



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

电机、拖动与控制

主 编 万芳瑛



所介绍知识内容全面，囊括电机、拖动、控制与其他课程衔接有效，体现连贯、平滑、入扣其编写叙述风格独特，力求精细、实际、新颖



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

电机、拖动与控制

主 编 万芳瑛

副主编 李 琳 姚 焯 向 诚

参 编 李 颖 岳松洁



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

作为自动化和电子信息类专业课程的教材,本书覆盖了高等工科院校电机、拖动与控制课程教学大纲所要求的内容。

本书由电机原理与拖动、传统的电机控制技术、现代 PLC 控制技术这 3 部分构成,全面系统地介绍了各种电机、变压器的结构、工作原理、拖动技术、控制技术。全书分为 7 章,内容包括:变压器及其应用、三相异步电动机及其拖动控制、单相异步电动机及其拖动控制、同步电动机及其拖动控制、直流电动机及其拖动控制、控制电动机及其控制系统、S7-200PLC 控制器及其应用。每章章前均设有教学要点和引例,每章章末均附有习题,便于读者阅读及巩固基础知识。

本书可以作为高等院校自动化、电子信息工程、机械自动化、机电工程等本科专业的教材,也可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电机、拖动与控制/万芳瑛主编. —北京:北京大学出版社,2013.8

(21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-22872-2

I. ①电… II. ①万… III. ①电机—电力传动—高等学校—教材②电机—控制系统—高等学校—教材
IV. ①TM30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 162554 号

书 名: 电机、拖动与控制

著作责任者: 万芳瑛 主编

策 划 编 辑: 程志强

责 任 编 辑: 程志强

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-22872-2/TP·1295

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博:@北京大学出版社

电 子 信 箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京富生印刷厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 387 千字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 34.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

“电机、拖动与控制”课程是自动化、电子信息工程、机械自动化等专业的一门重要的专业课程。本书根据教育部高等学校自动化专业教学指导委员会制订的教材规划，结合编者多年的教学经验，为适应工程应用型的本科院校自动化专业和电子信息类专业的教学需求而编写。

本书在内容选材上立足于“精选内容，注重实用”的原则，在编写过程中注意与“大学物理”、“电路”、“电子技术”、“单片机应用”等课程的衔接。在内容编排上舍弃烦琐的理论推导过程；顺序上注重知识的连贯性，先介绍电动机的工作原理与拖动技术，然后讲述相应电动机的实用控制方法，如直流电动机的各种控制方法、步进电动机的单片机控制技术等，方便读者在运用这些常用的电动机进行电子产品的制作开发时查阅相关知识；在内容的涵盖面上除了包括电动机的传统继电器接触器控制方法，还重点介绍了性价比较高的西门子 S7-200PLC 控制技术。在编写风格和文字叙述上尽量做到条理清晰、重点突出、深入浅出、简明扼要、重视实际应用。本书各章章前均设有教学要点和引例，章末附有精选的习题，便于读者阅读及巩固知识。

本书共分为 7 章，由万芳瑛副教授担任主编，负责全书的组织、统稿和改稿工作。万芳瑛副教授编写了第 5 章和第 7 章，岳松洁讲师编写了第 1 章，李琳讲师编写了第 2 章，李颖讲师编写了第 3 章，向诚讲师编写了第 4 章，姚焯讲师编写了第 6 章，另外 2009 级电子信息工程专业本科生林秋秋同学承担了第 2 章、第 5 章电路图的绘制工作。

鉴于编者水平有限以及其他各种因素，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者朋友和同行的专家批评指正！

编 者
2013 年 5 月

目 录

| | |
|---|----|
| 第 1 章 变压器及其应用 | 1 |
| 1.1 变压器的结构及工作原理 | 3 |
| 1.1.1 变压器的分类 | 3 |
| 1.1.2 变压器的结构 | 4 |
| 1.1.3 变压器的工作原理 | 6 |
| 1.1.4 变压器的铭牌数据 | 7 |
| 1.1.5 变压器的额定值 | 7 |
| 1.2 单相变压器 | 8 |
| 1.2.1 单相变压器的空载运行 | 8 |
| 1.2.2 单相变压器的负载运行 | 10 |
| 1.3 变压器的运行特性 | 12 |
| 1.3.1 变压器的外特性及电压 变化率 | 12 |
| 1.3.2 变压器的损耗及效率 | 13 |
| 1.4 三相变压器 | 15 |
| 1.4.1 三相变压器的磁路系统 | 15 |
| 1.4.2 三相变压器的电路系统 | 16 |
| 1.5 特性用途变压器 | 16 |
| 1.5.1 仪用互感器 | 16 |
| 1.5.2 自耦变压器 | 17 |
| 1.6 整流变压器的应用简例 | 18 |
| 习题一 | 19 |
| 第 2 章 三相异步电动机及其拖动控制 | 23 |
| 2.1 三相异步电动机的结构及工作 原理 | 25 |
| 2.1.1 三相异步电动机的结构 | 25 |
| 2.1.2 三相异步电动机的工作 原理 | 27 |
| 2.1.3 三相异步电动机的铭牌 数据 | 30 |
| 2.2 三相异步电动机的电路分析 | 31 |
| 2.2.1 定子电路 | 32 |
| 2.2.2 转子电路 | 32 |
| 2.3 三相异步电动机的机械特性 | 33 |
| 2.3.1 电磁转矩 | 33 |
| 2.3.2 机械特性 | 34 |
| 2.3.3 三相异步电动机的运行 | 36 |
| 2.4 三相异步电动机的启动 | 37 |
| 2.4.1 异步电动机的启动方法 | 37 |
| 2.4.2 异步电动机启动的例题 讲解 | 39 |
| 2.5 三相异步电动机的调速 | 41 |
| 2.5.1 变频调速 | 41 |
| 2.5.2 变转差率调速 | 41 |
| 2.5.3 变极调速 | 41 |
| 2.6 三相异步电动机的制动 | 42 |
| 2.6.1 能耗制动 | 42 |
| 2.6.2 反接制动 | 43 |
| 2.6.3 发电反馈制动 | 43 |
| 2.7 常用低压电器 | 44 |
| 2.7.1 闸刀开关和组合开关 | 44 |
| 2.7.2 熔断器 | 44 |
| 2.7.3 按钮 | 45 |
| 2.7.4 交流接触器 | 46 |
| 2.7.5 中间继电器 | 47 |
| 2.7.6 热继电器 | 47 |
| 2.7.7 自动空气断路器 | 48 |
| 2.7.8 时间继电器 | 48 |
| 2.8 三相异步电动机的基本控制电路 | 49 |
| 2.8.1 三相异步电动机直接启动 的控制电路 | 49 |
| 2.8.2 三相异步电动机 $\text{Y}-\Delta$ 换接 启动的控制电路 | 51 |
| 2.8.3 三相异步电动机正反转的 控制电路 | 51 |
| 2.8.4 三相异步电动机能耗制动 的控制电路 | 53 |
| 2.9 三相异步电动机的常用控制电路 | 54 |
| 2.9.1 行程控制 | 54 |
| 2.9.2 先后顺序控制 | 55 |

| | | | |
|----------------------------------|----|--------------------------------|-----|
| 习题二 | 56 | 4.4 同步电动机的功率因数调节和 V 形曲线 | 88 |
| 第 3 章 单相异步电动机及其拖动控制 | 60 | 4.4.1 同步电动机的功率因数调节 | 88 |
| 3.1 单相异步电动机的结构及启动装置 | 61 | 4.4.2 同步电动机的 V 形曲线 | 89 |
| 3.1.1 单相异步电动机的结构 | 61 | 4.5 同步电动机的启动 | 90 |
| 3.1.2 启动装置 | 62 | 4.5.1 变频启动法 | 90 |
| 3.2 单相异步电动机的工作原理 | 63 | 4.5.2 异步启动法 | 90 |
| 3.2.1 单相绕组的脉振磁场 | 64 | 4.6 微型同步电动机 | 91 |
| 3.2.2 两相绕组的旋转磁场 | 65 | 4.6.1 永磁式同步电动机 | 91 |
| 3.2.3 单相异步电动机的力矩特点 | 66 | 4.6.2 反应式同步电动机 | 92 |
| 3.3 单相异步电动机的启动方法 | 66 | 4.6.3 磁滞式同步电动机 | 93 |
| 3.3.1 分相式电动机 | 67 | 4.6.4 微型同步电动机的应用 | 94 |
| 3.3.2 电容式电动机 | 67 | 4.7 同步电动机的控制原理 | 95 |
| 3.3.3 罩极式电动机 | 69 | 4.7.1 同步电动机使用电压型变频器的开环控制 | 96 |
| 3.4 单相异步电动机的调速 | 70 | 4.7.2 自控同步电动机的闭环控制 | 96 |
| 习题三 | 71 | 习题四 | 99 |
| 第 4 章 同步电动机及其拖动控制 | 73 | 第 5 章 直流电动机及其拖动控制 | 102 |
| 4.1 同步电动机的基本结构与工作原理 | 75 | 5.1 直流电动机的工作原理及结构 | 104 |
| 4.1.1 同步电动机的结构 | 76 | 5.1.1 直流电动机的工作原理 | 104 |
| 4.1.2 同步电动机的工作原理 | 77 | 5.1.2 直流电动机的基本结构 | 105 |
| 4.1.3 同步电动机的额定数据 | 77 | 5.1.3 直流电动机的铭牌数据 | 107 |
| 4.2 同步电动机的电磁关系 | 78 | 5.2 直流电动机的励磁方式与基本方程式 | 108 |
| 4.2.1 同步电动机的磁动势及磁通 | 78 | 5.2.1 直流电动机的励磁方式 | 108 |
| 4.2.2 同步电动机的双反应原理 | 80 | 5.2.2 直流电动机的基本方程式 | 109 |
| 4.2.3 凸极同步电动机的电压平衡方程 | 81 | 5.3 他励直流电动机的机械特性 | 111 |
| 4.2.4 凸极同步电动机的电势相量图 | 82 | 5.3.1 直流电动机的机械特性 | 111 |
| 4.2.5 隐极同步电动机 | 83 | 5.3.2 固有机械特性 | 112 |
| 4.3 同步电动机的功率关系与矩角特性 | 84 | 5.3.3 人为机械特性 | 112 |
| 4.3.1 同步电动机的功率关系方程及转矩方程 | 84 | 5.4 他励直流电动机的启动 | 114 |
| 4.3.2 同步电动机的功角特性 | 85 | 5.4.1 电枢回路串电阻启动 | 115 |
| 4.3.3 同步电动机的矩角特性 | 86 | 5.4.2 降压启动 | 116 |
| 4.3.4 同步电动机的运行 | 86 | 5.4.3 直流电动机的转动方向 | 116 |
| | | 5.5 他励直流电动机的调速 | 117 |
| | | 5.5.1 降低电枢电压调速 | 117 |
| | | 5.5.2 电枢串电阻调速 | 118 |
| | | 5.5.3 弱磁调速 | 118 |

| | | | |
|--|-----|---|-----|
| 5.6 他励直流电动机的制动 | 120 | 第7章 S7-200PLC控制器及其应用 ... | 183 |
| 5.6.1 能耗制动 | 120 | 7.1 可编程控制器概述 | 185 |
| 5.6.2 反接制动 | 121 | 7.1.1 PLC的特点及主要功能 ... | 186 |
| 5.6.3 回馈制动 | 122 | 7.1.2 PLC的发展趋势 | 187 |
| 5.7 直流电动机的驱动控制电路 | 123 | 7.1.3 PLC的组成及分类 | 187 |
| 5.7.1 直流电动机驱动问题 | 124 | 7.1.4 PLC的工作原理 | 190 |
| 5.7.2 直流电动机单向启停驱动 电路 | 125 | 7.2 S7-200系列PLC性能介绍 | 191 |
| 5.7.3 直流电动机双向运转H桥 驱动电路 | 125 | 7.2.1 S7系列产品简介 | 191 |
| 5.7.4 直流电动机单向运转PWM 调速驱动电路 | 127 | 7.2.2 S7-200系列PLC的硬件 系统 | 192 |
| 5.7.5 基于单片机的直流电动机双向 运转PWM调速控制电路 ... | 128 | 7.2.3 S7-200系列PLC的内部 资源 | 194 |
| 5.7.6 基于可编程器件的直流电动机 控制电路 | 129 | 7.3 S7-200系列PLC的基本指令 | 195 |
| 习题五 | 132 | 7.3.1 逻辑取及线圈驱动指令 ... | 196 |
| 第6章 控制电动机及其控制系统 | 135 | 7.3.2 触点串联指令 | 196 |
| 6.1 伺服电动机 | 138 | 7.3.3 触点并联指令 | 197 |
| 6.1.1 交流伺服电动机 | 138 | 7.3.4 电路块的串联、并联连接 指令 | 198 |
| 6.1.2 直流伺服电动机 | 141 | 7.3.5 置位与复位指令 | 198 |
| 6.2 旋转变压器 | 144 | 7.3.6 立即指令 | 198 |
| 6.2.1 旋转变压器的结构和原理 ... | 144 | 7.3.7 边沿脉冲指令 | 199 |
| 6.2.2 旋转变压器的负载运行 ... | 145 | 7.3.8 计数器指令 | 200 |
| 6.2.3 一次侧补偿的旋转变压器 ... | 146 | 7.3.9 定时器指令 | 202 |
| 6.2.4 二次侧补偿的旋转变压器 ... | 147 | 7.4 S7-200系列PLC的典型电路 梯形图程序设计方法 | 205 |
| 6.2.5 线性旋转变压器 | 147 | 7.4.1 电动机启停控制电路 ... | 205 |
| 6.2.6 数字式旋转变压器 | 149 | 7.4.2 电动机正反转控制线路 ... | 207 |
| 6.3 自整角机 | 150 | 7.4.3 延时脉冲产生电路 | 207 |
| 6.3.1 三相自整角机 | 150 | 7.4.4 电动机顺序启/停控制 电路 | 208 |
| 6.3.2 单相自整角机 | 152 | 7.4.5 长定时电路 | 210 |
| 6.4 步进电动机 | 153 | 7.4.6 闪烁控制电路 | 210 |
| 6.4.1 步进电动机的工作原理和 基本结构 | 153 | 7.5 S7-200系列PLC的顺序控制 指令及应用 | 211 |
| 6.4.2 步进电动机的运行特性 ... | 156 | 7.5.1 功能图 | 211 |
| 6.4.3 步进电动机的驱动电源 ... | 161 | 7.5.2 顺序控制指令介绍 | 212 |
| 6.4.4 步进电动机的控制 | 166 | 7.5.3 顺序控制指令应用举例 ... | 213 |
| 6.4.5 步进电动机的应用 | 175 | 7.6 PLC控制系统的设计方法 | 216 |
| 习题六 | 181 | 7.6.1 PLC控制系统设计基本 原则 | 216 |



| | | | | | |
|-------|--------------------------------------|-----|--------------|------------------------------|-----|
| 7.6.2 | PLC 控制系统一般设计 步骤 | 217 | 7.7.5 | 建立 PC 与 S7-200 的 通信 | 225 |
| 7.6.3 | PLC 控制系统设计举例 ... | 218 | 7.7.6 | 创建一个 PLC 程序 | 225 |
| 7.7 | S7-200 系列 PLC 编程软件的使用 ... | 223 | 7.8 | S7-200 系列 PLC 仿真软件简介 | 226 |
| 7.7.1 | STEP 7-Micro/WIN V4.0 的基本功能 | 224 | 7.8.1 | S7-200 模拟仿真软件 | 227 |
| 7.7.2 | 硬件连接 | 224 | 7.8.2 | 3 台电动机顺序启停仿真 ... | 227 |
| 7.7.3 | 打开 STEP 7-Micro/WIN ... | 224 | 7.8.3 | 4 层电梯程序仿真 | 227 |
| 7.7.4 | 为 STEP7-Micro/WIN 设置通信参数 | 225 | 习题七 | 229 | |
| | | | 习题参考答案 | 233 | |
| | | | 参考文献 | 255 | |

第 1 章

变压器及其应用

变压器是一种常见的电气设备，可用于变换电压、变换电流、变换阻抗。变压器在很多领域有着非常广泛的应用。在电力系统和用电方面，高压输电和低压用电领域需要使用变压器升压、降压。在电子线路中，变压器不仅用于变换电压、提供电源，还可以耦合电路、传递信号、实现阻抗匹配。在测量方面，利用互感器可以扩大交流电压表和交流电流表的测量范围。在工程技术和其他领域中还大量使用着各式各样的变压器。本章主要内容包括：变压器的结构与工作原理、运行特性以及变压器的简单应用。



教学目标

- 了解变压器的结构和分类方式；
- 理解变压器的工作原理；
- 掌握变压器的空载和负载运行工作的基本方程；
- 掌握变压器电压调整率、外特性、损耗、效率等性能指标；
- 了解自耦变压器、仪用互感器的工作原理。



教学要求

| 知识要点 | 能力要求 | 相关知识 |
|-------------|--|-----------|
| 变压器的结构与工作原理 | (1) 了解变压器的结构、分类 (2) 理解变压器的工作原理 | 变压器的物理模型 |
| 单相变压器 | (1) 掌握单相变压器的空载运行 (2) 掌握单相变压器的负载运行 | 变压器的电路模型 |
| 变压器的运行特性 | (1) 理解变压器的外特性及电压变化率 (2) 理解变压器的损耗及效率 | 变压器的损耗和效率 |
| 三相变压器 | 了解三相变压器的磁路系统、绕组连接 | |
| 变压器的应用 | (1) 理解自耦变压器、仪用互感器的应用 (2) 了解整流变压器的应用 | |

推荐阅读资料

1. 曹承志. 电动机、拖动与控制. 2008(7): 91-115.
2. 唐介. 电动机与拖动. 2009(11): 168-215.
3. 潘再平. 电动机学. 2008(8): 11-61.

基本概念

一次绕组(初级绕组、原边绕组): 与电源相连, 接收交流电能的绕组。

二次绕组(次级绕组、副边绕组): 与负载相连, 送出交流电能的绕组。

变压器的变比: 原、副绕组的匝数比。当电源电压一定时, 只要改变匝数比, 就可得出不同的输出电压。

空载运行: 变压器的原边绕组接在电网上, 副边绕组开路时的运行状态。

负载运行: 原边绕组接通额定电压, 副边绕组接上负载时的运行状态。

主磁通恒定: 根据 $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_m$ 可知铁心中主磁通的大小主要取决于电网电压 U_1 和频率 f , 当 U_1 和 f 不变时, 主磁通最大值不变, 而磁路的饱和状态也基本不变, 产生主磁通的励磁磁动势也大致恒定。

引例: 变压器的历史和发展

1831年, 法拉第采用如图 1.1 所示的实验装置进行磁生电的实验。在图 1.1 中, 圆环用 7/8in. 的铁棍制成, 圆环外径 6in.; A 是 3 段各 24in. 长铜线绕成的线圈; B 是 50in. 铜线绕成的 2 个线圈; 1 为电池; 2 为开关; 3 为检流器。实验时, 当合上开关 2 后, 法拉第发现检流器 3 摆动, 即线圈 B 和检流器 3 中有电流流过。通过这个实验发现了电磁感应现象。法拉第进行这个实验的装置(如图 1.2 所示), 实际上是世界上第一只变压器雏形。

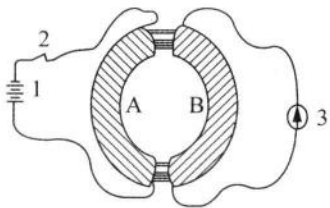


图 1.1 法拉第实验装置原理图



图 1.2 法拉第感应线圈

1850年德国技师鲁姆科夫(H. D. Ruhmkorff, 1803—1877)制成第一只感应线圈(Inductorium), 如图 1.3 所示。与以前的感应线圈相比, 鲁姆科夫感应线圈有较大的改进。由于功率较大, 不但可用作实验, 而且还可用于放电治疗。因此可以说, 鲁姆科夫感应线圈是第一个有实用价值的变压器。

1881年, 法国人 L. 戈拉尔与英国人 J. D. 吉布斯首先制成一台变压器样品, 如图 1.4 所示。并设计第一条 2000V 单相配电线路, 于 1883 年开始为伦敦一些铁路车站提供交流电。

1912年, 油浸变压器诞生了, 如图 1.5 所示, 它较好地解决了变压器高电压的绝缘问题和大容量的散热问题, 迅速成为变压器领域的主流产品, 直至今日都得到了广泛的应用。

1965年德国 T. U 公司生产了第一台环氧树脂绝缘干式变压器, 如图 1.6 所示, 具有绝缘强度高、不会燃烧爆炸、无须保养维修、环保等优点, 在世界范围尤其是欧洲迅速得到了广泛的应用。

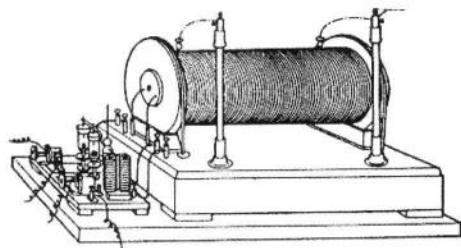


图 1.3 鲁姆科夫感应线圈

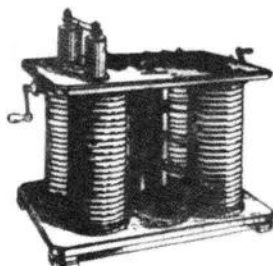


图 1.4 戈拉尔和吉布斯制作的变压器

我国在 20 世纪 70 年代已引进了环氧树脂绝缘干式变压器生产技术，但技术发展和应用非常缓慢，到 20 世纪 80 年代末 90 年代初，随着新的干式变压器生产技术工艺的引进和国民经济的迅速发展，以及人民生活的大幅度提高，干式变压器的应用迅速普及。国内企业生产的变压器品种包括超高压变压器、换流变压器、全密封式变压器、环氧树脂干式变压器、卷铁心变压器、组合式变压器。国内变压器技术的发展也达到国际先进水平。近几年，为适应国家城乡电网改造的需求，发展了一批新型、优质的配电变压器，使配电网的变压器装备更趋先进，供电更可靠，农村用电更趋低价。



图 1.5 油浸变压器

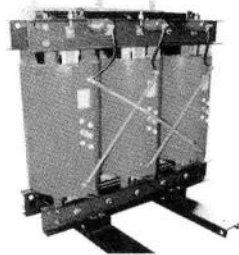


图 1.6 干式变压器

1.1 变压器的结构及工作原理

变压器是一种静止的电动机，它利用电磁感应原理将一种电压、电流的交流电能转换成同频率的另一种电压、电流的电。换言之，变压器就是实现电能在不同等级电压之间进行转换。

1.1.1 变压器的分类

1. 按用途分类

电力变压器。用作电能的输送与分配，这是生产数量最多、使用最广泛的变压器。按其功能不同又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器等。电力变压器的容量从几千伏安到几十万伏安，电压等级从几百伏到几百千伏。

特种变压器。在特殊场合使用的变压器，如作为焊接电源的电焊变压器、专供大功率电炉使用的电炉变压器、将交流电整流成直流电时使用的整流变压器等。

仪用互感器。用于电工测量中，如电流互感器、电压互感器等。

控制变压器。容量一般比较小，用于小功率电源系统和自动控制系统。如电源变压



器、输入变压器、输出变压器、脉冲变压器等。

其他变压器。如试验用的高压变压器、输出电压可调的调压变压器、产生脉冲信号的脉冲变压器等。

2. 按绕组构成分类

双绕组变压器。有高压绕组和低压绕组的变压器。

三绕组变压器。有高压绕组、中压绕组和低压绕组的变压器。

自耦变压器。一次、二次绕组之间不仅有磁耦联系，还有电的直接联系。比普通变压器节省材料、降低成本、缩小变压器体积和重量，有利于大型变压器的运输和安装。

3. 按铁心结构分类

有叠片式铁心、卷制式铁心、非晶合金铁心。

4. 按相数分类

有单相变压器、三相变压器、多相变压器。

5. 按冷却方式分类

有干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环变压器、充气式变压器等。

6. 按容量分类

中小型变压器。电压值 35kV 以下，容量在 10~6300kV·A。

大型变压器。电压在 63~110kV 以上，容量在 6300~63000kV·A。

特大型变压器。电压在 220kV 以上，容量在 31500~360000kV·A。

7. 其他分类

按导线材料分类：铜导线变压器和铝导线变压器。

按中性绝缘水平分类：全绝缘变压器和半绝缘变压器。

1.1.2 变压器的结构

变压器的型式多种多样，但它们的基本结构相同，都由铁心和绕组所组成，如图 1.7 所示。

根据铁心和绕组的相对位置不同，变压器可以分为心式和壳式两种。

1. 心式

心式变压器的外型结构如图 1.8 所示。特点是铁心在绕组里面，绕组包围铁心。心式变压器的结构简单，用铁量少，绕组的安装和绝缘比较容易。容量较大的单相变压器和三相电力变压器都采用这种结构。

原、副边绕组一般用铜或铝的绝缘导线缠绕在铁心柱上。高压绕组电压高、绝缘要求高，如果高压绕组在内，离变压器铁心近，则应加强绝缘，这样提高了变压器的成本造价。因此，为了绝缘方便，低压绕组紧靠着铁心，高压绕组则套装在低压绕组的外面。两个绕组之间留有油道，既可以起绝缘作用，又可以使油把热量带走。在单相变压器中，高、低压绕组均分为两部分，分别缠绕在两个铁心柱上，两部分既可以串联又可以并联。

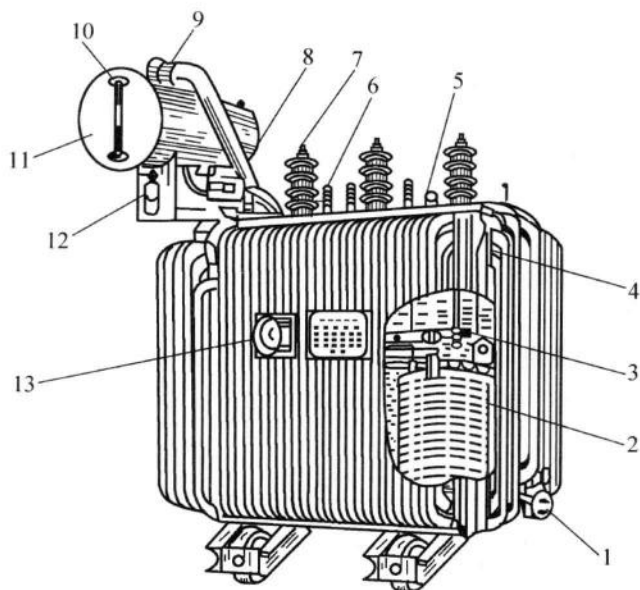


图 1.7 油浸式电力变压器外形图

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—油表；11—储油柜；12—吸湿器；13—湿度计

2. 壳式

壳式变压器的外型结构如图 1.9 所示。特点是绕组在铁心里面，即铁心包围绕组。壳式变压器用铜量少，散热比较容易，而且可以不要专门的变压器外壳。容量较小的单相变压器和某些特殊用途的变压器采用这种结构。

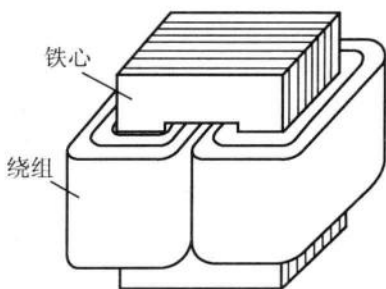


图 1.8 心式变压器

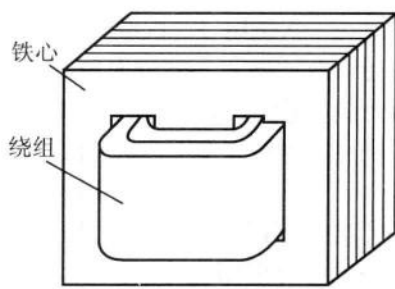


图 1.9 壳式变压器

为了减小交变磁通在铁心中引起的损耗，铁心通常用厚度为 0.3~0.5mm 的硅钢片叠装而成。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。



小知识：干式变压器和油浸式变压器

只有绕组和铁心的变压器称为干式变压器。依靠空气对流进行冷却，一般用于局部照明、电子线路、

机械设备等变压器，在电力系统中，一般汽机变压器、锅炉变压器、除灰变压器、除尘变压器、脱硫变压器等都是干式变压器，变比为 6000V/400V 和 10kV/400V，用于带额定电压 380V 的负载。

大容量变压器的器身放在盛有绝缘油的油箱中，这样的变压器称为油浸式变压器。为了加强绝缘和冷却条件，变压器的铁心和绕组都一起浸入灌满了变压器油的油箱中。800kV·A 及以上油浸式变压器应装设气体继电器和压力保护装置，800kV·A 以下油浸式变压器根据使用要求，与制造厂协商，也可装设气体继电器。

1.1.3 变压器的工作原理

以单相双绕组变压器为例分析其工作原理，如图 1.10 所示，两个绕组之间只有磁的耦合，没有电的联系。与电源相连的绕组，接受交流电能，称为一次绕组（初级绕组、原边绕组）；与负载相连的绕组，送出交流电能，称为二次绕组（次级绕组、副边绕组）。原边的匝数、电压、电动势、电流分别以 N_1 、 u_1 、 e_1 、 i_1 来表示；副边的匝数、电压、电动势、电流分别以 N_2 、 u_2 、 e_2 、 i_2 来表示。

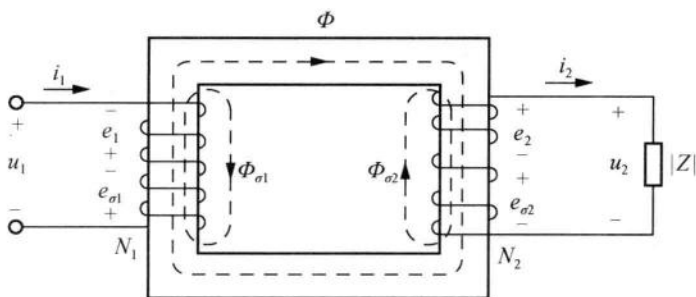


图 1.10 单相双绕组变压器原理图

当一次绕组接入交流电压 u_1 时，一次绕组中便有交流电流 i_1 通过，并在磁动势 $F_1 = I_1 N_1$ 作用下产生交变磁通。磁通绝大部分通过铁心而闭合，称为主磁通，用 Φ 表示。由于主磁通同时与一次绕组、二次绕组相交链，因此当主磁通交变时，同时在一次绕组、二次绕组中产生感应电动势 e_1 、 e_2 （方向采用右手螺旋定则确定）。如果二次绕组接有负载，便有电流 i_2 流过负载，并向负载输出电功率。在此，负载上的电流和功率是通过变压器铁心中的交变磁通，利用电磁感应作用，从一次绕组传送到二次绕组的，这就是变压器的基本工作原理。

此外，一次绕组、二次绕组磁动势产生的磁通还有一小部分只经过绕组自身和周围的空气而闭合，这部分磁通称为漏磁通。漏磁通用 $\Phi_{\sigma 1}$ 和 $\Phi_{\sigma 2}$ 表示。漏磁通在各自绕组中产生的感应电动势分别用 $e_{\sigma 1}$ 和 $e_{\sigma 2}$ 表示（图 1.10）。

变压器的各电磁量都是交流量，为分析和计算方便，必须规定出其正方向。图 1.10 所示变压器各量的正方向遵循惯例，按下面所述的相应电磁规律来规定。

(1) u_1 、 u_2 ： u_1 与 i_1 正方向符合电动机惯例，对于一次绕组而言，方向一致； u_2 与 i_2 正方向符合电动机惯例，对于二次绕组而言，方向相反。

(2) Φ 、 Φ_{σ} ：其正方向与产生它们的电流符合右手螺旋定则。因此，判定磁通的正方向时必须注意绕组的绕向。

(3) e_1 、 $e_{\sigma 1}$ 和 e_2 、 $e_{\sigma 2}$ ：正方向与产生它们的磁通符合右手螺旋定则，根据电磁感应定律 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 确定。

(4) i_1 、 i_2 ：正方向与相应的电势方向一致。



世界之最：发展历史

1835年，美国物理学家佩奇制成的感应线圈是世界上第一台自耦变压器，利用自动锤的振动使水银接通或断开电路。在副边线圈感生的电动势能使一个真空管的电火花达4.5in长。

1889年，俄国科学家多利沃·多布罗夫斯基为解决三相电流的传输及供电问题，发明了三相变压器。当年，他申请了第一个三相变压器铁心的专利，3个心柱在周向垂直对称布置，上、下与两个轭环相连。这种结构类似欧洲中世纪的修道院，故称为“Tempeltype(寺院式)”。

1889年，英国斯温伯恩发明“刺猬式”油浸变压器，这种变压器现在仍有应用。

1891年，莫迪为布拉什公司设计制成一台采用叠片铁心的变压器。

1.1.4 变压器的铭牌数据

为了使变压器安全、经济、合理地运行，同时让用户对变压器的性能有所了解，制造厂家给每一台变压器都安装了一块铭牌，上面标明了变压器型号及各种额定数据，只有理解铭牌上各种数据的含义，才能正确地使用变压器。图1.11所示为三相变压器的铭牌。

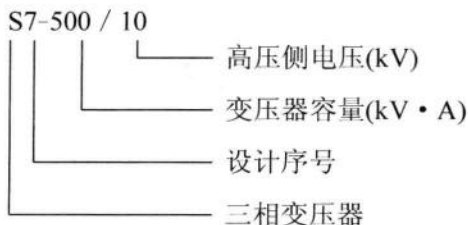
| | | | | | | |
|---------------|-----------|------|-------|-------|------|-----------|
| 电力变压器 | | | | | | |
| 产品型号 | S7-500/10 | 标准代号 | ××××× | | | |
| 额定容量 | 500kV·A | 产品代号 | ××××× | | | |
| 额定电压 | 10kV | 出厂序号 | ××××× | | | |
| 额定频率 | 50Hz 3相 | 开关位置 | 高压 | | 低压 | |
| 联结组标号 | Y, yn0 | | 电压/V | 电流/A | 电压/V | 电流/A |
| 阻抗电压 | 4% | | I | 10500 | 27.5 | |
| 冷却方式 | 油冷 | | II | 10000 | 28.9 | 400 721.7 |
| 使用条件 | 户外 | III | 9500 | 30.4 | | |
| ××变压器厂 ××年××月 | | | | | | |

图 1.11 三相变压器的铭牌

1.1.5 变压器的额定值

图1.11所示的变压器是配电站用的降压变压器，将10kV的高压降为400V的低压，供三相负载使用。铭牌中的主要参数说明如下。

1. 型号





2. 额定电压 U_{1N} 和 U_{2N}

高压侧(一次绕组)额定电压 U_{1N} 是指加在一次绕组上的正常工作电压值。它是根据变压器的绝缘强度和允许发热等条件规定的。高压侧标出的 3 个电压值, 可以根据高压侧供电电压的实际情况, 在额定值的 $\pm 5\%$ 范围内加以选择, 当供电电压偏高时可调至 10500V, 偏低时则调至 9500V, 以保证低压侧的额定电压为 400V 左右。

低压侧(二次绕组)额定电压 U_{2N} 是指变压器空载时, 高压侧加上额定电压后, 二次绕组两端的电压值。变压器接上负载后, 二次绕组的输出电压 U_2 将随负载电流的增加而下降, 为保证在额定负载时能输出 380V 的电压, 考虑到电压调整率为 5%, 故该变压器空载时二次绕组的额定电压 U_{2N} 为 400V。在三相变压器中, 额定电压均指线电压。

3. 额定电流 I_{1N} 和 I_{2N}

额定电流是指根据变压器容许发热的条件而规定的满载电流值。在三相变压器中额定电流是指线电流。

4. 额定容量 S_N

额定容量是指变压器在额定工作状态下, 一次绕组和二次绕组的视在功率, 其单位为 $kV \cdot A$ 。

单相变压器:

$$S_N = I_{1N}U_{1N} = I_{2N}U_{2N} \quad (1-1)$$

三相变压器:

$$S_N = \sqrt{3} I_{1N}U_{1N} = \sqrt{3} I_{2N}U_{2N} \quad (1-2)$$

例 1-1 一台三相油浸自冷式铝线变压器, 已知 $S_N = 560kV \cdot A$, $U_{1N}/U_{2N} = 10000V/400V$, 试求一次绕组、二次绕组的额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} 各是多大?

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

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



小知识:

为了把发电厂发出的电能传输和分配给用户, 要经过多次变压。发电机发出的交流电压常为 10kV, 而远距离输电的电网为 220kV、500kV 送电, 因此发电厂发出的电能首先要用升压变压器升压, 然后由高压电网送电。传送一定功率的电能, 电压越高, 电流越小。这样可以减少线路损耗, 同时节省输电线路的用铜量。电能传输到用户地区, 首先要降压, 然后再配电到用户。从发电、输电到配电要经过几次变压, 因此变压器的总容量常为发电机装机容量的 5~8 倍。

1.2 单相变压器

1.2.1 单相变压器的空载运行

变压器的原边绕组接在电网上, 副边绕组开路时的运行状态, 称为空载运行, 其原理



如图 1.12 所示。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。

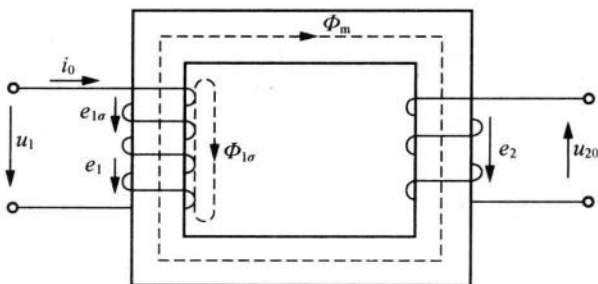


图 1.12 变压器空载运行原理图

根据基尔霍夫第二定律(KVL)及电磁感应定律, 可得一次侧回路和二次侧回路 KVL 方程(r_1 为原边绕组等效电阻):

$$u_1 = i_0 r_1 - e_{1\sigma} - e_1 = i_0 r_1 + N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1-3)$$

$$u_{20} = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1-4)$$

如果各物理量均按正弦规律变化, 便可用如下的相量形式来表示:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 - \dot{E}_{1\sigma} - \dot{E}_1 \quad (1-5)$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-6)$$

1. 主感应电动势

首先研究主磁通所产生的感应电动势 e_1 、 e_2 。由于漏磁通远小于主磁通, 故 $e_{1\sigma} < e_1$, 空载时的原边绕组压降 $\dot{I}_0 r_1$ 也很小, 忽略这两者(它们之和只有 u_1 的 0.2% 左右)的影响时, 可认为 $u_1 \approx e_1$ 。可见当 u_1 是正弦波时, e_1 和 Φ_m 也按正弦规律变化。

设 $\Phi_m = \Phi_m \sin \omega t$, 则

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2} E_1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-7)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} = \omega N_2 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2} E_2 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-8)$$

e_1 、 e_2 的有效值分别为

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

$$E_2 = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-10)$$

相应的相量表达式为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-11)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-12)$$

\dot{E}_1 和 \dot{E}_2 在相位上都滞后于产生它们的磁通 $\dot{\Phi}_m$ 90° , 在大小上具有 $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$, K 为变