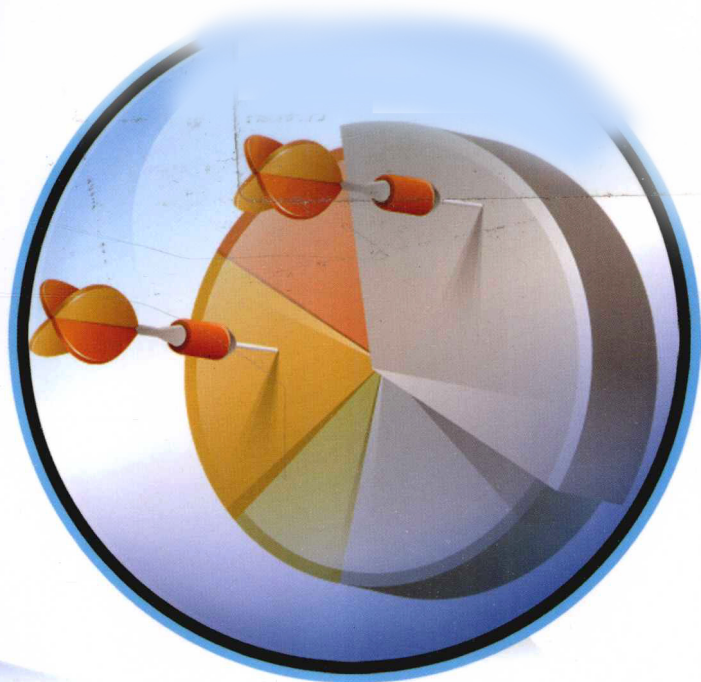


职业教育机电类规划教材

第2版

电机及拖动基础

胡幸鸣 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



职业教育机电类规划教材

电机及拖动基础

第2版

主编 胡幸鸣
参编 陈佳新 赵双全 何巨兰
主审 徐 虎



机械工业出版社

本书主要叙述变压器、三相异步电动机、直流电机的工作原理和结构特点及运行性能,分析三相异步电动机、他励直流电动机的机械特性及其起动、调速和制动的电力拖动原理与实施方法,较第1版增加了三相异步电动机软起动和斩波调速等新技术;简要分析单相异步电动机、同步电动机和控制电机的结构、特点和工作原理;结合实际应用,给出了电动机容量选择的基本知识和方法;对交直流串励电动机、锥型电动机、直线电动机、无刷直流电动机、盘式电动机等实用、新颖的电动机也有所介绍,扩大了信息量;为利于加深理解,各章都精心设计了结合实际和注重应用的例题,并在章节末配有小结、思考题与习题等,便于学生复习提高。

本书重点突出理论知识的实际应用和实践能力的培养,根据目前生源特点,较第1版降低了理论深度,更加通俗易懂。适用于职业院校的电气技术、电气自动化、机电一体化技术等专业。

为方便教学,本书配有免费电子教案、习题参考答案等。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础/胡幸鸣主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2010.3

职业教育机电类规划教材

ISBN 978-7-111-28943-2

I. 电… II. 胡… III. ①电机-专业学校-教材②电力传动-专业学校-教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第033234号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:高倩 责任编辑:王娟

封面设计:陈沛 责任校对:程俊巧

责任印制:杨曦

北京富生印刷厂印刷

2010年3月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·12.5印张·307千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28943-2

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第2版前言



《电机及拖动基础》(1版)是职业教育机电类规划教材,该书融入了编者二十余年的课程教学经验,并根据职业院校培养技能型人才的教学模式,理论知识以够用为度,但仍保持教材内容的相对连贯性和稳定性;准确定位,合理取舍内容,运用案例,用图解、图示等方法降低理论难度,理论联系实际,深入浅出,通俗易懂。本书自出版以来,已累计印刷了13次,得到了全国广大中专、职业院校师生的认可。

为适应科学技术的发展和社会对技能型人才的需求,编者对原书进行了再版修订,出版第2版。由于电力电子技术、计算机控制技术等的迅速发展,以往的直流电源由直流发电机提供改为大多由交流整流电源提供,而起动、调速和制动性能优良的直流电动机也有被采用先进控制技术(如变频控制)的三相异步电动机等替代的趋势。因此编者对直流电机、直流电动机的电力拖动内容进行了较大幅度的删减,并在章节的编排上进行了调整,突出三相异步电动机及电力拖动的内容。故本教材的章节顺序为:变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、直流电机、直流电动机的电力拖动、其他用途的电动机、控制电机、电动机容量的选择。除了章节的变动更利于教学外,本次修订着重在以下几方面进行:

1) 变压器的等效电路先画图再叙述,避开了繁杂的参数推导过程;大量公式采用推导从简,注重分析物理意义和应用的方法。对变压器的参数测定、运行特性、并联运行等内容各作了必要的删减整合;增加电力变压器运行维护和常见故障分析的内容。

2) 略去了交流绕组的感应电动势中的绕组因数推导,对三相异步电动机的空载运行、负载运行、电磁转矩的三种表达式分析删繁就简;增加了软起动的内容,对制动的复杂计算进行简化,调速的分析着重应用,并注重新技术的渗透。增加三相异步电动机运行维护和故障分析的内容。

3) 对直流电机绕组、换向的内容删繁就简,删减直流发电机特性;对直流电机的电磁功率、损耗等作了更简要明了的叙述;删改能耗制动的相关内容;直流他励电动机的制动计算用基本方程式求解,简化复杂计算。删改串励直流电动机机械特性的叙述。

4) 简化单相异步电动机中两相合成圆形旋转磁场的内容,删除单相异步电动机的调速和三相异步电动机的单相状态等内容;删除三相同步电动机的电动势平衡方程式和相量图、功率平衡及功角特性内容;修改对V形曲线的叙述方法;删改直线电动机内容;删去单相同步电动机,增加无刷直流电动机、盘式电动机的内容。

5) 对控制电机中的伺服电动机特性描述、步进电动机的原理等作了更为易懂的修改,删去自整角机和旋转变压器简介内容。

6) 对电动机容量选择中电动机的发热与冷却内容,避开了繁杂的公式推导,用简明的语言描述;电动机容量的选择方法强调常见的工作制。

7) 各类图形符号、文字符号、量和单位及相关电机标准均按最新国家标准进行修订。

对应上述的主要修订框架,编者对全书各章内容的表述、部分插图和表格、各章节的相关小结、章末的思考和习题作了相应的细致修改。这次修订,电机原理部分理论内容和拖动

部分传统的方法论述进一步化难为易,加强应用新材料、新技术的新型电动机介绍,知识面扩大,但难度进一步降低,应用性进一步突出。

本书由胡幸鸣担任主编,制订修订框架,并修订绪论及第二、三章,陈佳新修订第一、六章、附录,赵双全修订第七、八章,何巨兰修订第四、五章。

本书由徐虎担任主审。感谢徐虎老师及提出中肯建议和宝贵修订意见的劳顺康老师、许孔扬老师。

感谢所有选用此教材的各类学校,欢迎使用本书的师生提出宝贵意见。

编 者

第1版前言



本书是普通中等专业教育机电类“九五”规划教材，是根据原机械工业部1996年新制定的中等专业学校“电机及拖动基础”课程教学大纲编写的。其内容有直流电机、直流电机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、其它用途的电动机、控制电机、电动机容量的选择等八章。每章附有思考题与习题，便于复习提高和加深理解。

本教材是一门技术基础课，适用于工业企业电气自动化专业，同时也适用于机电一体化、数控技术应用等电类专业。本教材内容是《电机原理》与《电力拖动基础》两本教材内容的有机结合，是在学习《电工基础》等课程的基础上进行授课，并为“工厂电气控制设备”、“调速系统”和“工厂供电”等后继课程打好基础。通过本课程的学习，能掌握一般直流电机、变压器、三相异步电动机的工作原理和结构特点及其电磁关系和能量关系，掌握他励直流电动机和三相异步电动机的起动、调速和制动的工作原理及相关计算。并对单相异步电动机、同步电动机和控制电机的特点、工作原理及运行特性等也有所了解。同时可初步具备选择、使用和维护电机的基础能力。

本书的特点是：注重应用，利用图解分析，减少了繁琐的数学推导，简化了一些复杂的计算，多举了一些结合生产实际和应用的例题，力求深入浅出，通俗易懂；同时又注意扩大知识面，介绍了一些实用和新颖的电机等。

本书由浙江机械工业学校胡幸鸣任主编并编写绪论及第四、五章，福建高级工业专门学校陈佳新编写第三、六章、附录，河北省机电学校赵双全编写第七、八章，成都市工业学校何巨兰编写第一、二章。

本书由浙江温州机械工业学校徐虎高级讲师主审。参加审稿的有管运生、李林、郭环球、许孔扬等老师。编者对他们提出的宝贵意见和建议、对他们的辛勤劳动和热情帮助表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录



第2版前言

第1版前言

主要符号表

绪论	1
第一章 变压器	3
第一节 变压器的基本工作原理和结构	3
第二节 单相变压器的空载运行	7
第三节 单相变压器的负载运行	11
第四节 变压器参数的测定	16
第五节 变压器的运行特性	18
第六节 三相变压器	22
第七节 其他用途的变压器	28
第八节 电力变压器运行维护和常见故障分析	31
思考题与习题	33
第二章 三相异步电动机	35
第一节 三相异步电动机的基本工作原理和结构	35
第二节 三相异步电动机的定子绕组和感应电动势	45
第三节 三相异步电动机的空载运行	52
第四节 三相异步电动机的负载运行	54
第五节 三相异步电动机的功率及转矩平衡方程式	60
第六节 三相异步电动机的参数测定与工作特性	62
第七节 三相异步电动机的运行维护和故障分析	65
思考题与习题	69
第三章 三相异步电动机的电力拖动	71
第一节 电力拖动系统的运动方程式	71
第二节 生产机械的负载转矩特性	73
第三节 三相异步电动机的机械特性	75
第四节 三相异步电动机的起动	81

第五节 三相异步电动机的制动	90
第六节 三相异步电动机的调速	98
思考题与习题	108
第四章 直流电机	111
第一节 直流电机的基本工作原理与结构	111
第二节 电磁转矩和电枢电动势	119
第三节 直流电动机的运行原理	120
第四节 直流电机的换向	125
思考题与习题	127
第五章 直流电动机的电力拖动	129
第一节 他励直流电动机的机械特性	129
第二节 他励直流电动机的起动和反转	131
第三节 他励直流电动机的制动	134
第四节 他励直流电动机的调速	140
第五节 串励和复励直流电动机	144
思考题与习题	146
第六章 其他用途的电动机	148
第一节 单相异步电动机	148
第二节 三相同步电动机	153
第三节 其他电动机	156
思考题与习题	162
第七章 控制电机	164
第一节 伺服电动机	164
第二节 测速发电机	170
第三节 步进电动机	174
思考题与习题	178
第八章 电动机容量的选择	179
第一节 电动机容量选择的基本知识	179
第二节 电动机容量选择的基本方法	182
思考题与习题	188
附录 用“时钟表示法”确定三相变压器的联结组	189
参考文献	191

绪 论



一、电机、电力拖动技术在国民经济中的作用

电能是现代能源中应用最广的二次能源，它的生产、变换、传送、分配、使用和控制都较为方便经济，而要实现电能的生产、变换和使用等都离不开电机。

电机是一种利用电磁感应定律和电磁力定律，将能量或信号进行转换或变换的电磁机械装置。它主要是指发电机、变压器和电动机。在电力工业中，产生电能的发电机和对电能进行变换、传输与分配的变压器是电站和变电所的主要设备。在机械制造、冶金、纺织、石油、煤炭、化工、印刷及其他工业企业中，人们利用电动机把电能转换成机械能，去拖动机床、轧钢机、纺织机、钻探机、电铲机、起重机、传输带等各种生产机械，从而满足生产工艺过程的要求。在交通运输业中，需要大量的牵引电动机和船用、航空电动机。随着农业机械化的发展，电力排灌、播种、收割等农用机械中，都需要规格不同的电动机。在伺服传动、机器人传动、航天航空和国防科学等领域的自动控制技术中，各种各样的控制电机作为检测、定位、随动、执行和解算元件。在日益走进百姓家庭的小轿车中，其内装备的各类微特电机一般已超过 60 台以上。在医疗仪器、电动工具、家用电器、办公自动化设备和计算机外部设备中，也离不开功能各异的小功率电动机和特种电机……。综上所述，电机在工农业生产、交通运输、国防、科技、文教领域以及人们日常生活中，早已成为提高生产效率和科技水平以及提高生活质量的主要载体之一，在国民经济的各个领域起着重要的作用。

同样以电动机为动力，拖动生产机械的拖动方式——电力拖动，具有许多其他拖动方式（如蒸汽机、内燃机、水轮机等）无法比拟的优点。

电力拖动具有优良的性能，起动、制动、反转和调速的控制简单方便、快速性好且效率高。电动机的类型很多，具有各种不同的运行特性，可以满足各种类型生产机械的要求。电力拖动系统各参数的检测、信号的变换与传送方便，易于实现最优控制。因此，电力拖动已成为现代工农业生产、交通运输等最广泛采用的拖动方式，而且随着自动控制理论不断发展，电力电子器件的采用，以及数控技术和计算机技术的发展与采用，电力拖动装置的特性品质大大提高，极大地提高了劳动生产率和产品质量，提高了生产机械运转的准确性、可靠性、快速性，提高了电力拖动系统的控制自动化程度，所以电力拖动成为国民经济中现代工农业等领域电气自动化的基础。

二、本课程的内容、特点及学习方法

本课程是机电类专业的一门技术基础课，既有基础性又有专业性。是“电机原理”和“电力拖动基础”两大部分内容的有机结合，主要学习各类电机的工作原理、基本结构、基本理论及其运行特性；学习各种电动机在电力拖动系统中的起动、反转、调速和制动等基本原理、特点和应用，并学习为拖动系统选择合适的电动机。

本课程是运用“电工基础”等基础课的基本理论来分析研究各类电机内部的电磁物理过程，从而得出各类电机的一般规律及其各异的特性。但它与“电工基础”等基础课的性质不同。在“电机及拖动基础”课程中，不仅有理论的分析推导，磁场的抽象叙述，而且

还要用基本理论去分析研究比较复杂的、往往带有机、电、磁综合性的工程实际问题。这是学习本课程的特点，也是难点。

因此为了学好本课程，必须熟练运用电磁感应和电磁力定律、电路定律、磁路定律、安培全电流定律、铁磁材料的特点、力学、运动学、机械制图等已学过的知识，理解和掌握各类电机的基本电磁关系和能量转换关系，并运用所学的理论对电机的运行性能、电动机各运转状态等作相关计算。为了提高课堂教学效果，课前应预习，这样一是对相关的已学知识进行回顾和补遗，二是对将要学到的内容浏览一遍，对新的名词术语和相关内容有所了解，便于有的放矢地听课；课后应及时复习和小结及选择适当的思考题和计算题作为课外作业，以巩固理论知识提高理解和运算能力。此外，需进行必要的实验和实习，培养学生的独立工作能力，提高实验、实训操作技能和动手能力。

“电机及拖动基础”为日后工作中对电力拖动设备的技术管理和生产第一线的选配、安装调试、操作、维护与检修电力拖动设备打下良好基础。

第一章

变 压 器

变压器是一种静止的电气设备，它利用电磁感应原理，根据需要可以将一种交流电压和电流等级转变成同频率的另一种电压和电流等级。它对电能的经济传输、灵活分配和安全使用具有重要的意义；同时，它在电气测试、控制和特殊用电设备上也有广泛的应用。

本章主要叙述一般用途的电力变压器的工作原理、分类、结构和运行特性，对特殊用途的变压器只作扼要的介绍。

第一节 变压器的基本工作原理和结构

一、变压器的基本工作原理

变压器是利用电磁感应原理工作的，主要由铁心和套在铁心上的两个（或两个以上）互相绝缘的绕组所组成，绕组之间有磁的耦合，但没有电的联系，如图 1-1 所示。通常一个绕组接交流电源，称为一次绕组；另一个绕组接负载，称为二次绕组。当在一次绕组两端加上合适的交流电源时，在电源电压 u_1 的作用下，一次绕组中就有交流电流 i_0 流过，产生一次绕组磁通势，于是铁心中激励起交变的磁通 Φ ，这个交变的磁通 Φ 同时交链一、二次绕组，根据电磁感应定律，便在一、二次绕组中产生感应电动势 e_1 、 e_2 。二次绕组在感应电动势 e_2 的作用下，便可向负载供电，实现能量传递。

在以后的分析中可知一、二次绕组感应电动势之比等于一、二次绕组匝数之比，而一次侧感应电动势 e_1 的大小接近于一次侧外加电源电压 u_1 ，二次侧感应电动势 e_2 的大小则接近于二次侧输出电压 u_2 。因此只要改变一次或二次绕组的匝数，便可达到变换

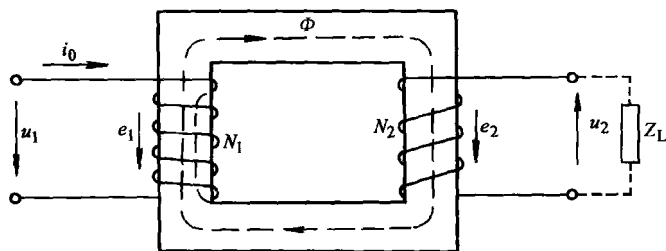


图 1-1 变压器的工作原理图

输出电压 u_2 大小的目的。这就是变压器利用电磁感应原理，将一种电压等级的交流电源转换成同频率的另一种电压等级的交流电源的基本工作原理。

二、变压器的应用和分类

1. 变压器的应用

变压器除了能够变换电压外，在以后的分析中还可以知道，变压器还能够变换电流和阻抗，因此在电力系统和电子设备中得到广泛的应用。

电力系统中使用的变压器称作电力变压器，它是电力系统中的重要设备。由交流电功率 $P = \sqrt{3}UI\cos\varphi$ 可知，如果输电线路输送的电功率 P 及功率因数 $\cos\varphi$ 一定，电压 U 越高时，

线路电流 I 越小, 则输电线路上的压降损耗和功率损耗也就越小; 同时还可以减小输电线的截面积, 节省材料, 达到减小投资和降低运行费用的目的。由于发电厂的交流发电机受绝缘和工艺技术的限制, 通常输出电压为 10.5kV 或 16kV, 而一般高压输电线路的电压为 110kV、220kV、330kV 或 500kV, 因此需用升压变压器将电压升高后送入输电线路。当电能输送到用电区后, 为了用电安全, 又必须用降压变压器将输电线路上的高电压降为配电系统的配电电压, 然后再经过降压变压器降压后供电给用户。电力系统的多次升压和降压, 使得变压器的应用相当广泛。

另外, 变压器的用途还很多, 如测量系统中使用的仪用互感器, 可将高电压变换成低电压或将大电流变换成小电流, 以隔离高压和便于测量; 用于实验室的自耦调压器, 则可任意调节输出电压的大小, 以适应负载对电压的要求; 在电子线路中, 除了电源变压器外, 变压器还用来耦合电路、传递信号、实现阻抗匹配等。

2. 变压器的分类

为了达到不同的使用目的并适应不同的工作条件, 变压器可以从不同的方面进行分类。

(1) 按用途分类 变压器可以分为电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器主要用于电力系统, 又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器和厂用变压器等。特种变压器根据不同系统和部门的要求, 提供各种特殊电源和用途, 如电炉变压器、整流变压器、电焊变压器、仪用互感器、试验用高压变压器和调压变压器等。

(2) 按绕组构成分类 变压器可分为双绕组、三绕组、多绕组变压器和自耦变压器。

(3) 按铁心结构分类 变压器可分为壳式变压器和心式变压器。

(4) 按相数分类 变压器可分为单相、三相和多相变压器。

(5) 按冷却方式分类 变压器可分为干式变压器、油浸式变压器 (油浸自冷式、油浸风冷式和强迫油循环式等)、充气式变压器。

尽管变压器的种类繁多, 但它们皆是利用电磁感应的原理制成的。

三、变压器的基本结构

变压器的主要部分是铁心和绕组 (合称为器身)。为了改善散热条件, 大、中容量的电力变压器的铁心和绕组浸在盛满变压器油的封闭油箱中, 各绕组与外线路的连接由绝缘套管引出。为了安全、可靠地运行, 变压器还设有储油柜、安全气道和气体继电器等附件, 如图 1-2 所示。

1. 铁心

铁心是变压器的磁路, 又作为

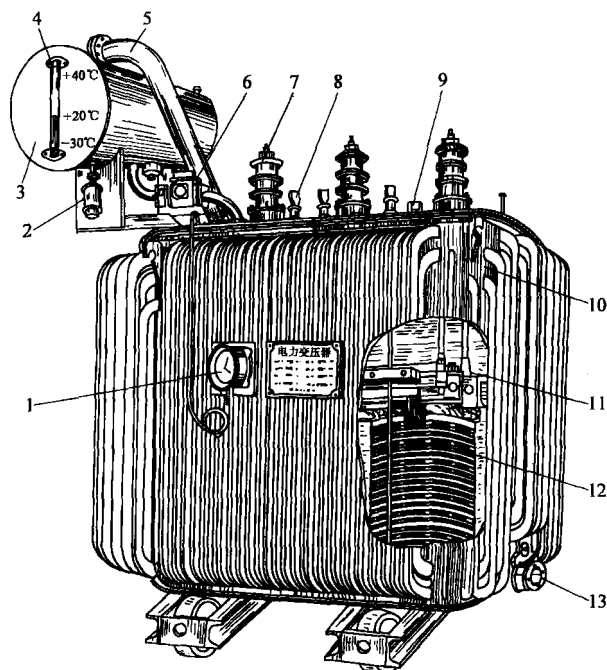


图 1-2 油浸式电力变压器

- 1—信号式温度计 2—吸湿器 3—储油柜
- 4—油表 5—安全气道 6—气体继电器
- 7—高压套管 8—低压套管 9—分接开关
- 10—油箱 11—铁心 12—线圈 13—放油阀门

绕组的支撑骨架。铁心分铁心柱和铁轭两部分，铁心柱上装有绕组，铁轭是连接两个铁心柱的部分，其作用是使磁路闭合。为了提高铁心的导磁性能，减小磁滞损耗和涡流损耗，铁心多采用厚度为0.35mm、表面涂有绝缘漆的热轧或冷轧硅钢片叠装而成。

铁心的基本结构型式有心式和壳式两种，如图1-3所示。心式结构的特点是绕组包围铁心，如图1-3a所示，这种结构比较简单，绕组的装配及绝缘也比较容易，适用于容量大而电压高的变压器，国产电力变压器均采用心式结构。壳式结构的特点是铁心包围绕组，如图1-3b所示，这种结构的机械强度较好，铁心容易散热，但外层绕组的铜线用量较多，制造工艺又复杂，一般多用于小型干式变压器中。

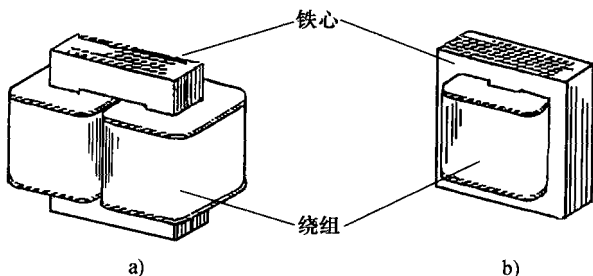


图1-3 心式和壳式变压器

a) 心式 b) 壳式

大、中型变压器的铁心，一般先将硅钢片裁成条形，然后采用交错叠片的方式叠装而成，如图1-4所示。交错叠片的目的是使各层磁路的接缝互相错开，以免接缝处的间隙集中，从而减小磁路的磁阻和励磁电流。

叠装好的铁心其铁轭用槽钢（或焊接夹件）及螺杆锁紧。当铁心的叠片上有冲孔以便采用螺杆锁紧时，则穿心螺杆要加绝缘套管，以保证螺杆与叠片间的绝缘。

小型变压器为了简化工艺和减小接缝处间隙，常采用E形、F形冲片交错叠装而成，如图1-5所示。

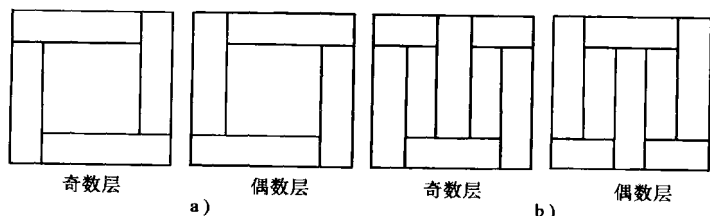


图1-4 变压器铁心的交错叠片

a) 单相 b) 三相

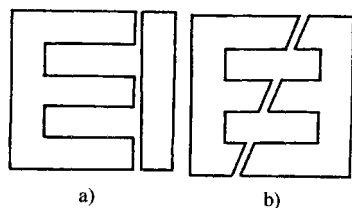


图1-5 小型变压器的铁心形式

a) E形 b) F形

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分，常用绝缘铜线绕制而成。变压器中，工作电压高的绕组称为高压绕组，工作电压低的绕组称为低压绕组。同心式绕组是将高、低压绕组同心地套在铁心柱上。为了便于绕组与铁心之间的绝缘，通常将低压绕组装在里面，而把高压绕组装在外面，如图1-6所示。在高、低压绕组之间及绕组与铁心之间都加有绝缘。同心式绕组具有结构简单、制造方便的特点，国产变压器多采用这种结构。

3. 其他结构附件

(1) 油箱 油浸式变压器的外壳就是油箱，它起着机械支撑、冷却散热和保护的作用。变压器的器身放在装有变压器油的油箱内。变压器油既是绝缘介质，又是冷却介质，它使铁心和绕组不被潮湿所侵蚀，同时通过变压器油的对

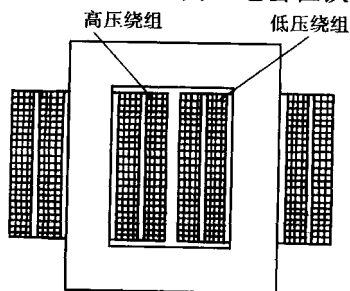


图1-6 同心式绕组

流，将铁心和绕组所产生的热量传递给油箱和散热管，再往空气中散发热量。

(2) 储油柜 储油柜亦称油枕，它是安装在油箱上面的圆筒形容器，它通过连通管与油箱相连，柜内油面高度随油箱内变压器油的热胀冷缩而变动，以保证器身始终浸在变压器油中。

(3) 分接开关 变压器运行时，为了使输出电压控制在允许的变化范围内，通过分接开关改变一次绕组匝数，从而达到调节输出电压的目的。通常输出电压的调节范围是额定电压的 $\pm 5\%$ 。

(4) 绝缘套管 变压器的引出线从油箱内穿过油箱盖时，都要通过瓷质绝缘套管，以使带电的引出线与接地的油箱绝缘。

四、变压器的铭牌和额定值

为使变压器安全、经济、合理地运行，每一台变压器上都安装了一块铭牌，上面标注了变压器型号及各额定数据等。只有理解铭牌上各种数据的含义，才能正确、安全地使用变压器。图 1-7 所示为三相电力变压器的铭牌。

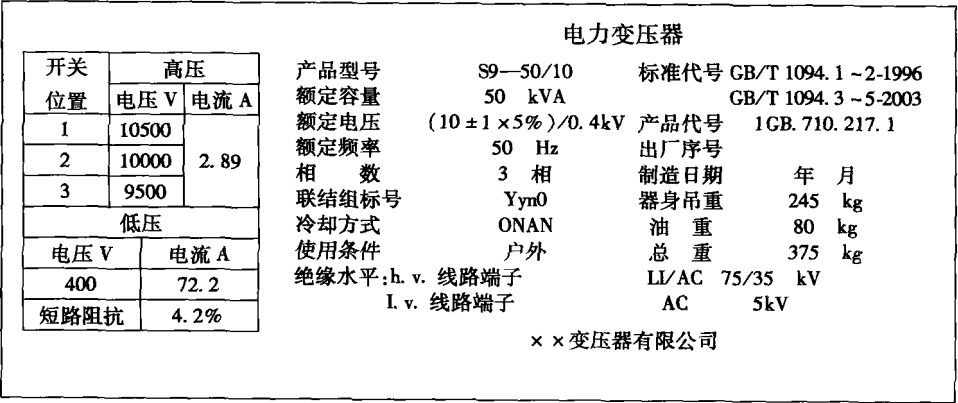
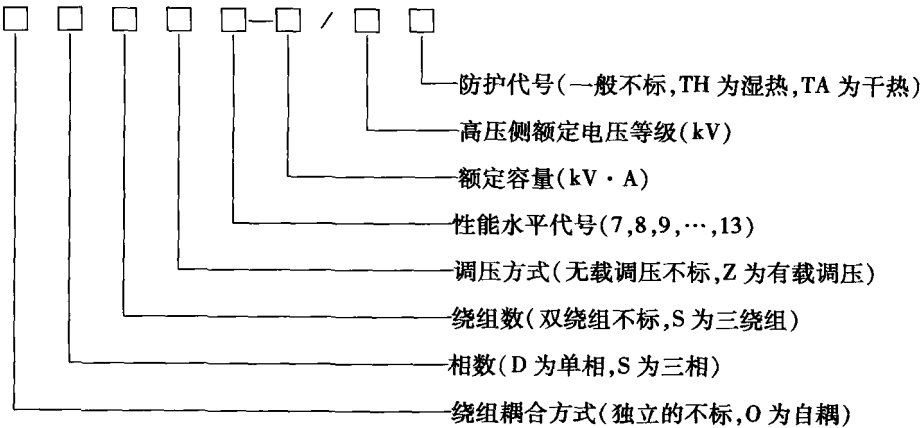


图 1-7 三相电力变压器铭牌

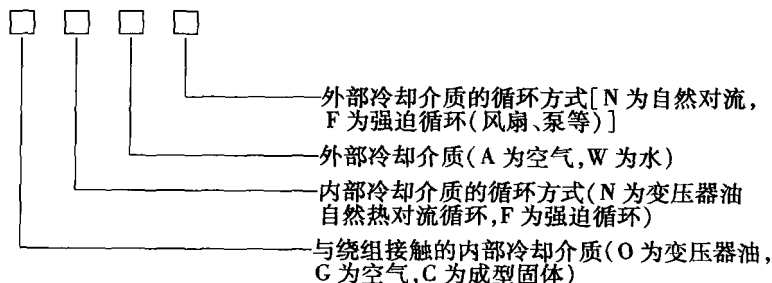
下面介绍铭牌上的主要内容：

1. 变压器的型号及冷却方式

电力变压器的型号包括变压器结构性能特点的基本代号、额定容量和高压侧额定电压等级(kV),其型号具体意义如下：



电力变压器的冷却方式包括变压器中与绕组接触的内部冷却介质、循环方式；变压器外部冷却介质、循环方式，其冷却方式具体意义如下：



目前我国生产的电力变压器，绕组均用铜线，铝线变压器 SL 已不生产；代表性能水平的代号都是 9 以上，数字越大代表空载损耗、负载损耗越小，是节能型变压器，因此 SJ 系列、S7 系列等已淘汰，S9 系列已广泛生产，S11、S13 等油浸式三相变压器系列也不断上市。同时 SC 系列（三相环氧树脂浇注干式变压器）也大量生产。

2. 变压器的额定值

(1) 额定电压 U_{1N} 和 U_{2N} 一次绕组的额定电压 U_{1N} (kV) 是根据变压器的绝缘强度和允许发热条件规定的一次绕组正常工作电压值。二次绕组的额定电压 U_{2N} 指一次绕组加上额定电压，分接开关位于额定分接头时，二次绕组的空载电压值。对三相变压器，额定电压指线电压。

(2) 额定电流 I_{1N} 和 I_{2N} 额定电流 I_{1N} 和 I_{2N} (A) 是根据允许发热条件而规定的绕组长期允许通过的最大电流值。对三相变压器，额定电流指线电流。

(3) 额定容量 S_N 额定容量 S_N (kV · A) 指额定工作条件下变压器输出能力（视在功率）的保证值。三相变压器的额定容量是指三相容量之和。由于电力变压器的效率很高，忽略压降损耗时有

$$\text{对单相变压器} \quad S_N = U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N} \quad (1-1)$$

$$\text{对三相变压器} \quad S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \quad (1-2)$$

当已知一台变压器的相数、额定容量和额定电流时，可选用上面两式之一计算该变压器的额定电流。

例 1-1 一台三相油浸自冷式变压器，已知 $S_N = 560 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 10000 \text{ V}/400 \text{ V}$ ，试求一、二次绕组的额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} 各是多大？

解：

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{560 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10000} \text{ A} = 32.33 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{560 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} \text{ A} = 808.29 \text{ A}$$

第二节 单相变压器的空载运行

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，这种运行方式称为变压器的空载运行，如图 1-8 所示。其中 N_1 和 N_2 分别为一、二次绕组的匝数。

一、空载运行时的物理状况

由于变压器中电压、电流、磁通及电动势的大小和方向都随时间作周期性变化，为了能正确表明各量之间的关系，要规定它们的正方向。一般采用电工惯例来规定其正方向（假定正方向）：

1) 同一条支路中，电压 u 的正方向与电流 i 的正方向一致。

2) 电流 i 与其产生的磁通势所建立的磁通 Φ 的正方向符合右手螺旋法则。

3) 由磁通 Φ 产生的感应电动势 e ，其正方向与产生磁通 Φ 的电流 i 正方向一致，则 $e = -Nd\Phi/dt$ 。

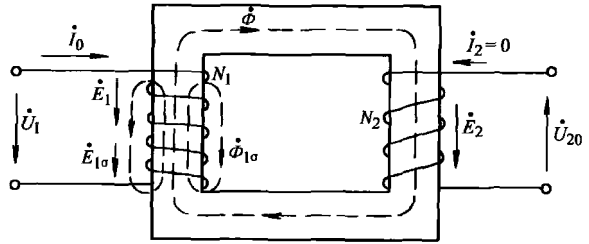
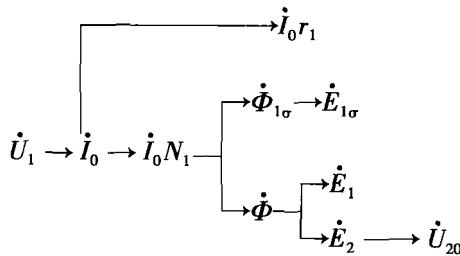


图 1-8 单相变压器的空载运行

以上各瞬时量正方向的规定，同样适用于图 1-8 中各相量的正方向确定。

当一次绕组加上交流电源电压 $\dot{U}_1$ 时，一次绕组中就有电流产生，由于变压器为空载运行，此时称一次绕组中的电流为空载电流 $\dot{i}_0$ 。由 $\dot{i}_0$ 产生空载磁通势 $\dot{F}_0 = \dot{i}_0 N_1$ ，并建立空载时的磁场。由于铁心的磁导率比空气（或油）的磁导率大得多，所以绝大部分磁通通过铁心闭合，同时交链一、二次绕组，并产生感应电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 。如果二次绕组与负载接通，则在电动势作用下向负载输出电功率，所以这部分磁通起着传递能量的媒介作用，称为主磁通 $\dot{\Phi}$ ；另有一小部分磁通（约为主磁通的 0.25%）主要经非磁性材料（空气或变压器油等）形成闭路，只与一次绕组交链，不参与能量传递，称为一次绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ ，它在一次绕组中产生漏磁电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 。另外， $\dot{i}_0$ 将在一次绕组中产生绕组压降 $\dot{i}_0 r_1$ ，此过程可表示为



二、感应电动势和漏磁电动势

1. 感应电动势

在变压器的一次绕组加上正弦电压 u_1 时， e_1 和 e_2 也按正弦规律变化。假设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ 。根据电磁感应定律，一次绕组的感应电动势 e_1 为

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t \\ &= \omega N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知，当主磁通 Φ 按正弦规律变化时，由它产生的感应电动势也按正弦规律变化，但在时间相位上滞后于主磁通 90° ，且 e_1 的有效值为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

同理，二次绕组的感应电动势的有效值为

$$E_2 = \sqrt{2}\pi f N_2 \Phi_m = 4.44f N_2 \Phi_m$$

e_1 和 e_2 用相量表示为

$$\begin{aligned}\dot{E}_1 &= -j4.44f N_1 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j4.44f N_2 \dot{\Phi}_m\end{aligned}\quad (1-4)$$

式(1-4)表明，变压器一、二次绕组感应电动势的大小与电源频率 f 、绕组匝数 N 及铁心中主磁通的最大值 Φ_m 成正比，而在相位上比产生感应电动势的主磁通滞后 90° 。

2. 漏磁电动势

变压器一次绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 也将一次绕组中感应产生一个漏磁电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 。根据前面的分析，同样可得出

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} \quad (1-5)$$

为简化分析或计算，由电工基础知识，引入参数 L_1 或 X_1 ， L_1 和 X_1 分别为一次绕组的漏电感和漏电抗，从而把式(1-5)漏磁电动势的电磁表达形式转换成我们习惯的电路表达形式

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 \omega L_1 = -j\dot{I}_0 X_1 \quad (1-6)$$

从物理意义上讲，漏电抗反映了漏磁通对电路的电磁效应。由于漏磁通的主要路径是非铁磁物质，磁路不会饱和，是线性磁路。因此对已制成的变压器，漏电感 L_1 为一个常数，当频率 f 一定时，漏电抗 X_1 也是常数。

三、空载运行时的等效电路和电动势平衡方程式

除了前面引入的漏电抗参数 X_1 ，这里再引入参数 Z_m ，就可把图 1-8 所示的单相变压器空载运行时电与磁的相互关系用纯电路的形式“等效”地表示出来，以简化对变压器的分析和计算。变压器空载运行时的等效电路如图 1-9 所示。

图中阻抗 Z_m 是感应电动势 $\dot{E}_1$ 对应的参数，而 $\dot{E}_1$ 是主磁通感应的，参数中除了电抗还要考虑铁心损耗的影响，把 $\dot{E}_1$ 的作用看成是空载电流 $\dot{I}_0$ 流过 Z_m 而产生的压降，即

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 (r_m + jX_m) \quad (1-7)$$

式中 Z_m ——变压器的励磁阻抗， $Z_m = r_m + jX_m$ ；

r_m ——励磁电阻，对应铁心损耗 p_{Fe} 的等效电阻；

X_m ——励磁电抗，反映主磁通的作用。

由图 1-9 可得一次侧电动势平衡方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 Z_m + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (Z_m + Z_1) \quad (1-8)$$

式中 r_1 ——一次绕组的电阻；

Z_1 ——一次绕组的漏阻抗， $Z_1 = r_1 + jX_1$ 。

可以看出，空载时的变压器相当于两个电抗线圈串联：一个是阻抗为 $Z_1 = r_1 + jX_1$ 的空心线圈；另一个是阻抗为 $Z_m = r_m + jX_m$ 的铁心线圈。 r_m 和 X_m 均随电压的大小和变压器铁心饱和程度不同而变化，但是一般变压器实际运行时，电网的电压和频率基本恒定，可以认为是常数。

变压器的空载电流 $\dot{I}_0$ 主要分量是建立空载磁场的感性无功励磁分量，它与主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 同

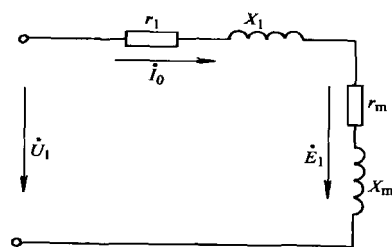


图 1-9 变压器空载运行时的等效电路

相位; $\dot{I}_0$ 还有一个很小的用于平衡铁心损耗、空载铜耗的有功分量, 它超前主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 90° 。我们通常近似称空载电流 I_0 为励磁电流。对于电力变压器, 空载电流 I_0 一般为额定电流的 $2\% \sim 5\%$, 从 S9 系列开始, I_0 已小于额定电流的 2% , 且随变压器容量增大而下降。

电力变压器的漏阻抗 Z_1 是很小的, 漏阻抗压降 $I_0 Z_1$ 一般小于 $0.5\% U_{1N}$, 因此式 (1-8) 可近似为

$$U_1 \approx E_1 \quad (1-9)$$

空载运行时二次侧电动势平衡方程式为

$$U_{20} = E_2 \quad (1-10)$$

由 E_1 、 E_2 有效值表达式和式 (1-9)、式 (1-10) 可得变压器的电压比为

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-11)$$

对三相变压器来说, 电压比是指相电压的比值。

由式 (1-11) 可知, 若 $N_2 > N_1$, 则 $U_2 > U_1$, 为升压变压器; 若 $N_2 < N_1$, 则 $U_2 < U_1$, 为降压变压器。通过改变一、二次绕组的匝数之比, 即可达到改变二次绕组输出电压的目的。

四、空载运行时的相量图

为了直观地表示变压器中各物理量之间的大小和相位关系, 在同一张图上将各物理量用相量的形式来表示, 称之为变压器的相量图。

根据式 (1-8) 作出的空载运行时的相量图如图 1-10 所示。作相量图时, 先以主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 作参考相量, 画在水平线上; 依据 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 滞后 $\dot{\Phi}_m$ 90° 可画出 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$; 因铁耗的存在, 所以 $\dot{I}_0$ 超前 $\dot{\Phi}_m$ 一个铁耗角 α_{Fe} ; 最后根据式 (1-8), 在 $-\dot{E}_1$ 相量的末端作电阻压降相量 $\dot{I}_0 r_1$ 平行于 $\dot{I}_0$, 再在 $\dot{I}_0 r_1$ 相量末端作漏抗压降相量 $j\dot{I}_0 X_1$ 超前于 $\dot{I}_0$ 90° , 其末端与原点相连, 即为相量 $\dot{U}_1$ 。作图 1-10 的相量图时, 为了看得清楚起见, 把 $\dot{I}_0 r_1$ 和 $j\dot{I}_0 X_1$ 有意识地放大了比例。

由图 1-10 可知, $\dot{U}_1$ 与 $\dot{I}_0$ 之间的相位角 φ_0 接近 90° , 因此变压器空载时的功率因数很低, 一般 $\cos \varphi_0 = 0.1 \sim 0.2$ 。

例 1-2 一台单相变压器, 已知 $S_N = 5000 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N}/U_{2N} = 35 \text{ kV}/6.6 \text{ kV}$, 铁心的有效截面积为 $S_{Fe} = 1120 \text{ cm}^2$, 若取铁心中最大磁通密度 $B_m = 1.5 \text{ T}$, 试求高、低压绕组的匝数和电压比 (不计漏磁)。

解: 变压器的电压比为

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{35}{6.6} = 5.3$$

铁心中的磁通

$$\Phi_m = B_m S_{Fe} = (1.5 \times 1120 \times 10^{-4}) \text{ Wb} = 0.168 \text{ Wb}$$

高压绕组匝数

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44 f \Phi_m} = \frac{35 \times 10^3}{4.44 \times 50 \times 0.168} = 938$$

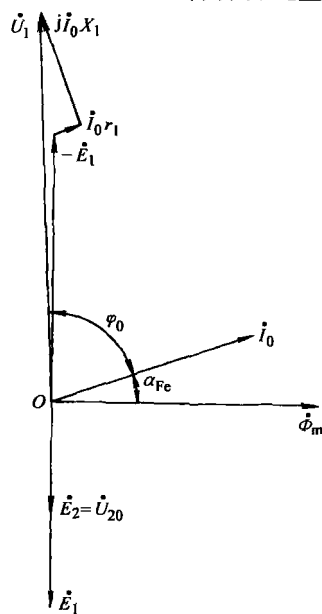


图 1-10 变压器空载运行时的相量图