

中等专业学校教材

# 化工电器及仪表

泸州化工学校 尹廷金 主编

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

化工电器及仪表/尹廷金主编. —北京:化学工业出版社,1998.4 (1999.3 重印)

中等专业学校教材

ISBN 7-5025-2044-9

I. 化… II. 尹… III. ①化工设备:电气设备-专业学校-教材②化工仪表-专业学校-教材 IV. TQ056

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 29725 号

---

中等专业学校教材  
**化工电器及仪表**  
泸州化工学校 尹廷金 主编  
责任编辑:王丽娜  
责任校对:洪雅姝  
封面设计:宫 历

\*

化学工业出版社出版发行  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
新华书店北京发行所经销  
北京市燕山印刷厂印刷  
三河市延风装订厂装订

\*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17½ 字数 437 千字  
1998 年 4 月第 1 版 1999 年 3 月北京第 2 次印刷  
印 数:10101—20200  
ISBN 7-5025-2044-9/G·604  
定 价:22.50 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

## 前 言

本书以 1996 年化工部人教司颁布的化工工艺类专业教学计划及其配套的“化工电器及仪表教学大纲”为依据进行编写的。按新的教学计划和大纲要求,化工工艺类专业不再开设“电工学”和“化工仪表及自动化”课程,而代之以“化工电器及仪表”课。内容和教学方法都有较大变化。

本书针对化工工艺类专业学生在化工生产第一线工作时,操作、使用、选择电器设备和仪表的实际需要,精选电机电器、检测控制仪表的内容和电工电子、自动化的基础知识,分两篇共 11 章进行介绍。第一篇主要介绍化工电器设备,并概略地阐述了电工、电子常用基本术语、基本概念和用电常识;第二篇化工仪表内容中删除了原《化工仪表及自动化》教材中的陈旧内容、理论推导和电路分析,保留了精华部分,增加了自动成分分析仪表、可编程序控制器、集中分散型控制系统和带控制点的工艺流程图等新内容,自动化基础知识也尽量结合仪表讲述且更加适用。每章配有习题和思考题,书后附有学生实验和附录。

本书由泸州化工学校尹廷金主编,并编写第五~十一章和实验三、四、五、六、八;吉林化工学校于占河编写第一、二、三、四章和实验一、二;实验七、九、十由泸州化工学校张华和温熙阳编写。本书由广西化工学校孙良振主审,吉林化工学校姜敏夫、上海化工学校李文原、淮南化工学校张玲、北京市化工学校蔡夕忠、兰州化工学校于秀丽和郑怡参审。

本书在编写中一直得到化工部人教司的关怀,得到“全国化工中专教学指导委员会”的支持和帮助。在编写过程中参考了大量资料,主要参考资料附后,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中缺点、错误难免,欢迎批评指正。

## 内 容 提 要

本书共分两篇：化工电器设备和化工仪表。其中化工电器设备主要涉及电工基础、电子学、电机、电器甚至电力拖动的内容；化工仪表部分主要讲述检测仪表、控制仪表、可编程控制器、集中分散型控制系统和自动化基础等内容。

本书针对工艺专业人员在实际工作中操作、控制电机电器和自动化仪表的需要，精选有关内容，深入浅出地讲述，着重于提高运用能力。书中配有实验、例题和习题，适合化工中专各工艺专业作教材使用，也可供化工、轻工、石油化工等行业工艺专业技术人员和工人参考。

# 目 录

|                    |   |
|--------------------|---|
| 绪论 .....           | 1 |
| 一、本课程的性质、任务 .....  | 1 |
| 二、课程改革的思路和内容 ..... | 1 |
| 三、正确的学习方法 .....    | 2 |

## 第一篇 化工电器设备

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第一章 电工电子技术基础知识 .....  | 3  |
| 第一节 直流电路的基本特性 .....   | 3  |
| 一、电路 .....            | 3  |
| 二、常用定律 .....          | 4  |
| 第二节 电磁特性 .....        | 5  |
| 一、电流的磁效应 .....        | 5  |
| 二、电磁力 .....           | 5  |
| 三、自感与互感 .....         | 6  |
| 第三节 单相交流电路 .....      | 7  |
| 一、交流电的基本特性 .....      | 7  |
| 二、基本交流电路 .....        | 8  |
| 第四节 三相交流电及负载的连接 ..... | 11 |
| 一、三相交流电的连接 .....      | 11 |
| 二、三相负载的连接 .....       | 12 |
| 三、三相电功率 .....         | 13 |
| 第五节 电子元件及电子电路 .....   | 14 |
| 一、基本电子元件及特性 .....     | 14 |
| 二、直流稳压电源 .....        | 15 |
| 三、单管交流放大器 .....       | 17 |
| 四、多级放大器 .....         | 19 |
| 五、直流放大器 .....         | 20 |
| 六、LC 振荡器 .....        | 21 |
| 七、集成运算放大器 .....       | 22 |
| 八、脉冲与数字电路 .....       | 23 |
| 九、模拟量与数字量的转换 .....    | 26 |
| 课堂作业(观察演示实验) .....    | 27 |
| 习题及思考题 .....          | 27 |
| 第二章 变压器 .....         | 29 |
| 第一节 变压器的工作原理 .....    | 29 |
| 一、变压器的分类及基本结构 .....   | 29 |
| 二、空载时的变压器 .....       | 30 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 三、有载时的变压器 .....           | 31 |
| 四、阻抗变换 .....              | 31 |
| 五、变压器的损耗与效率 .....         | 31 |
| 第二节 特殊变压器及三相变压器 .....     | 32 |
| 一、几种特殊变压器 .....           | 32 |
| 二、三相变压器 .....             | 34 |
| 习题及思考题 .....              | 35 |
| 第三章 交流电动机 .....           | 36 |
| 第一节 异步电动机 .....           | 36 |
| 一、三相异步电动机的结构 .....        | 36 |
| 二、三相异步电动机的工作原理 .....      | 37 |
| 三、三相异步电动机的起动 .....        | 39 |
| 四、三相异步电动机的铭牌 .....        | 40 |
| 五、单相异步电动机 .....           | 42 |
| 第二节 同步电动机 .....           | 43 |
| 一、三相同步电动机的结构和工作原理 .....   | 43 |
| 二、三相同步电动机的控制 .....        | 44 |
| 三、单相同步电动机及步进电动机 .....     | 44 |
| 第三节 电动机的控制与维护 .....       | 46 |
| 一、电动机的手动控制设备 .....        | 46 |
| 二、电动机的起动控制设备 .....        | 47 |
| 三、电动机的保护设备 .....          | 48 |
| 四、三相鼠笼式异步电动机的正、反转控制 ..... | 50 |
| 五、异步电动机的简单故障分析 .....      | 51 |
| 习题及思考题 .....              | 51 |
| 第四章 电工测量与安全用电 .....       | 53 |
| 第一节 电工测量 .....            | 53 |
| 一、概述 .....                | 53 |
| 二、电流、电压和功率的测量 .....       | 54 |
| 三、万用表 .....               | 56 |
| 第二节 安全用电及节约用电 .....       | 58 |
| 一、化工厂供电及用电常识 .....        | 58 |
| 二、触电及危害 .....             | 59 |
| 三、防止触电措施 .....            | 60 |
| 四、静电的危害及防护 .....          | 61 |
| 五、节约用电 .....              | 62 |

|                                |           |                            |            |
|--------------------------------|-----------|----------------------------|------------|
| 习题及思考题 .....                   | 63        | 七、液位检测仪表的选用 .....          | 99         |
| <b>第二篇 化工仪表</b>                |           | <b>第五节 流量检测及仪表 .....</b>   | <b>101</b> |
| <b>第五章 过程控制与仪表 .....</b>       | <b>64</b> | 一、概述 .....                 | 101        |
| 第一节 概述 .....                   | 64        | 二、差压式流量计 .....             | 103        |
| 一、化工生产过程的特点 .....              | 64        | 三、其它流量仪表 .....             | 105        |
| 二、手动控制与仪表 .....                | 64        | 四、流量的显示与记录 .....           | 107        |
| 三、自动控制与仪表 .....                | 65        | 五、流量检测元件及仪表的选用 .....       | 108        |
| <b>第二节 控制系统的构成及其控制指标 .....</b> | <b>65</b> | <b>第六节 成分自动分析及仪表 .....</b> | <b>109</b> |
| 一、自动控制系统的类型 .....              | 65        | 一、概述 .....                 | 109        |
| 二、简单控制系统的构成 .....              | 66        | 二、氢分析器 .....               | 110        |
| 三、复杂控制系统的构成 .....              | 67        | 三、氧分析器 .....               | 112        |
| 四、控制系统的控制指标 .....              | 68        | 四、红外线气体分析器 .....           | 114        |
| <b>第三节 自动化仪表分类 .....</b>       | <b>69</b> | 五、工业气相色谱仪 .....            | 115        |
| 一、概述 .....                     | 69        | 习题及思考题 .....               | 117        |
| 二、检测仪表分类 .....                 | 69        | <b>第七章 控制规律及控制仪表 .....</b> | <b>119</b> |
| 三、控制仪表分类 .....                 | 70        | 第一节 控制对象的特性 .....          | 119        |
| <b>第四节 仪表及控制系统的符号表示 .....</b>  | <b>71</b> | 一、概述 .....                 | 119        |
| 一、被测量和仪表功能的字母代号 .....          | 72        | 二、对象特性参数 .....             | 120        |
| 二、仪表位号及编制方法 .....              | 73        | <b>第二节 控制规律 .....</b>      | <b>124</b> |
| 三、带控制点工艺流程图 .....              | 74        | 一、双位控制 .....               | 124        |
| 习题及思考题 .....                   | 76        | 二、比例控制 .....               | 125        |
| <b>第六章 化工生产过程变量检测及仪表 .....</b> | <b>77</b> | 三、比例积分控制 .....             | 127        |
| 第一节 概述 .....                   | 77        | 四、比例微分控制 .....             | 129        |
| 一、测量过程 .....                   | 77        | 五、比例积分微分控制 .....           | 130        |
| 二、测量误差 .....                   | 77        | 六、数字 PID 控制 .....          | 131        |
| 三、精确度和灵敏度 .....                | 78        | <b>第三节 气动调节器 .....</b>     | <b>132</b> |
| <b>第二节 温度检测及仪表 .....</b>       | <b>79</b> | 一、概述 .....                 | 132        |
| 一、概述 .....                     | 79        | 二、气动集装式调节仪表 .....          | 133        |
| 二、常用测温元件 .....                 | 80        | <b>第四节 电动模拟调节器 .....</b>   | <b>134</b> |
| 三、常用温度显示仪表 .....               | 84        | 一、概述 .....                 | 134        |
| 四、温度仪表的使用和选择 .....             | 89        | 二、Ⅱ型调节器的结构原理 .....         | 135        |
| <b>第三节 压力检测及仪表 .....</b>       | <b>91</b> | 三、Ⅱ型调节器的使用和选择 .....        | 136        |
| 一、概述 .....                     | 91        | <b>第五节 可编程序调节器 .....</b>   | <b>138</b> |
| 二、弹簧管压力表 .....                 | 92        | 一、单回路调节器概述 .....           | 138        |
| 三、力平衡压力变送器 .....               | 93        | 二、KMM 可编程调节器 .....         | 141        |
| 四、新型压力变送器 .....                | 94        | 三、SLPC 可编程调节器 .....        | 144        |
| <b>第四节 物位检测及仪表 .....</b>       | <b>95</b> | 四、可编程调节器的选择 .....          | 150        |
| 一、概述 .....                     | 95        | <b>第六节 调节器的配套仪表 .....</b>  | <b>151</b> |
| 二、静压式液位计 .....                 | 95        | 一、气动定值器 .....              | 151        |
| 三、浮力式液位计 .....                 | 97        | 二、遥控板 .....                | 151        |
| 四、电容式物位计 .....                 | 98        | 三、固定式手动操作器 .....           | 152        |
| 五、放射性物位计 .....                 | 98        | <b>第七节 气动薄膜调节阀 .....</b>   | <b>153</b> |
| 六、激光式液位计 .....                 | 99        | 一、气动薄膜调节阀的结构和工作            |            |
|                                |           | 方式 .....                   | 154        |

|                              |     |                             |     |
|------------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 二、调节阀的主要类型 .....             | 155 | 二、联锁保护电路 .....              | 190 |
| 三、调节阀的流量系数 .....             | 157 | 三、无触点信号报警与联锁保护系统 .....      | 191 |
| 四、调节阀的流量特性 .....             | 157 | 习题及思考题 .....                | 191 |
| 五、阀门定位器 .....                | 159 | <b>第十章 可编程序控制器</b> .....    | 192 |
| 六、调节阀的选择与使用 .....            | 160 | 第一节 概述 .....                | 192 |
| 习题及思考题 .....                 | 161 | 一、可编程序控制器 PLC 的定义 .....     | 192 |
| <b>第八章 过程控制系统</b> .....      | 163 | 二、PLC 的发展概况 .....           | 192 |
| 第一节 简单控制系统的变量选择 .....        | 163 | 三、PLC 的功能与特点 .....          | 193 |
| 一、被控变量的选择 .....              | 163 | 第二节 PLC 的基本构成及工作原理 .....    | 194 |
| 二、操纵变量的选择 .....              | 163 | 一、概述 .....                  | 194 |
| 三、滞后对控制过程的影响 .....           | 163 | 二、PLC 的硬件组成 .....           | 196 |
| 四、调节器控制规律的选择 .....           | 164 | 三、PLC 的软件组成 .....           | 197 |
| 第二节 调节器参数的工程整定 .....         | 164 | 四、PLC 的编程语言 .....           | 197 |
| 一、经验法 .....                  | 164 | 五、工作原理 .....                | 199 |
| 二、衰减曲线法 .....                | 166 | 第三节 ACME 系列 PLC .....       | 199 |
| 三、临界比例度法 .....               | 166 | 一、概述 .....                  | 199 |
| 第三节 简单控制系统的投运 .....          | 167 | 二、基本逻辑指令 .....              | 201 |
| 一、准备工作 .....                 | 167 | 三、数据操作指令 .....              | 207 |
| 二、投运 .....                   | 167 | 四、编程举例 .....                | 209 |
| 三、调整及简单故障判别 .....            | 167 | 习题及思考题 .....                | 210 |
| 第四节 复杂控制系统 .....             | 168 | <b>第十一章 集中分散型控制系统</b> ..... | 211 |
| 一、串级控制系统 .....               | 168 | 第一节 概述 .....                | 211 |
| 二、均匀控制系统 .....               | 171 | 一、关于计算机控制 .....             | 211 |
| 三、比值控制系统 .....               | 172 | 二、集散型控制系统的基本概念 .....        | 212 |
| 四、前馈控制系统 .....               | 174 | 三、集散型控制系统的特点 .....          | 213 |
| 五、选择性控制系统 .....              | 174 | 第二节 集散型控制系统的构成 .....        | 213 |
| 六、三冲量控制系统 .....              | 176 | 一、基本构成 .....                | 213 |
| 七、分程控制系统 .....               | 176 | 二、TDC-3000 系统的构成 .....      | 214 |
| 第五节 控制系统应用举例 .....           | 178 | 三、 $\mu$ XL 系统的构成 .....     | 215 |
| 一、泵的控制 .....                 | 178 | 第三节 集散控制系统的操作和显示 .....      | 216 |
| 二、压缩机的控制 .....               | 179 | 一、操作方式 .....                | 216 |
| 三、无相变换热器的温度控制 .....          | 180 | 二、显示画面 .....                | 217 |
| 四、载热体冷凝加热器的温度控制 .....        | 181 | 三、 $\mu$ XL 系统操作站 .....     | 223 |
| 五、载热体汽化的冷却器温度控制 .....        | 181 | 习题及思考题 .....                | 235 |
| 六、管式加热炉串级控制 .....            | 182 | <b>化工电器及仪表实验</b> .....      | 237 |
| 七、化学反应器的控制 .....             | 182 | 实验一 变压器测试 .....             | 237 |
| 八、精馏塔的控制 .....               | 184 | 实验二 三相异步电动机的检查和控制 .....     | 238 |
| 习题及思考题 .....                 | 186 | 实验三 温度测量系统的构成 .....         | 239 |
| <b>第九章 自动信号报警与联锁保护</b> ..... | 187 | 实验四 弹簧管压力表的调校 .....         | 241 |
| 第一节 概述 .....                 | 187 | 实验五 流量测量系统的构成 .....         | 243 |
| 一、信号报警 .....                 | 187 | 实验六 $\Pi$ 型基型调节器的使用 .....   | 245 |
| 二、联锁保护 .....                 | 189 | 实验七 控制系统的参数整定和投运 .....      | 247 |
| 第二节 信号报警与联锁保护电路 .....        | 189 | 实验八 集散型控制系统的认识 .....        | 249 |
| 一、信号报警电路 .....               | 189 | 实验九 报警及联锁系统认识 .....         | 249 |

|                               |     |                                   |     |
|-------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 实验十 气动三针记录调节器的认识和<br>使用 ..... | 252 | 附录四 动圈仪表型号与命名 .....               | 266 |
| 关于实验的说明 .....                 | 254 | 附录五 自动平衡显示仪表型号命名 .....            | 267 |
| 附录 .....                      | 255 | 附录六 工艺流程图上设备和机器图例<br>符号 .....     | 268 |
| 附录一 标准化热电偶电势-温度对照表 ...        | 255 | 附录七 工艺流程图上的物料代号 .....             | 270 |
| 附录二 热电阻欧姆-温度对照表 .....         | 260 | 附录八 工艺流程图上管道、管件、阀门及<br>附件图例 ..... | 270 |
| 附录三 热电偶、热电阻型号与主要<br>规格 .....  | 265 | 主要参考文献 .....                      | 271 |

# 绪 论

## 一、本课程的性质、任务

化工生产往往是通过密闭的装置、联接管道和动力设备进行的,具有高温、高压、深冷、易燃、易爆、有毒等特点。要保证安全、稳定、连续生产和产品质量,必须借助于检测、控制仪表对化工过程中的温度、压力、流量、物位和成分等变量进行检测或控制。电能是化工生产的重要能源,化工厂中供电和用电设备比比皆是。因此,可以说,化工厂是电气化和自动化程度较高、高新技术集中的地方。

作为工艺专业人员,除了应该牢固掌握必要的工艺专业知识外,还必须了解甚至熟悉用电设备和检测、控制仪表,以便正确使用、操作这些设备和仪表。否则也难以确保正常生产,难以完成工艺专业的任务。

因此,本课程是工艺专业学生必修的技术课。通过学习、实验、实习,了解或掌握化工厂中常用电器设备、检测控制仪表以及自动化的基础知识。为今后正确选择和使用电器设备或仪表打下基础。

本课程是在中专物理学的基础上进行学习的,涉及电工基础、电子学、电机、电器甚至电力拖动的内容以及检测仪表、气动仪表、电动仪表和自动化基础等内容。

本课程过去是以电工学、化工仪表及自动化两门课的形式进行教学的。为了在有限的时间内,学到最必需的内容,达到最佳的效果,有必要对课程内容和教学方法实行改革。

## 二、课程改革的思路和内容

根据部颁教学计划的要求,“化工电器及仪表”课程的改革应以满足实际生产对工艺专业学生在电器设备和仪表方面的需要为主要原则,不过多考虑学科系统性,只考虑学生在工艺类专业相关岗位上工作时对电器设备和仪表知识及能力的需要。

正常情况下,工艺专业的毕业生大都分配到工艺岗位从事操作、控制及相关工作。这些工作一般都要和电器设备和仪表打交道,都要求能够正确使用或选择电器设备和仪表。作为工艺技术人员,具有一定的电器设备和仪表知识,无论在正常运行中还是在技术改造(或设计)中都便于同自控专业人员配合,迅速、正确处理有关问题。当然与自控人员的要求应该有所不同。鉴于此,“化工电器及仪表”课程的改革基本思路是:

1. 打破传统的思维模式,不受学科体系结构的影响,以工艺专业学生的实际需要和符合教育规律为原则。

2. 降低理论要求,增加实用内容;减少微观分析,注重外特性及其应用;删减陈旧内容,突出高新技术。

3. 不论电器设备还是仪表,一般不进行内部电路分析,重点放在结构和工作原理,特别是正确使用、操作、控制以及根据工艺要求正确选择主要电器设备或仪表等方面。

4. 电工、电子及自动化方面的内容,不能考虑各自体系结构的完整性,只保证正确使用和选择电器设备及仪表的基本需要。

5. 在重视实用知识学习的同时,注意加强使用、操作、控制电器设备及仪表能力的培养和锻炼。

根据上述原则,本课程的内容确定为:

### (1) 化工电器

包括变压器、电动机及其控制、常用低压电器及安全用电等。其中,常用低压电器结合在电动机的控制中学习。

### (2) 化工仪表

①删除原有相关教材中的陈旧内容和过多理论推导、电路分析。主要介绍温度、压力、物位、流量的检测及仪表,调节器及配套仪表等。

②增加自动成分分析及仪表、集中分散型控制系统、可编程序控制器等内容。

③原“自动化基础”有关内容,只保留讲解和使用检测控制仪表必需的部分并结合仪表学习。新增带控制点工艺流程图相关的内容。

### (3) 电工、电子知识

本课程是在“中专物理”课基础上开设的,需要一定的电工、电子基础知识,以实现恰当过渡。这里只考虑讲述电器及仪表中涉及的电工、电子技术基础常用术语和基本概念,适当补充了一些常识性的内容。为增强直观性,利于理解和加深印象,采用演示实验引导,边做边讲。

“化工电器及仪表”是知识面很宽、实践性很强的课程,除充分运用电教手段和精心安排实验课外,还要通过实验和实习让学生能多见识一些电器和仪表,得到更多一些操作、控制方面的锻炼。

## 三、正确的学习方法

本课程内容的选择是紧紧围绕培养学生具有使用 and 选择电器设备和仪表的能力来搭配的,没有过多考虑各部分内容本身的系统性。学习时也应把握住提高能力这个重点。

学习电工、电子基础知识时,应注意观察演示实验中的各种电现象,准确理解相关的技术术语。

学习电器设备时,当然要注意电机、电器的结构、性能和工作原理,但重点是为了实现对电动机的控制,包括正常运行时的控制与维护 and 异常情况的处理。

检测、控制仪表的种类繁多,适当降低理论要求后有可能多见识一些品种,但也不可能包罗万象。因此,必须注意抓住仪表之间的共同性和特殊性;注意可调旋钮和按钮开关的作用与使用方法;注意显示或指示功能的实现。同时,仪表在线运行和离线状态的表现往往不同,必须注意仪表在线运行时包括环境条件、工艺条件等各种因素对仪表状态的影响。自动化基础知识有助于对仪表在检测控制系统中的作用的理 解,有助于对仪表在线运行时正常或异常状态的分析,也应结合仪表认真学好。

本课程不必死记硬背,强调理解以及理解基础上的应用。在重视理论学习的同时,也要重视实验与实习,有条件时最好能交替进行。不要放过任何接触仪表的机会学习仪表,根据实践中遇到的问题又再学习理论,坚持“实践—理论—再实践”的原则,理论与实践结合的能力、自学和自我发展的能力自会悄然增长。

# 第一篇 化工电器设备

## 第一章 电工电子技术基础知识

### 第一节 直流电路的基本特性

#### 一、电路

##### 1. 电路的组成

电路由电源、负载、输电导线与控制设备等组成。图 1-1 是最简单的直流电路图，图中，电池是电源，灯泡是负载，开关为控制设备，相互间由输电导线连接。通常，把电源内部叫内电路，电源以外的负载、开关、导线等叫外电路。

电源是电路的能源和信号源。电源用电动势来表示把正电荷由负极经电源内部移到正极的能力。电动势基本不变、内阻很低的电源称为电压源（等效为内阻与电动势串联），例如干电池、铅蓄电池及一般的直流发电机都可视为电压源。通常把内阻很大、能输出稳定电流的电源称为电流源（等效为内阻与恒流源并联），晶体三极管工作于放大状态时就是电流源。

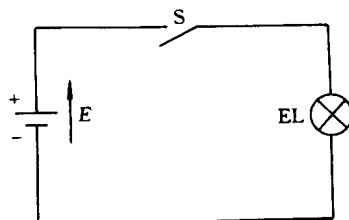


图 1-1 简单直流电路

负载是电路中的用电器，它将电能转换成其它形式的能量。直流电路中负载是电阻性质的。电路接通（开关合上），会有电流流过负载，负载两端形成电压（降）并消耗电能。

##### 2. 电流

在闭合电路中电荷在电场力的作用下作定向移动就形成了电流，习惯上认为正电荷运动

的方向是电流的方向，在电路分析中，往往很难事先断定电流的实际方向。这就引入了“参考方向”的概念，其方法是：任意假设某一支路中的电流方向（参考方向），把电流看作代数量，若计算结果为正，则表示电流的实际方向与参考方向相同，若计算结果

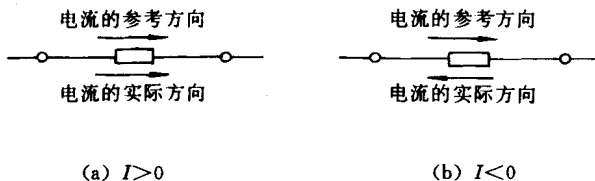


图 1-2 参考方向与实际方向的关系

果为负，则表示电流的实际方向与参考方向相反。如图 1-2 所示。电流的单位是安培（A）。实际中也有用毫安（mA）、微安（ $\mu\text{A}$ ）的。 $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$   $1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$ 。

##### 3. 电压

电压是指电路中任意两点的电位差，电压的方向是由高电位处指向低电位处，但在很多问题中，电压的实际方向也是难以事先判断的，因此仍要假定某段电路上的电压方向（参考方向）。如图 1-3 所示。电压的单位是伏特（V）。

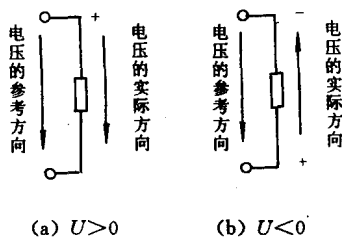


图 1-3 电压的方向

#### 4. 电阻

在金属导体中, 自由电子受电场力作用作加速运动, 但在运行中, 电子要与形成晶格的正离子发生碰撞, 使电子的运动受到阻碍, 所以电阻  $R$  就是表征导体对电流呈现阻碍作用的电路参数。电阻的单位是欧姆 ( $\Omega$ )。

#### 5. 电功和电功率

电能量对时间的变化率叫做电功率, 简称功率。在电压与电流的参考方向一致时, 电功率  $P$  可写成:

$$P = UI$$

当  $P > 0$  时, 元件吸收电能,  $P < 0$  时, 元件释放电能。功率的单位是瓦特 (W)。

在一段时间内, 电流所作的功叫电功或电能, 它等于电功率与时间的乘积。即

$$W = Pt$$

电功的单位为焦耳 (J), 实际中, 常用千瓦时即“度”作单位。

### 二、常用定律

#### 1. 欧姆定律

欧姆定律就是指流过电阻  $R$  的电流  $I$  与电阻两端的电压  $U$  成正比。在电压与电流的参考方向一致时, 则

$$I = U/R \text{ 或 } U = RI$$

上式又称为部分电路的欧姆定律。当电源电动势为  $E$ , 电源内阻为  $r_0$ 。不被忽略时, 上式可变为:

$$I = E/(R + r_0) \text{ 或 } E = U + Ir_0.$$

这称为全电路欧姆定律。

#### 2. 克希荷夫定律

支路: 电路中通过同一电流的每个分支叫做支路。

节点: 三条或三条以上支路的联接点叫做节点。

回路: 电路中任一闭合路径称为回路。

电流定律: 在任一瞬间, 流入任一节点的电流之和必等于流出该节点的电流之和。数学表达式为:

$$\sum I = 0$$

电压定律: 在任一瞬时, 沿任意闭合回路绕行一周, 在绕行方向上的电位升之和等于电位降之和。数学表达式为:

$$\sum U_{\text{升}} = \sum U_{\text{降}}$$

例如, 图 1-4 所示的电路有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2$$

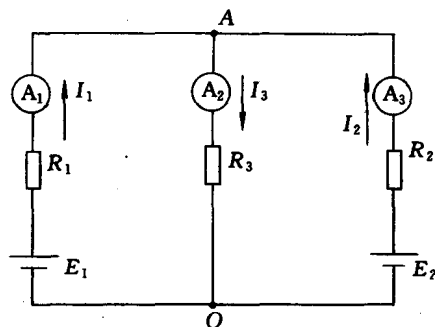


图 1-4 直流电路

## 第二节 电磁特性

### 一、电流的磁效应

通电导线周围也存在着磁场,这种现象称为电流的磁效应。磁场方向决定于电流方向,用右手螺旋定则判断。即:右手握住导线,伸直姆指,使其与电流方向一致,则弯曲的四指即表示导线周围的磁场方向。如果导线呈环形,则让弯曲的四指和环形电流的方向一致,那么伸直姆指的方向就是环形导线中心轴线上磁力线的方向。

描述磁场主要特性的物理量有:

#### 1. 磁感应强度 $B$

磁感应强度  $B$  是表示某点的磁场强弱及方向的物理量。它是一个矢量,其方向与该点磁力线的切线方向一致,与产生该磁场的电流之间的方向关系符合右手螺旋法则。若磁场内各点的磁感应强度大小相等、方向相同,则称为均匀磁场。在我国法定计量单位中,磁感应强度的单位是特斯拉 (T),简称特,以前在工程上也常用电磁制单位高斯 (Gs),  $1\text{T}=10^4\text{Gs}$ 。

#### 2. 磁通 $\Phi$

在均匀磁场中,磁感应强度  $B$  与垂直于磁场方向的面积  $S$  的乘积,称为通过该面积的磁通  $\Phi$ ,即

$$\Phi = B \cdot S \text{ 或 } B = \frac{\Phi}{S}$$

如果不是均匀磁场,则  $B$  取平均值。

磁感应强度  $B$  在数值上等于与磁场方向垂直的单位面积上通过的磁通,故  $B$  又称为磁通密度。在我国法定计量单位中,磁通  $\Phi$  的单位是韦伯 (Wb),简称韦,以前在工程上有时用电磁制单位麦克斯韦 (Mx),  $1\text{Wb}=10^8\text{Mx}$ 。

#### 3. 磁导率 $\mu$

磁导率  $\mu$  是表示物质导磁性能的物理量。它的单位是亨/米 (H/m)。由实验测出,真空的磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ 。其它任意一种物质的导磁性能用该物质的相对磁导率  $\mu_r$  来表示。

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

凡是  $\mu_r = 1$ , 即  $\mu = \mu_0$  的物质称为非磁性材料;  $\mu_r \gg 1$  的物质称为铁磁性材料。

#### 4. 磁场强度 $H$

磁场强度  $H$  是进行磁场计算时引用的一个物理量,也是矢量,它与磁感应强度的关系是:

$$H = \frac{B}{\mu} \text{ 或 } B = \mu H$$

磁场强度只与产生磁场的电流以及这些电流的分布情况有关,而与磁介质的磁导率无关,它的单位是安/米 (A/m)。

### 二、电磁力

通电导线在磁场中与磁力线方向垂直时,要受到电磁力的作用,电磁力  $F$  的大小和导线长度  $L$ 、通入导线的电流  $I$  成正比。在均匀磁场中有:

$$F = BLI$$

即均匀磁场中,通电导线所受电磁力  $F$  的大小等于磁感应强度  $B$ 、导线长度  $L$  和通电电流  $I$  的乘积。力的方向与磁场方向和电流方向有关,相互间遵循左手定则。

### 三、自感与互感

#### 1. 自感电动势

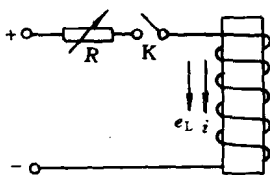


图 1-5 自感现象

在图 1-5 中当通过线圈的电流  $i$  发生变化时, 则在线圈两端产生自感电动势  $e_L$ 。当  $i$  与  $e_L$  的参考方向一致时, 其表达式为  $e_L = -L di/dt$ 。自感电动势的方向由楞次定律确定, 即感应电动势的方向反抗电流的变化。当电流增加时 ( $di/dt > 0$ ),  $e_L$  是负值, 表示  $e_L$  与电流  $i$  的方向相反; 当电流减少时 ( $di/dt < 0$ ),  $e_L$  为正值, 表示与  $i$  的方向相同。

$L$  叫做线圈的自感系数, 简称自感或电感。电感  $L$  的

单位为亨利, 简称亨 (H)。

#### 2. 互感电动势

图 1-6 所示为相邻的两个线圈①和②。当线圈①通入变化的电流  $i_1$  时, 它的磁通  $\phi_{11}$  穿过本线圈, 其中还有一部分  $\phi_{21}$  穿过线圈②。显然除了变化的磁通  $\phi_{11}$  在线圈①中产生感应电动势  $e_{11}$  或感应电压  $u_{11}$  外, 变化磁通  $\phi_{21}$  也会在线圈②中产生感应电动势  $e_{21}$  或感应电压  $u_{21}$ , 如图 1-6 (a) 所示。同理, 当线圈②中通以变化的电流  $i_2$  时, 产生的磁通也穿过两个线圈, 也必定会在线圈②中产生感应电动势  $e_{22}$  或感应电压  $u_{22}$ , 在线圈①中产生感应电动势  $e_{12}$  或感应电压  $u_{12}$ , 如图 1-6 (b) 所示。

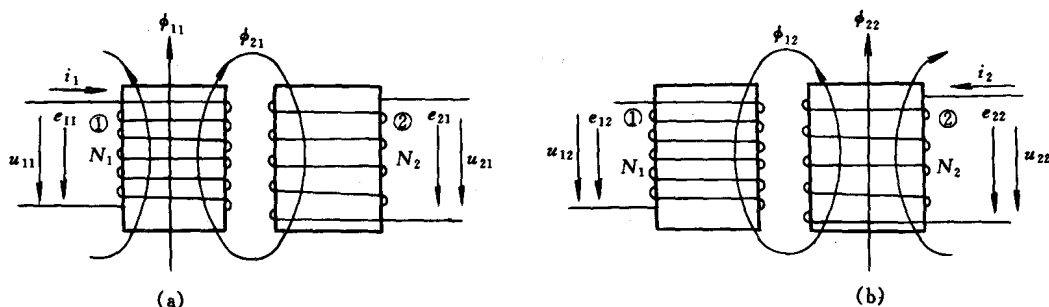


图 1-6 互感现象

在电路中, 一个线圈中电流变化时, 在相邻的另一个线圈中产生感应电动势或感应电压的现象, 称为互感现象。这种感应电动势或感应电压称为互感电动势或互感电压。此时, 就说这两个线圈之间有磁耦合存在, 互感电动势或互感电压为:

$$u_{21} = -e_{21} = d\phi_{21}/dt = M di_1/dt$$

$$u_{12} = -e_{12} = d\phi_{12}/dt = M di_2/dt$$

式中  $M$  为互感系数。

#### 3. 铁芯线圈的功率损耗

在交流铁心线圈中的功率损耗包括铜损和铁损两部分。线圈电阻  $R$  通电后所产生的发热损耗, 称铜损, 用  $\Delta P_{Cu}$  表示 ( $\Delta P_{Cu} = I^2 R$ ); 铁心在交变磁通作用下产生的磁滞损耗和涡流损耗, 两者合称为铁损, 用  $\Delta P_{Fe}$  表示。铁损将使铁心发热, 从而影响设备绝缘材料的使用寿命。

①磁滞损耗: 磁滞损耗是因铁磁性物质在交变磁化时, 磁畴来回翻转, 克服彼此间的阻力而产生的发热损耗, 常用  $\Delta P_h$  表示。可以证明, 铁心中的磁滞损耗与该铁心磁滞回线所包围的面积成正比, 同时励磁电流频率  $f$  愈高, 磁滞损失也愈大。当电流频率一定时, 磁滞损

失与铁心中磁感应强度最大值的平方成正比。

应采用磁滞回线窄小的铁磁材料以减少磁滞损耗,例如变压器、交流电机中的硅钢片、磁滞损耗就较小。

②涡流损耗:如图 1-7 (a) 所示,当线圈中通入交变电流时,交变磁通将在铁心中产生感应电动势和感应电流,这种电流就称为涡流。因铁心有一定的电阻,故涡流在铁心内产生发热损耗,涡流损耗用  $\Delta P_e$  表示。

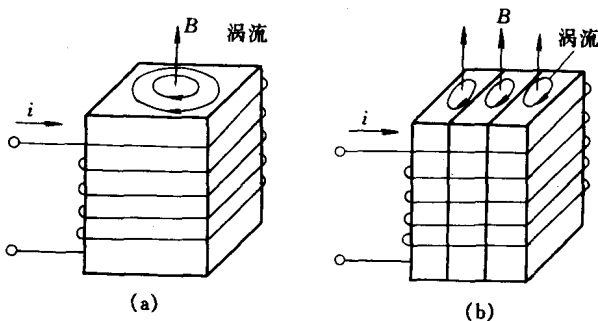


图 1-7 涡流损耗

为了减小涡流损耗,当线圈用于一般工频交流时,可采用彼此绝缘的硅钢片叠成铁心,如图

1-7 (b) 所示,这样将涡流限制在较小的截面内;因铁心内含硅,电阻率较大,也使涡流及损耗大为减小。一般电机和变压器的铁心常采用厚度为 0.35mm 或 0.5mm 的硅钢片叠成。对高频铁心线圈,常采用铁氧体磁心,其电阻率很高,可大大降低涡流损耗。

综上所述,交流铁心线圈工作时的功率损耗为:

$$\Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} = I_2 R + \Delta P_h + \Delta P_e$$

### 第三节 单相交流电路

#### 一、交流电的基本特性

交变电动势、交变电压、交变电流统称为交流电,其大小与方向随时间作周期性变化。

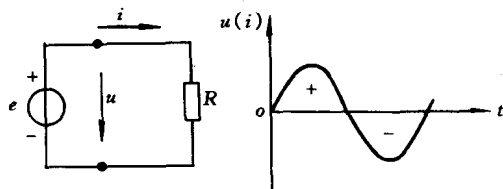


图 1-8 正弦电量

按正弦规律周期性变化的电压(或电流),称为正弦交流电压(或电流)。正弦交流电压和电流常统称为正弦电量,简称正弦量。如图 1-8 所示,电压  $u$  和电流  $i$  都随时间按正弦规律交替变化,不仅大小随时间变化,而且实际极性也不断地随时间变更。

正弦电压可以利用变压器升压或降压,便于远距离输送。在进行电路分析时,可以进行加、减、求导及积分等运算。结果仍为同频率的正弦量,因此当一个或几个同频率的正弦电压作用于线性电路时,电路中各部分的电压及电流都是同一频率的正弦量,这种电路称为正弦交流电路。

正弦电量在任一瞬时的值称为瞬时值,用小写字母  $u$ 、 $i$ 、 $e$  分别表示正弦电压、电流、电动势的瞬时值。图 1-9 给出了一个正弦电压  $u$  的波形图,图中  $T$  是电压  $u$  变化一周所需的时间,称为周期,其单位为秒(s)。电压  $u$  每秒变化的周数为  $1/T$ ,称为频率,用  $f$  表示,单位为赫兹(Hz)。我国

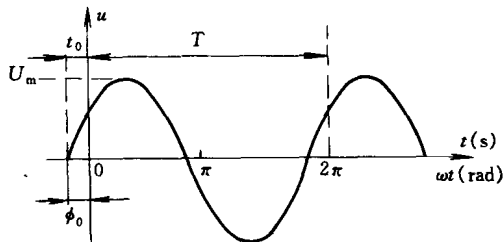


图 1-9 正弦电压波形图

和大多数国家都采用 50Hz 作为电力系统的供电频率, 美国、日本等国家采用 60Hz, 这种频率习惯上称为工频 (工业频率)。

对于图 1-9 所示的正弦电压  $u$ , 其瞬时值可用正弦函数表示, 即  $u = U_m \sin \omega(t + t_0) = U_m \sin(\omega t + \phi_0)$ , 由上可知, 对于一个正弦电压  $u$ , 如果  $U_m$ 、 $\omega$ 、 $\phi_0$  为已知, 则电压  $u$  只随时间  $t$  变化。 $U_m$  (幅值)、 $\omega$  (角频率)、 $\phi_0$  (初相位) 称为正弦电压  $u$  的三要素。

①幅值 正弦电量的最大值, 例如, 照明电路电压的最大值为 311V。正弦电压, 电流、电动势的幅值分别用  $U_m$ 、 $I_m$ 、 $E_m$  表示。

②角频率 单位时间内正弦电量辐角的增值, 它的单位为弧度/秒 (rad/s)。

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

③初相位 正弦函数的辐角 ( $\omega t + \phi_0$ ) 称为正弦电量的相位角, 简称相位。 $t=0$  时的相位角  $\phi_0$  称为初相角或初相位。习惯上把初相位的取值范围定为  $(-\pi \sim +\pi)$ 。

④相位差 在正弦交流电路中, 经常比较两个同频率正弦量的相位。例如正弦电压  $u$  和电流  $i$  为同频率的正弦量, 其波形如图 1-10 所示,  $u$ 、 $i$  可分别表示为:

$$u = U_m \sin(\omega t + \phi_u)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi_i)$$

通常, 把两个同频率正弦量的相位角之差称为相位差, 可用  $\phi$  表示, 这里  $u$ 、 $i$  的相位差为:

$$\phi = (\omega t + \phi_u) - (\omega t + \phi_i) = \phi_u - \phi_i$$

即两个同频率正弦量的相位差实际上等于它们的初相位之差。

如果  $\phi > 0$ , 则电压  $u$  在相位上比电流  $i$  超前  $\phi$  角, 或者说电流  $i$  比电压  $u$  滞后  $\phi$  角。

⑤有效值 实际中常用有效值来计量正弦电压、电流的大小。有效值是按照周期电流  $i$  与某个直流电流  $I$  热效应相等的观点来定义的, 即如果周期电流  $i$  产生的热量与直流电流  $I$  在一个周期内产生的热量相等, 则此直流电流的数值  $I$  称为周期电流  $i$  的有效值。由数学推导可得

$$I = 0.707 I_m \text{ 或 } I_m = \sqrt{2} I$$

同时有

$$U = 0.707 U_m \text{ 或 } U_m = \sqrt{2} U$$

$$E = 0.707 E_m \text{ 或 } E_m = \sqrt{2} E$$

当正弦电压最大值是 311V 时, 有效值则为 220V。

## 二、基本交流电路

### 1. 纯电阻电路

负载中仅有  $R$  参数 ( $L$ 、 $C$  参数可以忽略不计) 的交流电路, 称为纯电阻电路。例如: 白炽灯、电炉、变阻器都认为只含电阻, 通过导线将它们与交流电源联接而构成的电路就是纯电阻电路。电路如图 1-11 所示。

设电阻两端的电压为正弦交流电压

$$u_R = \sqrt{2} U_R \sin \omega t$$

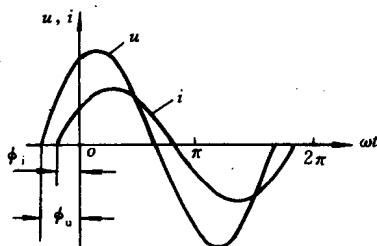
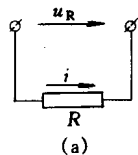
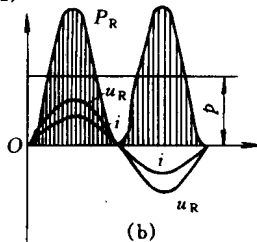


图 1-10 相位差



(a)



(b)

图 1-11 纯电阻电路

则有

$$i = u_R / R = (\sqrt{2} U_R / R) \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

$$I = U_R / R$$

纯电阻电路中,任一瞬时通过电阻的电流瞬时值与电压瞬时值的乘积,称作电路瞬时功率。

$$P_R = u_R i = 2 U_R I \sin^2 \omega t$$

通常用一个周期内取用的瞬时功率平均值来表示负载取用功率的大小,称为有功功率。单位是瓦或千瓦 (W 或 kW)。

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T 2 U_R I \sin^2 \omega t dt = U_R I = I^2 R = U_R^2 / R$$

可见,在交流作用下的纯电阻电路中,电流、电压的瞬时值、最大值、有效值之间都满足欧姆定律;电流和电压同相位;电阻消耗有功功率。

## 2. 纯电感电路

如果一个线圈的电阻  $R$  很小,可忽略不计,而看作只存在电感  $L$  参数,那么以这个线圈作负载的交流电路便称作纯电感电路,如图 1-12 所示。

设通过电感线圈的电流为  $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$

则有

$$u_L = -e_L = L di/dt = \sqrt{2} I \omega L \cos \omega t = \sqrt{2} U_L \sin(\omega t + \pi/2)$$

$$I = u_L / \omega L = U_L / X_L$$

式中

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

称作感抗,表征电感对交流电流的阻碍作用,单位是欧姆。

纯电感电路的瞬时功率为:

$$P_L = u_L i = 2 U_L I \sin \omega t \cos \omega t = U_L I \sin 2\omega t$$

平均功率为:

$$p = 1/T \int_0^T I U_L \sin 2\omega t dt = 0$$

可见,在纯电感电路中,电流与电压的瞬时值相位不同,电压领先电流  $90^\circ$  (电流落后于电压  $90^\circ$ ),有效值之间仍然满足欧姆定律 (以感抗代替电阻)。平均功率为零,不消耗有功功率,

电源与电感线圈间只是不断进行电能和磁场能的转换。能量转换的振幅称作无功功率,用  $Q_L$  表示。

$$Q_L = U_L I = I^2 X_L$$

单位是乏 (Var)。

## 3. 纯电容电路

一个质量很好的电容器,可以看成纯电容,负载仅含  $C$  参数的电路,称为

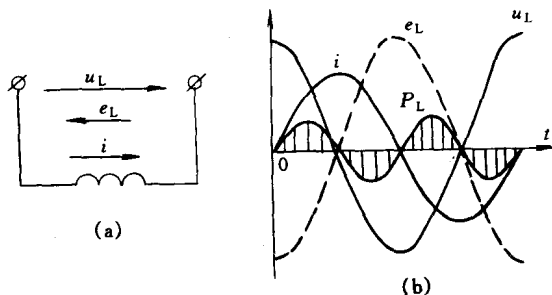


图 1-12 纯电感电路

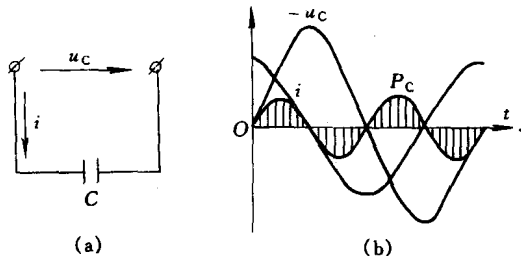


图 1-13 纯电容电路