



高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

电气控制技术

■ 史军刚 白小平 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

电气控制技术

史军刚 白小平 编著

西安电子科技大学出版社

2006

内 容 简 介

本书介绍了工业控制中的电气控制部件和执行器件以及控制电路的工作原理及应用。通过学习本书,使读者能了解和掌握常用的电气控制技术,为今后在实际工程设计中打下较好的基础。

全书内容包括:常用控制器件,控制电机,电机的微机控制,模拟量控制电路和可编程序控制器。每一章都附有习题与思考题。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化等专业的教材或教学参考书,也可供测控领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气控制技术/史军刚,白小平编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2006.10

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

ISBN 7-5606-1718-2

I. 电… II. ①史…②白… III. 电气控制—高等学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 107168 号

策 划 臧延新 云立实

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 14.25

字 数 335千字

印 数 1~4000册

定 价 18.00元

ISBN 7-5606-1718-2/TM·0033

XDUP 2010001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本书是根据测控技术与仪器专业新的教学计划而编写的,是测控技术与仪器专业的一门专业课教材。

本书取材适当,概念清晰,深入浅出,层次分明。全书共分四章。第1章常用控制器件,介绍常用无触点开关、继电器、电力电子器件、固态继电器的原理及其使用方法。第2章控制电机,主要介绍步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机、小功率同步电动机、测速发电机、自整角机的工作原理及在控制系统中的应用。第3章模拟量控制电路,介绍导电角控制、脉宽调制(PWM)控制电路及变频控制电路等。第4章可编程序控制器,介绍 PLC 的基本组成与工作过程、PLC 的软件设计方法以及 PLC 在实际工程中的应用。

本书的特色是强调基本原理和分析方法,突出重点,注重理论联系实际。书中介绍的电路模块,只注重它们的外部特性和应用,而不强调其内部电路的分析和计算。本课程的先修课程是模拟电路、数字电路、微机原理与应用、单片机原理与系统设计,为了避免与先修课的重复,有些电路虽然也是测控系统常用的,但由于先修课程已讲过,因此,在本书中就被删略了。

全书计划学时为 46 学时,删去部分章节后也适用于 30 学时教学。本书可作为测控技术与仪器、自动化、机械设计制造及其自动化等专业的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

本书由史军刚和白小平主编。在编写过程中,西安电子科技大学机电工程学院测控系主任赵建教授给予了作者很大的帮助;西安电子科技大学出版社的领导和编辑部臧延新副主任为本书的出版工作付出了辛勤的劳动;徐世伟、尹倩等同学在绘图方面做了不少工作。对于这一切,作者向他们表示最衷心的感谢。

作者对学习、编写过程中参考过的文献资料的作者深表感谢。

由于编者的业务水平有限,书中定有不妥和错误之处,恳请广大读者和使用本书的师生不吝指正。

编者

2006 年 6 月

欢迎选购西安电子科技大学出版社教材类图书

~~~~~国家级、部级重点教材~~~~~

计算机系统结构(第四版)(统编)	25.00
离散数学(第三版)(统编)(乔维声)	16.00
雷达对抗原理(统编)	15.00
雷达原理(第三版)	23.00
通信网的安全——理论与技术	42.00
模拟电子线路基础(傅丰林)	16.00
移动通信(第三版)(统编)(郭梯云)	26.00
智能控制理论和方法	18.00

~~~全国信息技术水平考试指定教材~~~

计算机网络信息安全理论与实践教程	32.00
网页设计与网站开发基础教程	54.00
中小校园网络管理基础教程	19.00
中小校园网络管理实验教程	25.00

~~~~~计算机提高普及类~~~~~

计算机应用基础(第三版)(丁爱萍)	19.00
计算机组装与维护(高职)(杜飞明)	22.00
计算机组装与维护实用教程(第二版)(高职)	29.00
计算机应用基础(Windows 2000 &Office 2002)(教育部高职)	23.00
《计算机应用基础》实践技能训练 与案例分析(教育部高职)	11.00
计算机综合能力实训教程(高职)	10.00
办公自动化技术及应用教程	22.00
办公自动化设备的使用和维护 (第二版)(高职)	18.00
网络办公自动化技术及应用(高职)	21.00

~~~~~计算机网络类~~~~~

Internet基础与使用(第二版)(高职)	13.00
计算机网络安全(高职)	15.00
计算机网络管理	20.00
网络安全技术(高职)	17.00
网络安全与保密	24.00
网络信息安全技术	17.00

网络信息安全	11.00
网站建设与维护(崔良海)	18.00
网站建设与维护(廖常武)	19.00
Internet技术及其应用教程	15.00
Windows网络程序设计	26.00
嵌入式系统原理与开发	21.00
通信网理论与技术	25.00
计算机图形图像与网页制作(高职)	19.00
互联网实用技术与网页制作(高职)	14.00
局域网组建、管理与维护(高职)	20.00
综合布线技术(高职)	18.00
计算机网络技术导论	16.00
计算机网络(第二版)(袁家政)	26.00
计算机网络技术(刘敏涵)	20.00
计算机网络(第二版)(蔡皖东)	18.00
计算机网络(第二版)(雷振甲)	21.00
计算机网络工程	20.00
计算机网络实验教程	14.00
计算机组网实验教程	23.00
计算机网络学习辅导及习题详解	23.00
网络工程设计与实践	29.00
网络应用程序设计	21.00
现代网络技术	24.00
网络计算	19.00

~~~~~计算机技术类~~~~~

计算机系统结构(陈智勇)	22.00
计算机系统设计——概念与技术(洪龙)	18.00
计算机组成原理 与系统结构实验教程(杨小龙)	12.00
计算机系统安全	22.00
实用计算机类毕业设计指导	18.00
计算机原理课程设计	10.00
电子政务理论与实务	20.00
电子商务概论(李晓燕)	17.00
电子商务概论(宋沛军)	20.00

电子商务基础与应用(第四版)(含盘)	34.00
电子商务基础与实务(第二版)(高职)	16.00
数据结构(C)(第二版)(杨秀金)	20.00
《数据结构》算法实现及解析 ——配合严蔚敏的《数据结构》(C语言版) (含光盘)(第二版)	35.00
数据结构——使用C++语言(第二版)	23.00
数据结构(高职)(周岳山)	15.00
计算方法与实习(高职)	11.00
算法设计与分析	15.00
编译原理教程(第二版)	18.00
《编译原理教程(第二版)》 习题解析与上机指导	18.00
离散数学(蔡英)	21.00
《离散数学》学习指导书	16.00
离散数学(马光思)	22.00
离散数学——精讲·精解·精练	24.00
软件工程(第二版)	22.00
软件工程与数据库概论	14.00
信息系统分析与设计(卫红春)	19.00
信息系统分析与设计(高职)(卫红春)	18.00
信息系统分析与设计(第二版)(陈圣国)	14.00
人工智能技术导论(第二版)	18.00
~~~~~计算机辅助技术类~~~~~	
电子工程制图(含习题集)(高职)	25.00
工程制图(含习题集)(高职)	22.00
机械制图与计算机绘图(含习题集)(高职)	24.00
计算机绘图(第二版)	25.00
DSP应用技术(高职)	25.00
现代DSP技术	22.00
电子电路CAD程序及其应用(高职)	16.00
电子线路CAD实用教程(第二版)	22.00
电子工艺与电子CAD(高职)	14.00
电子电路EDA技术	15.00
EDA技术及应用(第二版)	24.00
EDA技术综合应用实例与分析	22.00
EDA技术与数字系统设计(高职)	14.00
数字电路EDA设计(高职)	19.00

## ~~~~~操作系统类~~~~~

计算机操作系统(第二版)(颜彬)(高职)	17.00
计算机操作系统(修订版)(汤)	24.00
《计算机操作系统》学习指导与题解	16.00
计算机操作系统(王津)	16.00
计算机操作系统(孙雅如)	15.00
计算机操作系统(方敏)	28.00
计算机操作实训教程(张晓云)(高职)	18.00
操作系统教程——Linux实例分析(孟)	21.00
Linux操作系统实用教程(高职)	20.00
Linux实训指导教程(高职)	13.00

## ~~~~~图形处理类~~~~~

多媒体技术及应用(王坤)	21.00
多媒体软件设计技术(第二版)	20.00
多媒体技术与应用(第二版)(傅献祯)	16.00
多媒体技术教程(杨安琪)	20.00
计算机图形学(张义宽)	20.00
计算机图形学(丁爱玲)	14.00
计算机图形学(研究生系列)(璩柏青)	26.00
计算机图形学——图形的计算与显示原理	22.00
数字图像处理	20.00
3DS MAX 6.0实用教程(高职)	23.00

## ~~~~~微机与控制类~~~~~

微型计算机原理与应用(第二版)(本科)	33.00
《微型原理及应用》(第二版)学习指导	18.00
微型计算机原理(第四版)	29.00
《微型计算机原理》(第四版)学习指导书	14.00
《微型计算机原理》学习与实验指导	18.00
微型计算机原理及接口技术(新世纪)	25.00
80X86微机原理与接口技术	26.00
单片机原理及接口技术(喻宗泉)	15.00
单片机应用实训教程(高职)	22.00
单片机原理与应用技术	19.00
新编单片机原理与应用(第二版)	22.00
可编程序控制器原理及应用(第二版)	22.00
计算机控制技术(高职)(温希东)	12.00
计算机外部设备(第二版)	17.00

微机外围设备的使用与维护(高职)	19.00	模拟电子技术(第二版)(江晓安)	18.00
微机结构组成与外部设备(第二版)(高职)	17.00	《模拟电子技术》学习指导与题解	12.00
~~~~~数据库及计算机语言类~~~~~			
数据库原理(第二版)(郭盈发)	16.00	模拟电子技术实验(高职)	9.00
数据库原理(高荣芳)	18.00	模拟电子技术实训(高职)	9.00
Visual FoxPro 6.0数据库原理与应用(高职)	21.00	《模拟电子技术(修订版)》	
基于VFP和SQL的数据库技术及应用	16.00	目标测试及习题全解	11.00
SQL Server 2000应用基础与实训教程(高职)	19.00	《电路分析(修订版)》	
Oracle数据库SQL和PL/SQL实例教程(高职)	17.00	学习指导及习题全解(高职)	19.00
数据库技术及应用(高职)	14.00	电子产品工艺实训(高职)	15.00
网络数据库技术及应用(高职)	20.00	电子工艺实训教程	19.00
C++程序设计语言	20.00	电工技能实训基础(高职)	14.00
《C++程序设计语言》经典题解与实验指导	13.00	电工中级技能实训(高职)	15.00
新编C语言程序设计教程(第二版)	22.00	流行PLC实用程序及设计	32.00
《新编C语言程序设计教程(第二版)》		多媒体通信技术(王汝言)	23.00
习题解答与实验指导	15.00	现代通信系统	24.00
C++Builder 6.0程序设计(高职)	19.00	现代通信系统导论(高职)	18.00
Visual Basic程序设计(第二版)	20.00	通信电路(沈伟慈)	18.00
Visual Basic.NET程序设计教程(高职)	18.00	通信电源(高职)	14.00
汇编语言程序设计(第二版)(韩海)	18.00	通信系统(修订版)(王秉钧)	22.00
汇编语言程序设计(李强)	23.00	现代通信网概论	25.00
汇编语言程序设计(李革新)	19.00	现代通信理论与技术导论	25.00
微型计算机汇编语言程序设计(龚)	23.00	现代通信技术与网络应用	23.00
面向对象程序设计与VC++实践	22.00	现代通信新技术	20.00
面向对象程序设计与C++语言(第二版)	18.00	数字移动通信技术	15.00
面向对象程序设计教程	19.00	通信工程专业英语	12.00
面向对象程序设计——JAVA(第二版)	32.00	微波技术与天线	17.00
跨平台程序设计语言——JAVA	24.00	微波技术及应用	20.00
JAVA语言程序设计教程	18.00	电磁波——传输·辐射·传播	26.00
JAVA程序设计(高职)	18.00	锁相技术	14.80
~~~~~电子技术类~~~~~			
测试与计量技术基础	19.00	计算机通信网(沈金龙)	24.00
测试技术基础	15.00	计算机通信网(修订版)(刘后铭)	18.00
现代测控技术	20.00	计算机数据通信教程(张燕)	15.00
传感器原理及工程应用(第二版)	20.00	纠错码——原理与方法(王新梅)	35.00
模拟电子技术(第二版)(教育部高职)	17.00	编码理论	19.00
模拟电子电路基础(王卫东)	23.00	现代交换技术	20.00
		程控交换技术实用教程(李正吉)(高职)	11.00
		程控数字交换原理学习指导与习题解析	12.00
		数字视觉视频技术(研究生)	26.00

数据融合理论与应用 (第二版)	20.00	机械加工技术 (高职) (魏康民)	24.00
自动控制原理 (赵四化)	16.00	计算机辅助机械设计 (秦汝明)	19.00
自动控制原理 (薛安克)	19.00	数控机床原理与编程 (高职) (陈富安)	20.00
《自动控制原理》学习指导与题解 (方斌)	22.00	数控加工与编程 (高职)	19.00
自动控制原理及其应用 (高职)	15.00	数控加工工艺 (高职) (赵长旭)	22.00
智能化仪器原理及应用 (曹建平)	16.00	数控编程与操作 (高职) (秦启书)	16.00
楼宇自动化 (高职)	14.00	数控技术及应用 (高职) (马一民)	17.00
电梯原理及逻辑排故 (高职)	22.00	数控机床故障分析与维修 (高职) (潘海丽)	19.00
~~~~~家用电器与机电类~~~~~		数控机床电气控制 (高职) (姚勇刚)	21.00
电视原理与系统 (赵坚勇)	16.00	机电一体化技术 (高职)	17.00
电视原理与电视机检修 (高职)	16.00	机床电器 PLC (高职) (李伟)	14.00
数字电视技术	20.00	机床电气与 PLC (高职)	16.00
电器原理与技术 (裴昌幸)	24.00	电机及拖动基础 (高职) (孟宪芳)	17.00
调音技术 (高职)	16.00	电机拖动与控制 (高职) (刘保录)	25.00
音响技术	13.00	电机与电气控制 (高职) (冉文)	23.00
现代音响与调音技术	19.00	电切削加工技术 (高职) (詹华西)	13.00
电气控制与 PLC 原理及应用 (常文平)	17.00	金属切削与机床 (高职) (聂建武)	22.00
工程力学 (皮智谋) (高职)	12.00	模具制造技术 (高职) (刘航)	22.00
工程力学 (史艺农) (高职)	23.00	液压与气动技术 (朱梅)	19.00
工程材料与热加工技术 (高职) (程晓宇)	20.00	特种加工技术 (周旭光)	10.00
机械工程基础 (李茹) (高职)	26.00	汽车电工电子技术 (高职) (袁建华)	20.00
机械设计基础 (赵冬梅) (高职)	21.00	工业机器人技术 (高职) (郭洪红)	16.00
机械设计基础 (张京辉) (高职)	24.00	互换性与技术测量 (高职) (杨好学)	16.00
机械设计基础 (郭红星) (高职)	20.00	车工基本技能训练 (高职) (武建荣)	6.00
机械基础 (周家泽)	17.00	钳工基本技能训练 (高职) (彭彦)	5.00
机械 CAD/CAM 技术 (方新)	20.00	焊接基本技能训练 (高职) (王红英)	6.00
机械制图 (刘家平) (高职)	32.00	建筑管道工基本技能训练 (高职) (陈斐明)	8.00
机械制造工艺装备 (高职) (吴秀佳)	19.00	铣工基本技能训练 (高职) (韩振武)	4.00
机械制造技术 (高职) (邵堃)	24.00	高等教育管理导论 (研究生)	36.00

欢迎来函索取本社最新书目和教材介绍, 欢迎投稿!

从邮局或银行汇款邮购者, 汇款单上务必写清收书人姓名、地址、邮编、电话。款到后我社将挂号发书, 加收5元包装邮寄费 (一次购书30元以上者可免收邮费)。

通信地址: 西安市太白南路2号 西安电子科技大学出版社发行部 邮 编: 710071

电 话: (029) 88201467

传 真: (029) 88213675

主 页: <http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

目 录

第 1 章 常用控制器件	1
1.1 常用无触点开关	1
1.1.1 晶体管的开关特性	1
1.1.2 晶体管无触点开关	3
1.1.3 接近开关	4
1.1.4 双稳态触发器	5
1.2 继电器	6
1.2.1 电流继电器和电压继电器	6
1.2.2 速度继电器	7
1.2.3 热继电器	8
1.2.4 中间继电器和时间继电器	9
1.2.5 干簧继电器	11
1.3 电力电子器件	12
1.3.1 普通晶闸管	12
1.3.2 双向晶闸管	19
1.3.3 单结晶体管	20
1.3.4 电力晶体管 GTR	25
1.3.5 电力场效应晶体管	28
1.3.6 可关断晶闸管 GTO	32
1.3.7 绝缘栅双极晶体管 IGBT	33
1.3.8 集成门极换流晶闸管 IGCT	35
1.4 电力电子器件的驱动及接口技术	37
1.4.1 电力电子器件驱动电路概述	37
1.4.2 晶闸管驱动及接口技术	38
1.4.3 电力 MOSFET 的接口技术	39
1.4.4 IGBT 的驱动	40
1.4.5 IGCT 的驱动	43
1.5 固态继电器	45
1.5.1 固态继电器的原理和结构	45
1.5.2 固态继电器的应用	49
习题与思考题	51
第 2 章 控制电机	52
2.1 步进电动机	52
2.1.1 步进电动机的工作原理	52

2.1.2 步进电动机的结构和分类	56
2.1.3 步进电动机的运行性能	57
2.1.4 步进电动机的微机控制	60
2.2 直流伺服电动机	75
2.2.1 工作原理	75
2.2.2 主要特性	77
2.2.3 工作状态	82
2.3 直流伺服电动机的控制	82
2.3.1 小功率直流电动机调速原理	82
2.3.2 主要接口电路	83
2.3.3 脉宽调制(PWM)方法	86
2.4 交流伺服电动机	89
2.4.1 交流伺服电动机的结构	90
2.4.2 交流伺服电动机的工作原理	91
2.4.3 交流伺服电动机的特性	92
2.4.4 交流伺服电动机和步进电动机的性能比较	93
2.5 小功率同步电动机	94
2.5.1 永磁式同步电动机	95
2.5.2 反应式电磁减速同步电动机	97
2.6 测速发电机	98
2.6.1 直流测速发电机	98
2.6.2 交流异步测速发电机	100
2.7 自整角机	102
2.7.1 控制式自整角机	102
2.7.2 力矩式自整角机	104
习题与思考题	105
第3章 模拟量控制电路	106
3.1 导电角控制	106
3.1.1 可控整流电路	106
3.1.2 有源逆变的基本工作原理	120
3.1.3 无源逆变电路	121
3.2 脉宽调制(PWM)控制电路	135
3.2.1 脉宽调制控制电路的基本原理	135
3.2.2 常用触发脉宽调制方法	141
3.3 变频控制电路	143
3.3.1 变频调速的原理与分类	143
3.3.2 变频调速的控制方式	143
3.3.3 交—交变频器	144
3.3.4 交—直—交变频器	145
3.3.5 变频器的发展趋势	149
习题与思考题	151

第 4 章 可编程序控制器 152

4.1 概述 152

4.1.1 可编程序控制器的定义 152

4.1.2 可编程序控制器的发展过程 152

4.1.3 可编程序控制器的特点 153

4.1.4 可编程序控制器的分类 154

4.1.5 可编程序控制器的应用 155

4.1.6 常见的可编程序控制器 155

4.1.7 可编程序控制器的发展趋势 156

4.2 PLC 的基本组成与工作过程 157

4.2.1 PLC 的基本组成 157

4.2.2 可编程序控制器的工作过程 161

4.2.3 典型可编程序控制器的特性 163

4.3 PLC 的软件设计方法 166

4.3.1 PLC 常见编程语言简介 167

4.3.2 F 系列 PLC 编程元件的编号和功能 168

4.3.3 F 系列 PLC 指令系统及编程方法 173

4.4 PLC 编程技巧及应用实例 184

4.4.1 编程技巧 184

4.4.2 编程举例 187

4.5 F1 系列可编程序控制器的介绍 189

4.5.1 F1 系列 PLC 的结构功能与元件编号 190

4.5.2 F1 系列 PLC 指令系统及编程方法 193

4.5.3 F1 系列 PLC 的功能指令介绍 201

4.5.4 F1 系列 PLC 的模拟量控制 206

4.6 FX2 系列 PLC 简介 208

4.6.1 概述 208

4.6.2 FX2 系列 PLC 的性能指标 209

4.6.3 FX2 系列 PLC 的指令系统简介 210

4.7 PLC 应用系统设计实例 214

4.7.1 PLC 控制系统设计的基本原则 214

4.7.2 交通信号灯控制系统设计实例 215

习题与思考题 218

参考文献 220

第1章 常用控制器件

随着我国现代化建设的飞速发展和科学技术的不断进步,自动控制系统在现代化建设中起着越来越重要的作用。控制理论研究的深入和计算机技术的迅速发展,使一些控制系统已实现了数字化、智能化、计算机化和集成化,从而使自动控制系统功能更强,性能更优,体积更小,运行更可靠。但是任何一种自动控制系统,都离不开大量的检测、转换、放大、执行元件。这些元件统称为自动控制元件。它们的工作原理可以是基于物质的各种物理、化学性能,如光特性、电特性、磁特性、机械特性等等,但无论哪种控制器件,它们中的大多数最终都是直接利用电能来进行工作的。随着新材料、新技术、新工艺的出现以及控制系统的发展,控制器件得到了越来越迅速的发展。

1.1 常用无触点开关

刀开关、按钮开关是开关,继电器、接触器等电器实际上也是一种开关,它可按照生产过程的要求控制它们接通或断开,以达到自动控制和自动保护的目的。这一类带触点开关电器的优点是动作可靠,机械强度好,开关特性稳定。但是,它们也存在很多缺点,比如动作速度慢,消耗功率大,灵敏度较低,体积大和机械部分容易磨损等。

晶体管不仅有放大功能,也具有开关特性,可以利用晶体管做成无触点开关。无触点开关有许多突出的优点:动作速度快,消耗功率低,灵敏度高,体积小,重量轻,以及没有机械磨损等。

在晶体管开关电路中,传递的控制信号都是电信号。开关电路所研究的问题,主要是用什么方法和电路来产生、变换、传递、放大和测量各种信号。因此开关电路又叫脉冲电路,它广泛应用于生产过程的自动控制和遥测遥控等。

1.1.1 晶体管的开关特性

二极管具有单向导电性,即当二极管加正向电压时,二极管导通;加反向电压时,二极管截止,所以二极管是一种无触点开关。

三极管有三种工作状态:饱和、截止和放大。三极管应用于脉冲电路时,若三极管在饱和状态下工作,管压降很小,相当于开关接通;若三极管处于截止状态时,电源电压基本上降到集电极之间,阻抗很高,相当于开关断开。三极管开关由通到断(或由断到通)的转换异常迅速,因此利用三极管作开关可以获得边沿很陡直的脉冲信号。

光电二极管、光电三极管是利用半导体材料的电学特性,即受光照射后发生变化的原理,利用光电效应制成的。

光敏二极管的结构与一般二极管相似，装在透明玻璃外壳中，如图 1.1(a)所示，它的 PN 结装在管顶，可直接接受光照射。光敏二极管在电路中一般处于反向工作状态，如图 1.1(b)所示。

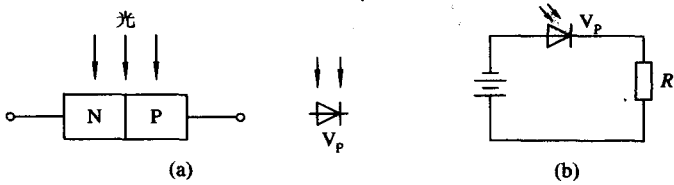


图 1.1 光敏二极管简化模型和基本电路
(a) 结构简化模型；(b) 基本电路

光敏二极管工作时通常处于反向偏压状态，当无光照射时，二极管截止，电路仅有 PN 结的反向漏电流，常称为暗电流；有光入射时，PN 结附近受光子冲击，吸收光子的能量产生电子—空穴对，使载流子能量增加，形成光电流。它的导电能力完全取决于光照，如果入射光照变化，发光的电子—空穴对的浓度也会相应地变化，通过外电路的电流也随之变化，光敏二极管此时将光信号转换为电信号输出。

光敏三极管的内部结构与普通三极管接近，也分成三个区，即发射区、基区和集电区。发射区和集电区均有电极引出，一般基区不引线。图 1.2 所示为 NPN 型三极管的结构简化模型和基本电路。当基极开路时，集电结反偏，而光照射到集电结附近的基区时，在 PN 结附近产生电子—空穴对，它们在内电场作用下定向运动，形成光电流。一般光敏三极管具有比光敏二极管更高的灵敏度，但光敏三极管的暗电流也较大。

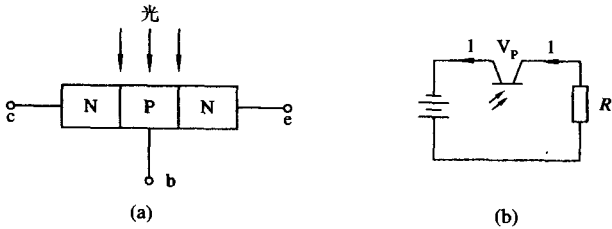


图 1.2 NPN 型光敏三极管简化模型和基本电路
(a) 结构简化模型；(b) 基本电路

光敏二极管和三极管的基本特性很多，如光照特性、伏安特性、温度特性等，这里仅介绍其光照特性。图 1.3 为硅光敏管的光照特性曲线。从图中可以看出，光敏二极管的光

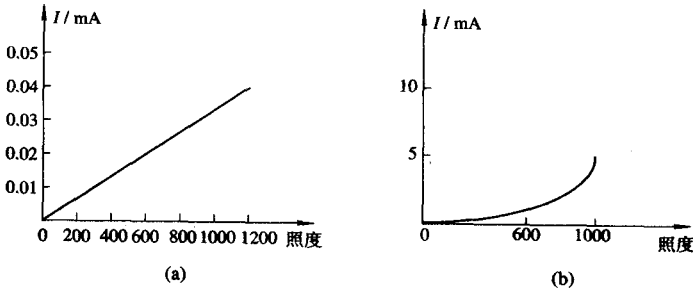


图 1.3 硅光敏管的光照曲线特性
(a) 硅光敏二极管；(b) 硅光敏三极管

照特性曲线线性比较好,三极管在照度较小时,光电流随照度增加较小,在大电流(光照度为几千勒克斯)时出现饱和现象(图中未画出),因为三极管的电流放大倍数在小电流和大电流时都要下降。

光敏二极管、光敏三极管主要用于光电检测和光电控制方面。

1.1.2 晶体管无触点开关

晶体管反相器是一种很简单的无触点开关。图 1.4 是晶体管反相器的工作原理图,图 1.4(a)是基本电路,图 1.4(b)是输入、输出波形。

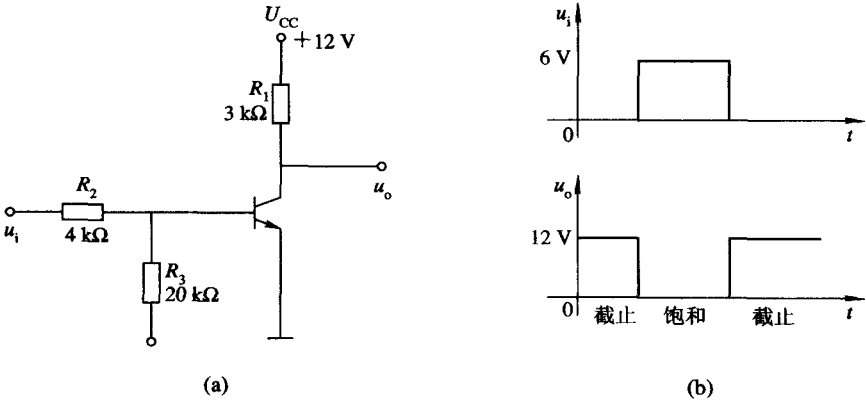


图 1.4 晶体管反相器的工作原理

当无输入信号时,晶体管截止,输出端截止,输出端电位接近 U_{CC} ,这时相当于开关断开的情况。当输入端加上信号(例如 $+6\text{V}$)时,晶体管处于饱和状态,输出端电位近似为零,电源电压几乎全部加在 R_1 上。这时相当于开关接通的情况。

由此可见,晶体管输入状态和输出状态刚好相反:输入为高电位时,输出为低电位;输入为低电位时,输出为高电位;因此可称之为反相器。又因为它相当于一个没有机械触点的开关,所以属于无触点开关。

图 1.4(a)中的 R_1 是集电极负载电阻,若直接以继电器代替,就构成了晶体管继电器,如图 1.5 所示。图中 S 表示传递信号源,如光敏元件、热敏元件等。依据信号源的不同,可以做成各种性能的继电器,如光电继电器、时间继电器、温度继电器等。当 S 闭合时,通过 R_b 供给晶体管 V 足够的电流使其饱和导通,继电器 KA 动作。若信号源接点 S 断开, V 截止,则 KA 释放。二极管 V_D 的作用是,当晶体管截止时,为继电器 KA 绕组中的感应电流提供一条回路,避免绕组上产生过大的感应电势。 V_{D1} 的作用也是防止晶体管截止时,基极—发射极承受过大的反向电压而损坏。

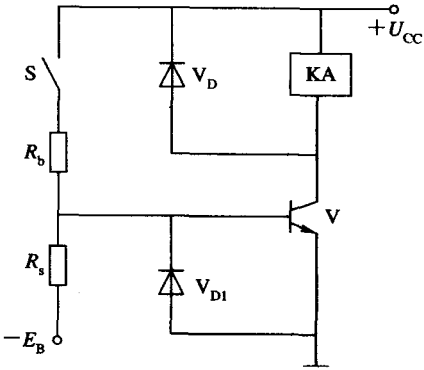


图 1.5 晶体管继电器原理图

简单的光电继电器如图 1.6 所示。图中所示电路用光电三极管接收光信号。当无光照或光照很微弱时，光电管 V_P 只有暗电流存在，管阻很大，使晶体管 V 的基极电流和集电极电流均很小，继电器得不到足够的驱动电流。一旦光照出现，光电流使 V_P 管阻变得很小， V 的基极电流明显增大，使继电器动作。由此可见，继电器的动作完全由光信号控制，因此称为光电继电器。

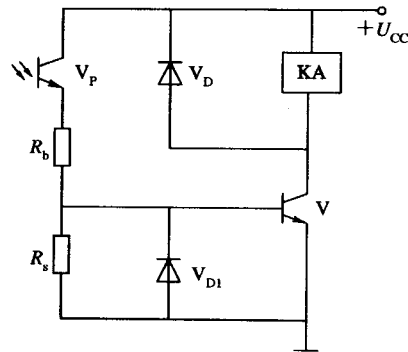


图 1.6 光电继电器

1.1.3 接近开关

现在应用较多的接近开关是以晶体管振荡器为核心组成的无触点开关。这种开关是当磁铁靠近它的晶体管振荡器的空间磁场时，在磁铁体内部产生涡流，消耗振荡能量，使振荡减弱，直至最后停止振荡；而当磁铁体离开后，晶体管振荡器重新恢复振荡，即由振荡器是否振荡来反映磁铁挡块是否接近感应头。接近开关具有反应迅速、定位精确、寿命长以及没有机械碰撞等优点，目前已被广泛应用于行程控制、定位控制以及各种保护控制等方面。

图 1.7 是某种接近开关的电路，它由 LC 振荡电路、开关电路及射极输出器三部分组成。由 V_1 组成振荡器，其中 L_2 、 C_2 组成选频电路， L_1 是反馈线圈， L_3 是输出线圈，这三个线圈绕在同一磁芯上，如图 1.7(b) 所示。

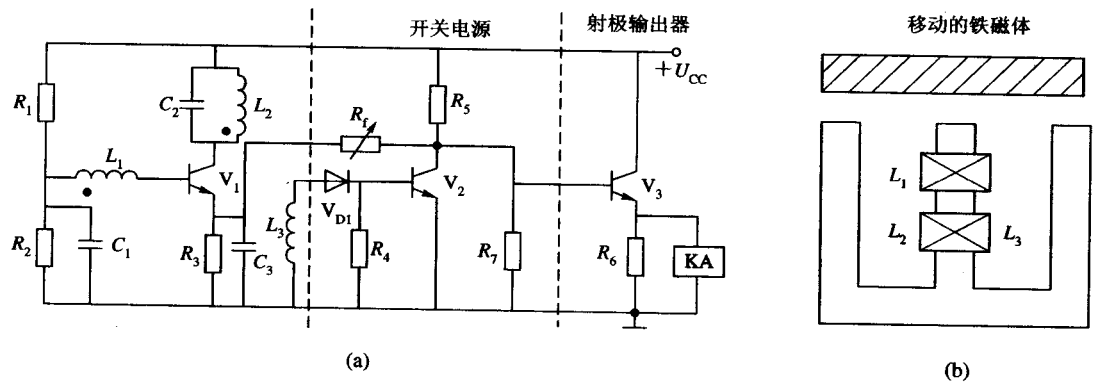


图 1.7 晶体管接近开关
(a) 电路图；(b) 感应头图示符号

当磁铁体没有靠近开关的感应头时, 振荡电路维持振荡, L_3 上有交流输出, 经二极管 V_{D1} 整流后使 V_2 获得足够偏流而工作于饱和和导通状态, 此时 $U_{ce2} \approx 0$, V_3 截止, 射极输出器无输出, 接在输出端的继电器 KA 不通电。

当磁铁体接近感应头时, 磁铁体感应产生涡流, 由于涡流的去磁作用, 削弱了 L_1 与 L_2 之间的耦合, 使得反馈量不足以维持振荡, 因而振荡器被迫停振, L_3 上无交流输出, V_2 截止, 若 $R_7 \gg R_5$, 此时 $U_{ce} \approx U_{CC}$, 射极输出器输出也接近 U_{CC} , 使继电器 KA 通电动作。图 1.7(b) 是接近开关感应头的图示符号。

V_3 采用射极输出, 是为了提高带负载能力。 R_1 为正反馈电阻, 当电路停振时, 通过它把 V_2 的集电极电压反馈一部分到 V_1 的发射极, 使发射极电位提高, 以保证振荡电路迅速而可靠地停振; 而当电路起振时, $U_{ce} \approx 0$, 无反馈电压, 使得振荡电路迅速恢复振荡, 这样开关的动作会更为迅速和准确。

1.1.4 双稳态触发器

晶体管反相器虽然有开关特性, 但是在它的翻转过程中(由截止到饱和或由饱和到截止), 存在一个过渡性质的放大状态, 这时无法确定它是处于“开”还是“关”的状态。这里我们介绍一种可以有效减小中间状态的集—射耦合双稳态触发器。

把两个反相器电路交叉耦合起来, 加上公用的发射极电阻, 便可构成一个触发器, 如图 1.8 所示。图中晶体管 V_1 的集电极输出电压通过电阻 R_2 耦合到晶体管 V_2 的基极, 同样 V_2 的集电极输出电压通过电阻 R_2 耦合到晶体管 V_1 的基极, 所以这是一个集—基耦合的反馈电路。由于电路对称, 人们可能认为两个晶体管工作状态相同, 其实由于交叉耦合正反馈的结果, 电路会产生不平衡, 会使电路突变到一个管子饱和, 另一个管子截止。假定电源刚加上时, V_2 比 V_1 导通强一点, 则会由于 U_{c2} 低一些, U_{b1} 也低一些, 从而使 V_1 趋向截止。 V_1 趋向截止, V_2 进一步导通, 又会使 U_{c2} 进一步降低, U_{b1} 进一步降低, V_1 更加截止。这一过程一直到 V_2 饱和, V_1 截止时才结束, 这是电路的一个稳态。当然电路也可能进入另一个稳态, 即 V_1 饱和和导通, V_2 截止。

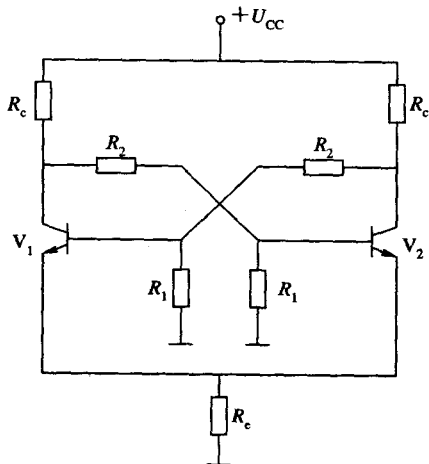


图 1.8 集—基耦合双稳态触发器

由于该电路构成交叉耦合的正反馈，因此这两种状态转换（即由饱和到截止，或由截止到饱和）的过程十分迅速，可视为“突变”，这样该电路更近似为无触点开关电路。

双稳态触发器状态的改变是通过触发电路来实现的，常用的触发方式有两类：一类称为置位复位方式，它可以使触发器预置，即置 0 或置 1，而不管触发器原来状态如何；另一类称为计数触发方式，每来一个输入信号，电路的状态就翻转一次，这类触发方式的电路如图 1.9 所示。采用计数输入触发时，只用一个触发信号（负脉冲）去控制触发器工作，当 V_1 截止时，负脉冲就自动加到 V_1 的发射极，使触发器翻转。而当 V_2 截止时，负脉冲将自动使 V_2 翻转。

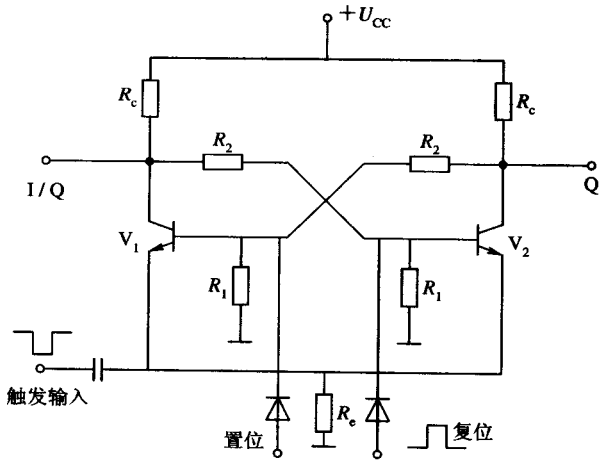


图 1.9 具有计数、置位、复位功能的触发器

置位和复位触发器的工作原理也是迫使截止管导通，但输入信号是分别加到相应三极管的基极上的。假定 $Q=0$ ，即 V_2 导通， V_1 截止。在置位端加一正脉冲，其幅度足够大，能克服 V_1 的反向偏置，则 V_1 导通， V_2 截止，使 $Q=1$ ；同理，在复位端加一正脉冲信号，可使 $Q=0$ 。

集—基耦合双稳态触发器电路形式有多种，其原理和功能类似，这里不再一一介绍。

1.2 继 电 器

继电器是控制和保护线路中应用广泛的一种自动控制电器。它被用来实现电路的自动接通、断开和信号转换、放大。其工作原理是根据电量或非电量（例如电流、电压、转速、时间、温度等）的变化，自动接通或者断开触点，来完成电路通、断功能的。自动控制系统对继电器的基本要求是：反应灵敏准确、工作可靠、性能稳定、结构简单、经久耐用、消耗功率小等。

常用的继电器可分为电流继电器、电压继电器、中间继电器、时间继电器、热继电器以及干簧继电器等。

1.2.1 电流继电器和电压继电器

电流继电器和电压继电器属于常用的电磁电器之一。其基本结构和工作原理如图 1.10