

电气传动自动控制 原理与设计

易继锴 江祥贤 编著
侯媛彬 杨玉珍

北京工业大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了电力电子技术、直流传动、随动系统和交流传动等领域的基本理论及工程实用的基本技术,包括电力电子器件的原理、特性参数、应用电路;单闭环和双闭环有环流、无环流直流调速系统原理及其工程设计;随动系统设计特点,检测元件,放大电路,数字正弦波 PWM 电路设计;交流串级调速,矢量变换变频调速,无换向器电动机调速;常规 PID 控制,滑模变结构控制,自适应鲁棒控制,模糊控制等设计技术。本书内容新颖,信息量大,着重工程概念的叙述,为读者提供了各种可供选择的设计方案和参考数据,给出了有关计算公式,涉及了正在发展中的各种实用方法,其内容既有先进性和系统性,又有很强的实用性。

本书可作为高等院校自动控制、电气自动化、仪表及过程控制、计算机应用等专业的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员阅读参考。

电气传动自动控制原理与设计

易继锴 江祥贤
侯媛彬 杨玉珍 编著

北京工业大学出版社出版发行

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

1997年10月第1版 1997年10月第1次印制

787mm×1092mm 16开本 31.5印张 776千字

ISBN 7-5639-0606-1/T·60

印数: 1~2500册

定价: 30.00元

前 言

随着电力电子器件、计算机技术和控制理论的迅速发展,电气自动化技术也在日新月异的变化,电气传动自动化技术已广泛应用于各个工程领域。目前,功率集成电路已将主电路器件、控制驱动、保护等汇集成一体,为电气传动自动控制系统机电一体化开辟了广阔的前景,数字PWM技术、微机控制及各种新型控制技术,如滑模变结构控制、自适应控制、鲁棒控制、模糊控制等,已日益渗入各类电气传动控制系统中。

根据电气自动化多学科交叉技术的发展,为了在教学上拓宽专业面,淡化专业界限,增强学生面向社会的适应性,特在原教学的基础上编写出版了本教材。

本书主要特点是:结构新颖,信息量大,内容深入浅出,理论联系实际,着重工程概念和基本原理叙述,提供了各种可供选择的设计方案和参考数据,给出了有关计算公式,涉及了正在发展中的各种实用方法,既有实用性,又具有先进性和系统性。本书还提供了大量数据和技术资料,既可作为高等学校自动控制、仪表及过程控制、电气自动化、计算机应用及相关专业的本科生或专科生的教材或教学参考书,也可作为从事电气自动化领域工作的工程技术人员的阅读参考书。

全书共分四篇十五章。第一篇介绍了晶闸管、电力晶体管、功率场效应管、绝缘栅双极晶体管等电力电子器件的原理、特性、参数,串并联应用;交流/直流、直流/交流、直流/直流等的各类电力电子变换电路。第二篇介绍了直流单闭环不可逆调速系统,转速、电流双闭环调速系统及其典型工程设计方法,可控环流、逻辑无环流、错位无环流等可逆调速系统,直流脉宽调制调速系统,直流调速系统的状态变量反馈控制、滑模变结构控制、自适应控制。第三篇介绍了随动系统的特点,位置检测和速度检测元件,PWM功率放大器,执行电机,系统的常规设计,复合控制,离散二次型设计,滑模变结构控制,鲁棒自适应控制,数字PID控制。第四篇介绍了交流调压调速和线绕式异步电动机串级调速,转差频率控制的变频调速,矢量变换控制的变频调速,无换向器电动机调速系统,交流调速系统的模糊控制器设计。

本书§ 1.1~§ 1.3、第2章、§ 3.1、§ 4.1、§ 4.4节、第12章、13章、14章、第四篇习题等内容由江祥贤副教授执笔,§ 1.4、§ 1.5、§ 3.2、§ 4.2~§ 4.5节、第一篇习题、第二篇习题等内容由杨玉珍副教授执笔,第5章、6章、7章、8章、9章、10章、11章、§ 12.1节、第15章、第三篇习题及各篇小结等内容均由侯媛彬副教授、易继锴教授执笔,全书由易继锴教授统稿。东南大学赵家壁教授、冷增祥教授,西安交通大学韩崇昭教授曾对书稿内容提出过许多宝贵意见和建议,北京工业大学出版社李志恒副总编为本书的出版做了许多工作,在此一并表示衷心的感谢。本书由北京工业大学教材出版基金资助出版。

由于编者水平所限,书中错误或不当之处在所难免,殷切期望读者批评指正。

编者

1996年12月

目 录

前言

第一篇 电力电子器件及电路

第一章 电力电子器件的基本原理	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 普通晶闸管	(1)
1.2.1 晶闸管及其工作原理	(2)
1.2.2 晶闸管的静态特性及主要参数	(5)
1.2.3 晶闸管的动态特性及参数	(8)
1.2.4 晶闸管的派生器件	(11)
1.3 电力晶体管 (GTR)	(15)
1.3.1 电力晶体管的工作原理及静态输出特性	(15)
1.3.2 电力晶体管的开关特性	(17)
1.3.3 电力晶体管的二次击穿与安全工作区	(18)
1.3.4 电力晶体管的极限运行参数	(20)
1.4 功率场效应管 (MOSFET)	(20)
1.4.1 MOSFET 的基本工作原理及静态输出特性	(21)
1.4.2 MOSFET 的开关特性	(24)
1.4.3 MOSFET 的安全工作区	(25)
1.4.4 MOSFET 的主要参数	(25)
1.5 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	(26)
1.5.1 绝缘栅双极晶体管的结构与工作原理	(27)
1.5.2 绝缘栅双极晶体管的特性	(28)
1.5.3 绝缘栅双极晶体管的锁定效应	(29)
1.5.4 绝缘栅双极晶体管的安全工作区	(29)
1.5.5 绝缘栅双极晶体管的主要参数	(30)
第二章 电力电子变换电路	(31)
2.1 交流/直流 (AC/DC) 变换——可控整流电路	(31)
2.1.1 概述	(31)
2.1.2 单相半波可控整流电路	(32)
2.1.3 单相全波可控整流电路	(36)
2.1.4 三相半波可控整流电路	(39)
2.1.5 三相桥式可控整流电路	(42)
2.1.6 整流变压器漏抗对整流电路的影响	(48)
2.1.7 有源逆变电路	(51)

2.1.8	相控整流电路的主要性能指标	(54)
2.2	直流/交流 (DC/AC) 变换——无源逆变电路	(56)
2.2.1	概述	(56)
2.2.2	交—直—交电压型逆变器	(58)
2.2.3	交—直—交电流型逆变器	(65)
2.2.4	脉宽调制 (PWM) 逆变器	(69)
2.3	交流/交流 (AC/AC) 变换与直流/直流 (DC/DC) 变换	(74)
2.3.1	交流/交流 (AC/AC) 变换——交—交变频器	(74)
2.3.2	直流/直流 (DC/DC) 变换——直流斩波器	(78)
第三章 电力电子器件驱动电路		(81)
3.1	晶闸管触发电路	(81)
3.1.1	概述	(81)
3.1.2	分立式相控同步模拟触发电路	(82)
3.1.3	触发电路同步信号的选择	(89)
3.1.4	集成式相控同步模拟触发电路	(90)
3.1.5	数字触发电路	(93)
3.2	全控型电力电子器件驱动电路	(98)
3.2.1	电力晶闸管 (GTR) 基极驱动电路	(99)
3.2.2	功率场效应管 (MOSFET) 栅极驱动电路	(105)
3.2.3	绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 栅极驱动电路	(109)
第四章 电力电子器件串并联应用与保护		(114)
4.1	晶闸管元件的选用及串并联	(114)
4.1.1	晶闸管元件的容量选择	(114)
4.1.2	晶闸管元件的串联与并联	(114)
4.2	电力晶体管元件的并联	(116)
4.3	功率场效应管元件的并联	(118)
4.4	晶闸管元件及装置的保护	(118)
4.4.1	过电压保护	(118)
4.4.2	过电流保护	(121)
4.4.3	电压上升率和电流上升率的限制	(121)
4.5	全控型器件及装置的保护	(121)
4.5.1	全控型器件开通与关断缓冲电路	(121)
4.5.2	全控型器件及变换装置的保护	(124)
第一篇小结		(127)
习题一		(127)

第二篇 直流调速系统

第五章 单闭环直流调速系统		(130)
5.1	概述	(130)

5.1.1	调速基本概念	(130)
5.1.2	调速的分类	(130)
5.1.3	调速系统的静态指标	(131)
5.1.4	调速系统的时域指标	(132)
5.1.5	开环和闭环调速系统的特点	(133)
5.1.6	晶闸管变流器—电动机系统的机械特性	(135)
5.2	直流单闭环不可逆调速系统	(138)
5.2.1	转速负反馈调速系统	(138)
5.2.2	转速负反馈调速系统的动态分析	(141)
5.2.3	电压负反馈调速系统	(146)
5.2.4	电压负反馈加电流补偿的调速系统	(148)
5.2.5	无静差调速系统	(150)
5.2.6	限流保护——电流截止负反馈	(153)
5.2.7	直流单闭环不可逆调速系统实例	(156)
第六章 双闭环直流调速系统及工程设计		(158)
6.1	转速、电流双闭环调速系统	(158)
6.1.1	转速、电流双闭环调速系统的特点	(158)
6.1.2	转速、电流双闭环调速系统的工作原理	(160)
6.1.3	转速、电流双闭环调速系统的工程设计法	(165)
6.2	直流可逆调速系统	(192)
6.2.1	概述	(192)
6.2.2	可控环流可逆调速系统	(196)
6.2.3	逻辑无环流可逆调速系统	(200)
6.2.4	错位无环流可逆调速系统	(206)
6.3	直流脉宽调制调速系统	(207)
6.3.1	直流斩波器——电动机调速系统	(207)
6.3.2	直流电力晶体管脉宽调制调速系统	(213)
第七章 直流调速系统的现代控制设计方法		(221)
7.1	能控性与能观性理论在直流调速系统中的应用	(221)
7.2	直流调速系统的状态观测器设计	(223)
7.2.1	状态变量反馈	(223)
7.2.2	线性调节器的设计	(226)
7.2.3	直流调速系统的负载观测器设计	(229)
7.3	直流调速系统的滑模变结构控制器设计	(233)
7.3.1	概述	(233)
7.3.2	滑模变结构控制器设计	(234)
7.4	直流调速系统的自适应控制	(239)
7.4.1	离散模型参考自适应控制	(239)
7.4.2	直流电机转速自适应控制	(241)
第二篇小结		(243)

习题二.....	(244)
----------	-------

第三篇 随动系统

第八章 随动系统及其检测元件	(247)
8.1 概述	(247)
8.1.1 随动系统的定义	(247)
8.1.2 随动系统的应用	(247)
8.1.3 随动系统的类型及结构	(247)
8.1.4 随动系统设计概要	(252)
8.1.5 随动系统的特点及性能指标	(252)
8.2 随动系统的位置检测元件	(253)
8.2.1 伺服电位器	(253)
8.2.2 自整角机	(255)
8.2.3 旋转变压器	(262)
8.2.4 精、粗测角线路	(269)
8.2.5 轴转角数字编码器	(272)
8.2.6 光栅	(274)
8.2.7 感应同步器	(276)
8.3 随动系统的速度检测元件	(278)
8.3.1 直流测速发电机	(278)
8.3.2 交流测速发电机	(281)
8.3.3 光电数字转速检测器	(284)
第九章 随动系统的功率放大器及执行电机	(286)
9.1 随动系统的功率放大器电路	(286)
9.1.1 脉冲宽度调制 (PWM) 电路	(286)
9.1.2 正弦波 PWM 电路	(292)
9.2 随动系统的执行电机	(299)
9.2.1 直流伺服电机	(299)
9.2.2 交流伺服电机	(308)
9.2.3 步进电机	(313)
9.2.4 永磁直流无刷电机	(317)
9.2.5 伺服电机功率的确定及减速器传动比的选择	(320)
第十章 随动系统的常规控制设计方法	(323)
10.1 随动系统典型结构及稳态特性	(323)
10.2 随动系统频率法设计	(325)
10.2.1 串联校正	(325)
10.2.2 反馈校正 (并联校正)	(331)
10.3 复合控制法设计	(333)
10.3.1 复合控制的概念及不变性原理	(333)

10.3.2 复合控制设计法	(334)
10.4 数字 PID 控制	(336)
10.4.1 离散 PID 控制算法	(337)
10.4.2 参数整定规则	(338)
第十一章 随动系统的现代控制设计	(340)
11.1 随动系统的离散最优二次型设计	(340)
11.2 随动系统的滑模变结构控制设计	(343)
11.2.1 概述	(343)
11.2.2 滑模变结构控制器的设计	(345)
11.3 随动系统的鲁棒调节器设计	(347)
11.3.1 鲁棒调节器	(347)
11.3.2 一种自适应鲁棒伺服系统的设计	(350)
第三篇小结	(357)
习题三	(358)

第四篇 交流调速系统

第十二章 交流调压调速和串级调速	(361)
12.1 概述	(361)
12.1.1 交流调速系统的应用	(361)
12.1.2 交流调速系统的分类	(361)
12.2 闭环控制的异步电动机调压调速系统	(366)
12.2.1 异步电动机改变电压时的机械特性	(366)
12.2.2 三相交流调压电路	(368)
12.2.3 闭环控制的调压调速系统	(369)
12.2.4 调压调速的功率损耗	(370)
12.3 绕线式异步电动机串级调速系统	(372)
12.3.1 串级调速原理及基本类型	(372)
12.3.2 串级调速系统电动机转子电路的工作状态	(376)
12.3.3 串级调速系统的工作特性	(378)
12.3.4 双闭环控制的串级调速系统	(381)
12.3.5 串级调速的效率和功率因数	(385)
12.3.6 串级调速系统设计中的几个问题	(387)
十三章 交流电动机变频调速系统	(389)
13.1 变频调速系统的控制方式及其机械特性	(389)
13.2 转速开环、电压闭环恒压频比控制的变频调速系统	(394)
13.2.1 转速开环、电压闭环的交—直—交电压型变频调速系统	(394)
13.2.2 转速开环、电压闭环的交—直—交电流型变频调速系统	(397)
13.2.3 采用 SPWM 专用芯片的变频调速系统	(398)
13.3 转速闭环、转差频率控制的变频调速系统	(402)

13.3.1	转差频率控制的基本概念	(402)
13.3.2	转差频率控制规律	(404)
13.3.3	转速闭环、转差频率控制的变频调速系统	(405)
13.4	异步电动机矢量变换控制系统.....	(407)
13.4.1	矢量变换控制的基本概念	(407)
13.4.2	坐标变换和矢量变换	(409)
13.4.3	矢量变换控制的异步电动机数学模型	(412)
13.4.4	转子磁链的检测	(418)
13.4.5	矢量变换控制的变频调速系统	(420)
13.4.6	小结	(423)
第十四章	无换向器电动机调速系统	(425)
14.1	概述.....	(425)
14.2	无换向器电动机的工作原理.....	(426)
14.2.1	直流电动机的基本原理	(426)
14.2.2	直流无换向器电动机的工作原理	(427)
14.2.3	交流无换向器电动机的工作原理	(429)
14.3	无换向器电动机的换流方式.....	(430)
14.3.1	反电势换流（负载换流）	(430)
14.3.2	电源换流	(431)
14.3.3	断续电流换流	(431)
14.4	无换向器电动机的基本特性.....	(432)
14.4.1	电压关系式	(432)
14.4.2	转速公式与调速方法	(433)
14.4.3	转矩关系式	(434)
14.4.4	过载能力及其提高措施	(436)
14.5	无换向器电动机的数学模型及调速系统工程设计.....	(437)
14.5.1	无换向器电动机调速系统的运行	(437)
14.5.2	无换向器电动机调速系统的数学模型	(441)
14.5.3	无换向器电动机调速系统的闭环控制	(444)
第十五章	交流调速系统的模糊控制器设计	(448)
15.1	模糊数学的基本概念.....	(448)
15.1.1	模糊子集的基本概念	(449)
15.1.2	模糊集合的运算	(450)
15.1.3	模糊关系及模糊关系矩阵运算	(452)
15.2	模糊自动控制工作原理.....	(454)
15.3	模糊控制器设计.....	(456)
15.3.1	精确量的 Fuzzy 化	(456)
15.3.2	Fuzzy 控制规则的构成	(457)
15.3.3	输出信息的 Fuzzy 判决.....	(464)
15.3.4	基本模糊控制器	(465)

15.4 模糊控制在交流调速中的应用.....	(466)
15.4.1 交流调速系统的模糊模型.....	(466)
15.4.2 变频调速系统模糊控制器设计.....	(471)
第四篇小结.....	(474)
习题四.....	(475)
附录 交流调速装置简介.....	(477)
附—1 交流电动机晶闸管交—直—交变频器调速装置.....	(477)
附—2 无换向器电动机晶闸管调速装置.....	(478)
附—3 大功率晶体管 (GTR) 脉冲调制 (PWM) 调速装置.....	(480)
附—4 数字式变频器.....	(480)
附—5 交流绕线电动机晶闸管串级调速装置.....	(484)
参考文献.....	(487)

第一篇 电力电子器件及电路

电力电子学包括电力电子器件、电力电子电路和电力电子装置及其控制系统，核心是变流器。就学科观点而言，电力电子技术是介于电气工程三大领域（电力、电子和控制）之间的边缘学科。

本篇首先介绍电力电子器件，包括不能自关断的半控型晶闸管及能自关断的全控型器件，如电力晶体管（GTR）、可关断晶闸管（GTO）、功率场效应晶体管（MOSFET）等。在此基础上，分析和讨论电能变换的四种形式，即交流/直流（AC/DC）、直流/交流（DC/AC）、交流/交流（AC/AC）和直流/直流（DC/DC）。其中尤以相控整流（AC/DC）和无源逆变（DC/AC）为重点，以此作为直流调速系统和交流调速系统的准备知识。

第一章 电力电子器件的基本原理

1.1 概述

50年代末出现的无自关断能力的半控型普通晶闸管是第一代电力电子器件。随着变流技术的发展而出现的能自关断的全控型器件，如电力晶体管（GTR）、门极可关断晶闸管（GTO）、功率场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极晶体管（IGBT）、静电感应晶体管（SIT）和静电感应晶闸管（SITH）等称之为第二代电力电子器件或功率集成器件。当今已发展到的功率集成电路（PIC），属于第三代电力电子器件。

普通晶闸管电压、电流定额都比较高，是目前大容量变流电源广泛采用的开关器件，导通可控，无自关断能力，开关频率低，可用在大容量的交直流传动中。

可关断晶闸管（GTO）是由晶闸管派生出来的，是具有自关断能力的全控型器件，如在变频器中采用这种元件，可省去关断电路，从而简化主电路。可关断晶闸管开关频率较一般晶闸管高，但其关断增益（阳极电流与关断GTO所需的最小门极电流之比）小。

电力晶体管（GTR）也是全控型器件，属电流控制元件，开关频率高，在正弦脉宽调制逆变器中得到广泛应用，但使用中容易发生二次击穿，故需设置阻容吸收电路。

功率场效应晶体管（MOSFET）同样具有自关断能力，与GTR不同的是它属于电压控制元件，由栅极电压来控制漏极电流，因此，驱动电路功率小，开关频率更高。由于漏极电流温度系数是负的，不易出现热点和

图 1-1 不同器件的变流器容量与开关频率的关系

二次击穿,故在实际应用中可靠性高,其缺点是电压、电流定额比较低,多用在小容量的 PWM 变频系统中。

总的说来,由于电流、电压定额和开关时间的不同,根据技术经济指标的分析,每种器件各有其不同的应用范围,图 1-1 表示了由各种器件构成的变流器容量和开关频率的相对关系。

80 年代后期,新型电力电子器件发展很快,为了在 GTR 和 MOSFET 之间取长补短,出现了绝缘栅双极晶体管 IGBT。IGBT 具有同 GTR 一样的功率处理能力,同功率 MOSFET 类似的开关特性。目前已产品化的 IGBT 电流容量为 8A ~ 400A,电压为 600V、1200V,开关频率可达 20kHz 以上。MOS 控制的晶闸管 MCT 是在 IGBT 的基础上发展起来的,其通态压降仅为 IGBT 的 $\frac{1}{3}$,开关速度超过 GTR, $\frac{di}{dt}$ 、 $\frac{du}{dt}$ 耐量高,目前 MCT 的单管容量可达 1200V、100A。

最近出现的功率集成电路 PIC 则属于第三代电力电子器件。在 PIC 中,不仅含有主电路的器件,而且把驱动电路以及过压过流保护、电流检测甚至温度自动控制等电路都集成在一起,形成一个整体。它将为运动控制系统的机电一体化开辟广阔的前景。PIC 的主要技术障碍是高低压电路之间的绝缘问题以及温升和散热的有效处理问题。

电力电子器件的发展情况可大致归纳成表 1-1。

表 1-1 电力电子器件发展简表

第一代 半控器件	第二代 自关断器件		第三代 功率集成电路
	电流控制	电 场 控 制	
硅整流二极管 (SR)	电力晶体管 (GTR)	结型、静电感应晶体管 (FET) (SIT)	功率 MOS 晶体管 (MOSFET)
晶体闸流管 (SCR)、(TH): 普通、快速、双向、逆导、高频、光控等	可关断晶闸管 (GTO)	静电感应晶闸管 (FCT) (SITH)	绝缘栅场控双极型晶体管 (IGBT)
			MOS 场控晶闸管 (MCT)
			高压集成电路 (HVIC)
			SMART 功率集成电路 (SPIC)

从上述发展可以明显地看到,电力电子器件的发展是整个运动控制系统乃至过程控制系统发展的先导,随着微电子技术和电力电子技术更好地结合与发展,将会推动自动化领域的更大发展。

1.2 普通晶闸管

1.2.1 晶闸管及其工作原理

我国目前生产的晶闸管,从外形上看,根据不同容量有三种形式,即:塑料封装式、螺栓式和平板式。晶闸管有三个电极,阳极 A、阴极 K 和门极(或称控制极) G。晶闸管在开关工作过程中会有损耗而发热,依靠与晶闸管紧密接触的散热器可将热量传递给冷却介质。冷却方式通常采用自然冷却、强迫风冷和水冷。一般说来,20A 及以下采用自然冷却;30A ~

200A 采用强迫风冷；300A 及以上采用水冷或强迫风冷。

晶闸管是三端四层器件，共有三个 PN 结 (J_1 、 J_2 和 J_3)，如图 1-2(a) 所示，其电路符号表示在图 1-2(b) 上。若把晶闸管看成是由两个晶体管 $P_1N_1P_2$ 及 $N_1P_2N_2$ 构成的，如图 1-3(a)

图 1-2 晶闸管的结构及符号

所示，则其等值电路可表示成如图 1-3(b) 所示电路。现设 $P_1N_1P_2$ 晶体管共基极电流放大系数为 β_1 ， $N_1P_2N_2$ 晶体管共基极电流放大系数为 β_2 。对于 $P_1N_1P_2$ 晶体管， P_1N_1 为发射结， N_1P_2 为集电结；对于 $N_1P_2N_2$ 晶体管， P_2N_2 为发射结， N_1P_2 仍为集电结，因此， N_1P_2 为公共的收集结。

图 1-3 晶闸管的等值模型

当 A—K 两端加正向电压时， J_1 和 J_3 结为正偏置，而中间结 J_2 为反偏置；当 A—K 两端加反向电压时，中间结 J_2 为正偏置，而 J_1 和 J_3 结均为反偏置。因此，在晶闸管未导通时，正向外加电压由反偏置的 J_2 结承担；而反向外加电压主要由反偏置的 J_1 结承担，这是由晶闸管的制造工艺和结构决定的。

一、晶闸管的导通条件

当门极开路，A—K 两端加正向电压时，通过 J_2 结的电流为 $\beta_1 I_0$ 、 I_0 和 $\beta_2 I_0$ ，如图 1-4 所示。其中： $\beta_1 I_0$ 为由 J_1 结注入的空穴运动电流； $\beta_2 I_0$ 为由 J_3 结注入的电子运动电流； I_0 为反偏置 J_2 结的漏电流，因此

$$I = \beta_1 I_0 + I_0 + \beta_2 I_0$$

所以

图 1-4 门极开路时通过 J_2 结的电流示意图

$$I = \frac{I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

因电流放大系数 α_1 和 α_2 都较小，故晶闸管的阳极电流 $I \approx I_0$ ，处于正向阻断状态。此时外加的正向电压全部由 J_2 结承担。

当门极加入正向控制电压 ($U_{GK} > 0$) 产生门极电流 I_G 后，载流子的流动情况如图 1-5 所示。

图 1-5 有门极信号时通过 J_2 结的电流示意图

由图可知，通过 J_2 结的电流 I_A 为

$$I_A = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_G \quad (1-2)$$

同时有

$$I_A + I_G = I_K \quad (1-3)$$

整理后可得

$$I_A = \frac{I_G + I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

晶闸管的工作过程可简单表示如下：

流入 I_G 后(参看图 1-3(b)) $I_{b2} = I_{c2} = I_{b1} = I_{c1} = I_G$ ，从而形成强烈的正反馈

过程，随着发射极电流的增大， α_1 及 α_2 增大，当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时 (图 1-6 中 K 值)，将大大提高晶闸管的阳极电流 I_A ，这时，流过晶闸管的电流完全由主回路的电源电压和回路负载所决定。

晶闸管导通以后，由于 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$ ，即使此时门极电流 $I_G = 0$ ，晶闸管仍能维持导通状态。所以晶闸管一旦触发导通后，门极即失去了控制作用。欲关断已导通的晶闸管，可以减小电源电压或增大回路负载电阻，使阳极电流 I_A 减小至维持电流 I_H (约数十毫安) 以下，此时 α_1 和 α_2 迅速下降， $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时，晶闸管又恢复到阻断状态。

以上所述是在正向电压条件下加上门极触发信号，晶闸管由正向阻断状态转入导通状态，属于正常的导通工作状态。此时，三个 PN 结均

图 1-6 电流放大系数与发射极电流关系

为正偏置，因此，导通压降很小，平均压降约为 $1V \sim 2V$ 。

当不加门极触发信号时，在下述情况下晶闸管也仍有可能导通。

(1) 正向转折导通：提高 U_{AK} 正向电压，阳极电流增加，当满足 $I_1 + I_2 = I_1$ ，晶闸管转入通态；

(2) 温度增加时， I_0 随着增大，直到 $I_1 + I_2 = I_1$ ，晶闸管转入通态；

(3) $\frac{dU_{AK}}{dt}$ 过大造成导通：由于各 PN 结都存在结电容 C_j ，当 A—K 两端正向电压变化率过大时，各 PN 结将流过充电电流 $C_j \frac{dU_{AK}}{dt}$ ，其作用也是使阳极电流增加，当 $I_1 + I_2 = I_1$ 时晶闸管也就导通了。

以上所述，是在正向电压条件下未加门极触发信号，晶闸管由正向阻断状态转入导通状态，属于非正常导通，或曰误导通，故应予避免。

二、晶闸管的反向阻断状态

当 A—K 两端加上反向电压时，晶闸管处于反向阻断状态。在这种情况下，晶闸管已失去内部正反馈的作用，图 1-3 所示的模型结构及等值电路也不再成立，这时，加门极正信号只能增加通过晶闸管的反向漏电流。

1.2.2 晶闸管的静态特性及主要参数

晶闸管作为一个开关器件，从使用的角度来说，需要了解在关断状态下能够承受多大电压，导通时能够流过多大电流，本身有多大压降，要使它由阻断变为导通，门极需要加多大电流和电压等问题。

一、晶闸管的阳极伏安特性

图 1-7 表示了晶闸管阳极伏安特性，OA 为正向阻断区，此时有很小的正向漏电流，OC 为反向阻断区有反向漏电流，EF 为通态区，BE 为断态到通态快速转变区。晶闸管的反向特性及通态特性与整流管相似。 U_{BO} 为正向转折电压 ($I_G = 0$)，正常工作时不允许把电压加到 U_{BO} 值， U_{BR} 为反向击穿电压。当 $I_G > 0$ 时，随着 I_G 的增加，晶闸管阳极电压转折点就要下降 (图

图 1-7 晶闸管阳极伏安特性

1-7 中 $I_{G2} > I_{G1} > 0$)，当 I_G 大到一定程度，晶闸管的正向阻断区就消失了。晶闸管导通后，逐步减小阳极电流，当 $I_A < I_H$ 时，晶闸管便由导通转为阻断。 I_H 是维持晶闸管导通所需的最小

阳极电流，称为维持电流。

二、晶闸管的门极伏安特性

晶闸管在正向阳极电压作用下，当门极加入适当的信号时，可使晶闸管由断态变为通态。

晶闸管的门极和阴极间有一个PN结 J_3 ， U_G 与 I_G 之间特性称为门极伏安特性。一般情况下门极伏安特性的分散性很大，常用伏安特性区域来表示同类产品的门极伏安特性。图1-8表示了500A晶闸管的门极伏安特性区域。

在图1-8(a)中，曲线OD为极限低阻伏安特性，曲线OG为极限高阻伏安特性。由于施加于门极的电压、电流和功率都是有一定限度的，所以可根据门极正向峰值电流 I_{FGM} 、正向峰值电压 U_{FGM} 和允许的瞬时最大功率 P_{GM} 来划定其上限，分别得DE、FG、EF线，从而构成下列三个区域：

图 1-8 晶闸管的门极伏安特性

区域：图中OHJO范围内的区域称为不触发区，由门极不触发电流 I_{GD} 和不触发电压 U_{GD} 限定。

区域：图中ABCJHA范围内的区域称为不可靠触发区。由门极触发电流 I_{GT} 和触发电压 U_{GT} 限定。在该区域内不能保证同类型所有合格产品都能可靠触发。

区域：图中ADEFGCBA的区域称为可靠触发区，只要由触发器加于门极的触发电流和电压在此区域内，都能保证同类型所有合格产品可靠地触发。另外，门极的平均功率损耗不应超过规定的平均功率 $P_{G(AV)}$ 。

在晶闸管出厂合格证上，标明了能够保证触发该器件的最小触发电流和电压。为使触发器能通用于同型号的晶闸管，在电路设计时应使门极的工作点在可靠触发区内。如果晶闸管的触发电压太低，则容易受干扰造成误触发。另外触发电流与电压值还与器件的温度有关，应予以注意。

三、晶闸管的主要参数

晶闸管的静态参数主要有电压定额、电流定额和门极定额。

1. 电压定额

(1) 正向转折电压 U_{Bo} ： $I_G=0$ 时，漏电流突然增加，晶闸管从阻断状态转入导通状态的最小正向瞬时电压；反向时为击穿电压 U_{BR} 。

(2) 断态不重复峰值电压 U_{DSM} ：不允许重复施加于晶闸管两端的正向瞬时电压，它通常

由外因引起，并假定其影响在第二次不重复瞬态电压到来之前已完全消失。

(3) 断态重复峰值电压 U_{DRM} ：允许重复施加于晶闸管的峰值电压。一般常取 U_{DRM} 为 U_{DSM} 的 90%。

反向不重复峰值电压 U_{RSM} 及反向重复峰值电压 U_{RRM} 含义与上相似，取 U_{RRM} 为 U_{RSM} 的 90%。

(4) 额定电压：通常取器件中 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的那个数值。实际应用中，一般选用晶闸管的额定电压为正常工作峰值电压的 2~3 倍作为安全裕量。

(5) 通态（峰值）电压 U_{TM} ：晶闸管通以 1 倍或规定倍数额定通态平均电流值时的瞬态峰值电压。

2. 电流定额

(1) 通态平均电流 I_{Ta} ：工频正弦半波的通态电流在一个周期内的平均值，如图 1-9 所示。在实际使用时，由于流过晶闸管的电流波形通常不是正弦半波电流，此时允许的电流平均值应根据有效值相等的原则来确定，即，令实际电流有效值等于额定电流 I_{Ta} 所对应的有效值，则

图 1-9 晶闸管的通态平均电流波形

$$I_{Ta} = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} I_M \sin t \, dt = \frac{I_M}{2} \quad (1-5)$$

正弦半波电流有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{2} \int_0^{\pi} (I_M \sin t)^2 dt} = \frac{I_M}{2} \quad (1-6)$$

正弦半波电流的波形系数

$$K_{fT} = \frac{I}{I_{Ta}} = \frac{I_M}{2} = 1.57$$

所以

$$I = K_{fT} I_{Ta} = 1.57 I_{Ta} \quad (1-7)$$

当实际电流非正弦半波时，此时波形系数（有效值与平均值之比） $K_f = \frac{I}{I_{dVT}}$ ，根据不同波形其有效值相等的原则，可求得此时允许的电流平均值 I_{dVT} 为

$$I_{dVT} = \frac{I}{K_f} = \frac{1.57 I_{Ta}}{K_f} \quad (1-8)$$

以上计算，尚未考虑晶闸管电流安全裕量。

(2) 维持电流 I_H ：晶闸管从较大的通态电流降低至能保持通态所需的最小阳极电流。

(3) 擎住电流 I_L ：晶闸管加上触发电流（压）后，刚从断态转为通态就撤除触发信号能维持通态所需的最小阳极电流。通常

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

(4) 浪涌电流 I_{TSM} ：晶闸管通以额定通态平均电流，稳定后在工频正弦波半周期间器件能承受的最大过载电流。浪涌电流用峰值表示。

3. 门极定额

(1) 门极触发电流 I_{GT} ：晶闸管施加 6V 正向阳极电压，使元件由断态转入通态所必须的最小门极电流。