

高职高专机电及电气类“十二五”规划教材

电力电子技术

主 编 吕志香 李建荣
副主编 张 娟 徐 秋
主 审 倪永宏



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高职高专机电及电气类“十二五”规划教材

电力电子技术

主 编 吕志香 李建荣
副主编 张 娟 徐 秋
主 审 倪永宏

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书采用项目化设计,通过调光控制电路、三相直流电源控制电路、电风扇无级调速控制电路、开关电源控制电路和不间断电源(UPS)控制电路五个项目进行内容引入,分析了四种电力变换的电路结构、工作原理及相关电力参数的计算。

本书主要作为高职高专电气技术、机电一体化技术、自动化、应用电子技术等相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/吕志香,李建荣主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.1

高职高专机电及电气类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3909-3

I. ① 电… II. ① 吕… ② 李… III. ① 电力电子技术—高等职业教育—教材 IV. ① TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 007261 号

策 划 高 樱

责任编辑 许青青 牛秀月

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

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 10.375

字 数 243千字

印 数 1~3000册

定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-3909-3/TM

XDUP 4201001-1

*** 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

高职教育的培养目标是：培养适应生产、建设、管理和服务第一线需要的技术技能型人才。为了适应高职高专人才培养方案的需求，我们编写了本书。

“电力电子技术”是一门理论性、工程性与实践性都很强的课程，其基本概念多，并且有大量的波形需要分析和计算。本书围绕高等职业教育的办学宗旨，减少了以往教材中的理论和公式推导等内容，增加了直观的图形与波形分析内容，并充分运用 Matlab/Simulink 仿真软件对大部分变流电路进行了仿真实验，使得书中内容通俗易懂，增强了读者的感性认识。

本书绪论部分主要讲述电力电子技术的概念，电力电子技术与电子学、电力学和控制理论三门学科的关系，电力电子技术的发展史以及电力电子技术的典型应用；项目一“调光控制电路”主要讲述普通晶闸管与单结晶体管、单相整流电路、单结晶体管触发电路及调光电路的设计；项目二“三相直流电源控制电路”主要讲述三相可控整流电路、触发电路、晶闸管保护及三相桥式整流电路的设计与测试；项目三“电风扇无级调速控制电路”主要讲述双向晶闸管、交流开关电路、交流调压电路及电风扇无级调速电路的设计；项目四“开关电源控制电路”主要讲述开关电源常用元器件(GTR、MOSFET、IGBT)、DC/DC 变换电路及开关电源控制电路设计；项目五“不间断电源(UPS)控制电路”主要讲述门极可关断晶闸管(GTO)、有源逆变电路、无源逆变电路及不间断电源(UPS)的设计。

本书绪论、项目一、项目二由吕志香编写，项目三、项目四由李建荣编写，项目五由徐秋和张娟编写，全书由吕志香和李建荣统稿。扬州工业职业技术学院倪永宏主审了本书，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，且限于编者水平，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2015 年 9 月

目 录

绪论	1
项目一 调光控制电路	5
任务一 普通晶闸管与单结晶体管	5
任务二 单相整流电路	14
任务三 单结晶体管触发电路	29
任务四 调光电路的设计	35
习题	38
项目二 三相直流电源控制电路	40
任务一 三相可控整流电路	40
任务二 触发电路	57
任务三 晶闸管保护	65
任务四 三相桥式整流电路的设计与测试	68
习题	78
项目三 电风扇无级调速控制电路	79
任务一 双向晶闸管	79
任务二 交流开关电路	83
任务三 交流调压电路	85
任务四 电风扇无级调速电路的设计	94
习题	100
项目四 开关电源控制电路	101
任务一 开关电源常用元器件	101
任务二 DC/DC 变换电路	112
任务三 开关电源控制电路设计	124
习题	128
项目五 不间断电源(UPS)控制电路	129
任务一 门极可关断晶闸管(GTO)	129
任务二 有源逆变电路	134
任务三 无源逆变电路	142
任务四 不间断电源(UPS)的设计	154
习题	159
参考文献	160

绪 论

电力电子学(Power Electronics)这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。它是一门交叉于电气工程三大领域——电力学、电子学和控制理论之间的边缘学科技术。“电力电子学”和“电力电子技术”是分别从学术和工程技术两个不同的角度来称呼的,但是其实际内容并没有很大区别。电力电子技术简单地说是以电力为对象的电子技术,具体地说就是利用电力电子器件对电能实现变换和控制的技术,它能够实现对电压、电流、频率和相位等基本电参数的控制和处理,是现代电子学的一个重要分支,也是电工技术的分支之一。

通常所用的电力分为交流电力和直流电力两种。交流电力通常是从公用电网直接得到的电力,直流电力通常是从蓄电池和干电池得到的电力,从这些电源得到的电力往往不能满足实际需求,因此需要进行电力处理和变换。电力电子技术所变换的“电力”,功率可以大到数百兆瓦,也可以小到 1 瓦以下。

电力电子技术和信息电子技术是现代电子技术的两个分支。信息电子技术主要用于信息处理,其在处理信号的通信、信息测量和信息控制等领域取得了显著进展,也就是常说的模拟电子技术和数字电子技术;而电力电子技术则主要用于电力变换,是能源变换和控制的基础,也是弱电控制强电的桥梁,它拓宽了信息电子技术的应用领域,为现代通信、电子仪器、计算机、工业自动化、电网优化、电力工程、新能源、航天、核能超导、激光、海洋、生物等各种高新技术提供高性能、高精度、高效率的电控设备和电源设备,成为发展高新技术的基础和关键。

一、电力电子技术的主要组成部分

电力电子技术主要由电力电子器件、变流技术和控制技术三个部分组成。其中电力电子器件是电力电子技术的基础。如果没有晶闸管和电力晶体管等电力电子器件,也就没有电力电子技术。电力电子技术主要用于电力变换,因此可以认为变流技术是电力电子技术的核心和主体。电力电子器件制造技术的理论基础是半导体物理,而变流技术的理论基础是电路理论。电力电子变流技术是包括用电力电子器件构成的各种电力变换电路以及用这些电路构成电力电子装置和电力电子系统的技术。

电力电子技术对电力的变换通常有四大类:交流转变成直流(整流)、直流转变成交流(逆变)、直流转变成直流(斩波)、交流转变成交流(交流调压、变频、变相)。

二、电力电子技术与其他学科的关系

电力电子技术和电子学的关系是显而易见的。电子学可分为电子器件和电子电路两大分支,这两大分支分别与电力电子器件和电力电子电路相对应。电力电子器件制造技术和电子器件制造技术的理论基础是一样的,其大多数工艺也是相同的。特别是现代电力电子器件的制造大部分使用集成电路制造工艺,采用微电子制造技术,许多设备都和微电子器

件制造设备通用,这说明两者同根同源。电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一致的,只是两者的应用目的不同,前者用于电力变换和控制,后者用于信息处理。电子电路中的功率放大和功率输出部分也可算作电力电子电路。此外,电力电子电路广泛用于包括电视机、计算机在内的各种电子装置(其电源部分都是电力电子电路)中。在电子技术中,半导体器件既可处于放大状态,也可处于开关状态;而在电力电子技术中,为避免功率损耗过大,电力电子器件总是工作在开关状态,这是电力电子技术的一个重要特征。

电力电子技术广泛用于电气工程中,这就是电力电子学和电力学的主要关系。各种电力电子装置广泛应用于高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电解、励磁、电加热、高性能交直流电源等电力系统和电气工程中,因此,通常把电力电子技术归属于电气工程学科。电力电子技术是电气工程学科中一个最为活跃的分支。电力电子技术的不断进步给电气工程的现代化以巨大的推动力,也是保持电气工程活力的重要源泉。

控制理论广泛用于电力电子技术中,它使电力电子装置和系统的性能不断满足人们日益增长的各种需求。电力电子技术可以看成是弱电控制强电的技术,它是弱电和强电之间的接口,而控制理论则是实现这种接口的一条强有力的纽带。另外,控制理论和自动化技术密不可分,而电力电子装置则是自动化技术的基础部件和重要支撑。

随着科学技术的发展,电力电子技术又与电磁学、物理学、材料科学、电机工程、现代控制理论、仿真与计算、信号处理和计算机科学等许多学科密切相关。目前电力电子技术已逐步发展成为一门多学科相互渗透的综合性技术学科。

三、电力电子技术的发展简介

1. 史前期

1904年电子管的出现,开启了电子技术的先河。1947年美国贝尔实验室研制出的晶体管,引发了电子技术的革命。1957年美国通用公司研制出第一个晶闸管,标志着电力电子技术的诞生。在此之前的时期称为电力电子技术的史前期。

2. 整流器时代

20世纪60年代至70年代,大功率硅整流管和晶闸管以及晶闸管的一系列派生器件的开发,推动了电力变换在冶金、电化学和电力工业等行业中的运用和发展。

3. 逆变器时代

20世纪70年代后期至80年代,随着变频调速装置的普及,大功率逆变用晶闸管、巨型功率晶体管和门极可关断晶闸管等全控型器件成为当时电力电子器件的主角,取代了普通晶闸管,将电力电子技术推进到一个新的发展阶段。

4. 变频器时代

20世纪80年代后期,大规模和超大规模集成电路技术的迅猛发展,开辟了电力电子器件发展的智能化方向,为现代电力电子技术的发展奠定了基础。

四、电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。它不仅用于一般工业,也广泛用于交通运输、电

力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统、航空航天和现代军事系统,在照明、空调等家用电器和其他领域中也有着广泛的应用。以下分别对几个主要应用领域加以叙述。

1. 一般工业应用

直流电动机具有良好的调速性能,为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置。

电化学工业大量使用直流电源,如电解铝、电解食盐水等。电力电子技术还大量用于冶金工业中作为高频或中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等。电镀装置也需要整流电源。

近年来电力电子变频技术的迅速发展,使交流电机的调速性能可与直流电机的相媲美,交流调速技术大量应用并占据主导地位。电力电子技术还应用于几百瓦到数千千瓦的变频调速装置、软起动装置等。

2. 交通运输

电气化铁路中广泛采用电力电子技术,电气机车中的直流机车采用整流装置,交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆,在磁悬浮列车中,电力电子技术更是一项关键技术,除牵引电机传动外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。电动汽车的电机靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制,其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车中需要许多控制电机,它们也要靠变频器和斩波器驱动并控制。飞机和船舶需要很多不同要求的电源,因此交通运输也需要电力电子技术。

3. 电力系统

电力电子技术在电力系统有着非常广泛的应用。据估计,发达国家在用户最终使用的电能中有 60% 以上至少经过一次电力电子变流装置的处理。在电力系统的现代化进程中,电力电子技术是关键技术之一。毫不夸张地说,离开电力电子技术,电力系统的现代化是不可想象的。直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,其送电端的整流器和受电端的逆变器都采用晶闸管变流装置。近年发展起来的柔性交流输电也是依靠电力电子装置才得以实现的。无功补偿和谐波抑制对电力系统有重要的意义。晶闸管控制电抗器和晶闸管投切电容器都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器和有源电力滤波器新型电力电子装置具有更为优越的无功功率和谐波补偿的性能。在配电网系统,电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等,以进行电能质量控制,改善供电质量等。

4. 电子装置用电源

各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源以前使用晶闸管整流电源,现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源和微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在各种电子装置中,以前大量采用线性稳压电源供电,但由于高频开关电源体积小、重量轻、效率高,现在它已逐渐取代了线性稳压电源。因为各种信息技术装置都需要电力电子装置提供电源,所以可以说信息电子技术离不开电力电子技术。

5. 家用电器

变频空调是家用电器中应用电力电子技术的典型例子之一。电视机、音响设备和家用

计算机等电子设备的电源部分也都应用了电力电子技术。此外,电力电子技术还应用于洗衣机、电冰箱和微波炉等电器。

6. 其他

不间断电源(UPS)在现代社会中的作用越来越重要,用量也越来越大。目前,UPS 在电力电子产品中已占有相当大的份额。航天飞行器中的各种电子仪器需要电源,载人航天器中为了人的生存和工作,也离不开各种电源,而这些都必须采用电力电子技术。

总之,电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙和大自然的探索,到国民经济的各个领域,再到我们的衣食住行,到处都能感受到电力电子技术存在和巨大魅力。这也激发了一代又一代学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术,促使电力电子技术飞速发展。

项目一 调光控制电路

调光电路在日常生活中的应用非常广泛,种类也很多,常见的调光电路就是简易调光灯,通过旋转调光旋钮就可以调节灯泡的亮度,其本质是改变通过灯泡的电流大小来达到调节亮度的目的。

调光的方法有可变电阻调光法、调压器调光法、脉冲占空比调光法、晶闸管相控调光法和 PWM 调光法等。本项目主要介绍使用晶闸管相控调光法进行调光电路设计的方法。晶闸管相控调光通过控制晶闸管触发脉冲,改变晶闸管导通时间来改变电路的输出电压,使加在灯泡两端的电压发生改变,从而实现调光的目的。

任务一 普通晶闸管与单结晶体管

学习目标

- (1) 通过观察器件外形,能够区分普通晶闸管和单结晶体管,并熟悉器件管脚和型号。
- (2) 通过使用万用表进行管脚测试,能够判定器件端子名称和器件好坏,并熟悉器件工作原理。
- (3) 掌握器件基本参数,能根据实际需要进行器件选型。

一、任务分析

调光电路是一种简单的电力电子装置,控制电路中常用普通晶闸管、单结晶体管、二极管、电阻、电容等元器件,本项目的主要任务是了解普通晶闸管、单结晶体管的结构及工作原理,为设计调光电路打下基础。

二、相关知识

(一) 普通晶闸管

1. 结构和图形符号

普通晶闸管是一种功率四层半导体(P1N1P2N2)器件,由三个 PN 结 J1、J2、J3 组成,内部结构和等效电路如图 1-1 所示。普通晶闸管有三个电极,分别为阳极(A)、阴极(K)、门极(G)。目前普通晶闸管外形有塑封式、螺栓式、平板式和贴片式等,常见的外形图和电气符号如图 1-2 所示。

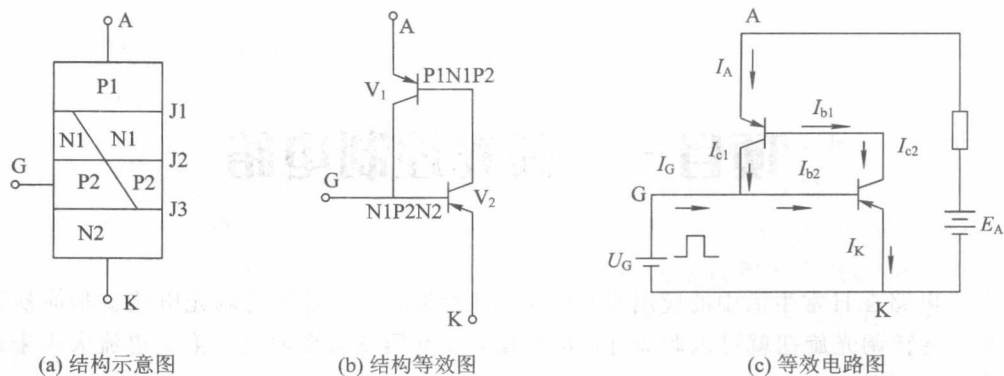


图 1-1 普通晶闸管内部结构示意图及等效电路

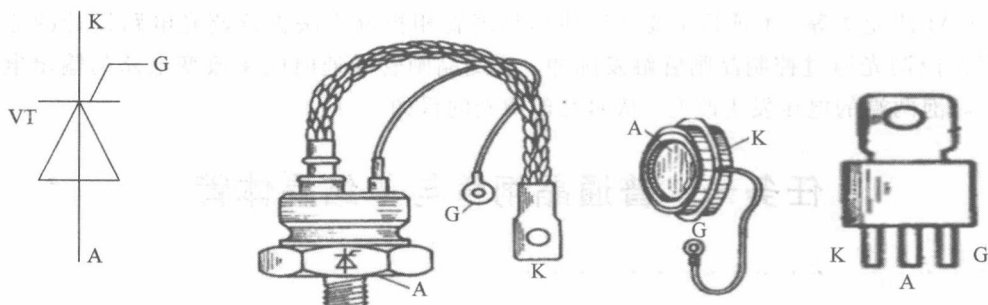


图 1-2 普通晶闸管电气符号及外形图

2. 工作原理

普通晶闸管与二极管具有相似特性——单向导电性，即电流只能从阳极流向阴极。但普通晶闸管具有正向阻断性，具体工作原理可以通过实验完成，实验电路如图 1-3 和图 1-4 所示。

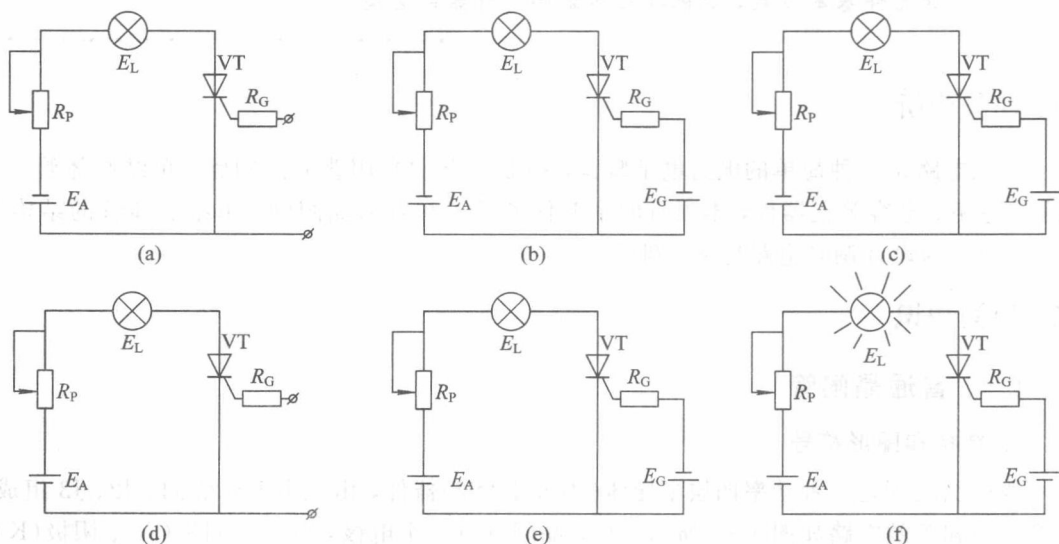


图 1-3 晶闸管导通实验

图 1-3(a)中, 阳极和阴极之间加反向电压, 门极和阴极之间不加电压, 指示灯不亮, 晶闸管截止。图 1-3(b)中, 阳极和阴极之间加反向电压, 门极和阴极之间加反向电压, 指示灯不亮, 晶闸管截止。图 1-3(c)中, 阳极和阴极之间加反向电压, 门极和阴极之间加正向电压, 指示灯不亮, 晶闸管截止。图 1-3(d)中, 阳极和阴极之间加正向电压, 门极和阴极之间不加电压, 指示灯不亮, 晶闸管截止。图 1-3(e)中, 阳极和阴极之间加正向电压, 门极和阴极之间加反向电压, 指示灯不亮, 晶闸管截止。图 1-3(f)中, 阳极和阴极之间加正向电压, 门极和阴极之间也加正向电压, 指示灯亮, 晶闸管导通。图 1-4(a)去掉触发电压, 指示灯亮, 晶闸管仍导通。图 1-4(b)门极和阴极之间加反向电压, 指示灯亮, 晶闸管仍导通。图 1-4(c)去掉触发电压, 将电位器阻值加大, 晶闸管阳极电流减小, 当电流减小到一定值时, 指示灯熄灭, 晶闸管关断。

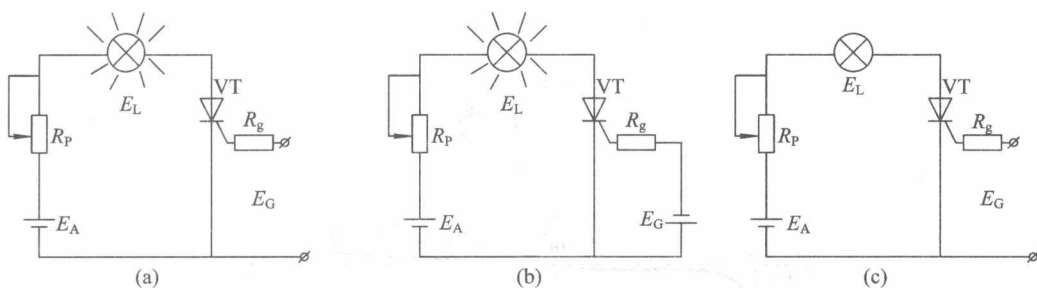


图 1-4 晶闸管关断实验

根据实验结果得出晶闸管导通条件有以下两个方面:

(1) 晶闸管阳极和阴极之间加上正向电压, 即 $U_{AK} > 0$ 。

(2) 必须在门极和阴极之间加上正向门极电压, 有了足够的门极电流流入后才能使晶闸管正向导通, 即 $U_{GK} > 0$ 。

将已经导通的晶闸管关断可以有以下方法:

(1) 可降低阳极的电源电压或增加阳极回路的电阻, 使流过晶闸管的阳极电流 I_A 减小, 当阳极电流 I_A 减小到一定数值以下时, 阳极电流 I_A 会突然降为 0, 之后即使再调高阳极电压或减小阳极回路电阻, 阳极电流 I_A 也不会增加, 说明晶闸管已经关断。

(2) 在阳极与阴极之间加反向电压, 流过晶闸管的电流为 0, 说明晶闸管已经反向截止。

3. 伏安特性

晶闸管的伏安特性是指晶闸管阳极和阴极之间电压与电流的关系, 也称为阳极伏安特性, 特性图如图 1-5 所示。

正向阳极伏安特性如图 1-5 第一象限, 当阳极电流 $I_G = 0$ 且晶闸管正向阳极电压未达到转折电压 U_{BO} 时, 晶闸管均处于正向阻断状态, 正向漏电流随阳极电压增大而增大, 当阳极电压 u_A 增大到转折电压时, 晶闸管就导通了。这种在自然特性下的导通称为“硬导通”, 是不可控的。多次“硬导通”会损坏晶闸管。正常导通应在门极和阴极之间加正向门极电压, 给门极输入足够的触发电流, 晶闸管就会正常导通, 转折电压明显减小。正常导通晶闸管的阳极伏安特性与二极管的正向伏安特性相似。

反向阳极伏安特性如图 1-5 第三象限, 与二极管的反向伏安特性相似。如果反向电压

增大到反向击穿电压 U_{RO} 时,晶闸管将永久性损坏,因此,晶闸管两端所能承受的最大峰值电压都要小于晶闸管的正反向击穿电压。

4. 主要参数

1) 额定电压 U_{TN}

根据图 1-5 所示的晶闸管阳极伏安特性规定,当门极断开,晶闸管处在额定结温时,允许重复加在晶闸管上的正向峰值电压为晶闸管的断态重复峰值电压,用 U_{DRM} 表示;允许重复加在晶闸管上的反向峰值电压为反向重复峰值电压,用 U_{RRM} 表示。将 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中的较小值按百位取整后作为该晶闸管的额定值。通常标准电压等级规定为:电压在 1000 V 以下,每 100 V 为一级,电压在 1000 V 以上,每 200 V 为一级。选择晶闸管的额定电压为晶闸管所能承受的最大电压,一般为实际工作时可承受的最大电压的 2~3 倍,即

$$U_{TN} = (2 \sim 3)U_{TM}$$

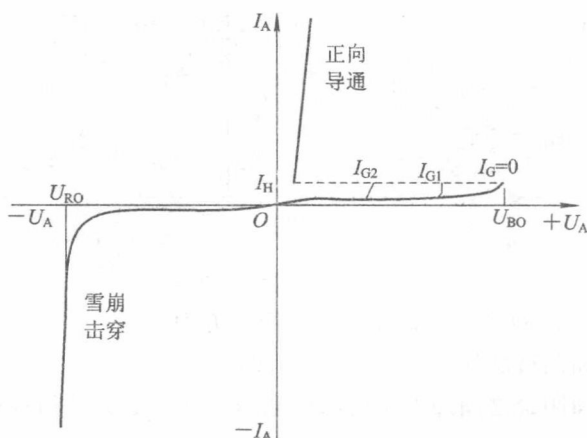


图 1-5 晶闸管阳极伏安特性

2) 额定电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度为 40°C 和规定的冷却条件下,元件在电阻性负载的单相工频正弦半波、导通角不小于 170° 的电路中,当结温不超过额定结温时,所允许的最大通态平均电流,即为额定电流 $I_{T(AV)}$ 。

以正弦半波为例,根据晶闸管额定电流 $I_{T(AV)}$ 的定义,设流过晶闸管的正弦半波电流的峰值为 I_m ,根据电流平均值(算术平均)和有效值(几何平均)的定义有

$$\text{电流平均值} \quad I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi}$$

$$\text{电流有效值} \quad I_{TN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2}$$

晶闸管电流波形系数 K_f 为电流波形的有效值与平均值之比,即

$$K_f = \frac{I_{TN}}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

这就说明当额定电流为 100 A 的普通晶闸管,它可以流过有效值为 $I_{TN} = K_f I_{T(AV)} = 1.57 \times 100 = 157$ A 的正弦半波电流,考虑到晶闸管的电流承载能力比较小,在选择晶闸管

时至少要考虑 1.5~2 倍的安全裕量，即

$$I_{TN} \geq (1.5 \sim 2) I_{TM}$$

所以晶闸管最大通态平均电流为 $I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) I_{TM} / 1.57$ ，式中 I_{TM} 为流过晶闸管电流的最大有效值。

3) 维持电流与掣住电流

维持电流：在室温下门极断开时，元件从较大的通态电流降至刚好能保持导通的最小阳极电流，用 I_H 表示。

掣住电流：在晶闸管加上触发电压，当元件从阻断状态刚转为导通状态就去除触发电压，此时能维持管子继续导通所需要的最小阳极电流，用 I_L 表示。

两者的关系为

$$I_L = (2 \sim 4) I_H$$

5. 型号

根据国家有关规定，晶闸管型号表示形式如图 1-6 所示。

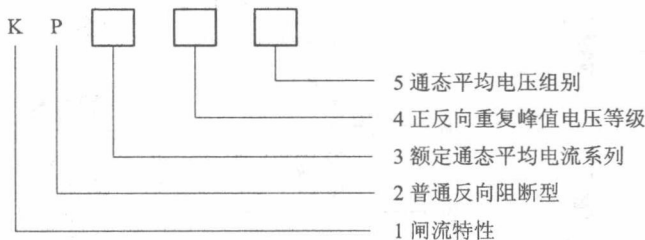


图 1-6 晶闸管型号图

国产晶闸管型号的具体含义如表 1-1 所示。

表 1-1 晶闸管型号含义表

序 号	含 义
1	K 表示闸流特性
2	用字母表示器件类型，P 表示普通反向阻断型，S 表示双向晶闸管，G 表示可关断晶闸管，K 表示快速开关型
3	用数字表示额定通态平均电流，一般情况下为 1 A、5 A、10 A、20 A、30 A、50 A、100 A、200 A、300 A、400 A、500 A、600 A、800 A、1000 A 等
4	用数字表示额定电压等级，1000 V 以下每 100 V 为一个等级（1、2、3、4、5、6、7、8、9），1000 V 以上每 200 V 为一个等级（10、12、14、16、18 等）
5	通态平均电压组别，额定电流 100 A 以下不标，100 A 以上有 9 个组别，用大写字母 A~I 表示 0.4~1.2 V 范围。每 0.1 V 为 1 级

例 1-1 晶闸管应用电路以 220 V 交流电压供电，要求流过晶闸管电流的有效值为 30 A，请问如何选择合适的晶闸管？

解 晶闸管额定电压选择：

$$U_{TN} = (2 \sim 3) U_{TM} = (2 \sim 3) \sqrt{2} \times 220 = 622 \sim 933 \text{ V}$$

取 800 V。

晶闸管额定电流选择:

$$I_{T(AV)} = \frac{(2 \sim 3) I_{TM}}{1.57} = \times \frac{(2 \sim 3) \times 30}{1.57} = 38 \sim 57 \text{ A}$$

取 50 A。

因此,按照晶闸管参数列表可选额定电压为 800 V,额定电流为 50 A 的晶闸管。

(二) 单结晶体管

1. 结构和图形符号

单结晶体管具有一个 PN 结的三端(一个发射极 E、两个基极 B_1 和 B_2)负阻抗器件,其内部结构示意图如图 1-7(a)所示。单结晶体管是在一个低掺杂浓度的 N 型硅片上利用扩散工艺形成一个高掺杂浓度 P 区,在 P 区与 N 区接触面形成 PN 结,就构成单结晶体管,其内部等效电路如图 1-7(b)所示。 B_1 和 B_2 之间的 N 型区域可以等效为一个纯电阻,即基区电阻,该电阻的阻值随着发射极电流的变化而改变。由于单结晶体管只有一个 PN 结,但有两个基极 B_1 和 B_2 ,故称为双基极二极管或单结管,其电路符号如图 1-7(c)所示。

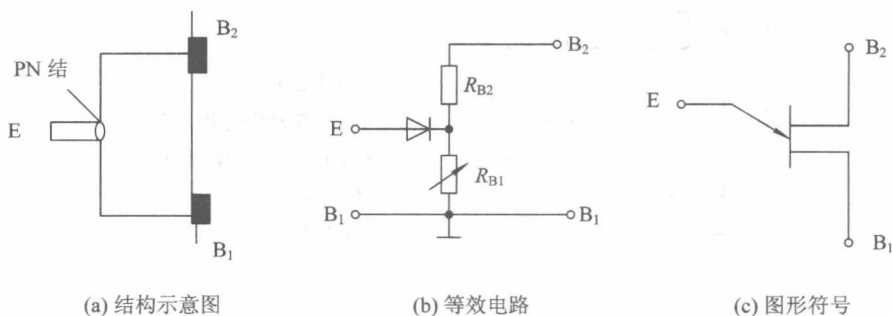


图 1-7 单结晶体管的结构图及电气符号

2. 伏安特性

当两基极 B_1 和 B_2 间加某一固定直流电压 U_{bb} 时,发射极电流 I_E 与发射极正向电压 U_E 之间的关系曲线称为单结晶体管的伏安特性,单结晶体管实验电路及伏安特性分别如图 1-8 和图 1-9 所示。

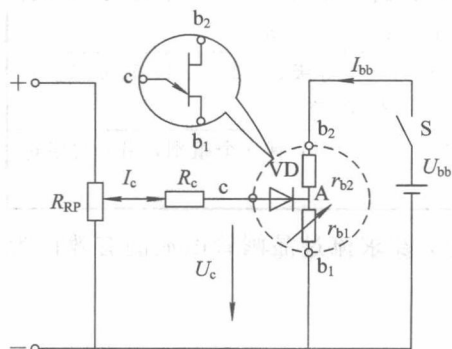


图 1-8 单结晶体管实验电路

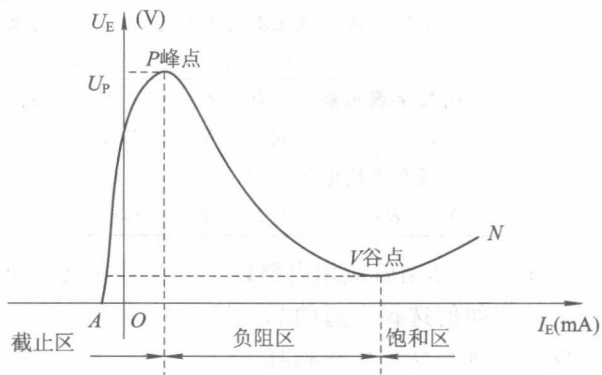


图 1-9 单结晶体管伏安特性图

1) 截止区——AP 段

当开关 S 闭合, 电压 U_{bb} 通过单结晶体管等效电路中的 r_{b1} 和 r_{b2} 分压, 得 A 点电位 U_A , 可表示为 $U_A = \frac{r_{b1}U_{bb}}{r_{b1} + r_{b2}} = \eta U_{bb}$, 其中 η 为分压比, 取值一般为 $0.3 \sim 0.9$ 。

当 U_E 从零开始逐渐增大, 但小于 U_A 时, 单结晶体管的 PN 结反向偏置, 只有很小的反向漏电流。当 U_E 等于 U_A 时, 发射极电流 I_E 等于 0, 即伏安特性中与纵轴的交点处。当 U_E 继续增大, PN 结开始正偏, 当 U_E 大于 U_A 的值达到 PN 结导通压降时, PN 结导通, 即等效二极管 VD 导通, 此时, U_E 到达峰值点 P 点, 单结晶体管由截止状态进入导通状态, 因此 P 点也称为单结晶体管电压转折点, 即伏安特性曲线中的最高点 P 处。

2) 负阻区——PV 段

当 U_E 大于 U_P 时, 发射极电流增大, 大量的空穴载流子从发射极端流入到 b_1 的硅片中, 使得基极电阻 r_{b1} 减小, 导致 U_A 电位下降, U_E 也跟着下降, 这时 PN 结承受更大的正偏电压, 使得 r_{b1} 进一步减小, 当发射极电流增大到一定的程度, b_1 的硅片的载流子浓度趋于饱和, 基极电阻 r_{b1} 减至最小, A 点电位 U_A 也最小, U_E 也最小, 如图 1-9 伏安特性曲线中的 V 点, 在此区域中, 电压 U_E 减小, 发射极电流 I_E 增大, 根据欧姆定律规律, 此区域称为伏安特性曲线的负阻区。

3) 饱和区——VN 段

当硅片中的载流子浓度达到饱和后, 若发射极电流 I_E 要继续增大, 则必须增大电压 U_E , 单结晶体管工作在饱和导通状态。

3. 单结晶体管主要参数

1) 基极间电阻 r_{bb}

当发射极开路时, 基极 b_1 、 b_2 之间的电阻, 一般为 $2 \sim 10$ 千欧, 其数值会随温度上升而增大。

2) 分压比 η

分压比是由单结晶体管内部结构决定的常数, 一般为 $0.3 \sim 0.9$ 。

3) 峰点电流 I_P

单结晶体管导通后, 发射极电压为峰点电压时的发射极电流为峰点电流 I_P 。

4) 谷点电压 U_V

单结晶体管导通后, 发射极电流增大, 基极电阻 r_{b1} 减小, U_A 电位下降, U_E 也跟着下降, 当发射极电流增大到一定的程度, b_1 的硅片的载流子浓度趋于饱和, 基极电阻 r_{b1} 减至最小, A 点电位 U_A 最小, U_E 也最小, 此时 U_E 就是谷点电压 U_V 。

5) 谷点电流 I_V

发射极电位 U_E 处于谷底时, 发射极上流过的电流 I_E 称为谷点电流 I_V 。

4. 型号

国产单结晶体管型号主要有 BT31、BT33 和 BT35 等。其中, B 表示半导体; T 为特种管; BT 表示特种晶体管; 3 表示电极数为 3 个; 最后一位表示单结晶体管耗散功率, 1 表示耗散功率为 100 mW , 3 表示耗散功率为 300 mW , 5 表示耗散功率为 500 mW 。

三、知识扩充

(一) 元件判别

1. 普通晶闸管的判别

1) 外形判别

普通晶闸管外形有塑封式、螺栓式、平板式和贴片式。螺栓式和平板式从外形上就可以判别,利用不同形状来判别 3 个电极。螺栓式晶闸管中螺栓为阳极 A,门极 G 比阴极 K 细。平板式晶闸管中间金属环为门极 G,靠近门极 G 的一面为阴极 K,另一面为阳极 A。至于塑封式和贴片式,判断时面对印了字的一面,引脚向下,从左至右依次为阴极 K、阳极 A 和门极 G。

2) 万用表判别

万用表选电阻 $R \times 1 \Omega$ 挡,用红、黑两根表笔分别测量任意两个引脚间正反向电阻,直至找出读数为数十欧姆的一对引脚,此时黑表笔所接引脚为门极 G,红表笔所接引脚为阴极 K,另一引脚为阳极 A。

3) 判别元器件好坏

利用万用表黑表笔接已判别出的阳极 A,红表笔仍接阴极 K。若万用表指针不动,再利用短线瞬间短接阳极 A 和门极 G,此时万用表电阻挡指针应向右偏转,阻值读数应为 10 欧姆左右。当阳极 A 接黑表笔,阴极 K 接红表笔时,若万用表指针发生偏转,则说明该普通晶闸管已击穿损坏。

2. 单晶体管的判别

1) 先判断单晶体管发射极 e

选择万用表电阻挡 $R \times 100$ 挡或 $R \times 1k$ 挡,黑表笔接假设的发射极,红表笔接另外两极,当出现两次低电阻时,黑表笔接的就是单晶体管的发射极。

2) 判断单晶体管第一基极 b_1 和第二基极 b_2

选择万用表电阻挡 $R \times 100$ 挡或 $R \times 1k$ 挡,用黑表笔接发射极 e,红表笔分别接另外两极,在两次测量中,电阻较大的一次,红表笔接的就是 b_1 极。上述判别 b_1 、 b_2 的方法对绝大部分的单晶体管都适用,但有个别管子的 e~ b_1 间的正向电阻值较小。

(二) 晶闸管仿真模型

1. Matlab 基础知识

Matlab/Simulink 作为面向系统框图的仿真平台,它可以调用模块代替程序的编写,以模块连成的框图表示系统,点击模块即可以输入模块参数,画完系统框图,设置好仿真参数,即可启动仿真。系统运行的状态和结果可以通过波形和曲线观察,这和实验室中用示波器观察的效果几乎一致。系统仿真的数据可以用以 .mat 为后缀的文件保存,并且可以用其他数据处理软件进行处理。

在 Matlab 的工具栏上点击图标 , 进入仿真界面,常用 Simulink、SimPowerSystems 模块库资源,其中 SimPowerSystems 包含电源模块库 (Electrical Sources)、电器元件模块库 (Elements)、电机模块库 (Machines)、电力电子元件模块库 (Power Electronics)、连接件模块