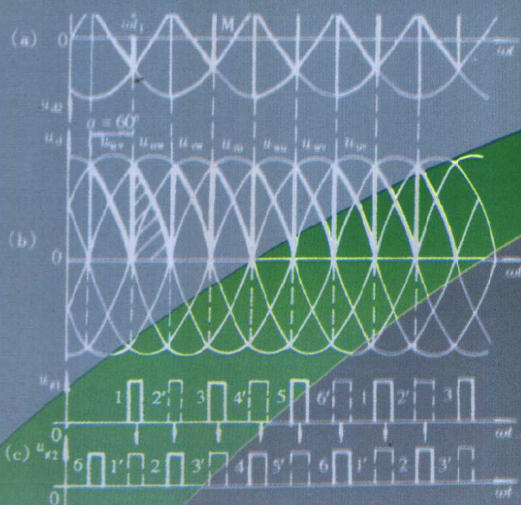


# 电力电子技术

## 释疑与习题解析

葛延津 主编



NEUPRESS  
东北大学出版社

# 电力电子技术释疑与习题解析

葛延津 主编

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 葛延津 2003

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术释疑与习题解析 / 葛延津主编. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2003.10

ISBN 7-81054-951-0

I. 电… II. 葛… III. 电力电子学—自学参考资料  
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 092938 号

---

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印刷者: 市政二公司印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 140mm × 203mm

印 张: 5.5

字 数: 143 千字

出版时间: 2003 年 10 月第 1 版

印刷时间: 2003 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑: 李毓兴

责任校对: 司徒

特邀编辑: 李 艳

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

---

定 价: 10.00 元

# 前 言

随着科学技术的发展，电气自动化技术已广泛地应用于国民经济发展中的各个领域。随着电气自动化技术的广泛应用，自动化领域的器件也在突飞猛进地发展。电力电子器件、计算机技术与控制理论的发展，为电气传动自动控制系统的机电一体化奠定了基础。现在已广泛应用的功率集成电路集系统的主电路部分、控制器驱动部分、电路的保护部分于一体，既便于安装，又便于系统设计调试。有了这样的集成电路，工程技术人员会将精力集中于系统的优化设计上，而对功率集成电路只作选型工作即可。

功率集成电路中功率器件可分为以晶闸管为代表的传统的电力电子器件与全控型自关断电力电子器件，对由它们构成的电路的工作原理的分析是工程技术人员必须掌握的重要的基础知识。对利用晶闸管与全控型自关断电力电子器件自行设计变流装置来说，掌握这种基础知识也是十分重要的。《电力电子技术》正是以这两方面的器件为重点阐述了电力电子技术的新发展。

《电力电子技术释疑与习题解析》是配合《电力电子技术》而编写的。其目的在于帮助学习者与工程技术人员更好地掌握电力电子器件的电路型式与工作原理。尤其帮助电气自动化专业的本科生、研究生减轻学习中的负担，为他们由浅入深地理解电力电子器件与由这些电力电子器件组成的电路提供帮助。对于在学习中容易出现的常见的问题与一些疑难问题，本书提供了分析、解析的方法，同时也给出习题的答案，以核对分析问题、解决问题的思路正确与否。

本书的特点是：紧密配合《电力电子技术》（东北大学出版社 2002 版），按其章节一一给出：内容归纳与总结、例题解析、习题提示与答案。力争做到在繁多的自动化专业课程中，为《电力电子技术》这一门课程的学习减少所用的时间，用较少的精力掌握这门课程的内容。用合理的时间与精力更合理地安排自动化专业诸多其他课程的学习。

为配合《电力电子技术》一书，本书也分九章。第一、二章由钱小龙编写；三、四、五、六章由葛延津编写；七、八、九章由杨卫国编写。

本书中的习题都是在《电力电子技术》的教学过程中长期使用的，经整理后而成。在编写中尽管我们做了很大努力，但“百密一疏”，难免还会有疏漏，诚恳欢迎使用本书的师生与其他读者批评指正。

**编者**

2003 年 10 月

# 目 录

<b>第 1 章 晶闸管</b> .....	1
1.1 内容归纳与总结 .....	1
1.1.1 晶闸管的结构与工作原理 .....	1
1.1.2 关断与导通条件 .....	1
1.1.3 晶闸管的主要参数 .....	2
1.2 例题解析 .....	3
1.3 习题提示与答案 .....	8
<b>第 2 章 单相可控整流电路</b> .....	12
2.1 内容归纳与总结.....	12
2.1.1 单相半控桥式整流电路.....	12
2.1.2 单相全控桥式整流电路.....	13
2.2 例题解析.....	13
2.3 习题提示与答案.....	22
<b>第 3 章 多相可控整流电路</b> .....	27
3.1 内容归纳与总结.....	27
3.1.1 多相整流电路.....	27
3.1.2 整流变压器的漏抗.....	27
3.1.3 整流电路的谐波、功率因数与保护电路.....	28
3.2 例题解析.....	28

---

3.3 习题提示与答案·····	38
<b>第4章 晶闸管电路的逆变工作状态</b> ·····	<b>53</b>
4.1 内容归纳与总结·····	53
4.1.1 晶闸管电路与电动机的两种状态·····	53
4.1.2 有源逆变的条件·····	53
4.1.3 波形分析·····	54
4.1.4 变压器漏抗的影响·····	54
4.1.5 逆变颠覆的原因·····	54
4.1.6 防止逆变颠覆的措施·····	55
4.1.7 逆变状态下的机械特性·····	55
4.2 例题解析·····	55
4.3 习题提示与答案·····	62
<b>第5章 晶闸管—直流电动机可逆电路</b> ·····	<b>77</b>
5.1 内容归纳与总结·····	77
5.1.1 几个主要概念·····	77
5.1.2 采用两套三相晶闸管装置的可逆电路·····	78
5.2 例题解析·····	78
5.3 习题提示与答案·····	87
<b>第6章 晶闸管的触发电路</b> ·····	<b>101</b>
6.1 内容归纳与总结·····	101
6.1.1 锯齿波移相的触发电路与原理·····	101
6.1.2 脉冲触发电路的控制特性·····	101
6.1.3 变流装置的传递函数·····	102
6.1.4 同步信号与主电路电压的同步问题·····	102
6.2 例题解析·····	102

---

6.3 习题提示与答案 .....	105
<b>第7章 晶闸管变频器和逆变器.....</b>	<b>110</b>
7.1 内容归纳与总结 .....	110
7.1.1 变频器和逆变器 .....	110
7.1.2 交—直—交变频器 .....	110
7.1.3 电压型变频器 .....	110
7.1.4 电流型变频器 .....	111
7.1.5 交—交变频器 .....	111
7.1.6 单相输出的交—交变频器 .....	111
7.1.7 三相输出的交—交变频器 .....	112
7.1.8 具有公共母线的三相输出交—交变频器 .....	112
7.1.9 输出端 Y 接的三相输出交—交变频器 .....	112
7.1.10 逆变器的换流.....	112
7.1.11 三相逆变器.....	113
7.2 例题解析 .....	113
7.3 习题提示与答案 .....	123
<b>第8章 自关断半导体器件.....</b>	<b>126</b>
8.1 内容归纳与总结 .....	126
8.1.1 电力电子器件分类 .....	126
8.1.2 电流控制型器件和电压控制型器件 .....	127
8.1.3 门极可关断晶闸管 GTO .....	128
8.1.4 电力晶体管 GTR .....	129
8.1.5 场效应晶体管 MOSFET .....	131
8.1.6 绝缘栅双极型晶体管 IGBT .....	134
8.1.7 电力电子器件的缓冲电路 .....	136
8.1.8 静电感应晶体管 SIT .....	137



8.1.9 静电感应晶闸管 SITH .....	138
8.1.10 MOS 栅控晶闸管 MCT .....	139
8.1.11 各种电力电子器件输出功率与工作频率的关系 .....	140
8.1.12 各种器件电压和电流的比较.....	140
8.2 例题解析 .....	141
8.3 习题提示与答案 .....	143
<b>第9章 脉宽调制 PWM 逆变器</b> .....	<b>151</b>
9.1 内容归纳与总结 .....	151
9.1.1 直流斩波器(Chopper)的三种调制方式 .....	151
9.1.2 单相 PWM 逆变器 .....	151
9.1.3 三相 PWM 逆变器 .....	152
9.1.4 PWM 变频器 .....	152
9.1.5 典型的 PWM 变频器 .....	152
9.1.6 载波与调制 .....	152
9.1.7 生成 SPWM 波形的主要方法.....	152
9.1.8 异步调制和同步调制 .....	154
9.1.9 单极性正弦 PWM(SPWM)调制 .....	155
9.1.10 双极性 SPWM 调制 .....	156
9.1.11 计算机在线计算.....	156
9.1.12 磁场轨迹法 PWM .....	156
9.2 例题解析 .....	157
9.3 习题提示与答案 .....	164
<b>参考文献</b> .....	<b>168</b>

# 第 1 章 晶闸管

## 1.1 内容归纳与总结

### 1.1.1 晶闸管的结构与工作原理

(1) 晶闸管可用图 1-1 的符号表示, 阳极——A, 阴极——K, 门极(控制极)——G。

其结构为三个 PN 结、四层结构、三端的半控型半导体开关管。

(2) 它的工作原理可理解为一个 PNP 三极管与一个 NPN 三极管的连接, 这种连接是以电流正反馈的原理按特殊工艺制造而成的。一旦晶闸管导通, 其控制极就失去作用。

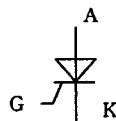


图 1-1 晶闸管符号

普通晶闸管有平板型与螺旋型两种。

### 1.1.2 关断与导通条件

(1) 导通的充分必要条件。

- 1) 阳极与阴极间承受正向电压。
- 2) 门极施加相对阴极来说为正的脉冲信号。

(2) 关断条件为下列之一。

- 1) 阳极与阴极间承受反向电压。
- 2) 阳极电流减小到小于维持电流。

### 1.1.3 晶闸管的主要参数

(1) 晶闸管的通态平均电流  $I_F$ 。

在规定的条件下,为晶闸管通以工频、正弦半波电流,且负载为纯电阻负载,导通角不小于  $170^\circ$ 。此时这个电流的平均值就是半波电流的平均值。若正弦半波电流的峰值为  $I_m$ ,则

$$I_F = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{I_m}{\pi}$$

通过的电流有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{I_m}{2}$$

波形系数:通过晶闸管的电流的(一般为非正弦)有效值与平均值之比  $K_f$ ,在此

$$I/I_F = 1.57, \text{ 即 } I = 1.57 I_F = K_f I_F$$

$K_f$  称波形系数。

还有其他参数:额定电压、维持电流、擎住电流以及一些动态参数和门极特性等。

(2) 实际应用中晶闸管的选择。

主要按实际承受的电压、电流选择晶闸管。电压的选择:按晶闸管实际在线路中承受的电压的峰值,还要乘以一个安全裕量。电流的选择:按晶闸管中实际通过电流的有效值与所选晶闸管(通态平均电流为  $I_F$ )允许通过的电流有效值相等的原则,再乘以安全裕量,这被称做有效值相等的原则。

当然要将计算出的值靠到工厂生产产品的系列值上。

这里要注意:无论是电流还是电压波形,都有一个峰值、有效值、平均值,要弄清它们的定义及算法。

## 1.2 例题解析

**例题 1.1** 在不用晶闸管测试仪的情况下,如何用万用表简单地测出晶闸管的阳极、阴极与控制极?

**解:**(1) 用万用表的欧姆档测试晶闸管的三个电极间的电阻。晶闸管的阳极与阴极间的正向电阻与反向电阻都接近无限大(一般为几百千欧以上)。门极对阴极间的正向电阻一般为几欧到几百欧,不能为零或大于几千欧;反向电阻比正向电阻稍大。

(2)要真正判断其好坏,可用以下简单电路测试。

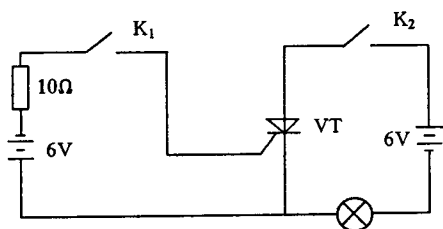


图 1-2 例题 1.1 图

**例题 1.2** 图1-3为流过晶闸管中的电流波形,其峰值为  $I_m$ 。

(1)计算其平均值与有效值。

(2)KP-100 型晶闸管不计安全裕量,当这些波形电流流经晶闸管时,晶闸管所能承受的电流平均值与最大值。

**解:**(1) 平均值与有效值。

1) 平均值

$$I_{d1} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} I_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{I_m}{2\pi}$$

$$I_{d2} = \frac{2}{3\pi} I_m = \frac{1}{3} I_m$$

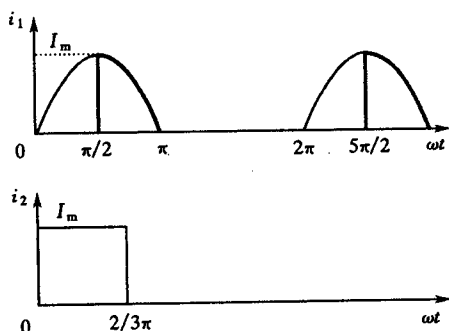


图 1-3 例题 1.2 图

2)有效值

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2/3\pi} I_m^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} I_m^2 \cdot \frac{2}{3}\pi} = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$$

(2) 100A 的晶闸管所能承受的电流平均值与最大值。

1)晶闸管能承受的电流最大值与平均值

100A 的晶闸管允许通过的有效值电流为

$$I_T = 1.57 \times 100 = 157 \text{ A}$$

实际通过的电流有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$$

按有效值相等的原则,最大值为

$$\frac{I_m}{2\sqrt{2}} = 157 \text{ A}, \quad I_{m1} = 442.7 \text{ A}$$

平均值为

$$I_{d1} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} I_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{I_m}{2\pi} = \frac{442.7}{2\pi} = 70.7 \text{ A}$$

2) 电流的平均值与最大值

100A 的晶闸管允许通过的电流有效值为

$$I_T = 1.57 \times 100 = 157 \text{ A}$$

实际通过的电流有效值为

$$I = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\pi}{2\pi} I_m^2} = \sqrt{\frac{1}{3}} I_m$$

按有效值相等的原则

$$\text{允许的最大值} \quad \sqrt{\frac{1}{3}} I_m = 157 \quad I_m = 272 \text{ A}$$

$$\text{允许的平均值} \quad I_{d2} = \frac{2}{3} \frac{\pi}{2\pi} I_m = \frac{1}{3} I_m = \frac{1}{3} \times 272 = 90.5 \text{ A}$$

**例题 1.3** 电路如图 1-4, VT 导通, 画出负载 R 上的电压波形。

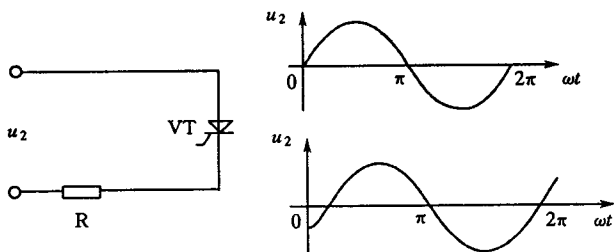
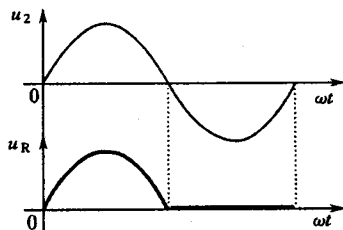
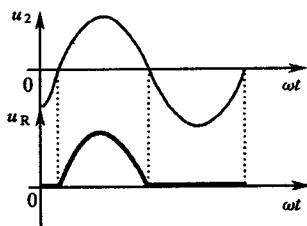


图 1-4 例题 1.3 图

解:(1) R 上的波形如下:



(2) R 上的波形如下:



**例题 1.4** 电路与波形示于图1-5(a), (b)。若在  $t_1$  时刻合上 K, 在  $t_2$  时刻断开 K, 求负载电阻上的电压波形。若在  $t_1$  时刻合上 K,  $t_3$  时刻断开 K, 输出电压的波形又如何 ( $u_g$  宽度大于  $360^\circ$ )?

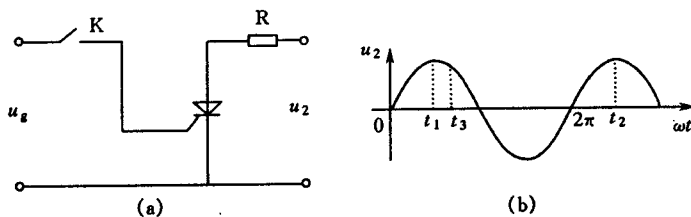


图 1-5 例题 1.4 图

解: 波形见图 1-6。

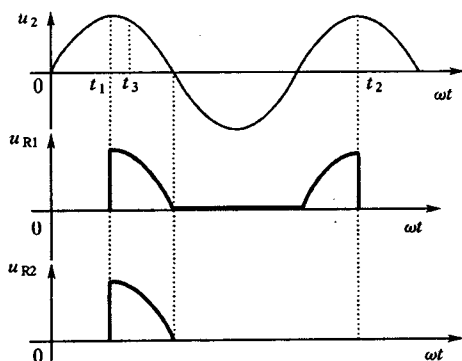


图 1-6 电阻 R 上的波形

**例题 1.5** 在图 1-7 中, 晶闸管阳极总加正向电压, 只要在  $VT_1$  与  $VT_2$  的控制极分别加上脉冲, 可实现两只晶闸管轮流导通, 试分析工作情况。

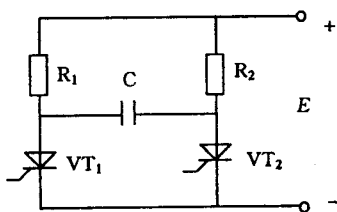


图 1-7 例题 1.5 图

**解:** 当触发  $VT_1$  时, 正电源经  $R_2$ ,  $C$ ,  $VT_1$  为电容器充电, 其极性为左负右正, 这样, 如果  $VT_2$  正在导通, 电容器两端的电压将会使  $VT_2$  承受反压而关断。另外一支晶闸管也如此。



### 1.3 习题提示与答案

本习题提示与答案是依据东北大学出版社《电力电子技术》一书中每章后习题进行的,其目的是起个提示作用。对习题中的问答与波形部分也给出了答案,这样可以使读者更好地理解每章中讲解的各种电路及问题,也是为了帮助理解各种电路所带不同负载(电阻性、电感性与反电动势)时,输出电压与电流的波形。所给答案仅供参考。

**习题 1-1** 晶闸管由关断状态变为导通状态的条件,由导通状态变为关断状态的条件是什么?

**答案** 晶闸管由关断状态变为导通状态必须同时满足两个条件:

- (1)晶闸管阳极、阴极间承受正向电压。
- (2)控制极对阴极有正的足够大的触发脉冲。

由导通变为关断状态,满足下列两个条件之一即可:

- (1)晶闸管的阳极、阴极间承受反向电压。
- (2)减小阳极电流,使其小于维持电流。

**习题 1-2** 晶闸管的转折电压、额定电压、额定电流、维持电流、擎住电流是如何定义的?

**答案** 转折电压:当断开门极,阳极电压  $U_a$  增大到晶闸管正向击穿导通的电压。

额定电压:晶闸管断态正向不重复峰值电压的 90%,即断态正向重复峰值电压。

额定电流:通态平均电流,条件为环境温度为  $40^{\circ}\text{C}$  和规定的冷却条件,电阻负载且导通角不小于  $170^{\circ}$ ,所加电流为工频正弦半波时的电流平均值。

维持电流:晶闸管维持导通状态所必需的最小电流。