



教育部高职高专规划教材  
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

# 电机应用技术基础

牛维扬 主编  
牛维扬 李祖明 殷 军 编

高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



教育部高职高专规划教材

# 电机应用技术基础

牛维扬 主编

牛维扬 李祖明 殷军 编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是教育部高职高专规划教材。全书从使用的角度出发,介绍交流和直流电动机、变压器以及一些常用特种驱动用小型电动机的工作原理、基本特性以及选用、使用、维护等方面的基础知识,以便为学习后续课程打下基础。书中尽量减少理论推导,将实训与理论教学穿插进行,如:变压器的拆装与组装实训、电动机的拆装与测试实训等。

全书共5章,包括变压器、异步电动机、同步电动机、直流电动机、电动机的选择与维护。

本书适用于高职高专电类各专业,也可作为从事电工技术工作的技术人员学习参考。

## 图 书 在 版 编 目 (CIP) 数 据

电机应用技术基础/牛维扬主编. —北京:高等教育出版社,2001.9

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-04-009966-7

I. ①... II. 牛... III. 电机—高等学校:技术学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 26189 号

电机应用技术基础

牛维扬 主编

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2001 年 9 月第 1 版

印 张 16

印 次 2001 年 9 月第 1 次印刷

字 数 380 000

定 价 13.90 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**

## 出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

# 前 言

本书是根据教育部《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育电气信息类专业人才培养目标及规格》的要求,在多年教学改革与实践的基础上编写的。作为教育部高职高专规划教材,适用于电气、自动化、机电类等相关专业,也可作为相关培训教材和供从事电气技术工作的工程技术人员参考。

各种电动机和变压器是电气技术工作的主体设备。从使用者的角度看,主要应掌握它们的基本原理、工作特性、分析方法及使用、维护,并不需要从学科的角度深入了解电机理论。电气技术工作是一个宽广的技术领域,可以有多种专业发展方向,如自动控制、发供电、机电工程等等,但它们同样需要了解和掌握电动机、变压器的基础知识,这是共性的一面。本书就是基于上述认识,在改革实践的基础上编写的。

本书内容包括交流和直流电动机、变压器以及一些常见的驱动用小型电动机,是从事电气技术工作必需了解和掌握的基本内容和必备的基础。在编写中力求阐明概念,突出重点,联系实际,注重工程分析方法。书中编写了较多的例题,一般每章均备有指导复习的小结、思考题和习题。在一些主要章节设有“实践训练课题”,以督促安排综合性、工程性的训练,加强学生的技术应用能力培养,再配合必要的、传统的电机实验课,期望使学生的能力培养环节得以落实和系统化,最终使学生具有较扎实的理论基础和较强的工程分析能力。

本书按 70 学时编写,全书共 12 章。由牛维扬任主编并编写 1,2,3,8 四章;殷军编写 4,5,6,7 四章;李祖明编写 9,10,11,12 四章及附录。书中少数章、节注有“\*”号,表示该章、节内容可以选讲或指定学生自学。

本书承哈尔滨理工大学史乃教授仔细审阅,提出十分宝贵的意见;对提高本书质量起了重要作用,在此谨表衷心的感谢。

鉴于水平所限,书中错漏不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2001 年 3 月

|      |     |     |
|------|-----|-----|
| 责任编辑 | 韩颖  |     |
| 封面设计 | 杨立新 |     |
| 责任绘图 | 李维平 |     |
| 版式设计 | 周顺银 |     |
| 责任校对 | 王慧玲 | 姜国萍 |
| 责任印制 | 杨明  |     |

# 目 录

|                                                   |    |                                        |    |
|---------------------------------------------------|----|----------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 变压器原理</b> .....                          | 1  | 2.1.1 三相变压器磁路系统 .....                  | 41 |
| 1.1 变压器基本工作原理、分类及结构简介 ..                          | 1  | 2.1.2 变压器一、二次绕组电压的相位关系 .....           | 42 |
| 1.1.1 变压器基本工作原理 .....                             | 1  | 2.1.3 三相变压器的联结组别及其判定 ..                | 43 |
| 1.1.2 变压器分类 .....                                 | 2  | <b>2.2 三相变压器并联运行</b> .....             | 45 |
| 1.1.3 配电变压器结构简介 .....                             | 2  | 2.2.1 并联运行的理想情况和并联条件 ..                | 45 |
| 1.1.4 型号及额定数据 .....                               | 6  | 2.2.2 变比不等或联结组别不同时引起的环流 .....          | 46 |
| <b>1.2 变压器空载运行</b> .....                          | 7  | 2.2.3 短路阻抗标么值不等时的负载分配 .....            | 47 |
| 1.2.1 空载运行时的物理情况 .....                            | 7  | <b>2.3 三相变压器不对称运行分析</b> .....          | 49 |
| 1.2.2 主电动势 $E_1$ 、 $E_2$ 和一次侧漏电动势 $E_{l_0}$ ..... | 8  | 2.3.1 对称分量法简介 .....                    | 49 |
| 1.2.3 空载电流 $i_0$ 的分析 .....                        | 9  | 2.3.2 相序参数及相序等效电路 .....                | 50 |
| 1.2.4 空载等效电路、相量图 .....                            | 10 | 2.3.3 $Y, y_n 0$ 联结组三相变压器不对称运行分析 ..... | 52 |
| <b>1.3 变压器负载运行</b> .....                          | 12 | 本章小结 .....                             | 54 |
| 1.3.1 负载运行的物理情况——磁动势平衡方程 .....                    | 12 | 思考题 .....                              | 55 |
| 1.3.2 负载运行时电动势方程 .....                            | 13 | 习题 .....                               | 55 |
| 1.3.3 折合算法 .....                                  | 14 | 实践训练课题 .....                           | 56 |
| 1.3.4 负载运行的等效电路 .....                             | 16 | <b>第 3 章 其它类型变压器</b> .....             | 58 |
| 1.3.5 负载运行的相量图 .....                              | 17 | 3.1 自耦变压器和自耦调压器 .....                  | 58 |
| <b>1.4 变压器参数的实验测定及表示法</b> .....                   | 18 | 3.1.1 自耦变压器工作原理 .....                  | 58 |
| 1.4.1 变压器空载试验 .....                               | 18 | 3.1.2 自耦变压器的容量关系 .....                 | 59 |
| 1.4.2 变压器短路试验 .....                               | 19 | 3.1.3 自耦变压器的特点及其应用 .....               | 60 |
| 1.4.3 变压器参数表示法 .....                              | 20 | * 3.1.4 自耦调压器 .....                    | 61 |
| <b>1.5 变压器运行特性</b> .....                          | 25 | <b>3.2 互感器及变换器</b> .....               | 62 |
| 1.5.1 电压变化率 $\Delta U$ .....                      | 25 | 3.2.1 电压互感器 .....                      | 62 |
| 1.5.2 变压器损耗、频率 .....                              | 27 | 3.2.2 电流互感器 .....                      | 63 |
| <b>1.6 变压器发热与冷却</b> .....                         | 31 | * 3.2.3 电流电压变换器 .....                  | 64 |
| * 1.7 小型控制用变压器计算及制作 .....                         | 32 | <b>* 3.3 整流变压器</b> .....               | 65 |
| 1.7.1 小变压器设计计算要点 .....                            | 32 | 3.3.1 概述 .....                         | 65 |
| 1.7.2 小变压器制作工艺要点 .....                            | 35 | 3.3.2 整流变压器容量确定 .....                  | 66 |
| 本章小结 .....                                        | 37 | 本章小结 .....                             | 68 |
| 思考题 .....                                         | 37 | 思考题 .....                              | 69 |
| 习题 .....                                          | 38 | 习题 .....                               | 69 |
| 实践训练课题 .....                                      | 40 | <b>第 4 章 交流电机绕组、电动势、磁</b>              |    |
| <b>第 2 章 三相变压器</b> .....                          | 41 |                                        |    |
| 2.1 三相变压器的磁路与绕组联结 .....                           | 41 |                                        |    |

|                                    |     |                                               |     |
|------------------------------------|-----|-----------------------------------------------|-----|
| <b>电动势</b> .....                   | 70  | <b>实践训练课题</b> .....                           | 118 |
| <b>4.1 交流绕组及其感应电动势</b> .....       | 70  | <b>第6章 异步电动机运行分析</b> .....                    | 119 |
| 4.1.1 关于交流绕组的几个概念 .....            | 70  | 6.1 电力拖动的一般知识 .....                           | 119 |
| 4.1.2 线圈基波电动势及节距因数 .....           | 71  | 6.1.1 电力拖动系统的概念 .....                         | 119 |
| 4.1.3 线圈组基波电动势及分布因数 .....          | 73  | 6.1.2 负载的机械特性 .....                           | 119 |
| 4.1.4 三相交流绕组连接实例 .....             | 74  | 6.1.3 电力拖动的运动方程 .....                         | 121 |
| 4.1.5 相绕组基波电动势 $E_{\phi}$ .....    | 78  | 6.1.4 异步电动机运行稳定性 .....                        | 122 |
| <b>4.2 单相绕组的磁动势——脉振磁动势</b> .....   | 79  | 6.2 异步电动机起动 .....                             | 123 |
| 4.2.1 线圈的磁动势 .....                 | 79  | 6.2.1 直接起动 .....                              | 123 |
| 4.2.2 线圈组的磁动势 .....                | 81  | 6.2.2 降压起动 .....                              | 124 |
| 4.2.3 相绕组的磁动势 .....                | 82  | 6.2.3 转子绕组串入电阻起动 .....                        | 126 |
| 4.2.4 单相基波脉振磁动势的分解 .....           | 83  | 6.3 异步电动机调速 .....                             | 128 |
| <b>4.3 三相绕组合成磁动势——旋转磁动势</b> .....  | 84  | 6.3.1 调速的基本方法概述 .....                         | 128 |
| 4.3.1 三相合成旋转磁场的概念 .....            | 84  | 6.3.2 变极调速概念 .....                            | 129 |
| 4.3.2 三相基波合成磁动势——圆形旋转<br>磁动势 ..... | 85  | 6.3.3 变频调速概念 .....                            | 130 |
| 4.3.3 三相绕组的谐波磁动势 .....             | 86  | 6.3.4 改变定子绕组端电压调速 .....                       | 131 |
| 4.3.4 两相绕组产生的磁动势 .....             | 89  | 6.3.5 绕线型电动机转子回路串入电阻<br>调速 .....              | 131 |
| 本章小结 .....                         | 91  | 6.3.6 绕线型电动机转子回路串入电动<br>势调速概念 .....           | 132 |
| 思考题 .....                          | 91  | 6.4 异步电动机制动概念 .....                           | 133 |
| 习题 .....                           | 92  | 6.4.1 能耗制动 .....                              | 133 |
| 实践训练课题 .....                       | 92  | 6.4.2 反接制动 .....                              | 134 |
| <b>第5章 异步电动机运行原理</b> .....         | 93  | 6.4.3 回馈制动(发电制动) .....                        | 135 |
| 5.1 异步电动机基本知识 .....                | 93  | 本章小结 .....                                    | 136 |
| 5.1.1 异步电动机转动原理 .....              | 93  | 思考题 .....                                     | 136 |
| 5.1.2 异步电机的三种运行状态 .....            | 94  | 习题 .....                                      | 137 |
| 5.1.3 异步电动机结构简介 .....              | 95  | <b>第7章 单相异步电动机及交流伺服电<br/>        动机</b> ..... | 138 |
| 5.1.4 铭牌数据及国产系列 .....              | 98  | 7.1 单相异步电动机 .....                             | 138 |
| 5.2 三相异步电动机工作原理 .....              | 101 | 7.1.1 单相异步电动机工作原理 .....                       | 138 |
| 5.2.1 气隙合成旋转磁场 .....               | 101 | 7.1.2 电容分相的单相异步电动机 .....                      | 139 |
| 5.2.2 定子、转子电动势方程 .....             | 102 | 7.1.3 电阻分相起动电动机 .....                         | 141 |
| 5.2.3 等效的静止转子——折算 .....            | 103 | 7.1.4 罩极电动机 .....                             | 142 |
| 5.2.4 异步电动机等效电路、相量图 .....          | 104 | 7.2 交流伺服电动机 .....                             | 142 |
| 5.3 异步电动机功率、转矩及机械特性 .....          | 106 | 7.2.1 交流伺服电动机的结构特点及工作<br>原理 .....             | 142 |
| 5.3.1 功率平衡方程 .....                 | 106 | 7.2.2 交流伺服电动机控制方法简介 .....                     | 144 |
| 5.3.2 转矩平衡方程及电磁转矩 .....            | 107 | 思考题 .....                                     | 144 |
| 5.3.3 异步电动机机械特性 .....              | 111 | <b>第8章 同步电动机</b> .....                        | 146 |
| 5.3.4 异步电动机的工作特性 .....             | 114 | 8.1 概述 .....                                  | 146 |
| 本章小结 .....                         | 116 |                                               |     |
| 思考题 .....                          | 116 |                                               |     |
| 习题 .....                           | 117 |                                               |     |

|                                     |     |                                     |     |
|-------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
| 8.1.1 基本工作原理及分类 .....               | 146 | 9.2.2 感应电动势和电磁转矩 .....              | 183 |
| 8.1.2 额定值及国产同步电动机系列<br>简介 .....     | 147 | 9.3 直流电机的换向 .....                   | 188 |
| 8.2 同步电动机的基本电磁关系 .....              | 148 | 9.3.1 换向过程的概念 .....                 | 188 |
| 8.2.1 同步电动机的磁动势 .....               | 148 | 9.3.2 换向的电磁理论 .....                 | 189 |
| 8.2.2 凸极同步电动机电动势方程、相<br>量图 .....    | 149 | * 9.3.3 换向火花分析 .....                | 191 |
| 8.2.3 隐极同步电动机电动势方程、相<br>量图 .....    | 151 | 9.3.4 改善换向的方法 .....                 | 192 |
| 8.3 同步电动机功率、转矩及角特性 .....            | 152 | 本章小结 .....                          | 193 |
| 8.3.1 功率与转矩方程 .....                 | 152 | 思考题 .....                           | 194 |
| 8.3.2 功角特性与矩角特性 .....               | 153 | 习题 .....                            | 195 |
| 8.3.3 同步电动机稳定运行区和过载<br>能力 .....     | 154 | 实践训练课题 .....                        | 195 |
| 8.4 同步电动机功率因数调节及 V 形<br>曲线 .....    | 157 | <b>第 10 章 直流电动机运行原理</b> .....       | 197 |
| 8.4.1 同步电动机 V 形曲线 .....             | 157 | 10.1 直流电动机的基本方程 .....               | 197 |
| 8.4.2 用同步电动机改善电网功率<br>因数 .....      | 158 | 10.1.1 直流电动机的励磁方式 .....             | 197 |
| 8.5 同步电动机起动 .....                   | 160 | 10.1.2 直流电动机的基本方程 .....             | 198 |
| 8.6 微型同步电动机 .....                   | 161 | 10.2 直流电动机工作特性 .....                | 200 |
| 8.6.1 永磁式同步电动机 .....                | 161 | 10.2.1 直流电动机转速与转矩特性 .....           | 200 |
| 8.6.2 磁阻同步电动机 .....                 | 161 | 10.2.2 并励电动机工作特性 .....              | 201 |
| 8.6.3 磁滞同步电动机 .....                 | 163 | 10.2.3 串励电动机工作特性 .....              | 203 |
| 8.7 步进电动机 .....                     | 164 | 10.2.4 复励电动机工作特性 .....              | 204 |
| 8.7.1 反应式步进电动机的工作原理 .....           | 164 | 10.3 直流电动机起动 .....                  | 206 |
| * 8.7.2 小步距角反应式步进电动机的工作<br>原理 ..... | 166 | 10.4 直流电动机调速 .....                  | 208 |
| * 8.7.3 步进电动机运行状态 .....             | 166 | 10.4.1 并励电动机调速方法 .....              | 209 |
| * 8.7.4 步进电动机驱动电源简介 .....           | 169 | 10.4.2 其它励磁方式电动机的调速及<br>电动机反转 ..... | 212 |
| 本章小结 .....                          | 170 | 10.5 他励直流电动机的电气制动 .....             | 212 |
| 思考题 .....                           | 170 | 10.5.1 能耗制动 .....                   | 213 |
| 习题 .....                            | 171 | 10.5.2 反接制动 .....                   | 214 |
| 实践训练课题 .....                        | 171 | 10.5.3 回馈制动(再生制动) .....             | 215 |
| <b>第 9 章 直流电机基本知识</b> .....         | 173 | 本章小结 .....                          | 216 |
| 9.1 概述 .....                        | 173 | 思考题 .....                           | 217 |
| 9.1.1 直流电动机的工作原理 .....              | 173 | 习题 .....                            | 217 |
| 9.1.2 直流电机的可逆性原理 .....              | 174 | <b>第 11 章 特殊直流电动机</b> .....         | 219 |
| 9.1.3 直流电机的基本结构 .....               | 175 | 11.1 直流伺服电动机 .....                  | 219 |
| 9.1.4 国产直流电机简介 .....                | 177 | 11.2 直流测速发电机 .....                  | 221 |
| 9.2 直流电枢绕组及其电动势、电磁转矩 .....          | 179 | 11.3 直流力矩电动机 .....                  | 222 |
| 9.2.1 直流电枢绕组 .....                  | 179 | 11.4 通用电动机(交直流两用电动机) .....          | 223 |
|                                     |     | 本章小结 .....                          | 225 |
|                                     |     | 思考题与习题 .....                        | 225 |
|                                     |     | <b>第 12 章 电动机选择与维护</b> .....        | 226 |
|                                     |     | 12.1 电动机选择的主要内容 .....               | 226 |
|                                     |     | 12.1.1 一般原则 .....                   | 226 |

|                                   |     |                                       |     |
|-----------------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 12.1.2 电动机种类选择 .....              | 226 | * 12.3.3 电动机的维护与保养 .....              | 237 |
| 12.1.3 电动机电压等级与转速选择 .....         | 227 | * 12.3.4 电动机的常见故障及处理 .....            | 237 |
| 12.1.4 电动机型式选择 .....              | 228 | 本章小结 .....                            | 237 |
| 12.1.5 电动机温升与工作方式、额定功率<br>.....   | 228 | 思考题与习题 .....                          | 238 |
| 12.2 电动机额定功率选择 .....              | 231 | <b>附录 A 典型负载的负载特性</b> .....           | 239 |
| 12.2.1 电动机额定功率选择的一般<br>步骤 .....   | 231 | <b>附录 B 异步电动机绕组故障检测方法</b><br>简介 ..... | 240 |
| 12.2.2 负载功率的估算 .....              | 231 | <b>附录 C 异步电动机的维护保养</b><br>内容 .....    | 242 |
| 12.2.3 工作时间内常值负载时额定功<br>率选择 ..... | 233 | <b>附录 D 电动机常见异常现象及</b><br>原因 .....    | 243 |
| 12.3 电动机的使用、维护及故障处理 .....         | 235 | <b>参考文献</b> .....                     | 246 |
| 12.3.1 电动机使用前的检查与准备 .....         | 235 |                                       |     |
| 12.3.2 电动机运行中的监视与维护 .....         | 236 |                                       |     |

# 第1章

## 变压器原理

变压器是一种静止的电器设备,由绕在共同铁心上的两个或两个以上绕组构成。依据电磁感应原理,它将一种数值的交流电压、电流转换为同频率的另一种数值的电压、电流。它还可以用来做阻抗变换器以及作为电气测量的中介元件使用。调压器、电抗器等在基本原理、结构上与变压器十分类似,通常也称为变压器类产品。

变压器用途广泛、种类繁多,容量小的只有几伏安,大的可达数十万伏安;电压低的只有几伏,高的可达几十万伏,因此其结构各有特点,然而基本原理是相同的。本章以电力变压器为典型,介绍变压器的工作原理、性能及其分析方法。

### 1.1 变压器基本工作原理、分类及结构简介

#### 1.1.1 变压器基本工作原理

如图 1.1 所示,闭合铁心上绕制有两个(或两个以上)绕组,各绕组匝数不等。其中与电源相接、接受电能的绕组,称为一次绕组(原边);与负载相接、向负载提供电能的绕组称为二次绕组(副边)。凡一次侧的量均注以下标“1”,凡二次侧的量均注以下标“2”。

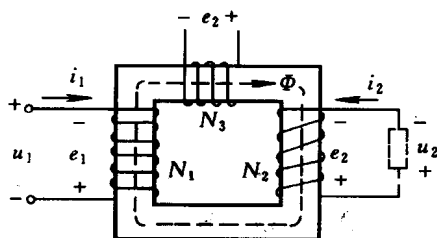


图 1.1 变压器工作原理图

当交流电压  $u_1$  加到一次绕组上,交流电流  $i_1$  便从电源流入一次绕组,产生激磁作用,使铁心中产生交变磁通  $\Phi$ ,磁通  $\Phi$  同时交链各个绕组(称磁耦合),并在各绕组中产生感应电动势  $e_1$ 、 $e_2$ ,由电磁感应定律有

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

若某二次绕组与负载阻抗  $Z_L$  接通,则电动势  $e_2$  会在二次侧回路产生电流  $i_2$ ,  $i_2$  流经  $Z_L$ , 其两端电压降即为变压器二次绕组的端电压  $u_2$ 。这样,电源送至一次侧的电能( $u_1 i_1$ ),通过磁耦合关系(一、二次侧没有电的直接连系),向负载输出了电能( $u_2 i_2$ )。

定义变压器变比  $K$  为

$$K = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{u_1}{u_2} \quad (1-2)$$

式中,  $N_1$ 、 $N_2$  分别为一、二次绕组的匝数。显然,若  $N_1/N_2$  不同,当外加电压  $u_1$  不变时,可以获得不同的二次侧电压  $u_2$ ,用来满足负载要求。利用一、二次绕组匝数的变化来改变二次侧电压值,这就是变压器能够“变压”的原理。

### 1.1.2 变压器分类

随着科学技术的发展,电能的利用深入到生产、生活的各个领域,变压器也获得极为广泛的应用。如果按照用途对变压器分类,大体可分为:

(1) 电力变压器。用在电力系统中传输和分配电能,是用途最广、产量最大的一类。如升、降压变压器,配电变压器,联络变压器,厂用电变压器等。

(2) 特种电源变压器。用来获得工业生产中特殊要求的电源。如整流变压器(交、直流变换);电炉变压器(电、热能变换);高压试验变压器(获得试验用高电压);中频变压器(1 000 ~ 8 000 Hz交流系统中使用)等。

(3) 专用变压器。供特殊和专门用途使用的一类。如电子、电信、自控系统中使用的电源变压器、阻抗匹配变压器、脉冲变压器等等;又如供电气测量用的电流互感器(测量大电流)、电压互感器(测量高电压);再如专供焊接电源用的电焊变压器等等。

对变压器还可按相数分为单相、三相、多相;按绕组数分为双绕组、三绕组、多绕组;按绝缘方式分为干式、油浸式;油浸式变压器还可按冷却方式分为自然冷却、风冷、水冷、强迫油循环等多种型式。

### 1.1.3 配电变压器结构简介

变压器虽种类繁多,结构各有特点,但基本结构是由铁心、绕组、绝缘以及其它零部件组成的。这里以常见的配电变压器为例作简要介绍。图 1.2 给出油浸式电力变压器结构总图,现将各部分功能分述如下:

#### 一、铁心

为了减少交变磁通在铁心中引起的磁滞、涡流损耗(合称铁耗),铁心由厚 0.30 ~ 0.35 mm 的硅钢片叠成,硅钢冲片两面涂有绝缘漆,采用交叠式装配方式,如图 1.3 所示。这种相邻两层硅钢冲片不同排列,可以使各层接缝交在不同地点,从而减少叠装间隙,进而减少激磁电流。目前,已大量采用高导磁率、低损耗的冷轧硅钢片做铁心,因其在轧制方向导磁率高。为此,采用斜

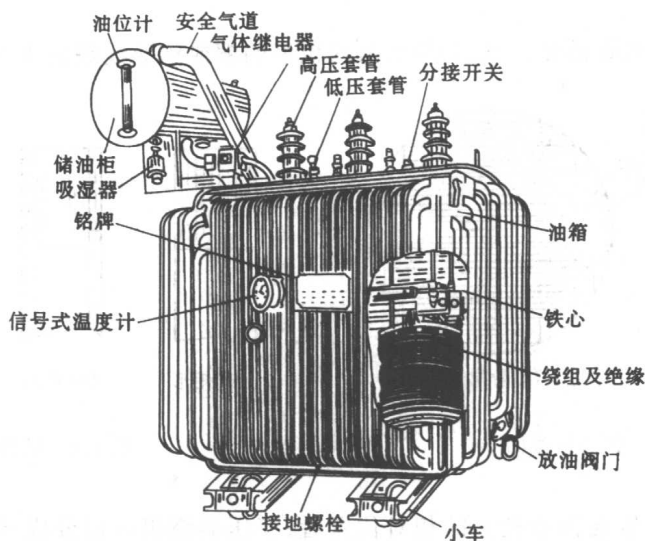


图 1.2 中小型油浸式电力变压器

切角条片叠成斜接缝,其交叠装配办法,如图 1.4 所示。

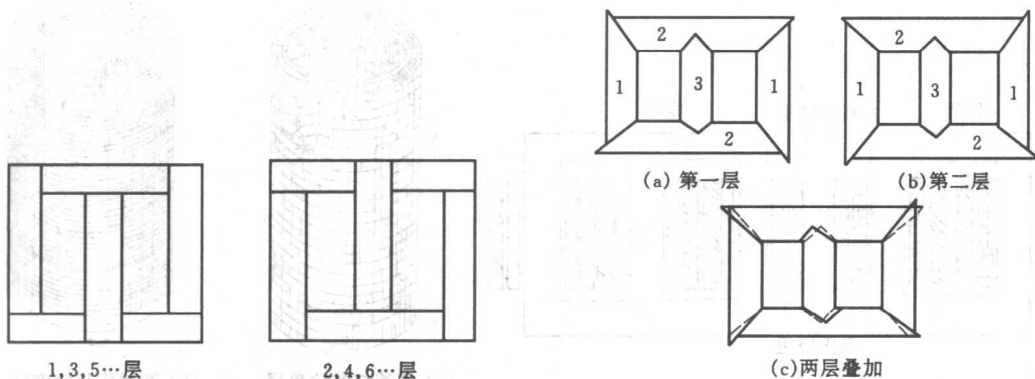


图 1.3 铁心交叠装配图

图 1.4 三相三柱式标准 45° 全斜接缝铁心

铁心由铁心柱和铁轭两部分组成,在铁心柱上套置一、二次绕组,铁轭是构成交变磁通闭合磁路必不可少的部分,铁心柱截面通常做成多级阶梯形,以便充分利用绕组内圆空间,阶梯数越多,铁心柱截面越接近于圆形。一般阶梯数在十级左右,容量大的变压器,阶梯数较多。为改善铁心冷却条件,常常在铁心中设有油道,以利散热。如图 1.5 所示。

铁轭截面有矩形、T 形和阶梯形几种,如图 1.6 所示。为减少变压器空载电流和铁损耗,心式变压器铁轭截面一般比铁心柱截面大 5%~10%。

## 二、绕组

绕组是变压器的电路部分,一般为绝缘材料包裹的铜或铝导线绕制而成,套置在铁心柱上。

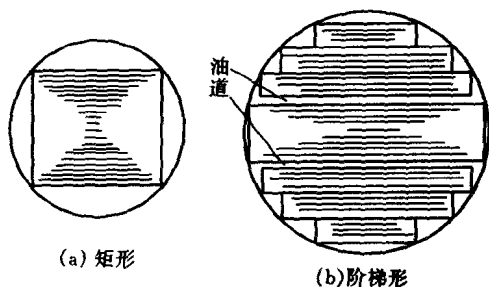


图 1.5 铁心柱截面

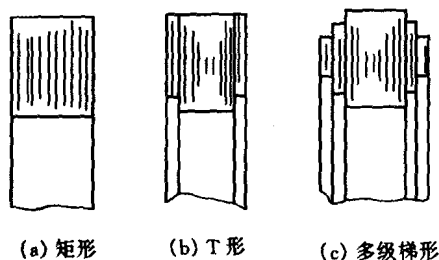


图 1.6 铁轭截面

从高低压绕组套置在铁心柱上的相对位置看,变压器绕组可以分成同心式和交叠式两类。同心式绕组高低压线圈同心地套在铁心柱上,为增强绝缘及便于高压侧绕组与分接开关连接,低压绕组紧靠铁心,高压绕组再套置在低压绕组外面,二者间留有间隙,用作油道,便于冷却绕组,同时也加强了高低压绕组间的绝缘。图 1.7 示出高低压绕组套置在铁心柱上的相对位置情况,图 1.8 给出常用的双层圆筒式绕组结构示意图。

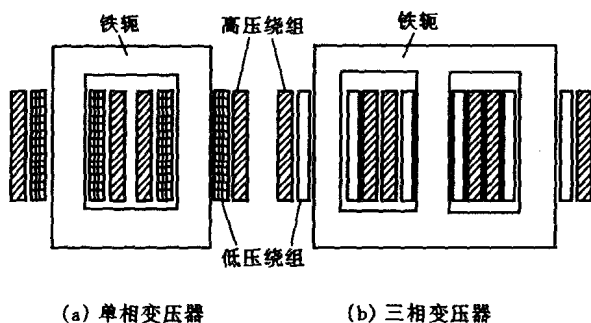


图 1.7 高低压绕组在铁心中套装情况

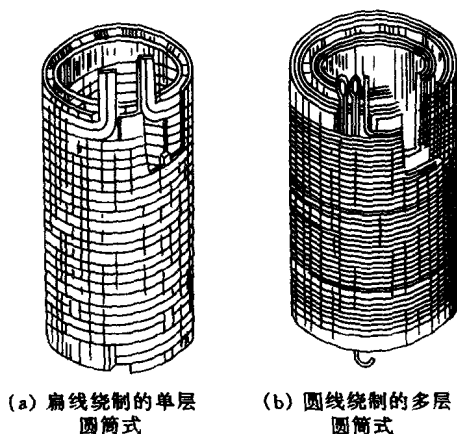
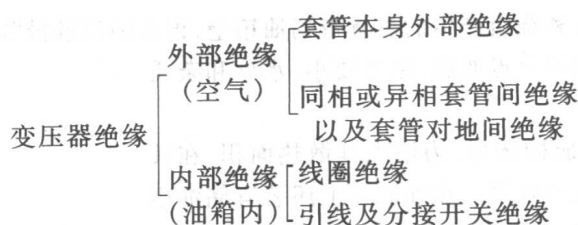


图 1.8 圆筒式绕组

交叠式绕组的线圈制成圆饼形状,沿铁心柱高度,高低压线饼交叠放置。通常在靠近铁轭处放置低压线饼,以减少绝缘困难,这种绕组漏抗小,易构成多路并联,为此多用于低压、大电流的电焊、电炉变压器等。

## 三、绝缘结构

变压器的绝缘分类如下:



变压器内部绝缘又分为主绝缘和纵绝缘。主绝缘是指绕组(或引线)对地、对异相或对同相其它绕组(或引线)之间的绝缘。纵绝缘是指同一线圈上各点之间或其相应引线之间的绝缘。

绝缘尺寸,特别是主绝缘尺寸,将直接影响变压器重量和外形尺寸,影响变压器阻抗电压、损耗等性能指标,应根据试验电压和冲击电压作用下线圈内电压分布情况,正确确定绝缘结构和尺寸,并应留有适当的裕度,以保证变压器安全运行。此外,还要考虑设置必要的冷却油道,以满足线圈的散热要求。

图 1.9 给出了 35 kV 及以下电力变压器主绝缘结构。应当说明,变压器的内部绝缘结构和尺寸与制造厂工艺处理水平、材料材质等有关,应根据生产经验试验确定。运行中的变压器内部绝缘的强度,往往与该台变压器工艺处理水平、绝缘干燥程度、绝缘结构中存留空气泡的多少等因素有关,运行监视中应予以充分注意。

#### 四、变压器油、油箱及其它部件

高、低压绕组套装在铁心柱上,称为器身,如图 1.10 所示。油浸式变压器的器身应浸入变压器油中,变压器油充满在油箱中。充变压器油的目的是:(1)提高绕组绝缘强度,(2)通过油受

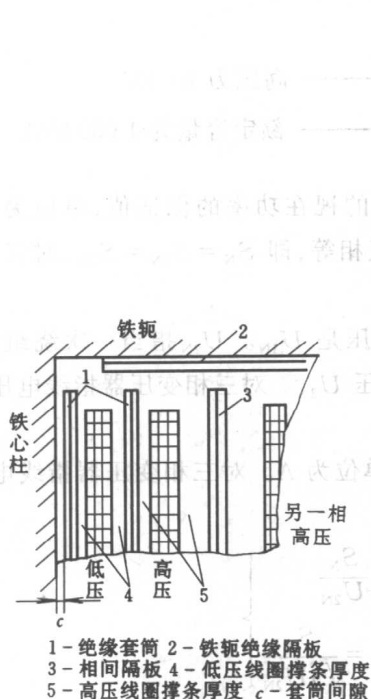


图 1.9 35 kV 及以下主绝缘结构

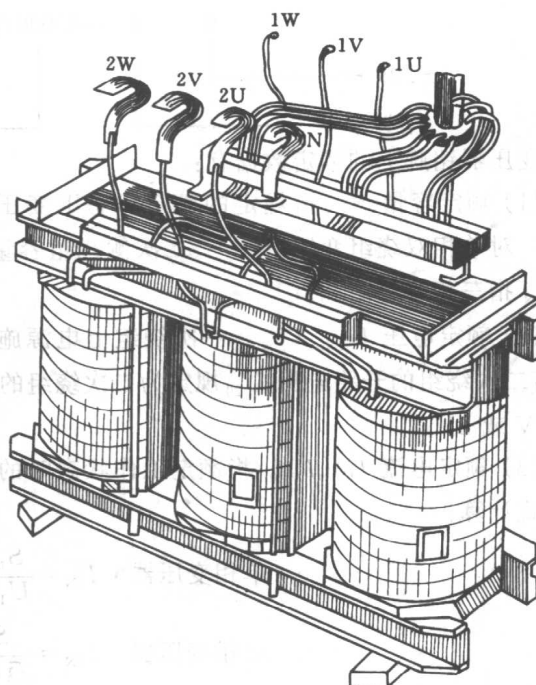


图 1.10 配电变压器器身

热后的自然对流,将铁心和绕组产生的热量带到油箱壁,再由油箱壁散放到空气中去。对变压器油的要求是:介质强度和着火点要高,粘度要小,水分和杂质含量应尽可能少。

变压器油箱一般做成椭圆形,为增大其散热面积,在其外增加散热管,以提高散热效果。在油箱盖上还装有储油柜和安全气道(俗称防爆管)。储油柜是固定在油箱顶部的圆筒形容器,并以管子与油道连通,它可以减少变压器油与空气的接触面积,以减少变压器油与空气接触后老化变质。安全气道是一个长筒钢管,下部与油箱连通,上部出口盖以玻璃或酚醛纸板。当变压器发生严重故障时,油箱内会产生大量气体,迅速上升的压力可以冲破安全气道上的玻璃或酚醛挡板,释放气体,消除压力,从而保护变压器,如图 1.11 所示。

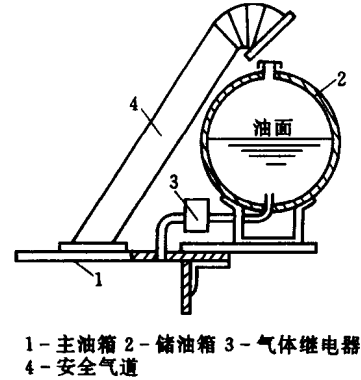
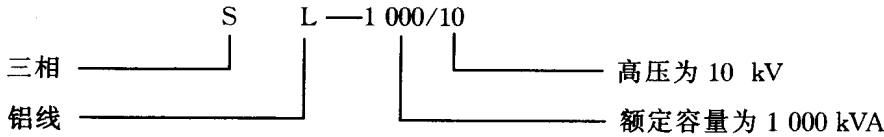


图 1.11 储油柜和安全气道

此外,油箱上还有引出线用的绝缘套管,变压器发生事故时发出信号的气体继电器,以及调节一次绕组匝数的分接开关等。

#### 1.1.4 型号及额定数据

每台变压器油箱上都装有铭牌,其上标注着变压器的型号、额定数据和其它有关数据。变压器的型号是用汉语拼音字母和数字,按确定的顺序组合来表示的,如:



变压器铭牌上的额定数据有:

(1) 额定容量  $S_N$ , 指规定的额定状态下变压器输出的视在功率的保证值,单位为 VA 或 kVA。对单相双绕组变压器其一、二次侧绕组容量设计值相等,即  $S_N = S_{1N} = S_{2N}$ ,对三相变压器,  $S_N$  指三相容量之和。

(2) 额定电压  $U_{1N}$ 、 $U_{2N}$ 。一次绕组上电源施加的电压是  $U_{1N}$ 。  $U_{2N}$  指当一次绕组加  $U_{1N}$  时,将二次绕组的开路电压  $U_{20}$  规定为二次绕组的额定电压  $U_{2N}$ 。对三相变压器指线电压,其单位为 V 或 kV。

(3) 额定电流  $I_{1N}$ 、 $I_{2N}$ 。指额定工作状态时的电流,单位为 A。对三相变压器指线电流,可按下式计算:

$$\left. \begin{array}{l} \text{单相变压器} \quad I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}, I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} \\ \text{三相变压器} \quad I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}}, I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} \end{array} \right\} \quad (1-3)$$

(4) 额定频率  $f_N$ 。我国的标准规定为 50 Hz

## 1.2 变压器空载运行

变压器一次绕组接在交流电源  $u_1$  上,二次绕组开路( $i_2 = 0$ )的运行方式称为空载运行,如图 1.12 所示,这是变压器的一种实际运行状态,也是一种最简单的运行方式,相当于铁心电抗线圈接在电源上。

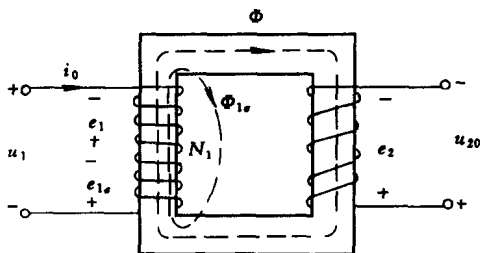


图 1.12 变压器空载运行

### 1.2.1 空载运行时的物理情况

空载运行时,由电源流入变压器一次绕组的电流  $i_0$ ,称为空载电流,它产生空载磁动势  $f_0 = i_0 N_1$  ( $N_1$  为一次绕组匝数), $f_0$  产生总磁通,建立变压器空载磁场。磁通按性质可分为两部分:一是通过铁心磁路闭合,与一、二次绕组共同交链的主磁通  $\Phi$ ,它是总磁通的主要部分,是一、二次侧进行能量传递的媒介;另一部分是只与一次绕组相交链,通过空气(或变压器油)等非磁性介质构成回路的一次侧漏磁通  $\Phi_{l\sigma}$ ,由于该磁路磁阻甚大,故  $\Phi_{l\sigma}$  仅占总磁通的极小一部分。

由于  $u_1$  交变, $i_0$ 、主磁通  $\Phi$ 、漏磁通  $\Phi_{l\sigma}$  均交变。由电磁感应定律,交变磁通在所交链的绕组中感生交变电动势  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_{l\sigma}$  分别为

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_{l\sigma} &= -N_1 \frac{d\Phi_{l\sigma}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

变压器中各电磁量均是随时间变化的,使用式(1-4),按电工惯例,选取同一电磁过程中,相关电磁量同一瞬间的方向规定为正方向。这些惯例规定:电压降与电流正方向一致;电流的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则;磁通的正方向与其感应电动势的正方向也符合右手螺旋定则,感应电动势是指电势升高的方向等等。按上述电工惯例,变压器空载运行时各电磁量正方向如图 1.12 所示。

上述空载运行时各电磁量的相互关系可表示如下: