

电力变换的种类

输出 \ 输入	交流 (AC)	直流 (DC)
直流 (DC)	整流	直流斩波
交流 (AC)	交流电力控制 变频、变相	逆变

电力电子技术的应用范围

几乎所有需要电能变换的地方

■ 按照能够被控制电路信号所控制的程度

◆ 半控型器件

- ☞ 主要是指晶闸管（Thyristor）及其大部分派生器件。
- ☞ 器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

◆ 全控型器件

- ☞ 目前最常用的是 IGBT 和 Power MOSFET。
- ☞ 通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断。

◆ 不可控器件

- ☞ 电力二极管（Power Diode）
- ☞ 不能用控制信号来控制其通断。

■按照驱动信号的性质

◆电流驱动型（GTO，GTR）

✎通过从控制端注入或者抽出**电流**来实现导通或者关断的控制。

◆电压驱动型（MOSFET，IGBT）

✎仅通过在控制端和公共端之间施加一定的**电压**信号就可实现导通或者关断的控制。

■按照驱动信号的波形（电力二极管除外）

◆脉冲触发型

✎通过在控制端施加一个电压或电流的**脉冲**信号来实现器件的开通或者关断的控制。

◆电平控制型

✎必须通过**持续**在控制端和公共端之间施加一定电平的电压或电流信号来使器件开通并**维持**在导通状态或者关断并维持在阻断状态

1. 静特性

PN结特性

2. 开关特性

电容效应引起:

关断过程---反向峰值电流 I_{RR} , 反向恢复时间 t_{rr}

开通过程---正向恢复

3. 分类和适用场合

普通二极管: 1kHz 以下

快/超快恢复二极管: 高频

肖特基二极管: 高频低压 ($\leq 200V$)

4. 参数

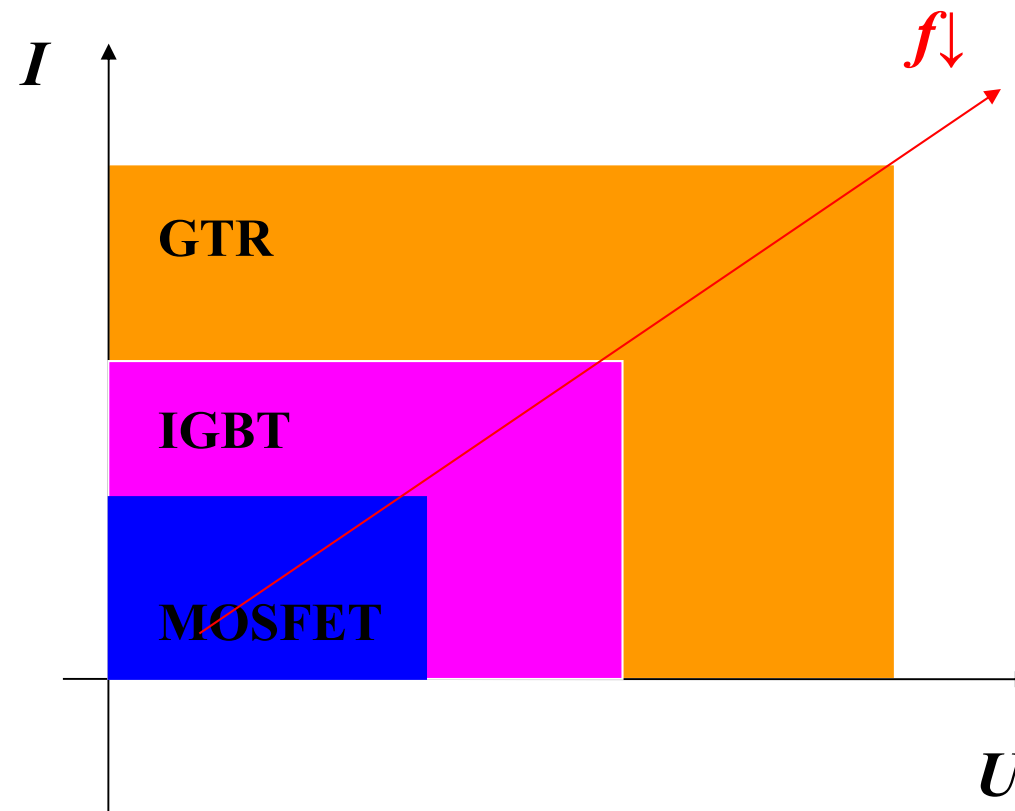
额定正向平均电流 I_F

反向重复峰值电压

反向恢复时间

正向导通压降

三种全控开关器件的应用特点:



★晶闸管的通断条件

脉冲触发

- 断→通** 1. 阳极和阴极之间加正向阳极电压
且
2. 门和阴极之间加适当的正向门极电压

维持导通: 阳极和阴极之间的电流大于维持
电流(此时门极电压不起作用)

通→断: 阳极和阴极之间的电流小于维持电流

通过非正弦波形的电流时晶闸管额定电流如何计算？

电流有效值相等即发热相同的原理

**将非正弦半波电流的有效值 I_T 折合成
等效的正弦半波电流平均值去选择晶闸管额定值**

$$I_T = K_f I_d$$

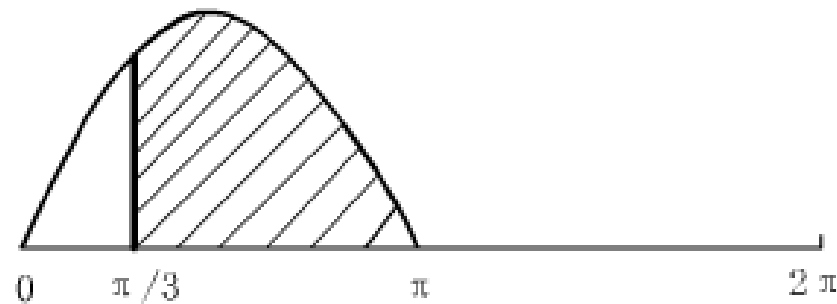
$$I_{Tav} = I_T / 1.57$$

在实际选用时，一般取1.5—2倍的安全裕量

可以认为，额定有效值电流为 $1.57I_{Tav}$

例1 -- 流经晶闸管的电流波形如图所示

- (1) 试计算该电流波形的平均值、有效值及波形系数。
- (2) 若取安全系数为2，问额定电流为100A的晶闸管，其允许通过的该波形电流平均值和最大值为多少？
- (3) 若该波形的平均值为50A，则需要选取多大额定电流的晶闸管？



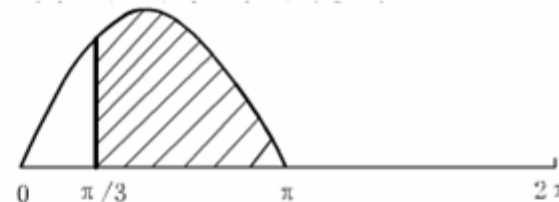
例1 -- 流经晶闸管的电流波形如图所示

(1) 试计算该电流波形的平均值、有效值及波形系数。

解

电流平均值

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3}{4\pi} I_m = 0.24 I_m$$



电流有效值

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = I_m \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{16\pi}} = 0.46 I_m$$

波形系数

$$K_f = \frac{0.46 I_m}{0.24 I_m} = 1.92$$

例1 -- 流经晶闸管的电流波形如图所示

(2)若取安全系数为2，问额定电流为100A的晶闸管，其允许通过的该波形电流平均值和最大值为多少？

$$K_f = \frac{0.46I_m}{0.24I_m} = 1.92$$

100A的晶闸管允许通过的电流平均值

$$I_d = \frac{1.57 \times 100}{2 \times 1.92} = 41 \text{ (A)}$$

电流最大值

$$I_m = \frac{I_d}{0.24} = \frac{41}{0.24} = 171 \text{ (A)}$$



例1 -- 流经晶闸管的电流波形如图所示

(3)若该波形的平均值为50A，考虑安全系数为2，则需要选取多大额定电流的晶闸管？

$$I_d = 0.24I_m \quad (1)$$

$$I_T = 0.46I_m \quad (2)$$

由(1)，均值50A对应的峰值：

$$I_m = 50 / 0.24 = 208(A)$$

代入(2)，得有效值 $I_T = 95.8A$

对应的所需额定电流 $I_{dTav} = 95.8 / 1.57 = 61.0(A)$

留两倍裕量后： $61.0 \times 2 = 122.2A$

查手册，满足要求的晶闸管其电流定额为？？ A

■ GTR的基本特性

◆ 静态特性

✎ 在共发射极接法时的典型输出特性分为截止区、放大区和饱和区三个区域。

✎ 在电力电子电路中，GTR工作在开关状态，即工作在截止区或饱和区。

✎ 在开关过程中，即在截止区和饱和区之间过渡时，一般要经过放大区。

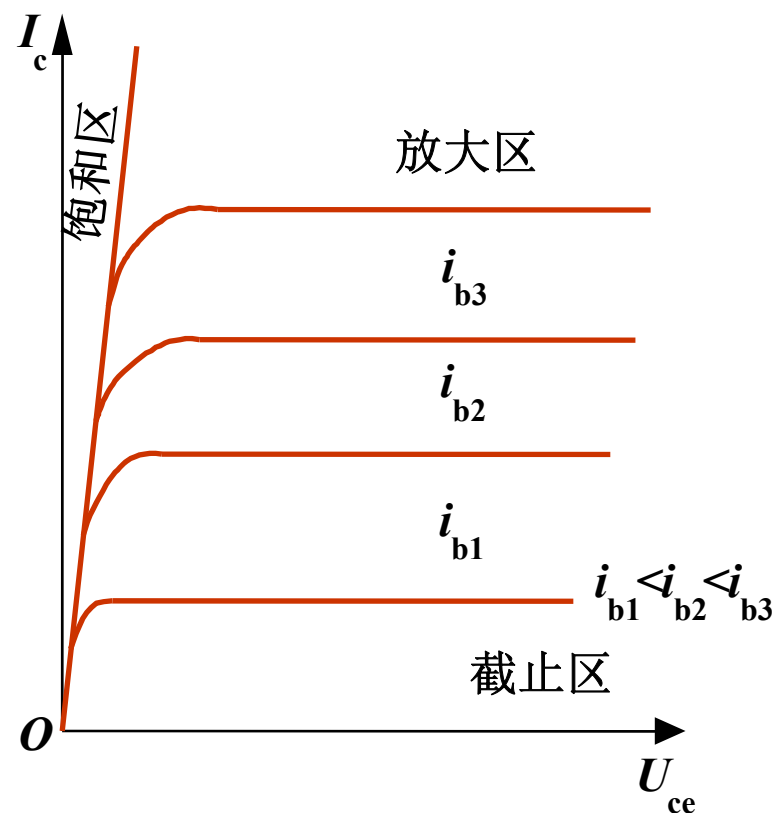


图2-17 共发射极接法时
GTR的输出特性

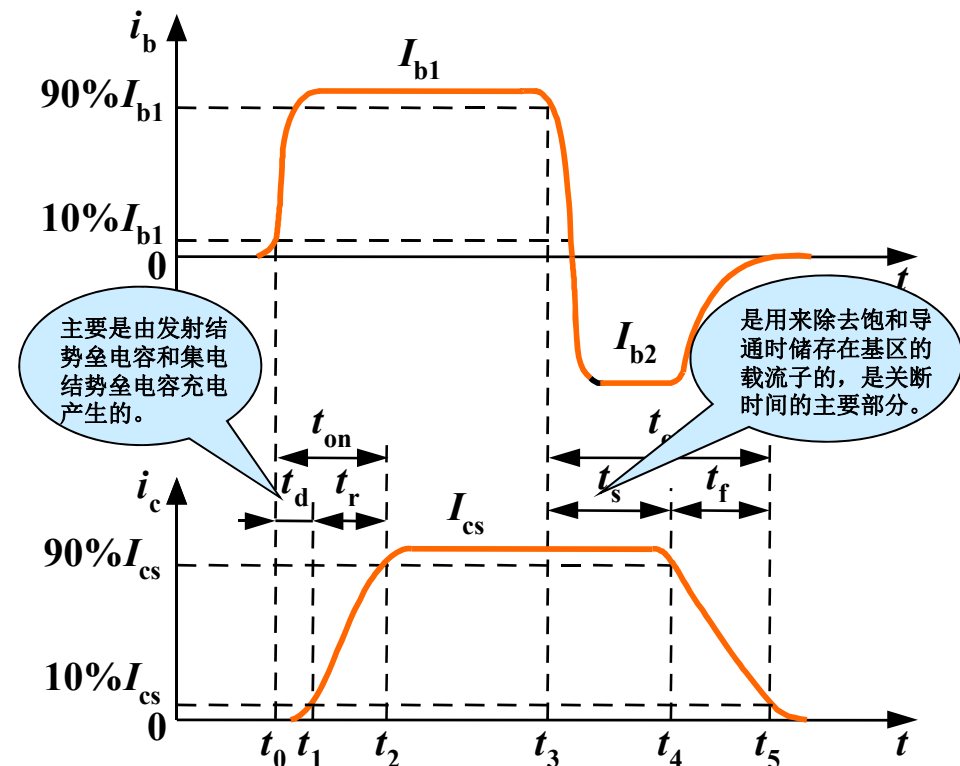
◆动态特性

开通过程

- √需要经过延迟时间 t_d 和上升时间 t_r ，二者之和为开通时间 t_{on} 。
- √增大基极驱动电流 i_b 的幅值并增大 di_b/dt ，可以缩短延迟时间，同时也可以缩短上升时间，从而加快开通过程。

关断过程

- √需要经过储存时间 t_s 和下降时间 t_f ，二者之和为关断时间 t_{off} 。
- √减小导通时的饱和深度以减小储存的载流子，或者增大基极抽取负电流 I_{b2} 的幅值和负偏压，可以缩短储存时间，从而加快关断速度。
- √GTR的开关时间在几微秒以内，比晶闸管和GTO都短很多。



加速开通、截止反偏

一、加速电容

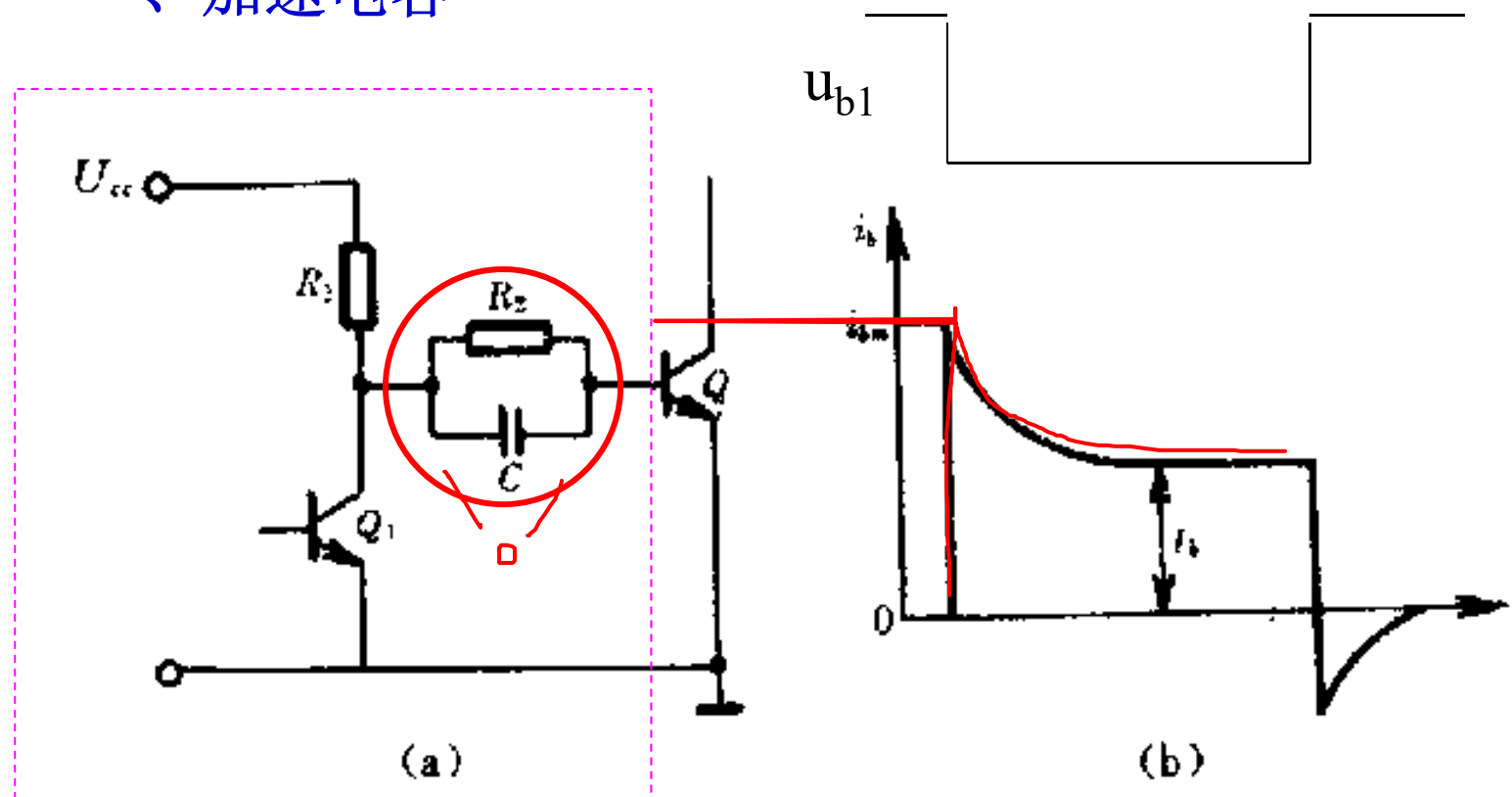


图 12-10 采用加速电容的驱动电路

二、抗饱和电路

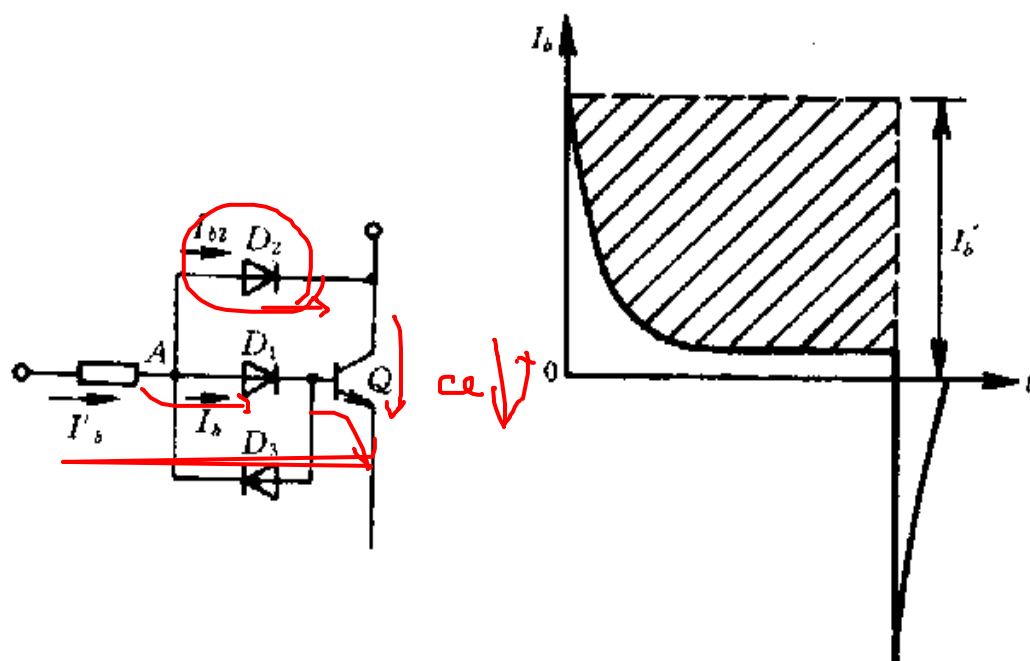


图 12-11 抗饱和电路

图 12-12 加抗饱和电路后的
基极电流的波形

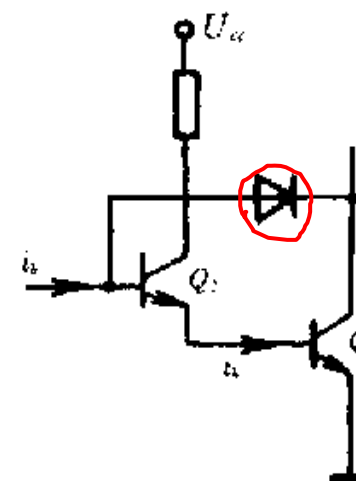


图 12-13 改进后的抗饱和电路

三、截止反偏驱动电路—加快关断

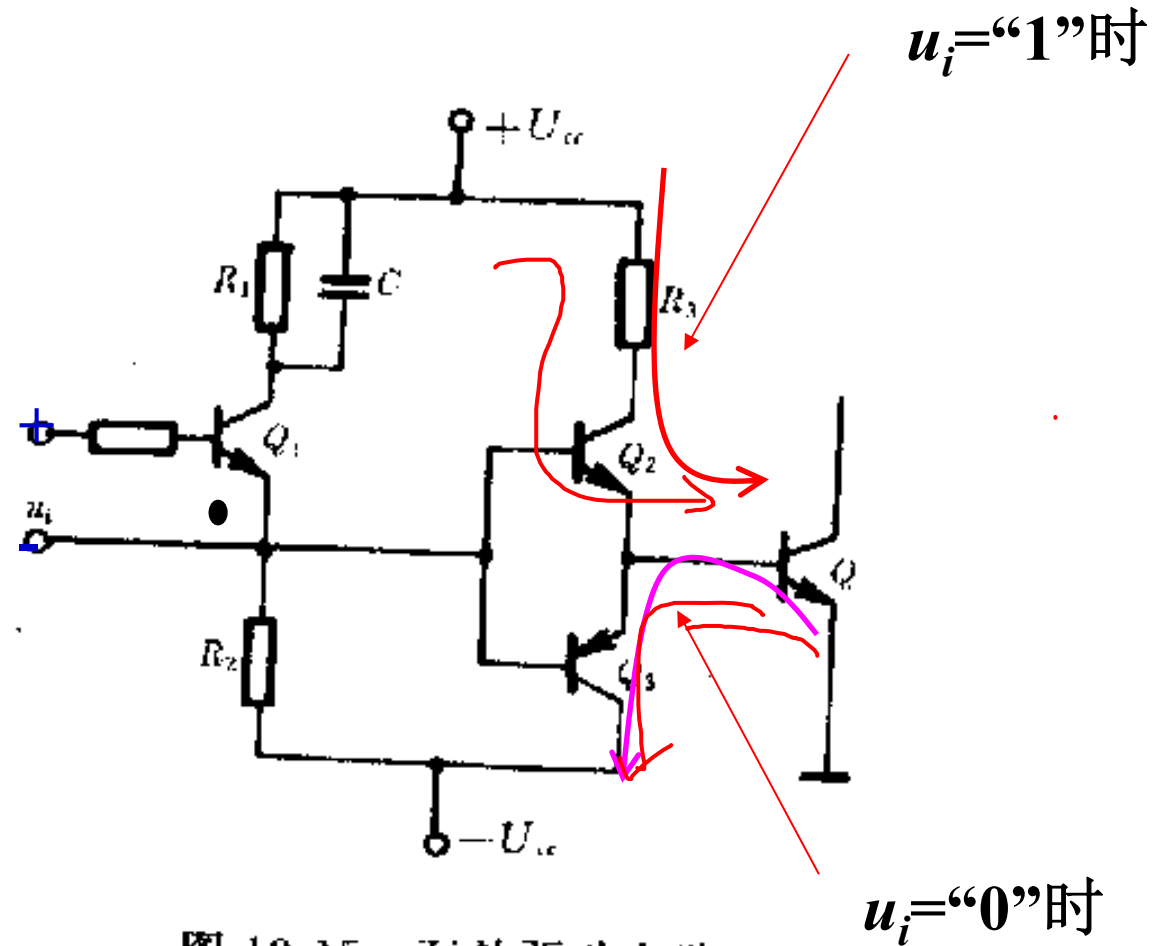


图 12-15 互补驱动电路

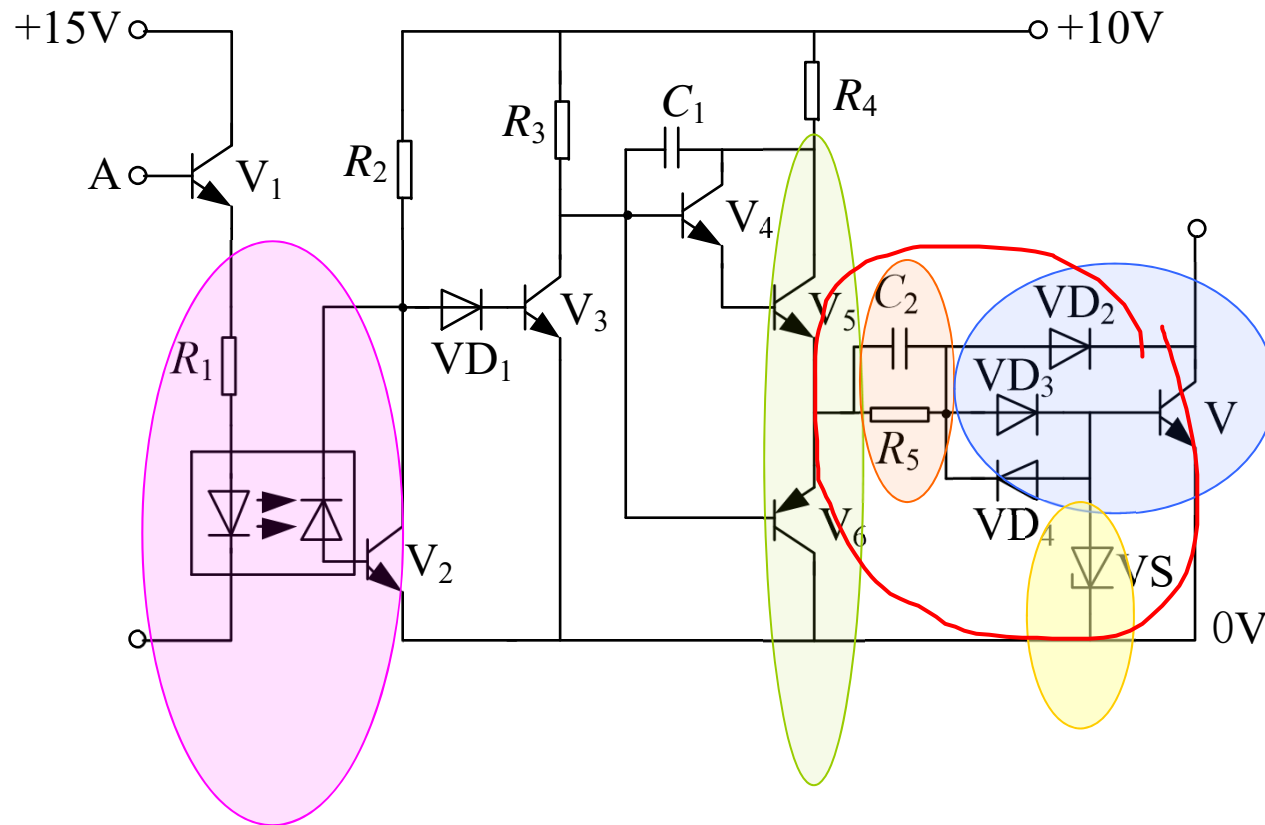


图9-7 GTR的一种驱动电路

■ 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

☞ 光耦合器由发光二极管和光敏晶体管组成，封装在一个外壳内。

☞ 有普通、高速和高传输比三种类型。

◆ 磁隔离的元件通常是脉冲变压器

☞ 当脉冲较宽时，为避免铁心饱和，常采用高频调制和解调的方法。

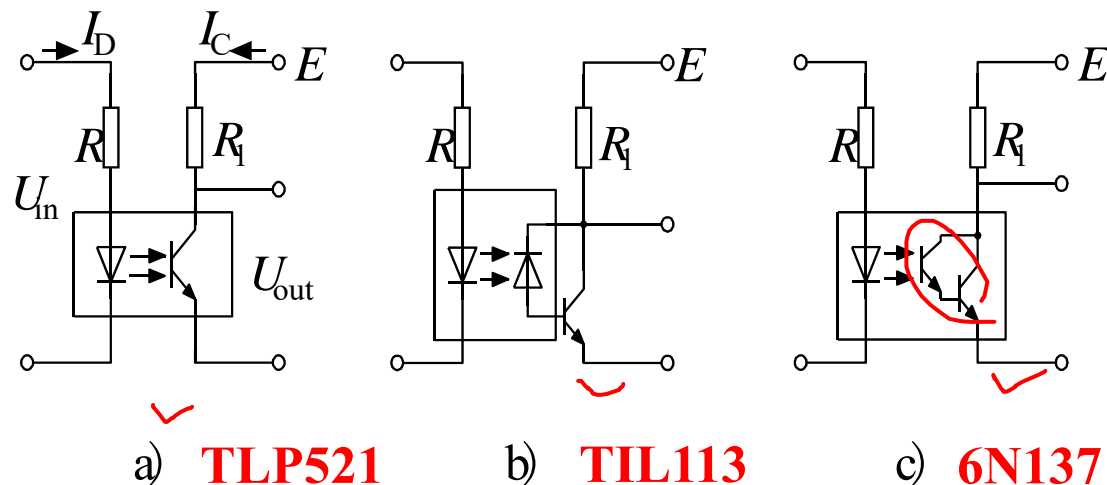


图9-1 光耦合器的类型及接法

a) 普通型 b) 高速型 c) 高传输比型

● 基本数量关系

首先，引入两个重要的基本概念：

- ✦ **触发延迟角**：从晶闸管开始承受正向阳极电压起到施加触发脉冲止的电角度,用 α 表示,也称**触发角**或**控制角**。
- ✦ **导通角**：晶闸管在一个电源周期中处于通态的电角度，用 θ 表示。

直流输出电压平均值为

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = 0.45U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0$$

随着 α 增大， U_d 减小，VT的 α 移相范围为 180°

- 通过控制触发脉冲的相位来控制直流输出电压大小的方式称为**相位控制方式**，简称**相控方式**

波形分析要点：

输出电压波形分析：

- 。共阴极连接的可控硅：有触发脉冲且阳极电位最高的T导通；
- 。共阳极连接的可控硅：有触发脉冲且阴极电位最低的T导通；
- 。是否构成电流回路、且电流方向正确？
- 。T关断的条件：
- 。先分析输出电压，后T上压降
- 。回路电压定律
- 。有触发脉冲且承受正压的T，才能由关断变为导通；
承受反压的T关断，才由导通变为关断

■ 带阻感负载的工作情况

◆ 电路分析

在 u_2 正半周期

✓ 触发角 α 处给晶闸管 VT_1 和 VT_4 加触发脉冲使其开通, $u_d = u_2$ 。

✓ 负载电感很大, i_d 不能突变且波形近似为一条水平线。

在 u_2 过零变负时, 由于电感的作用晶闸管 VT_1 和 VT_4 中仍流过电流 i_d , 并不关断。

在 $\omega t = \pi + \alpha$ 时刻, 触发 VT_2 和 VT_3 , VT_2 和 VT_3 导通, u_2 通过 VT_2 和 VT_3 分别向 VT_1 和 VT_4 施加反压使 VT_1 和 VT_4 关断, 流过 VT_1 和 VT_4 的电流迅速转移到 VT_2 和 VT_3 上, 此过程称为 **换相**, 亦称 **换流**。

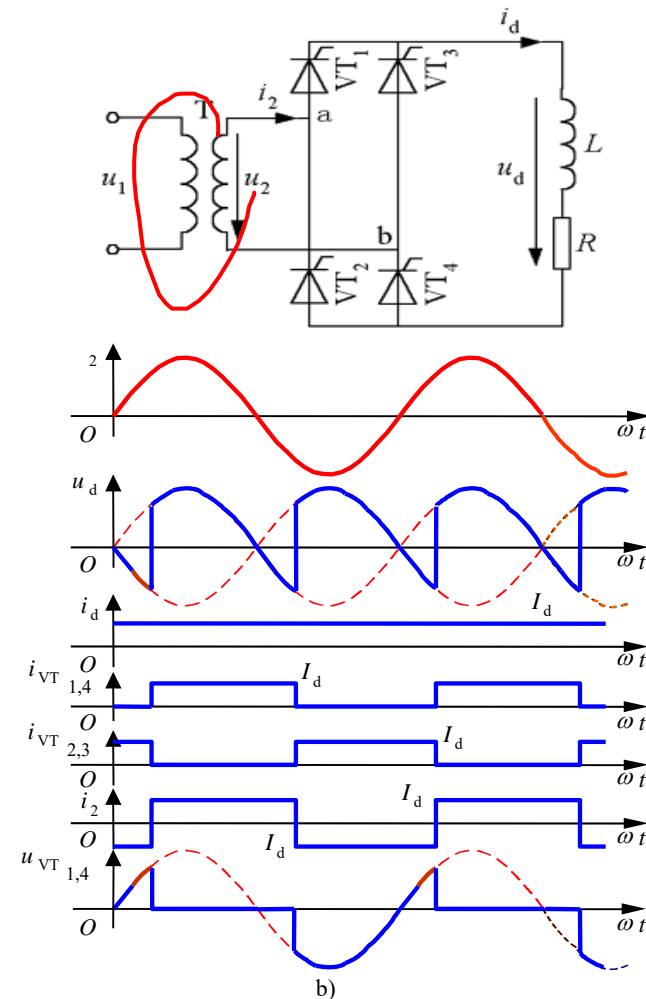


图3-6 单相全控桥带阻感负载时的电路及波形

基本数量关系

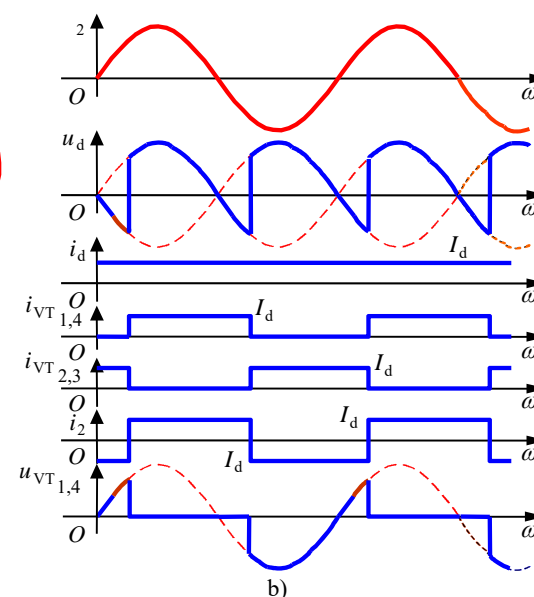
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha = \underline{0.9U_2 \cos \alpha} \quad (3-15)$$

- 晶闸管移相范围为 90° 。
- 晶闸管承受的最大正反向电压均为 $\sqrt{2}U_2$ 。
- 晶闸管导通角 θ 与 α 无关，均为 180° 。

电流的平均值和有效值：

$$\underline{I_{dT} = \frac{1}{2} I_d}$$

$$\underline{I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d = 0.707 I_d}$$



- 变压器二次侧电流 i_2 的波形为正负各 180° 的矩形波，其相位由 α 角决定，有效值 $I_2 = I_d$ 。

又称单相双半波可控整流电路。

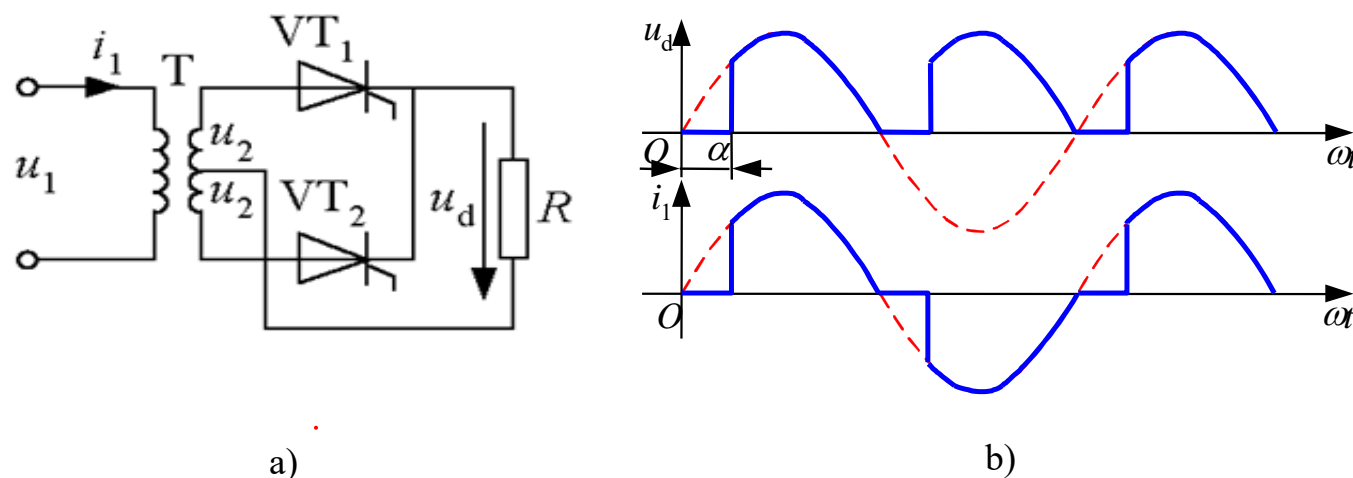


图3-10 单相全波可控整流电路及波形

- 单相全波与单相全控桥从直流输出端或从交流输入端看均是基本一致的。
- 变压器不存在直流磁化的问题。

◆单相全波与单相全控桥的区别

☞单相全波中**变压器**结构较复杂，材料的消耗多。

☞单相全波只用**2**个晶闸管，比单相全控桥少**2**个，相应地，门极驱动电路也少**2**个；但是晶闸管承受的最大电压是单相全控桥的**2**倍。

☞单相全波**导电回路**只含**1**个晶闸管，比单相桥少**1**个，因而管压降也少**1**个。

◆从上述后两点考虑，单相全波电路有利于在**低输出电压**的场合应用。

● 电路结构

单相全控桥中，每个导电回路中有2个晶闸管，1个晶闸管可以用二极管代替，从而简化整个电路。

如此即成为单相桥式半控整流电路（先不考虑 VD_R ）。

● 电阻负载

半控电路与全控电路在电阻负载时的工作情况相同。

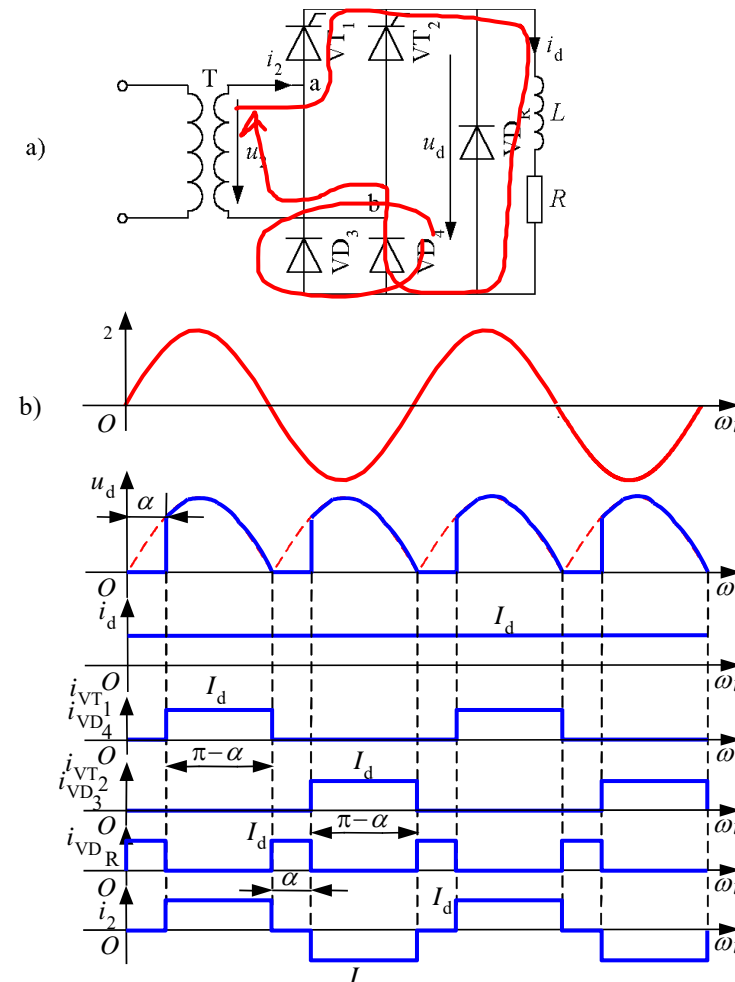


图3-11 单相桥式半控整流电路，有续流二极管，阻感负载时的电路及波形

● 单相半控桥带阻感负载的情况

每一个导电回路由1个晶闸管和1个二极管构成。

在 u_2 正半周， α 处触发 VT_1 ， u_2 经 VT_1 和 VD_4 向负载供电。

u_2 过零变负时，因电感作用使电流连续， VT_1 继续导通，但因a点电位低于b点电位，电流是由 VT_1 和 VD_2 续流， $u_d=0$ 。

在 u_2 负半周， α 处触发 VT_3 ，向 VT_1 加反压使之关断， u_2 经 VT_3 和 VD_2 向负载供电。

u_2 过零变正时， VD_4 导通， VD_2 关断。 VT_3 和 VD_4 续流， u_d 又为零。

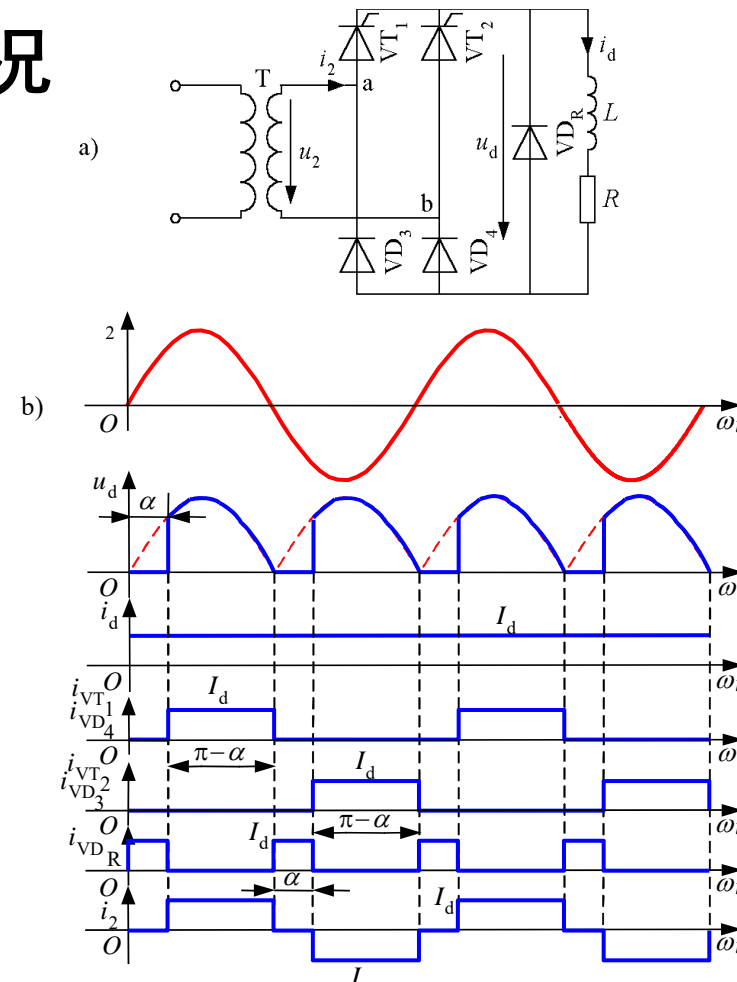
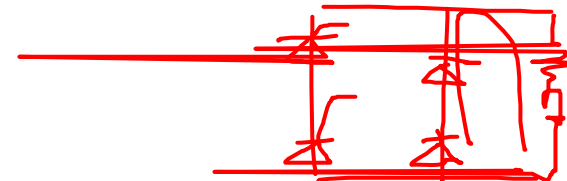
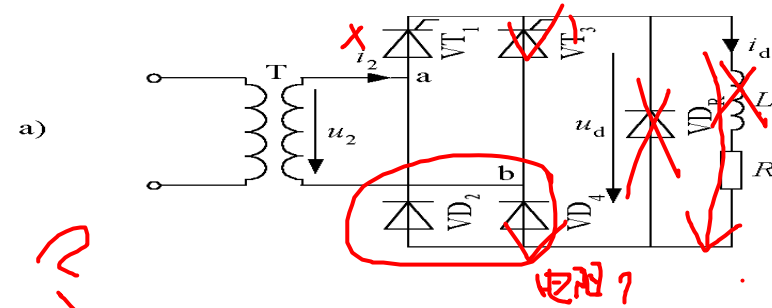


图3-11 单相桥式半控整流电路，有续流二极管，阻感负载时的电路及波形

续流二极管的作用

- 避免可能发生的失控现象。

若无续流二极管，则当 α 突然增大至 180° 或触发脉冲丢失时，会发生一个晶闸管持续导通而两个二极管轮流导通的情况，这使 u_d 成为正弦半波，其平均值保持恒定，称为**失控**。



- 有续流二极管 VD_R 时，续流过程由 VD_R 完成，避免了失控的现象。
- 续流期间导电回路中只有一个管压降，有利于降低损耗。

● 单相桥式半控整流电路的另一种接法

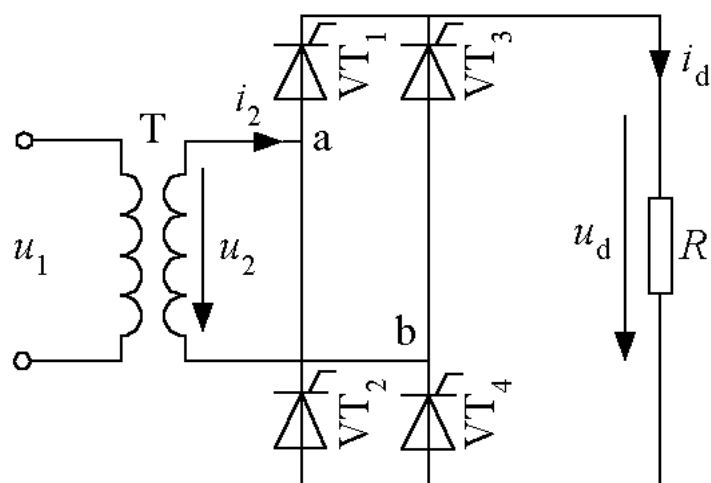


图3-5 单相全控桥式
带电阻负载时的电路及波形

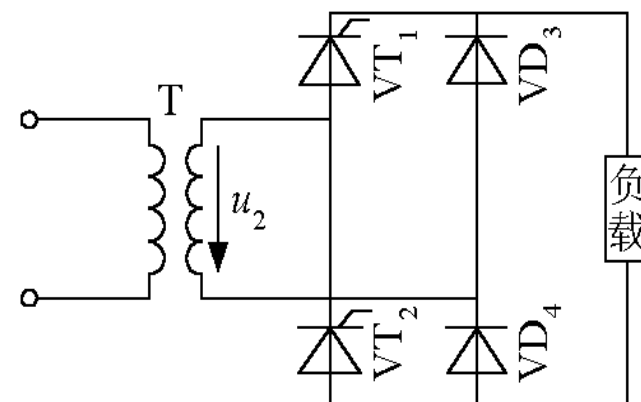


图3-12 单相桥式半控整流
电路的另一接法

- ⊕ 相当于把图3-5a中的 VT_3 和 VT_4 换为二极管 VD_3 和 VD_4 ，这样可以省去续流二极管 VD_R ，续流由 VD_3 和 VD_4 来实现。

● 三相桥式全控整流电路的特点

(3) u_d 一周脉动6次，每次脉动的波形都一样，故该电路为6脉波整流电路。

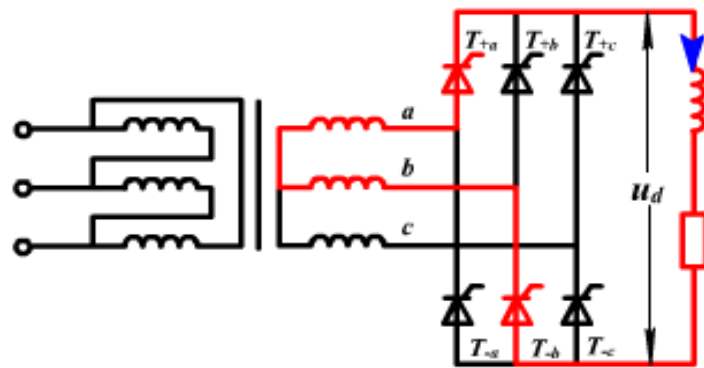
(4) 需保证同时导通的2个晶闸管均有脉冲

✦ 可采用两种方法：一种是宽脉冲触发

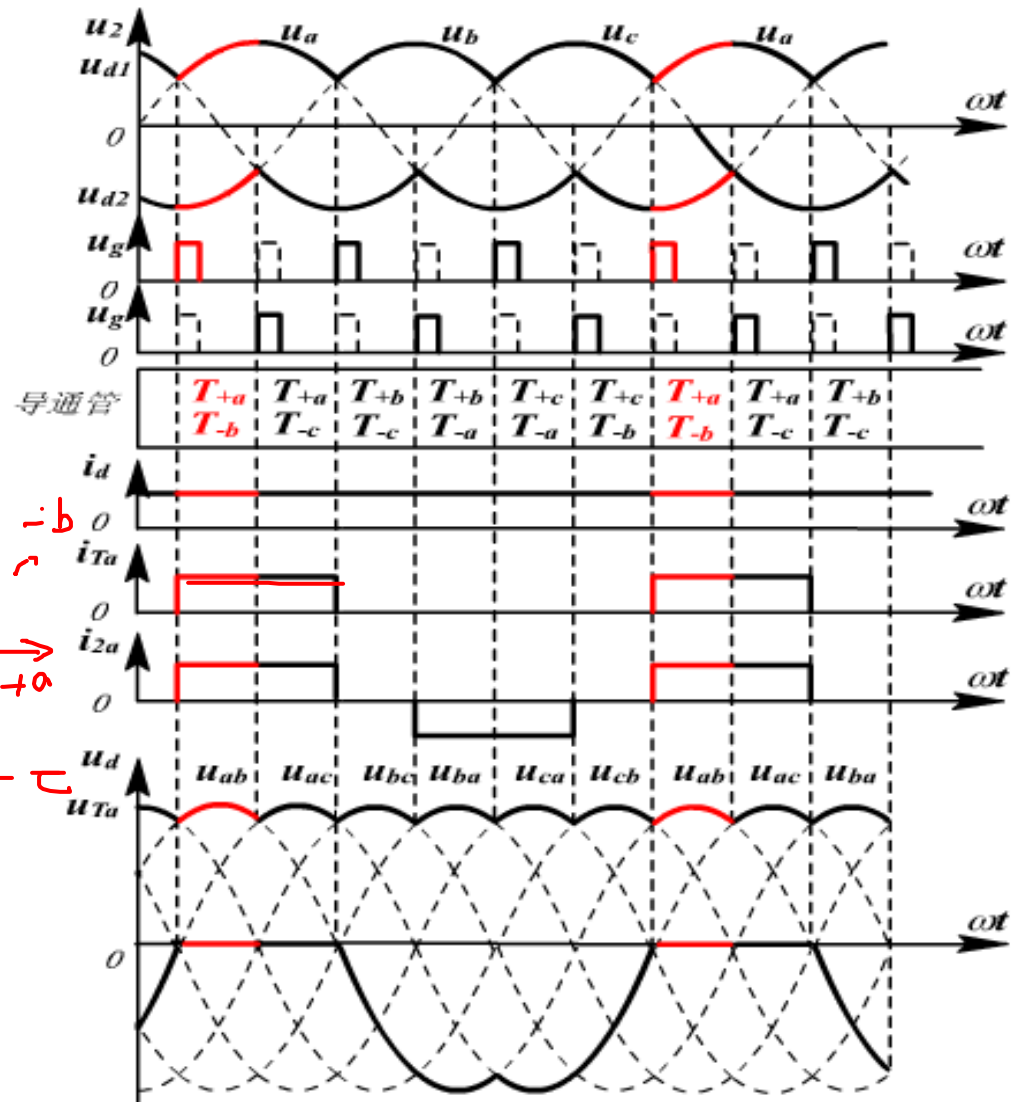
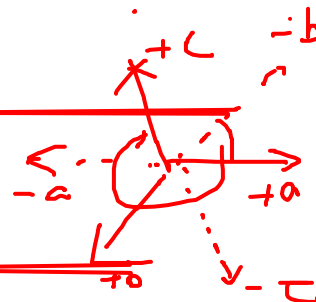
一种是双脉冲触发（常用）

(5) 晶闸管承受的电压波形与三相半波时相同，晶闸管承受最大正、反向电压的关系也相同。

(二) 电感负载工作过程

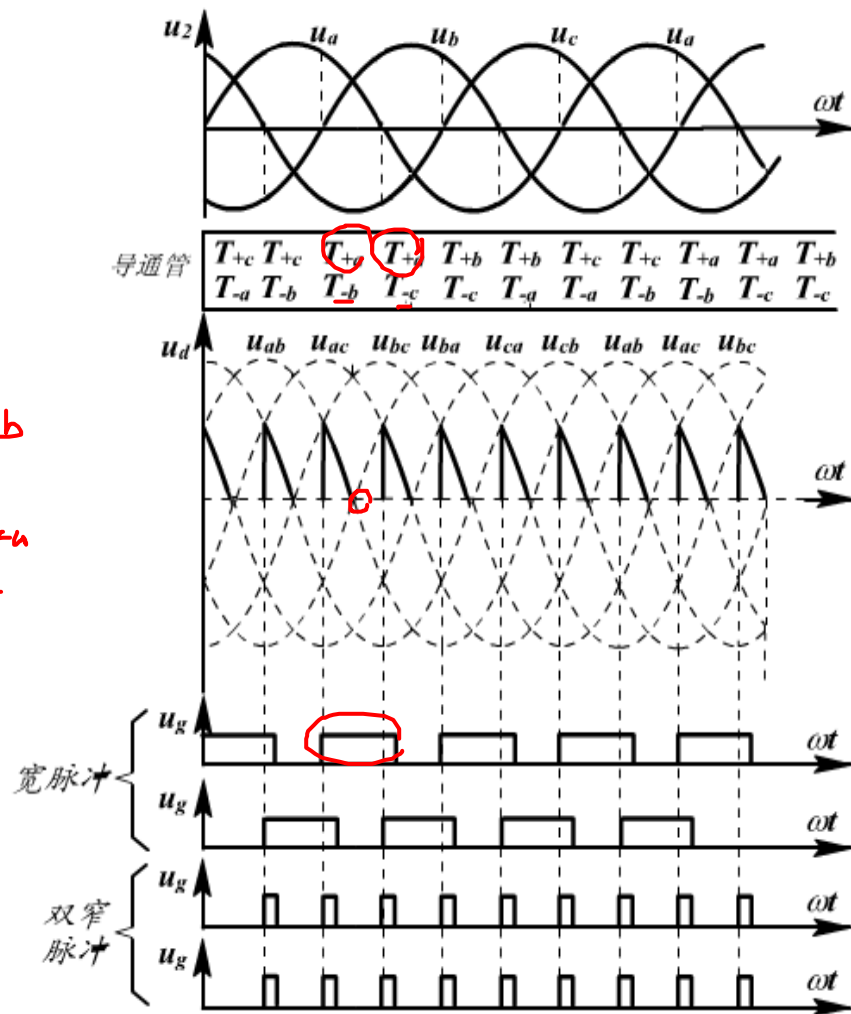
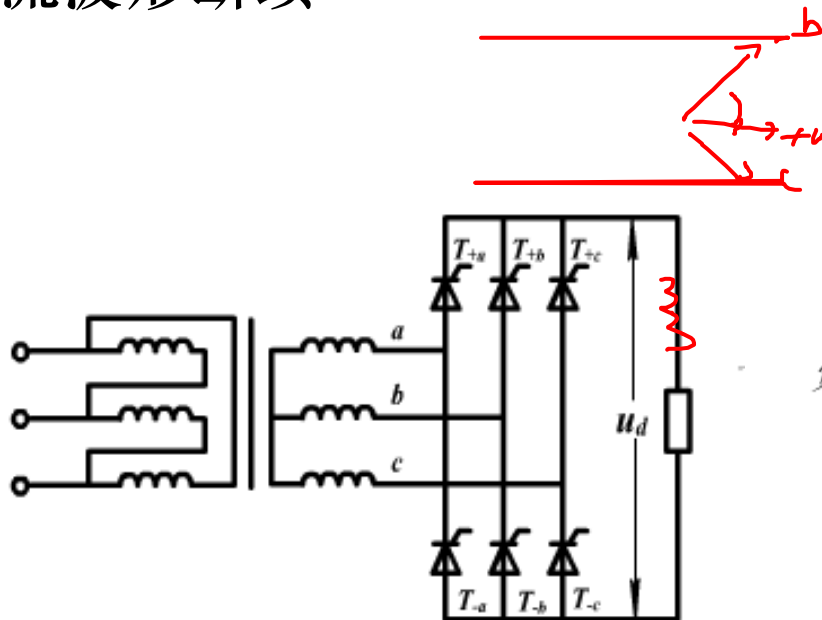


- 初态
- T_{+a}, T_{-b} 导通
- T_{+a}, T_{-c} 导通
- T_{+b}, T_{-c} 导通
- T_{+b}, T_{-a} 导通
- T_{+c}, T_{-a} 导通
- T_{+c}, T_{-b} 导通



控制角 $\alpha > 60^\circ$

以控制角等于90度为例，当
线电压过零时，晶闸管关断，
电流波形断续



1) 带电阻负载时的工作情况

- 当 $\alpha \leq 60^\circ$ 时, u_d 波形均连续, 对于电阻负载, i_d 波形与 u_d 波形形状一样, 也连续

波形图: $\alpha = 0$ (图3-19)

$\alpha = 30^\circ$ (图3-20)

$\alpha = 60^\circ$ (图3-21)

- 当 $\alpha > 60^\circ$ 时, u_d 波形每 60° 中有一段为零, u_d 波形不能出现负值

波形图: $\alpha = 90^\circ$ (图3-22)

- 带电阻负载时三相桥式全控整流电路 α 角的移相范围是 120°

2) 阻感负载时的工作情况

● $\alpha \leq 60^\circ$ 时 ($\alpha = 0^\circ$ [图3-23](#); $\alpha = 30^\circ$ [图3-24](#))

✦ u_d 波形连续，工作情况与带电阻负载时十分相似。

主要包括 {
各晶闸管的通断情况
输出整流电压 u_d 波形
晶闸管承受的电压波形

✦ 区别在于：得到的负载电流 i_d 波形不同。

当电感足够大的时候， i_d 的波形可近似为一条水平线。

● $\alpha > 60^\circ$ 时 ($\alpha = 90^\circ$ [图3-25](#))

✦ 阻感负载时的工作情况与电阻负载时不同。

电阻负载时， u_d 波形不会出现负的部分。

阻感负载时， u_d 波形会出现负的部分。

● 单相可控整流电路，重点掌握：

- ⊕ 分段线性等效电路的分析方法
- ⊕ 单相半波、桥式全控、全波可控、桥式半控整流电路的原理分析
- ⊕ 触发角、导通角的定义
- ⊕ 电阻负载、阻感负载（续流二极管 -- 半控）的区别
- ⊕ 直流磁化问题
- ⊕ 晶闸管的电压应力分析

● 逆变的概念

逆变——与整流相对应，直流电变成交流电。

✦ 交流侧接电网，为**有源逆变**。

✦ 交流侧接负载，为**无源逆变**。

本章讲述无源逆变

● 逆变与变频

✦ 变频电路：分为交交变频和交直交变频两种。

✦ 交直交变频由交直变换（整流）和直交变换两部分组成，后一部分就是逆变。

● 主要应用

✦ 各种直流电源，如蓄电池、干电池、太阳能电池等。

✦ 交流电机调速用变频器、不间断电源、感应加热电源等电力电子装置的核心部分都是逆变电路。

● 器件换流 (Device Commutation)

- ✦ 利用全控型器件的自关断能力进行换流。
- ✦ 在采用IGBT、电力MOSFET、GTO、GTR等全控型器件的电路中的换流方式是器件换流。

● 电网换流 (Line Commutation)

- ✦ 电网提供换流电压的换流方式。-- 晶闸管整流
- ✦ 将负的电网电压施加在欲关断的晶闸管上即可使其关断。不需要器件具有门极可关断能力，但不适用于没有交流电网的无源逆变电路。

● 负载换流 (Load Commutation)

● 强迫换流 (Forced Commutation)

- 由负载提供换流电压的换流方式。
- 负载电流的相位超前于负载电压的场合，都可实现负载换流。
- 如图是基本的**负载换流**电路，4个桥臂均由晶闸管组成。
- 整个负载工作在接近并联谐振状态而略呈容性。
- 直流侧串电感，工作过程可认为 i_d 基本没有脉动。
- 负载对基波的阻抗大而对谐波的阻抗小。所以 u_o **接近正弦波**。
- 注意**触发 VT_2 、 VT_3 的时刻 t_1 必须在 u_o 过零前并留有足够的裕量，才能使换流顺利完成。

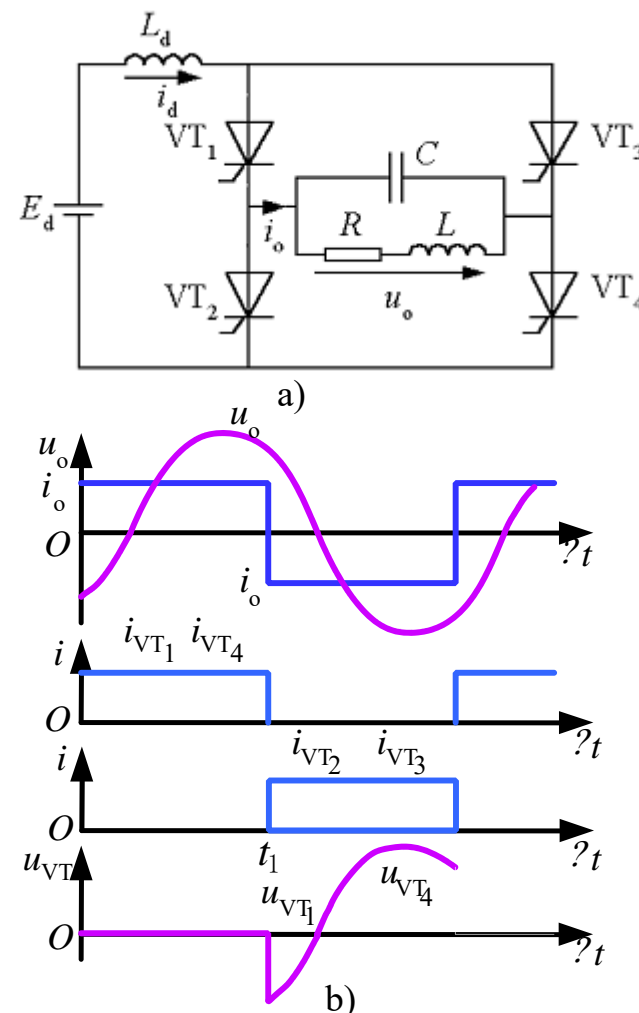


图4-2 负载换流
电路及其工作波形

● 强迫换流 (Forced Commutation)

- ✦ 设置附加的换流电路，给欲关断的晶闸管强迫施加反压或反电流的换流方式称为**强迫换流**。
- ✦ 通常利用附加电容上所储存的能量来实现，因此也称为**电容换流**。
- ✦ 分类

由换流电路内电容
直接提供换流电压



直接耦合式
强迫换流

通过换流电路内的
电容和电感的耦合
来提供换流电压或
换流电流



电感耦合式
强迫换流

直接耦合式强迫换流

当晶闸管VT处于通态时，预先给电容充电。当S合上，就可使VT被施加反压而关断。也叫电压换流。

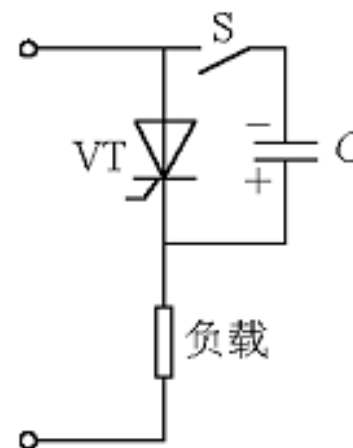


图4-3直接耦合式强迫换流原理图

电感耦合式强迫换流

先使晶闸管电流减为零，然后通过反并联二极管使其加上反向电压。也叫电流换流。

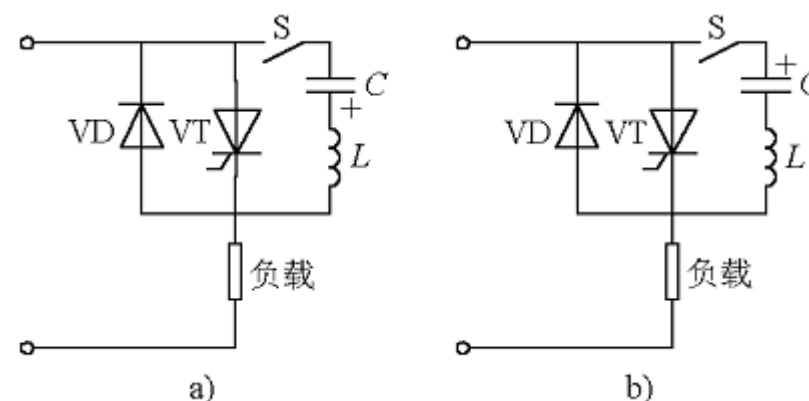


图4-4 电感耦合式强迫换流原理图

● 换流方式总结：

- ✦ 器件换流——适用于全控型器件。
- ✦ 其余三种方式——针对晶闸管。
- ✦ 器件换流和强迫换流——属于自换流。
- ✦ 电网换流和负载换流——属于外部换流。
- ✦ 当电流不是从一个支路向另一个支路转移，而是在支路内部终止流通而变为零，则称为**熄灭**。

● 逆变电路的分类 —— 根据直流侧电源性质的不同

直流侧是**电压源**

电压型逆变电路——又称为电压源型逆变电路

Voltage Source Type Inverter-VSTI

直流侧是**电流源**

电流型逆变电路——又称为电流源型逆变电路

Current Source Type Inverter-VSTI

● 电压型逆变电路的特点

✦ 直流侧为电压源或并联大电容，直流侧电压基本**无脉动**。

✦ 输出电压为矩形波，输出电流因负载阻抗不同而不同。

✦ 阻感负载时需提供无功功率。为了给交流侧向直流侧反馈的无功能量提供通道，逆变桥各臂并联反馈二极管。

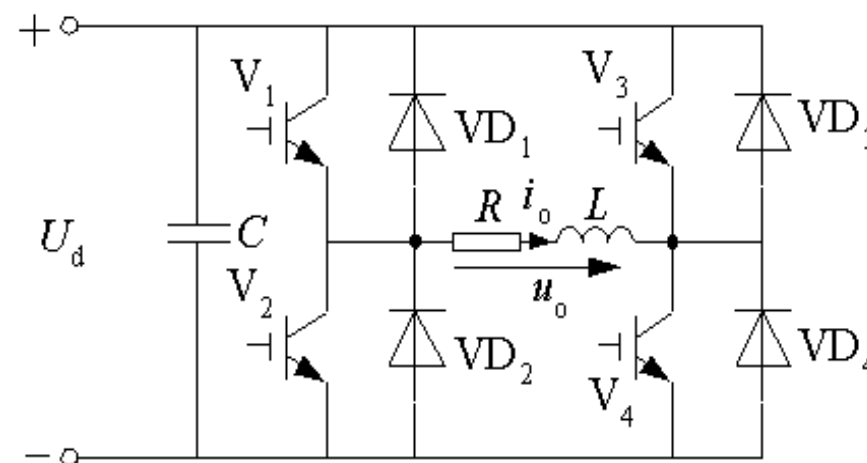


图4-5 电压型全桥逆变电路

- 直流电源为电流源的逆变电路称为**电流型逆变电路**。

- 电流型逆变电路主要**特点**

(1) 直流侧串大电感，电流基本无脉动，相当于电流源。

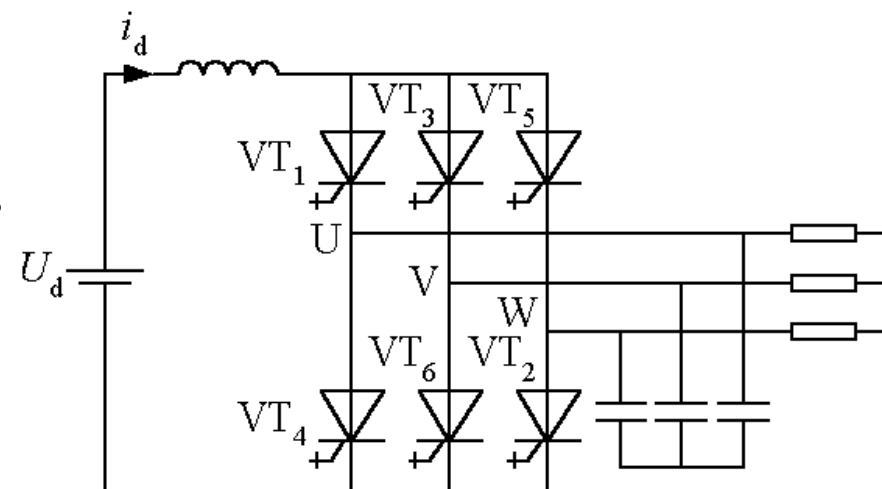


图4-11 电流型三相桥式逆变电路

(2) 交流输出电流为矩形波，与负载阻抗角无关。输出电压波形和相位因负载不同而不同。

(3) 直流侧电感起缓冲无功能量的作用，不必给开关器件反并联二极管。

- 电流型逆变电路中，采用半控型器件的电路仍应用较多。
- 换流方式有负载换流、强迫换流。

变换器理想时的外特性

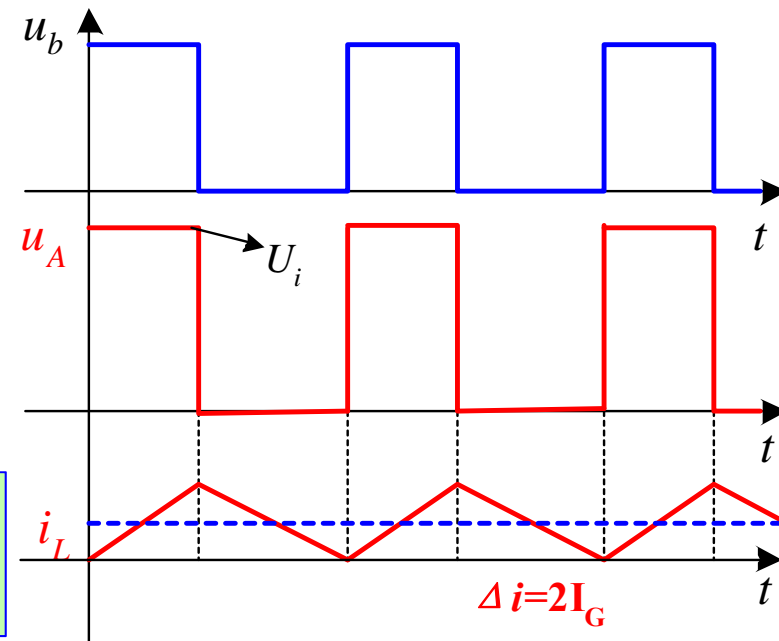
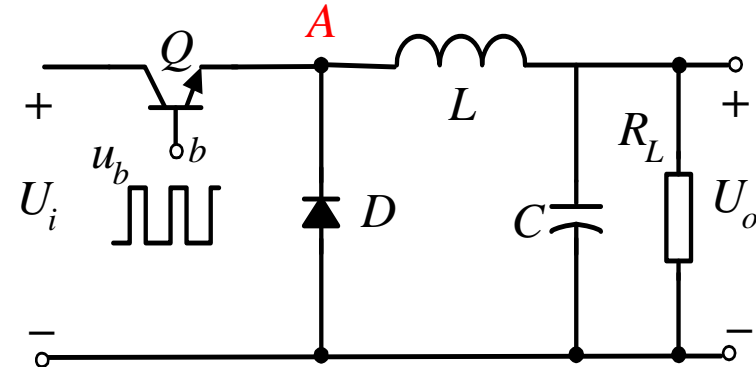
临界连续模式(CRM):

当 $I_O = \Delta i / 2 = I_G \rightarrow$ 临界连续

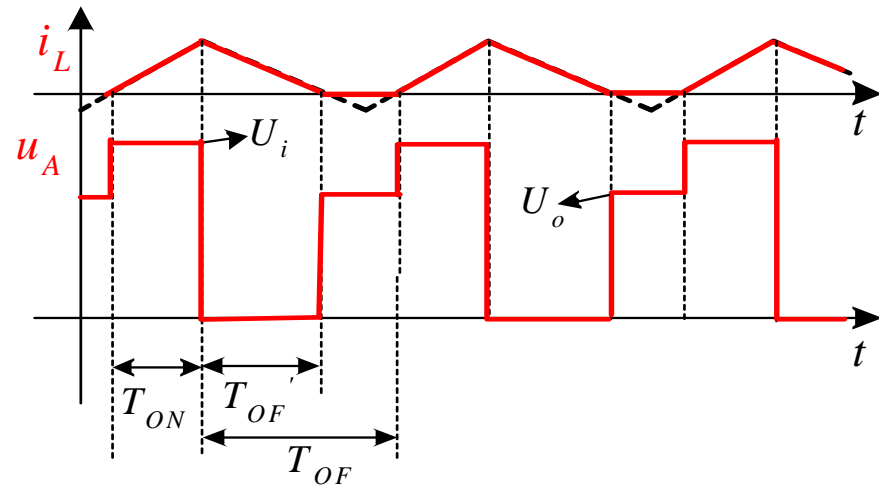
临界连续电流: I_G

$$\begin{aligned}\Delta i_{\text{ON}} &= \frac{(U_i - U_o) \cdot DT}{L} \\ &= -\Delta i_{\text{OF}} = \frac{U_o \cdot (1-D)T}{L} = 2I_G\end{aligned}$$

$$\star I_G = \frac{U_i T}{2L} D(1-D) \quad I_{G\text{max}} = \frac{U_i T}{8L}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} (0 \sim DT) \quad \Delta i_{ON} = \frac{1}{L} (U_i - U_o) T_{ON} \\ (DT \sim DT + T'_{oF}) \quad \Delta i'_{oF} = \frac{1}{L} (-U_o) T'_{oF} \end{array} \right.$$



$$T'_{oF} = \frac{U_i - U_o}{U_o} T_{ON}$$

$$I_o = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} (T_{ON} + T'_{oF}) \cdot \Delta i_{ON}$$

断续时外特性:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 + I_o / (4 I_{G \max} D^2)}$$

式中

$$I_{G \max} = \frac{U_i T}{8L}$$

● 滤波电感设计

- ✦ 为保证电感在给定负载条件下电感电流连续，有 $I_{\text{omin}} = I_G$
- ✦ 将 I_{omin} 代入 I_G 表达式，即得到电感 L ：

$$L = \frac{U_i T D (1 - D)}{2 I_{\text{omin}}}$$

- ✦ (L也可以按照 Δi 的表达式计算)
- ✦ 如果临界连续电流取得过小，则电感过大；电感小、则电流纹波大
- ✦ 经验取值： $I_G = (1/5 \sim 1/3) I_{\text{omax}}$
- ✦ 轻载时必定工作在断续模式

滤波电容设计

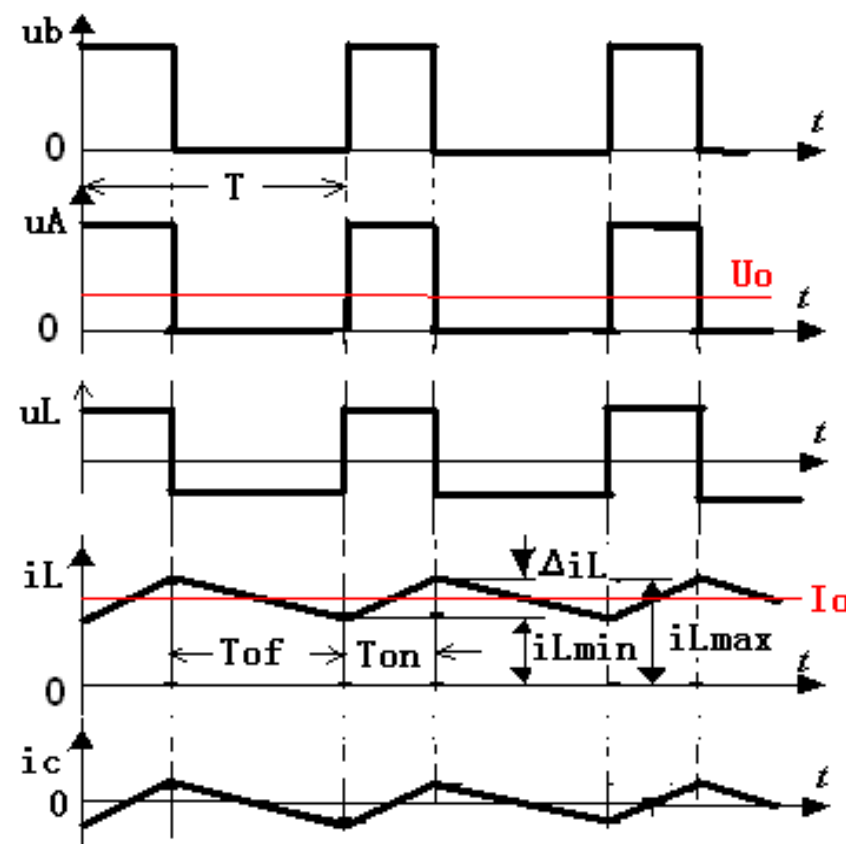
- 电容电流近似为电感电流的脉动部分
- 电容电流在1/2周期内充电，在1/2周期内放电
- 所以，电容电流：

$$\Delta I_c = \frac{\Delta i_c}{4} = \frac{\Delta i_L}{4} = \frac{U_i T}{4L} D(1-D)$$

- 电容纹波电压

$$\Delta U_c = \frac{1}{C} \int_0^{T/2} \Delta I_c dt = \frac{1}{C} * \frac{U_i T}{4L} D(1-D) * \frac{T}{2} = \frac{U_i}{8LCf^2} D(1-D)$$

$$\Delta i_L = \frac{U_i T}{L} D(1-D):$$



- 电路拓扑，理想电路的分析
- CCM的分析方法、要点、过程和结果： U_o ， Δi_L
- DCM的分析方法、要点、过程和结果： U_o ， Δi_L
- 关键点电流电压波形，器件应力，器件选取和设计

几个公式： $U_o = DU_i$

参数计算：
(最小值)

$$\begin{cases} L = \frac{U_i TD(1-D)}{2I_{o\min}} \\ C = \frac{U_i D(1-D)}{8Lf^2 \Delta U_c} \end{cases}$$

✦ 联立等式，求解

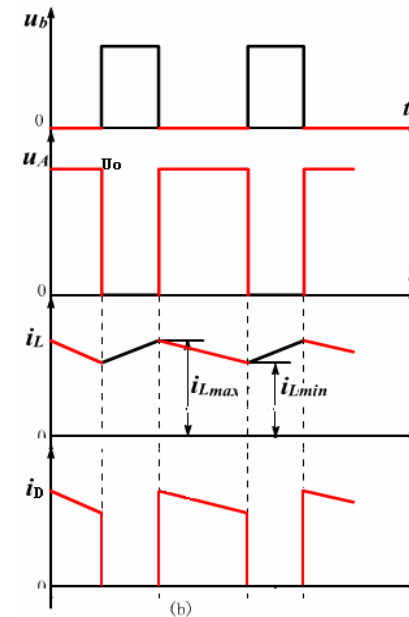
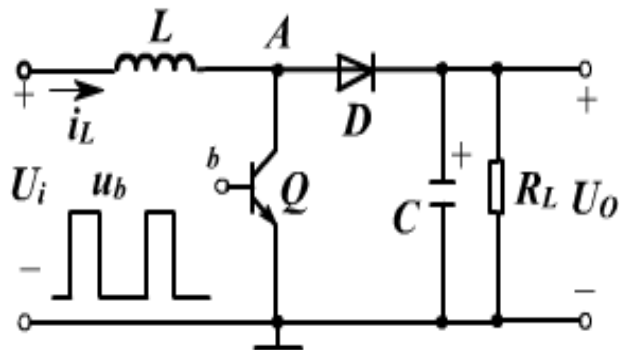
$$\begin{cases} U_i = L \frac{i_{L\max} - i_{L\min}}{T_{ON}} \\ U_i - U_o = L \frac{i_{L\min} - i_{L\max}}{T_{OFF}} \end{cases}$$



$$\frac{U_i}{U_i - U_o} = \frac{-T_{OFF}}{T_{ON}} = \frac{D-1}{D}$$

$$U_o = \frac{T_{ON} + T_{OFF}}{T_{OFF}} U_i = \frac{U_i}{1-D}$$

✦ 根据公式可知，输出电压大于输入电压，属升压电路



● 开关周期磁通变化量为零

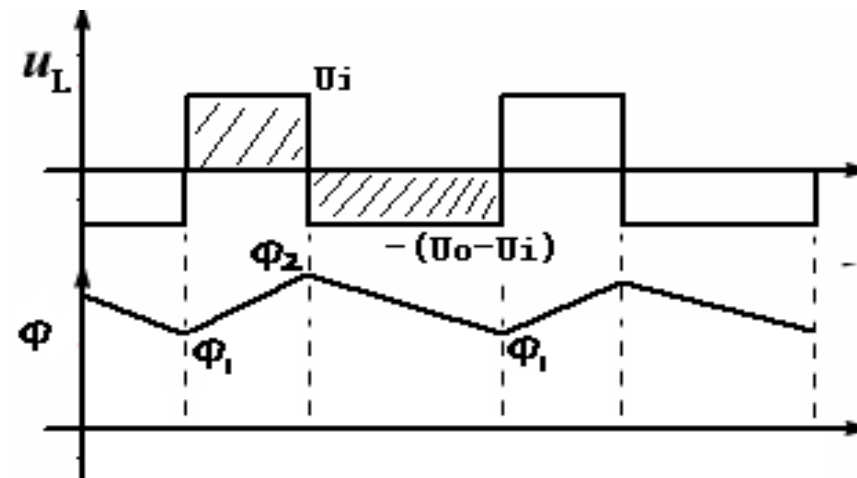
- ⊕ 电感外加电压 u_L 为正时，磁通增加
- ⊕ 电感外加电压 u_L 为负时，磁通减小
- ⊕ 在单个开关周期，磁通变化量为零（磁通平衡）



$$\phi_T - \phi_0 = \frac{1}{N} \int_0^T u_L dt = 0$$

$$\int_0^T u_L dt = 0$$

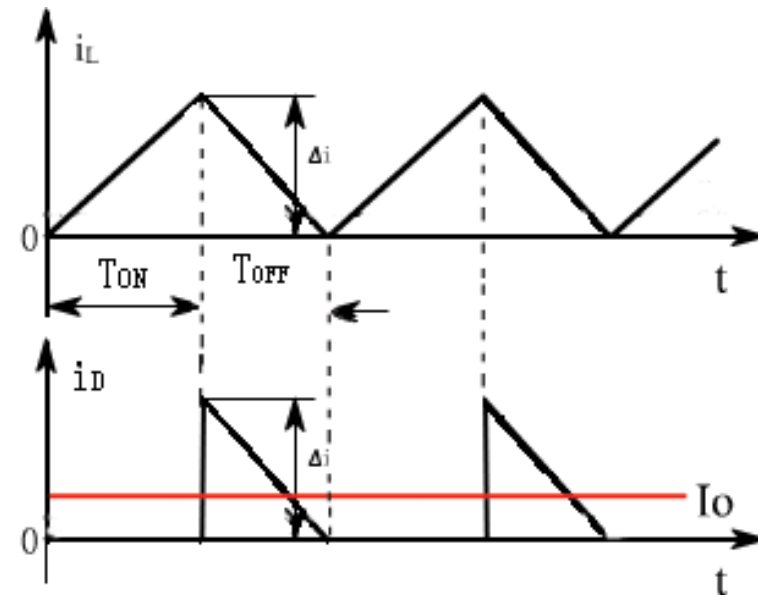
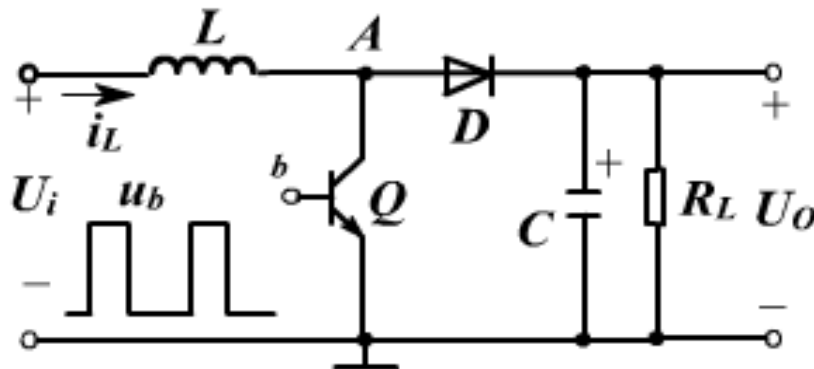
$$u_L = N \frac{d\phi}{dt}$$



- 临界电流值 I_G :电感电流临界连续条件下输出电流的平均值

$$I_G = I_o = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \Delta i_L T_{OFF}$$

为什么是 T_{OFF} ?



$$I_G = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \Delta i_L T_{OFF}$$

临界连续工作条件

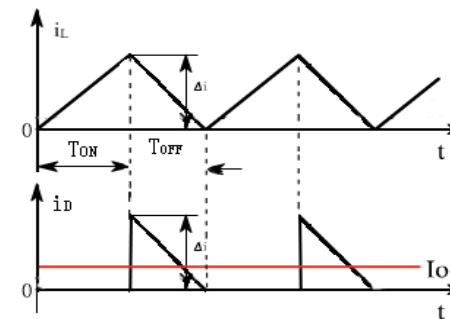
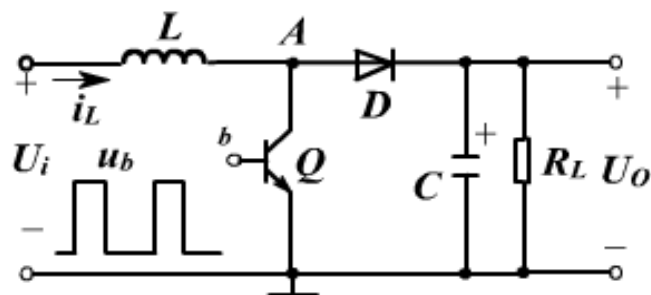
在稳态时， $\Delta i = i_{Lmax} - i_{Lmin}$ ，由前式可得

$$\Delta i_L = \frac{U_i D T}{L}$$

代入

$$I_G = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \Delta i_L T_{OFF} = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{U_i D T}{L} \right) T_{OFF} = \frac{U_i T D (1-D)}{2L}$$

和BUCK型变
换器相比，
是否相同？



● Boost斩波电路小结

- ✦ 电路的名称和拓扑
- ✦ 电感电流连续模式（CCM）下的工作原理和外特性分析—方法和结果
- ✦ 电感电流断续模式（DCM）下的工作原理和外特性分析—方法和结果；临界连续的概念
- ✦ 关键点电流电压波形和器件应力
- ✦ L、C的设计依据和方法

● Boost变换器的特点

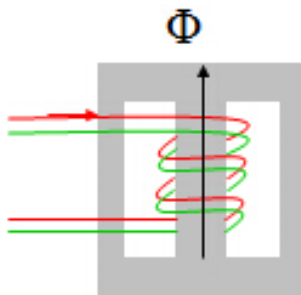
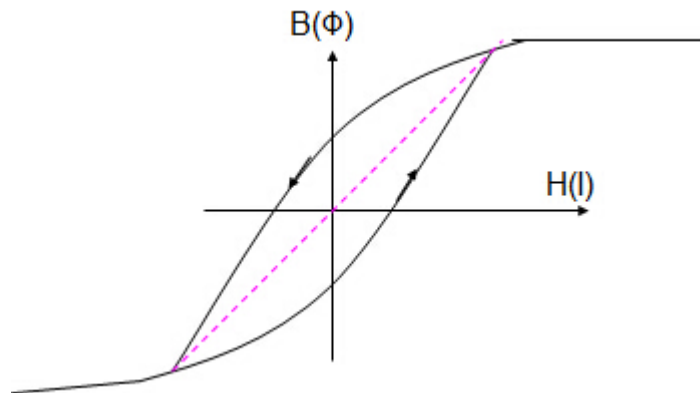
- ✦ $i_{in} = i_L$; $I_o = I_D$; 峰值电流: i_Q 、 i_D 和 i_L 相同;
- ✦ 输入电流纹波小而输出电流纹波大;

● 重点掌握

- ✦ 能正确画出flyback变换器电路构成图；
- ✦ 掌握flyback变换器基本工作原理和特点
- ✦ 掌握分析方法，CCM模式下的公式推导和关键波形，DCM模式下的关键波形
- ✦ CCM和DCM两种方式下外特性
- ✦ 设计临界连续电感，会判断在某给定参数下的工作方式
- ✦ 器件承受的电流电压值

● 单端反激(flyback)变换器

✦ 是隔离的Buck-Boost变换器



- ✦ 磁通 $\Phi = BS$
- ✦ $u = L \cdot di/dt = N \cdot d\Phi/dt$
- ✦ 磁通连续性: Φ 不能突变
- ✦ 磁饱和, 磁复位

连续模式 – 指磁通连续/电感能量连续

⊕ Q ON时:

晶体管导通时，二极管截止

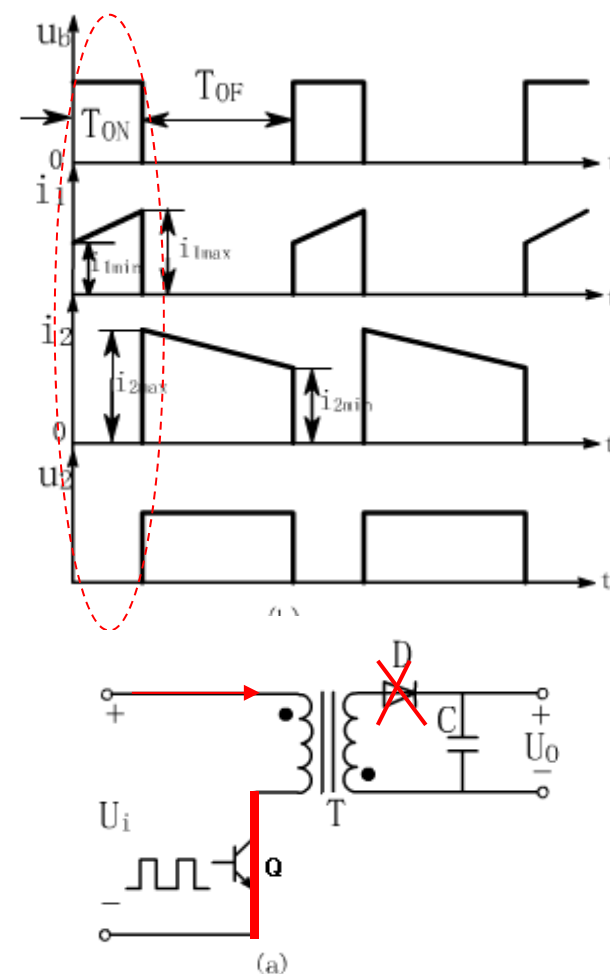
电感变压器作为电感运行

电感储能，负载由电容提供能量

$$U_i = L_1 \frac{di_{L1}}{dt}$$

$$\Delta i_1 = (i_{1\max} - i_{1\min}) = \frac{U_i}{L_1} T_{\text{ON}}$$

L_1 : 原边等效励磁电感



连续模式 – 指磁通连续/电感能量连续

⊕ Q OFF时:

晶体管截止时

感应电动势决定二极管导通

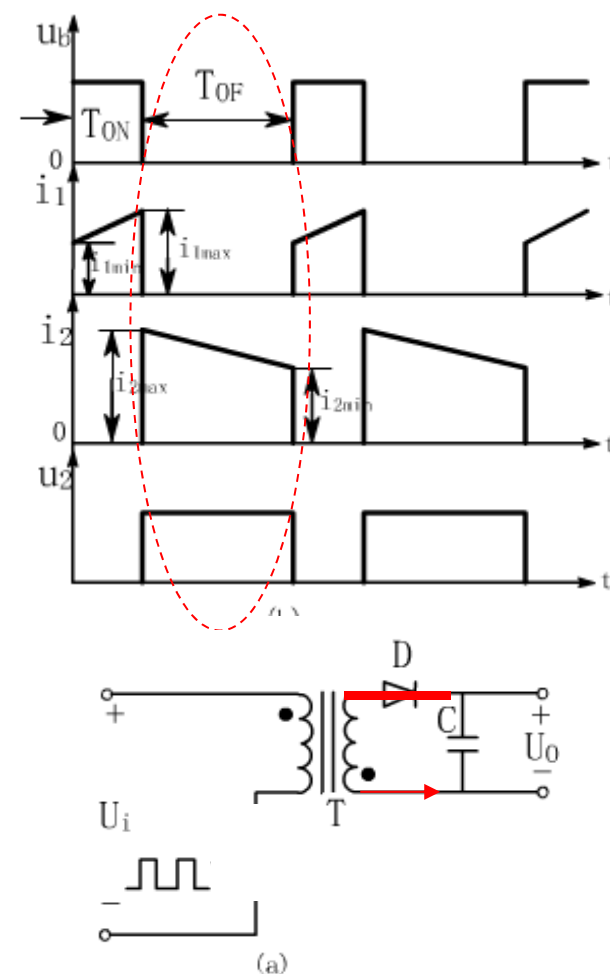
i_2 维持磁通不能突变

电感储能向电容和负载提供

$$-U_o = L_2 \frac{di_{L2}}{dt}$$

$$\Delta i_2 = (i_{2\max} - i_{2\min}) = \frac{U_o}{L_2} T_{OF}$$

L_2 : 副边等效激磁电感



连续模式 – 指磁通连续/电感能量连续

在稳态时，转换瞬间磁通连续：

$$i_{1\max} N_1 = i_{2\max} N_2 \text{ 和 } i_{1\min} N_1 = i_{2\min} N_2$$

即 $\Delta i_1 N_1 = \Delta i_2 N_2$

此外，电感与匝数的平方成正比

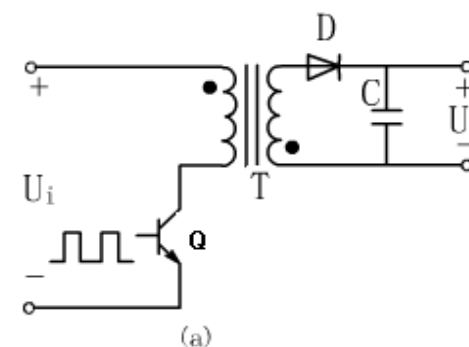
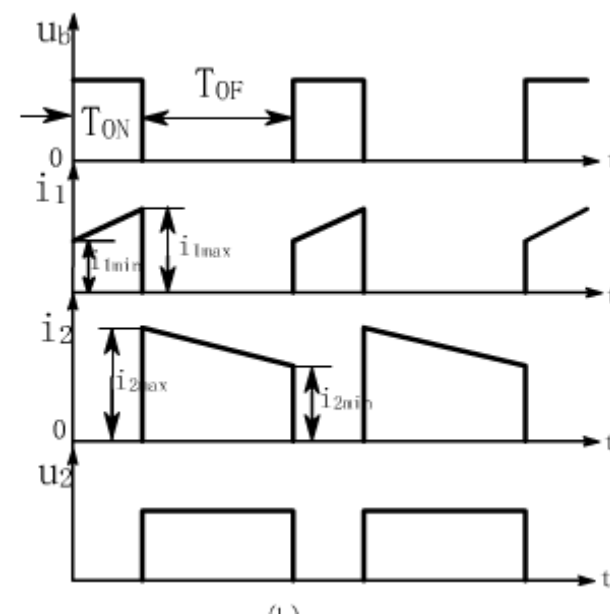
$$L_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 L_2$$

代入前式

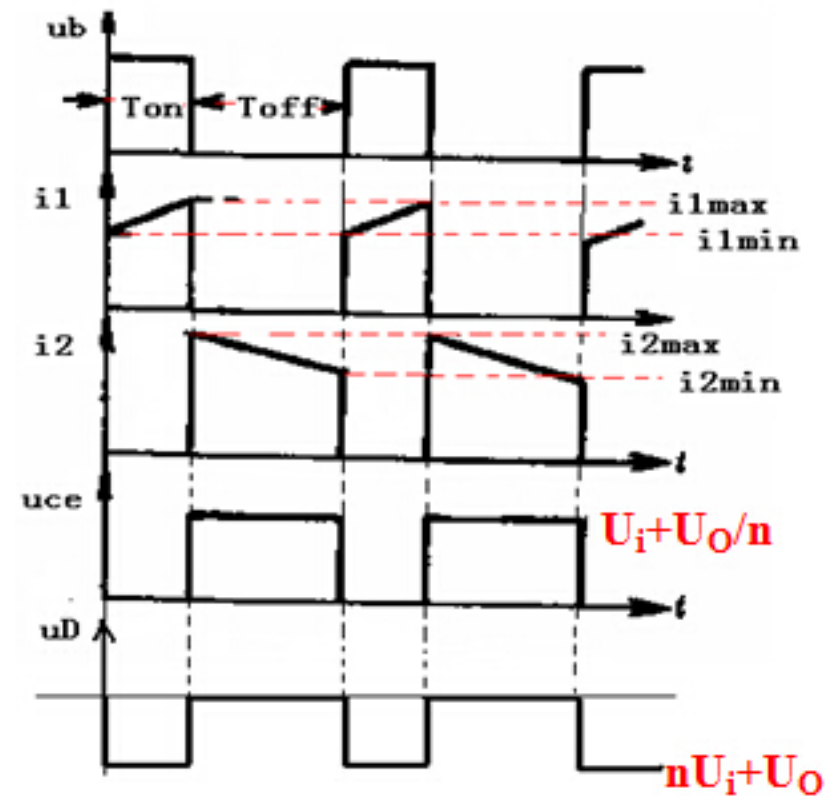
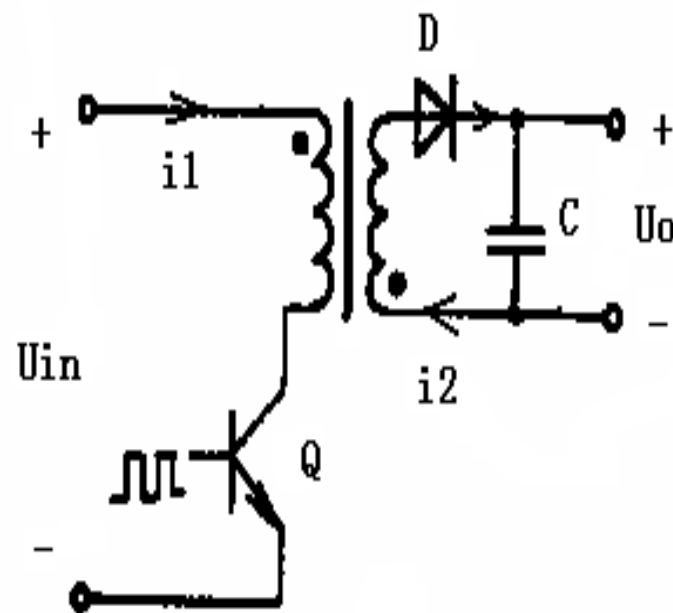
$$U_o = \frac{T_{ON}}{T_{OF}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot U_i$$

定义 $n = N_2/N_1$ ，则

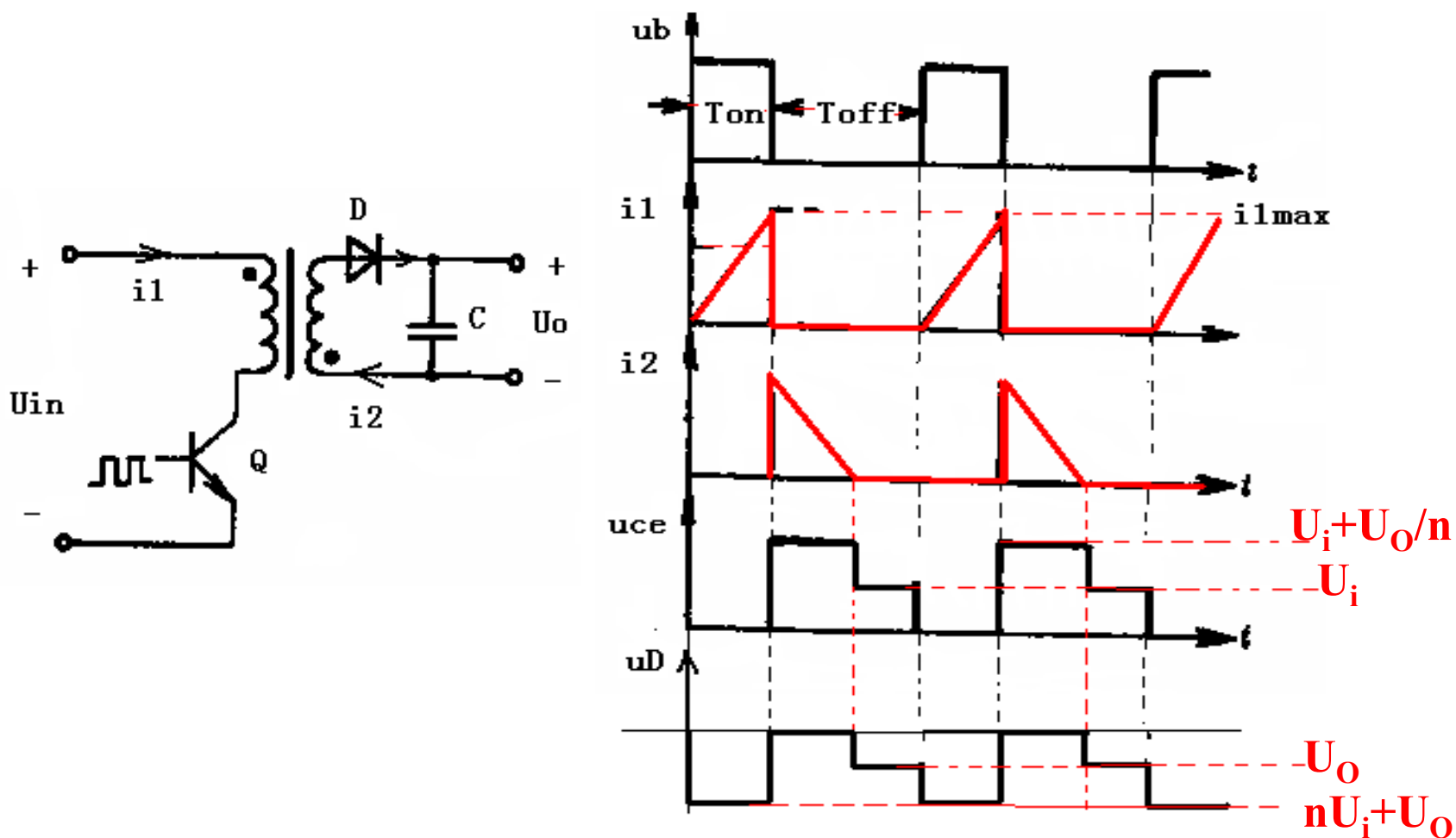
$$U_o = \frac{Dn}{1-D} \cdot U_i$$



完整的波形分析

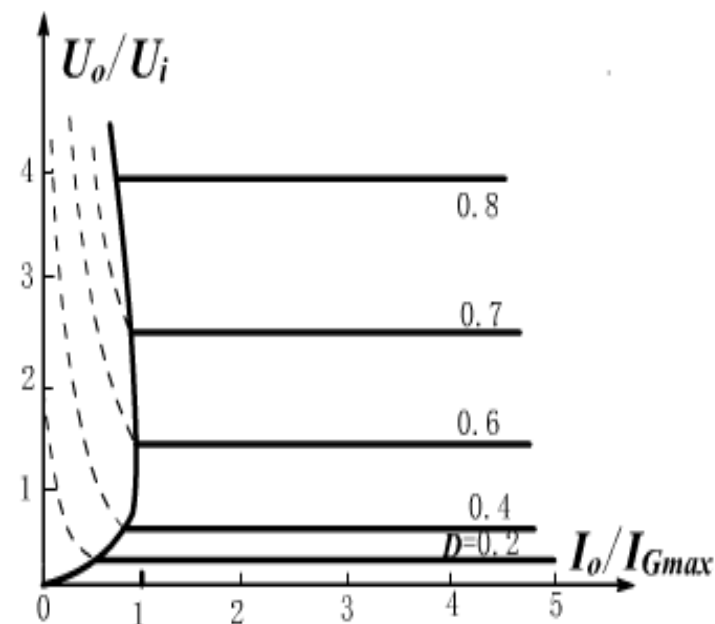


● 电流断续时的波形分析



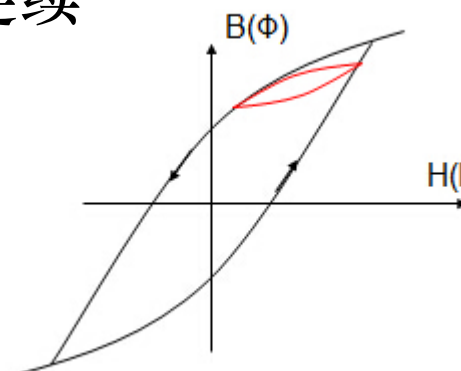
● 单端反激电路的标么外特性

- ✦ 标么特性，相对概念
- ✦ 包含三种工作模态的电路外特性
- ✦ 中间为临界模态，右边为连续，左边为断续
- ✦ 在电流断续时，当输出电压不变时，负载变化较大时，占空比也会有较大变化，工作不稳定。



● Flyback特点:

- ✦ 简单 (T兼作L) , 输入电压范围宽, 输入输出电流纹波都大, Q电压应力高
- ✦ 适用于小功率应用
- ✦ 单端、反激的概念
- ✦ Q on/off瞬间的能量守恒和磁通连续
- ✦ 利用伏秒平衡的分析方法

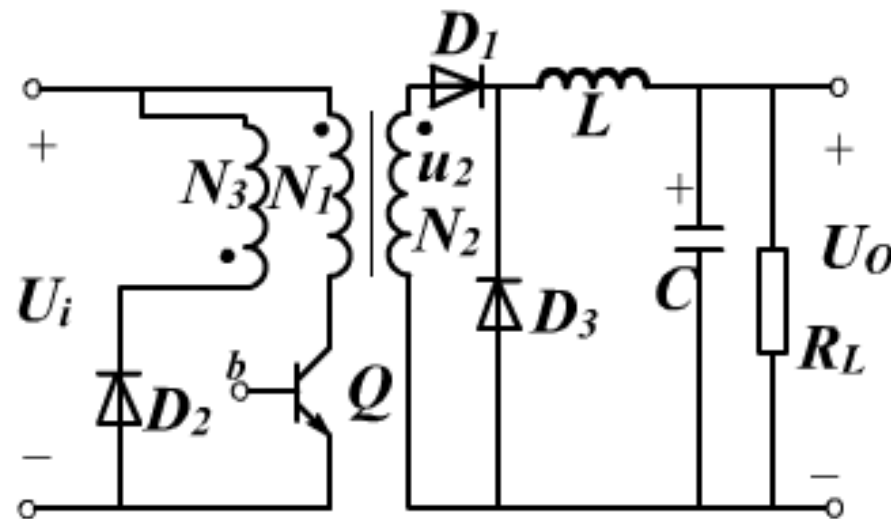


● 重点掌握

- ✦ 能正确画出forward变换器电路构成图；
- ✦ 掌握forward变换器基本工作原理和特点
- ✦ 掌握分析方法，CCM模式下的公式推导和关键波形，DCM模式下的关键波形
- ✦ CCM和DCM两种方式下外特性
- ✦ 设计临界连续电感，会判断在某给定参数下的工作方式
- ✦ 器件承受的电流电压值

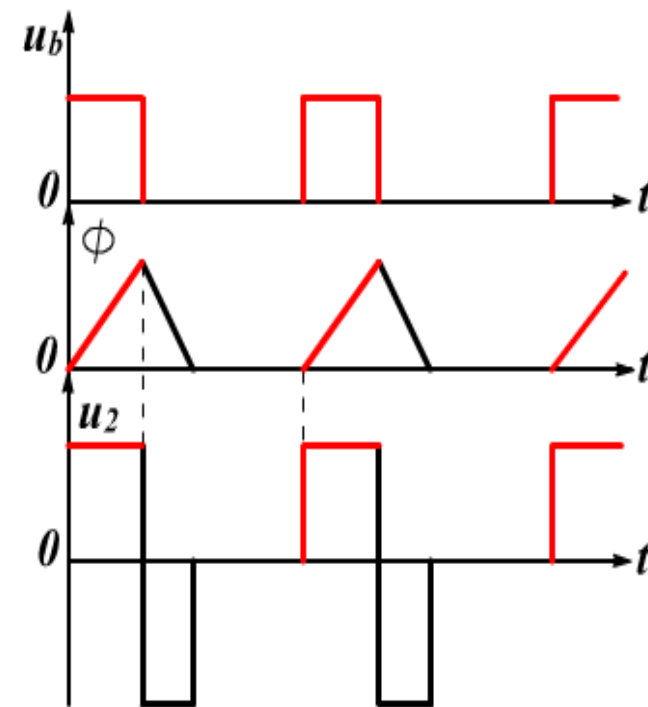
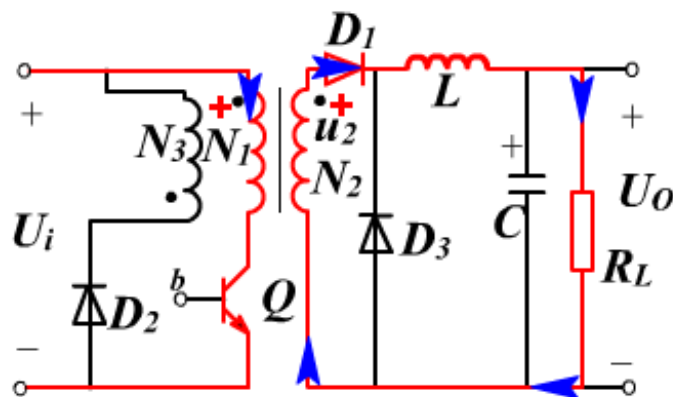
● 电路构成及工作原理

- ✦ 变压器T、晶体管Q、整流二极管D1
- ✦ 续流二极管D3和滤波电感L、电容C off时：D导通
- ✦ 此外还有磁复位绕组和磁复位二极管D2



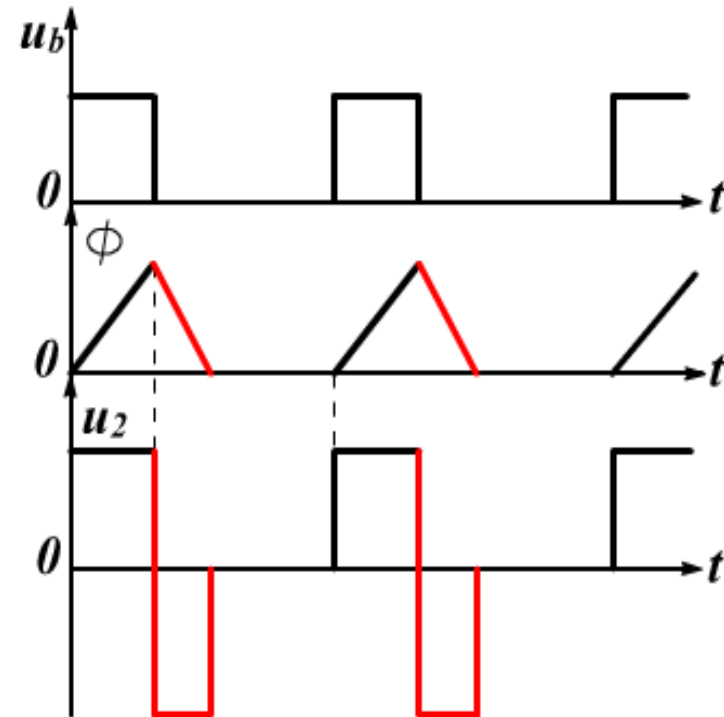
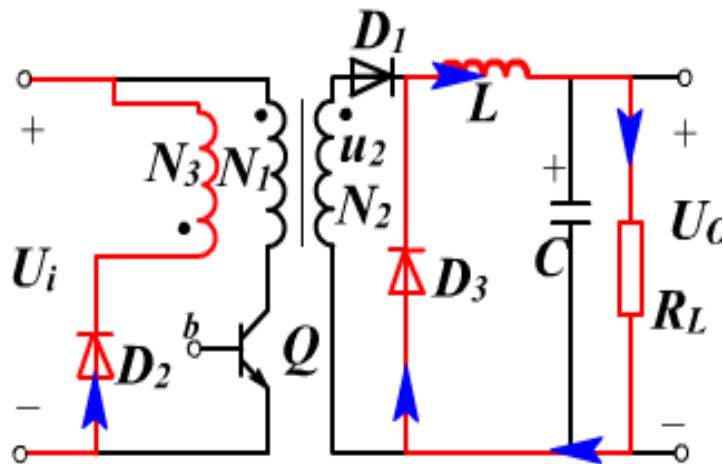
● 工作模态分析，当Q导通时：

- ✦ 变压器 “•” 端为正端，副边形成功率通路
- ✦ $u_2 = n \cdot u_i$ ($n = N_2/N_1$ 为变比)
- ✦ D2反压截止
- ✦ D3反压截止



工作模态分析，当Q截止时：

- ✦ 变压器“•”端为负端，D1截止
- ✦ D3导通、为电感电流续流



● 电流断续时的工作波形和应力分析

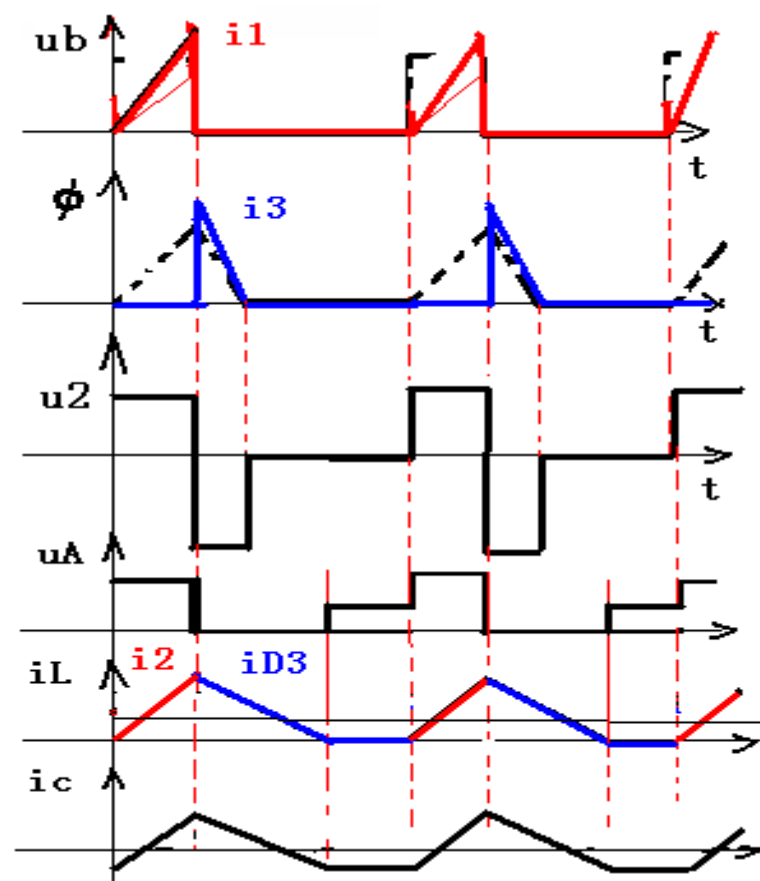
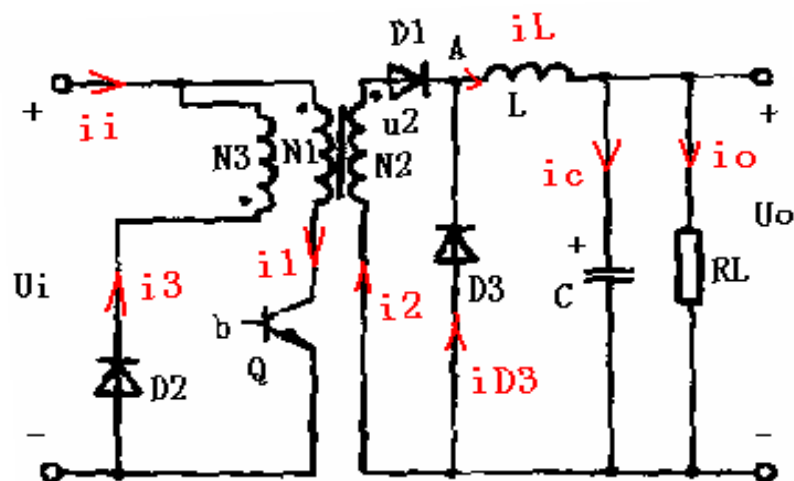


表 5-1 各种不同的间接直流变流电路的比较

电路	优点	缺点	功率范围	应用领域
正激	电路较简单，成本低，可靠性高，驱动电路简单	变压器单向励磁，利用率低	几百W~几kW	各种中、小功率电源
反激	电路非常简单，成本很低，可靠性高，驱动电路简单	难以达到较大的功率，变压器单向励磁，利用率低	几W~几十W	小功率电子设备、计算机设备、消费电子设备电源。
全桥	变压器双向励磁，容易达到大功率	结构复杂，成本高，有直通问题，可靠性低，需要复杂的多组隔离驱动电路	几百W~几百kW	大功率工业用电源、焊接电源、电解电源等
半桥	变压器双向励磁，没有变压器偏磁问题，开关较少，成本低	有直通问题，可靠性低，需要复杂的隔离驱动电路	几百W~几kW	各种工业用电源，计算机电源等
推挽	变压器双向励磁，变压器一次侧电流回路中只有一个开关，通态损耗较小，驱动简单	有偏磁问题	几百W~几kW	低输入电压的电源