

● 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)

● 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**。

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。

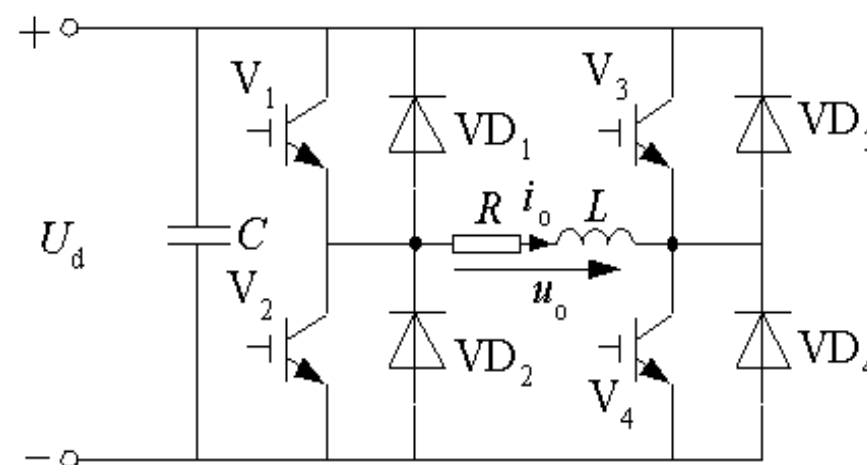


图4-5 电压型全桥逆变电路

- 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。

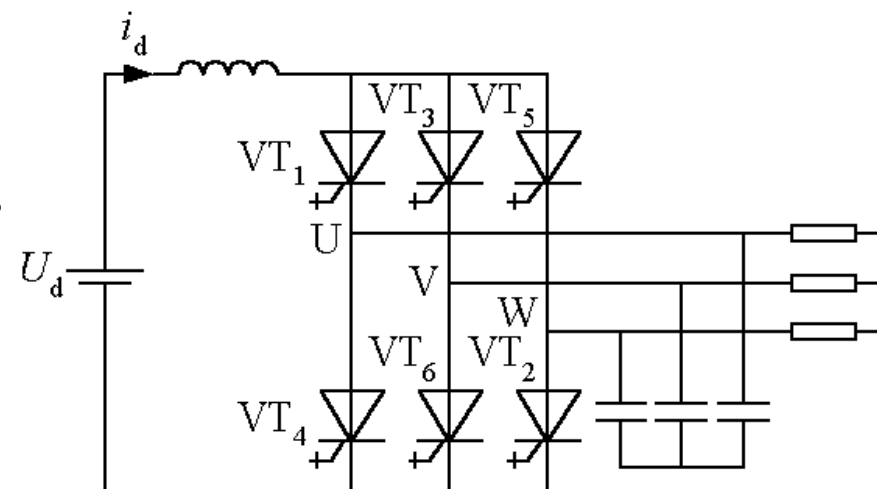


图4-11 电流型三相桥式逆变电路

(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。

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

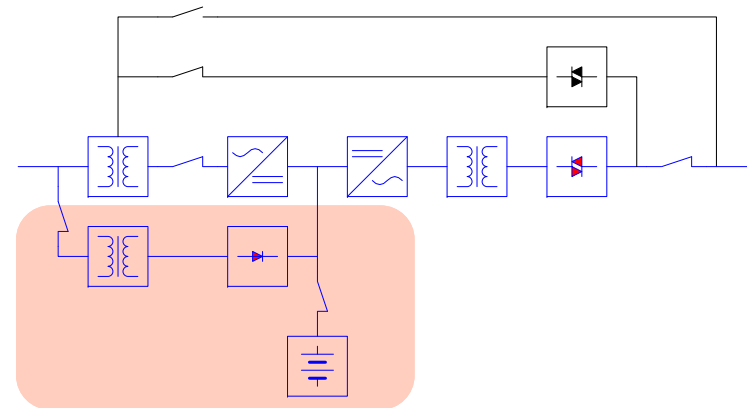
● 直流斩波电路 (DC Chopper)

- ✦ 将直流电变为另一固定电压或可调电压的直流电。
- ✦ 也称为**直流--直流变换器 (DC/DC Converter)**。
- ✦ 一般指直接将直流电变为另一直流电，**不包括直流—交流—直流**。

● 电路种类

- ✦ 6种基本斩波电路：**降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、Cuk斩波电路、Sepic斩波电路和Zeta斩波电路**。
- ✦ 复合斩波电路——不同结构基本斩波电路组合。
- ✦ 多相多重斩波电路——相同结构基本斩波电路组合。

一般工业-- 不间断供电电源 (UPS)



消费电子-- 笔记本电源适配器

单相220V交流变换为20V直流



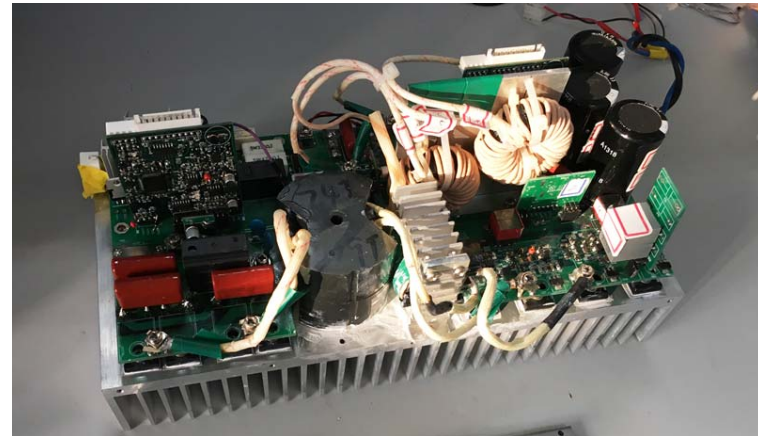
两级电能变换:

- 1、交流变直流
- 2、直流变直流



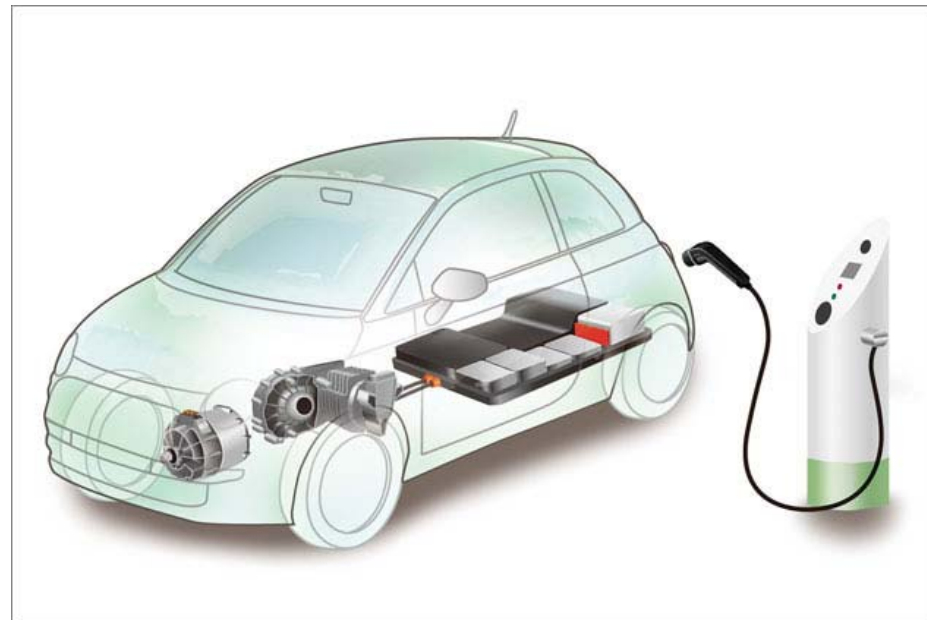
消费电子- 电动汽车充电

电池电压 **250V~500V**

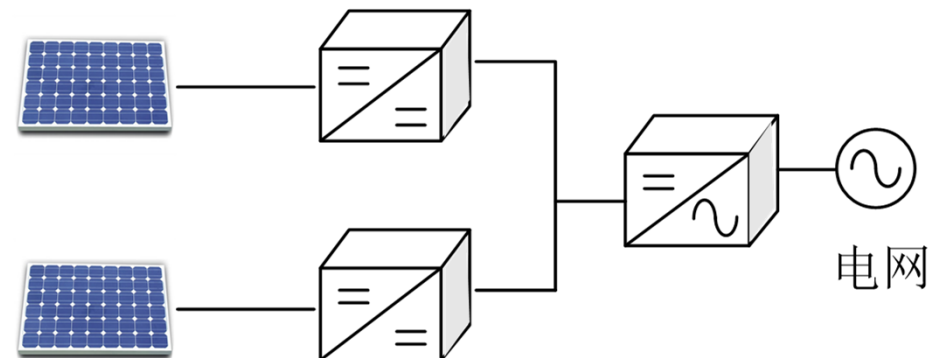


两级电能变换：

- 1、交流变直流
- 2、直流变直流



新能源发电 -- 光伏并网逆变器



3.2.1 Buck变换器

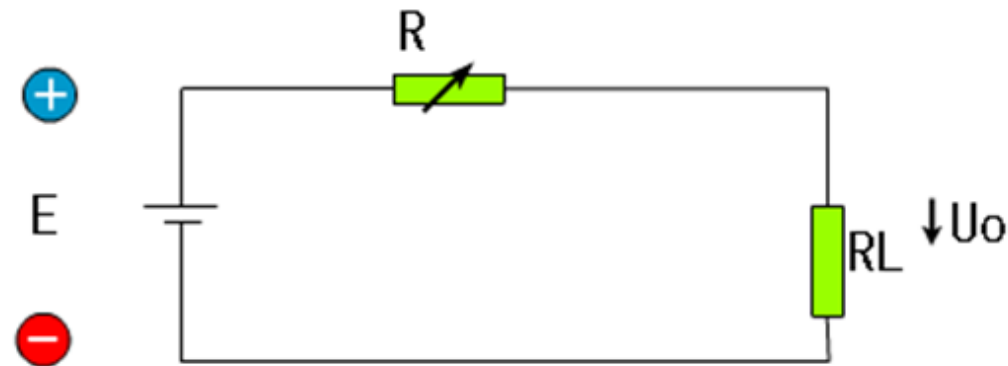
3.2.2 Boost变换器

3.2.3 升降压变换器

3.2.4 6种基本拓扑的比较

如何实现降压？

实现降压电路的方案一 -- 采用电阻分压

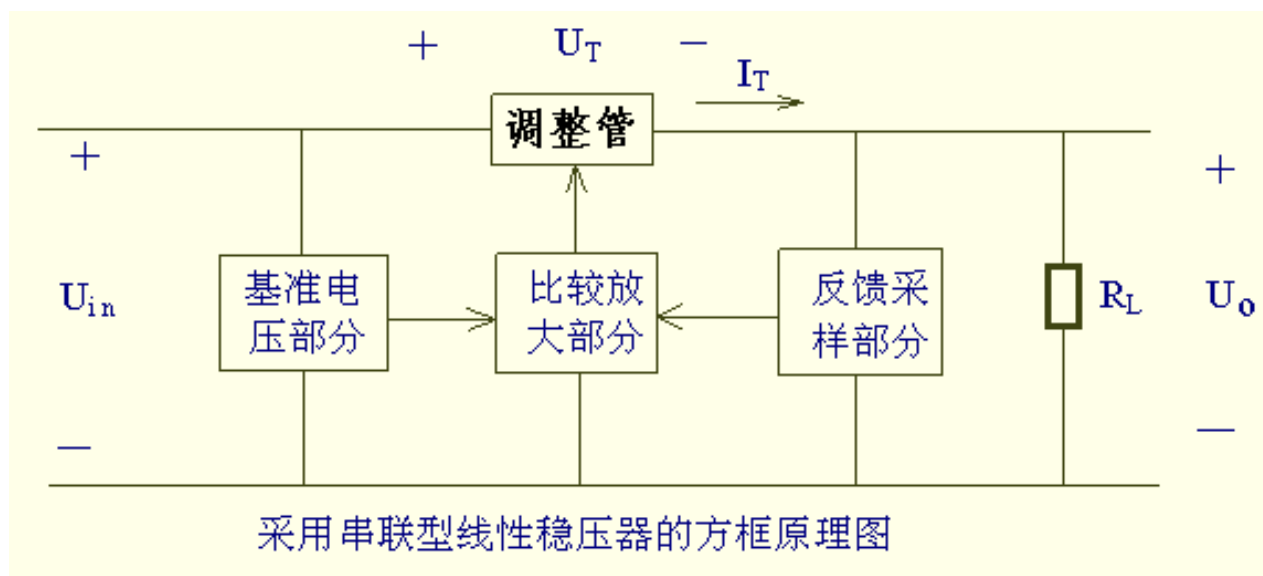


传统方式

其损耗为： $P_T = U_R * I_R = (U_{IN} - U_O) * I_R$

U_R 较大 损耗大

实现降压电路的方案二 -- 线性稳压



线性电源损耗为： $P_T = U_T * I_T = (U_{IN} - U_O) * I_T$
 U_T 较大 损耗大

实现降压电路的方案三 -- 电力电子方式

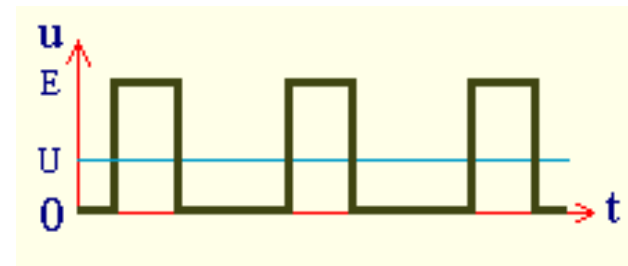
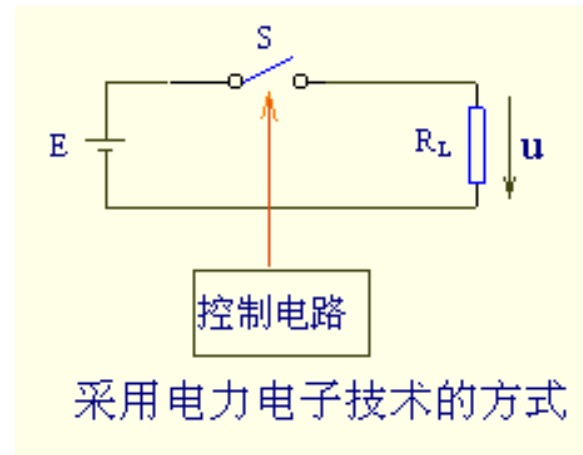
在电力电子电路中，有源器件总是工作在开关状态

开关电源：PT=通态损耗+开关损耗

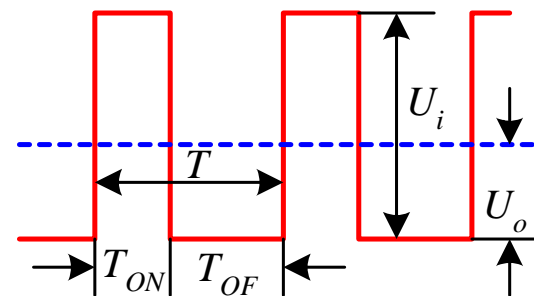
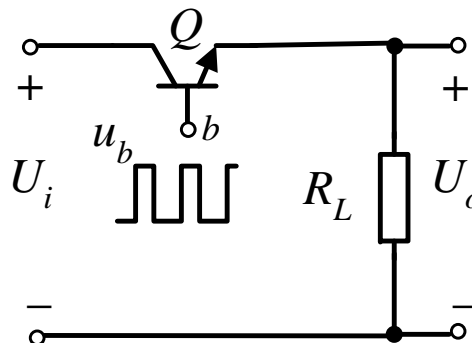
$$\text{通态损耗} = U_T * I_T$$

U_T 较小 损耗小

缺点??



直流斩波器



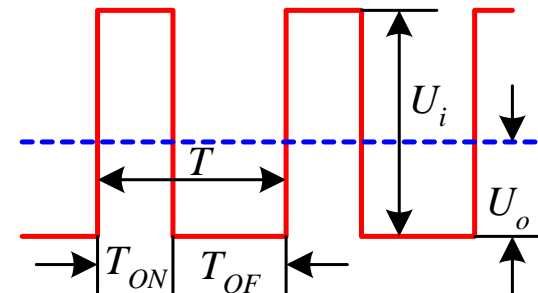
占空比（度）定义★： $D = \frac{T_{ON}}{T}$

输出平均电压

$$U_o = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T_{ON}} U_i \cdot dt = \frac{T_{ON}}{T} \cdot U_i = D \cdot U_i$$

$$P_o = \frac{1}{T} \int_T U_i i dt = \frac{DU_i^2}{R}$$

输出电压总是低于输入电压：
所以称之“降压式，step down”



(4)改变输出电压的方法△—改变D

改变D的方法—恒频、改变脉宽-PWM；脉宽固定、变频-PFM，
频率、脉宽都变

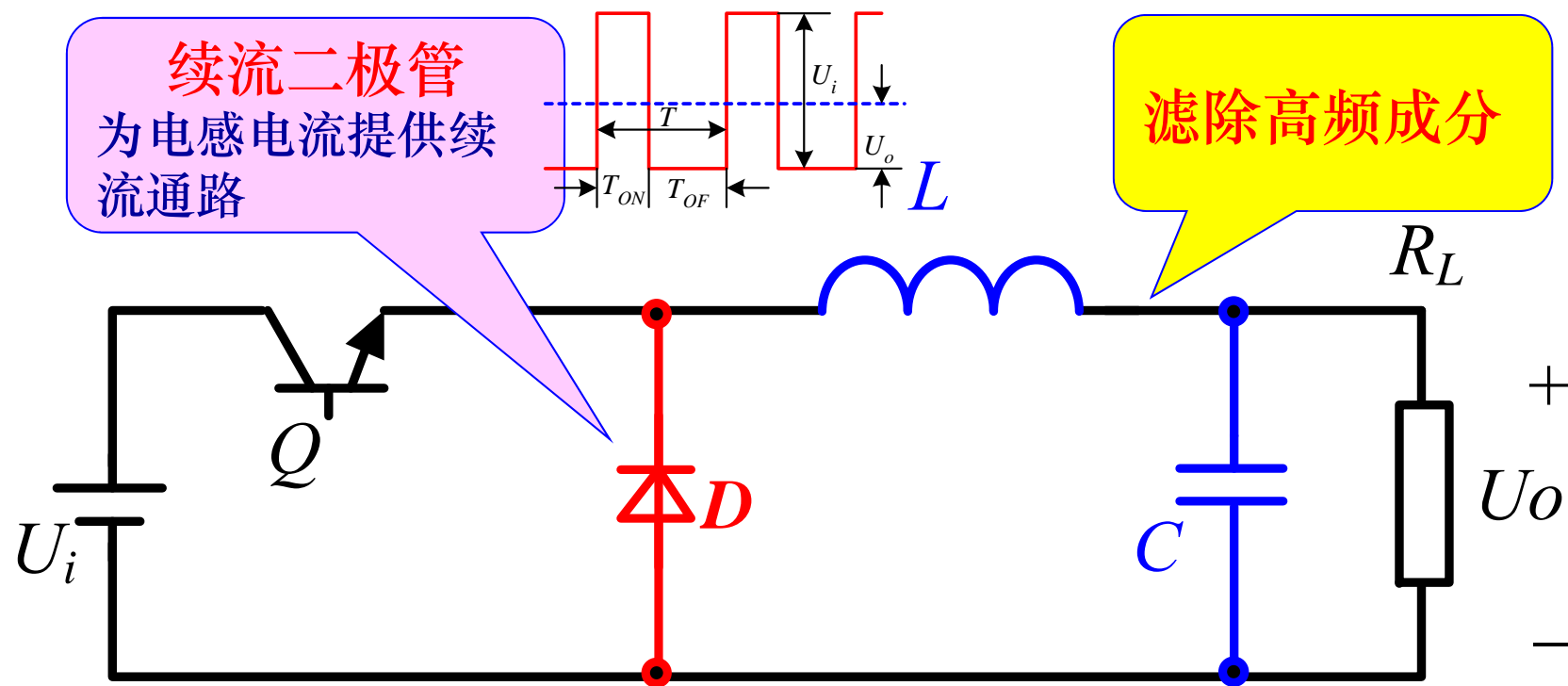
(5)斩波器的缺点—输出脉动太大→加入滤波器



重点掌握

- ✦ 能正确画出Buck变换器电路构成图；
- ✦ 掌握Buck变换器基本工作原理和特点
- ✦ 掌握分析方法（CCM和DCM两种工作模式下波形和基本关系推导及规律）
- ✦ 滤波元件与开关频率关系
- ✦ 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
- ✦ 电容的高频特性
- ✦ 考虑内部损耗时外特性的影响

Buck变换器的推导



斩波管Q + 续流D + LC低通滤波器

工作原理 (电流连续模式, CCM)

忽略 U_o 脉动, 注意波形★

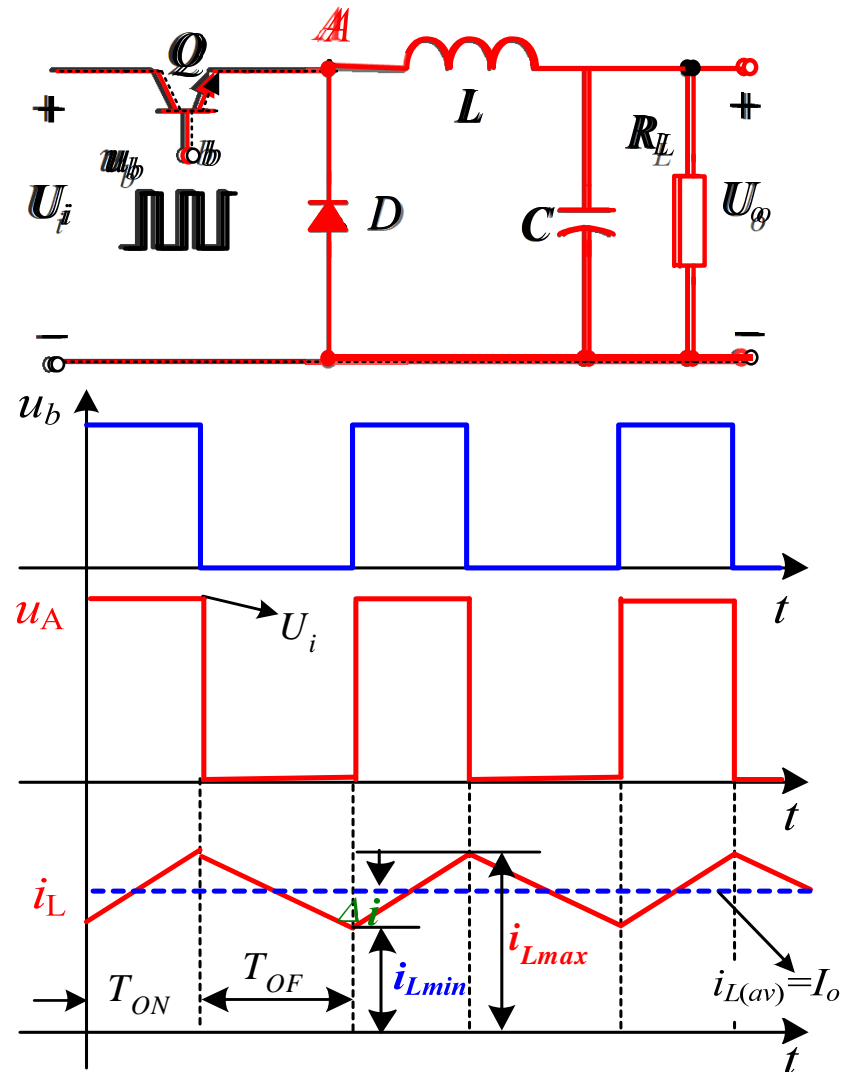
Q on, D off: $u_A = U_i$,

$$U_i - U_o = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{电感电流线性}\uparrow$$

Q off: 电感电流不能突变, **D on,**

$$u_A = 0$$

$$-U_o = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{电感电流线性}\downarrow$$

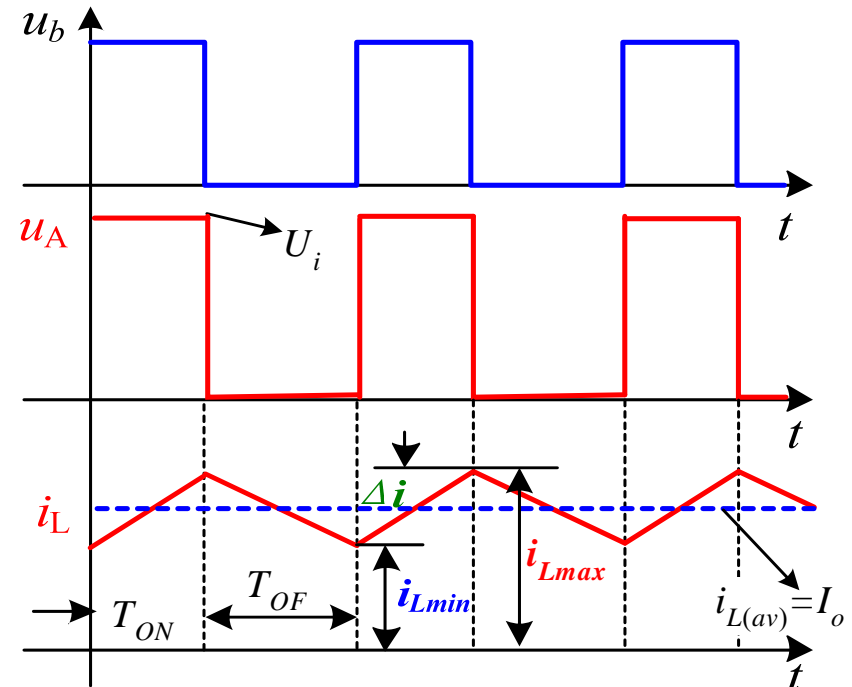


工作原理

(电流连续模式, CCM)

稳态时一起点与终点值相等, 故
电感电流上升量等于电流下降量

$$\Delta i_{\text{ON}} = \Delta i_{\text{OF}}$$



$$\text{Q ON: } U_i - U_o = L \frac{i_{L\max} - i_{L\min}}{T_{\text{ON}}} = L \frac{\Delta i_{\text{ON}}}{T_{\text{ON}}}$$

$$\text{Q OF: } U_o = -L \frac{i_{L\min} - i_{L\max}}{T_{\text{OF}}} = L \frac{i_{L\max} - i_{L\min}}{T_{\text{OF}}} = L \frac{\Delta i_{\text{OF}}}{T_{\text{OF}}}$$

$$\Delta i_{\text{ON}} = \frac{(U_i - U_o) \cdot DT}{L}$$

$$= \Delta i_{\text{OF}} = \frac{U_o \cdot (1-D)T}{L} \rightarrow U_o = DU_i$$

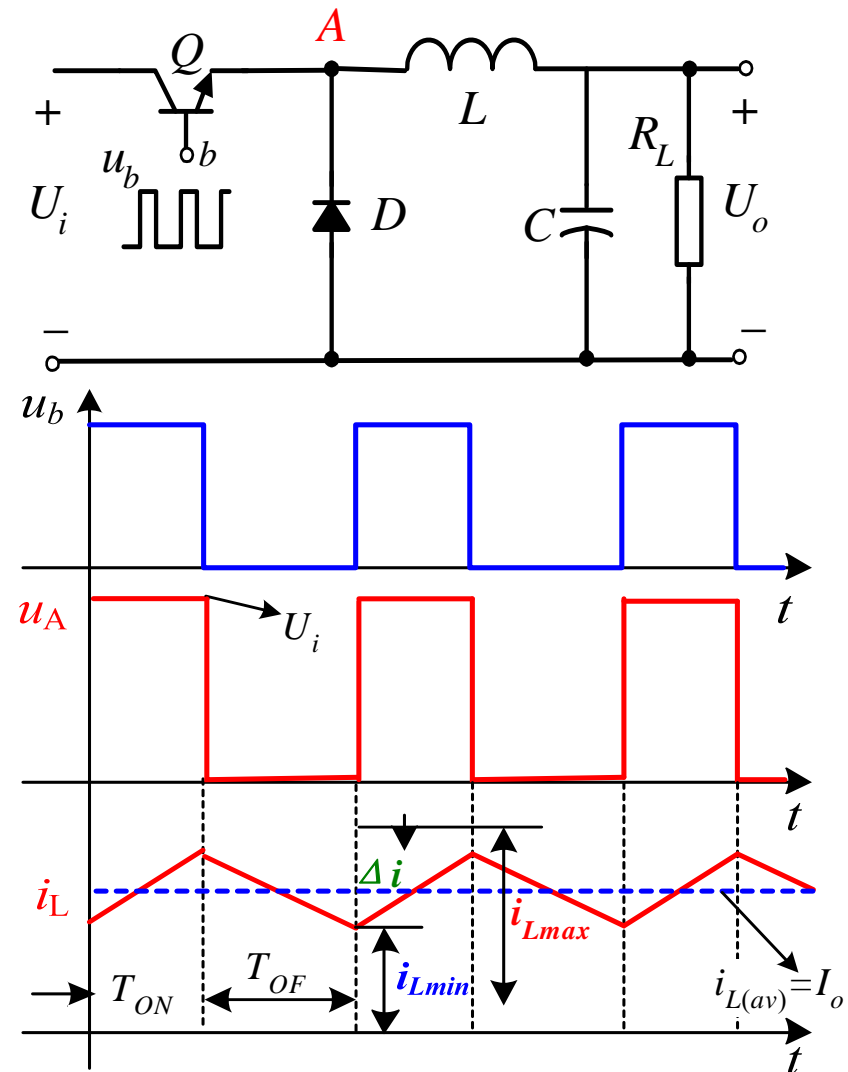
理解：

低通滤波 $\rightarrow u_A$ 的直流分量
等于 U_o

$$\rightarrow U_o = DU_i$$

电感电流的直流分量（平均值）
等于输出电流平均值

电感电流的交流分量（平均值）
等于??



● 分析方法要点

- ⊕ CCM （输出电压和输入电压关系式）
- ⊕ 电感电流上升量=电感电流下降量
- ⊕ T_{ON} 期间磁通变化量= T_{OF} 期间磁通变化量

● 稳态时储能元件一个开关周期具有以下特点

- ⊕ 电感L： 电流变化量/伏秒面积为零
- ⊕ 能量守恒原则： 储能能量=释放能量

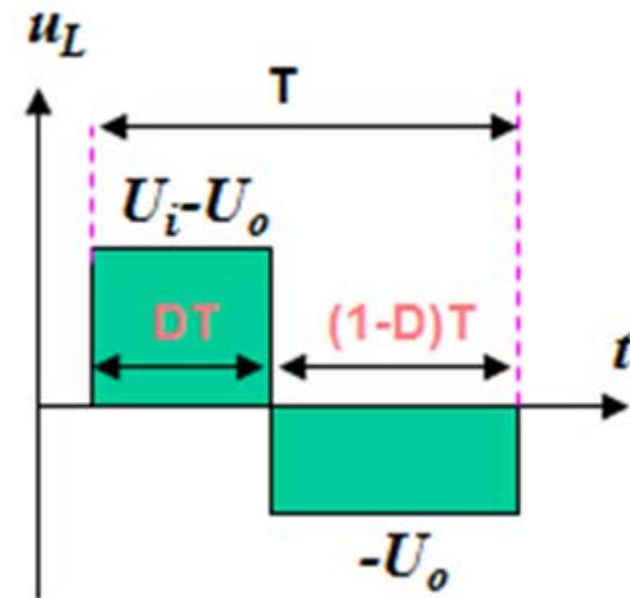
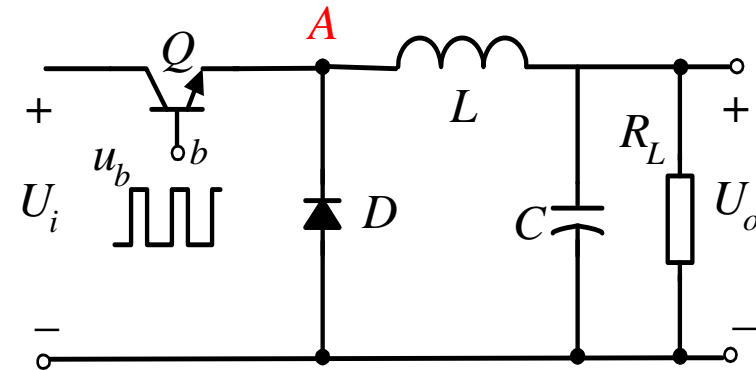
$$\int_0^T u_L dt = 0$$

另一种分析方法:

电感伏-秒面积平衡

$$(U_i - U_o) * DT = U_o * (1 - D)T$$

$$U_o = DU_i$$



变换器理想条件(理想器件)下外特性 定义

在恒定占空比下，变换器的输出电压与输出电流(这里实际上是平均电流)的关系称为变换器的外特性

$$U_o = f(I_o) \Big|_D$$

对于Buck变换器: $I_o = I_L$

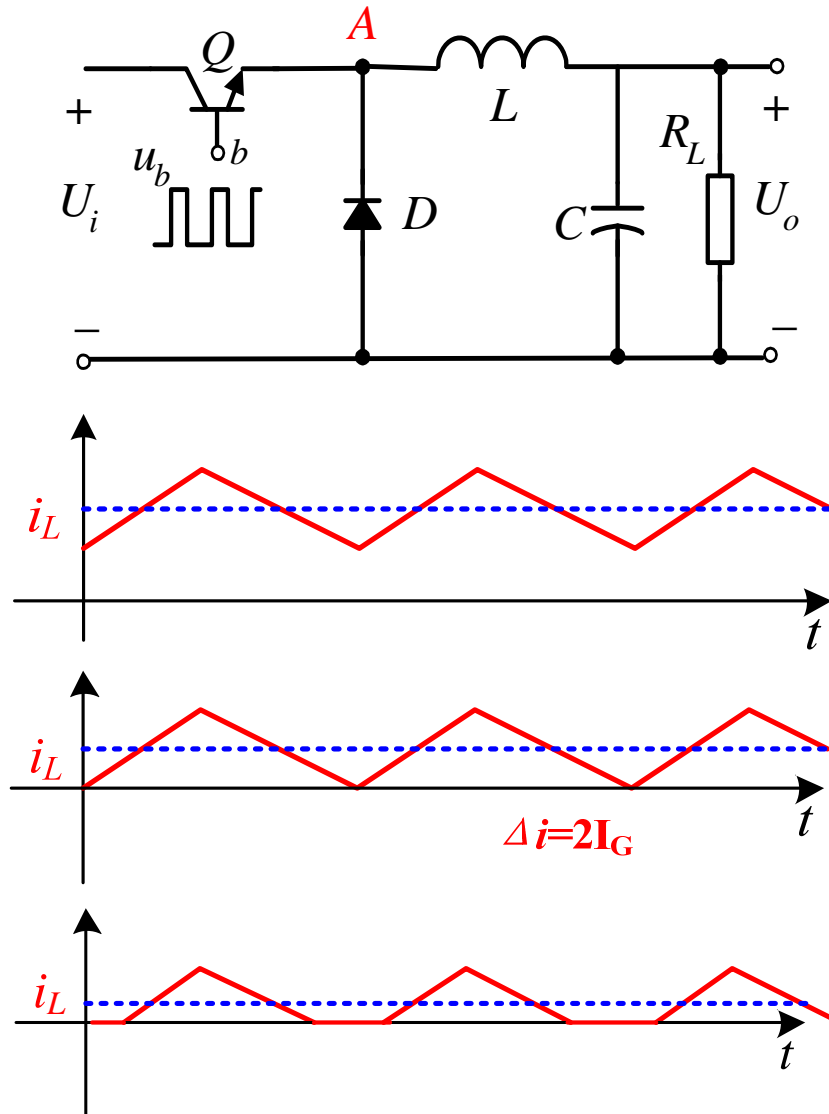
电感电流有: 连续, 临界连续, 断续 三种情况

$I_o \downarrow \rightarrow i_L$ 下移

但 $i_L \geq 0$ ，斜率不变，

所以必有轻载时 i_L 变为临界连续、断续

临界电流连续、电流断续时的输入、输出电压关系??



变换器的外特性

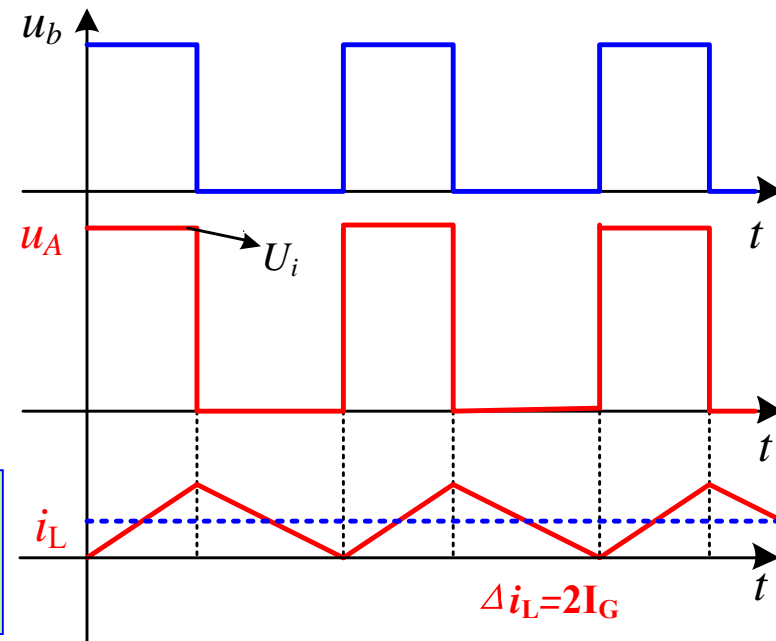
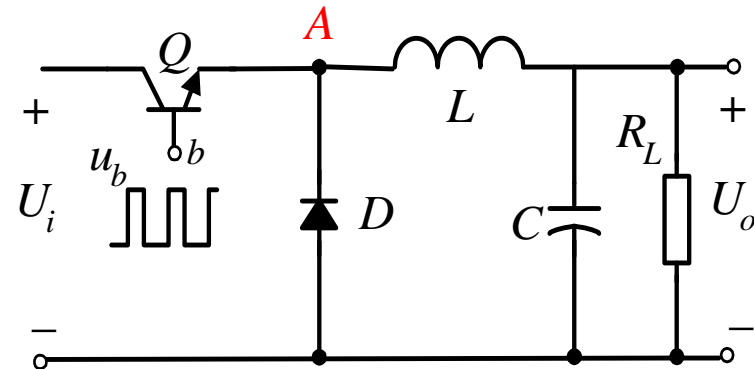
临界连续模式(CRM):

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

临界连续电流: I_G

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

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



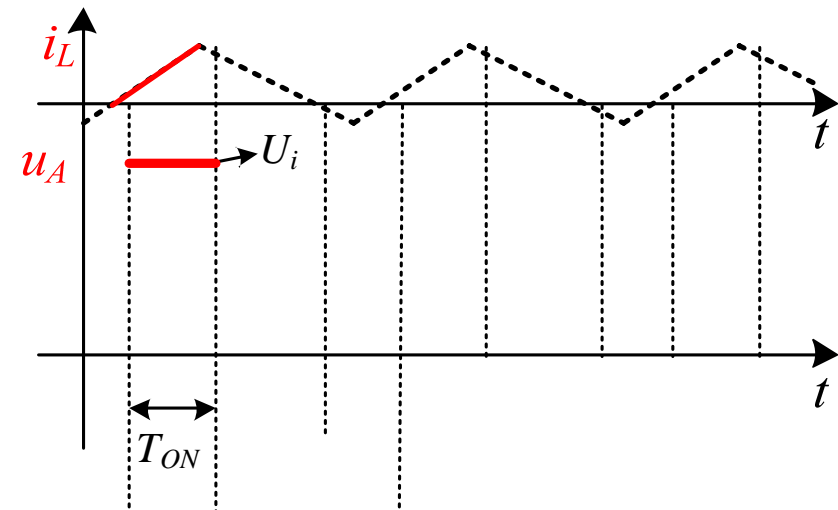
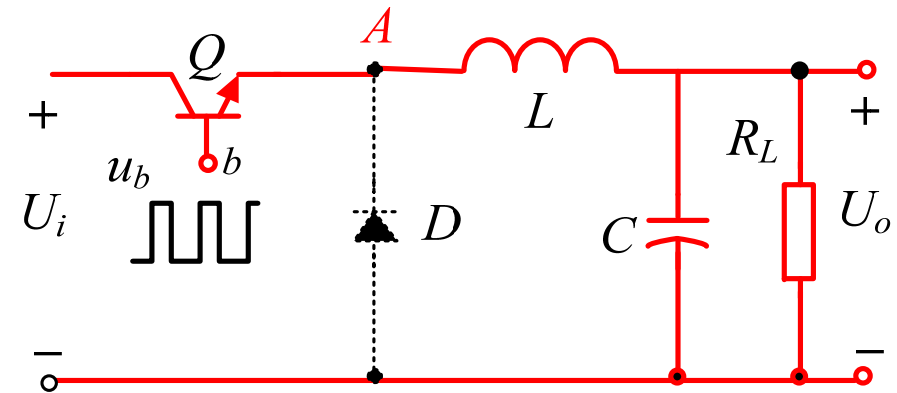
3.2.1 Buck变换器

变换器理想时的外特性

断续模式(DCM):

0~DT:

$$\Delta i_{\text{ON}} = \frac{1}{L}(U_i - U_o)T_{\text{ON}}$$



(0~DT)

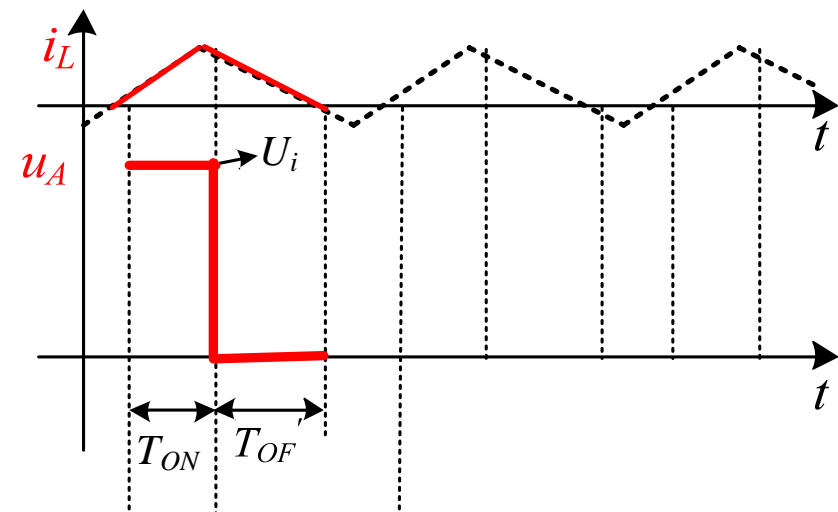
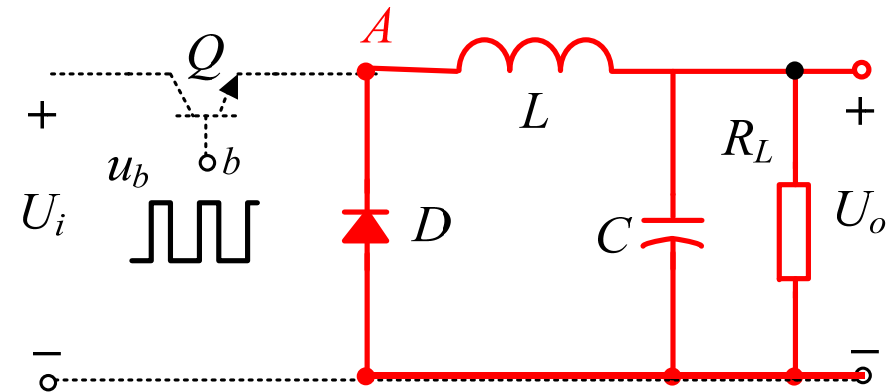
3.2.1 Buck变换器

变换器理想时的外特性

断续模式(DCM):

$DT \sim DT + T'_{OF}$:

$$\Delta i'_{OF} = \frac{1}{L}(-U_o)T'_{OF}$$

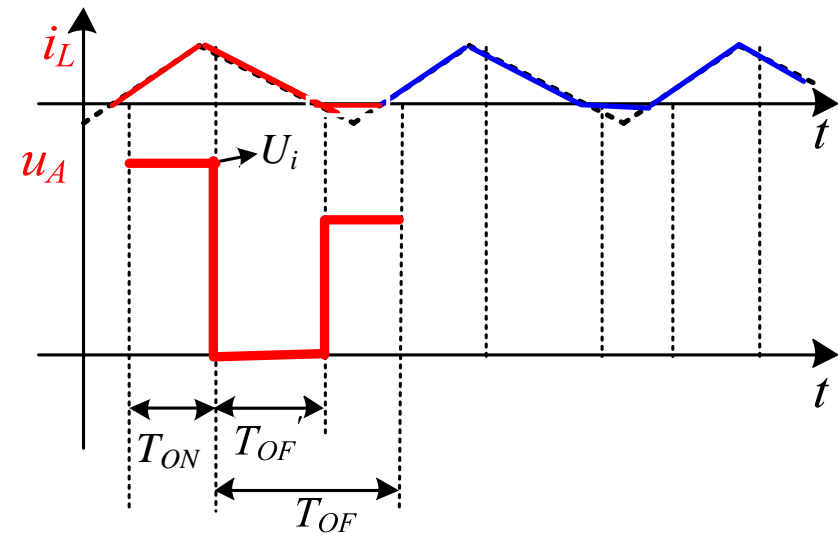
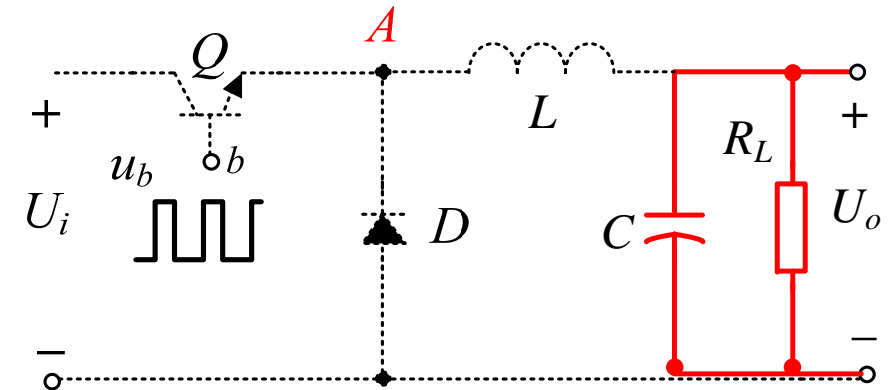


变换器理想时的外特性

断续模式(DCM):

$DT + T'_{OF} \sim T$:

$$i_L = 0$$



3.2.1 Buck变换器

$(0 \sim DT)$

$$\Delta i_{\text{ON}} = \frac{1}{L}(U_i - U_o)T_{\text{ON}}$$

$(DT \sim DT + T'_{\text{OF}})$

$$\Delta i'_{\text{OF}} = \frac{1}{L}(-U_o)T'_{\text{OF}}$$

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

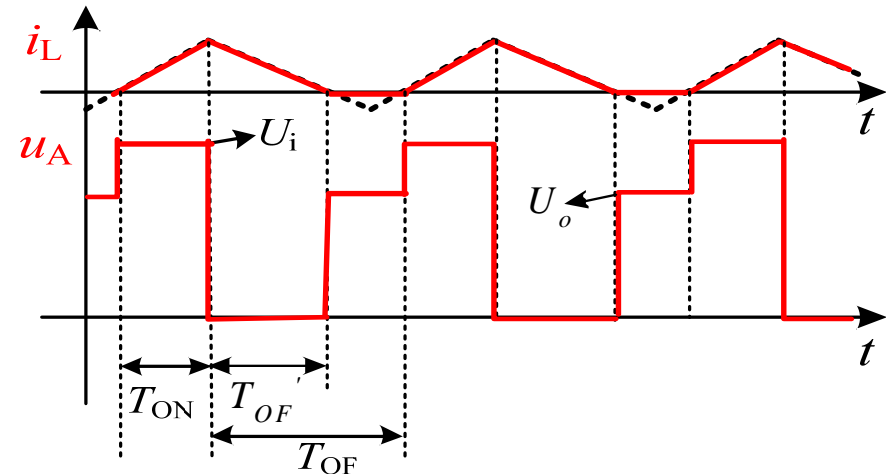
$$I_o = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} (T_{\text{ON}} + T'_{\text{OF}}) \cdot \Delta i_{\text{ON}}$$

断续时外特性:

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

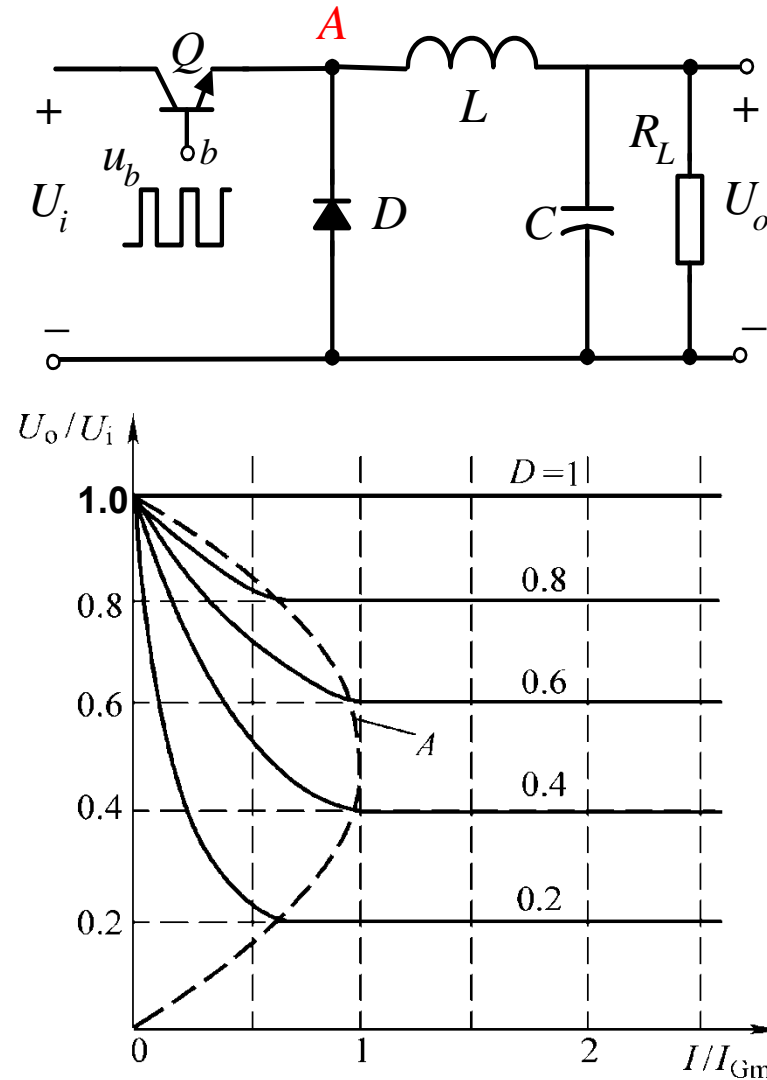
式中

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



3.2.1 Buck变换器

- 图中虚线为**临界连续**曲线，即为分界线
- 右边为**电流连续**，输出电压只与占空比相关
- 左边为**电流断续**，输出电压与负载电流也有关



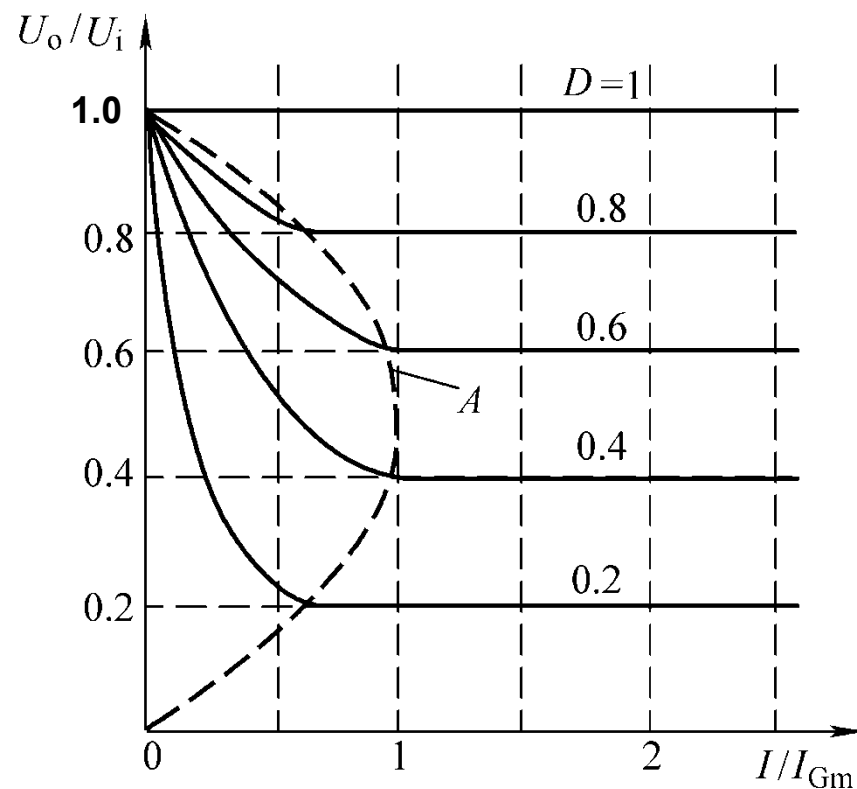
变换器理想时的外特性

断续时 Δ :

D 不变, $I_o \downarrow$ 、 $U_o \uparrow$

相同负载、 D 不变, $L \uparrow$ 、 $I_{Gmax} \downarrow$ 、 $U_o \downarrow$

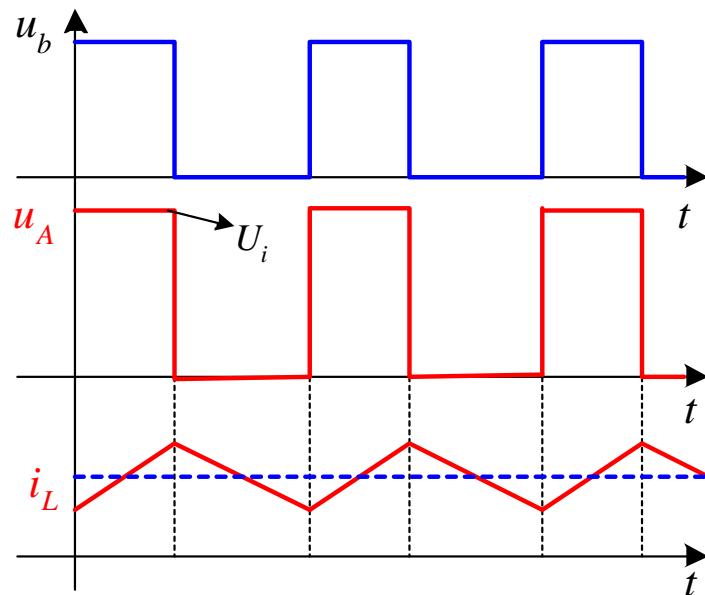
断续区, I_o 变化, 要稳定 U_o , 应改变 D



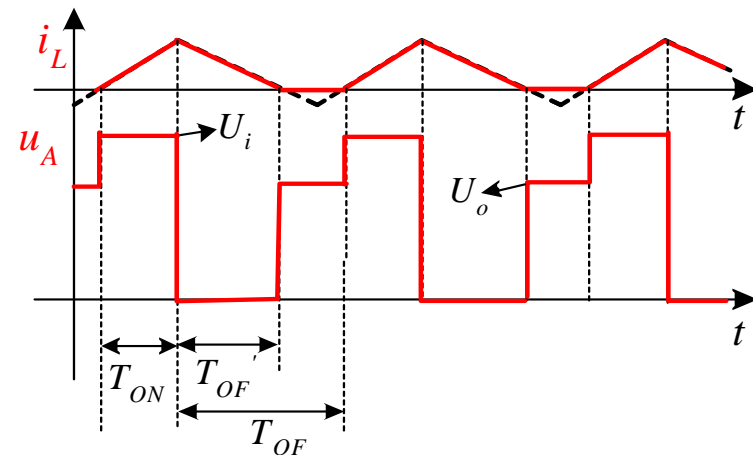
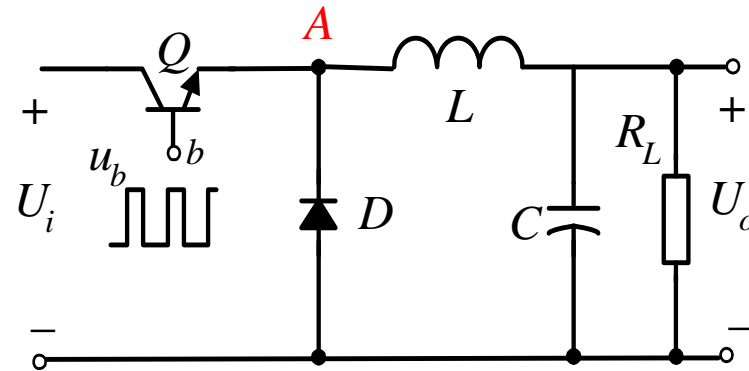
如何从物理意义上理解?

变换器功率器件设计

开关管、二极管
电流电压波形、应力



CCM



DCM

● 开关管选型

- ✦ MOSFET? IGBT? GTR?
- ✦ 依据：电压、电流和功率等级、开关频率

● 功率管最大电流等于电感电流峰值

$$I_{QP} = I_o + \frac{\Delta i_L}{2} = I_{omax} + I_{Gmax}$$

- ✦ 式中 I_{omax} 和 I_{Gmax} 为最大输出电流与最大临界电流

● 一般取功率晶体管的最大电流 I_{CM} $I_{CM} > I_{QP}$

● 功率管的电压满足 $U_{(BR)CEO} \geq 1.5U_{imax}$

● 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_{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 Δi_L 的表达式计算) $\Delta i_L = 10\% \sim 15\% I_{\text{omax}}$**

滤波电容设计

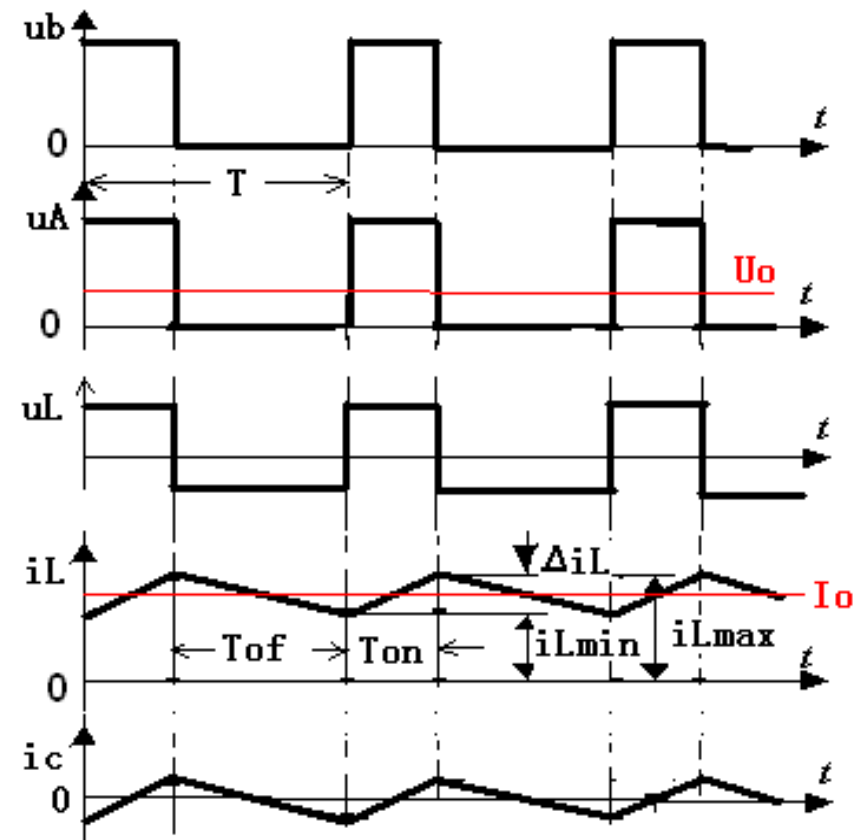
- 电容电流近似为电感电流的脉动部分
- 电容电流在1/2周期内充电，在1/2周期内放电
- 所以，半周期电容电流：

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

- 电容纹波电压

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

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



● 分析方法要点

- ✦ CCM （输出电压和输入电压关系式）
- ✦ 电感电流上升量=电感电流下降量
- ✦ T_{ON} 期间磁通变化量= T_{OFF} 期间磁通变化量
- ✦ DCM （外特性）
- ✦ 流过输出滤波电容前元件的电流平均值 = I_o

● 稳态时储能元件一个开关周期具有以下特点

⊕ 电感L：电流变化量/伏秒面积为零

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

⊕ 电容C：电压变化量/安秒面积为零

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

⊕ 变压器：磁通变换量/伏秒面积为0

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

⊕ 能量守恒原则：储能能量=释放能量

- 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)

$$\left\{ \begin{array}{l} L = \frac{U_i T D (1 - D)}{2 I_{\text{omin}}} \\ C = \frac{U_i D (1 - D)}{8 L f^2 \Delta U_c} \end{array} \right.$$

工作原理分析: (i_L 连续)

on/off 期间的回路方程+边界条件 ----→ $U_o = DU_i$



外特性-----连续,临界连续,断续三种情况的汇总;临界连续点



参数计算: Q ---电压 (稳态承受电压: U_i) , 峰值电流

D ---电压 (稳态承受电压: U_i), 电流有效值/平均电流定额

L ---按临界连续电流设计

C ---按输出电压纹波设计



Buck变换器基本特点: 降压, i_i 纹波大、而 i_o 纹波小 , $I_L = I_o$

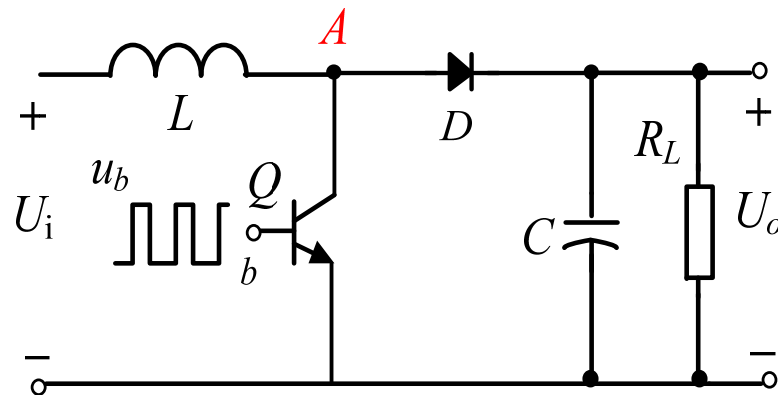
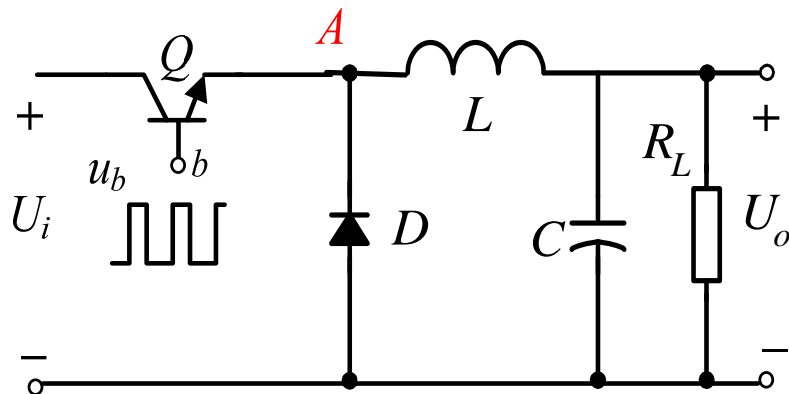
1、降压式DC/DC变换器电路。输入电压为 $27\text{V} \pm 10\%$ ，输出电压为 15V ，最大输出功率为 120W ，最小输出功率为 10W 。设器件为理想的，工作频率为 30KHz ，求：

- (1) 保证整个工作范围电感电流连续时，占空比的变化范围
- (2) 保证整个工作范围电感电流连续时所需的最小电感值
- (3) 输出电压纹波为 100mV 时的滤波电容值
- (4) 电感临界连续电流为 4A 时的电感量，及最小输出功率时的占空比变化范围

重点掌握

- ✦ 能正确画出Boost变换器电路构成图；
- ✦ 掌握Boost变换器基本工作原理和特点
- ✦ 掌握分析方法（CCM和DCM两种工作模式下波形和基本关系推导及规律）
- ✦ 滤波元件与开关频率关系
- ✦ 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
- ✦ 电容的高频特性
- ✦ 考虑内部损耗时外特性的影响

- 升压式电路构成： L , Q , D , C 四个元件构成
- 典型的单管功率电路
- 与BUCK电路构成基本的直直变换器
- 升压变换器、BOOST变换器



工作原理

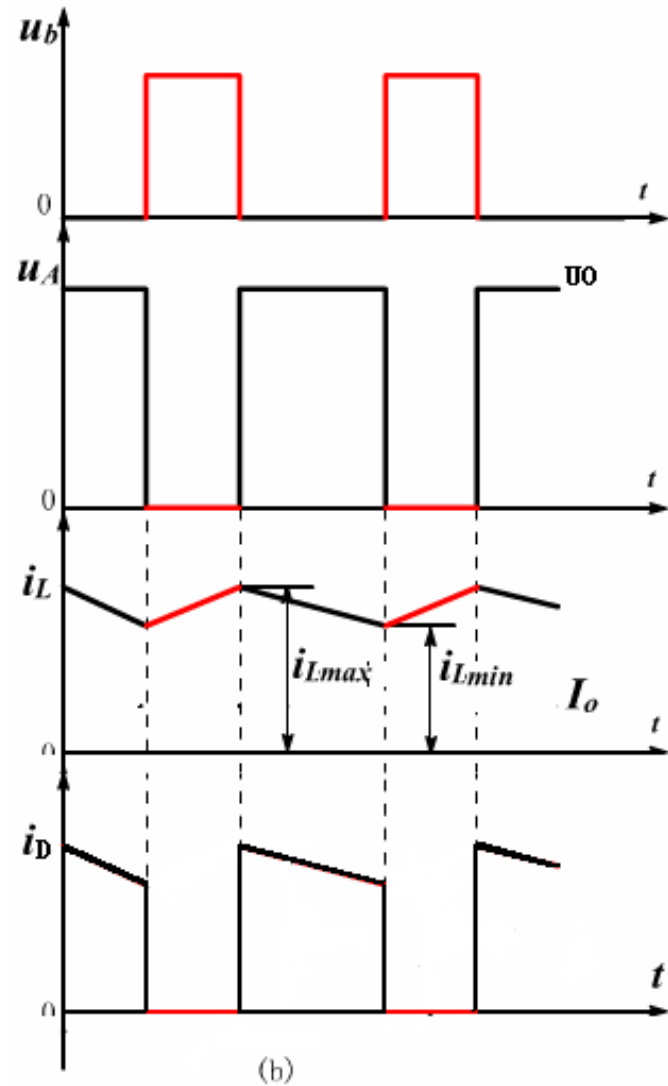
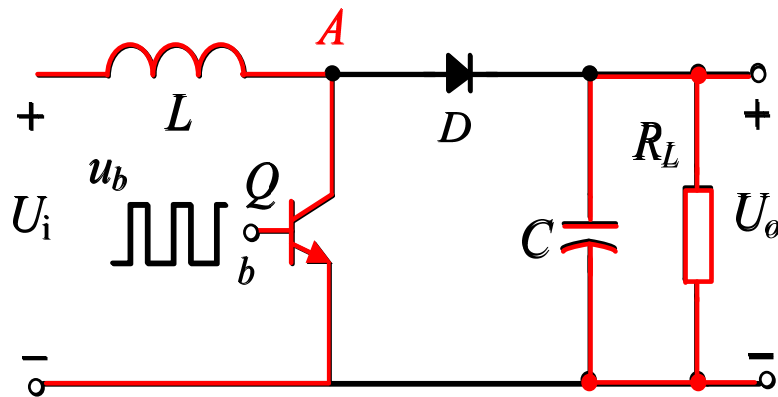
(电流连续模式, CCM)

✦ 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)



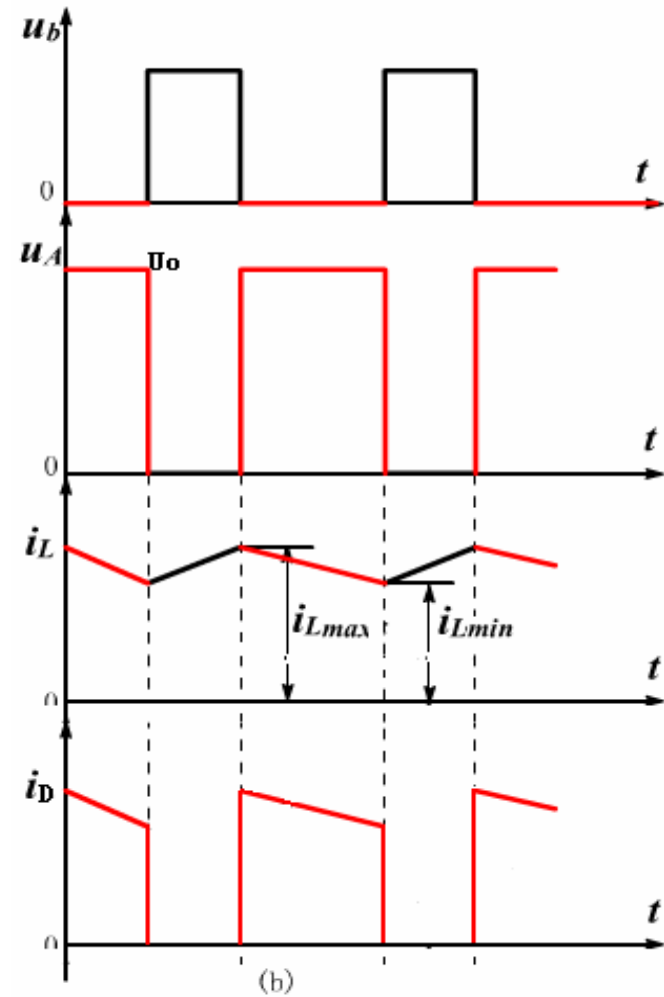
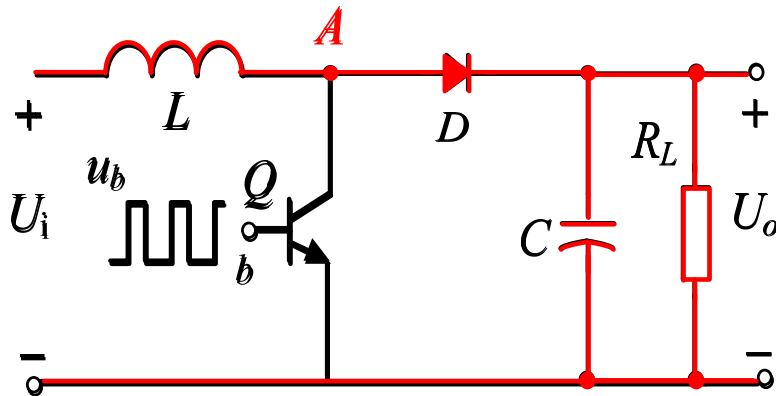
工作原理

(电流连续模式, CCM)

⊕ 当Q截止时

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

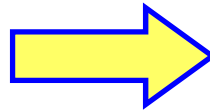
⊕ 电感电流线性减小



3.2.2 Boost变换器

✦ 联立等式，求解

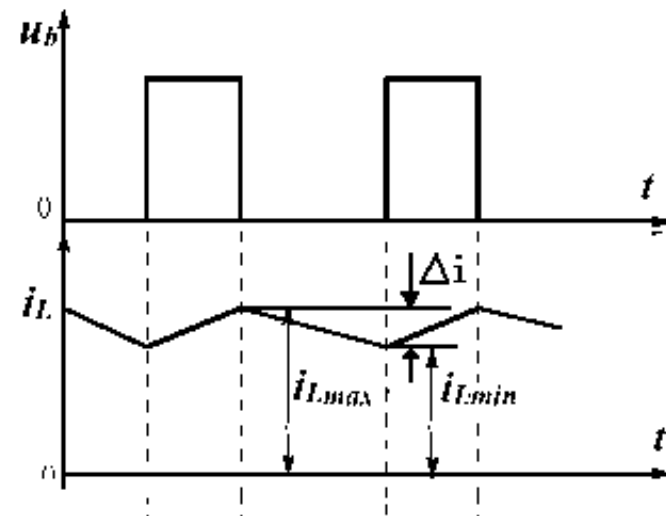
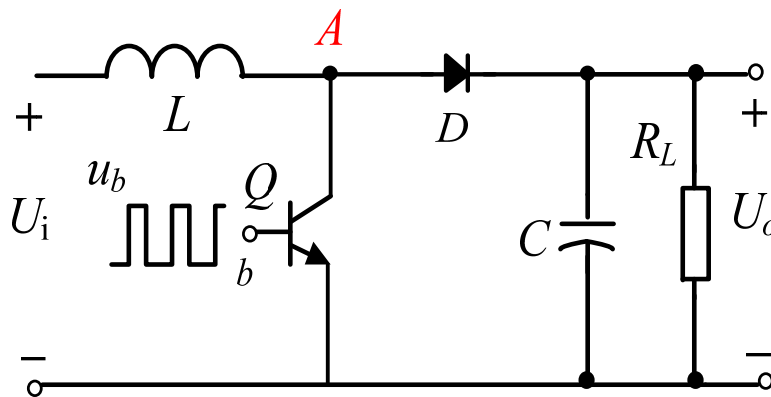
$$\begin{cases} U_i = L \frac{i_{L\max} - i_{L\min}}{T_{\text{ON}}} \\ U_i - U_o = L \frac{i_{L\min} - i_{L\max}}{T_{\text{OFF}}} \end{cases}$$



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

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

✦ 根据公式可知，输出电压大于输入电压，属**升压电路**



● 开关周期磁通变化量为零

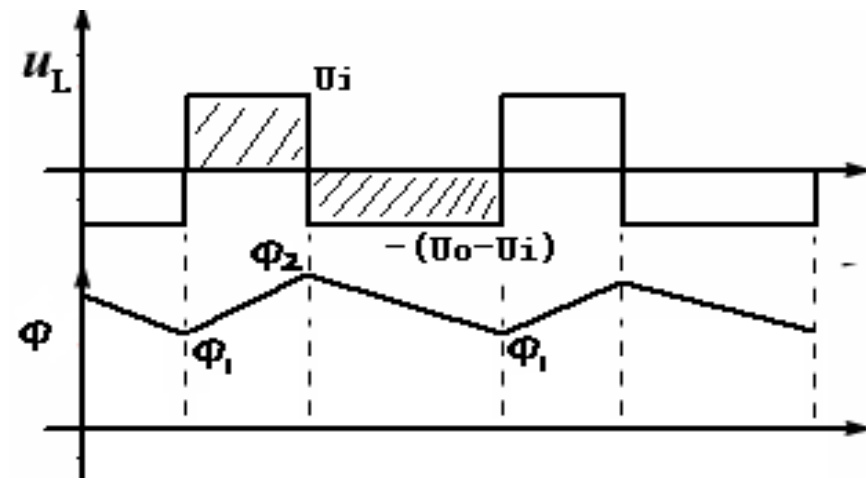
- ⊕ 电感外加电压 u_L 为正时，磁通增加
- ⊕ 电感外加电压 u_L 为负时，磁通减小
- ⊕ 在单个开关周期，磁通变化量为零（磁通平衡）



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

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

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



- 当Q导通时，正电压作用，增磁：

$$\int_0^{T_{\text{ON}}} u_L dt = U_i DT$$

- 当Q截止时，负电压作用，去磁：

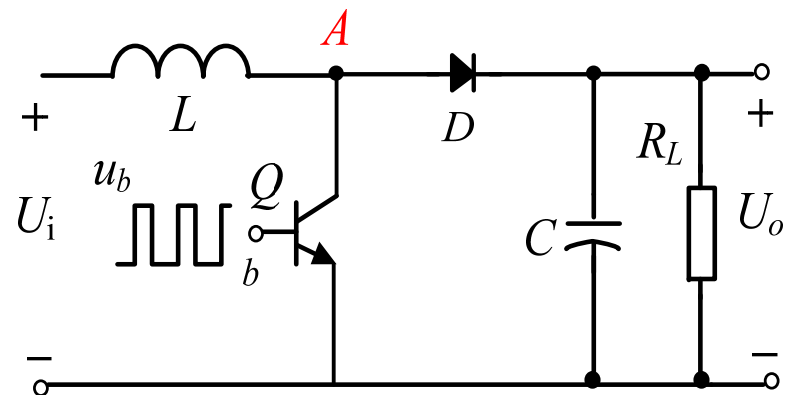
$$\int_{T_{\text{ON}}}^T u_L dt = (U_i - U_o)(1-D)T$$

- 因为：

$$\int_0^{T_{\text{ON}}} u_L dt + \int_{T_{\text{ON}}}^T u_L dt = 0$$

- 所以：

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

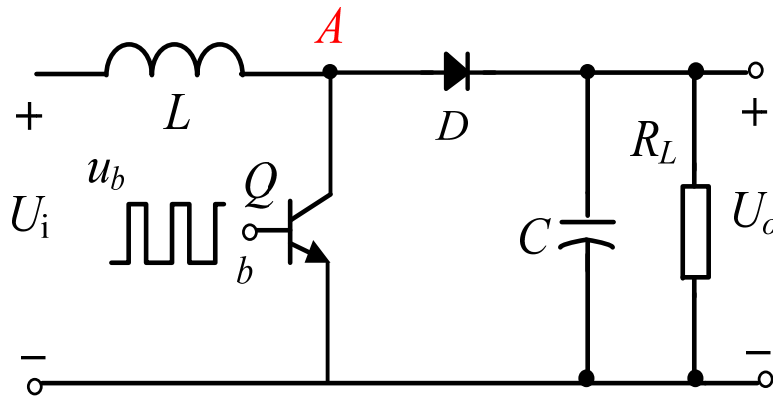


3.2.2 Boost变换器

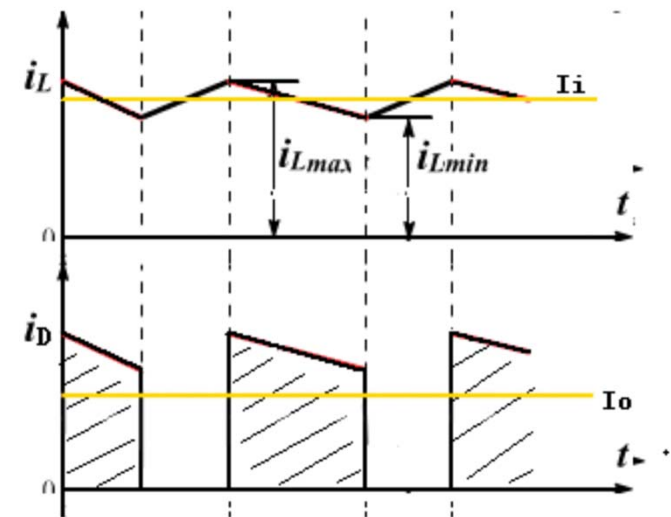
- 输入电流与电感电流的关系
- 输出电流与二极管电流关系
- 输出、输入平均电流关系

$$I_i = \frac{1}{2} (i_{Lmax} + i_{Lmin})$$

$$I_o = \frac{1}{2} (i_{Lmax} + i_{Lmin}) (1-D) T / T = I_i (1-D)$$



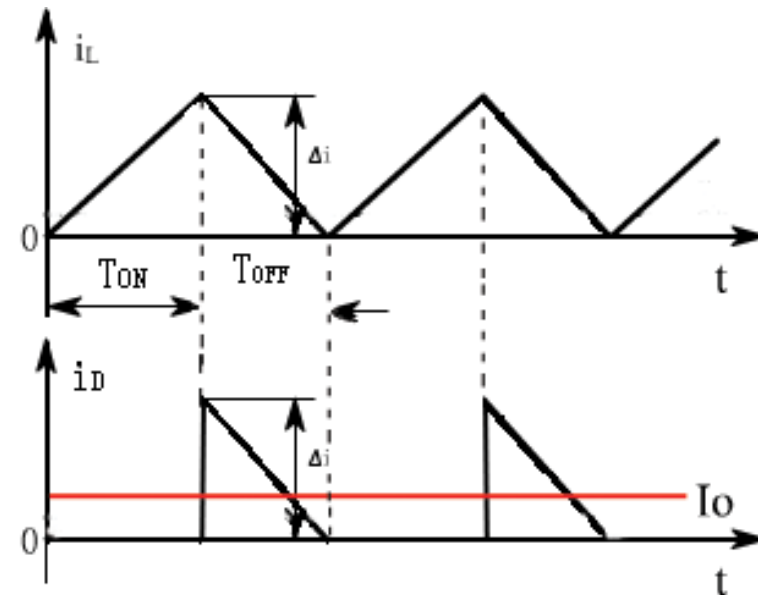
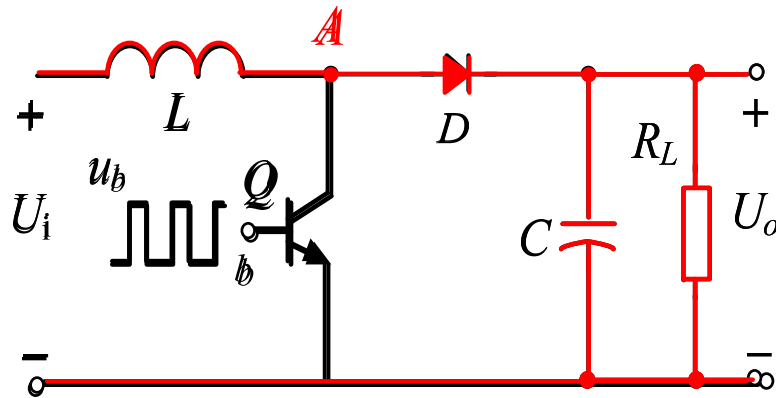
输出电流平均值和
二极管电流平均值
相等?



- 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} ?



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

● 临界连续工作条件

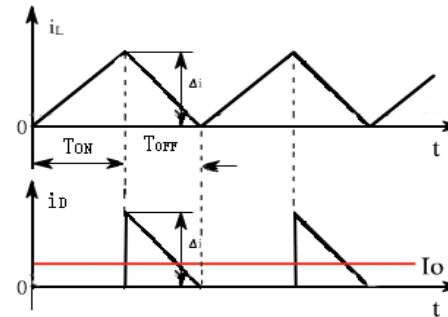
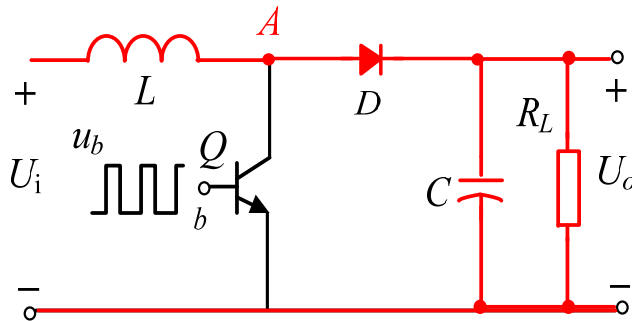
✦ 在稳态时, $\Delta i = i_{L\text{max}} - i_{L\text{min}}$, 由前式可得

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

✦ 代入

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

和BUCK型变换器相比, 是否相同?



- 当 $D=0.5$ 时，有最大临界连续负载电流

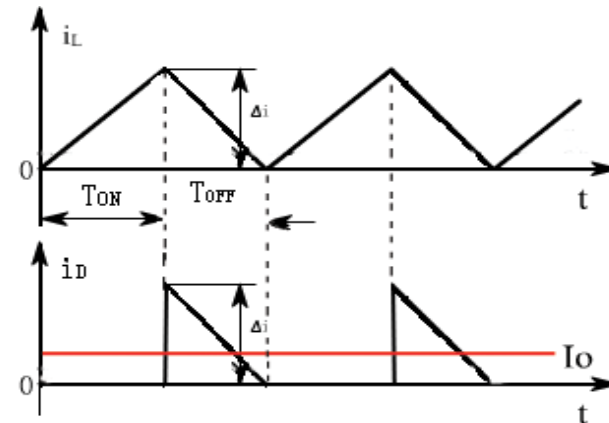
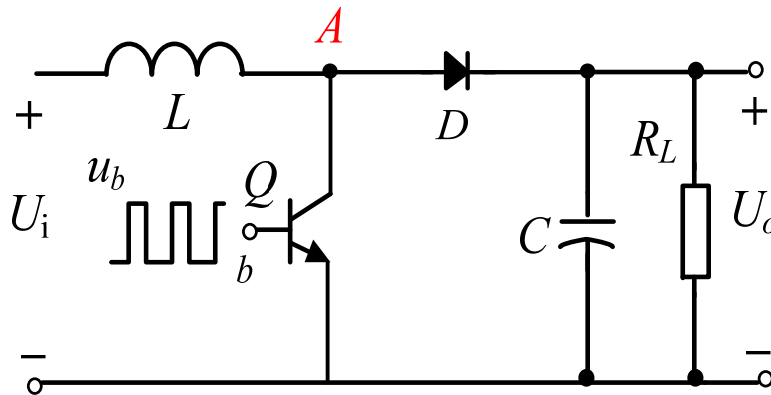
$$I_{G\max} = \frac{U_i T}{8L}$$

与BUCK型变换器相同

- 代入，进而得

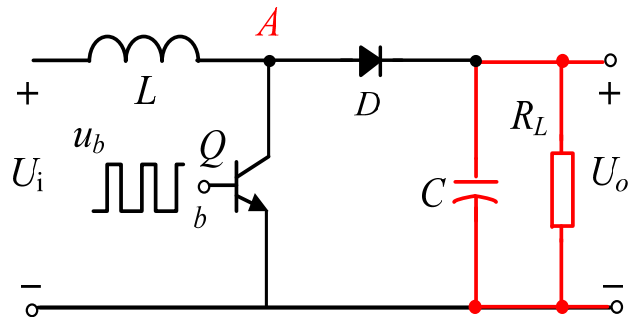
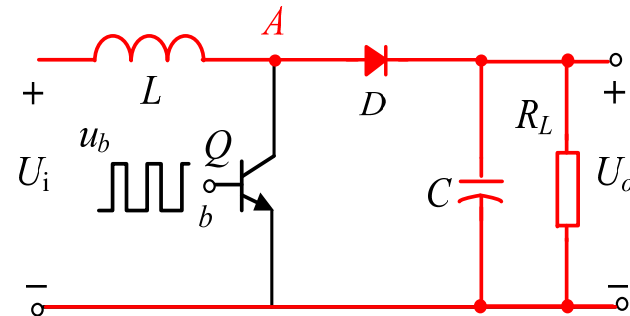
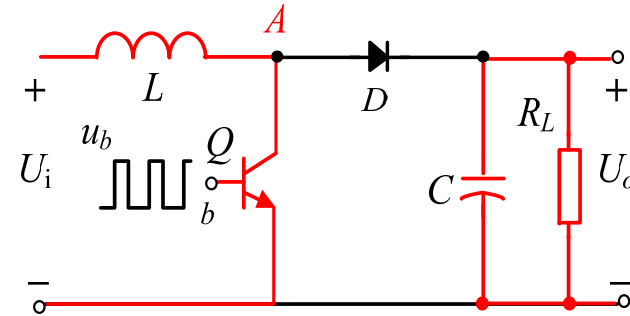
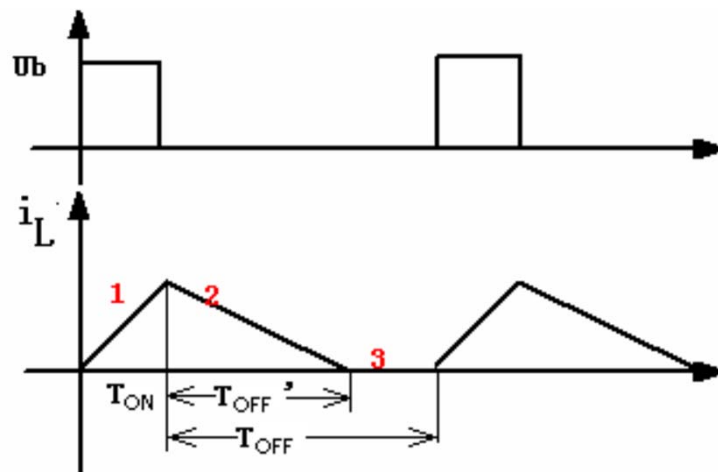
$$I_{G\max} = 4I_{G\max} D(1-D)$$

同样是和BUCK型变换器相同



电感电流断续工作方式

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



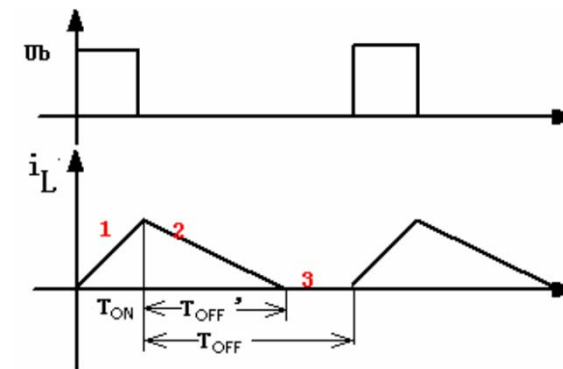
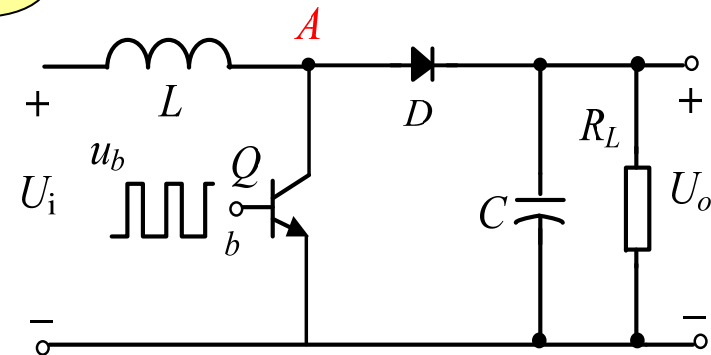
- ◆ 当电感电流断续时，用类似Buck变换器的分析方法可得

$$\begin{cases} U_i = L \frac{\Delta i_{\text{ON}}}{T_{\text{ON}}} \\ U_i - U_o = L \frac{\Delta i_{\text{OFF}}}{T'_{\text{OFF}}} \end{cases}$$

两式相除

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

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



- Q导通时
- 开关周期磁通变化量关系

$$\int_0^{T_{\text{ON}}} u_L dt = U_i DT$$

- Q截止电感电流下降到零之前

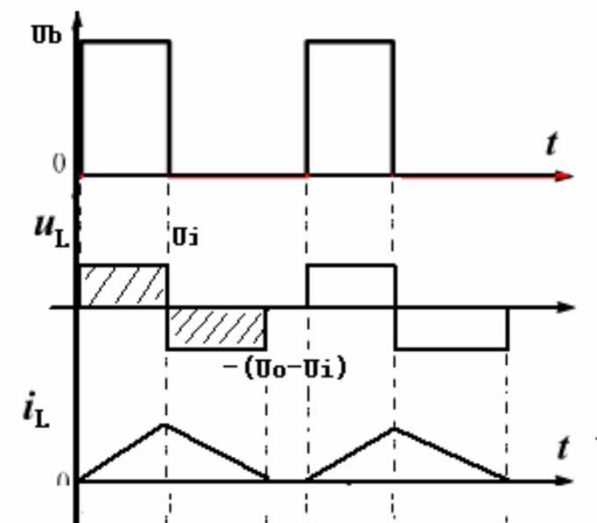
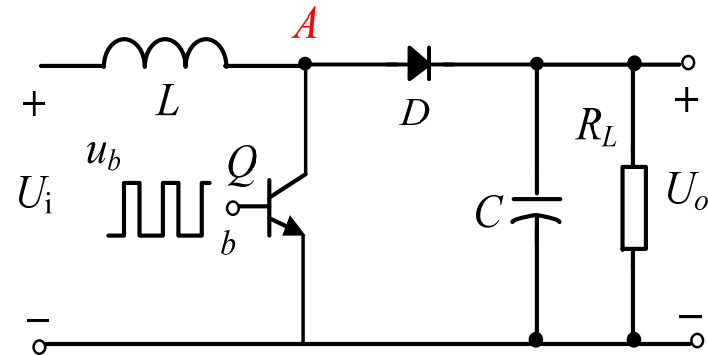
$$\int_{T_{\text{ON}}}^{T_{\text{ON}}+T'_{\text{OFF}}} u_L dt = (U_i - U_o)T'_{\text{OFF}}$$

- 因为

$$\int_0^{T_{\text{ON}}} u_L dt + \int_{T_{\text{ON}}}^{T_{\text{ON}}+T'_{\text{OFF}}} u_L dt = 0$$

- 所以

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



根据断续时的输出电流 $I_o = \frac{1}{2T} \Delta i_L \cdot T'_{OFF}$

代入

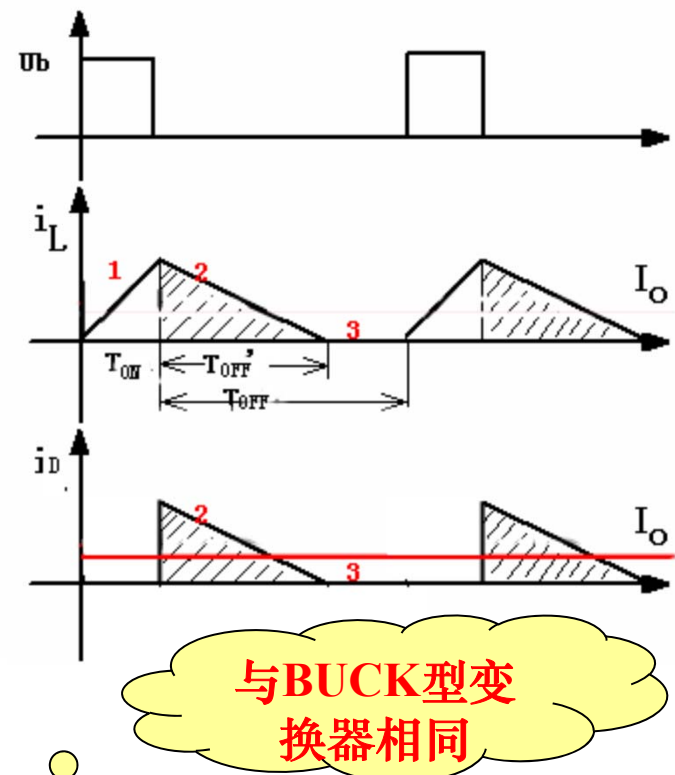
$$I_o = \frac{1}{2T} \cdot \left(\frac{U_i \cdot T_{ON}}{L} \right) \cdot \left(\frac{U_i T_{ON}}{U_o - U_i} \right)$$

$$= 4I_{Gmax} D^2 \cdot \frac{U_i}{U_o - U_i}$$

经过整理，得到输出/输入电压比值

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

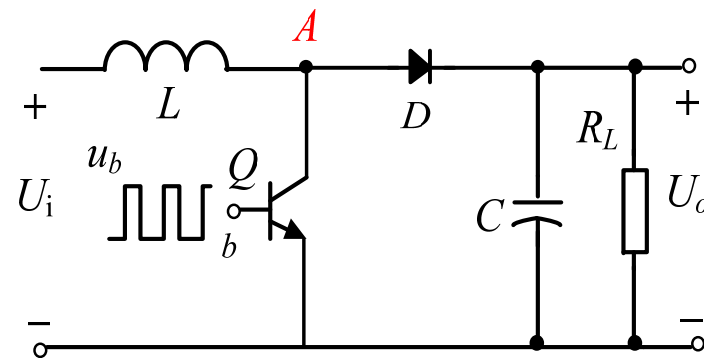
可以看出：输出电压不仅和占空比相关，还受负载电流影响



断续条件下输出电压

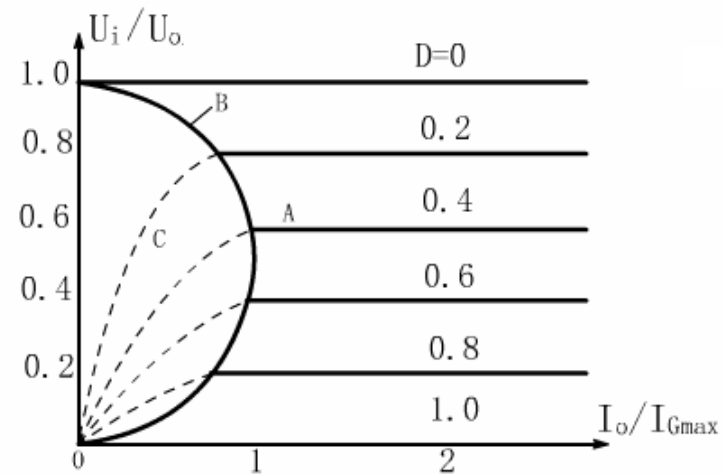
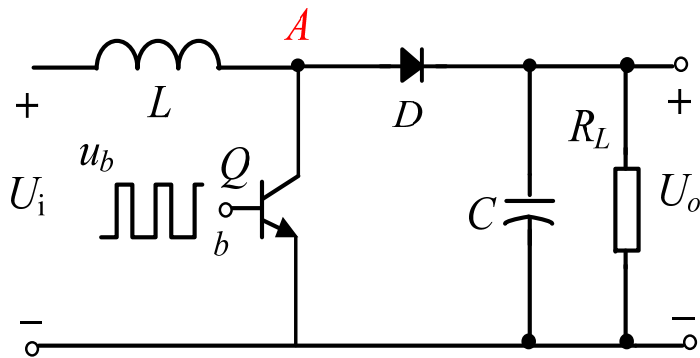
- 输出电压不仅和占空比有关还受负载电流影响
- I_o 相同条件下， D 越大， U_i/U_o 越小（物理意义？）
- D 相同条件下，负载电流越大， U_i/U_o 越大（物理意义？）

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



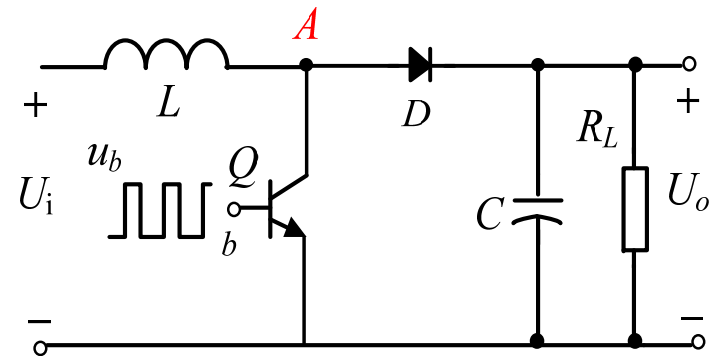
升压式变换器标么输出特性

- ✦ 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



✦ 开关管电流

$$I_{QP} = I_{imax} + \frac{\Delta i}{2} \quad \frac{\Delta i}{2} = I_{Gmax}$$



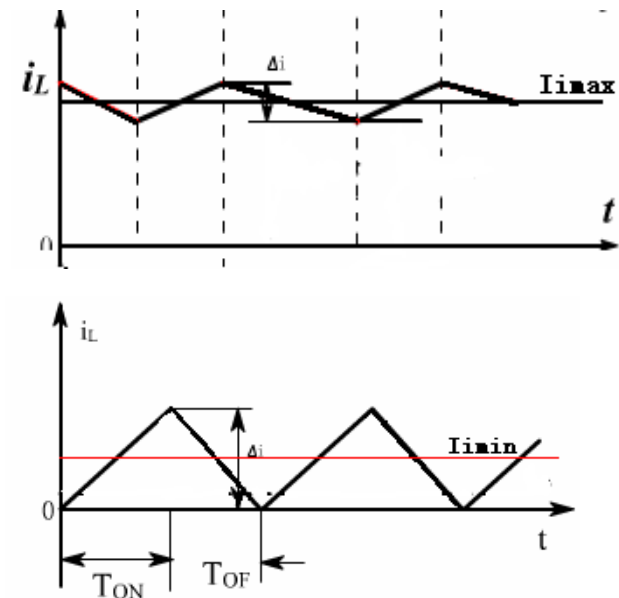
✦ 式中 I_{imax} 和 I_{Gmax} 为最大输入电流与最大临界电流

✦ 一般取功率晶体管的最大电流 I_{CM}

$$I_{CM} > I_{QP}$$

✦ 功率管的电压满足

$$U_{(BR)CEO} \geq 1.5U_{imax}$$



● 二极管选型

- ✦ 在低压场合优先选肖特基二极管；电压较高(>250V)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

$$I_D = I_i(1-D) \qquad I_{\text{Drms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_{\text{OF}}} I_i^2 dt} = I_i \sqrt{(1-D)}$$

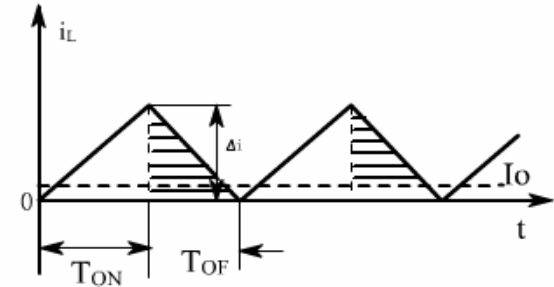
- 二极管的电压满足（2倍裕量）： $U_{\text{BR}} \geq 2U_o$

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 $I_{o\min}=I_G$
- ✦ 将 $I_{o\min}$ 代入 I_G 表达式，即得到电感 L ：

$$L = \frac{U_o D(1-D)^2}{2fI_{o\min}} \quad L = \frac{U_i TD(1-D)}{2I_{o\min}}$$

- ✦ 在 $D=0\sim 1/3$ 范围内， D 增加， L 增加
- ✦ 在 $D=1/3\sim 1$ 范围内， D 增加， L 减小
- ✦ 在已知的 D 范围内，应设计最大的电感量
- ✦ 经验取值： $I_G=(1/5\sim 1/3)I_{o\max}$
- ✦ L 也可以按照 Δi_L 的表达式计算 $\Delta i_L = 10\% \sim 15\% I_{i\max}$



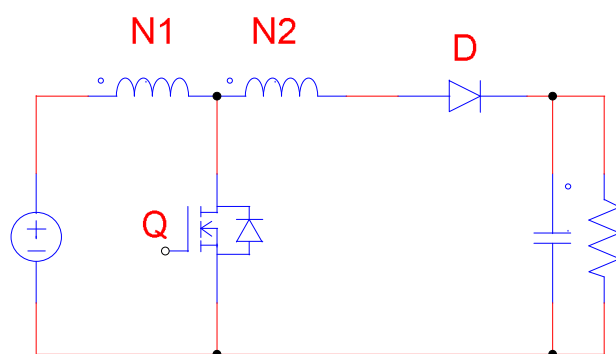
● Boost斩波电路小结

- ✦ 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 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;
- ✦ 输入电流纹波小二输出电流纹波大;

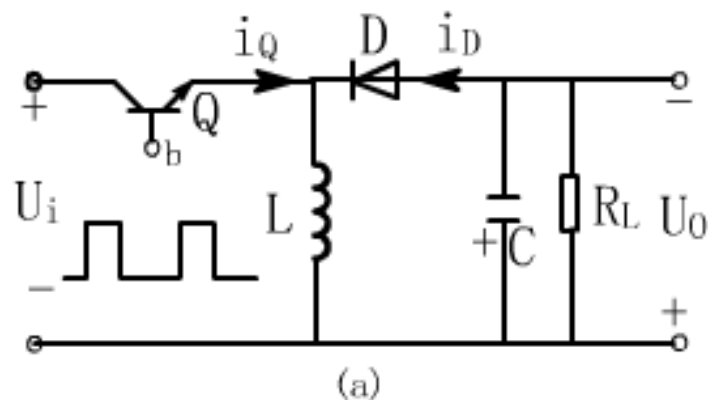
1、升压式变换器的另一种接法如下图，晶体管工作在开关状态，电感电流连续，占空比为 D ，求 U_o/U_i



提示：N1绕组伏秒平衡，N1和N2是耦合电感

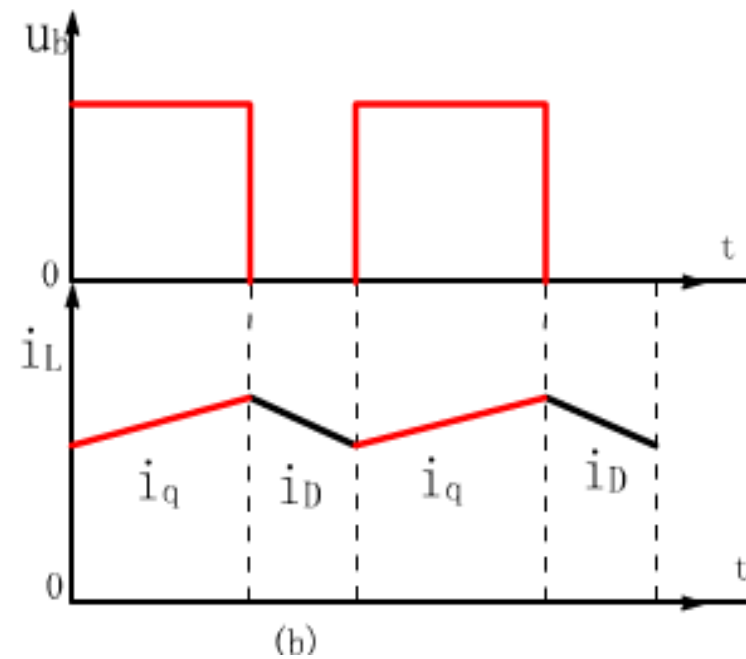
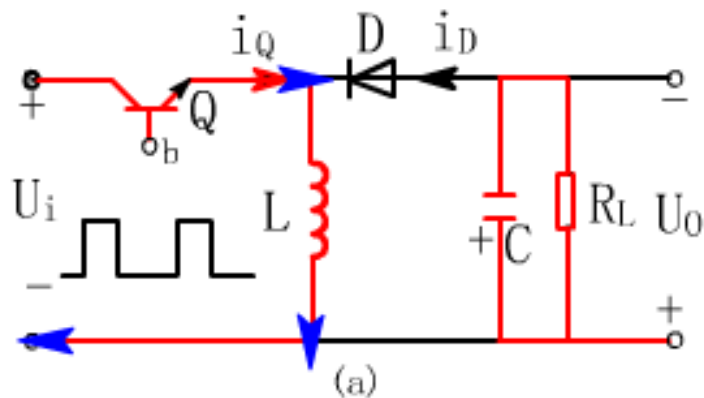
Boost-Buck升降压变换

- ✦ 电路构成，注意副边电压为负值
- ✦ 当Q导通时，电能给电感储能，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。



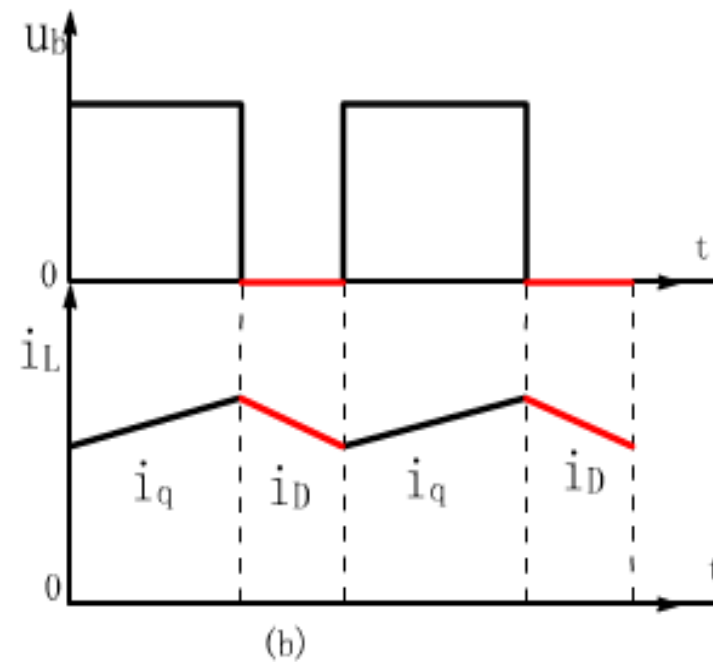
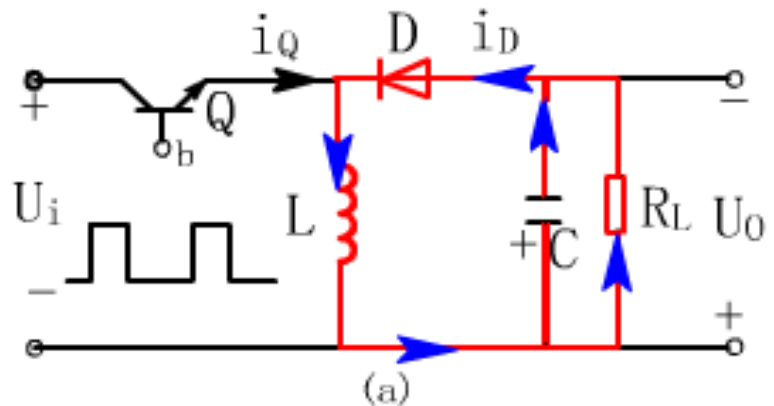
● Q ON, 电感电流线性上升

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



● Q off, 电感电流线性下降

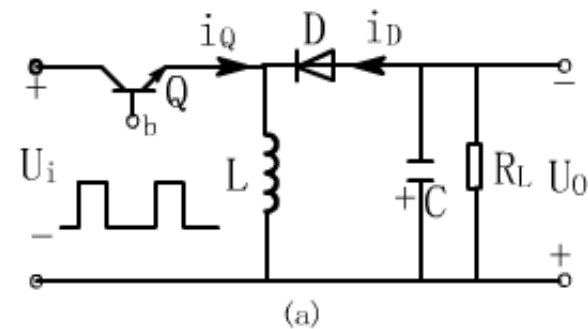
$$L \frac{i_{L\min} - i_{L\max}}{(1-D)T} = U_o$$



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



3.2.4 6种基本拓扑的比较

变换器拓扑	输出-输入电压 变换比 U_o/U_i	输入电流 纹波	输出电流 纹波
Buck	D	大	小
Boost	$1/(1-D)$	小	大
Buck-Boost	$D/(1-D)$	大	大
Cuk	$D/(1-D)$	小	小
SEPIC	$D/(1-D)$	小	大
Zeta	$D/(1-D)$	大	小