



# 第9章 电力电子器件应用的共性问题

9.1 电力电子器件的驱动

9.2 电力电子器件的保护

9.3 电力电子器件的串联使用和并联使用

本章小结



# 9.1 电力电子器件器件的驱动

## 9.1.1 电力电子器件驱动电路概述

## 9.1.2 晶闸管的触发电路

## 9.1.3 典型全控型器件的驱动电路

## ● 驱动电路——主电路与控制电路之间的接口

- ✦ 使电力电子器件工作在较理想的开关状态，缩短开关时间，减小开关损耗。
- ✦ 对装置的运行效率、可靠性和安全性都有重要的意义。
- ✦ 一些保护措施也往往设在驱动电路中，或通过驱动电路实现。

## ● 驱动电路的基本任务：

- ✦ 按控制目标的要求施加开通或关断的信号。
- ✦ 对半控型器件只需提供开通控制信号。
- ✦ 对全控型器件则既要提供开通控制信号，又要提供关断控制信号。

驱动电路还要提供控制电路与主电路之间的**电气隔离**环节，一般采用光隔离或磁隔离。

- 光隔离一般采用光耦合器
- 磁隔离的元件通常是**脉冲变压器**

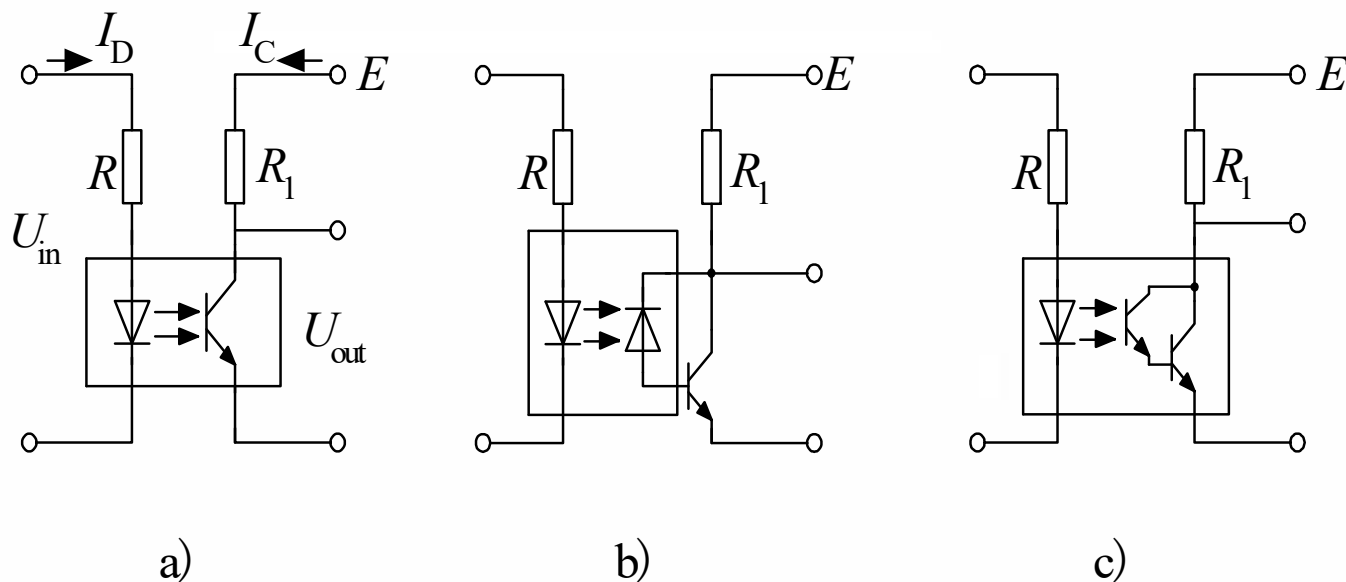


图9-1 光耦合器的类型及接法

a) 普通型 b) 高速型 c) 高传输比型

## ● 分类

- ✦ 按照驱动信号的性质分，可分为**电流驱动型**和**电压驱动型**。
- ✦ 驱动电路具体形式可为**分立元件**的，但目前的趋势是采用**专用集成驱动电路**。
  - 双列直插式集成电路及将光耦隔离电路也集成在内的混合集成电路。
  - 为达到参数最佳配合，首选所用器件生产厂家专门开发的集成驱动电路。

## 晶闸管的触发电路

⊕ **作用：** 产生符合要求的门极触发脉冲，保证晶闸管在需要的时刻由阻断转为导通。

⊕ **晶闸管触发电路应满足下列要求：**

- 脉冲的宽度应保证晶闸管可靠导通。
- 触发脉冲应有足够的幅度。
- 不超过门极电压、电流和功率定额，且在可靠触发区域之内。
- 有良好的抗干扰性能、温度稳定性及与主电路的电气隔离。

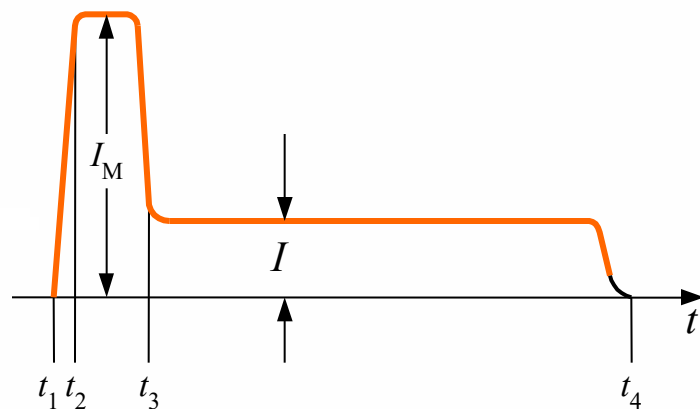


图9-2 理想的晶闸管触发脉冲电流波形

$t_1 \sim t_2$ —脉冲前沿上升时间 ( $< 1\mu\text{s}$ )

$t_1 \sim t_3$ —强脉宽度

$I_M$ —强脉冲幅值 ( $3I_{GT} \sim 5I_{GT}$ )

$t_1 \sim t_4$ —脉冲宽度  $I$ —脉冲平顶幅值 ( $1.5I_{GT} \sim 2I_{GT}$ )

## 9.1.2 晶闸管的触发电路

### ● 常见的晶闸管触发电路

- ✦  $V_1$ 、 $V_2$  构成脉冲放大环节。
- ✦ 脉冲变压器 TM 和附属电路构成脉冲输出环节。
- ✦  $V_1$ 、 $V_2$  导通时，通过脉冲变压器向晶闸管的门极和阴极之间输出触发脉冲。
- ✦  $VD_1$  和  $R_3$  是为了  $V_1$ 、 $V_2$  由导通变为截止时脉冲变压器 TM 释放其储存的能量而设。

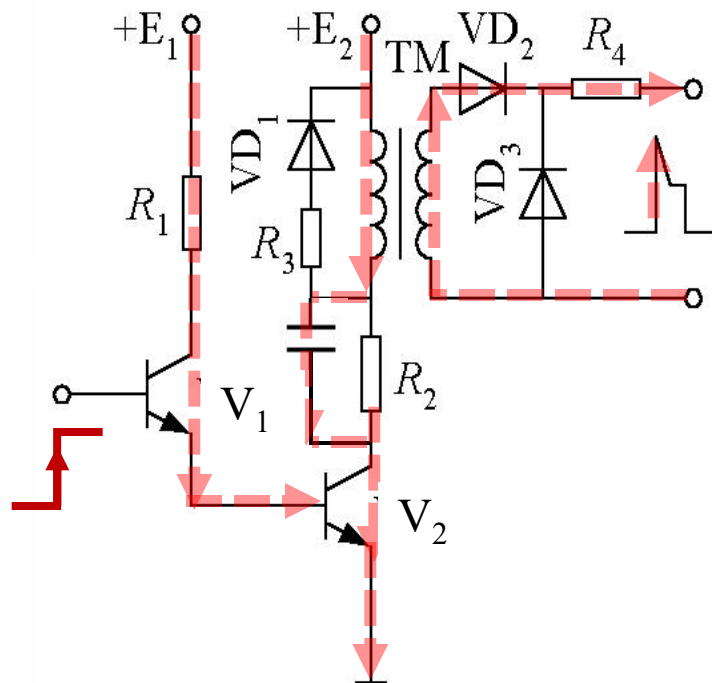


图9-3 常见的晶闸管触发电路

- ✦  $V_1$ 、 $V_2$  构成脉冲放大环节。
- ✦ 脉冲变压器 TM 和附属电路构成脉冲输出环节。
- ✦  $V_1$ 、 $V_2$  导通时，通过脉冲变压器向晶闸管的门极和阴极之间输出触发脉冲。
- ✦  $VD_1$  和  $R_3$  是为了  $V_1$ 、 $V_2$  由导通变为截止时脉冲变压器 TM 释放其储存的能量而设。

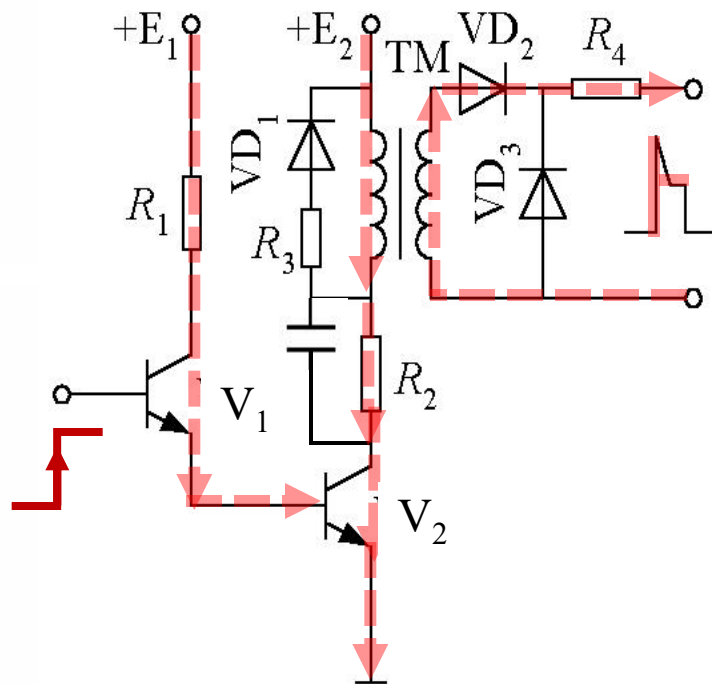


图9-3 常见的晶闸管触发电路



- ✦  $V_1$ 、 $V_2$  构成脉冲放大环节。
- ✦ 脉冲变压器  $TM$  和附属电路构成脉冲输出环节。
- ✦  $V_1$ 、 $V_2$  导通时，通过脉冲变压器向晶闸管的门极和阴极之间输出触发脉冲。
- ✦  $VD_1$  和  $R_3$  是为了  $V_1$ 、 $V_2$  由导通变为截止时脉冲变压器  $TM$  释放其储存的能量而设。

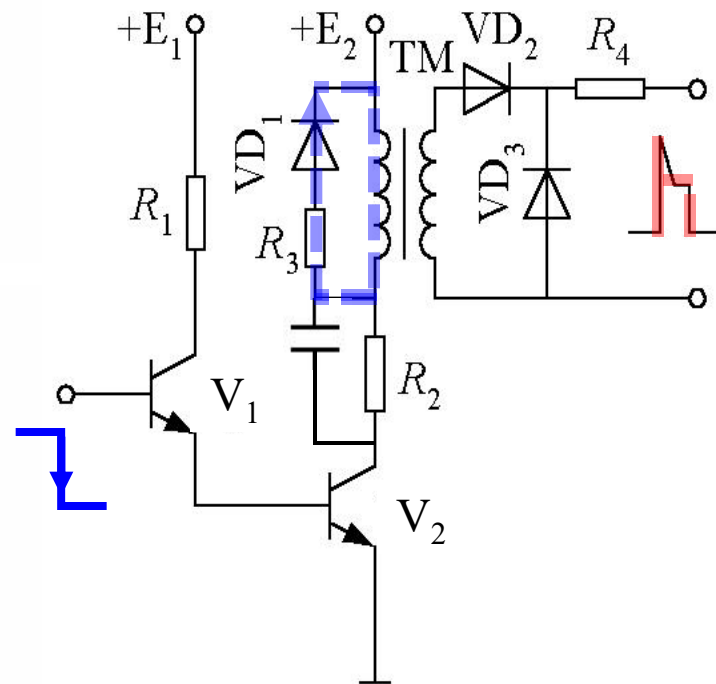


图9-3 常见的晶闸管触发电路

## 1) 电流驱动型器件的驱动电路

### (1) GTO

- GTO的**开通控制**与普通晶闸管相似。但对脉冲前沿的幅值和陡度要求高，且一般需在整個导通期间施加正门极电流。
- GTO**关断控制**需施加负门极电流。对其幅值和陡度的要求更高，关断后还应在门阴极施加约5V的负偏压以提高抗干扰能力。
- GTO驱动电路通常包括**开通驱动电路**、**关断驱动电路**和**门极反偏电路**三部分，可分为**脉冲变压器耦合式**和**直接耦合式**两种类型。

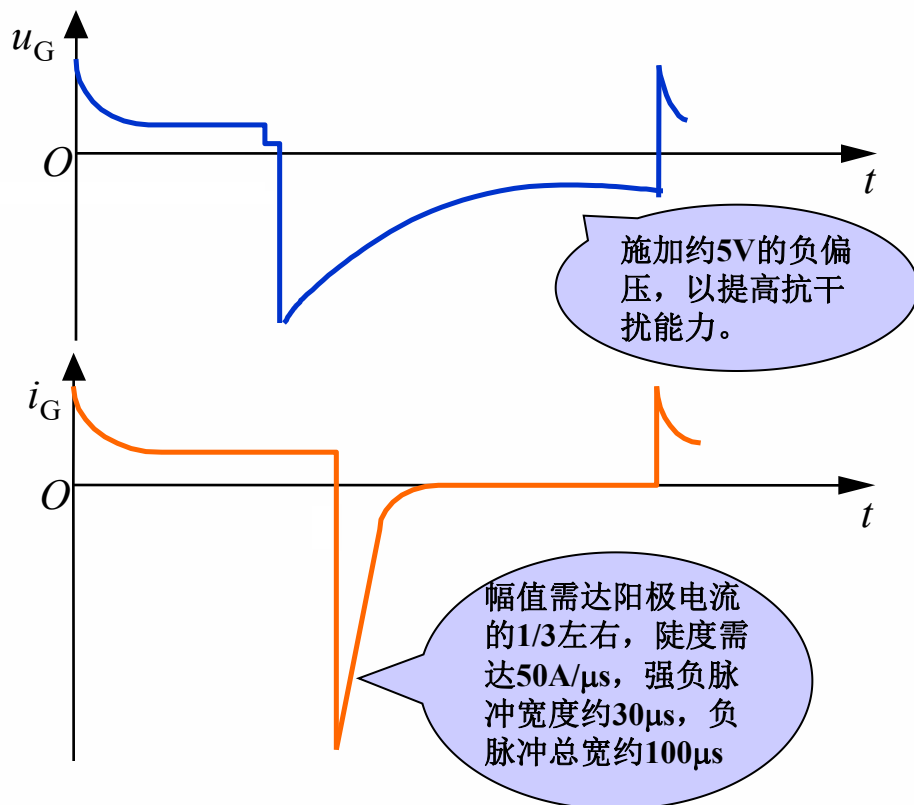


图9-4 推荐的GTO门极电压电流波形

## 直接耦合式驱动电路

✓ 可避免电路内部的相互干扰和寄生振荡，可得到较陡的脉冲前沿；缺点是功耗大，效率较低。

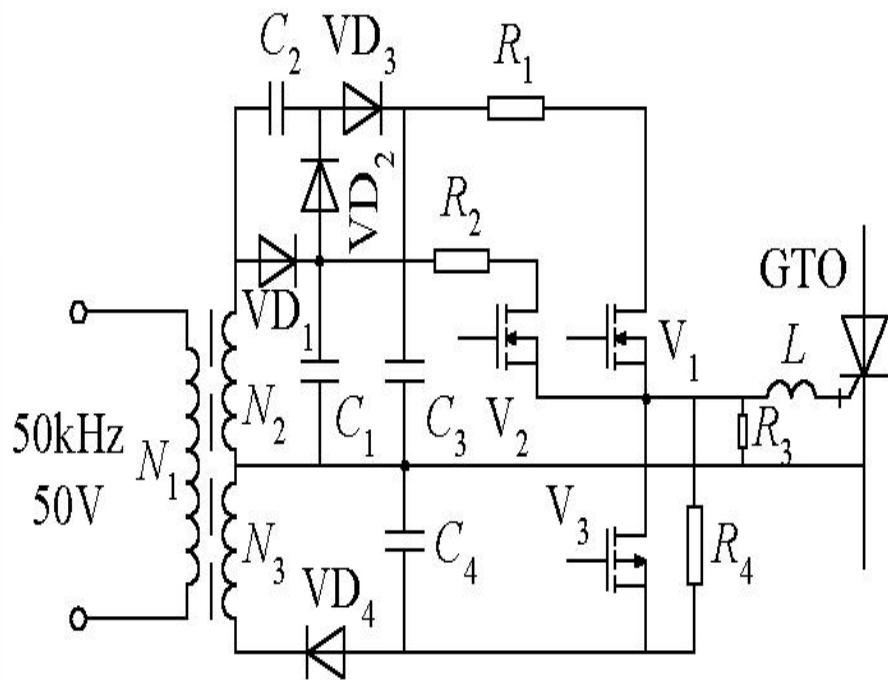


图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路

## 直接耦合式驱动电路

✓ 电路的电源由高频电源经二极管整流后提供， $VD_1$ 和 $C_1$ 提供+5V电压， $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 构成倍压整流电路提供+15V电压， $VD_4$ 和 $C_4$ 提供-15V电压。

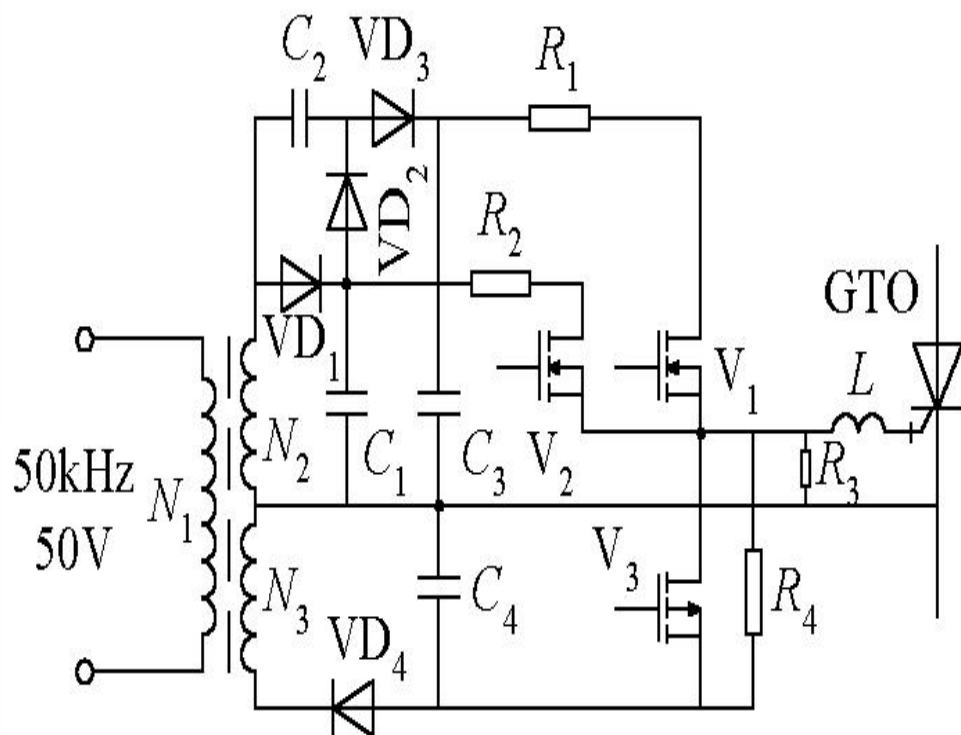


图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路

## 直接耦合式驱动电路

✓ 电路的电源由高频电源经二极管整流后提供， $VD_1$ 和 $C_1$ 提供+5V电压， $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 构成倍压整流电路提供+15V电压， $VD_4$ 和 $C_4$ 提供-15V电压。

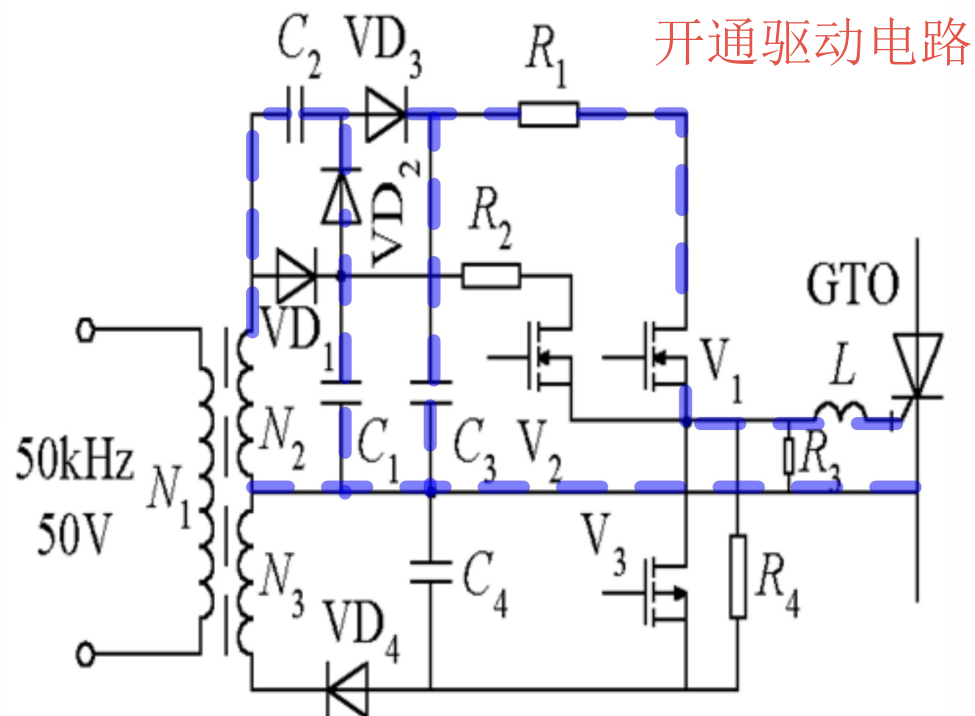


图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路

## 直接耦合式驱动电路

✓ 电路的电源由高频电源经二极管整流后提供， $VD_1$ 和 $C_1$ 提供+5V电压， $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 构成倍压整流电路提供+15V电压， $VD_4$ 和 $C_4$ 提供-15V电压。

✓  $V_1$ 开通时，输出正强脉冲；

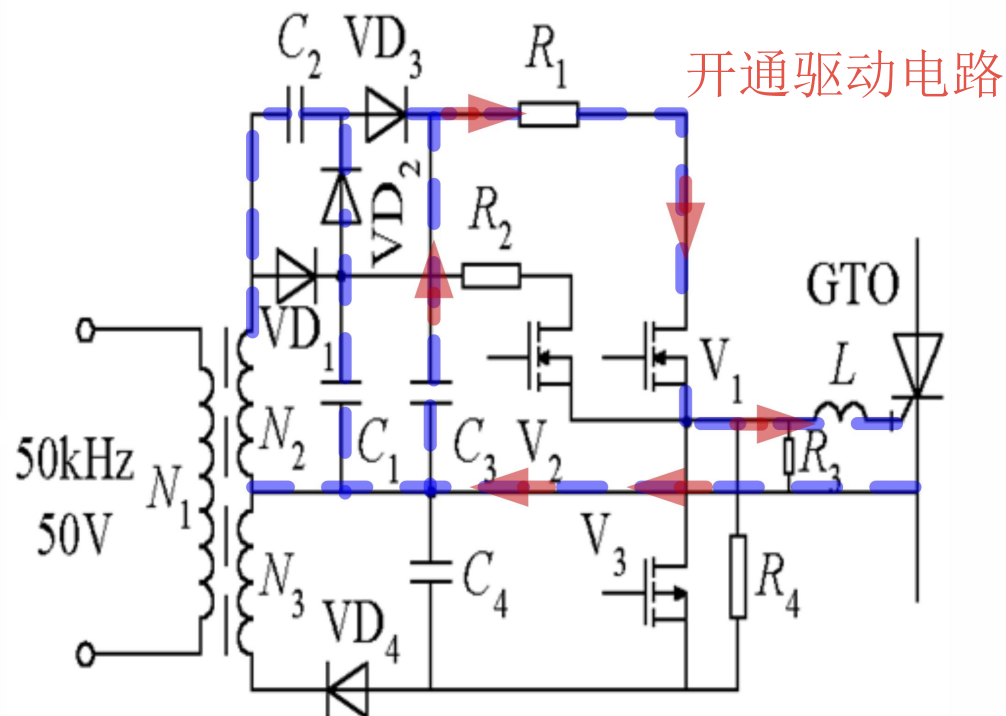
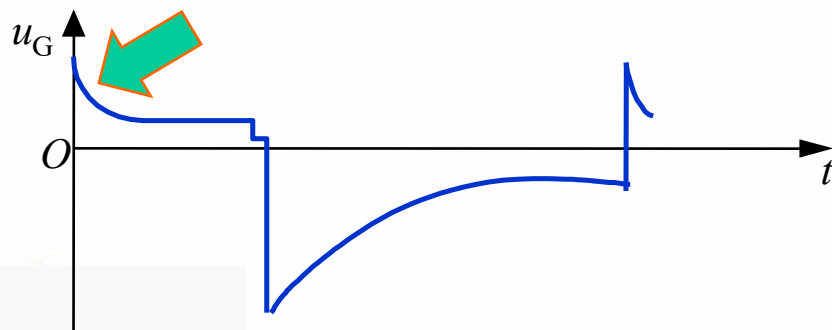


图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路



## 直接耦合式驱动电路

✓ 电路的电源由高频电源经二极管整流后提供， $VD_1$ 和 $C_1$ 提供+5V电压， $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 构成倍压整流电路提供+15V电压， $VD_4$ 和 $C_4$ 提供-15V电压。

✓  $V_1$ 开通时，输出正强脉冲；  
 $V_2$ 开通时，输出正脉冲平顶部分；

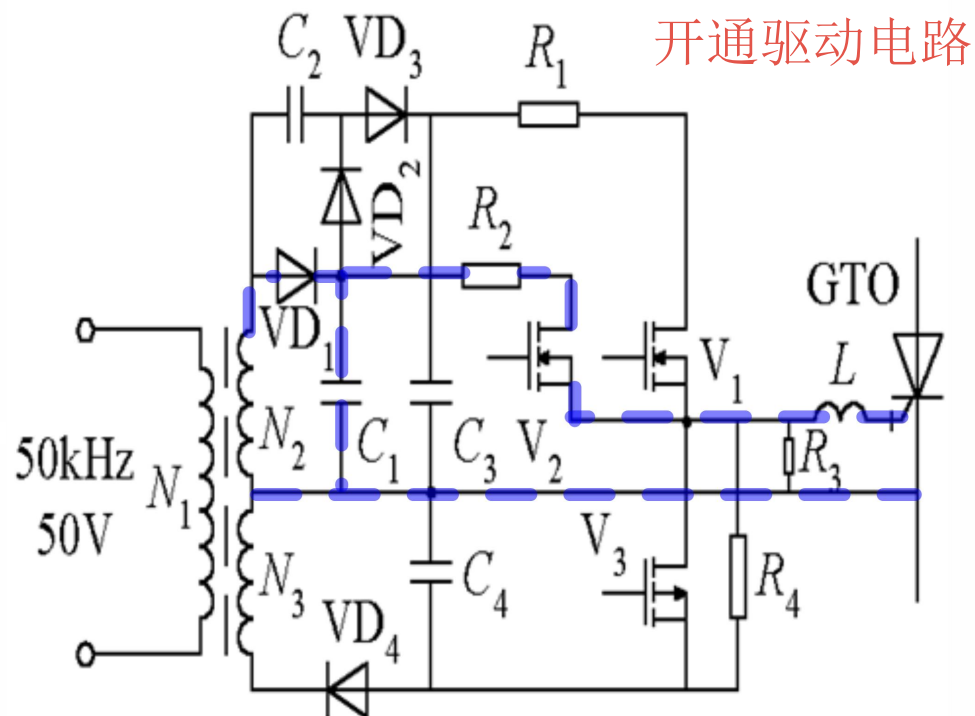
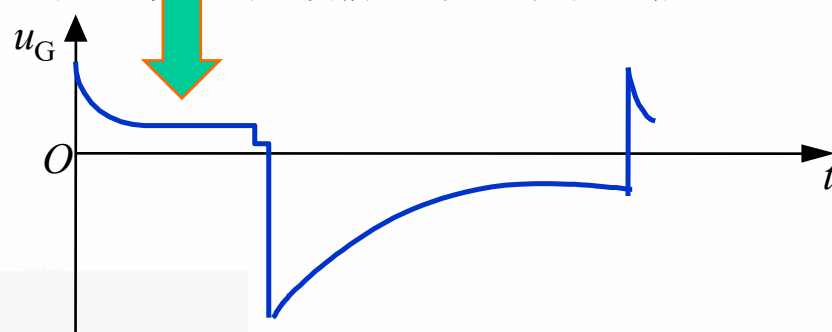


图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路



## 直接耦合式驱动电路

✓ 电路的电源由高频电源经二极管整流后提供， $VD_1$ 和 $C_1$ 提供+5V电压， $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 构成倍压整流电路提供+15V电压， $VD_4$ 和 $C_4$ 提供-15V电压。

✓  $V_1$ 开通时，输出正强脉冲；  
 $V_2$ 开通时，输出正脉冲平顶部分；

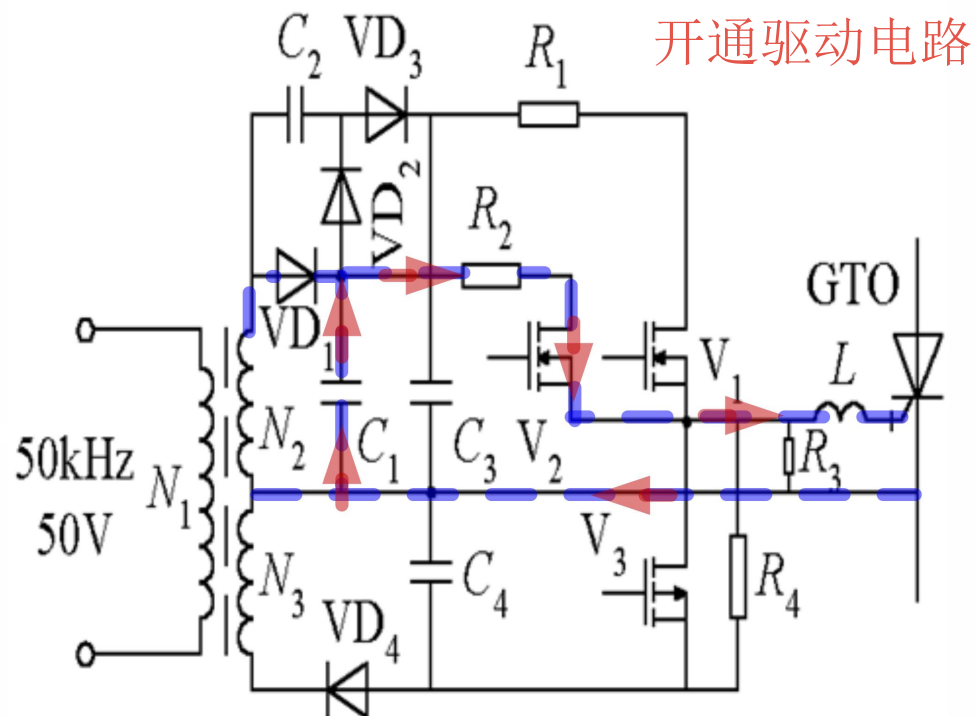
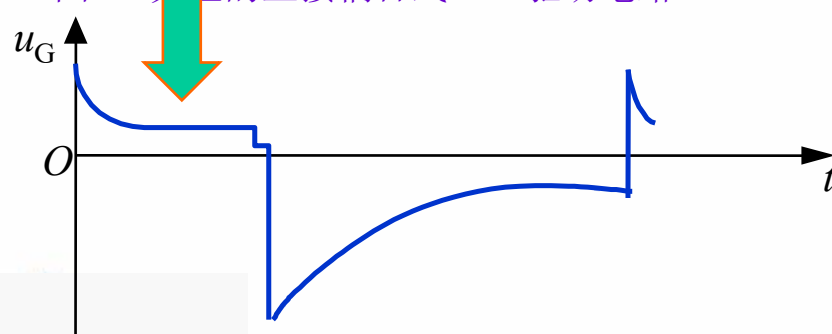


图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路





## 直接耦合式驱动电路

✓ 电路的电源由高频电源经二极管整流后提供， $VD_1$ 和 $C_1$ 提供+5V电压， $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 构成倍压整流电路提供+15V电压， $VD_4$ 和 $C_4$ 提供-15V电压。

✓  $V_1$  开通时，输出正强脉冲；  
 $V_2$  开通时，输出正脉冲平顶部分；

✓  $V_2$ 关断而 $V_3$ 开通时输出负脉冲； $V_3$ 关断后 $R_3$ 和 $R_4$ 提供门极负偏压。

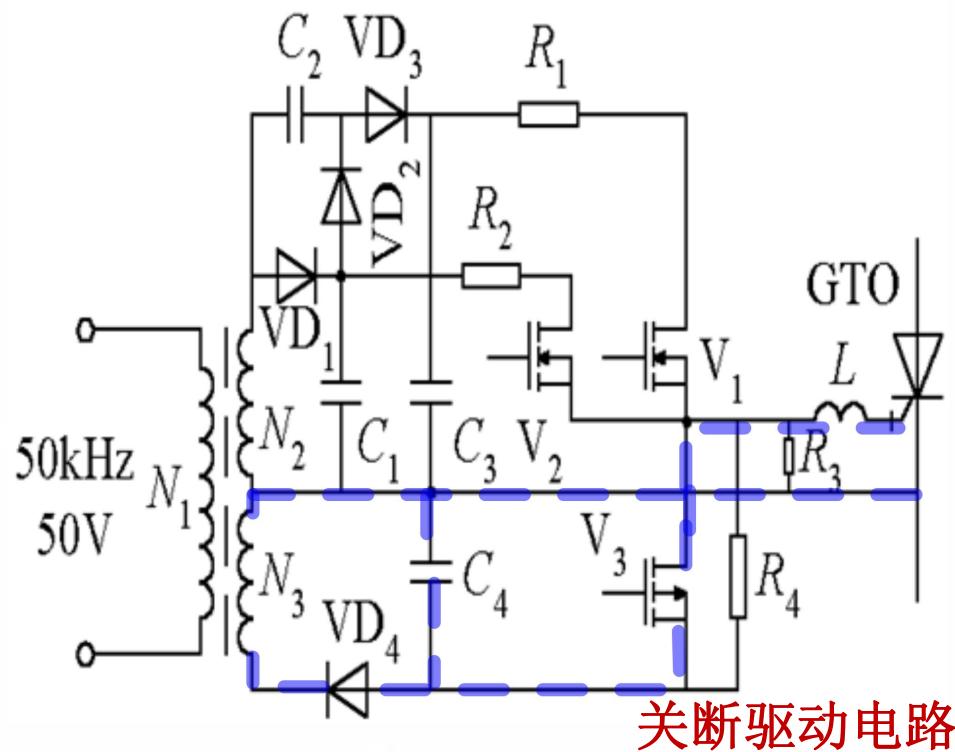
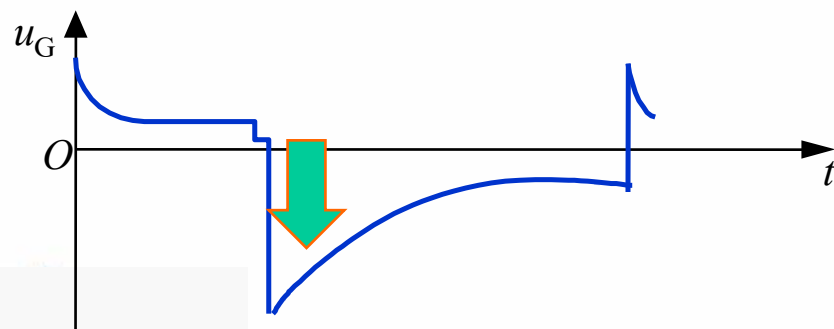


图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路



## 直接耦合式驱动电路

- ✓ 电路的电源由高频电源经二极管整流后提供， $VD_1$ 和 $C_1$ 提供+5V电压， $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 构成倍压整流电路提供+15V电压， $VD_4$ 和 $C_4$ 提供-15V电压。
- ✓  $V_1$ 开通时，输出正强脉冲； $V_2$ 开通时，输出正脉冲平顶部分；
- ✓  $V_2$ 关断而 $V_3$ 开通时输出负脉冲； $V_3$ 关断后 $R_3$ 和 $R_4$ 提供门极负偏压。

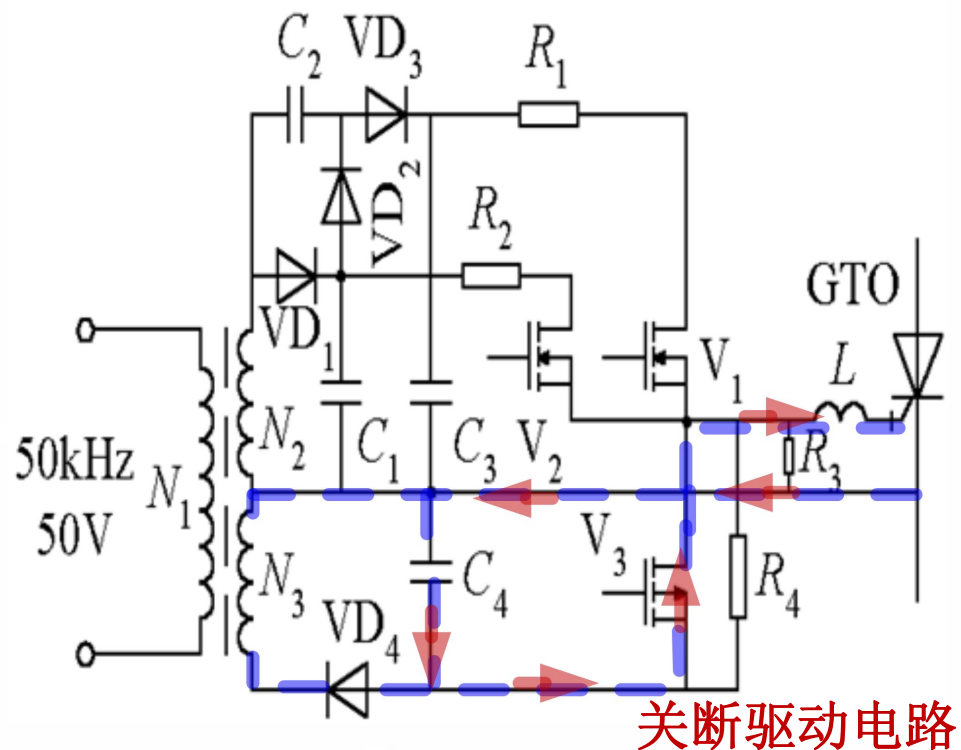
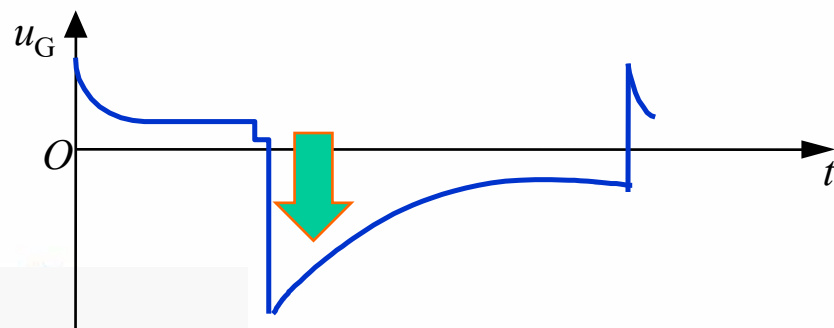
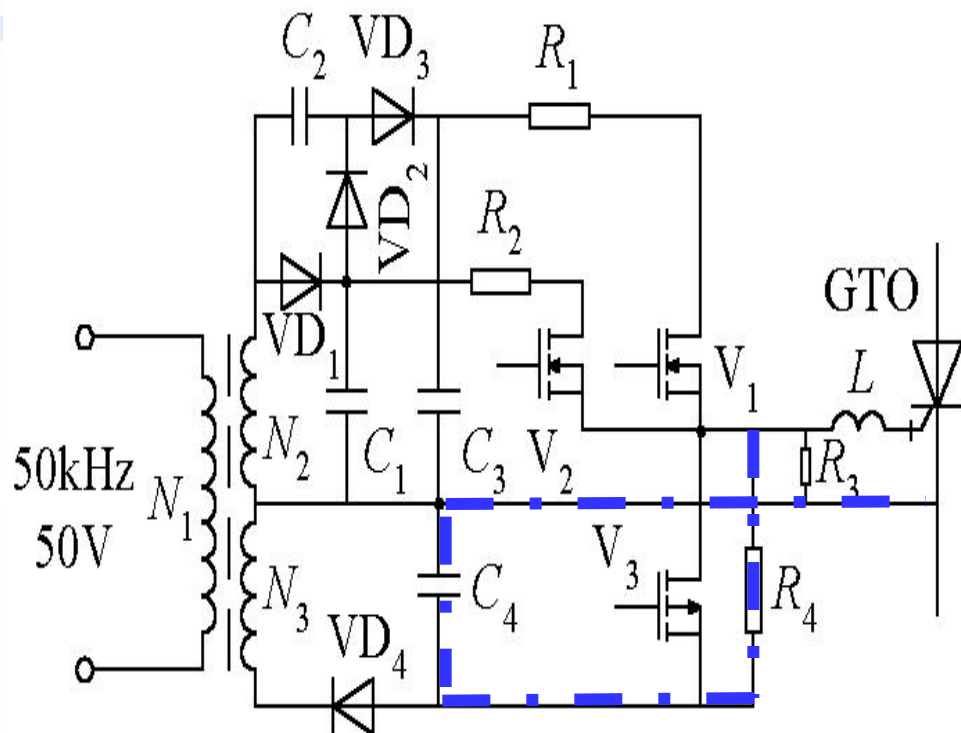


图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路



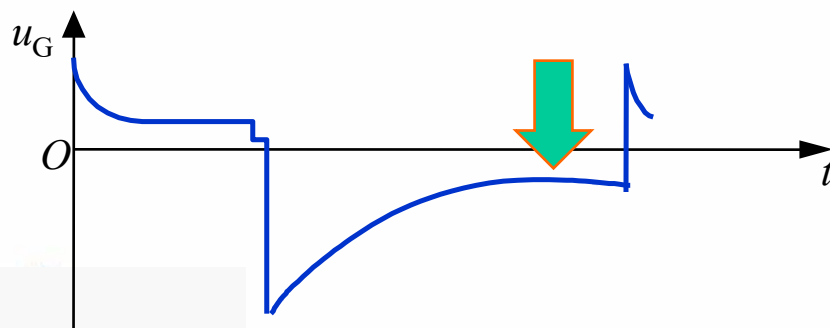
## 直接耦合式驱动电路

- ✓ 电路的电源由高频电源经二极管整流后提供， $VD_1$ 和 $C_1$ 提供+5V电压， $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 构成倍压整流电路提供+15V电压， $VD_4$ 和 $C_4$ 提供-15V电压。
- ✓  $V_1$ 开通时，输出正强脉冲； $V_2$ 开通时，输出正脉冲平顶部分；
- ✓  $V_2$ 关断而 $V_3$ 开通时输出负脉冲； $V_3$ 关断后 $R_3$ 和 $R_4$ 提供门极负偏压。



门极反偏电路

图9-5 典型的直接耦合式GTO驱动电路



## (2) GTR

- 开通驱动电流应使GTR处于准饱和导通状态，使之不进入放大区和深饱和区。
- 关断GTR时，施加一定的负基极电流有利于减小关断时间和关断损耗。
- 关断后同样应在基射极之间施加一定幅值（6V左右）的负偏压。

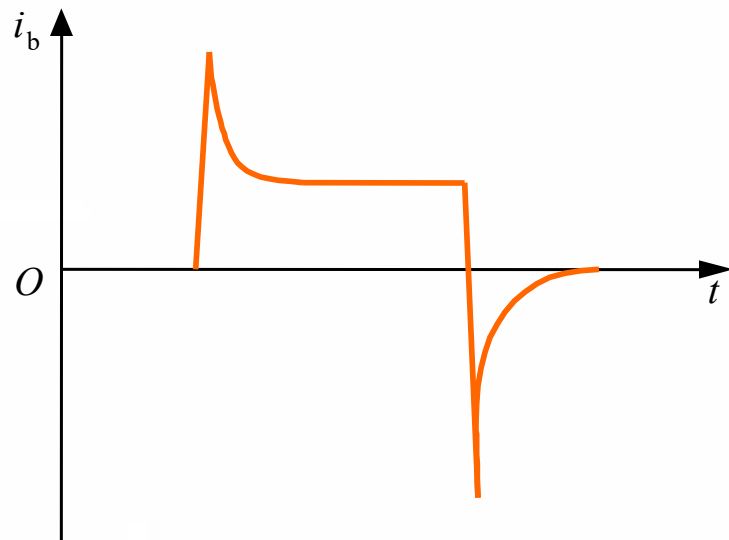


图9-6 理想的GTR基极驱动电流波形

- GTR的一种驱动电路，包括电气隔离和晶体管放大电路两部分。

✓ VD2和VD3构成贝克箝位电路，是一种抗饱和电路，可使GTR导通时处于临界饱和状态；

✓ C2为加速开通过程的电容，开通时R5被C2短路，这样可以实现驱动电流的过冲，并增加前沿的陡度，加快开通

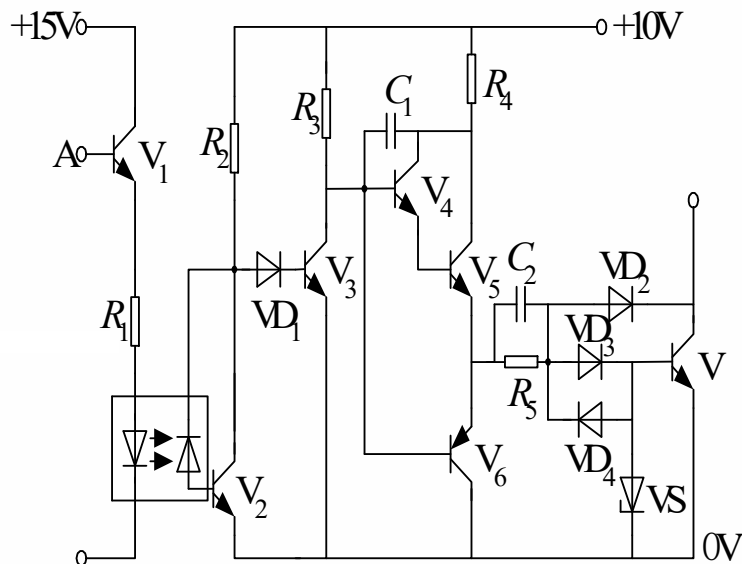


图9-7 GTR的一种驱动电路

- 驱动GTR的集成驱动电路中，THOMSON公司的UAA4002和三菱公司的M57215BL较为常见。

### 2) 电压驱动型器件的驱动电路（应用最多）

- 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件。
- 为快速建立驱动电压，要求驱动电路输出电阻小。
- 使MOSFET开通的驱动电压一般10~15V，使IGBT开通的驱动电压一般15 ~ 20V。
- 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5 ~ -15V）有利于减小关断时间和关断损耗。
- 在栅极串入一只低值电阻 $R_G$ 可以减小寄生振荡。

● **电气隔离和晶体管放大电路**两部分。



■ 专为驱动电力MOSFET而设计的混合集成电路有三菱公司的M57918L，其输入信号电流幅值为16mA，输出最大脉冲电流为+2A和-3A，输出驱动电压+15V和-10V。



## ■ 电压驱动型器件的驱动电路

- ◆ 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件
- ◆ 为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- ◆ 使电力MOSFET开通的栅源极间驱动电压一般取10~15V，使IGBT开通的栅射极间驱动电压一般取15~20V
- ◆ 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5~-15V）有利于减小关断时间和关断损耗
- ◆ 在栅极串入一只低值电阻（数十欧左右）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

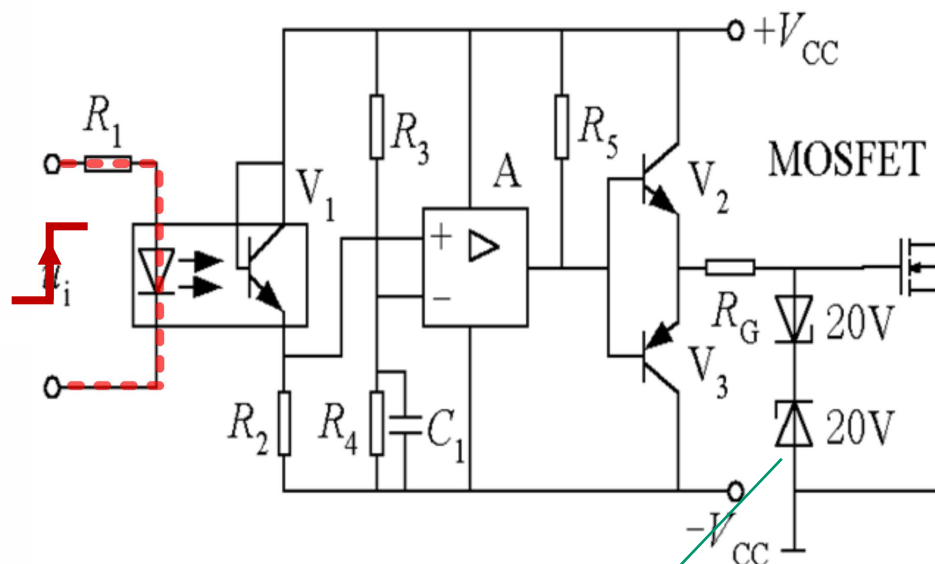


图9-8 电力MOSFET的一种驱动电路

电压钳位在 $\pm 20V$



## ■ 电压驱动型器件的驱动电路

- ◆ 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件
- ◆ 为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- ◆ 使电力MOSFET开通的栅源极间驱动电压一般取10~15V，使IGBT开通的栅射极间驱动电压一般取15~20V
- ◆ 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5~-15V）有利于减小关断时间和关断损耗
- ◆ 在栅极串入一只低值电阻（数十欧左右）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

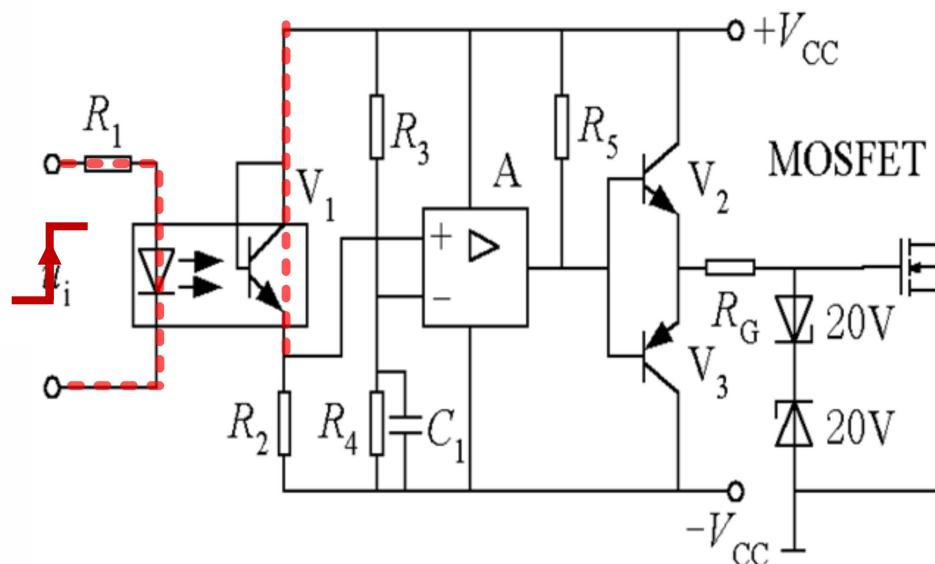


图9-8 电力MOSFET的一种驱动电路

● 当有输入信号时 $V_1$ 导通

## ■ 电压驱动型器件的驱动电路

- ◆ 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件
- ◆ 为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- ◆ 使电力MOSFET开通的栅源极间驱动电压一般取10~15V，使IGBT开通的栅射极间驱动电压一般取15~20V
- ◆ 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5~-15V）有利于减小关断时间和关断损耗
- ◆ 在栅极串入一只低值电阻（数十欧左右）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

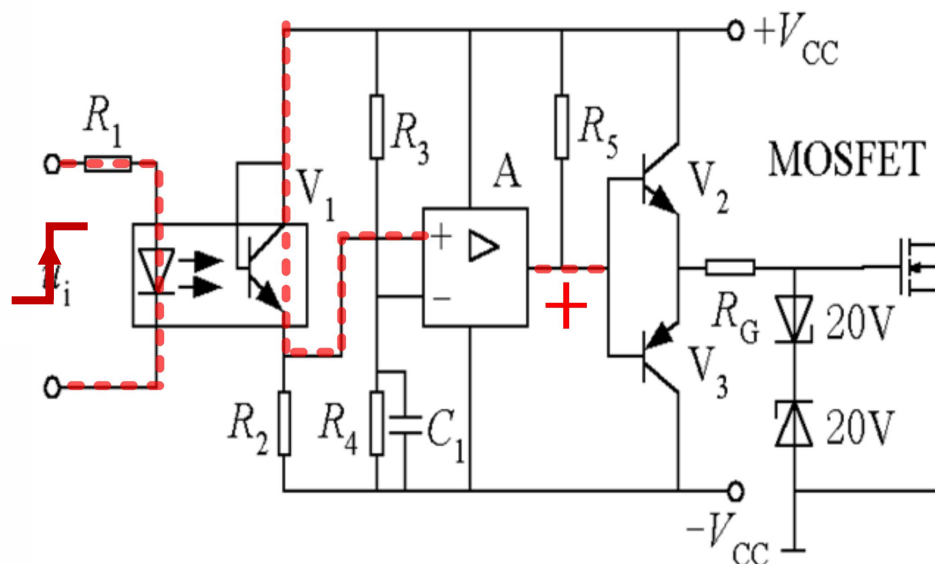


图9-8 电力MOSFET的一种驱动电路

当有输入信号时 $V_1$ 导通， $+V_{CC}$ 接入高速放大器 $A$ 正端， $A$ 输出正电平。

## ■ 电压驱动型器件的驱动电路

- ◆ 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件
- ◆ 为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- ◆ 使电力MOSFET开通的栅源极间驱动电压一般取10~15V，使IGBT开通的栅射极间驱动电压一般取15~20V
- ◆ 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5~-15V）有利于减小关断时间和关断损耗
- ◆ 在栅极串入一只低值电阻（数十欧左右）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

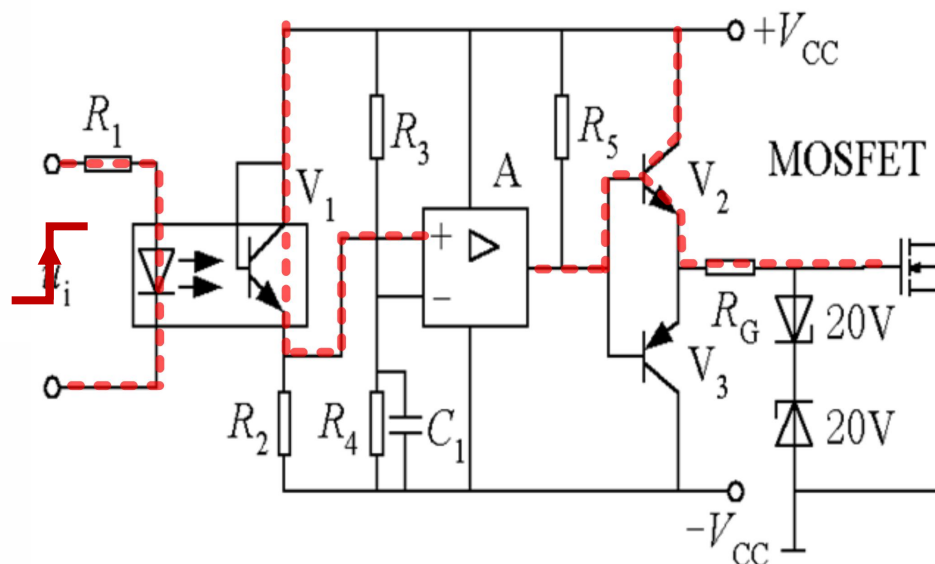


图9-8 电力MOSFET的一种驱动电路

当有输入信号时  $V_1$  导通， $+V_{CC}$  接入高速放大器  $A$  正端， $A$  输出正电平， $V_2$  导通输出正驱动电压。

## ■ 电压驱动型器件的驱动电路

- ◆ 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件
- ◆ 为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- ◆ 使电力MOSFET开通的栅源极间驱动电压一般取10~15V，使IGBT开通的栅射极间驱动电压一般取15~20V
- ◆ 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5~-15V）有利于减小关断时间和关断损耗
- ◆ 在栅极串入一只低值电阻（数十欧左右）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

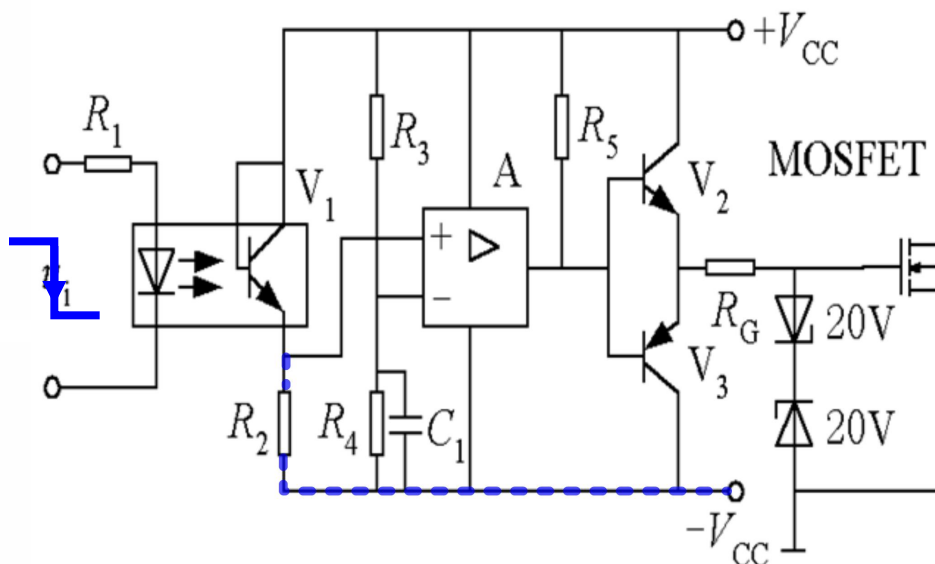


图9-8 电力MOSFET的一种驱动电路

- ◆ 当无输入信号时，V1截止，-Vcc接入高速放大器A正端

## ■ 电压驱动型器件的驱动电路

- ◆ 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件
- ◆ 为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- ◆ 使电力MOSFET开通的栅源极间驱动电压一般取10~15V，使IGBT开通的栅射极间驱动电压一般取15~20V
- ◆ 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5~-15V）有利于减小关断时间和关断损耗
- ◆ 在栅极串入一只低值电阻（数十欧左右）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

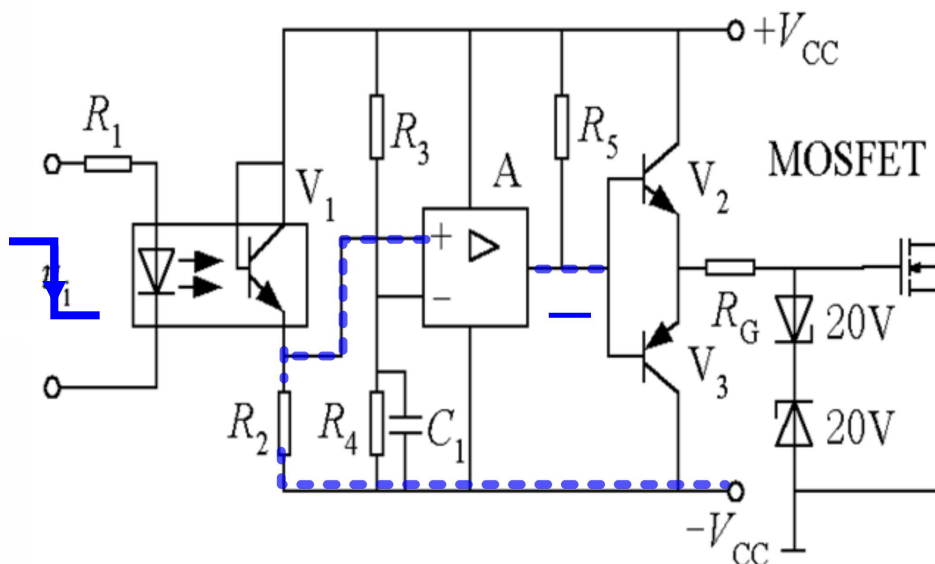


图9-8 电力MOSFET的一种驱动电路

当无输入信号时，V1截止， $-V_{cc}$ 接入高速放大器A正端，A输出负电平，

## ■ 电压驱动型器件的驱动电路

- ◆ 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件
- ◆ 为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- ◆ 使电力MOSFET开通的栅源极间驱动电压一般取10~15V，使IGBT开通的栅射极间驱动电压一般取15~20V
- ◆ 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5~-15V）有利于减小关断时间和关断损耗
- ◆ 在栅极串入一只低值电阻（数十欧左右）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

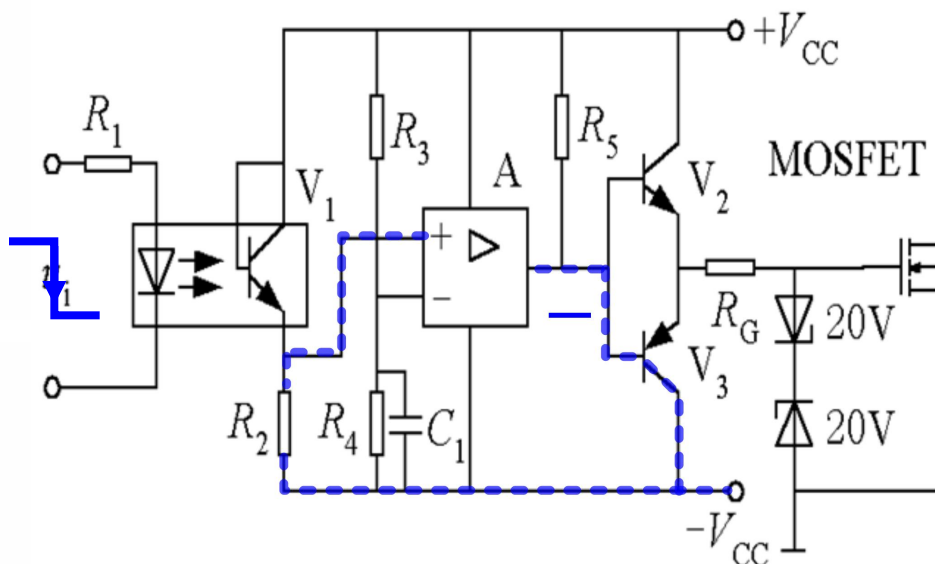


图9-8 电力MOSFET的一种驱动电路

当无输入信号时，V1截止，-Vcc接入高速放大器A正端，A输出负电平，V3导通输出负驱动电压。



## ■ 电压驱动型器件的驱动电路

- ◆ 电力MOSFET和IGBT是电压驱动型器件
- ◆ 为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。
- ◆ 使电力MOSFET开通的栅源极间驱动电压一般取10~15V，使IGBT开通的栅射极间驱动电压一般取15~20V
- ◆ 关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取-5~-15V）有利于减小关断时间和关断损耗
- ◆ 在栅极串入一只低值电阻（数十欧左右）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

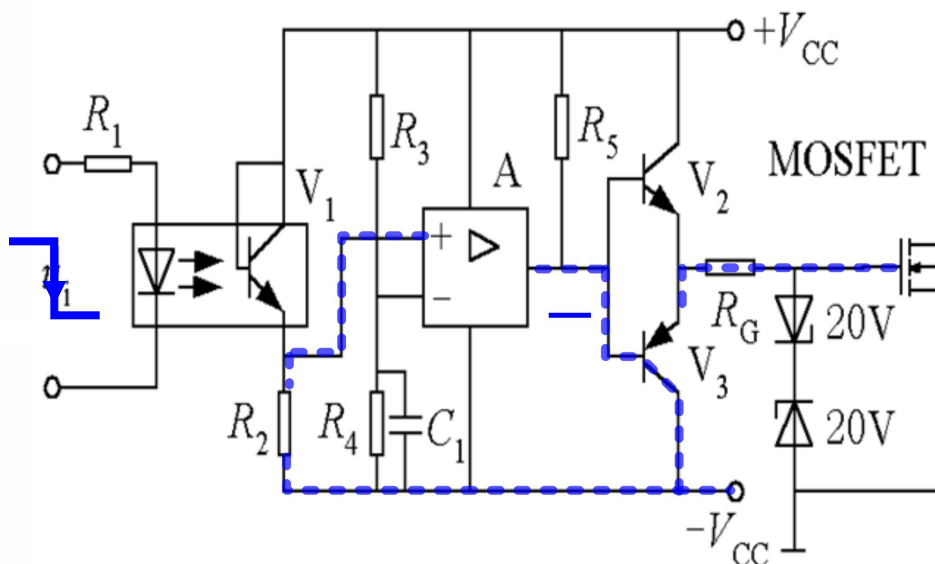


图9-8 电力MOSFET的一种驱动电路

当无输入信号时，V1截止，-Vcc接入高速放大器A正端，A输出负电平，V3导通输出负驱动电压。

## (2) IGBT的驱动

- 多采用专用的混合集成驱动器。

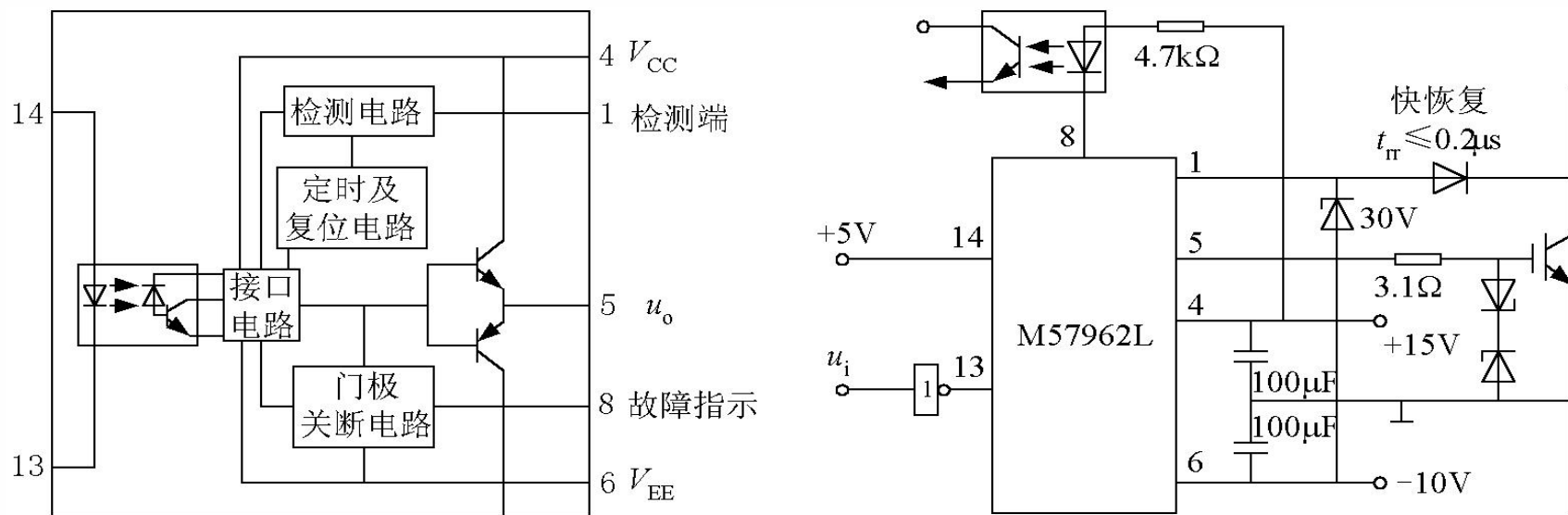


图9-9 M57962L型IGBT驱动器的原理和接线图

- 常用的有三菱公司的M579系列（如M57962L和M57959L）和富士公司的EXB系列（如EXB840、EXB841、EXB850和EXB851）。





## 9.2 电力电子器件器件的保护

### 9.2.1 过电压的产生及过电压保护

### 9.2.2 过电流保护

### 9.2.3 缓冲电路

## 9.2.1 过电压的产生及过电压保护

### ● 电力电子装置可能的过电压——外因过电压和内因过电压

- ✦ 外因过电压：主要来自雷击和系统操作过程等外因
  - 操作过电压：由分闸、合闸等开关操作引起
  - 雷击过电压：由雷击引起
- ✦ 内因过电压：主要来自电力电子装置内部器件的开关过程
  - 换相过电压：晶闸管或与全控型器件反并联的二极管在换相结束后，反向电流急剧减小，会由线路电感在器件两端感应出过电压。
  - 关断过电压：全控型器件关断时，正向电流迅速降低而由线路电感在器件两端感应出的过电压。

## ● 过电压保护措施

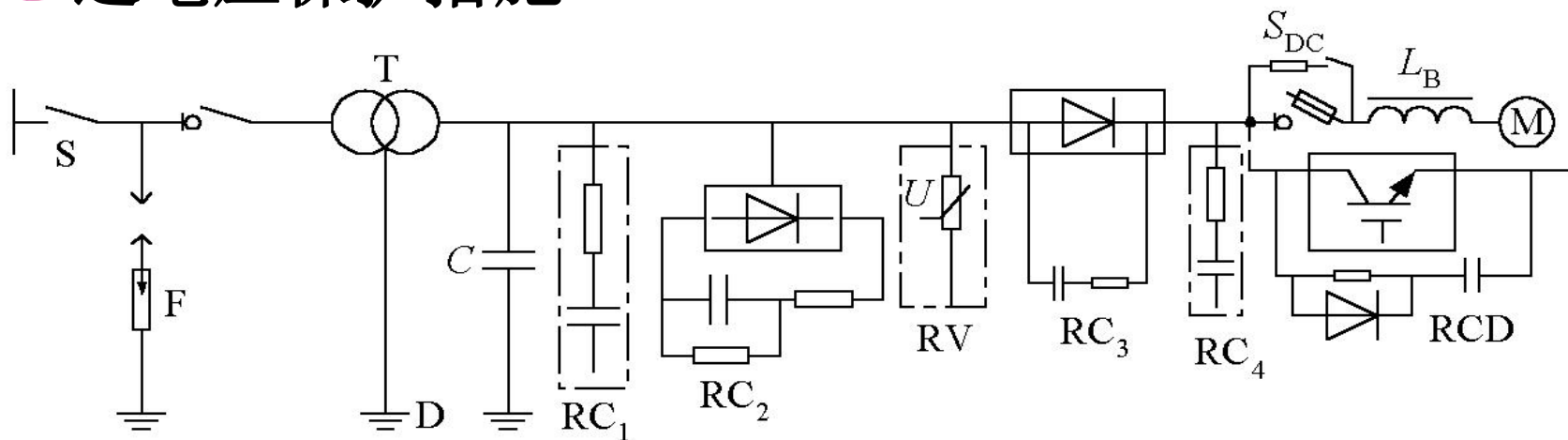


图9-10 过电压抑制措施及配置位置

F—避雷器 D—变压器静电屏蔽层 C—静电感应过电压抑制电容

RC<sub>1</sub>—阀侧浪涌过电压抑制用RC电路 RC<sub>2</sub>—阀侧浪涌过电压抑制用反向阻断式RC电路

RV—压敏电阻过电压抑制器 RC<sub>3</sub>—阀器件换相过电压抑制用RC电路

RC<sub>4</sub>—直流侧RC抑制电路 RCD—阀器件关断过电压抑制用RCD电路

- ⊕ 电力电子装置可视具体情况只采用其中的几种。
- ⊕ 其中RC<sub>3</sub>和RCD为抑制内因过电压的措施，属于缓冲电路范畴。
- ⊕ 外因过电压抑制措施中，RC过电压抑制电路最为常见。

- 对大容量的电力电子装置，可采用图9-12所示的反向阻断式RC电路。
- 采用雪崩二极管、金属氧化物压敏电阻、硒堆和转折二极管（BOD）等非线性元器件来限制或吸收过电压也是较常用的措施。

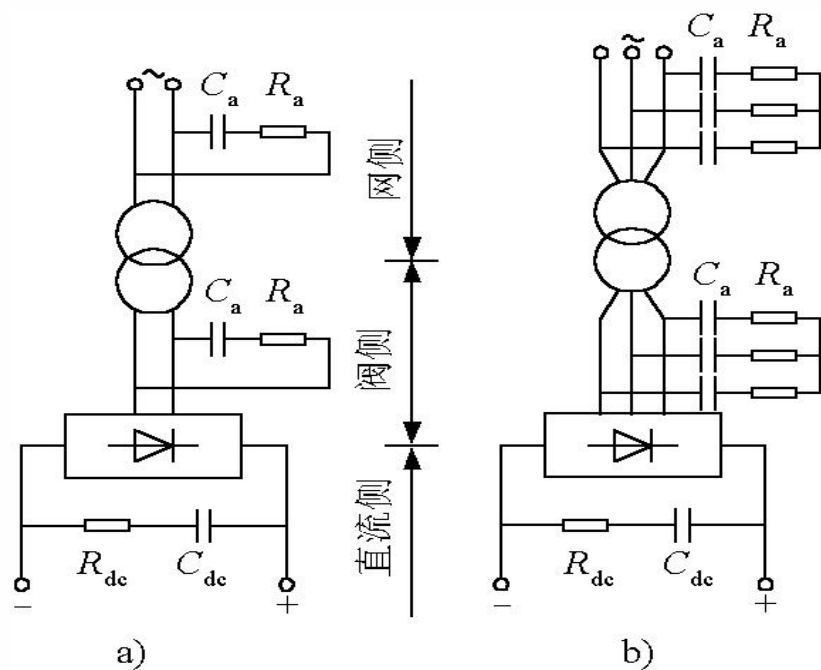


图9-11 RC过电压抑制电路联结方式  
a)单相 b)三相

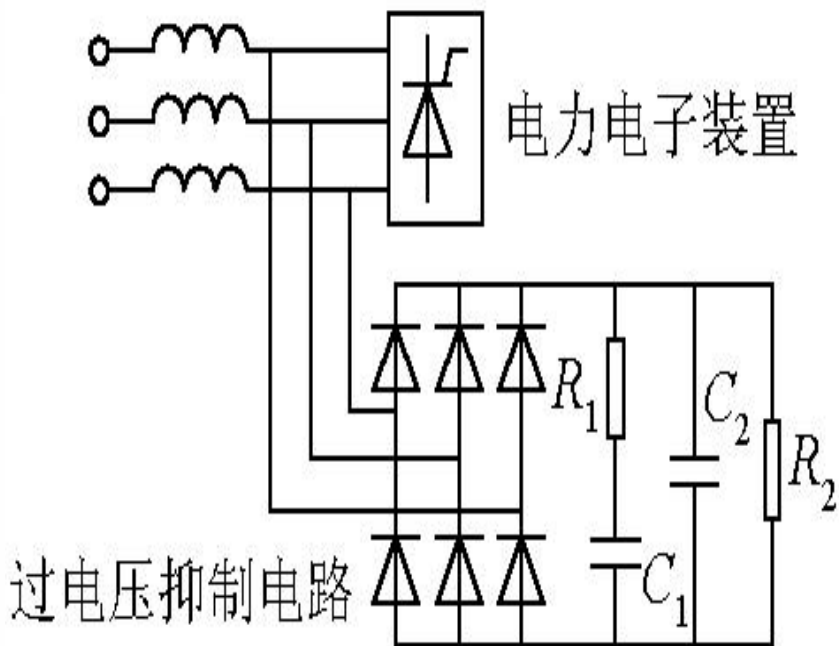


图9-12 反向阻断式过电压抑制用RC电路

- 过电流——**过载**和**短路**两种情况
- 保护措施

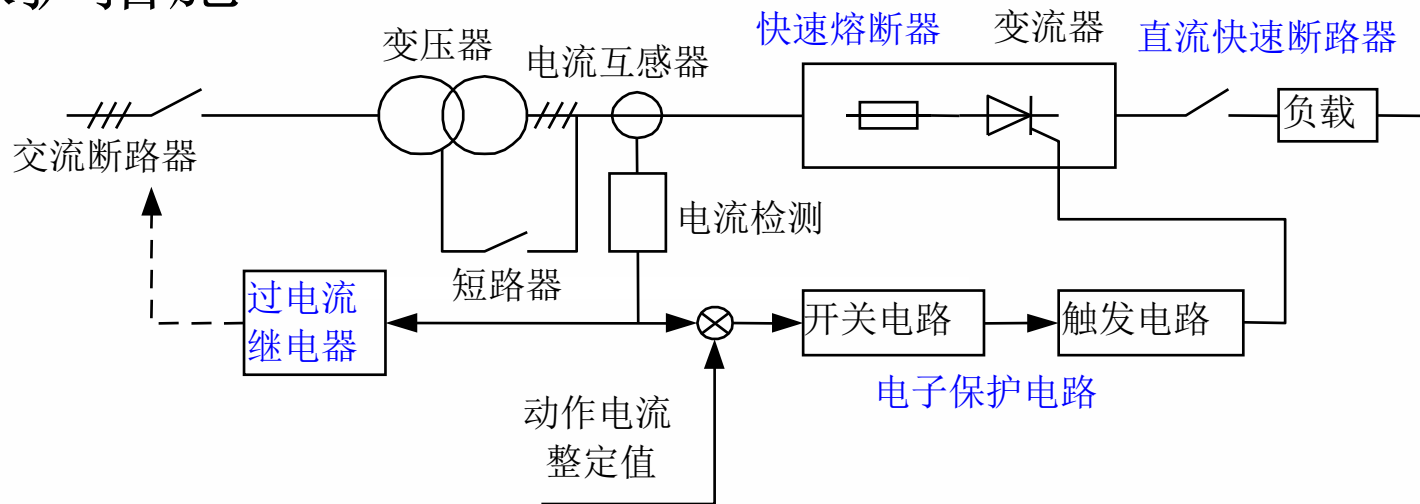


图9-13 过电流保护措施及配置位置

- ◆ 同时采用几种过电流保护措施，提高可靠性和合理性。
- ◆ 电子电路作为第一保护措施，快熔仅作为短路时的部分区段的保护，直流快速断路器整定在电子电路动作之后实现保护，过电流继电器整定在过载时动作。

- 快熔对器件的保护方式：**全保护**和**短路保护**两种
  - ⊕ 全保护：过载、短路均由快熔进行保护，适用于小功率装置或器件裕度较大的场合。
  - ⊕ 短路保护：快熔只在短路电流较大的区域起保护作用。
- 对重要的且易发生短路的晶闸管设备，或全控型器件，需采用电子电路进行过电流保护。
- 常在全控型器件的驱动电路中设置过电流保护环节，响应最快。

## 9.2.3 缓冲电路

- **缓冲电路(Snubber Circuit)**： 又称**吸收电路**，抑制器件的内因过电压、 $du/dt$ 、过电流和 $di/dt$ ，减小器件的开关损耗。
  - ◆ **关断缓冲电路**（ $du/dt$ 抑制电路）——吸收器件的关断过电压和换相过电压，抑制 $du/dt$ ，减小关断损耗。
  - ◆ **开通缓冲电路**（ $di/dt$ 抑制电路）——抑制器件开通时的电流过冲和 $di/dt$ ，减小器件的开通损耗。
  - ◆ **复合缓冲电路**——关断缓冲电路和开通缓冲电路的结合。
  - ◆ 按能量的去向分类法：**耗能式缓冲电路**和**馈能式缓冲电路**（无损吸收电路）。
  - ◆ 通常将**缓冲电路**专指**关断缓冲电路**，将开通缓冲电路叫做 **$di/dt$ 抑制电路**。



## 9.2.3 缓冲电路

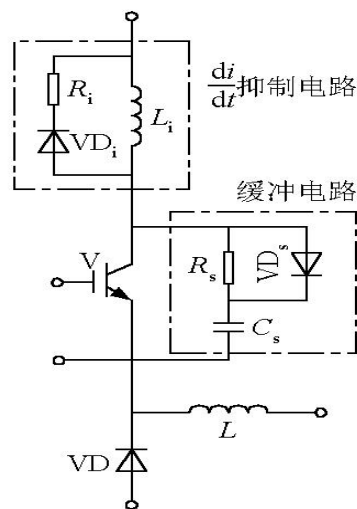
### 缓冲电路作用分析

#### 无缓冲电路:

- ◆ V 开通时电流迅速上升， $di/dt$  很大。
- ◆ 关断时  $du/dt$  很大，并出现很高的过电压。

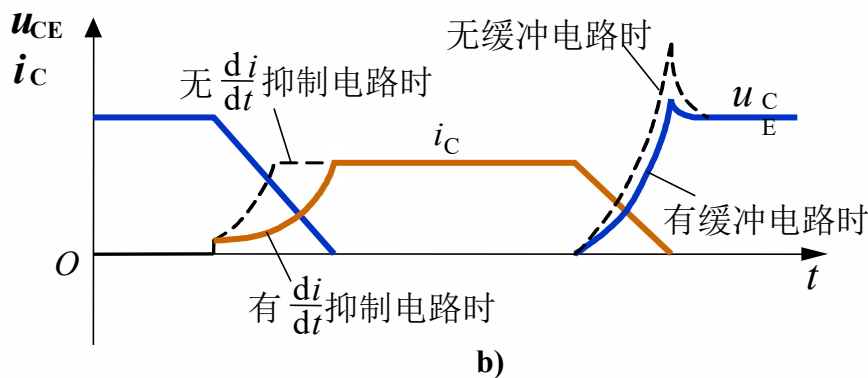
#### 有缓冲电路

- ◆ V 开通时:  $C_s$  通过  $R_s$  向 V 放电，使  $i_C$  先上一个台阶，以后因有  $L_i$ ， $i_C$  上升速度减慢。
- ◆ V 关断时: 负载电流通过  $VD_s$  向  $C_s$  分流，减轻了 V 的负担，抑制了  $du/dt$  和过电压。
- ◆ 因为关断时电路中（含布线）电感的能量要释放，所以还会出现一定的过电压



a)

缓冲电路的二极管要求采用快恢复二极管，以便于与 IGBT 的开关时间相配合。



b)

图9-14  $di/dt$ 抑制电路和  
充放电型RCD缓冲电路及波形

a) 电路

b) 波形





## ■ 缓冲电路

### ◆ 在有缓冲电路的情况下

👉 V 开通时,  $C_s$  先通过  $R_s$  向 V 放电, 使  $i_C$  先上一个台阶, 以后因为  $L_i$  的作用,  $i_C$  的上升速度减慢。

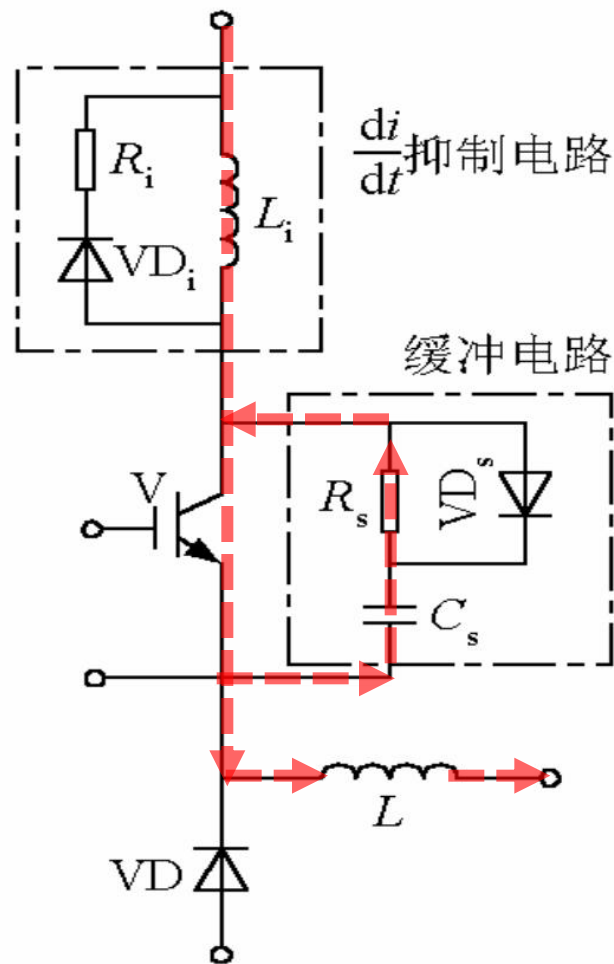
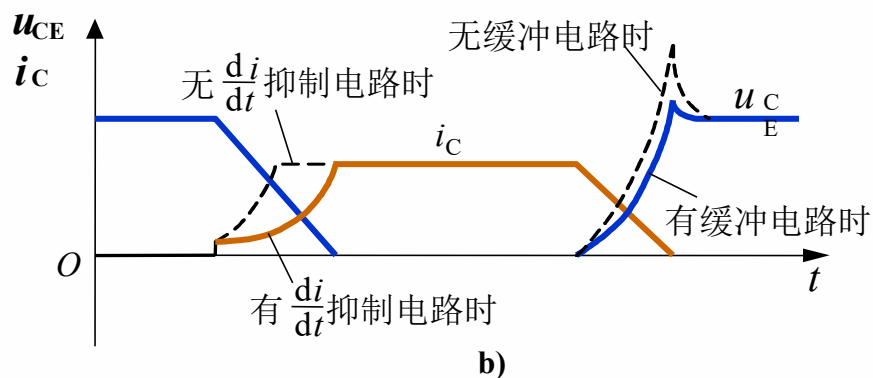


图9-14  $\frac{di}{dt}$ 抑制电路和充放电型 RCD 缓冲电路

## ■ 缓冲电路

### ◆ 在有缓冲电路的情况下

👉 V关断时，负载电流通过 $VD_s$ 向 $C_s$ 分流，减轻了V的负担，抑制了 $du/dt$ 和过电压。

👉 因为关断时电路中（含布线）电感的能量要释放，所以还会出现一定的过电压。

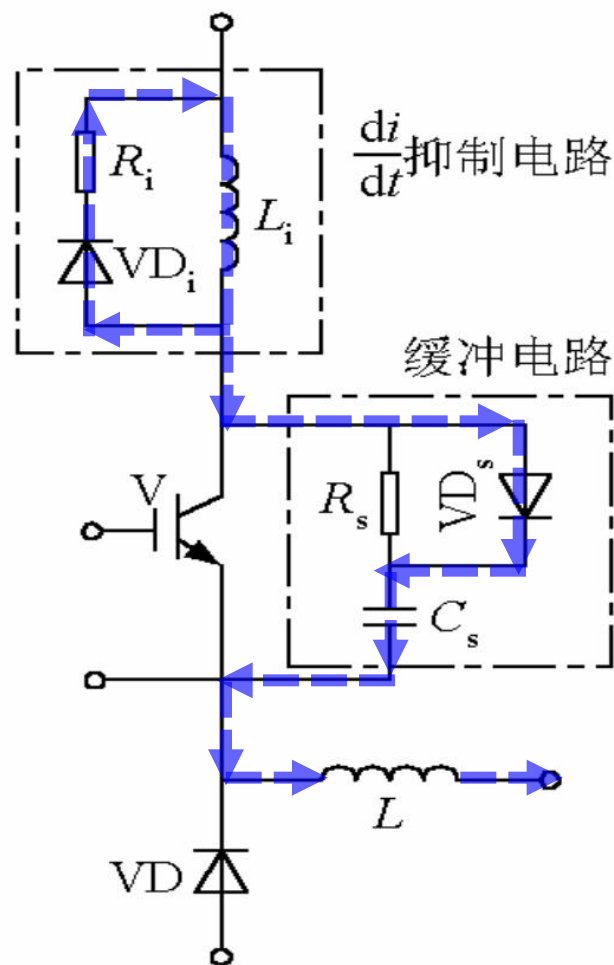
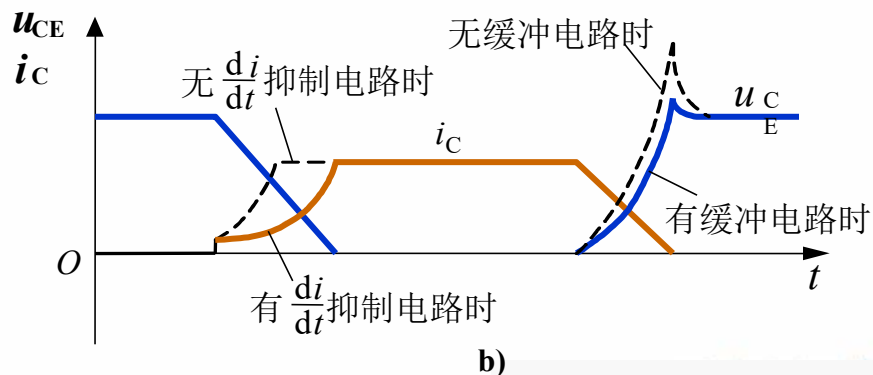


图9-14  $di/dt$ 抑制电路和充放电型RCD缓冲电路

## 关断时的负载曲线

- ※ 无缓冲电路时： $u_{CE}$  迅速升， $L$  感应电压使VD通，负载线从A移到B，之后 $i_C$  才下降到漏电流的大小，负载线随之移到C
- ※ 有缓冲电路时： $C_s$  分流使 $i_C$  在 $u_{CE}$  开始上升时就下降，负载线经过D到达C
- ※ 负载线ADC安全，且经过的都是小电流或小电压区域，关断损耗大大降低

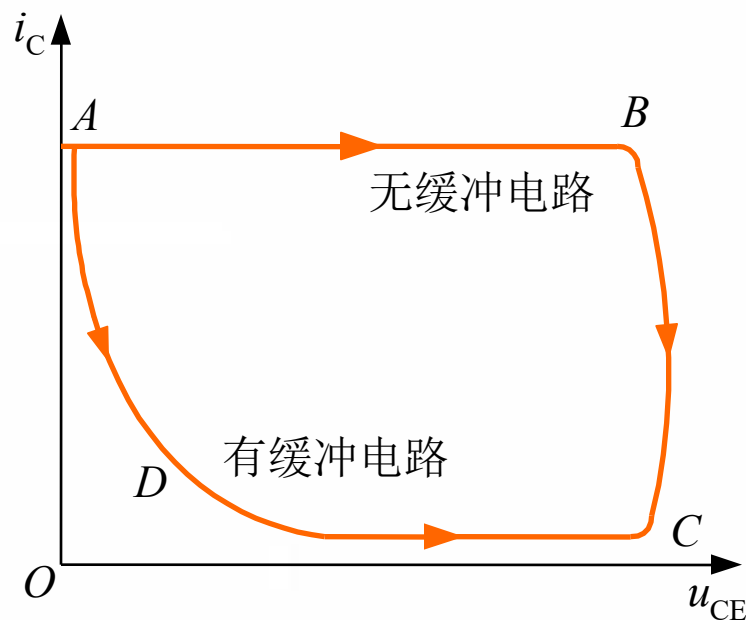


图9-15 关断时的负载线

- 充放电型RCD缓冲电路，适用于中等容量的场合。

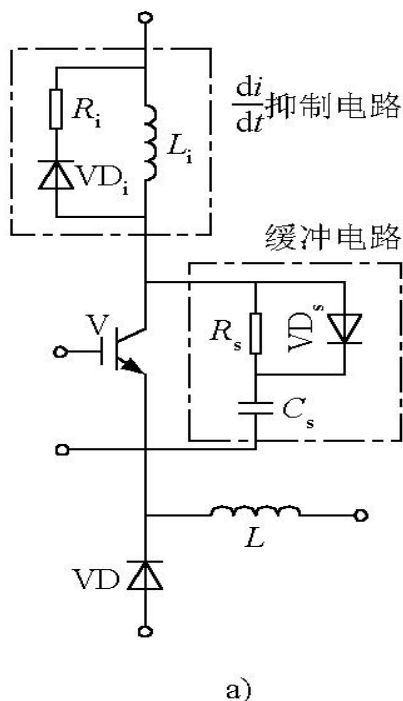


图9-14  $di/dt$ 抑制电路和  
充放电型RCD缓冲电路及波形

a) 电路

- 其中RC缓冲电路主要用于小容量器件，而放电阻止型RCD缓冲电路用于中或大容量器件。

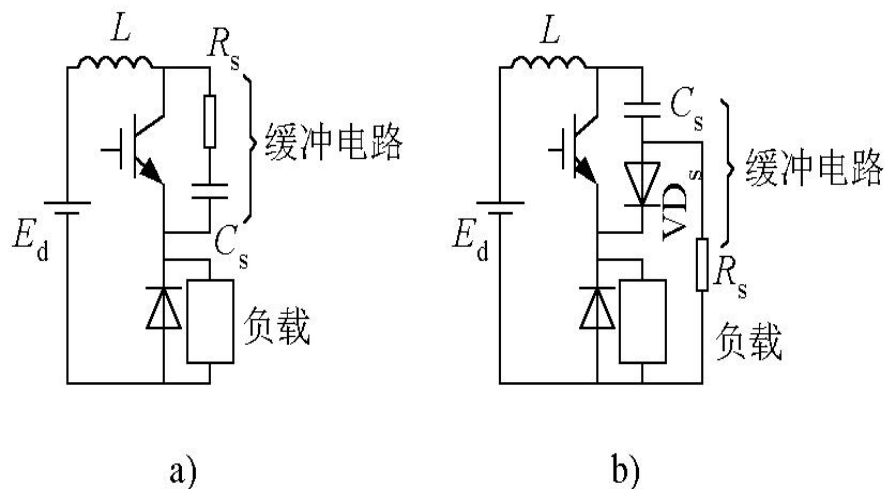


图9-16 另外两种常用的缓冲电路

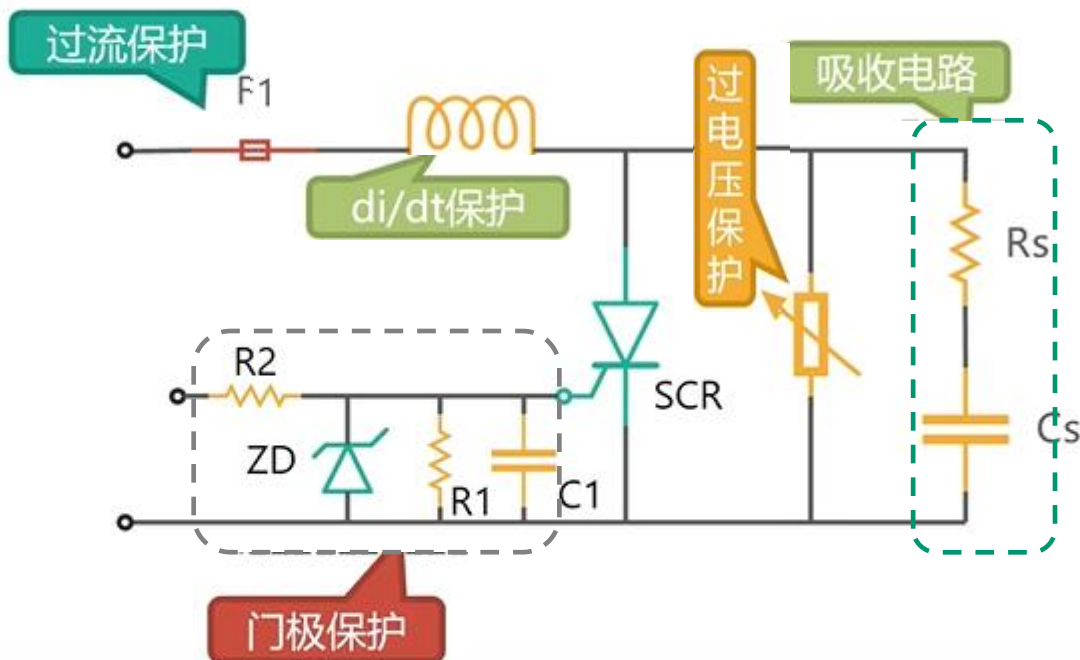
a) RC吸收电路

b) 放电阻止型RCD吸收电路

## 保护

电力电子装置运行中可受多种干扰，开、关和故障的暂态都可能给器件带来危害，器件的主功率端和控制端都需要增加一定的保护措施，主要包括：

- 1 过电流  
Over-current
- 2  $di/dt$ 或 $dv/dt$
- 3 电压尖峰  
Voltage spike or over-voltage
- 4 门极过压  
Over voltage at gate
- 5 温度过高  
Excessive temperature rise



晶闸管在实际应用中一般只承受换相过电压，没有关断过电压问题，关断时也没有较大的 $du/dt$ ，因此一般采用RC吸收电路即可。



## 9.3 电力电子器件器件的串联和并联使用

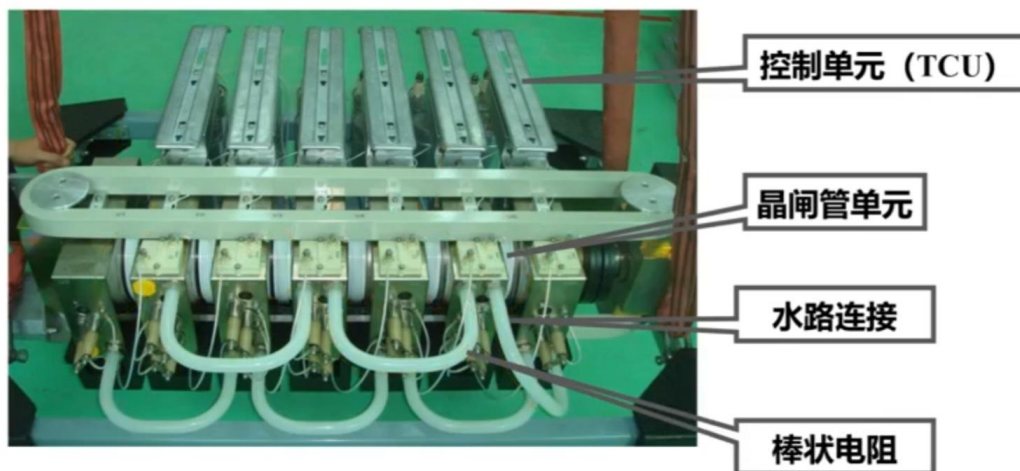
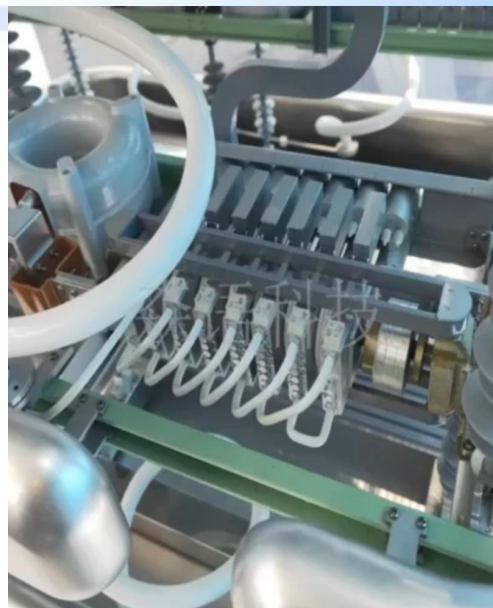
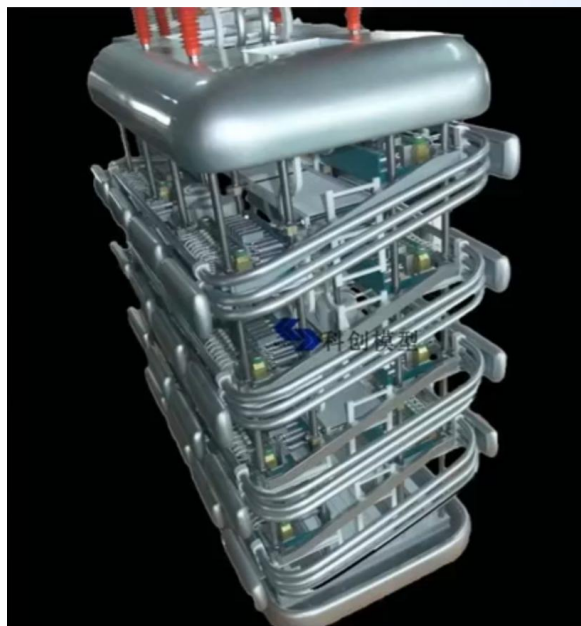
### 9.3.1 晶闸管的串联

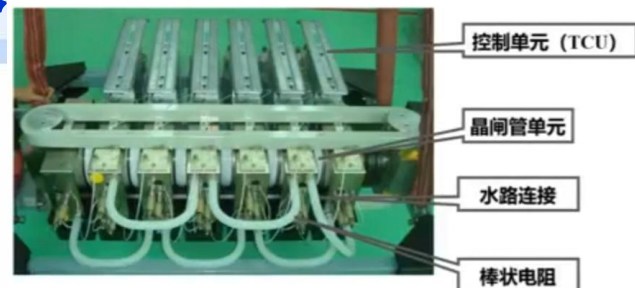
### 9.3.2 晶闸管的并联

### 9.3.3 电力MOSFET和IGBT并联运行的特点

- **目的：**当晶闸管额定电压小于要求时，可以串联。
- **问题：**理想串联希望器件分压相等，但因特性差异，使器件电压分配不均匀。
  - ✦ **静态不均压：**串联的器件流过的漏电流相同，但因静态伏安特性的分散性，各器件分压不等。
    - ★ 承受电压高的器件首先达到转折电压而导通，使另一个器件承担全部电压也导通，失去控制作用。
    - ★ 反向时，可能使其中一个器件先反向击穿，另一个随之击穿。
  - ✦ **动态不均压：**由于器件动态参数和特性的差异造成的不均压。







### 静态均压措施:

- 选用参数和特性尽量一致的器件。
- 采用**并电阻**均压， $R_p$ 的阻值应比器件阻断时的正、反向电阻**小**得多。

### 动态均压措施:

- 选择动态参数和特性尽量一致的器件。
- 用**RC**并联支路作动态均压。
- 采用门极强脉冲触发可以显著减小器件开通时间的差异。

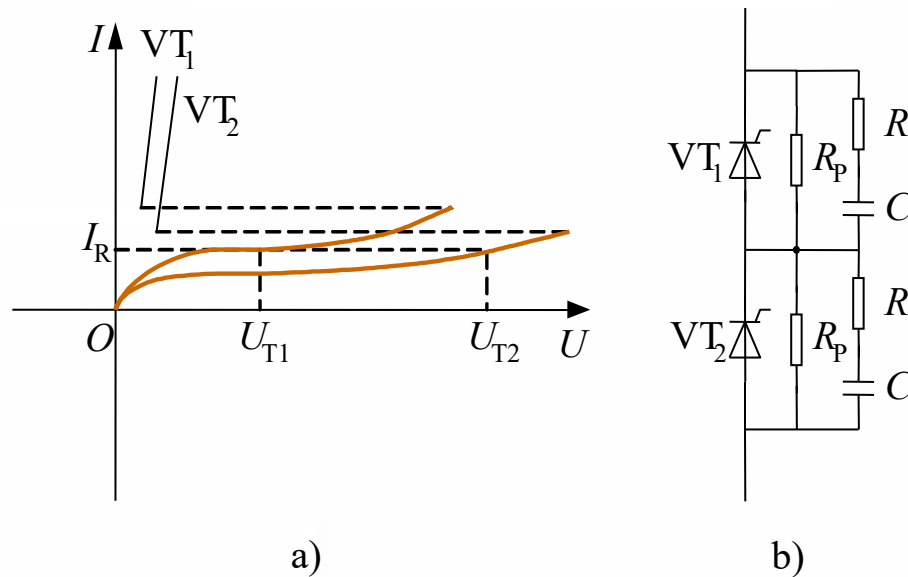


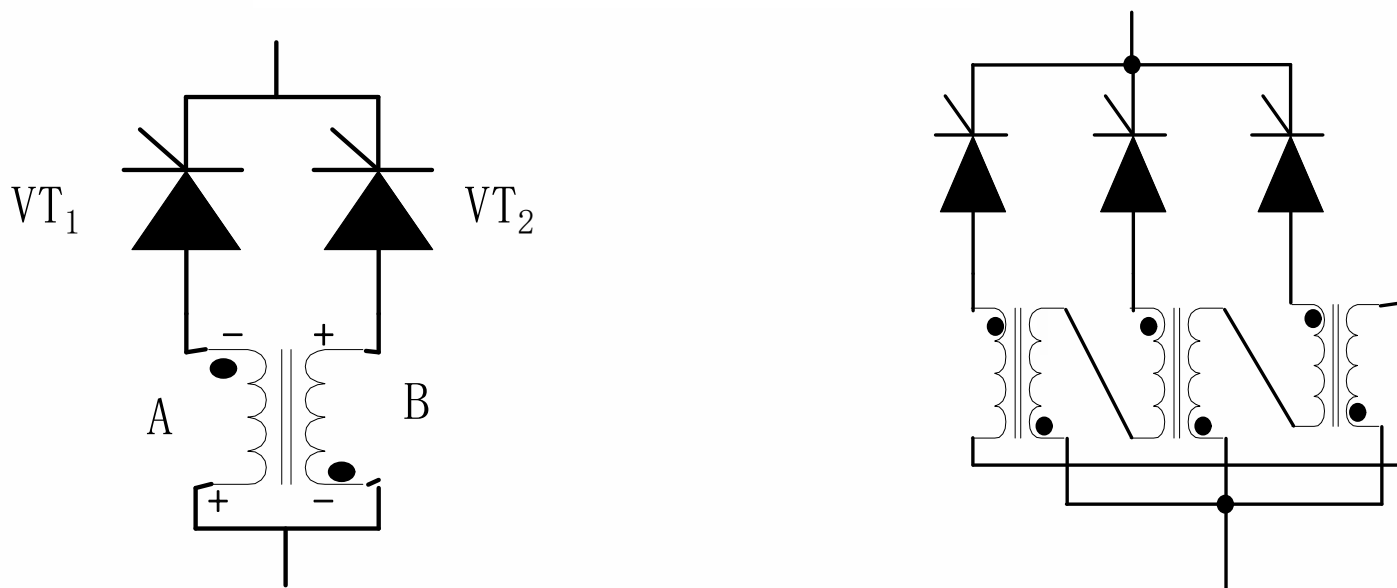
图9-17 晶闸管的串联  
a) 伏安特性差异 b) 串联均压措施



## 9.3.2 晶闸管的并联

- **目的：**多个器件并联来承担较大的电流
- **问题：**会分别因静态和动态特性参数的差异而电流分配不均匀。
- **均流措施：**
  - ⊕ 挑选特性参数尽量一致的器件。
  - ⊕ 采用 串均流电抗器，不仅可以均流，还可以限制  $di/dt$  和  $du/dt$ 。
  - ⊕ 用门极强脉冲触发也有助于动态均流。
  - ⊕ 当需要同时串联和并联晶闸管时，通常采用先串后并的方法联接。

- 均流原理：若晶闸管 $VT_1$ 首先导通，则在互感器 $L_B$ 上产生如图所示极性的电压，该电压提高了 $VT_2$ 阳阴极之间的电压，使得 $VT_2$ 易于导通，从而起了动态均流的作用。当 $VT_1$ 电流增加时， $L_A$ 产生的感应电动势有使 $VT_1$ 电流减小的作用，而 $L_B$ 上的感应电动势有使 $VT_2$ 电流增加的作用。这样不但解决了导通时间不同的均流问题，也解决了导通后电流分配不均的问题。但电抗器本身较重，接线也较复杂。



图：晶闸管并联均流电路

## ● 电力MOSFET并联运行的特点

- ⊕  $R_{on}$ 具有正温度系数，具有电流自动均衡的能力，容易并联。
- ⊕ 注意选用 $R_{on}$ 、 $U_T$ 、 $G_{fs}$ 和 $C_{iss}$ 尽量相近的器件并联。
- ⊕ 电路走线和布局应尽量对称。
- ⊕ 可在源极电路中串入小电感,起到均流电抗器的作用。

## ● IGBT并联运行的特点

- ⊕ 在1/2或1/3额定电流以下的区段，通态压降具有负温度系数。
- ⊕ 在以上的区段则具有正温度系数。
- ⊕ 并联使用时也具有电流的自动均衡能力，易于并联。

## ■ 本章要点

- ◆ 对电力电子器件驱动电路的基本要求。
- ◆ 在驱动电路中实现电力电子主电路和控制电路电气隔离的基本方法和原理。
- ◆ 对晶闸管触发电路的基本要求以及典型触发电路的基本原理。
- ◆ 对电力MOSFET和IGBT等全控型器件驱动电路的基本要求以及典型驱动电路的基本原理。
- ◆ 电力电子器件过电压的产生原因和过电压保护的主要方法及原理。
- ◆ 电力电子器件过电流保护的主要方法及原理。
- ◆ 电力电子器件缓冲电路的概念、分类、典型电路及基本原理。
- ◆ 电力电子器件串联和并联使用的目的、基本要求以及具体注意事项。