

机电工程系教案首页及教学过程设计

授课日期	第 <u>2</u> 周 星期 <u>二</u> 第 <u>1-2</u> 节	教学用时	2 学时
教学内容 (学习情境)	电力电子器件概述 不可控器件：电力二极管		
教学目的 及要求	了解电力电子器件的发展、分类与应用，理解电力二极管的基本特征		
教学重点	电力电子器件的发展、分类与应用 电力二极管的基本特征		
教学难点	电力电子器件的发展、分类与应用 电力二极管的基本特征		
本次课类型	☒ 理论课 ☐ 实验课 ☐ 实训课 ☐ 习题课 ☐ 其它		
教学方法	☐ 教、学、做一体 ☒ 传统教学 ☐ 案例教学 ☐ 小组教学 ☐ 启发式教学 ☐ 课堂讨论教学 ☐ 其它		
教学手段	☒ 多媒体 ☐ 电脑机房 ☐ 仿真软件 ☐ 校内实训条件 ☐ 校内实训条件 ☐ 校外实训条件 ☐ 其它		
教学过程设计 (含引入新课、 组织教学、启发 思维等，将授课 内容按逻辑层 次，有序地进行 设计编排)	复习上次课程的教学内容（5 分钟） 电力电子器件的概念和特征（20 分钟） 应用电力电子器件的系统组成（10 分钟） 电力电子器件的分类（10 分钟） 本章内容和学习要点（10 分钟） 电力二极管的工作原理（10 分钟） 电力二极管的基本特征（10 分钟） 电力二极管的主要参数（10 分钟） 答疑（5 分钟）		
作业布置			
授后小结	在已有二极管知识的基础上引申出电力电子器件，学生容易理解和接受。		

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 电力电子器件的概念和特征

在电气设备或电力系统中，直接承担电能的变化或控制任务的电路被称为主电路（Power Circuit）。由于电力电子器件直接用于处理电能的主电路，因而同处理信息的电子器件相比，它一般具有如下的特征：

- 1) 功率半导体器件（金属电导率 $10^6 \text{ mhos-cm}^{-1}$ ，良绝缘体 $10^{-15} \text{ mhos-cm}^{-1}$ ）。
- 2) 电力电子器件所能处理电功率的大小，也就是其承受电压和电流的能力，使其最重要的参数。其处理电功率的能力小至毫瓦级，大至兆瓦级，一般都远大于处理信息的电子器件。
- 3) 因处理电功率较大，为了减小本身的损耗、提高效率，电力电子器件一般都工作在开关状态。所以，电力电子器件的动态特性（即开关特性）和参数，使电力电子器件特性很重要的方面，有些时候甚至上升为第一位的重要问题。而在模拟电子电路中，电子器件一般都工作在线性放大状态，数字电路中的电子器件虽然一般也工作在开关状态，但其目的是利用开关状态表示不同的信息。正因为如此，也常常讲一个电力电子器件或者外特性像一个开关的几个电力电子器件的组合称为电力电子开关，或称为电力半导体开关。做电路分析时，为简单起见也往往用理想开关来代替。广义上讲，电力电子开关有时候也指由电力电子器件组成的电力系统中起开关作用的电气装置。
- 4) 在实际应用中，电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。由于电力电子器件所处理的电功率较大，因此普通的信息电子电路信号一般不能直接控制电力电子器件的导通或关断，需要一定的中间电路对这些信号进行适当的放大，这就是所谓的电力电子器件的驱动电路。
- 5) 尽管工作在开关状态，但是电力电子器件自身的功率损耗通常仍远大于信息电子器件，以而为了保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏，不仅在器件封装上比较讲究散热设计，而且在其工作时一般都还需要安装散热器。这是因为电力电子器件在导通或者阻断状态下，并不是理想的短路或者断路。器件导通时，其间上有一定的通态压降，阻断时器件上有微小的断态漏电流流过，尽管其数值都很小，但分

别与数值较大的通态电流和断态电压相作用，就形成了电力电子器件的通态损耗和断态损耗。此外还有动态时的开关损耗也是发热的一个很重要的原因。

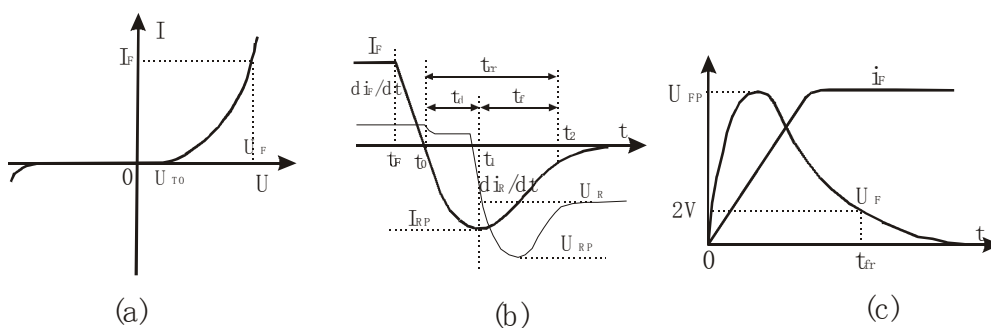
1.1.2 应用电力电子器件的系统组成

1.1.3 电力电子器件的分类：半控型、全控型、不可控器件

1.2 不可控器件—电力二极管

1.2.1 PN 结与电力二极管的工作原理

1.2.2 电力二极管的基本特性



静态特性（与普通二极管相似）、动态特性（电流、电压反向问题，电流过冲最大值 I_{RP} 、电压过冲最大值 U_{RP} 、延迟时间 t_d 、电流下降时间 t_f 、反向恢复时间 $t_{rr}=t_d+t_f$ ）

正偏压时，正向偏压降约为 1V 左右；导通时，二极管看成是理想开关元件，因为它的过渡时间与电路的瞬时过程相比要小的得多，但在关断时，它需要一个反向恢复的时间（reversr-recovery time）以清除过剩载流子。

1.2.3 电力二极管的主要参数

正向平均电流 $I_{F(AV)}$ —在规定的管壳温度和散热条件下，所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值

正向压降 U_F —指电力二极管在正向电流导通时二极管上的正向压降

最高工作结温 T_{JM} —在 PN 结不受损坏的前提下，二极管所能承受的最高平均温度。一般在 125-175℃ 范围内。

反向恢复时间 t_{rr} —二极管由导通到截止、并恢复到自然阻断状态所需的时间。

浪涌电流 I_{FSM} —指电力二极管所能承受的最大的连续一个或几个工频周期的过电流。

1.2.4 电力二极管的主要类型

正偏压时，正向偏压降约为 1V 左右；导通时，二极管看成是理想开关元件，因为它的过渡时间与电路的瞬时过程相比要小的得多，但在关断时，它需要一个反向恢复的时间（reverser-recovery time）以清除过剩载流子。

1. 普通二极管 Line-frequency Diodes——正向压降可以设计的尽可能的低，但是如果 t_{rr} 较大用于线性频率的系统，耐压几千伏，电流几千安。
2. 快恢复二极管 Fast-recovery Diodes——用于变频电路， t_{rr} 只有几个微秒，功率二极管的耐压为几百伏，可以导通几百安培，反向恢复时间短 $<50\text{ns}$ ，正向压降低 0.9V 左右，反向耐压一般在 1200V 以内
3. 肖特基二极管 Schottky Diodes——导通压降只有 0.3V（forward voltage drop）反压为 50–100V。反向恢复时间更短，10~40ns，不会有明显的电压过冲。缺点是当提高反向耐压时，正向压降也会提高，多用于 200V 以下的低压场合；反向漏电流也很大。

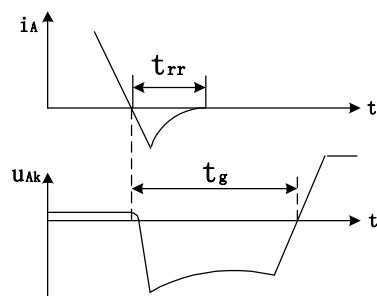
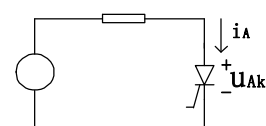
机电工程系教案首页及教学过程设计

授课日期	第 <u>3</u> 周 星期 <u>二</u> 第 <u>1-2</u> 节	教学用时	2 学时
教学内容 (学习情境)	晶闸管的基本结构与工作原理 晶闸管的基本特征、主要参数		
教学目的 及要求	理解和掌握晶闸管的工作机理、电气特征和主要参数		
教学重点	晶闸管的工作机理、电气特征和主要参数		
教学难点	晶闸管的工作机理、电气特征和主要参数		
本次课类型	☒ 理论课 ☒ 实验课 ☐ 实训课 ☐ 习题课 ☐ 其它		
教学方法	☒ 教、学、做一体 ☐ 传统教学 ☐ 案例教学 ☐ 小组教学 ☐ 启发式教学 ☐ 课堂讨论教学 ☐ 其它		
教学手段	☒ 多媒体 ☒ 电脑机房 ☒ 仿真软件 ☐ 校内实训条件 ☐ 校内实训条件 ☐ 校外实训条件 ☐ 其它		
教学过程设计 (含引入新课、 组织教学、启发 思维等，将授课 内容按逻辑层 次，有序地进行 设计编排)	复习上次课程的教学内容（5 分钟） 晶闸管的结构与工作原理（25 分钟） 晶闸管的基本特征（20 分钟） 晶闸管的主要参数（20 分钟） 晶闸管的派生器件（15 分钟） 答疑（5 分钟）		
作业布置	晶闸管的导通与关断条件；计算通过晶闸管波形的有效值和平均值。		
授后小结	电力电子器件是电力电子技术的物质基础和关键技术，而晶闸管是电力电子器件的发展源头，要学生重点掌握。		

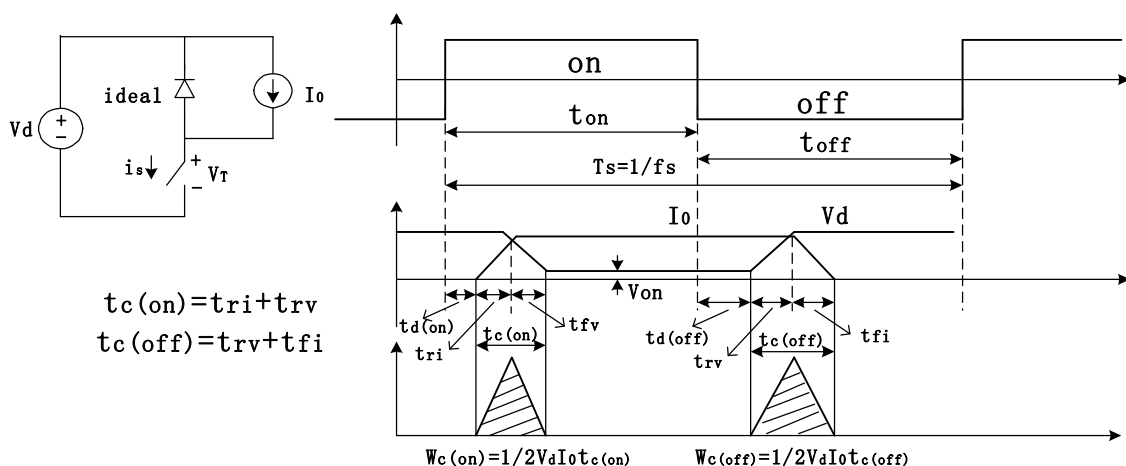
1.3 半控型器件——晶闸管

通常，晶闸管的正向阻断电压 (blocking voltage) 是相同的，根据不同的应用对象，有各种不同的晶闸管。除了电压电流的额定值外， t_q 、正向导通压降、导通时的电流上升率 di/dt ，关断时的电压上升率 dv/dt 等，都是要考虑的特性。

- 相控晶闸管 Phase-control Thyristor，有时称作整流晶闸管 Converter thyristor，用于主要用于整流器。器件圆盘达到 10cm。平均电流 4000A 或更高，阻断电压 5-7KV，通态压降从 1.5V (1000V 器件) 到 30V (对 5-7KV 晶闸管)
- 逆变晶闸管 Inverter-grade thyristor，导通压降低， t_q (考虑了 t_{rr} 的可靠系数) 小，额定值达到 2500V/1500A， t_q 一般在几个微秒到 100 微秒，这取决于阻断电压的而定值及导通电压降。
- 光控晶闸管 Light-cutivated thyristor：级联方式用于高压系统，易于触发，4KV/3KA。



1.3.1 理想的可控开关元件



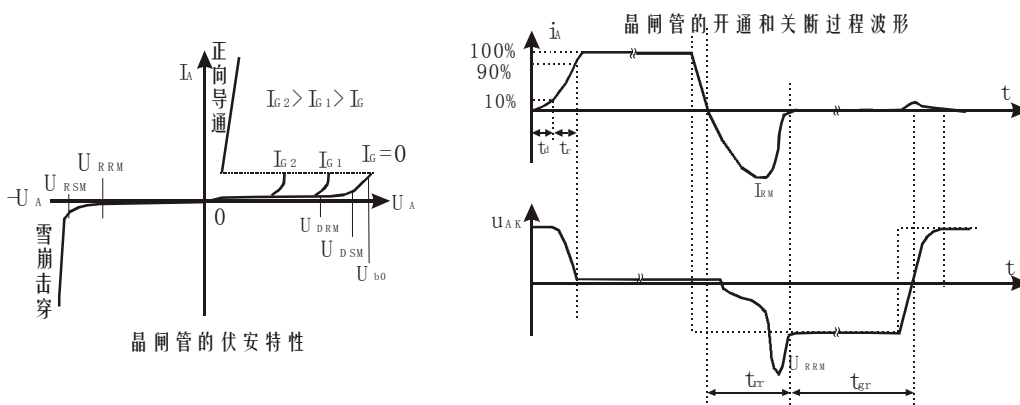
所希望的开关特性应该是：

- 关断时的漏电流较小，导通时 V_{on} 小。
- 很高的正反向阻断电压的能力，这可减少元件的串联，并因此而减少相应保护电路的功率损耗。
- 很大的电流导通能力。这可减少元件并联。

- 较短的导通和关断时间，这可提高开关频率。
- 导通电阻具有正的温度特性，这可保证并联的元件能共同分担总电流。
- 较小的控制功率。
- 具有阻止电压和电流上升率的能力，这样就可以不使用外部 Snubber 电路保护。
- 具有较高的 dv/dt , di/dt 额定值。

1.3.2 晶闸管的结构与工作原理

1.3.3 晶闸管的基本特性（静态、动态、）



阳极电流从零上升到稳态值的 10% 这段时间称为延迟时间 t_d ，阳极电流从 10% 上到稳态值的 90% 所需的时间称为上升时间 t_r ，开通时间 t_{gt} 定义为两者之和，即 $t_{gt} = t_d + t_r$ 。普通晶闸管的延迟时间为 0.5 s，上升时间为 0.5~3 s。其延迟时间随门极电流的增大而减小。上升时间除了反映晶闸管本身特性外，还受到外电路电感的严重影响。延迟时间和上升时间还与阳极电压的大小有关。提高阳极电压可以增大晶体管 VT 的电流增益，从而使正反馈过程加速，延迟时间和上升时间都可显著缩短。

1.3.4 晶闸管的主要参数

1. 电压定额

- (1) 断态重复峰值电压 U_{DRM} 断态重复峰值电压是在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的正向峰值电压。国标规定重复频率为 50Hz，每次持续时间不超过 10ms。规定断态重复峰值电压 U_{SRM} 为断态不重复峰值电压（即断态最大瞬时电压） U_{DSM} 的 90%。断态不重复峰值电压应低于正向转折电压 U_{bo} ，所留余量大小

由生产厂家自行规定。

- (2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} 反向重复峰值电压是在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的反向峰值电压。规定反向重复峰值电压 U_{RRM} 为反向不重复峰值电压（即反向最大瞬态电压） U_{RSM} 的 90%。反向不重复峰值电压应低于反向击穿电压，所留余量大小由生产厂家自行规定。
- (3) 通态（峰值）电压 U_{TM} 这是晶闸管通以某一规定倍数的额定通态平均电流时的瞬态峰值电压。

通常取晶闸管的 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的标值作为该器件的额定电压。选用时，额定电压要留有一定裕量，一般取额定电压为正常工作时晶闸管所承受峰值电压的 2~3 倍。

2. 电流定额

- (1) 通态平均电流 $I_T(AV)$ 国标规定通态平均电流为晶闸管在环境温度为 40°C 和规定的冷却状态下，稳定结温不超过额定结温时所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。这也是标称其额定电流的参数。同电力二极管一样，这个参数是按照正向电流造成的器件本身的通态损耗的发热效应来定义的。因此在使用时，同样应按照实际波形的电流与通态平均电流所造成的发热效应相等，即有效值相等的原则来选取晶闸管的此项电流定额，并应留一定的裕量。一般取其通态平均电流为按此原则所得计算结果的 1.5~2 倍。
- (2) 维持电流 I_H 维持电流是指使晶闸管维持导通所必需的最小电流，一般为几十到几百毫安。 I_H 与结温有关，结温越高，则 I_H 越小。
- (3) 擎住电流 I_L 擎住电流是晶闸管刚从断态转入通态并移除触发信号后，能维持导通所需的最小电流。对同一晶闸管来说，通常 I_L 约为 I_H 的 2~4 倍。

3. 动态参数

除了开通时间 t_{gt} 和关断时间 t_q 外，还有：

- (1) 断态电压临界上升率 du/dt 这是指在额定结温和门极开路的情况下，不导致晶闸管从断态到通态转换的外加电压最大上升率。如果在断态的晶闸管两端所施加的电压具有正向的上升率，则在逐段状态下相当于一个电容的 J2 结会有充电电

流流过，称之为位移电流。此电流流经 J3 结时，起到类似门极触发电流的作用。如电压上升率过大，就会使晶闸管误导通。

- (2) 通态电流临界上升率 di/dt 这是指在规定条件下，晶闸管能承受而无有害影响的最大通态电流上升率。如果电流上升太快，则晶闸管刚一开通，便会有很大的电流集中在门极附近的小区域内，从而造成局部过热而使晶闸管损坏。

1.3.5 晶闸管的派生器件

1. 快速晶闸管

可应用于 400Hz 和 10kHz 以上的斩波或逆变电路中，快速晶闸管的开关时间以及 du/dt 、 di/dt 的耐量都有了明显的改善。从关断时间来看，普通晶闸管一般为数百微秒，快速晶闸管为数十微秒，而高频晶闸管则为 10 μ s 左右。与普通晶闸管相比，高频晶闸管的不足在于其电压和电流定额都不易做高。

2. 双向晶闸管

双向晶闸管可以认为是一对反并联结的普通晶闸管的集成。它有两个主电极 T1 和 T2，一个门极 G。门极使器件在主电极的正反两方向均可触发导通。由于双向晶闸管通常用在交流电路中，因此不用平均值而用有效值来表示其额定电流值。

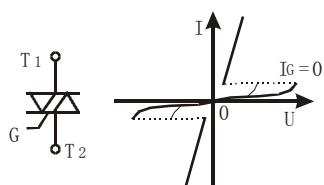
3. 逆导晶闸管

逆导晶闸管是将晶闸管反并连一个二极管制作在同一管芯上的功率集成器件，这种器件不具有承受反向电压的能力，一旦承受反向电压即开通。与普通晶闸管相比，逆导晶闸管具有正向压降小、关断时间短、高温特性好、额定结温高等优点，可用于不需要阻断反向电压的电路中。逆导晶闸管的额定电路有两个，一个使晶闸管电流，一个是与之反并联的二极管的电流。

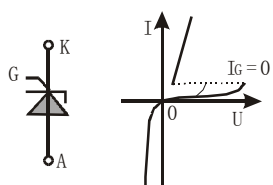
4. 光控晶闸管

光控晶闸管又称光触发晶闸管，是利用一定波长的光照信号触发导通的晶闸管。小功率光控晶闸管只有阳极和阴极两个端子，大功率光控晶闸管则还带有光缆，光缆上装有作为触发光源的发光二极管或半导体激光器。由于采用光触发保证了主电路与控制电路之

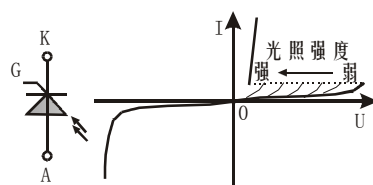
间的绝缘，而且可以避免电磁干扰的影响，因此光控晶闸管目前在高压大功率的场合，如高压直流输电和高压核聚变装置中，占据重要的地位。



双向晶闸管



逆导晶闸管



光控晶闸管