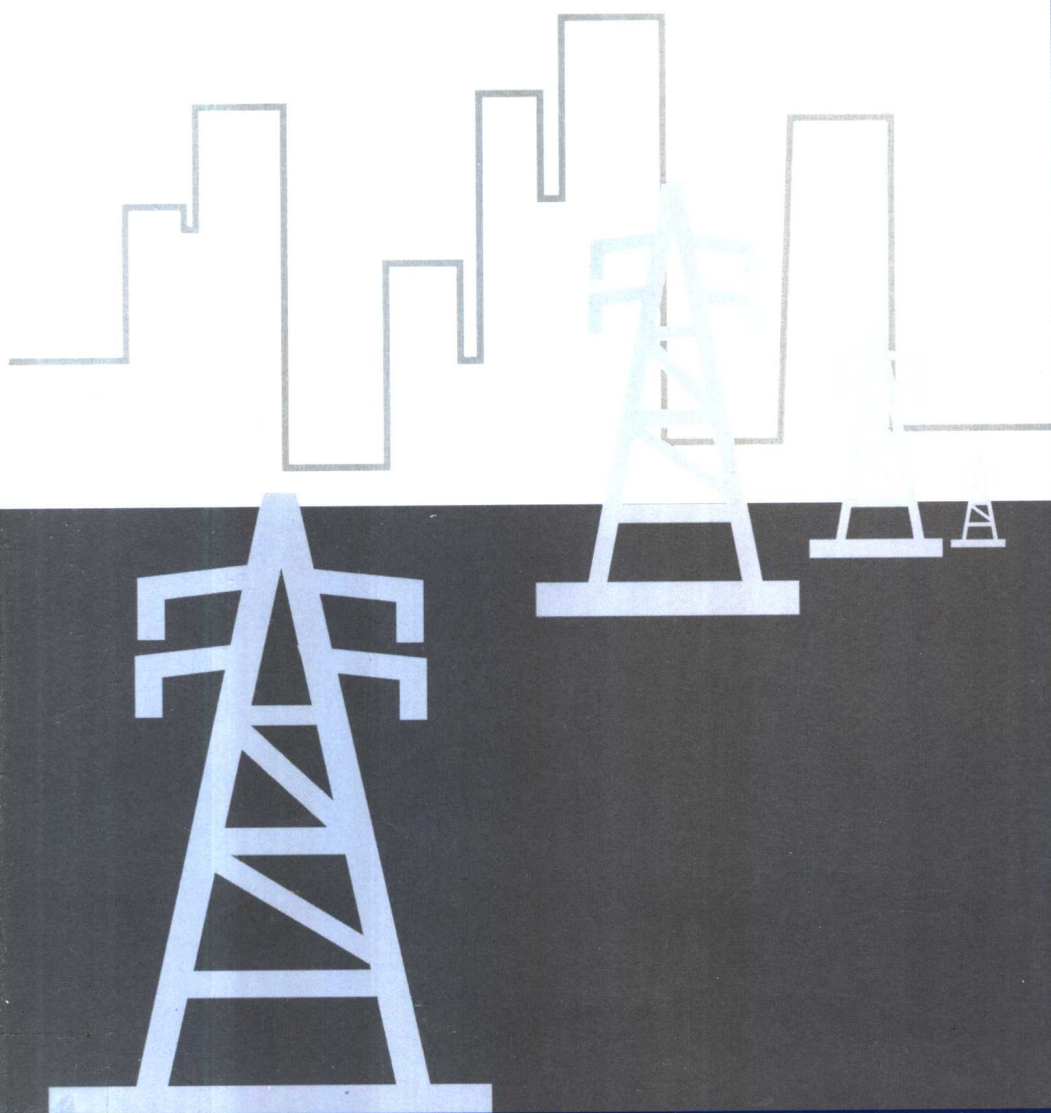


普通高等教育规划教材

电工应用技术教程

非电类专业

李俊友 曹秀吉 主编



 机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育规划教材

电工应用技术教程

(非电类专业)

主 编	李俊友	曹秀吉					
副主编	李玉章	鲁 军	李 梅				
参 编	王哈力	陈政权	韩成哲	于荣义	赵亚威	张景异	
	焦东林	陈俊生	李福奎	张丽萍	周 丹	刘砚菊	
	王小丽	胡玉	宋	忠	李 曦	陶 晶	
主 审	唐 介						



机械工业出版社

内 容 简 介

本教材是针对素质教育的需要,将课程内容定位在传授“建立一个实际电系统所必需掌握的技术要点和技术难点”之上,运用八年的教改经验,采用“面向读者,方便读者使用”的方式编写的。

本教材的特点是:①把怎样学习和怎样思考放在具体内容的讲授之上;②用强化动手能力的训练来突出创新能力的培养;③为实施工程意识和工程能力的培养,用一个实际系统建立的全过程将全书的知识综合起来应用。

本教材是以最新出版的四套面向 21 世纪的电工学教材为基础,针对非电类专业学生的实际需要,按讲授 40~60 学时,实验 30~60 学时编写的。本书适用于非电专业本科和专科学生作为教材,也适合非电工程师作为自学丛书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工应用技术教程/李俊友,曹秀吉主编. —北京:机械工业出版社, 2002.2

普通高等教育规划教材·非电类专业

ISBN 7-111-09677-0

I. 电... II. ①李... ②曹... III. 电工技术—高等学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 092655 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:鞠 杨 责任印制:路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·19.5 印张·1 插页·485 千字

0 001—8 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

随着知识更新速度加快, 学校教育的重点转移到方法论的传授上, 具体知识的讲授应下降到第二位。素质教育实质上是能力教育, 知识转化为能力需对应一个知识的整合过程, 而这一过程必须由受教育者自身来完成, 但是教育者应尽可能向他们提供必要的外界条件, 例如: 创造适当的环境氛围; 破除对纯理论知识的迷信; 增强他们的自信心; 强迫受教育者自我索取知识并养成他们的动手习惯就成了当前教育的基本方法。

在计划经济向市场经济转轨的今天, 为了适应市场经济的特色需要, 人们盼望有利于实施素质教育的新型教材。为此, 沈阳工业学院、沈阳大学、北方交通大学、哈尔滨理工大学、长春建筑工程学院五所院校, 根据各校多年教改的经验, 多次研讨, 历经四年时间编著了以非重点工科院校学生为对象, 用突出‘应用技术’知识的传授, 来强化工程意识的培养, 达到提高工程应用能力目的的新型教材。

本书由李俊友、曹秀吉任主编, 李玉章、鲁军、李梅为副主编。写作分工如下: 第一章李玉章、王小丽、朱立忠、赵亚威、韩成哲; 第二章鲁军、王哈力、李曦、于荣义、张景异; 第三章胡玉兰、陈政权、张丽萍; 第四章宋勤、陶晶、刘砚菊; 第五章李梅、焦东林、陈俊生、李福全、周丹。附录由各章相应分担。

本书主审是全国电工学研究会理事长唐介教授。

在定稿前曾得到哈尔滨工业大学秦曾煌教授的详细指点, 沈阳航空学院王相海、郑济仲副教授, 长春光机学院李秀芬教授也给予了具体指导, 在此一并致谢。

本书的知识结构是系统—电路—器件格式, 以建立 PWM 直流调速实验系统所需的全部硬件知识为基本内容来传授从理论到实践的全部知识。为了保证讲与练的时间比为 3 : 7, 在教学内容及教学方法上采取了相应的措施, 学时数为: 讲课 40~60, 实验 30~60。

由于采用通俗形式写作, 故易于自学。本教材适合非电专业本科及专科生使用, 也可作为非电工程师的自学丛书。

因能力所限, 不足之处请赐教。

编 者

目 录

前言		
绪论	1	
第一章 电系统的结构框架与分析电路的基础	3	
第一节 电系统的结构框架	3	
第二节 分析电路的基本理论	7	
第三节 正弦交流电路的特点及基本分析方法	28	
第四节 三相交流电路简介	57	
第五节 暂态分析	66	
第二章 电路应用的基础	77	
第一节 基本模拟电路	77	
第二节 基本数字电路	143	
第三节 计算机硬件电路简介	168	
第四节 可编程逻辑器件和可编程控制器	182	
第三章 电机与传感器的特性简介	197	
第一节 电机及以电机原理为主的元器件	197	
第二节 传感器的基本知识	215	
第三节 继电器、接触器的结构与用途		
简介	220	
第四章 信号处理、接口电路与抗干扰技术	222	
第一节 信号处理电路	222	
第二节 接口电路	229	
第三节 抗干扰技术	236	
第五章 实际系统的建立与分析	239	
第一节 基础知识的拓宽	239	
第二节 综合实验装置的设计过程	248	
第三节 系统的安装与调试	259	
第四节 系统的分析	260	
第五节 科学技术的普及与提高	260	
附录	265	
附录 A 继电接触控制系统的使用与维修	265	
附录 B FPI 系列 PLC 的指令介绍	270	
附录 C 常用的抗干扰措施	278	
附录 D 电系统安装、调试的经验介绍	284	
附录 E 实验	287	
附录 F 习题	288	
参考文献	307	

绪 论

随着科学技术的飞速发展,各专业间的知识渗透越来越深入,作为传授发展最快的电知识的电工学课程的任务越来越重,以 20 世纪 60 年代仿前苏联教科书为基本模式的教材应该退出历史舞台了。

在知识更新速度如此快的年代里,许多知识在还未走出校门就已经失去了应用的价值。原来为某些专业所特有的技术和理论已上升为各专业的共有技术和共有理论。在产品中高科技的含量越来越大,要想设计出水平高的产品,就必须占有更多的知识。

面对这种形势,电工学的内容就必须为非电工程师提供在生产过程的组织、运行、维修、管理及技术革新和改造中,与电气工程师们进行技术交流的必要知识。

由于专业的分工仍然存在,而且技术细节的掌握需对应一个很长的过程,所以电工学课为满足社会的需要,应将讲授的重点放在对建立一个实际电系统所涉及的技术要点和技术难点的理解和掌握上。

根据上述原则,本书突出了系统知识的传授,将书的知识系统结构设计为:第一章讲技术交流的共同语言;第二章讲组成系统的基本电路;第三章讲构成系统的常用部件;第四章是组成一个实际系统所必须了解的知识;第五章则是在解剖一个实际系统,并将全书的授课宗旨细化和升华。在附录中给出的是一些实践知识。这样一来,全书的知识就能在明确的讲授目标指导下进行。

素质教育的实质是营造一个适当的环境氛围,让受教育者来养成索取知识、处理事情和适应环境的良好习惯。作为工程技术人员,则要求在接受工程教育的同时,应建立起良好的工程意识和形成较强的工程能力。素质教育中的创新和求变意识的养成和学会从全局看问题的方法也是其核心之一。

工程技术人员动手习惯的养成,不仅能提高办事能力,更主要的是会缩短索取知识的过程。本书的知识应用结构的设计是:①先自学,后讲授;②实施课堂讨论,以正、反两方面的概念来纠正存在于人们头脑中的不恰当的学习方法和思维方法;③将实验和讲授环节揉和在一起(见附录 E),以强化自信心和动手能力的培养,达到养成工程意识的目的;④在习题与思考题的选择上注意了创新能力的培养,同时弱化了简单的验证题及怪题的份量,将人们的注意力吸引到观察实际中来。

在弄清教材的知识系统结构和知识应用结构后,就了解了本书的基本内容和特点,接下来人们关心的是怎么学和如何思考问题。

学习的基本方法是:从需要入手,站在全局的角度上去摆正各部分内容的位置,再去细化它、充实它,而不应该一开始就步入细节,然后再用所有细节来堆砌出一个整体。

思维的基本方法是:站在事物的基点(以基础知识为立足点)上,抓住事物的本质(即特点)去区分事物,而不应该是无边际地猜想。

在知识成堆的今天,不抓住基本理论和基本规律去理出一条清晰的思路,在知识的汪洋大海中是会寸步难行的。

要抓住事物的特点，就必须深入思考，深入实际。这些基本规律，在社会科学中是如此，在自然科学中也是如此。有意识地将历史、哲学的一些观点引入到自然科学中来，就能更好地理解社会，更快地学会做人。

所以学什么课并不重要，但从诸多课程中去学会学习、学会做事、学会做人的基本法则比什么都重要。这就是为什么素质教育的宗旨定在“三会”上的原因。

学习的另一个重要因素是积极参与，作为一个旁观者是永远也学不到真东西的。在积极参与中去尝试成功与失败的滋味，努力去增强自己的自信心，并破除对事物和人的神秘感，这时才能真正体会到知识的力量所在。本书的基本构思就是以这样一个格局实现的，能认真学会解剖一只麻雀就能了解一只大象的基本结构。只有敢于坚信自己又敢于否定自己的人，才能取得事业的成功。

第一章 电系统的结构框架与分析电路的基础

学习电工技术的目的在绪论中讲过了，为了认识电系统必需从结构框架开始，然后朝着明确的目标去深入学习。

本章的内容是简介系统的构成方式，阐述研究电路的基本理论、基本方法及基本技能。

第一节 电系统的结构框架

对于机械类专业的学生来说，将面对的是机电一体化的产品，而在机电深度结合的一体化产品中，可能涉及现有的各类电系统。我们不可能在短短的四年学习中，将有关电系统研究透，不过从整体上去认识这些系统，并学会建造及分析系统的基本方法也不是一件难事，本书就是以这种设想来组织课程体系的。

一、机电一体化系统的组成及各部件的功能

1. 机电一体化系统的七大部分

机电系统一般由：机械本体、动力部分、执行机构、控制与信息处理部分、接口部分、保护及抗干扰部分、显示部分共七大部分组成。

其中本体、动力、执行、显示四部分往往是独立存在的。接口、保护与抗干扰部分常常隐藏在各大功能块中。控制与信息处理部分是系统的核心，是新技术、新理论最集中的地方，所以最复杂。

2. 各部分的基本功能及其实现方法

本体部分是为整机提供支承系统的。机身、框架及机械联接结构是机械本体的具体结构。

动力部分是为整机提供能量的。电源就是电系统的能源，其他动力源也应是机电产品的动力部分，例如电动机、蒸气机及其他。

执行机构的功能是完成控制命令所要求的运动任务的，它是机与电的结合部。一般来说它的功率都比控制部分的功率大。要协调控制部分和执行部分的功率关系，在执行元件前面都要加驱动装置，所以执行机构一般由驱动装置和执行元件两部分组成。驱动装置为执行元件提供按控制命令变化的能量，执行元件则将电能转换为机械能。

控制与信息处理部分的功能是对各种信息进行采集、贮存、分析、加工后得出结果并让系统按给出的规律（即指令）运行。组成控制与信息处理部分的是一些电路或者是计算机类产品（即可以是电路，也可以是一个系统）。

接口部分是在系统各部分、各环节间出现物质、信息、能量交换时，为了能实施交换而设计的传输、放大、变换等功能性电路。这里传输必须保证准确、可靠、迅速；放大是将小信号变大；变换则是将物质能量、信息的形式进行转化。例如，电动机从某个角度来看它就是一种接口。

保护和抗干扰部分则是系统的“安全部”。保护是让系统在出现故障时损失最小而采取的措施。例如过电流时烧断熔丝，就是一种保护。抗干扰是指防止来自系统内部或外部出现会

破坏系统正常工作的信号而采取的措施。例如消除系统中强电对弱电的影响就是一种抗干扰。

显示部分的功能是：将希望了解的系统的工作状态表现出来。例如电工仪表显示电量、转速，红灯显示故障、绿灯表示正在运行等均是。

我们在本书的最后一章中，将这些内容组合在一起构成一个实际电系统，这时才能清晰地体会到各大功能部分的组成及作用。

二、常见电系统的结构框架

在这里我们研究的是机电产品中的电系统结构，不涉及机械本体的研究。

建立一个电系统的目的就是为实施控制。所谓控制就是让系统能按照人的意志办事。例如，对电机的速度、位置、转矩、转角等物理量的控制就是建立电系统的目的之一。

研究控制规律，必须将各种系统进行分类，这样可以根据不同类型系统的特点来组建系统。

1. 系统的分类方法

从结构上分：有开环和闭环两大类。开环和闭环的区别在于系统的输出量是否影响输入量上，有影响的称“闭环”，无影响的称“开环”。那么这个“环”是指什么呢？是从信息的传输角度上看，有信息回输的就是有环（闭），否则为无环（开）。

从输入、输出变量的多少上分为单变量和多变量两类。输入是自变量，输出是因变量，所以以一个变量的单输入、输出系统称单变量系统。多个输入、输出的称多变量系统。

从性能上分，有前馈系统、反馈系统、最优控制系统、自适应、自学习、自校正系统、预测控制、智能控制等。只要能找出性能上的突出优点的，都可以命名为一种控制系统。例如最优控制就有时间最优、耗能最优等等，而“最优”不过是与同类系统相比时具有其他系统不具备的优点而言。又如，自校正系统就告诉你该系统能在满足一定条件的前提下，自己能校正系统的部分参数（不可能是全部）。而自适应系统则是在人们预测到几种外界环境变化时对系统可能形成的影响，加以防范而已。人们常听到的“专家系统”虽然不是始创于控制理论中，但是也可引用到电系统中来。“专家”的经验是用几个先决条件作为判别的，条件（即输入）满足时，则某一措施（即输出）给出。智能的含义也不是什么都会的代名词。

从控制方法上分：有经典控制、现代控制、模糊控制及神经网络控制等。

所以同一个系统可以同时具有多个名称，而一个复杂的系统的控制方法，又可能是多种方法的组合。这样一来严格去定义一个系统的名称，其意义是不大的，当然一个不需要人参与的自动控制系统多半是以闭环系统形式出现的。区分系统的目的在于判别这个系统的基本性能，以便于寻找相应的理论去设计（或分析）这个系统。

2. 实际系统的控制过程分析

以水温调节系统为例，看看水温调节的方法和过程。

在浴池洗澡时，我们希望有适当的水温，夏天水温应低些，冬天水温要调得高些。

淋浴出现后，人们首先是用一个冷水槽和一个恒温的热水槽来控制水温。方法是经过计算和实测，得到了一个冷热水的比例所对应的水温表。根据水温要求，调节输入水的冷热比例就可以控制水温。比例是由浴池负责人控制（给定输入）的，洗澡人得到的实际温度是不可调的，这叫开环系统。由于外界因素引起冷、热水槽温度发生变化时，只要给定的冷热水比例不变，则必然引起输出水温的变化。开环系统结构简单，但是不能抵抗外部的扰动（环境变化）和内部参数的变化，所以真实值不能与期望得到的值（即给定输入值应该对应的输

出值)一一对应。

于是人们将水温调节阀改到由洗澡人来控制,浴池仅供给冷热水。为了得到温度适当的水,我们看看不同人的不同调节方法。

性急的人,打开龙头后,水温太低,他立即开大热水龙头。一会水温又太高,他马上再开大冷水龙头…,水温将始终处于冷热变化中。这种按一定比值开龙头的方法叫“比例控制法(P调节)”。P调节容易产生振荡(冷热交替)。

性慢的人,打开冷水龙头后,缓慢地加大热水龙头,耐心地试着水温,直到适中为止,该方法在控制理论中叫“积分控制法(I调节)”,I调节用的时间长,但系统不出现振荡。

另一种人,冷水龙头开后,他立即开大热水龙头,然后又迅速将热水龙头关小,水温迅速到达适中,这种方法称“微分控制法(D调节)”,D调节要求掌握适度,显然技术难度大一些。

知道了PID调节法后,我们希望水温能自动控制,这样人们就只要在输入端给出你希望得到的温度控制指标(即给定输入),则龙头将会始终供给你满意的水温。

分析一下水温调节过程,水温是系统的输出,人的手感觉相当于温度计(称温度传感器更好),测出水温后,立即去变更热水龙头(手将温度量变成了输出调节量),最终得到满意的水温。如果将人看成一个温度传感器,他将输出量(水温)的实际值返回到输入(即阀门的大小)端,并直接影响了输入的实际值,所以这种输出能影响输入的系统叫闭环系统。

注意:真正的闭环系统是不能把人算在系统中的。也就是说真正的闭环系统中,人的工作应该由机器来代替,否则仍然称开环系统。上述淋浴装置,在人调好水温后,环境及冷热水温本身的变化仍然存在,不过在闭环系统中,如果抗扰性能很好时,系统输出的水温会始终保持在人们的期望值上,这就是闭环系统的优点所在。

在闭环系统中,调节方法是PID综合的应用,一般是先用P法让水温接近期望值,然后再用I法来实现期望值,所以闭环系统中调节器常用PI调节器。简单的PI调节器用一个简单电路就可以实现。

由于计算机的出现,它有很强的运算能力和控制能力,他能直接算出在每一状态下所需要调节的量,并立即给出这个量。用计算机来做调节器,显然系统在各方面的性能都会比用简单电路构成的调节器要好,所以系统的控制性能得到了大幅度的提高,于是控制理论也得到了相应的发展。

3. 常见系统的结构框架

我们在分析一个系统时,常用代表其基本功能的框图来清晰地表出。到具体实施时,则根据实际需要去寻找相应的电路去实现,所以同一种结构的系统,其电路可能是完全不同的。所以说目的是主要的,方法则是可以选择的。下面我们列出八个框图(图1-1~图1-8所示)来比较一下各类系统的基本特点:

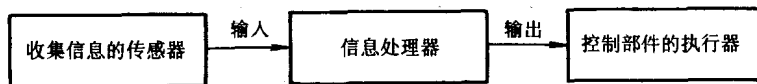


图 1-1 各种电子控制系统的基本结构图

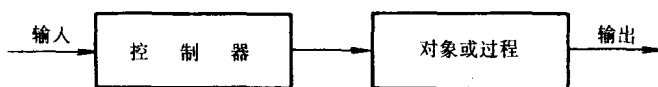


图 1-2 开环控制系统结构图

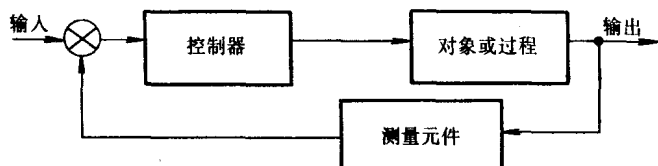


图 1-3 闭环控制系统结构图

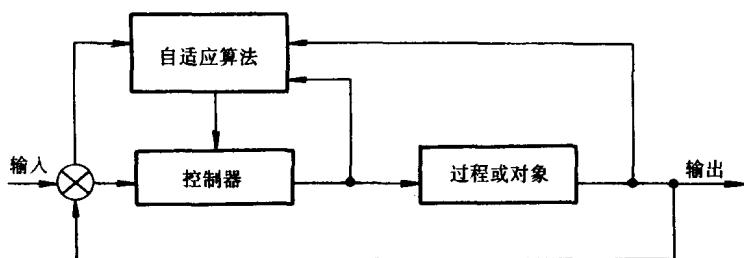


图 1-4 反馈自适应控制系统结构图

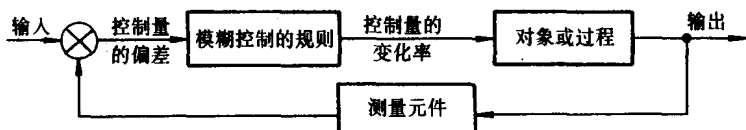


图 1-5 模糊控制系统结构图

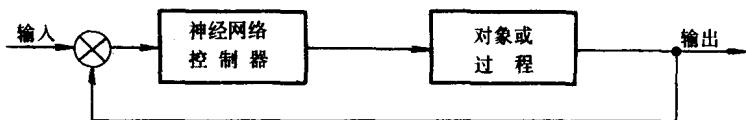


图 1-6 神经网络控制系统结构图

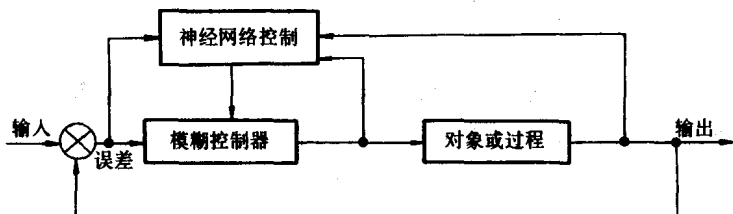


图 1-7 混合控制系统结构图

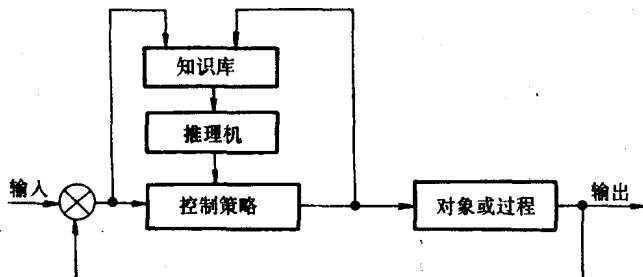


图 1-8 简单智能控制系统结构图

从图 1-1 中可以看出，任何一个电系统必然由三个部分组成，即传感器、信息处理器和执行器。在图 1-2 中控制器相当于信息处理器，对象或过程属于执行机构，输入信号可能由传感器

或电位器给出。

图 1-3 中的测量元件就是一个传感器。

在图 1-4~图 1-7 中, 控制器加算法加网络在一起组成了信息处理器。

图 1-8 中的信息处理器已经由知识库、推理机和控制策略来承担, 但是被控制对象和过程以及各种传感器仍然作为固定的组成部分存在。

由此可以得出一条结论: 组成系统的固有部分变化是不大的, 但信息处理器的进化是飞速的, 这种进化又体现在微电子器件和计算机系统参与控制过程。一个在硬件电路上基本相同的系统, 由于计算机的加入, 其性能上的差别会很悬殊, 所以一个性能良好的电系统必然是由计算机来实施信息处理的。不过系统在硬件电路上的区别主要体现在传感器的配置上, 其他方面则大同小异。

电工学的课程设置目的是让学生了解组建一个电系统的技术要点和技术难点, 而课程中如果把软件知识也列入必修内容的话, 则电工学课程任务将太重了。

由于组建一个电系统的硬件电路(包括计算机及 PLD 的硬件电路)类同, 只要实际掌握一个电系统的组建全过程, 就能满足课程设置的要求。

第二节 分析电路的基本理论

针对一门知识, 人们的认识过程往往是: 先熟悉理论的内容, 再深入研究这个理论的应用。学习这一章的要求是: ①掌握分析和认识电路的基本概念和基本方法; ②学会建立和运用理论的科学思维方法并为开拓创新打下基础。

分析就是将一个“整体”拆开后, 突出每个“小块”的主要特点, 然后将它们之间的相互联系找出来的过程。

电路简单说就是电流流通的道路。电路有时又称网络, 这是因复杂电路像一张网而得名。组成电路的目的: 一是为实现电能的传输和转换, 供电系统就是应用这部分特性的; 另一个则是为了进行信号的传递和处理, 所有的控制系统都是应用这一特性。显然前者对应的是高电压、大功率, 后者相反。人们习惯称前者是强电电路, 后者为弱电电路, 本书主要研究弱电电路。

基本理论是探索某类事物一般规律的理论, 它总是避开事物的具体形式, 用抽象的手法去突出存在于各事物中的主要特点, 来寻找出适合于该类事物各种形态的共性规律(例如欧姆定律和电磁感应定律就是从具体实验中得出, 尔后反过来又将它用于分析具体电路和具体现象的, 所以说实践能创造未来)。基本理论能用于各种形式的电路分析中, 这就是为什么要学习本章内容的原因。我们将从建立理论的高度去引入基本理论。

一、电路的基本概念

知道了电路的定义和两大用途后, 我们要把存在于各个具体电路中的主要特点抽象出来, 才能进一步寻找共性规律。

1. 电路的组成和电路状态

(1) 电路的组成 一般来说一个电路总是由一些电气元件和设备组成的。比方说: 输变电线路、收音机、手电筒和计算机控制的自控系统都是电路, 要将这些差异很大的不同电路的主要特点抽象出来的话, 只能把电路看成由负载、中间环节、电源三部分组成。

电源是为电路提供电能的部分，例如：发电机、电池、信号源等。所以一般情况下电源是由将非电能量转换为电能的元件和设备来承担，但信号源除外。

负载是电路中用电的元件和设备，例如：电动机、灯泡、电炉等。所以一般情况下将负载理解为把电能转化为非电能的元件或部件。

中间环节是连接电源和负载的“中间者”，例如导线就是最简单的中间环节。显然“中间环节”这个概念含义很广，它可能是一个大型系统，也可以是一个复杂的电路。例如：从发电厂到每一个用电单位这中间所涉及的输电线和设备均可视为中间环节。从自控系统电源到执行元件也可称为中间环节。虽然中间环节如此复杂，但在仅研究电路中能量的变化时，仍然可以把它看成是一根简单的导线，当然到了研究信号传递、转换和处理时，复杂的中间环节就不能简单看成是一根导线了。在一个复杂系统中将中间环节分开切成许多小块后，每一小块的能量变化仍然可以用“电源、中间环节、负载”这一模式来描述。

若把推动电路工作的物理量称为激励，把因激励产生的物理量叫响应的的话。电源中的电压和电流就是激励，由此而产生的电路中其他部分的电压和电流就是响应。从这个角度看，电路分析实质上就是在电路中寻找激励与响应之间的关系了。用负载、中间环节和电源来抽象电路的组成，问题变得简单化了。

(2) 电路所处的各种状态 一个电路对电源而言，可能出现的状态只能是三种：通、断、短路。显然在断、短路状态下，电路无法正常工作，处于通路状态下电路才正常工作。不过断路、短路这两种状态可视为通路工作时的两个极限，了解它的三种状态对我们进一步认识电路是有好处的。

通路就是电路处于工作状态，这时电源输出电能、负载消耗电能，中间环节有电能通过。因为通路状态负载在消耗电能所以这种状态又称有载状态。

在这种状态下，电源可能出现三种情况：满载、过载、欠载。满载又可称为满负荷运行或额定状态；过载又叫过负荷或超载运行；欠载又称欠负荷或轻载。关于它们的真实含义将在研究完断路和短路状态之后再谈。

断路（又称开路）是指电源没有输出电能时的状态，它相当于在电路中断开了电源与负载的联系，而断开的办法有两种：一种是打开电路中的开关；另一种则是让负载吸收的电能近似为零（相当于将负载电阻变成无限大）。显然后一种又可视为“轻载”的一个极限值。

短路是让电源输出电能大大超过它的允许值。这时如果把负载看成是一个电阻的话，则相当于在电源输出端接上一根电阻近似为零的导线（这时负载也不消耗电能），假如电源是一恒定不变的电压源（例如电池），短接后的电流将会烧毁电源（或电路中的熔丝）。从上面的讨论中我们知道，负载的电阻值减少后，吸收电源输出的电能会增多，相当于负载加大，这意味着过负荷是让电源承受更多的输出。也就是说短路可视为过载的极限，反过来看过载也可以看成是一种轻微的短路。

下面我们用中学时经常见到的一个电路来解释电路在三种状态下的物理实质。

一节电池上接一个电阻（可以是灯泡）加一个开关 S ，就组成了一个实际电路（例如手电筒电路）。 R 代表灯泡电阻（负载）， E 代表电池开路电压（电源电动势）， R_0 是电池在通电时对电流的阻碍，它代表电池内部消耗量的折换值（称内阻）。 S 合上时，电路中有电流 I 通过， S 打开时 $I=0$ 。

我们假定 U_0 是电源内阻上的压降（在电源中通过的电流始终和外电路中的总电流相等，

故它可代表内部耗能), U 是加在负载 R 上的路端电压。在引入 R 和 R_0 后, 电路变成由线性元件组成的串联电路, 这时可以用欧姆定律来描写它们的变化规律。假定 R_0 恒定不变, R 变化的结果导致 I 的反变化。根据欧姆定律知: $U=IR$, $U_0=IR_0$, 当 R 也不变时, 对应的曲线是图 1-9b 中 $U=E-IR$ 。 R 与 R_0 的比值决定了 a 点的位置, a 点对应的 I 值是电路中通过的电流值。 R 变小, 则 R_0 与 R 的比值变大, c 点代表了这种变化。在 U_0 变成 U' 后, 电池内部耗能加大, 在 $R=R_0$ 时 (例如图中的 d 点示) 相当于内部与外部消耗相等。当 $R=0$ 时, b 点代表了电能全部消耗在电池内部, 显然它的内部发热量足以损坏电池 (可以拿一节干电池做实验)。

在 a 点、 c 点时, 电路处于通路状态 (仅 a 点的状态是合理的)。开路时 $U_0=0$, $U=E-0=E$, 所以我们通常说: 开路时路端电压等于电源电动势就是这个道理。但短路时 $U=0$, 公式变为 $E-0=U_0$ 。故电能全部消耗在内部。

作为一个电压源, 要求 R_0 相对 R 值来说很小 (即 a 点状态), 这时负载接上前后 $U \approx E$ 基本不变。一旦过载时 (例如 c 点), U 值将明显下降, 电源发热量 (U_0) 加大, 对整个电路都不利。所以电器一般都标注一个额定值, 这个量可以理解为保证电源元件在允许的发热量范围内去满足负载的最大要求的量值。从上面的讨论中可以看出电源不是在什么情况下都能向电路供给能量的。电路中, 电源内部消耗越少对外部电路的贡献就越大。可以看出, 断路、短路状态仅对应外特性曲线 (即输出的电流与端电压之间的关系曲线) 上的一个点, 但通路状态却对应的是一条斜线, 线是由许多点组成的, 不同的点对应的电流、电压值不同。

2. 电路元件和电路模型

(1) 电路元件 电路元件可以分为两大类 (有源和无源), 三种模式 (有源、无源、受控源)。所谓“源”是指能否提供电能而言的。显然电压源和电流源元件是有源元件, 而电阻、电感、电容是无源元件, 但是受控源 (例如后面要学到的晶体管、场效应管等) 在单独存在时, 它是一个无源元件, 接入电路中工作时, 它也能向电路提供随控制信号变化的电能量, 所以称受控源, 不过它的电能是由其他电源提供的。从工作特性来说它可划入有源元件中, 实际上它具有电源和负载两种性质, 应介于有源和无源元件之间成为第三种模式。

1) 有源元件实际上有两种形式即电压源和电流源。发电机、蓄电池和某些电信号 (例如天线接收到的电信号) 都属于实际存在的电压源。我们从图 1-9b 中可以看出: 任何实际电源都是有内部消耗的, 为了表示这个特性我们引入了 R_0 这个内阻来表征它。我们希望的电源是内部消耗与向外供能的量相比较可以小到忽略不计的程度, 对于电压源来说, 就是要求串联在电动势上的 $R_0 \approx 0$ 。这时分压值 U_0 可以忽略不计。当然对于实际电流源来说, 则要求并联在电激流 I_s 上的 $R_0 \approx \infty$ 。分流值 I_0 也可忽略。

由于电压源可以向电路提供恒定不变的电压, 而电流源则可向电路供给恒定的电流, 故形象地定名为电压源、电流源。

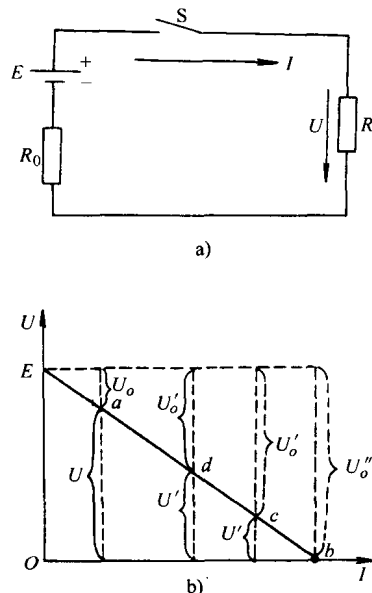


图 1-9 电路状态示例图

a) 电路图 b) 外特性曲线

电压源用符号 $\text{---} \bigcirc \text{---}$ 或 $\text{---} | \text{---}$ 表示。但电流源的符号只有一种表示法即 $\text{---} \bigcirc \text{---}$ 。在以后见到的图中大写字母 U 、 I 表示直流，小写字母 u 、 i 表示交流。

既然实际电压源和电流源在正常工作时，内部消耗可以忽略不计，在进行理论探讨时经常是抓住主要矛盾去探求一般规律。所以就抽象出了理想电压源和理想电流源两种既接近实际又脱离实际的元件。

理想电压源具有两个特性：①端电压 U 是恒定值（或 $U(t)$ 是一确定的时间函数），其输出值与电流的大小无关；②它的输出电流随外部电路而变化。这是假定在 $R_0=0$ 时电压源内部无损耗，所以才具有以上两个特性。

请大家注意：由于这两个特性的存在，决定了凡是与理想电压源并联的电路（包括理想电流源在内）或元件，其上的电压必然是 U ，不变，没有内部消耗的电压源就是理想电压源。理想电压源的表示方法就是去掉 R_0 的实际电压源符号。

理想电流源同理抽掉 R_0 （即让 $R_0=\infty$ ，则该支路断开）的电流源就是理想电流源。它也与理想电压源一样具有两个特性（将上面特性中的电压换成电流即可）。而且凡是与理想电流源串联（包括理想电压源在内）的元件，通过的电流必然是 I 。在实际电源中如果内部消耗的能量可以忽略不计时（实际中存在这种电源），就是一个理想电源。

这时电源的外特性曲线因为 R_0 不存在，故为平行于 I 轴（电压源）和平行于 U 轴（电流源）的两条直线。从这两条直线上，你们也可以形象地看出上面所说的两个特性。

记住，抽象的实质是略去 R_0 的作用，带来的变化是人为强加给它的。既然是理想的（即合理的假设）就是硬性规定的。

2) **无源元件**是不能向电路提供电能的元件，如电阻、电容、电感等。无源元件又可分为两类：能贮存电能的和只消耗电能的两种。

电阻元件是只能消耗电能的元件，直到普通物理中我们所接触到的电阻仍然是理想状态下的电阻。生活中见到的电阻元件是由碳、金属丝、电解液等材料制成的实际电阻。因为 $R = \rho \frac{L}{S}$ 式中电阻率 ρ 是随温度变化的，所以在长度 L ，截面积 s 不变时， R 值也是会随温度而变化的。为了获得精密电阻，常用温度系数很小的康铜、锰铜、镍及铬铁合金来制作电阻元件，在 R 被视为不变值时有： $u=Ri$ 或 $U=RI$ 成立。因为两平行导体间就有电容，由金属丝绕制成的电阻上也有电感，所以任何一个实际电阻元件都不是一个只具有电阻性能的元件。不过电阻元件上出现的电容、电感性质，在通常状态下可以忽略不计，于是就抽象出了理想电阻元件。就像忽略 R_0 的作用去抽象出理想电压源和理想电流源一样，理想电阻元件有以下特性：a) 电阻元件是一消耗电能的元件，在它上面产生的功率是 $p=ui=Ri^2=u^2/R$ 。它将电能转换成热能后消耗掉，不会逆转。b) 欧姆定律在它上面成立，即有 $u=Ri$ ，因为 R 是常数，所以电阻上的 u 与 i 是同时出现又同时消失的，没有时间的超前与滞后，在数学上称为电压和电流在电阻上有线性关系。所谓线性关系就是指：比例性（又称齐次性）和可加性而言的。

电容元件是存储电能的元件，理想电容元件是仅有电容特性的元件，假如在电容极板上存储的电荷量是 q ，则有 $q=Cu$ ，式中 C 是电容值， u 是极板两端的电压。这叫 q 与 u 成线性关系。

理想电容元件的特性是：a) q 与 u 成线性关系； C 值与 q 和 u 无关，是一常数；b) 当电容两极板上加有电压时在它的一个极板上会出现正电荷积聚，而另一板上的正电荷将被等量

排除掉, 剩下了相应量的负电荷, 于是在两极板间形成电场将电能存储起来, 它本身不消耗电能。我们把两极板间的和极板边缘上的漏电流忽略不计, 则理想电容元件就是一个以电场形式存储电能的元件。实际电容是有微弱的漏电流存在的, 这种能直接穿过两极板的电流相当于有一个很大的电阻附加在电容上, 所以实际电容还是会消耗一部分电能的。

电感元件是以磁场形式储存电能的元件, 关于电感线圈的性质是知道的, 线圈本身由导线制成, 导线是有电阻的, 两平行线圈之间相当于一个电容, 所以任何一个实际电感都附加有电阻和电容的性质, 不过电阻和电容所占的比例相当小而已。如果绕制的线圈是十分均匀的, 且无铁心存在, 则有 $N\phi = Li$ 关系存在, 式中 ϕ 是每匝线圈的磁通量, N 是匝数, L 是线圈自感量, i 是通过该线圈的电流。令 $\Psi = N\phi$, 则有 $\Psi = Li$, 这时 Ψ 与 i 是线性关系, 而 L 是一与 Ψ 、 i 无关的常数。

我们知道通有电流的导线周围有伴生磁场存在, 故一螺线管中通有电流 i 时, 必然存在磁场, 证实的方法是: 该磁场会阻碍线圈中电流的变化。由此可见在理想电感元件和电容元件上的电流、电压的建立过程是有差异的, 而能量是用电流、电压的积来表征, 这就是能量存储要对应一个过程的原因。这一特性是电容、电感与电阻元件的质的区别所在。

表示电阻、电容、电感的符号已经学过了。因为它们是无源元件, 所以在电路中多以负载的身份出现, 这时加在元件两端上的电压和流过元件上的电流方向相同, 都是由“+”指向“-”。这三种理想元件都属于线性元件因 $u = Ri$, $q = Cu$, $\Psi = Li$ 。注意, 表示电阻 R 上的 u 与 i 成正比, 电容 C 上是 q 与 u 成正比, 电感 L 上是 Ψ 与 i 成正比。不要误认为线性元件上都是 u 与 i 成正比, 否则到交流电的学习中就会出现概念性的错误。

上面所涉及的物理量的单位也学过了, 不再赘述, 但是注意: 现在国家规定不准用重叠词头, 例如“毫微伏”, “微微法”等, 应改成“纳伏”, “皮法”以便与国际标准接轨。

3) **受控源元件**, 例如晶体管、场效应晶体管、电子管等, 均属于这类元件, 在整个电路中如果没有独立电源元件存在时, 它们仅仅是一个无源元件, 但是在有电压源和电流源为它们提供能量时, 它们又可以按照控制量的大小为后面电路提供不同类型的电能。虽然在电路分析时, 含有这种元件的电路也叫有源网络, 实际上它们有双重身份。

受控源元件可受电压或电流控制, 它为负载提供能量的形式也有恒压和恒流两种, 故能组合成四种形式: 电压控制的电压源 (VCVS); 电压控制的电流源 (VCCS); 电流控制的电压源 (CCVS); 电流控制的电流源 (CCCS)。为了区别起见, 受控源的表示符号和独立电源的不同, 它用棱形替代圆圈, 四种电路图见图 1-10。

图中 $\mu = U_2/U_1$; $g = I_2/U_1$; $\beta = I_2/I_1$; $r = U_2/I_1$ 所以 g 与 r 是有量纲的, μ 与 β 是无量纲的。

(2) **电路模型** 基本理论是寻求一般规律的, 而我们所遇到的电路都是具有不同特性的真实电路。我们不能用任何一个实际电路去探讨存在于各种电路中的共同特性 (规律)。在前面我们已经把实际元件理想化了, 能否也将实际电路理想化呢? 这就是电路模型提出的原因。

在前面学习中已经知道: 研究电路实际上就是在讨论“激励”与“响应”之间的关系。那么, 激励、响应两者之间的关系又具体指什么呢? 从能量角度看就是指电流、电压、电荷、磁通等物理量之间的变化关系。显然经过抽象后的电路模型必需能反映出存在于任何一个实际电路中的这一物理过程。

我们把完全用理想化元件组成的电路图叫理想电路模型 (简称电路模型)。显然这个“模

型”必需具有两大特点：①因为任何元件只具有一种主要特性，故在电路模型中所反映出的电现象都可以用数学方式来精确地描述它；②在一个具体的实际电路中所发生过的实际物理现象都可以由各种模型来综合描述。也就是说：我们对各种电路模型的深入研究就是在探讨各种实际电路的基本规律。

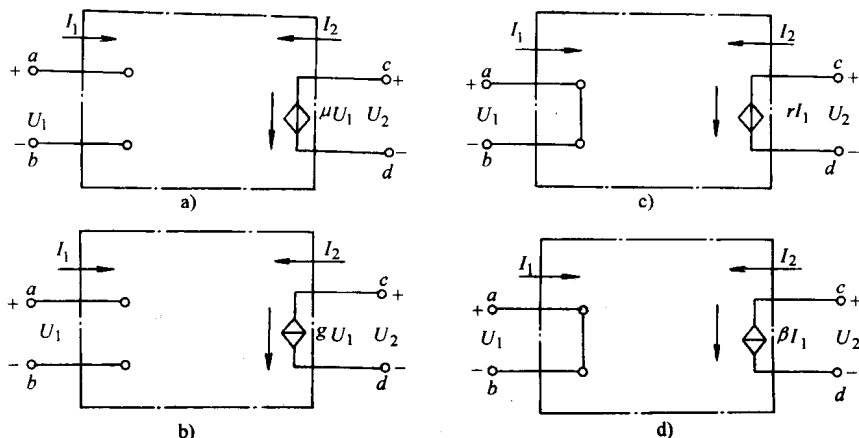


图 1-10 四种理想受控源电路图

a) VCVS 图 b) VCCS 图 c) CCVS 图 d) CCCS 图

注意：在中学及大学物理以及在我们这本书中所见到的电路图都是电路模型，而不是真实电路。工作中所遇到的图纸中标出的元、器、部件也都是理想化了的，可以说我们日常见到的电路图基本上都是些电路模型。

为了扩大知识面，我们还要指出：电路模型不是只有一种，在我们常见的模型中理想化的元件，是忽略了在通常情况下不起作用的参数，而突出了其主要特征。但是这些被忽略的因素在外部条件变化后，可能由次要因素上升到主要因素，这时这种“忽略”就是不符合实际的。我们把次要因素可以忽略的元件叫“集总参数元件”（简称集总元件）。在集总元件中的共同特点是（即集总的定义）：“在元件中所发生的电磁过程都集中在元件内部进行”。把这句话说具体些说就是：“任何时刻从元件一端流入的电流，将恒等于从元件另一端流出的电流；而且元件两端的电压值是完全确定的”。更通俗一些说就是：“要求加在元件上的电磁波波长要远远大于实际元件的尺寸”。这就是说上面所说的电路模型仅实用于中、低频电路，在高频和超高频电路中将用“分布电路模型”来抽象。

从上面的论述中我们看到：“集总”是抽象化的科学词汇。从定义上看它简洁、明了地指出物理过程仅在内部消化掉而不涉及外部这一特征，故具有一般性；第二种说法用电流、电压来描写这一概念时具有十分形象，容易理解的优点，但会产生认识的片面性，思路也会受到局限；用通俗的说法即中、低频特点（即波长）来点穿它的物理实质，优点是具体、好记。缺点是可能忘却了主题——在电路中出现的电磁现象是否会涉及其他。所以说：只有三种方式都懂的人，才能深刻理解“集总”的含义，死记硬背名词和概念的人是永远走不出书本的。不从基本概念出发，全用通俗语言来讲课是不行的。

3. 常见电路物理量及其参考方向

在电路中常见的物理量是：电流、电压、电位、电动势、电功率等，今天再来讨论这些物理量时，将涉及过去不被重视的也是今后要特别注意的内容。

电位（又称电势）在电路中参考点确定后，它是一种由位置确定的势能，这种能量有明