

# 第3章 直流-直流变流电路

## 3.1 概述

## 3.2 单管非隔离变换电路

## 3.3 单管隔离式变换电路

## 3.4 多管变换电路

## 3.5 双向DC-DC变换器

## 3.6 软开关变换器

## 本章小结



## ● 二极管选型

- ⊕ 在低压场合优先选肖特基二极管；电压较高(>?V)选超快恢复或快恢复二极管

## ● 二极管的平均电流和有效电流

$$I_D = I_o T_{OF} / T = I_o (1 - D) \quad I_{Drms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_{OF}} I_o^2 dt} = I_o \sqrt{(1 - D)}$$

## ● 二极管的电压满足（2倍裕量）： $U_{DR} \geq 2U_{max}$

## 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  $I_{\text{omin}}$  代入  $I_G$  表达式，即得到电感  $L$ ：

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

- ✦ 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
- ✦ **( $L$ 也可以按照  $\Delta i_L$  的表达式计算)  $\Delta i_L = 10\% \sim 15\% I_{\text{omax}}$**

## 滤波电容设计

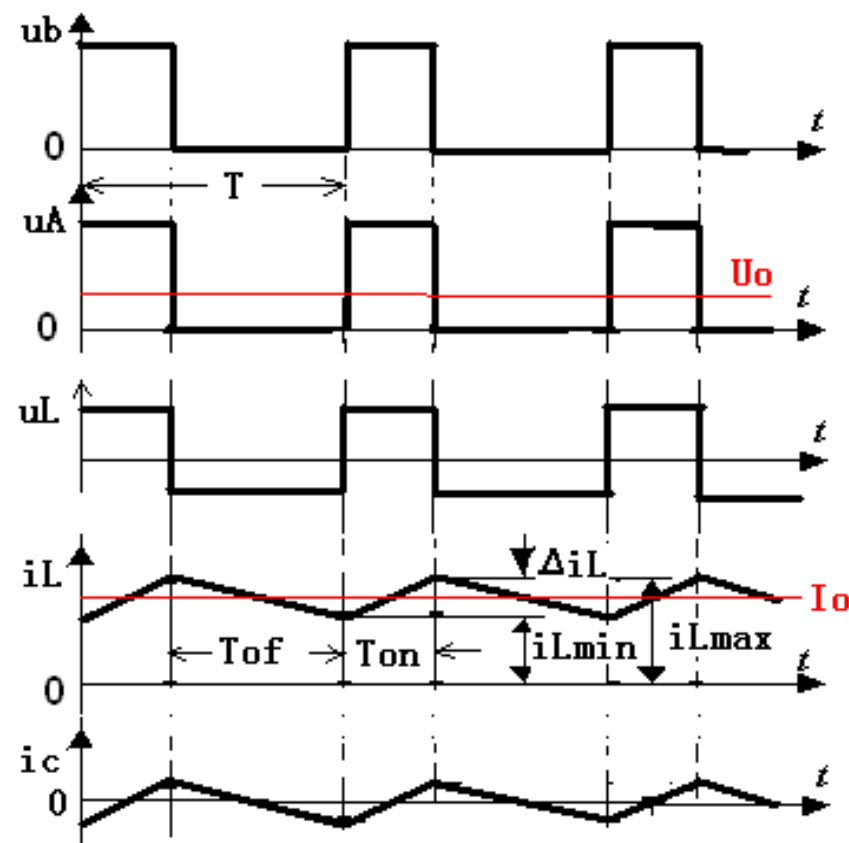
- 电容电流近似为电感电流的脉动部分
- 电容电流在1/2周期内充电，在1/2周期内放电
- 所以，半周期电容电流：

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

- 电容纹波电压

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

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



## 工作原理

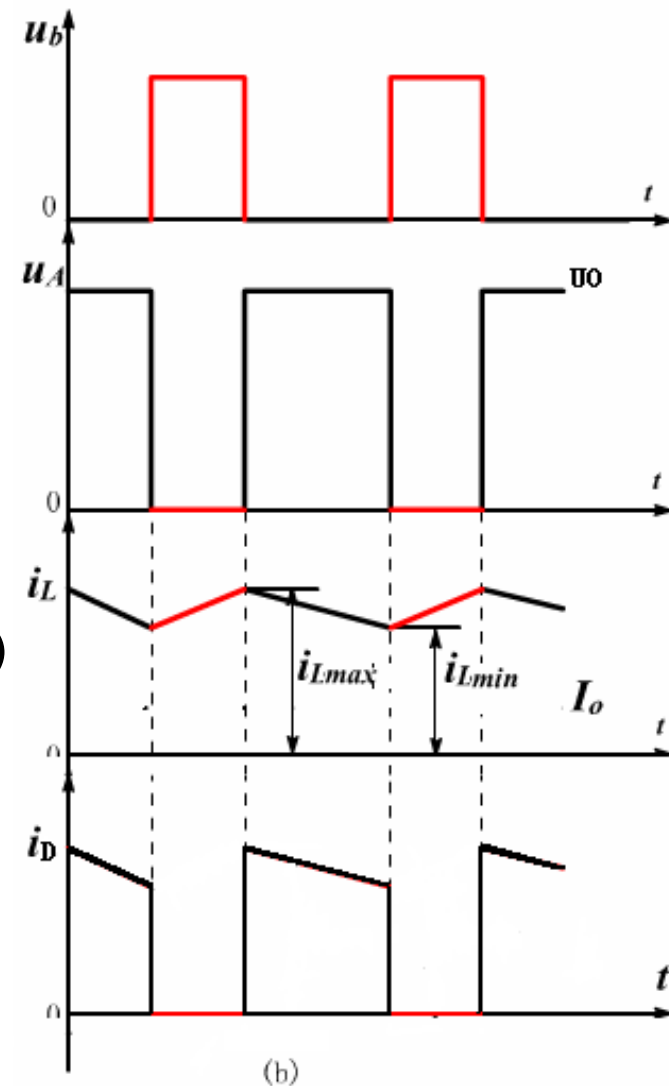
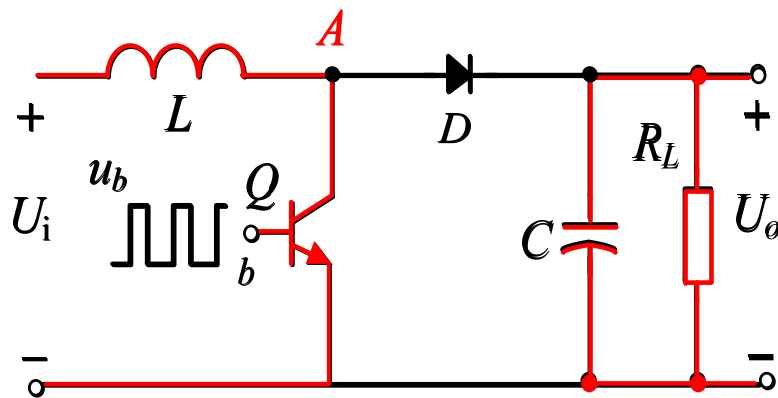
(电流连续模式, CCM)

✦ 当Q导通时

$$U_i = L \frac{di_L}{dt} \quad U_i = L \frac{i_{Lmax} - i_{Lmin}}{T_{ON}}$$

✦ 电感电流线性增长

✦ 电容维持负载电流 (电容足够大)



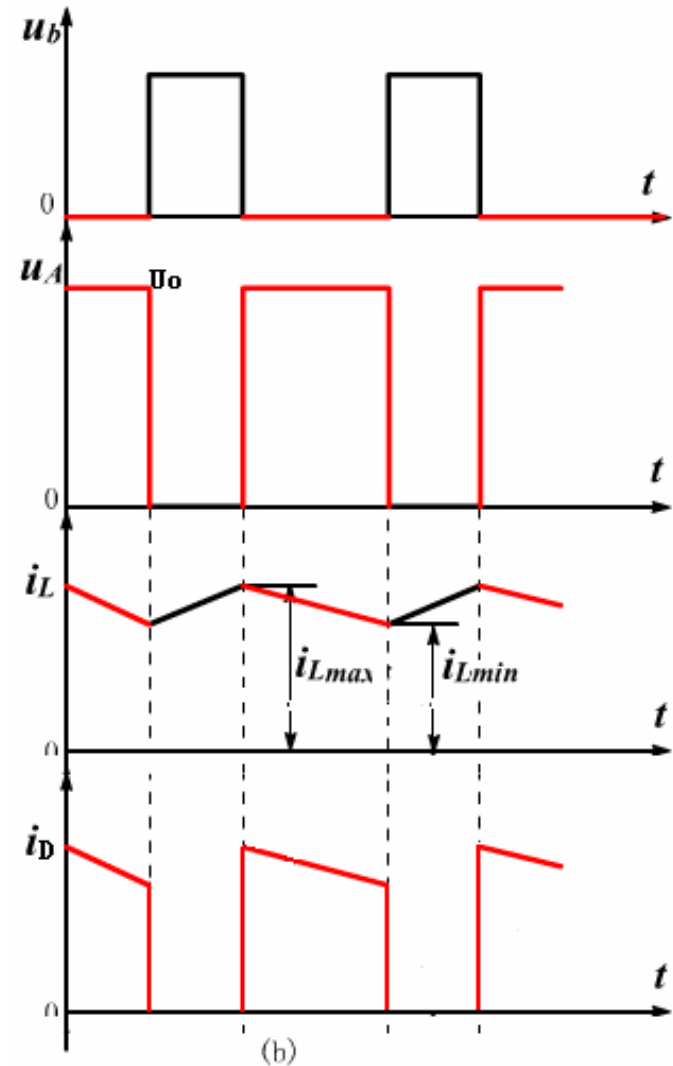
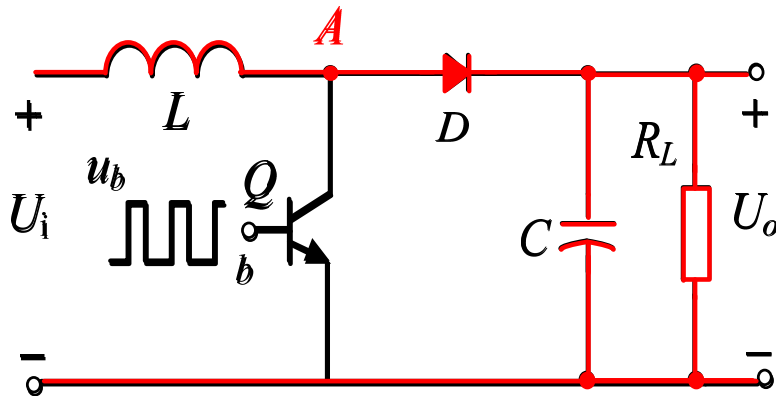
## 工作原理

(电流连续模式, CCM)

⊕ 当Q截止时

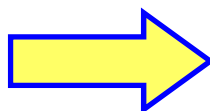
$$U_i - U_o = L \frac{di_L}{dt} \quad U_i - U_o = L \frac{i_{Lmin} - i_{Lmax}}{T_{OFF}}$$

⊕ 电感电流线性减小



✦ 联立等式，求解

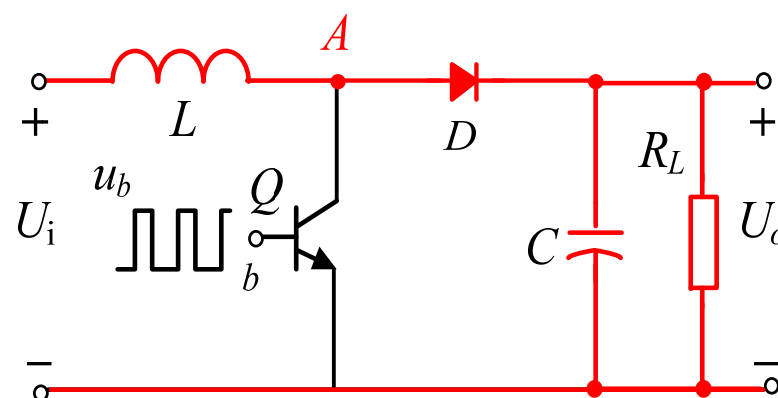
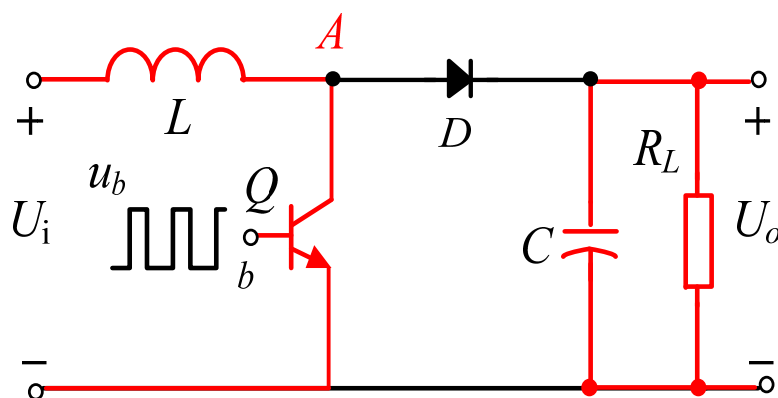
$$\begin{cases} U_i = L \frac{i_{L\max} - i_{L\min}}{T_{\text{ON}}} \\ U_i - U_o = L \frac{i_{L\min} - i_{L\max}}{T_{\text{OFF}}} \end{cases}$$



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

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

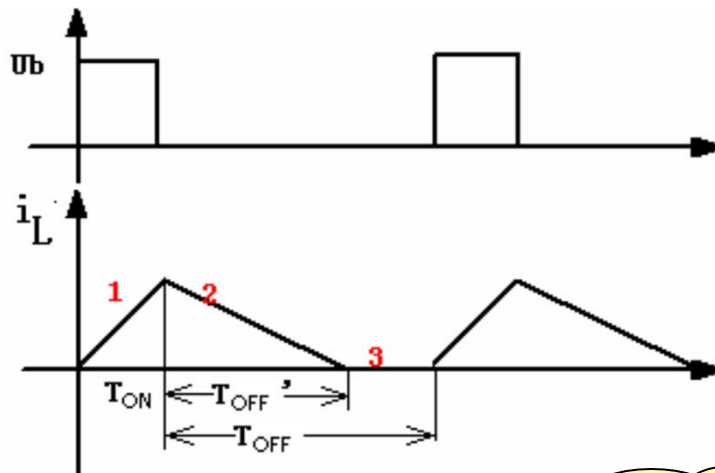
✦ 根据公式可知，输出电压大于输入电压，属**升压电路**



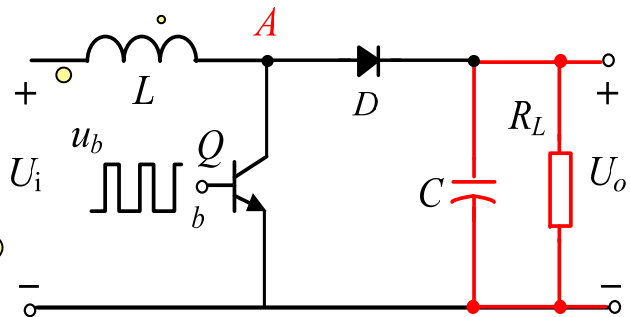
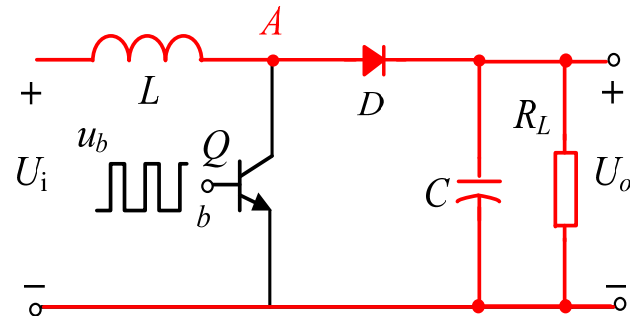
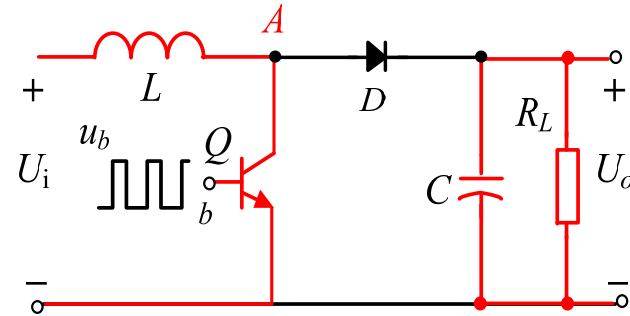


### 电感电流断续工作方式

- $T_{ON}$ ,  $L$  储存能量
- $T_{OFF}'$ ,  $L$  释放能量
- $T_{OFF}-T_{OFF}'$ ,  $i_L=0$

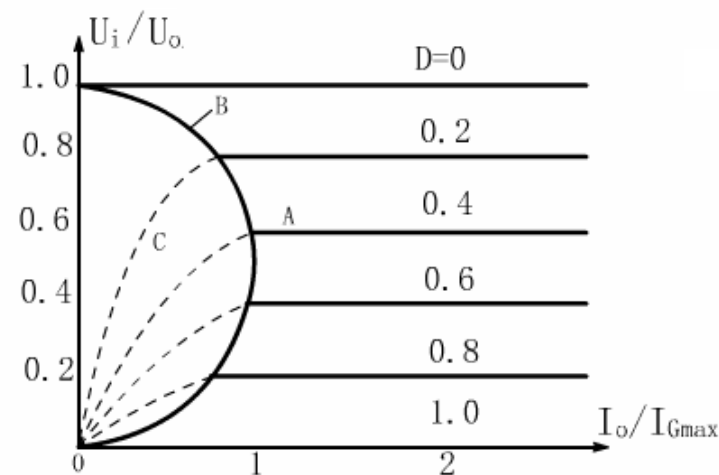
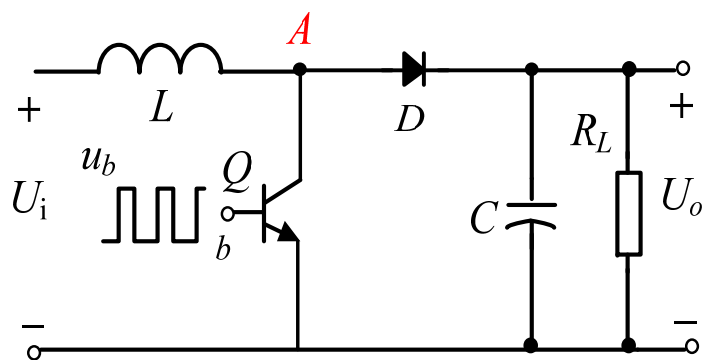


A点电压波形?



## ● 升压式变换器标么输出特性

- ✦ 图中A部分为电流连续条件
- ✦ 图中B部分为电流临界连续条件
- ✦ 图中C部分为电流断续条件
- ✦ 当 $I_o=0$ 时，输出开路， $U_i/U_o=0$ ，即 $U_o$ 无穷大，会损坏器件

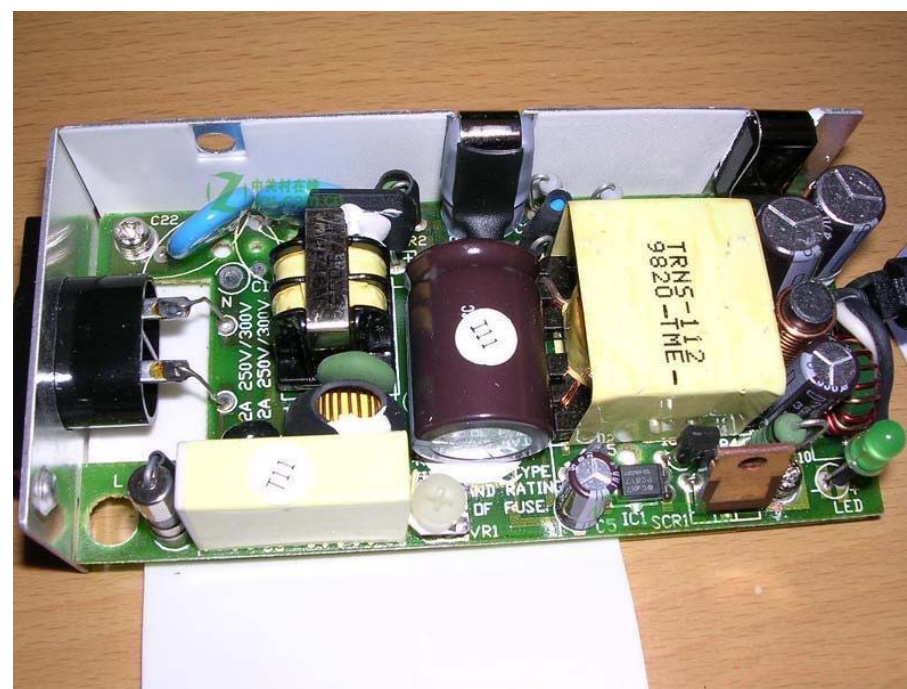


### 3.3.1 反激电路

### 3.3.2 正激电路

## 消费电子-- 笔记本电源适配器

单相220V交流变换为20V直流

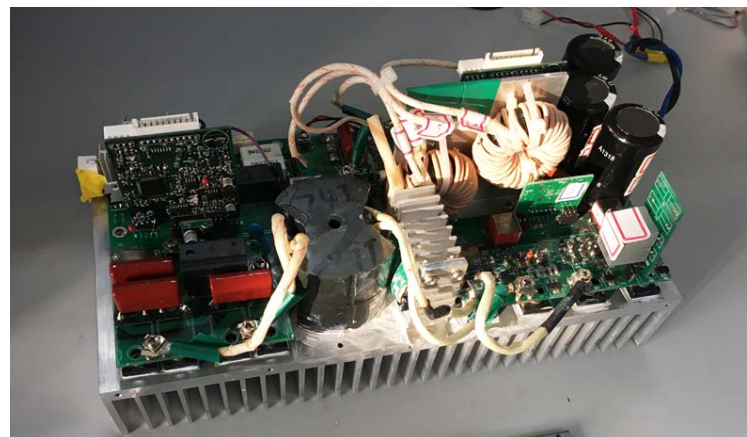


两级电能变换:

- 1、交流变直流
- 2、直流变直流

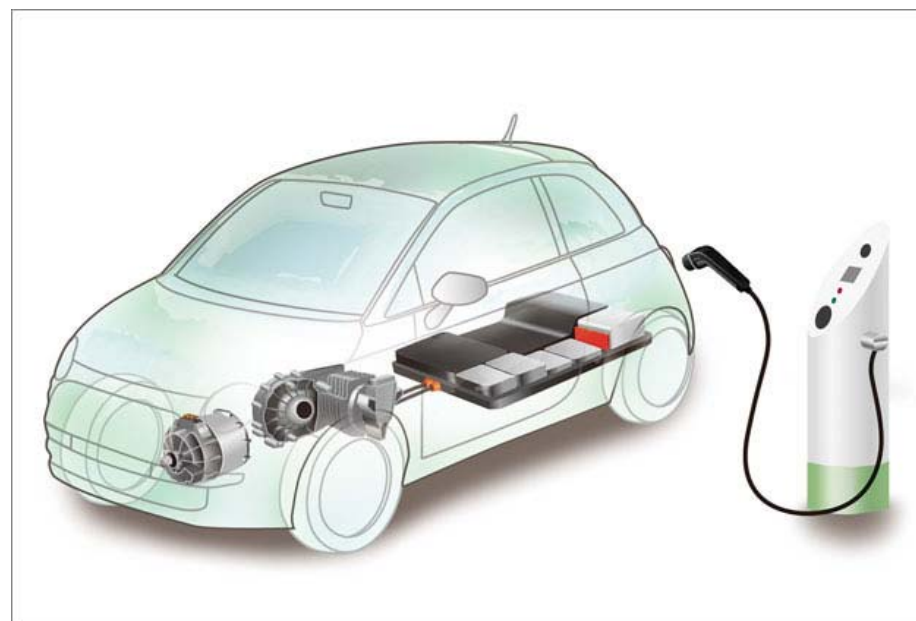
## 消费电子- 电动汽车充电

电池电压 **250V~500V**



两级电能变换：

- 1、交流变直流
- 2、直流变直流



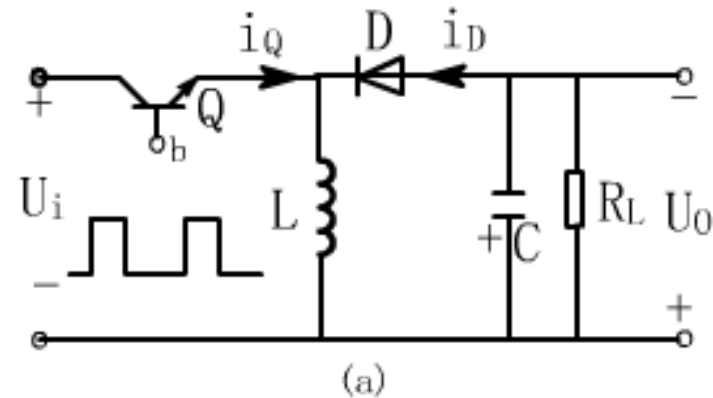


## 重点掌握

- ✦ 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

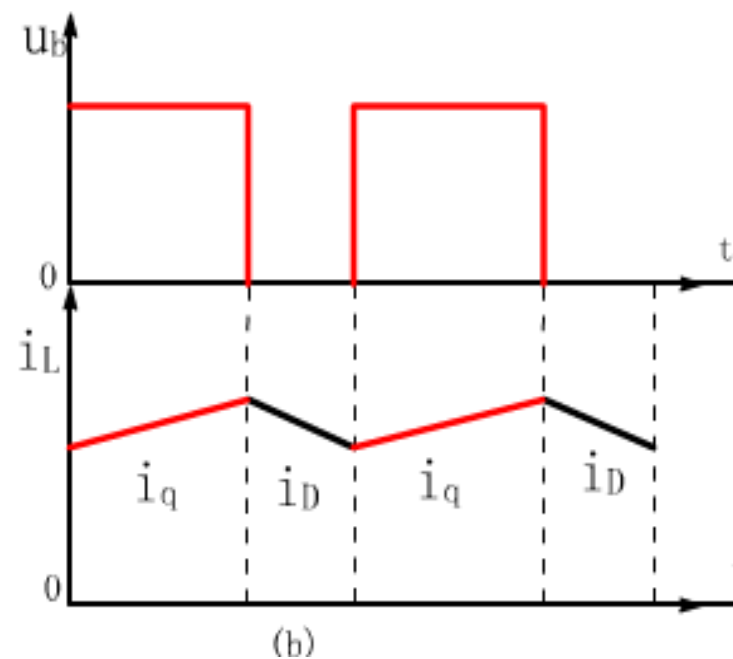
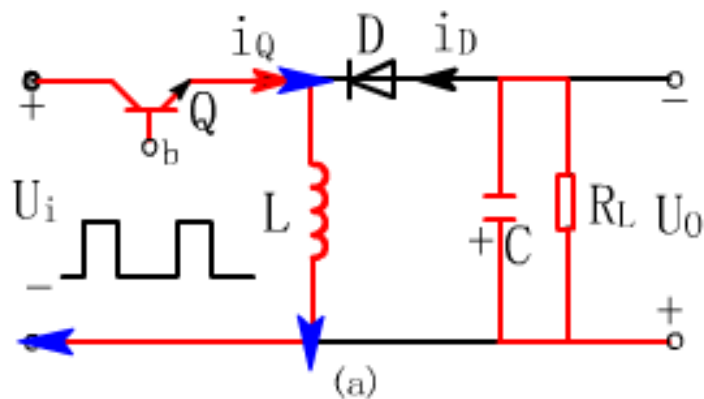
### Boost-Buck升降压变换器

- 电路构成，**注意副边电压为负值**
- 当Q导通时，电感储能，二极管截止，输出由滤波电容供电。
- 当Q截止时，电感产生感应电势维持原电流方向不变，迫使二极管导通，电感电流向负载供电，同时也向电容充电，输出负电压。



●  $Q$  ON, 电感电流线性上升

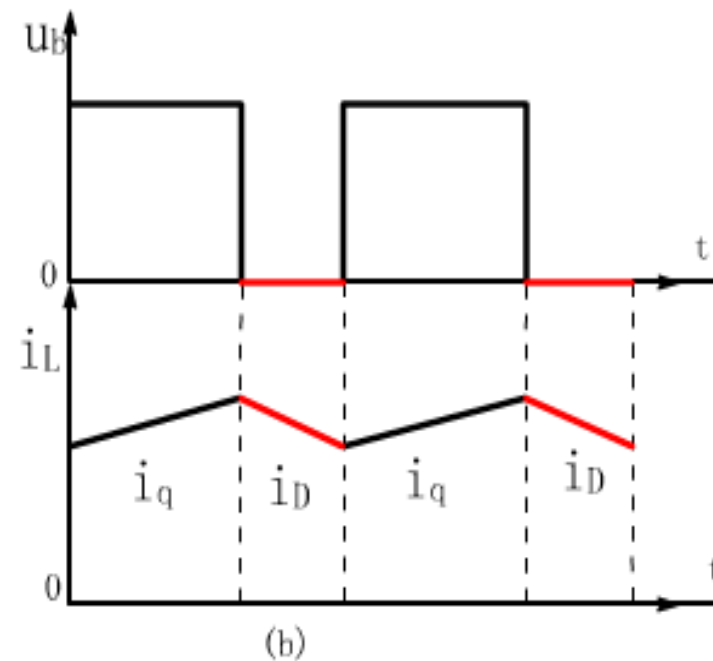
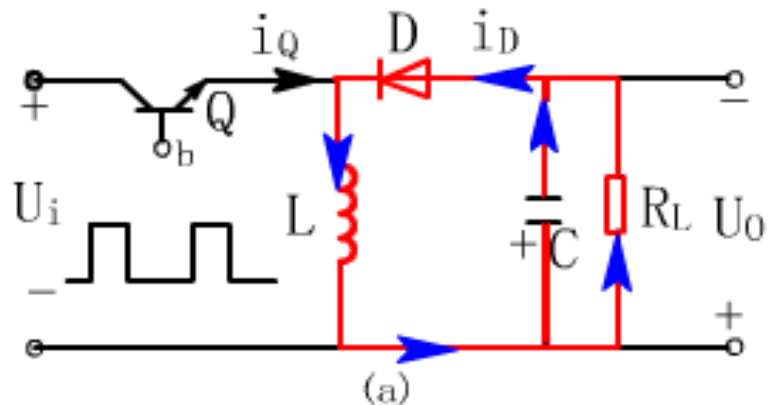
$$L \frac{i_{L\max} - i_{L\min}}{DT} = U_i$$





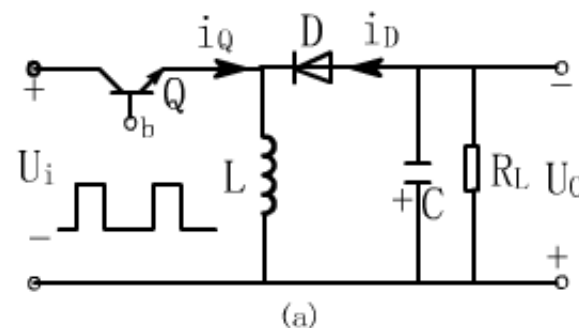
●  $Q$  OFF, 电感电流线性下降

$$L \frac{i_{L\min} - i_{L\max}}{(1-D)T} = U_o$$



### 整理两式

$$U_o = \frac{DU_i}{D-1}$$



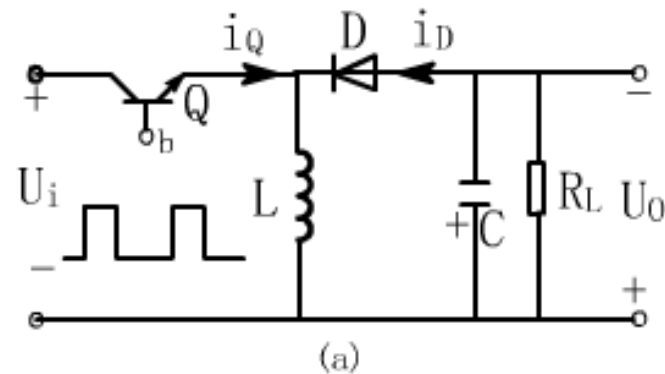
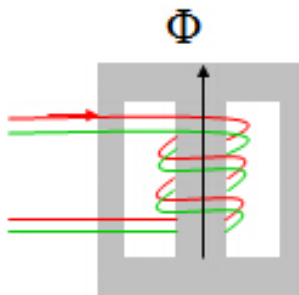
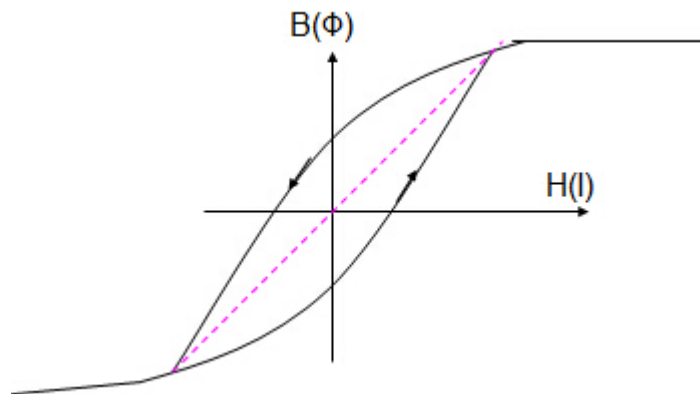
●  $D < 0.5$  时,  $U_o < U_i$ , 电路为降压型

●  $D > 0.5$  时,  $U_o > U_i$ , 电路为升压型

● 利用电感伏秒平衡关系??

### ● 单端反激(flyback)变换器

✦ 是隔离的Buck-Boost变换器



✦ 磁通  $\Phi = BS$

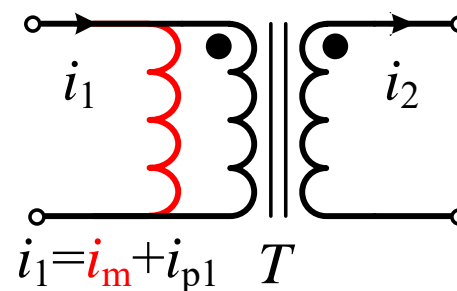
✦  $u = L \cdot di/dt = N \cdot d\Phi/dt$

✦ 磁通连续性:  $\Phi$  不能突变

✦ 磁饱和, 磁复位

### ● 电路构成及工作原理

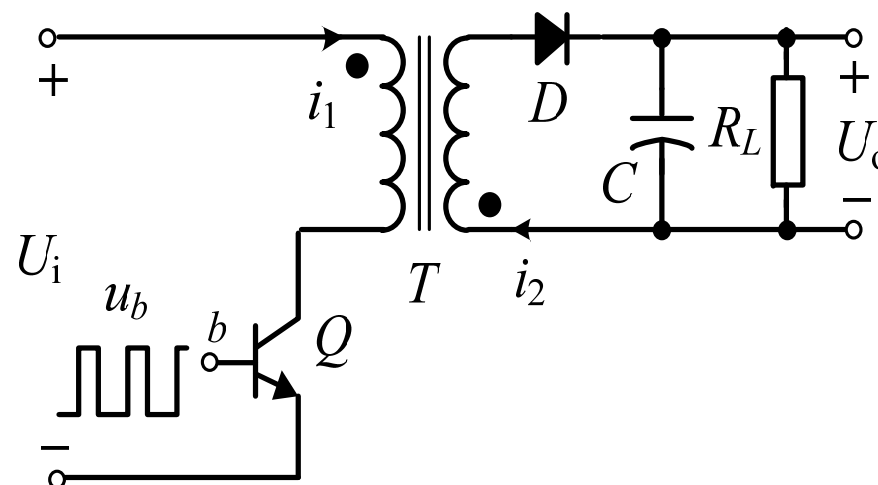
- 由隔离变压器（耦合电感） $T$ ，晶体管 $Q$ ，二极管 $D$ 和滤波电容 $C$ 组成。



- $Q$  ON时： $D$ 截止，电感储能
- $Q$  OFF时： $D$ 导通
- 能量不能突变：

磁通不能突变

能量不能突变



### 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

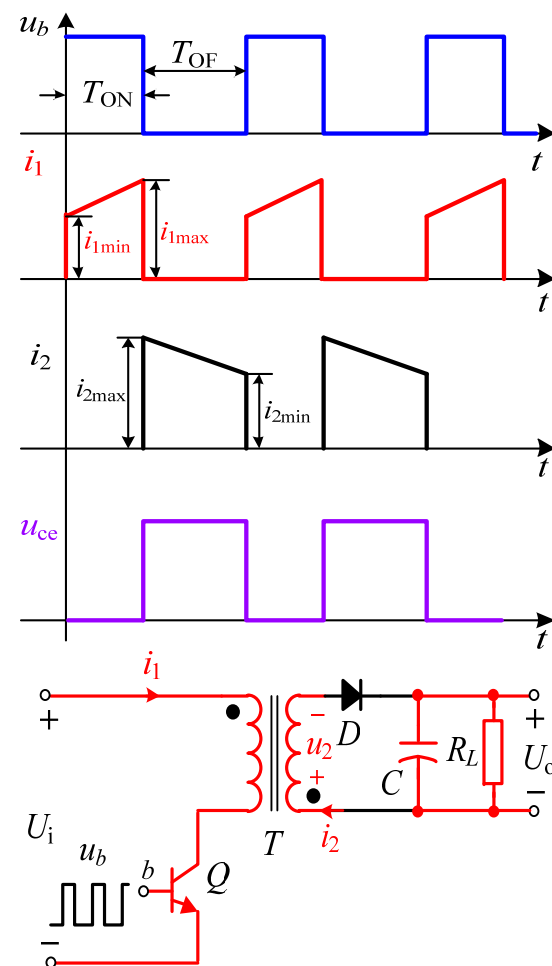
隔离变压器作为电感运行

电感储能，负载由电容提供能量

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

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

$L_1$ : 原边等效激磁电感



### 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

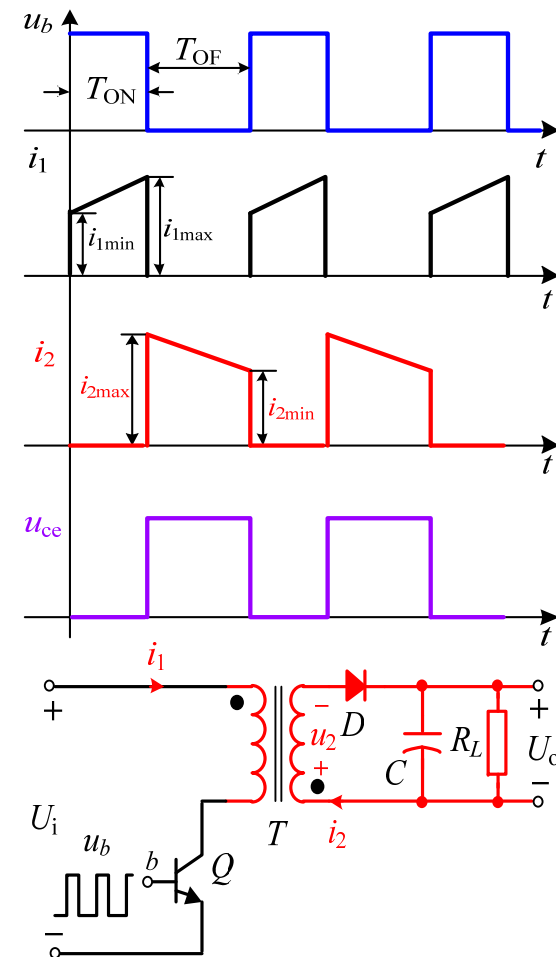
$i_2$  维持磁通不能突变

电感储能向电容和负载提供

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

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

$L_2$ : 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：

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

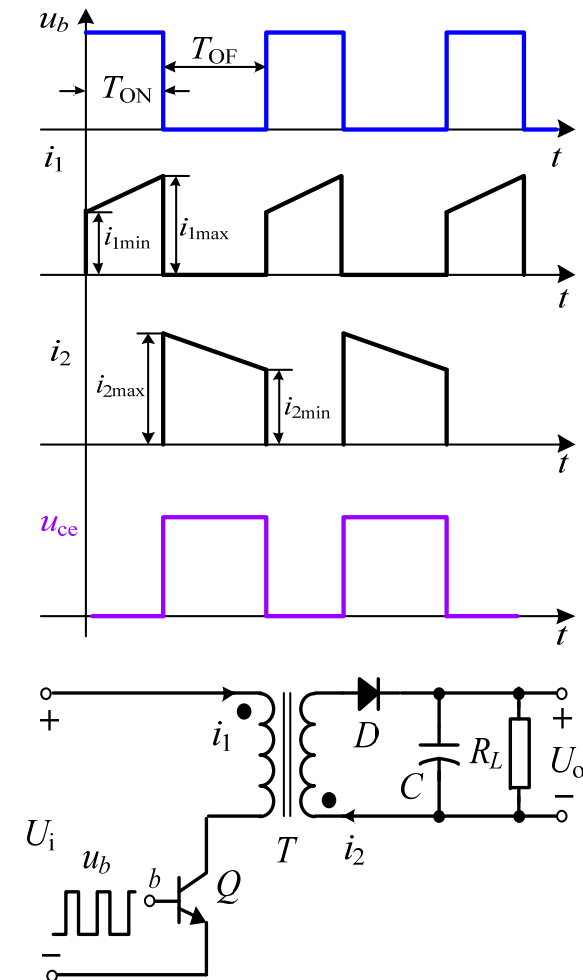
即  $\Delta i_1 N_1 = \Delta i_2 N_2$

此外，电感与匝数的平方成正比

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

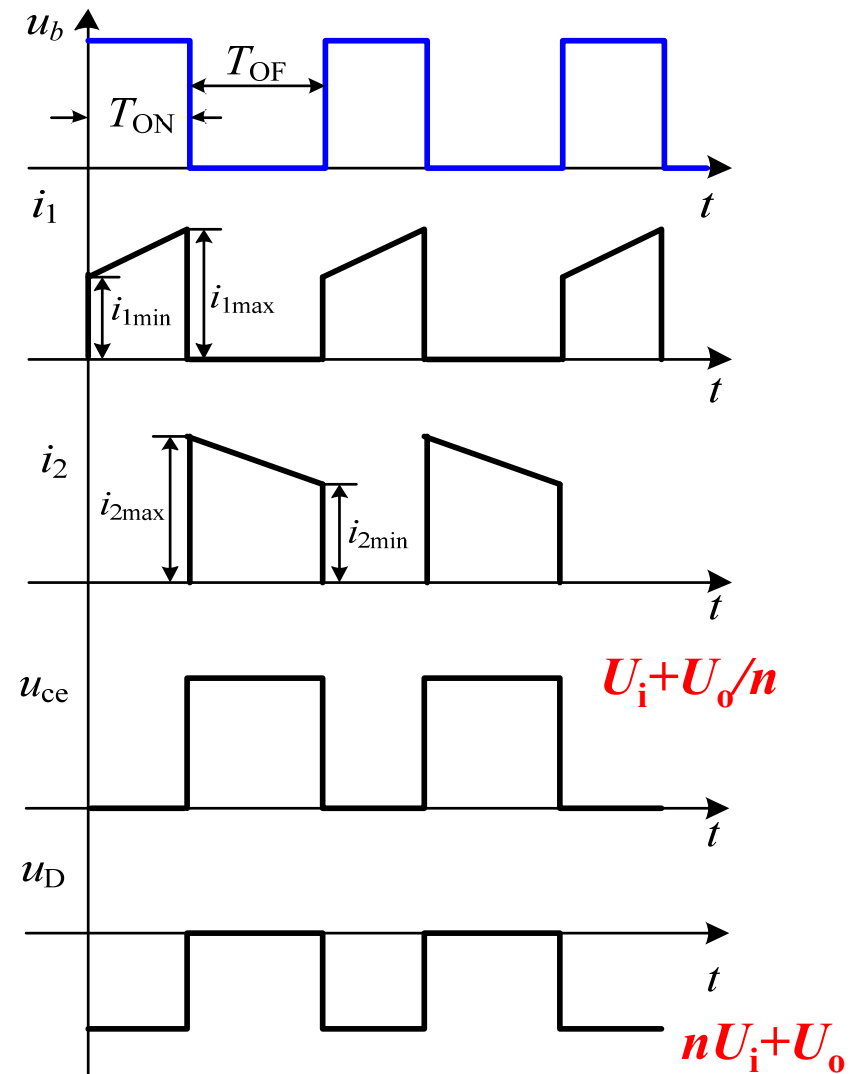
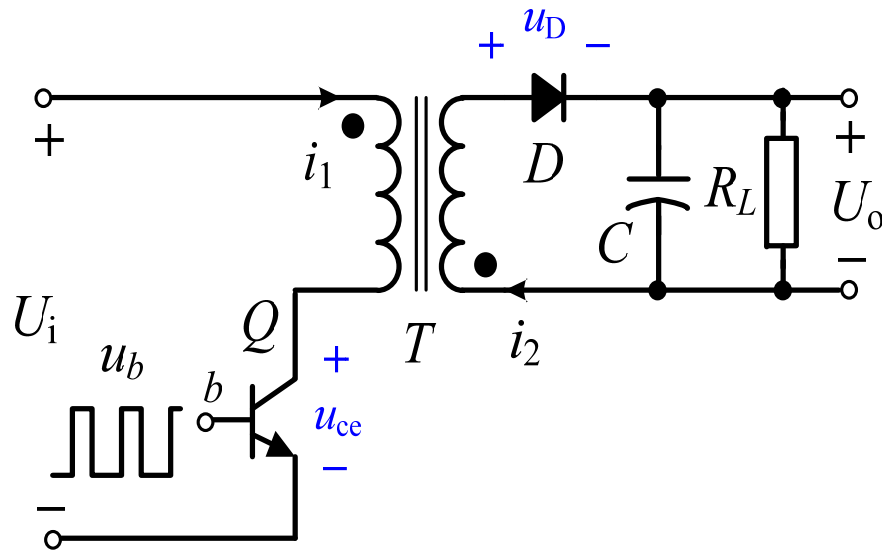
代入前式  $U_o = \frac{T_{\text{ON}}}{T_{\text{OF}}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot U_i$

定义  $n = N_2/N_1$   $U_o = \frac{Dn}{1-D} \cdot U_i$



## 完整的波形分析

电流连续时开关管 and 二极管  
的电压应力定量分析



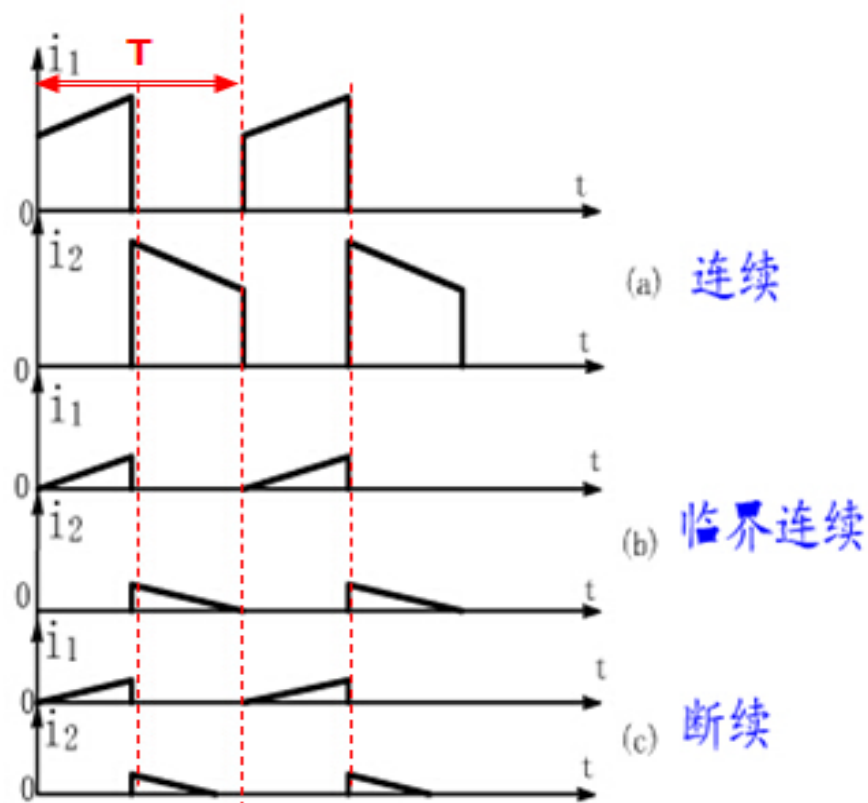


### ● 电流断续模式

- 反激式变换器中的电感变压器起着电感和变压器的双重作用。
- 具有电感电流**连续、临界连续和断续**3种工作模式。  
(磁通的连续性)
- 电流连续时电压关系

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

$$U_o = \frac{Dn}{1-D} \cdot U_i \quad n = N_2/N_1$$



### ● 电流断续模式

#### ⊕ 输出平均电流

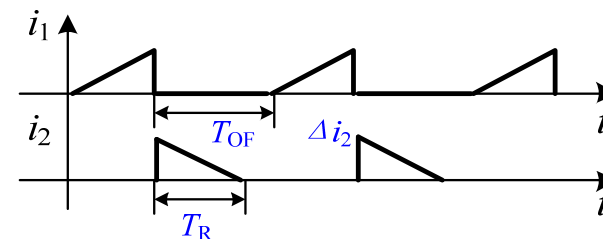
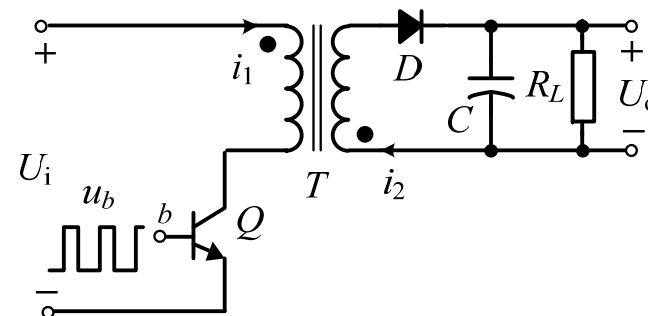
$$I_o = \frac{1}{T} \cdot \frac{\Delta i_2}{2} \cdot T_R \quad \text{式中, } T_R (< T_{OF}) \text{ 为次级电流流通时间}$$

#### ⊕ 晶体管关断时电路关系式

$$U_o = L_2 \frac{\Delta i_2}{T_R} \quad T_R = \frac{L_2}{U_o} \Delta i_2$$

#### ⊕ 代入化简

$$I_o = \frac{\Delta i_1^2}{2Tn^2} \cdot \frac{L_2}{U_o} = \frac{\Delta i_1^2 L_1}{2TU_o}$$



### ● 电流断续模式

- 在Q导通时，有 $\Delta i_1$ 的电路方程

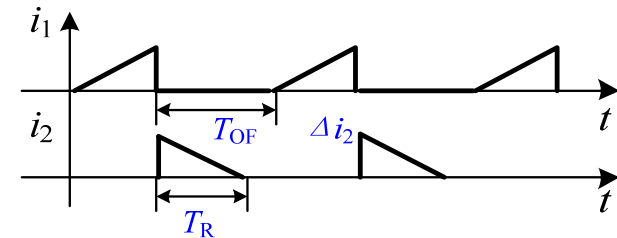
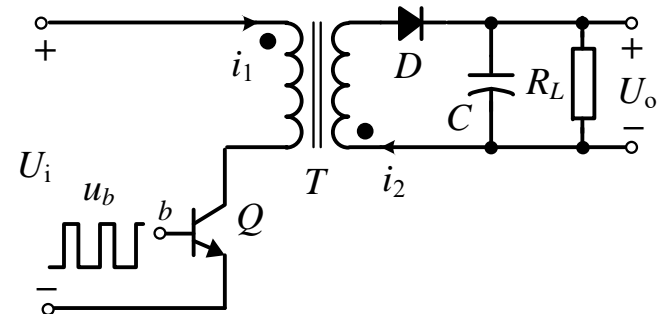
$$\Delta i_1 = \frac{U_i}{L_1} T_{\text{ON}}$$

- 所以输出平均电流

$$I_o = \frac{U_i}{2L_1} TD^2 \cdot \frac{U_i}{U_o}$$

- 如果以输出电压作为变量

$$U_o = \frac{U_i^2}{2L_1 I_o} TD^2 = \frac{U_i^2 D^2}{2L_1 f I_o}$$



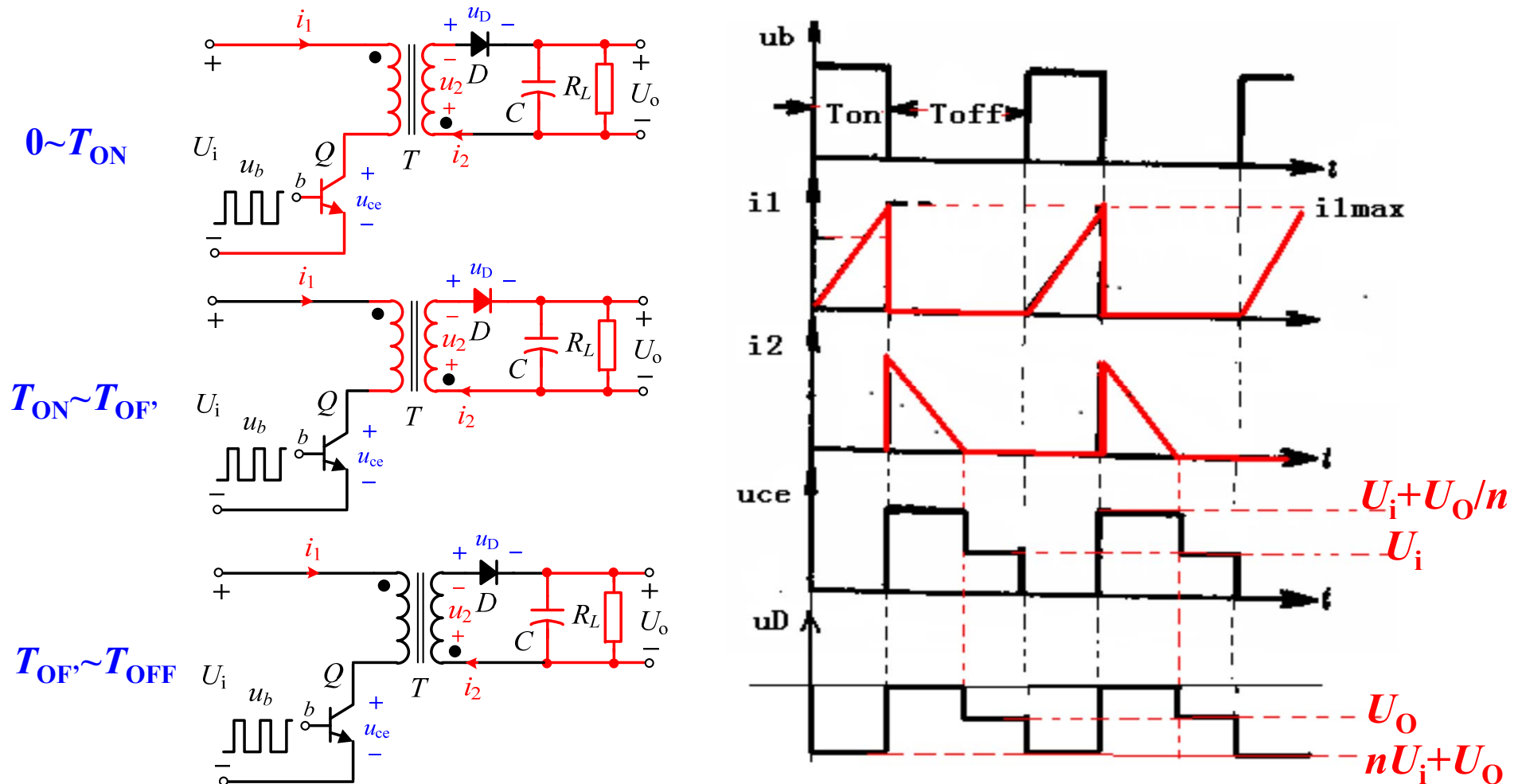
## ● 电流断续模式

### ✦ 电流断续时，输出电压

$$U_o = \frac{U_i^2}{2L_1 I_o} TD^2 = \frac{U_i^2 D^2}{2L_1 f I_o}$$

- ✦ 当负载电阻加大， $I_o$ 减小时，输出电压升高
- ✦ 当输出开路时，输出无穷大，将损坏电路
- ✦ 所以，反激电路不能开路输出

## ● 电流断续时的波形分析



### ● 临界连续模式

- ⊕ 电流临界连续时，其模式是连续和断续的特例

$$I_G = I_o = \frac{U_i}{2L_1 n} TD^2 \frac{1-D}{D} = \frac{U_i}{2L_1 n} TD(1-D)$$

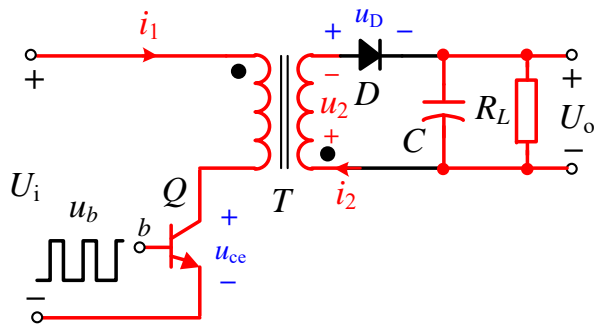
- ⊕ 当 $D=0.5$ 时，有最大临界电流

$$I_{G\max} = \frac{U_i T}{8L_1 n}$$

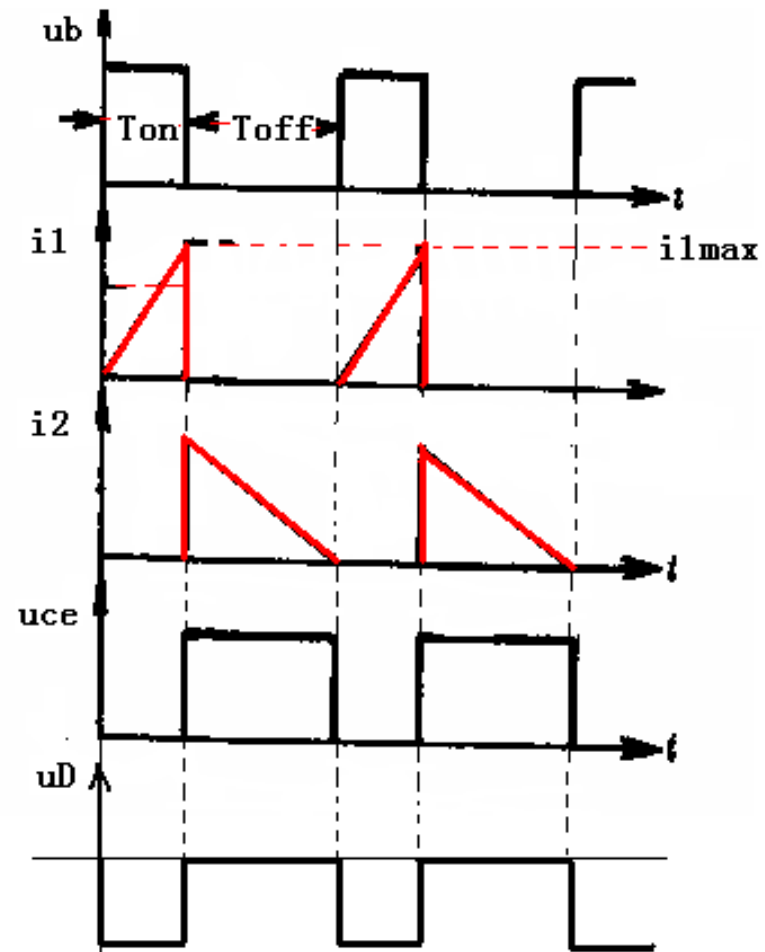
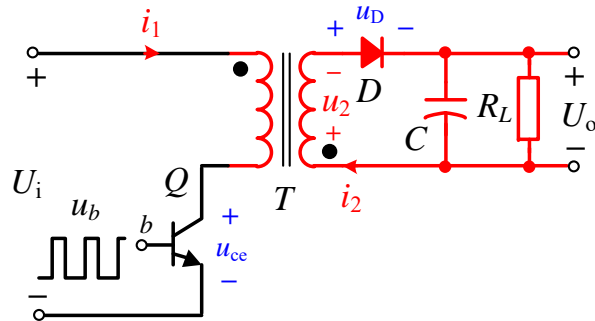
- ⊕ 所以，临界电流也等于  $I_G = 4I_{G\max} D(1-D)$
- ⊕ 同时，断续电流也等于  $I_o = 4nI_{G\max} D^2 \cdot \frac{U_i}{U_o}$

## ● 电流临界连续时的波形分析

$0 \sim T_{ON}$

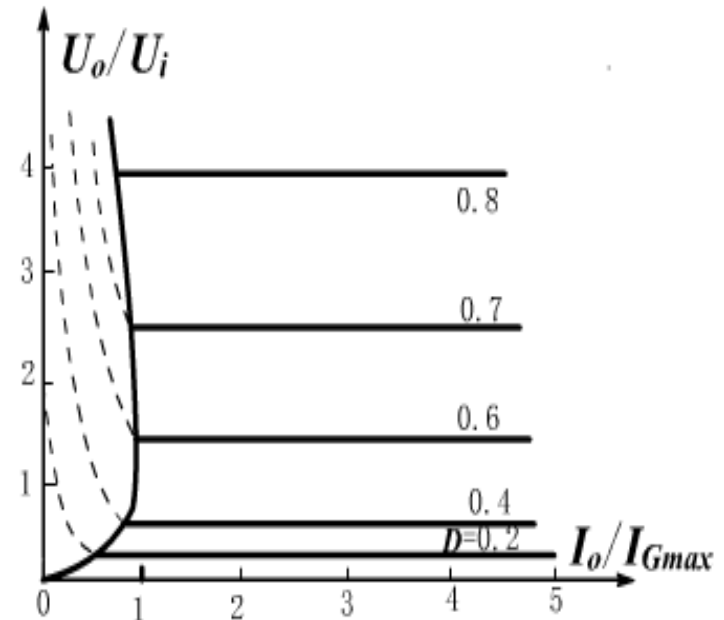


$T_{ON} \sim T_{OFF}$



### ● 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。





### ● 参数选择

- ✦ 功率管 $Q$ ，二极管 $D$
- ✦ 变压器激磁电感 $L$ ：由临界连续负载电流决定
- ✦ 电容： $T_{ON}$ 内，电容放电与Boost类似
- ✦ 电路设计时一般已知输入和输出电压，输出功率
- ✦ 基本反激变换器的效率一般为75%
- ✦ 输入电流平均值为

$$I_i = \frac{P_o}{\eta U_i}$$

### 功率管和二极管的电流定额

- 当电感电流连续时，功率管流过电流峰值为

$$I_{QP} = I_{ip} = \frac{I_i}{D} + \frac{\Delta i_1}{2} = \frac{P_o}{\eta D U_i} + \frac{U_i T}{2 L_1} D$$

- 二极管电流峰值即次级峰值电流

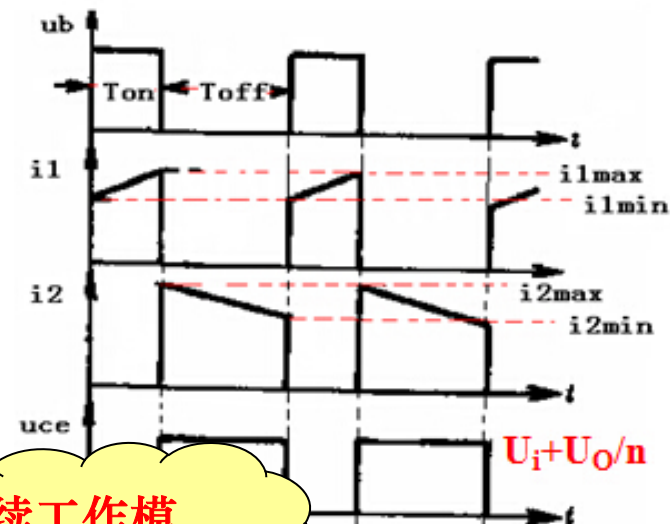
$$I_{DP} = I_{2p} = \frac{I_o}{1-D} + \frac{\Delta i_2}{2} = \frac{I_o}{1-D} + \frac{U_o T}{2 L_2} (1-D)$$

- 当电感电流断续时，输入电流峰值

$$I_{QP} = I_{ip} = \frac{2 P_o}{\eta D U_i}$$

- 次级峰值电流

$$I_{2p} = \frac{I_{ip}}{n} = \frac{2 P_o}{n D U_i \eta}$$



连续工作模式的缺点是什么？

相同输出功率，连续比断续的电流峰值小很多

同样电流定额管子，更大输出功率

### ● 变压器励磁电感的计算

- ⊕ 电流临界连续时，临界电流为

$$I_G = \frac{U_i T}{2nL_1} D(1-D) = \frac{U_i^2 T_{ON}^2 f}{2L_1 U_o}$$

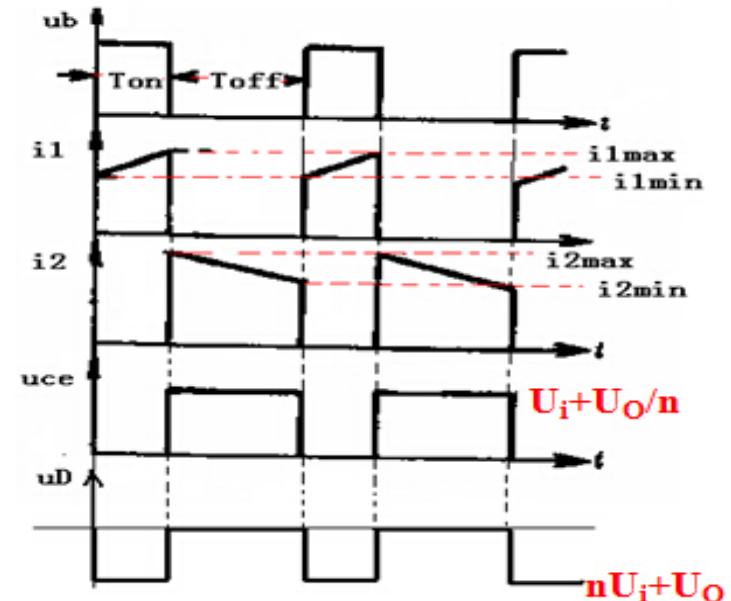
$$= \frac{(1-D)^2}{2n^2 f L_1} U_o$$

- ⊕ 设计变换器在整个工作范围内电流连续， $I_G = I_{omin}$

$$L \geq \frac{U_i^2 T_{ONmin}^2 f}{2I_{omin} U_o} \quad (U_i = U_{imax})$$

- ⊕ 设计变换器完全工作于断续状态， $I_G = I_{omax}$

$$L \leq \frac{U_i T_{ONmax}^2 f}{2I_{omax} U_o} \quad (U_i = U_{imin})$$



### ● 设计在断续模式时

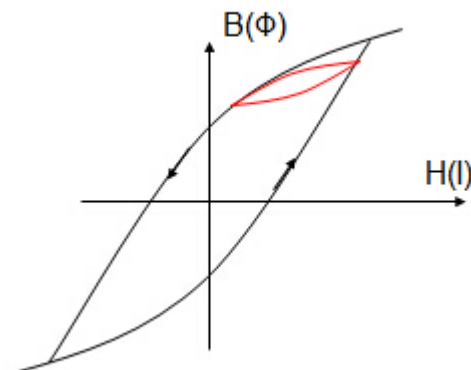
- ✦ **优点：**励磁电感小；功率管 $Q$ 和二极管 $D$ 的开关损耗小  
二极管 $D$ 无反向恢复问题
- ✦ **缺点：**电流峰值大，功率管电流定额大；占空比变化范围大
- ✦ **电流断续状态一般用于负载变化很小的场合**

### ● 功率器件的耐压值

- ✦ 功率管上的电压 
$$U_{ce} = U_i + \frac{U_o}{n} = U_i + \frac{D}{1-D} U_i = \frac{U_i}{1-D}$$
- ✦ 二极管上的电压 
$$U_{DR} = nU_i + U_o = \frac{U_o}{D}$$

### ● Flyback特点:

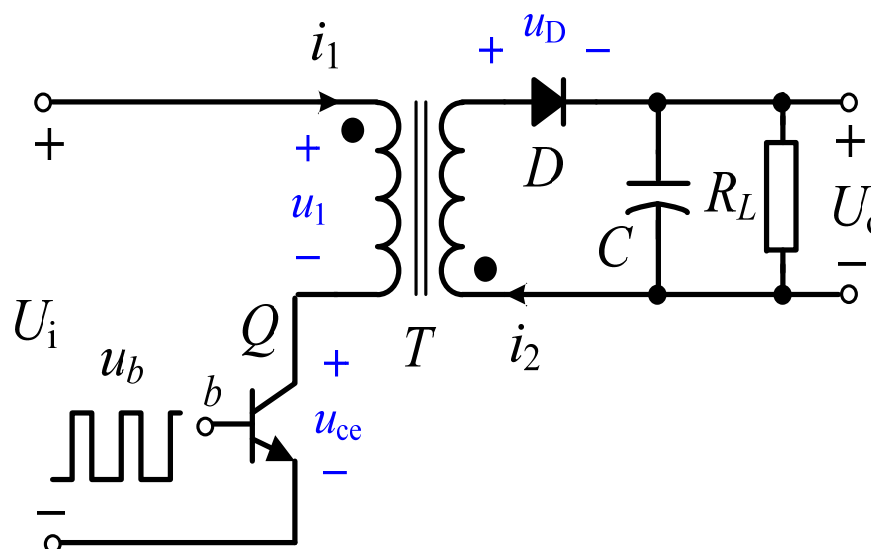
- ✦ 简单 (**T兼作L**) , 输入电压范围宽, 输入输出电流纹波都大, 功率管电压应力高
- ✦ **适用于小功率应用**
- ✦ **单端、反激**的概念
- ✦ 功率管 ON/OFF 瞬间的能量守恒和磁通连续
- ✦ 利用伏秒平衡的分析方法



反激变换器，占空比 $D=0.3$ ，分别作出CCM和DCM下的波形图，注明关键参数关系。

波形包括：PWM信号、 $i_1$ 、 $i_2$ 、 $u_1$ 、 $u_{ce}$ 、 $u_D$ 、 $\phi$

提示： $\phi$ 要考虑剩磁 $B_r$

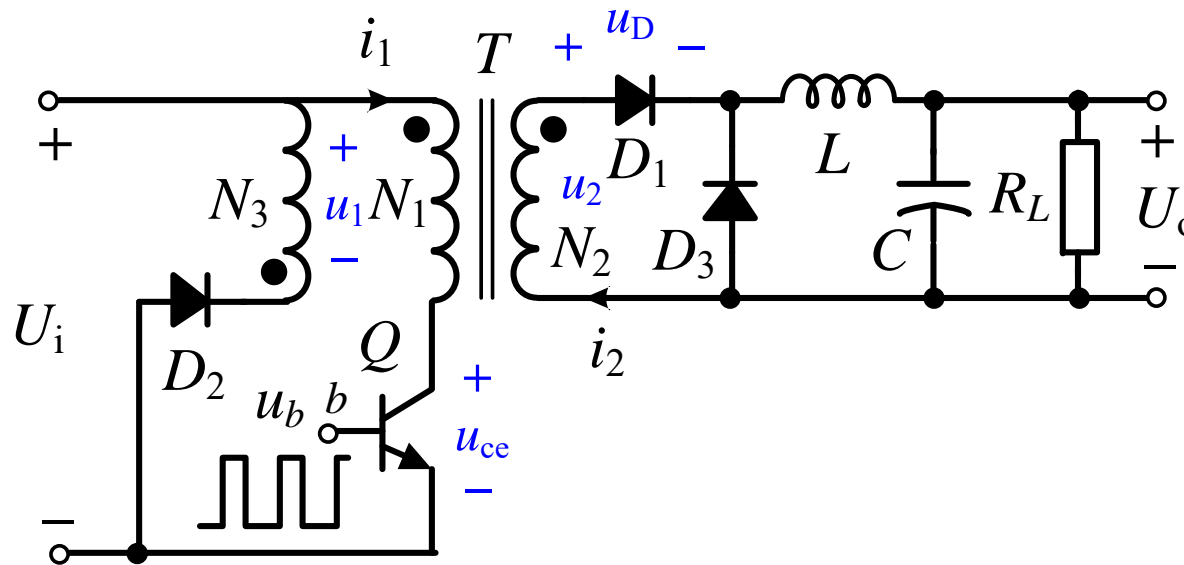


### 重点掌握

- ✦ 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

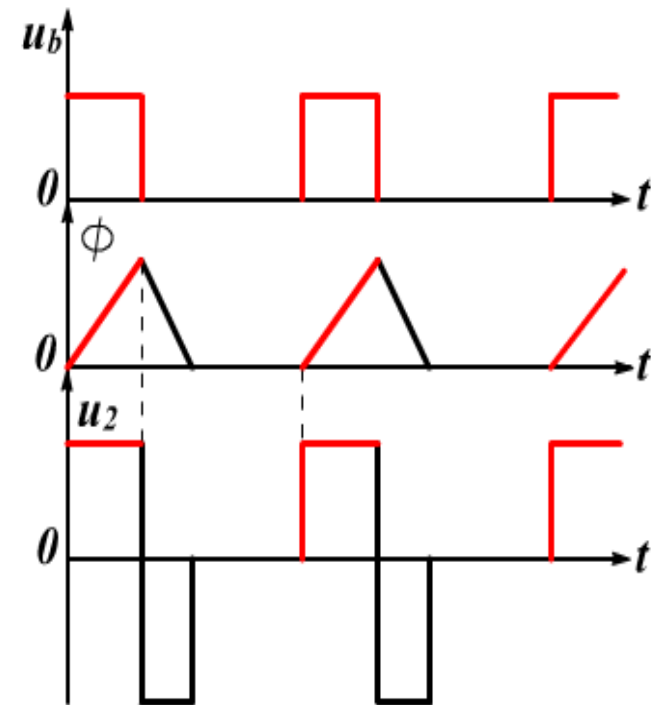
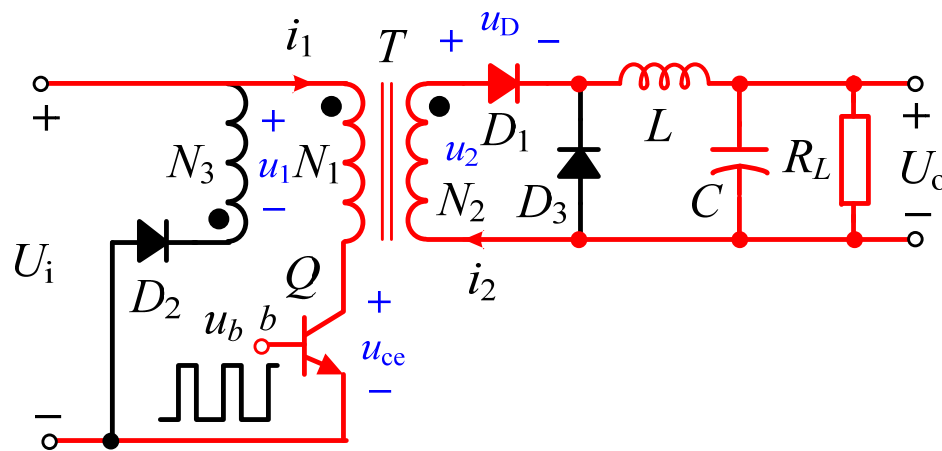
- ✦ 变压器 $T$ 、晶体管 $Q$ 、整流二极管 $D_1$
- ✦ 续流二极管 $D_3$ 和滤波电感 $L$ 和滤波电容 $C$
- ✦ 此外还有磁复位绕组 $N_3$ 和磁复位二极管 $D_2$





### 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
- ✦  $u_2 = n * u_i$  ( $n = N_2/N_1$  为变比)
- ✦  $D_2$  反压截止
- ✦  $D_3$  反压截止

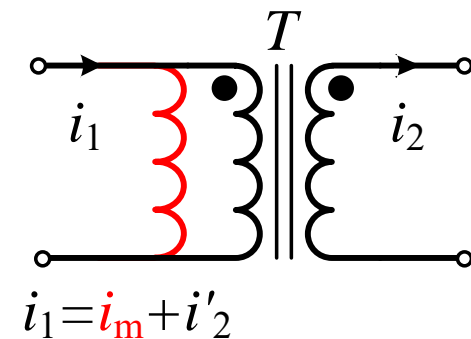
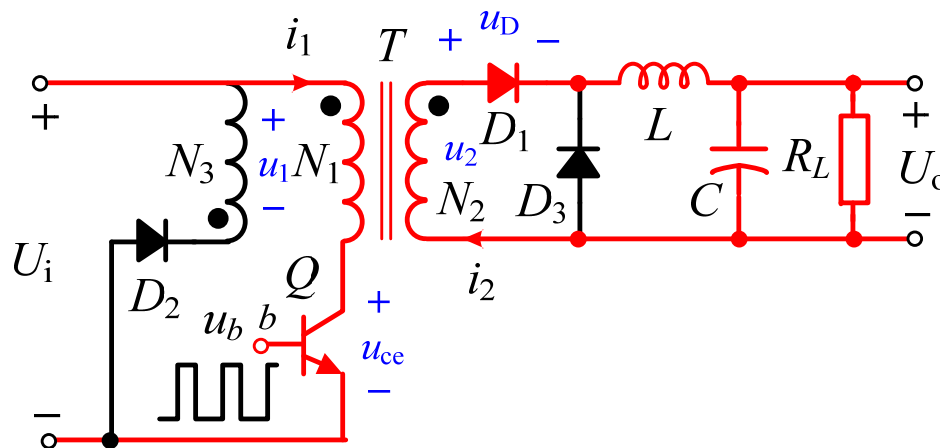


### 工作模式分析，当 $Q$ 导通时：

- 在晶体管导通时，输入电流包含负载电流折射分量 $i_2'$

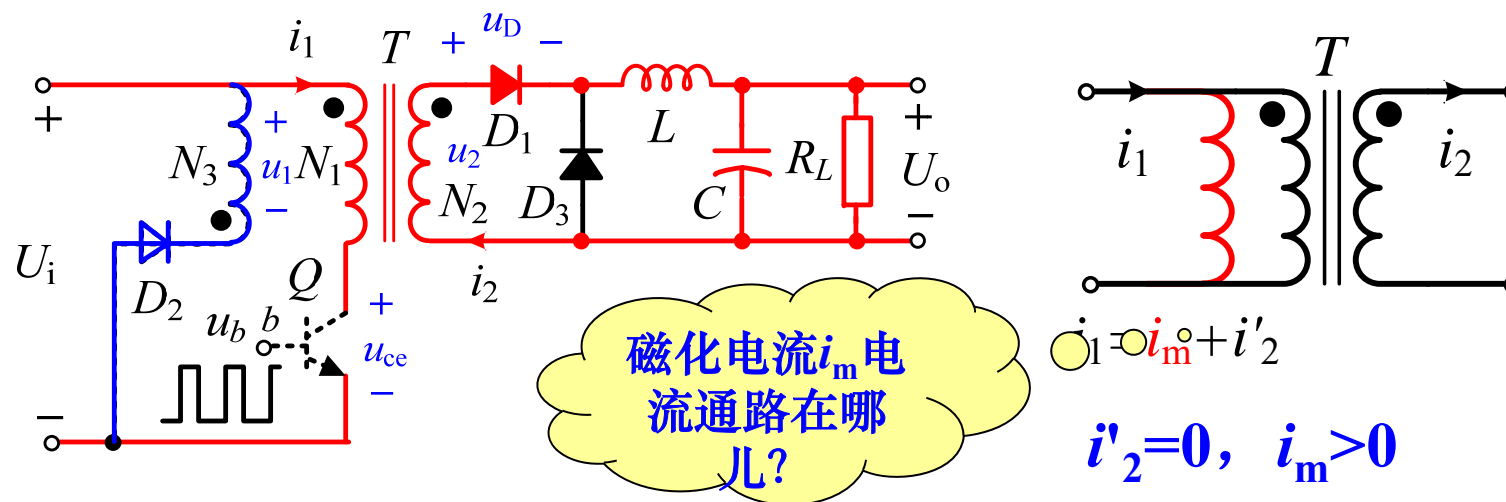
和磁化电流分量 $i_m$   $i_1 = i_2' + i_m$

- 磁化电流将能量储存在变压器磁芯中



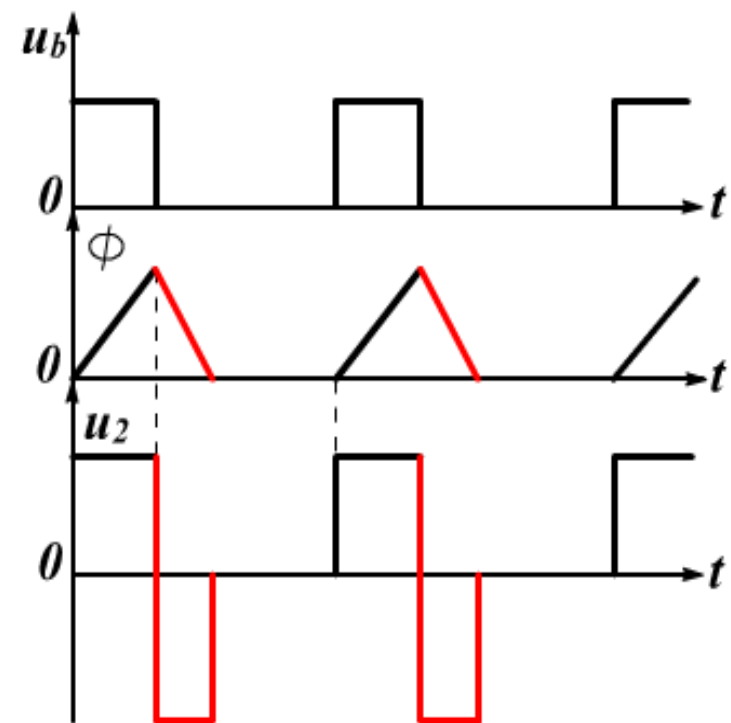
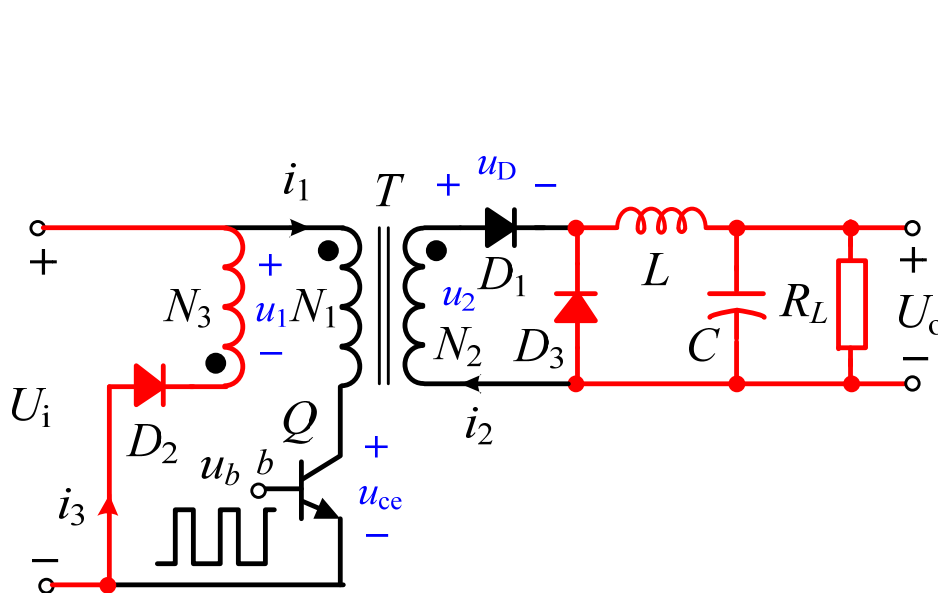
## 工作模式分析，当 $Q$ 截止时：

- ✦  $N_1$ 绕组电流突降至0
- ✦  $Q$ 截止时，若没有激磁电流流通回路，会造成过大的电压应力  $L_m di_m/dt$ ，功率器件 $Q$ 过压击穿
- ✦ **解决办法：** 变压器额外加上磁复位绕组 $N_3$ 和二极管 $D_2$



### 工作模态分析，当 $Q$ 截止时：

- ✦ 变压器“•”端为负端， $D_1$ 截止
- ✦  $D_3$ 导通，为电感电流提供续流通路



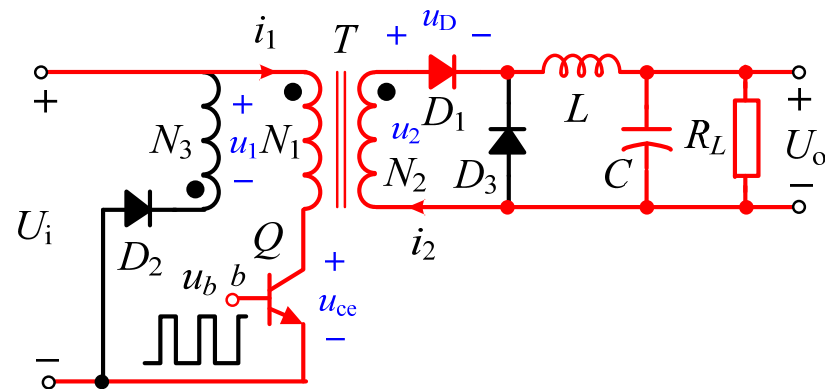
# 磁复位

- $$\Phi_{\text{m}} - \Phi_1 = \Delta\Phi_{\text{ON}} = \frac{U_{\text{i}}T_{\text{ON}}}{N_1}$$

- $$\Phi_1' - \Phi_m = -\Delta\Phi_{OF}' = -\frac{U_i T_R}{N_3}$$

- ## ◆ 联立求解

$$T_R = \frac{N_3}{N_1} T_{ON}$$



### ● $N_3$ 绕组的设计:

- ✦ 复位时间  $T_R$  应小于  $T_{OF}$ ，不然磁芯会饱和

$$T - T_{ON} = T_{OF} \geq T_R$$

- ✦ 将  $T_R$  代入

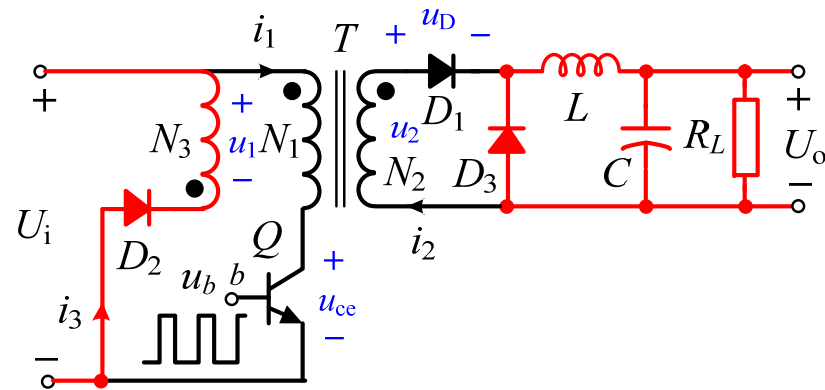
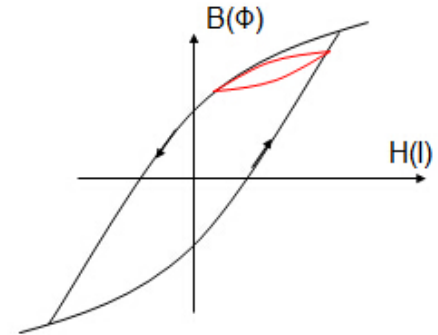
$$T_R = \frac{N_3}{N_1} T_{ON} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_{ON}}{T} = D < \frac{N_1}{N_1 + N_3}$$

- ✦ 晶体管关断时，最大电压为

$$u_{ce} = U_i + \frac{N_1}{N_3} U_i$$

- ✦ 同理可求出

$D_1, D_2, D_3$  的电压应力



●  $N_3$  绕组的设计:

● 由于:

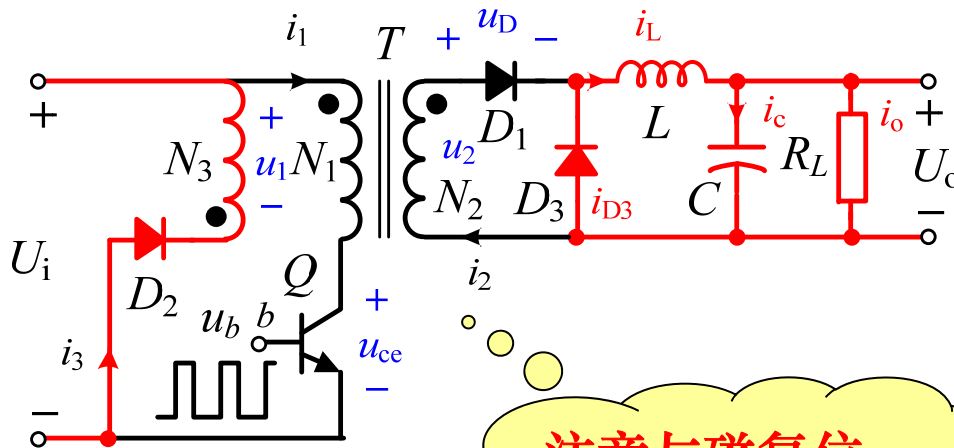
$$\frac{T_{\text{ON}}}{T} = D < \frac{N_1}{N_1 + N_3}$$

● 所以:

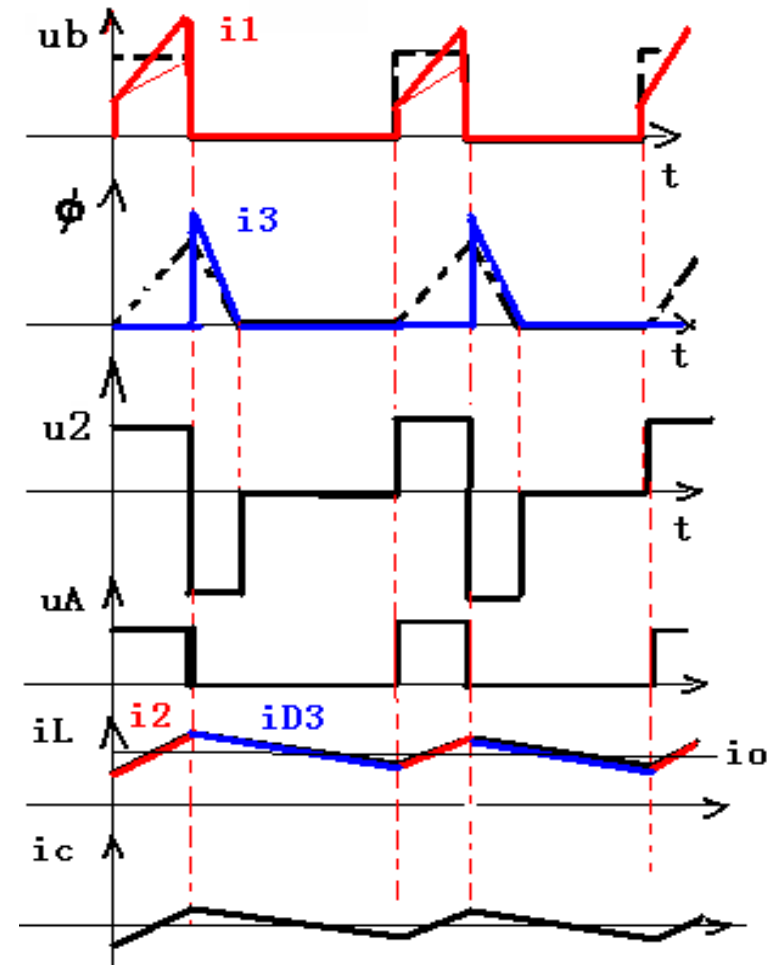
- ⊕ 当  $N_3 < N_1$  时,  $D$  可以大于 0.5, 但晶体管承受耐压也提高
- ⊕ 所以通常  $N_3 = N_1$  时,  $D < 0.5$ , 以保证磁芯复位
- ⊕ 为了使从将导通期间存储于磁场中的能量全部返回电源,  $N_1$  必须与  $N_3$  紧密耦合, 通常采用并绕

## ● 电流连续时的工作波形和应力分析

输出电流连续



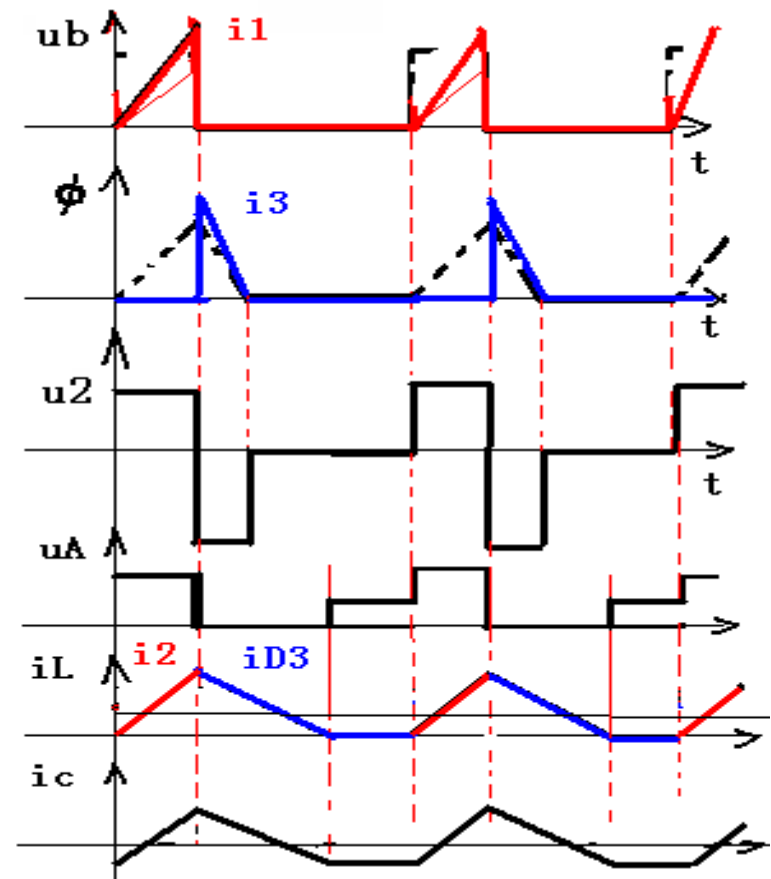
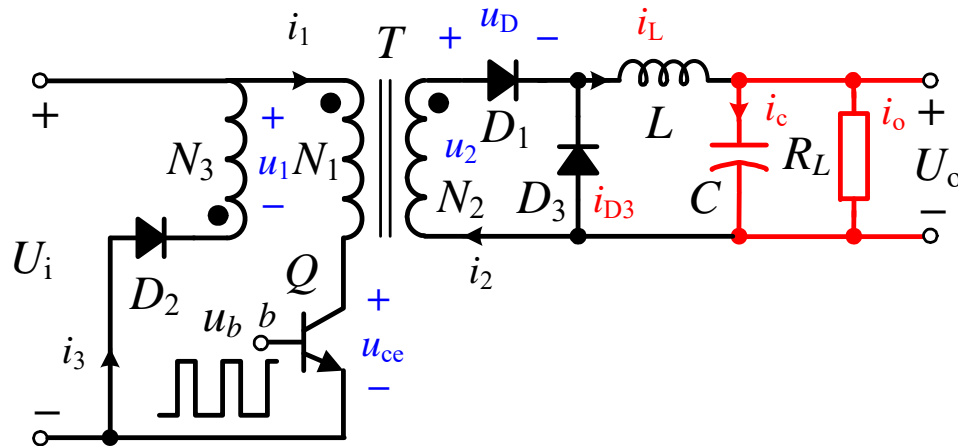
注意与磁复位  
电流的区别





## ● 电流断续时的工作波形和应力分析

输出电流断续



正激变换器如下图所示，电感电流连续。分析 $Q$ ， $D_1$ 和 $D_3$ 的电压应力(画出 $u_{ce}$ 、 $u_{D1}$ 、 $u_{D3}$ 和 $u_b$ 波形)；

占空比 $D=0.3$

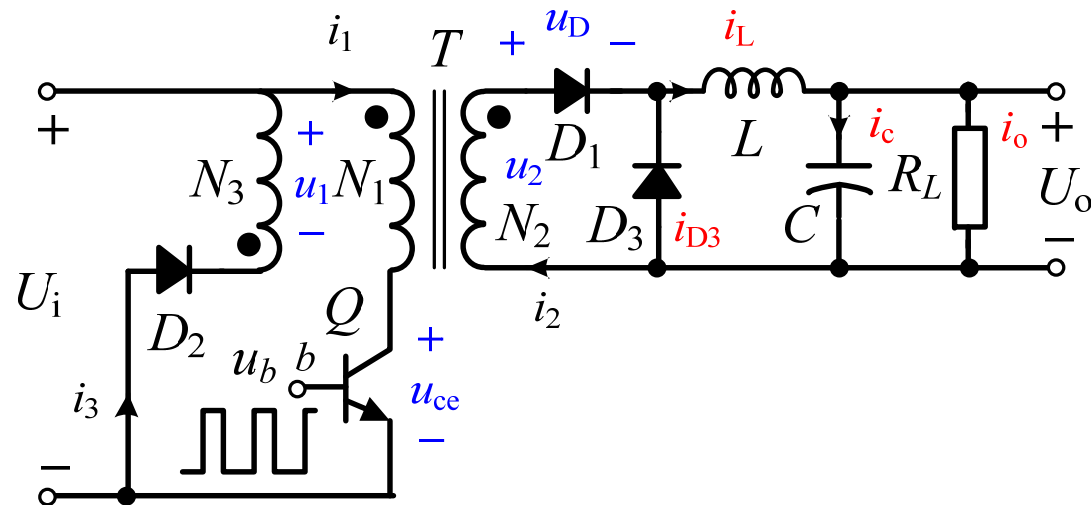


表 5-1 各种不同的间接直流变流电路的比较

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	变压器单向激磁，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，变压器单向激磁，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

- 直接直流变流电路包括6种基本斩波电路、2种复合斩波电路及多相多重斩波电路，其中最基本的是**降压斩波电路**和**升压斩波电路**两种。
- 常见的间接直流变换电路可以分为**单端**和**双端**电路两大类，单端电路包括**正激**和**反激**两类，双端电路包括全桥、半桥和推挽三类，每一类电路都可能有多种不同的拓扑形式或控制方法。