



★ 4.1 Buck变换器

★ 4.2 Boost变换器

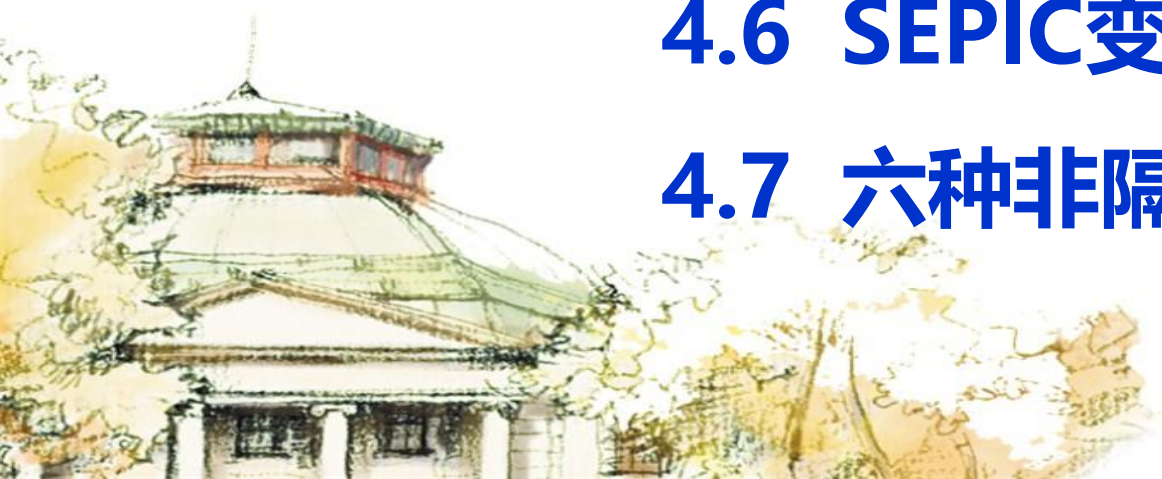
★ 4.3 Buck-Boost变换器

4.4 Cuk变换器

4.5 Zeta变换器

4.6 SEPIC变换器

4.7 六种非隔离直流变换器的比较





★ 4.1 Buck变换器

4.1.1 Buck变换器电路拓扑的推演

4.1.2 电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.3 电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.4 Buck变换器的外特性与调节特性

4.1.5 Buck变换器的参数设计



Buck变换器电路拓扑的推演



思考

■ 假设需要设计一个直流变换器，
如图4.1所示。参数如下：

- 输入电压 $U_{in} = 100V$
- 输出电压 $U_o = 40V$
- 输出电流 $I_o = 10A$
- 负载电阻 $R_{Ld} = 4\Omega$



直流变换器框图

你能想到那些方法



Buck变换器电路拓扑的推演



思考

■ 假设需要设计一个直流变换器，如图4.1所示。参数如下：

- 输入电压 $U_{in} = 100V$
- 输出电压 $U_o = 40V$
- 输出电流 $I_o = 10A$
- 负载电阻 $R_{Ld} = 4\Omega$



直流变换器框图

- 方法一：电阻分压法
- 方法二：线性调节器
- 方法三：开关变换器



■ 电阻分压法

- 效率 $\eta = U_o / U_{in}$
输出电压不变时，输入电压越高，
该电路的效率越低。
- 需要及时调整分压电阻 R_{div} 的大小才能
保证输出电压不变，而这在实际
应用中不太方便实现。

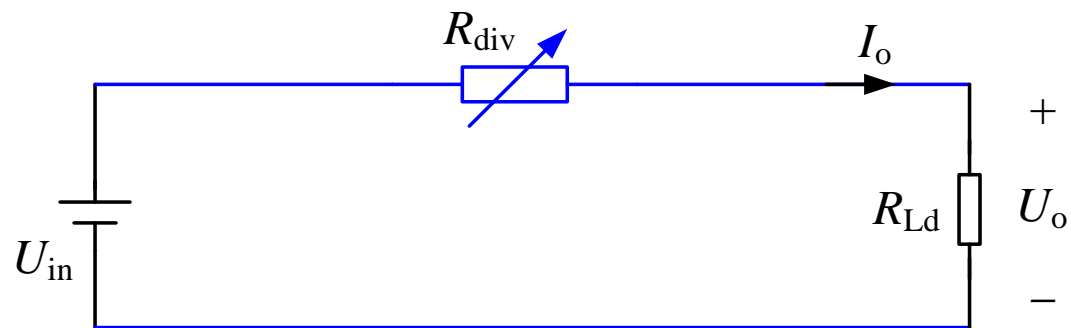


图4.2 电阻分压电路

- 缺点1：效率低
- 缺点2：无法自动调压

■ 线性调节器

- Q 工作在线性放大状态，称为调整管。起到分压作用，存在较大损耗，效率也较低。
- 实现了输出电压的闭环调节

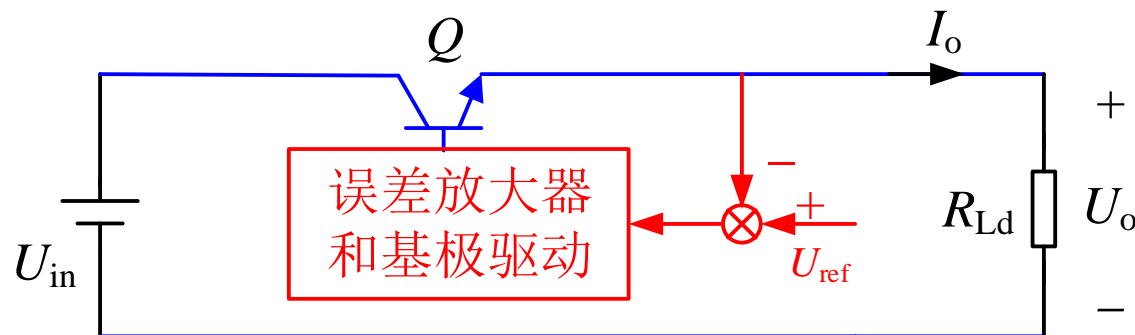


图4.3 线性调节器

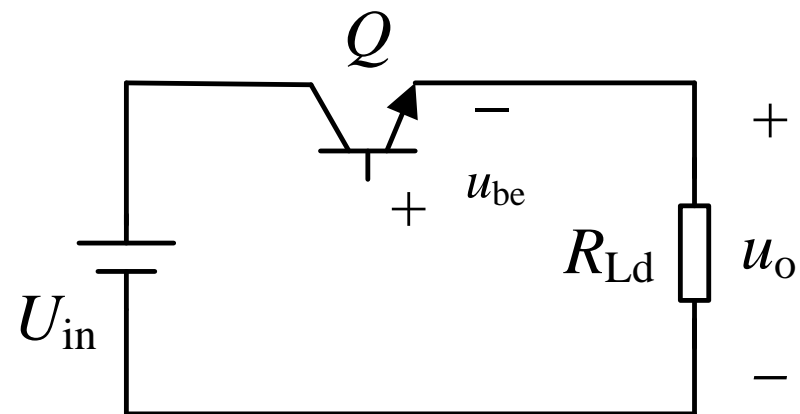
- 缺点：效率低
- 优点：可自动调压

Buck变换器电路拓扑的推演

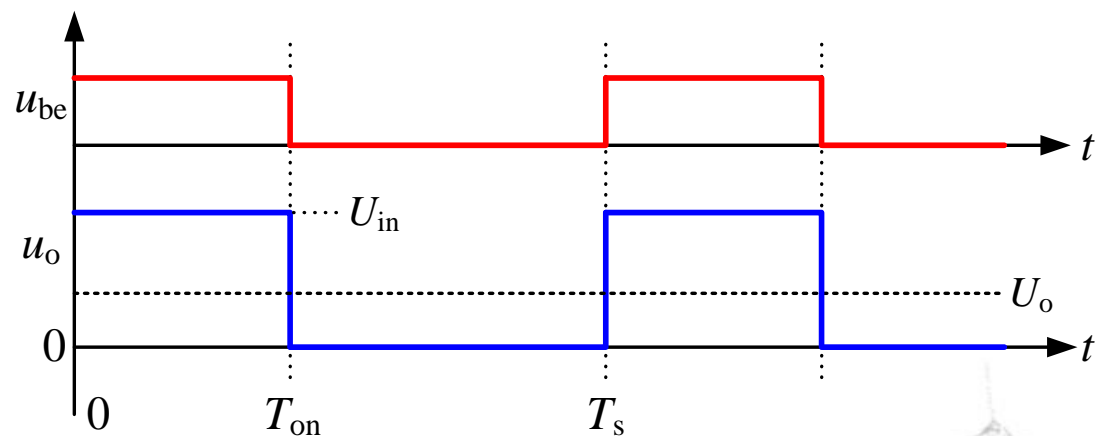
高效率的开关变换器

■ 基本工作原理

Q 工作在开关状态，称为功率开关管。该电路称为开关变换器，输出电压 u_o 为直流脉冲形式。



(a) Q 工作在开关状态



(b) 主要波形

图4.4 开关变换器



Buck变换器电路拓扑的推演

高效率的开关变换器

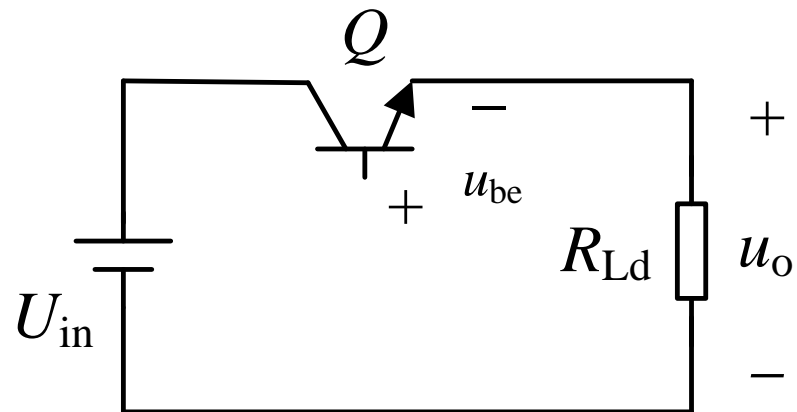
■ 基本工作原理

参考图4.4(b)，定义 T_{on} 为导通时间， T_s 为开关周期，对应的开关频率 $f_s = 1/T_s$ ，那么输出电压 u_o 的平均值为：

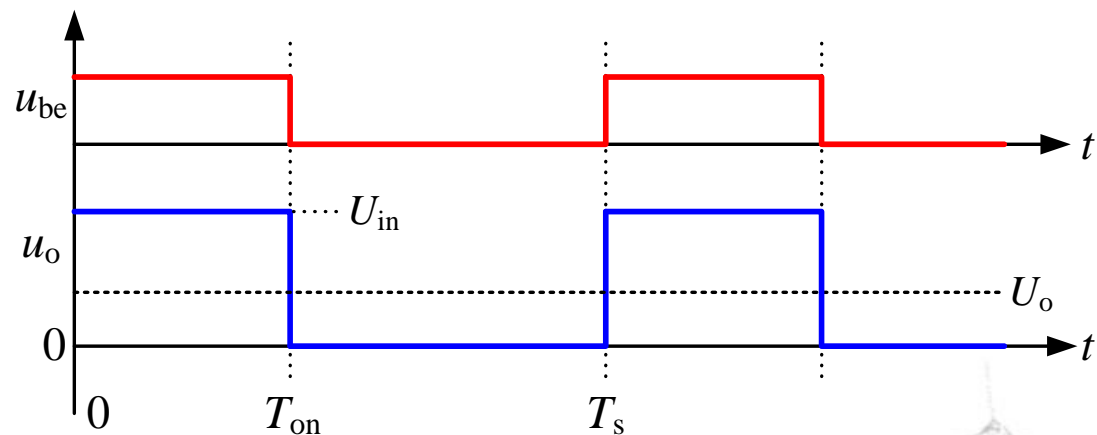
$$U_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_o dt = \frac{1}{T_s} U_{\text{in}} T_{\text{on}} = D_y U_{\text{in}}$$

式中， D_y 为占空比(Duty Cycle)

$$D_y = T_{\text{on}} / T_s$$



(a) Q工作在开关状态



(b) 主要波形

图4.4 开关变换器



Buck变换器电路拓扑的推演

高效率的开关变换器

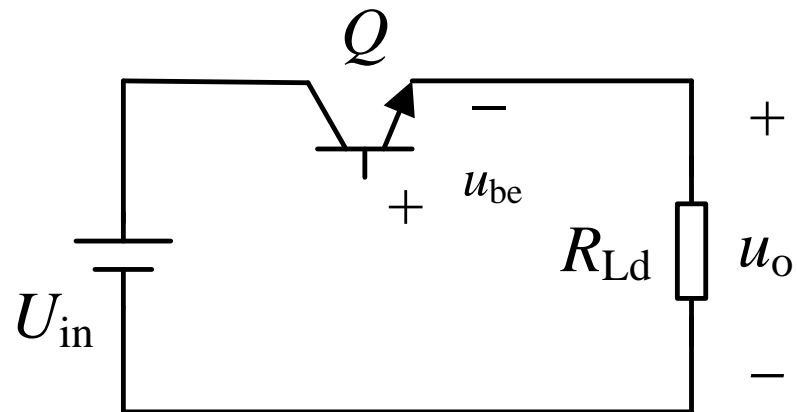


思考

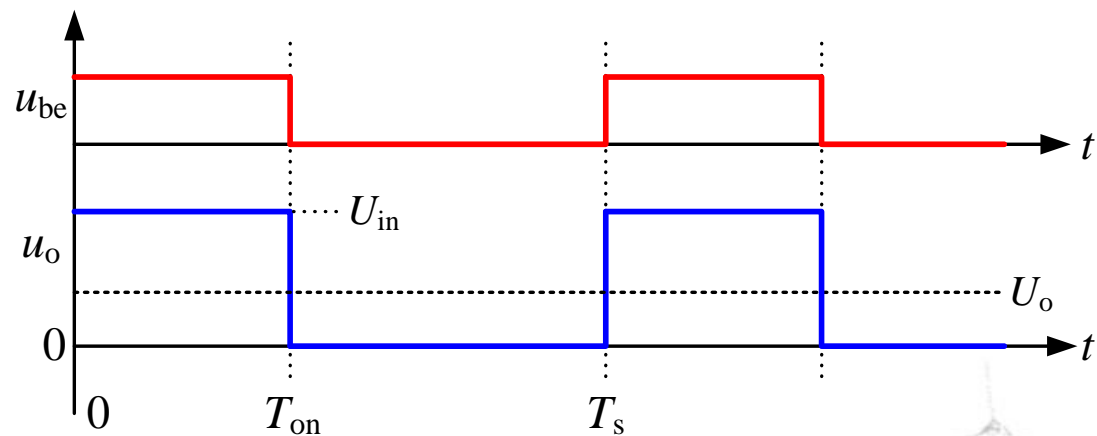
■ 开关变换器的输出供电

从图4.4(b)可以看出，输出电压 u_o 为直流脉冲形式，而绝大部分负载均需要平直的直流电压为其供电。

如何得到平直的输出直流电压？



(a) Q工作在开关状态



(b) 主要波形

图4.4 开关变换器



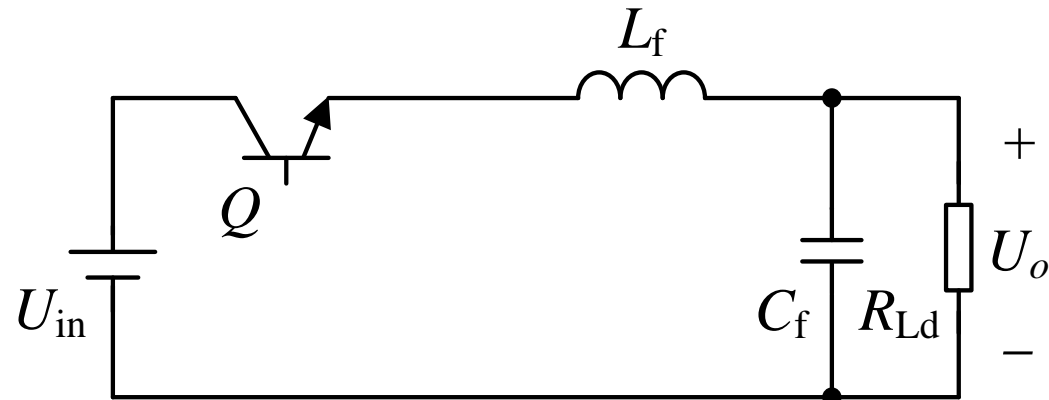
Buck变换器电路拓扑的推演

BUCK变换器

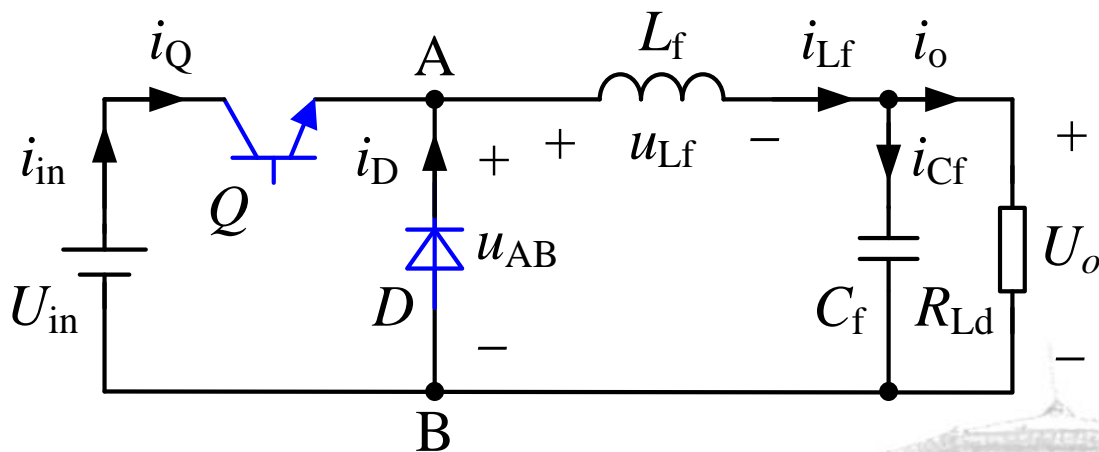
■ 推演过程

1. 引入由电感 L_f 和电容 C_f 组成的低通滤波器。滤除开关频率交流分量，仅保留其直流分量，从而得到平直的输出电压 U_o 。
2. 引入二极管 D ，为电感电流提供续流回路。

图4.5(b)所示的电路就是Buck变换器，又称为降压变换器。



(a) 引入电感 L_f 和电容 C_f



(b) 引入续流二极管 D

图4.5 Buck变换器的推演





★ 4.1 Buck变换器

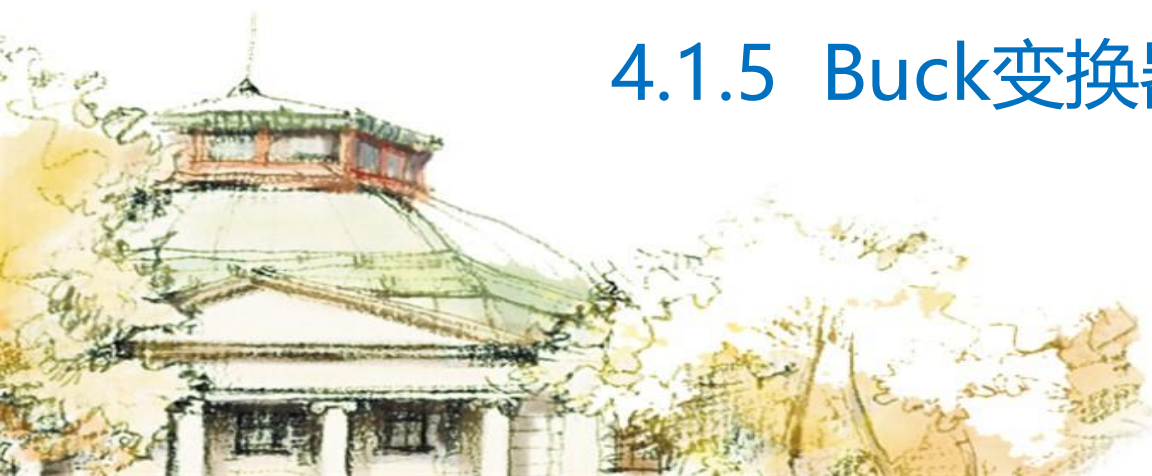
4.1.1 Buck变换器电路拓扑的推演

4.1.2 电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.3 电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.4 Buck变换器的外特性与调节特性

4.1.5 Buck变换器的参数设计



电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

滤波电感电流是否连续

电流连续模式(Continuous Current Mode, CCM)

是指滤波电感电流总是大于零。

电流临界连续模式(Critical Current Mode, CRM)

CCM与CRM两种工作模式之间的边界。

电流断续模式(Discontinuous Current Mode, DCM)

开关管关断后滤波电感电流会下降到零。



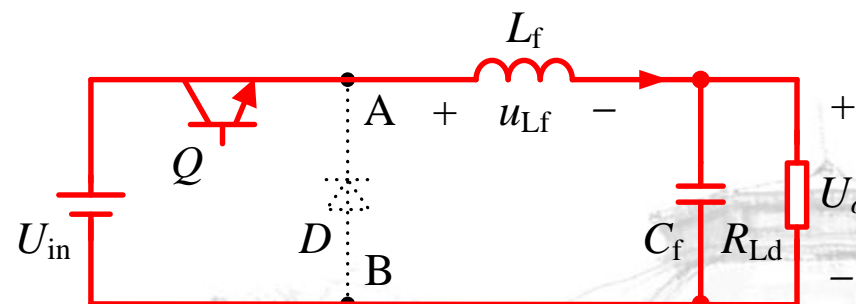
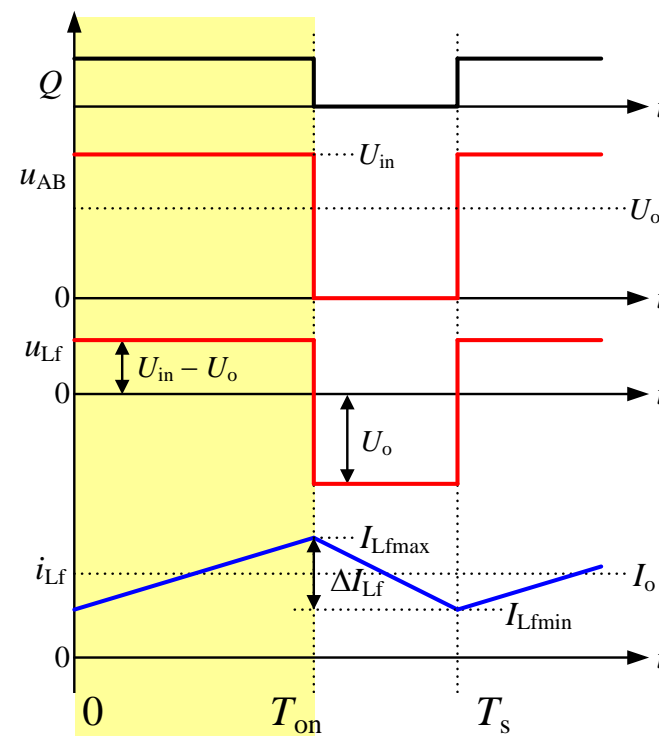
电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

1. 工作原理——模态 I

$t=0$ 时, 开关管 Q 开通, 输入电压 U_{in} 加到二极管 D 上, 则 D 承受反压截止。此时, $u_{AB} = U_{in}$, 加在滤波电感 L_f 上的电压为 $u_{Lf} = U_{in} - U_o$, 那么有:

$$L_f \frac{di_{Lf}}{dt} = U_{in} - U_o \quad (4.3)$$

■ 因为 U_o 低于 U_{in} , 故滤波电感电流 i_{Lf} 线性增长。



电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

1. 工作原理——模态 II

在 $t = T_{\text{on}}$ 时刻, Q 关断, 滤波电感电流 i_{L_f}

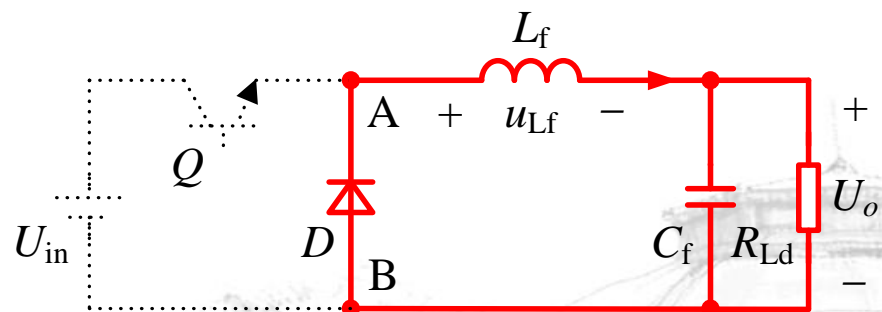
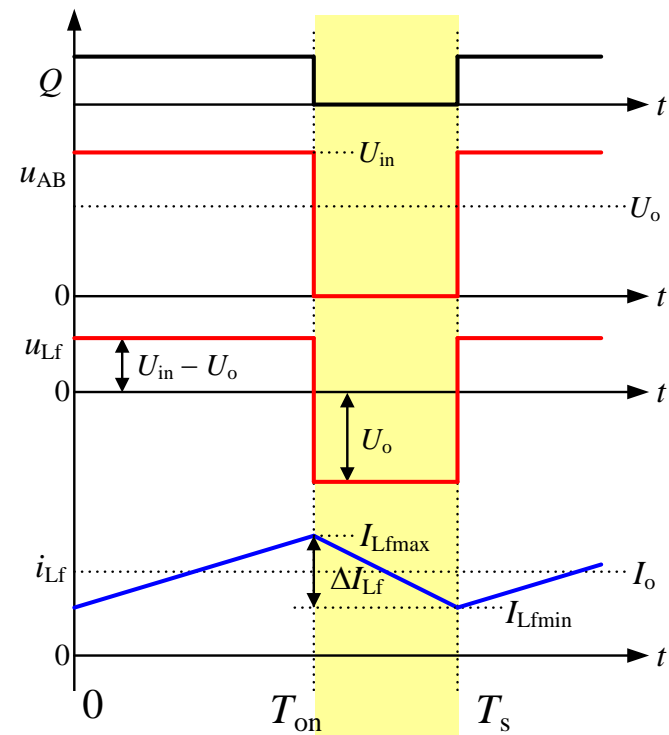
通过二极管 D 续流, 如图所示。此时,

$u_{AB} = 0$, 加在 L_f 上的电压为 $u_{L_f} = -U_o$,

那么有:

$$L_f \frac{di_{L_f}}{dt} = -U_o \quad (4.4)$$

- 在此开关模态中, i_{L_f} 线性减小。
- 在 $t = T_s$ 时, Q 再次开通, 进入下一个开关周期。



2. 基本关系

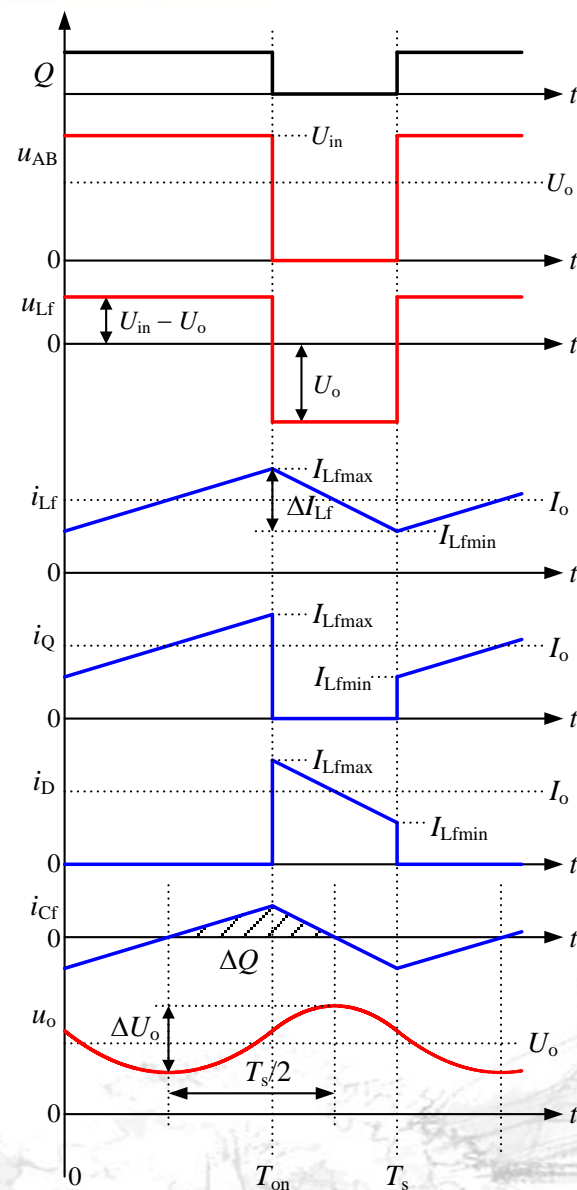
一个开关周期内， i_{L_f} 在 Q 导通期间的增长量等于 Q 截止期间的减小量 $I_{L_f}(T_s) = I_{L_f}(0)$ 。

有：

$$I_{L_f}(T_s) - I_{L_f}(0) = \frac{1}{L_f} \int_0^{T_s} u_{L_f} dt = 0$$

上式可简化为：

$$\int_0^{T_s} u_{L_f} dt = 0$$



电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

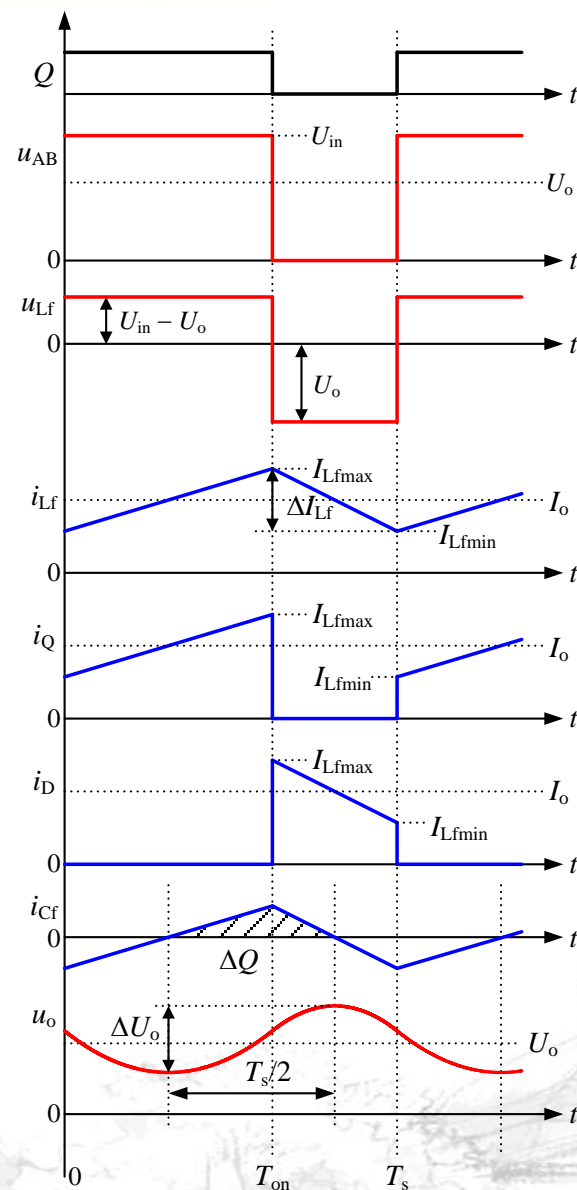
2. 基本关系

根据伏秒积平衡有：

$$\underbrace{(U_{in} - U_o) D T_s}_{\text{正伏秒面积}} = \underbrace{U_o (1 - D) T_s}_{\text{负伏秒面积}}$$

由上式可得：

$$\frac{U_o}{U_{in}} = D \quad (4.8)$$



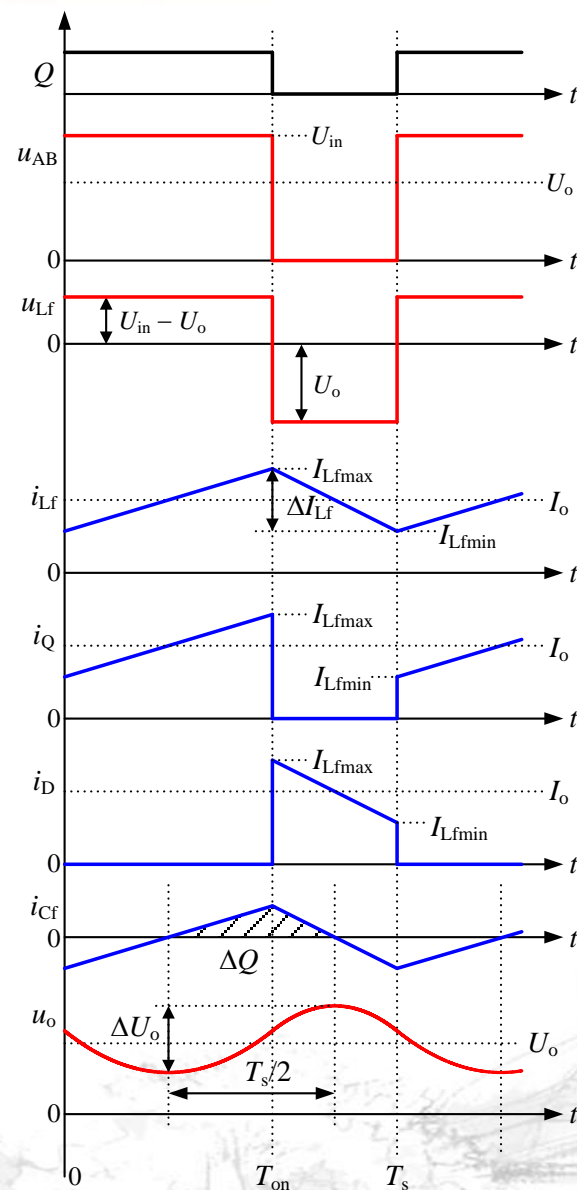
2. 基本关系

一个开关周期内滤波电容 C_f 的电压变化量也应该为零，那么有：

$$u_{Cf}(T_s) - U_{Cf}(0) = \frac{1}{C_f} \int_0^{T_s} i_{Cf} dt = 0$$

上式可简化为：

$$\int_0^{T_s} i_{Cf} dt = 0$$



电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

2. 基本关系

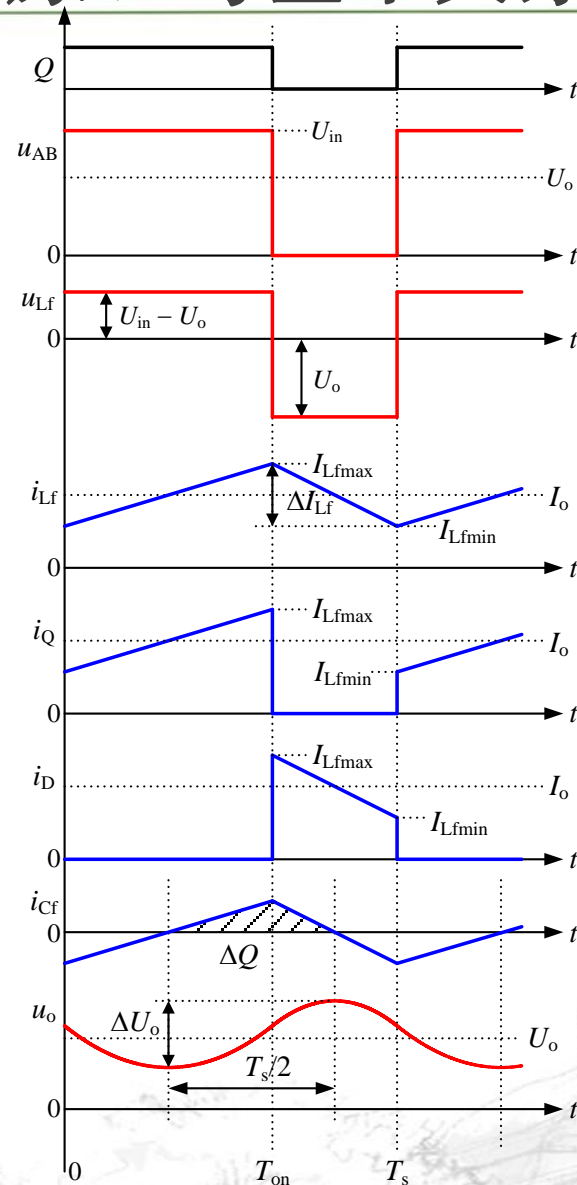
根据安秒积平衡，稳态时滤波电容平均电流为零，故Buck变换器的输出电流 I_o 等于 i_{L_f} 的平均值，即：

$$I_o = (I_{L_{fmin}} + I_{L_{fmax}}) / 2$$

滤波电感电流的最大值 $I_{L_{fmax}}$ 和最小值 $I_{L_{fmin}}$ 分别为：

$$I_{L_{fmax}} = I_o + \frac{\Delta I_{L_f}}{2} = I_o + \frac{U_o}{2L_f} \cdot (1 - D_y) T_s$$
$$I_{L_{fmin}} = I_o - \frac{\Delta I_{L_f}}{2} = I_o - \frac{U_o}{2L_f} \cdot (1 - D_y) T_s$$

式中， ΔI_{L_f} 为滤波电感电流脉动量。





★ 4.1 Buck变换器

4.1.1 Buck变换器电路拓扑的推演

4.1.2 电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.3 电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

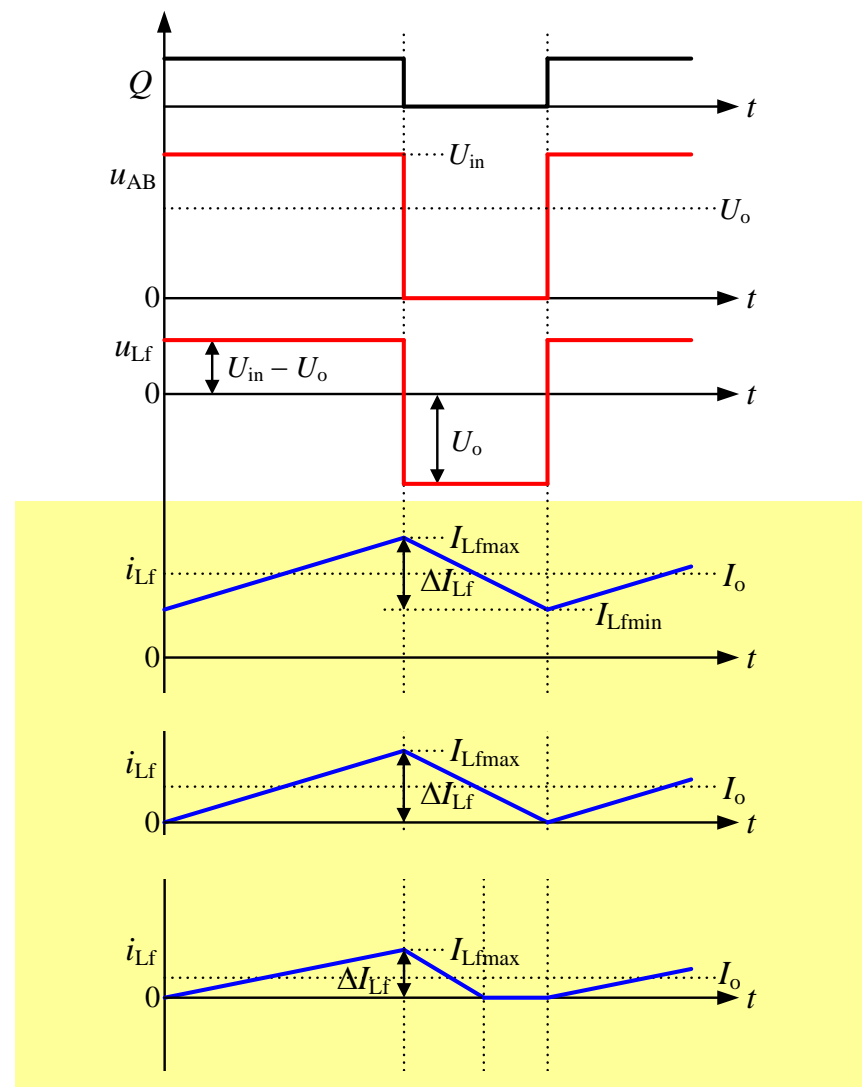
4.1.4 Buck变换器的外特性与调节特性

4.1.5 Buck变换器的参数设计



电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

- 稳态工作时滤波电感电流 i_{L_f} 的平均值等于输出电流 I_o 。
- I_o 减小时， i_{L_f} 的波形将向下移动。当 I_o 减小到某一个值时， i_{L_f} 的最小值 $I_{L_{fmin}}$ 将等于零
- 进一步减小 I_o ， i_{L_f} 将在 $t = T_s$ 之前下降到零，并保持为零，而二极管 D 也截止。此时，Buck变换器工作在**电流断续模式**



电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

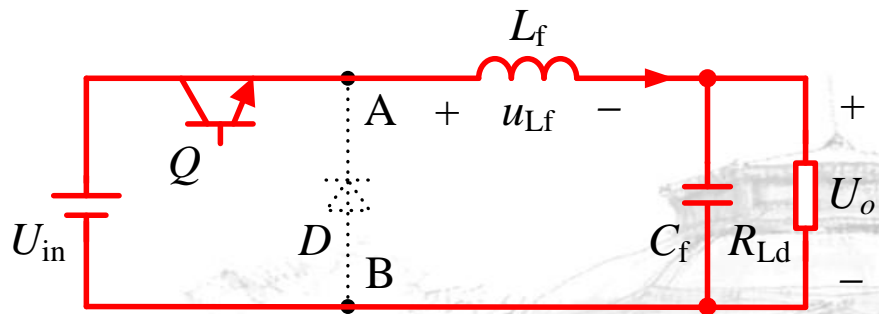
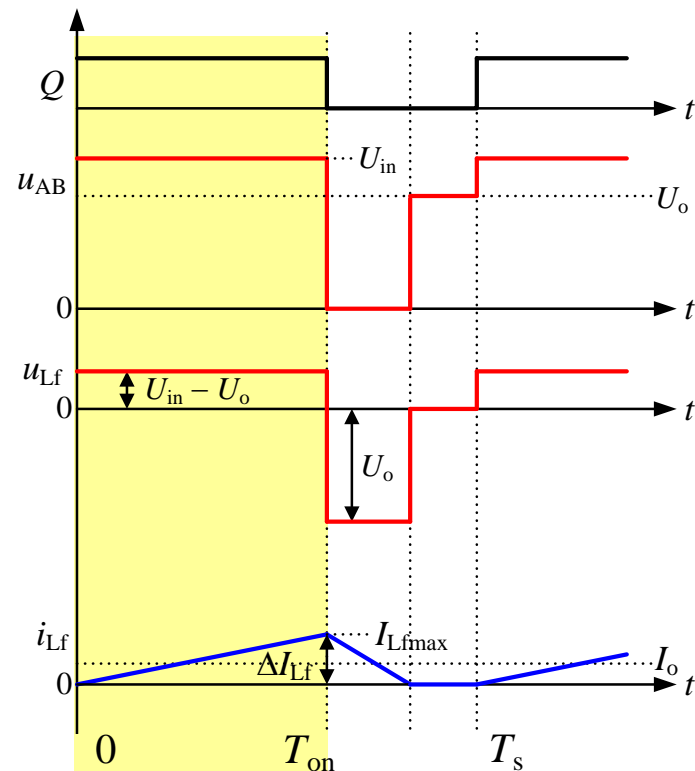
1. 工作原理——模态 I

Q 导通，二极管 D 截止，滤波电感电流

i_{L_f} 自零增长到 $I_{L_f \max}$ 。

则有：

$$I_{L_f \max} = \frac{U_{in} - U_o}{L_f} D_y T_s \quad (4.14)$$



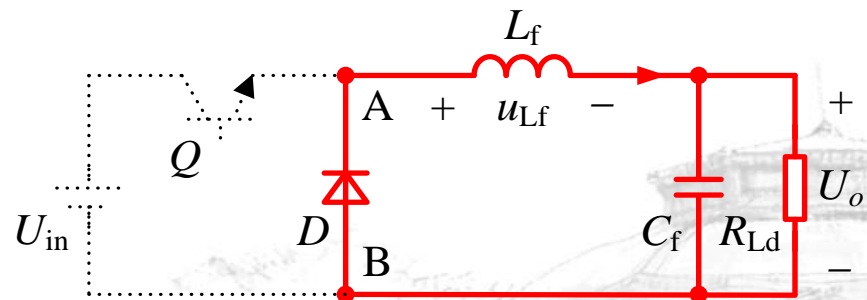
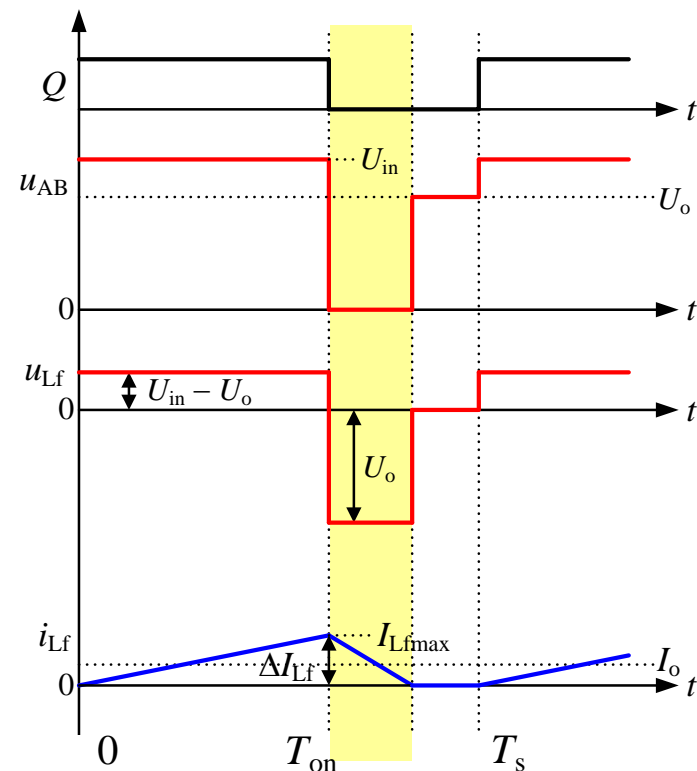
电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

1. 工作原理——模态II

Q 截止, D 续流, i_{L_f} 自 $I_{L_{fmax}}$ 下降, 在 $t = T_{on} + T'_{off}$ 时刻下降到零, 那么有:

$$I_{L_{fmax}} = \frac{U_o}{L_f} \cdot T'_{off} = \frac{U_o}{L_f} \cdot D_r \cdot T_s \quad (4.15)$$

T'_{off} 为滤波电感电流从 $I_{L_{fmax}}$ 下降到零的时间, $D_r = T'_{off}/T_s$ 。显然, $D_r < 1 - D_y$



电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

由式(4.14)和式(4.15)可得:

$$\left. \begin{aligned} I_{L\text{fmax}} &= \frac{U_{\text{in}} - U_{\text{o}}}{L_{\text{f}}} D_{\text{y}} T_{\text{s}} \\ I_{L\text{fmax}} &= \frac{U_{\text{o}}}{L_{\text{f}}} \cdot T'_{\text{off}} = \frac{U_{\text{o}}}{L_{\text{f}}} \cdot D_{\text{r}} \cdot T_{\text{s}} \end{aligned} \right\} D_{\text{r}} = \frac{U_{\text{in}} - U_{\text{o}}}{U_{\text{o}}} D_{\text{y}} \quad (4.16)$$

输出电流同样等于滤波电感电流平均值:

$$I_{\text{o}} = \frac{1}{T_{\text{s}}} \cdot \frac{1}{2} I_{L\text{fmax}} (T_{\text{on}} + T'_{\text{off}}) = \frac{1}{2} I_{L\text{fmax}} (D_{\text{y}} + D_{\text{r}}) \quad (4.17)$$

将式(4.14)和式(4.16)代入式(4.17), 可得:

$$U_{\text{o}} = \frac{U_{\text{in}}^2}{\frac{2L_{\text{f}} I_{\text{o}}}{D_{\text{y}}^2 T_{\text{s}}} + U_{\text{in}}} \quad (4.18)$$

■ 式(4.18)表明, 电流断续时, 输出电压 U_{o} 不仅与占空比 D_{y} 有关, 而且与输出电流 I_{o} 有关。若 $I_{\text{o}}=0$, 则不论 D_{y} 多大, 必有 $U_{\text{o}} = U_{\text{in}}$ 。

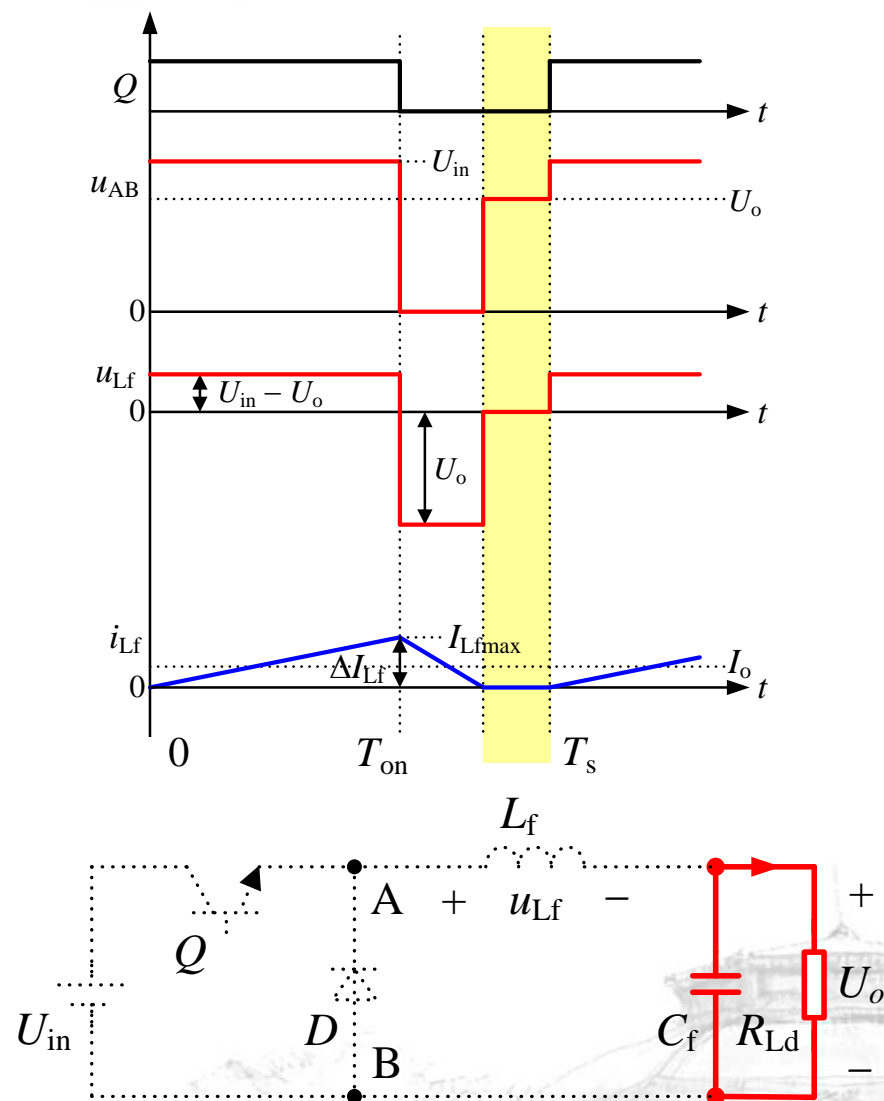


电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

1. 工作原理——模态 III

Q 和 D 均截止, I_{Lfmax} 保持为零;

负载由滤波电容 C 供电。





★ 4.1 Buck变换器

4.1.1 Buck变换器电路拓扑的推演

4.1.2 电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.3 电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.4 Buck变换器的外特性与调节特性

4.1.5 Buck变换器的参数设计

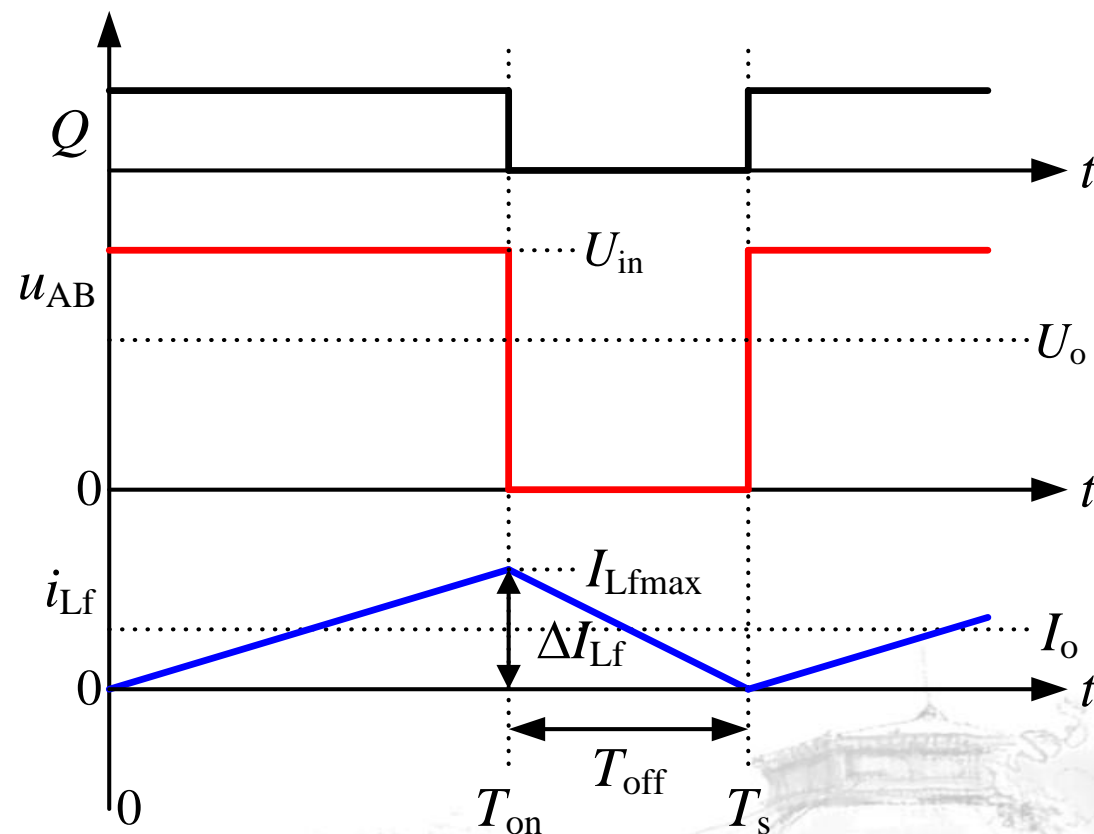


1. 电流临界连续时的输出电流

- 电流临界连续即为电流连续与断续的边界，即 $t = T_s$ 时，滤波电感电流 i_{L_f} 刚好下降到零

用 I_{oG} 表示电流临界连续时的输出电流 I_o ，那么有：

$$I_{oG} = \frac{1}{2} I_{L_{fmax}} = \frac{U_{in} - U_o}{2L_f} D_y T_s \quad (4.19)$$



2. 输入电压恒定不变时Buck变换器的外特性

Buck变换器的外特性是指当输入电压 U_{in} 恒定不变时，在某一占空比 D_y 下，输出电压 U_o 与输出电流 I_o 的关系式，

即

$$U_o = f(I_o) \Big|_{D_y}$$

电流临界连续时， $U_o = D_y U_{in}$ 的关系仍旧存在。当 U_{in} 恒定不变时，则 I_{oG} 可用 U_{in} 来表示，那么式(4.19)可改写为：

$$I_{oG} = \frac{(1 - D_y) D_y T_s}{2L_f} U_{in} \quad (4.20)$$



2. 输入电压恒定不变时Buck变换器的外特性

由上式可知, 在 $D_y = 0.5$ 时, I_{oG} 达到其最大值 I_{oGmax} , 即 $I_{oGmax} = \frac{T_s}{8L_f} U_{in}$ (4.21)

那么:

$$I_{oG} = \frac{(1 - D_y) D_y T_s}{2L_f} U_{in} \quad \frac{I_{oG}}{I_{oGmax}} = 4(1 - D_y) D_y \quad (4.22)$$

根据式(4.18)和式(4.21), 电流断续时Buck变换器的输出电压表达式可改写为:

$$U_o = \frac{U_{in}^2}{\frac{2L_f I_o}{D_y^2 T_s} + U_{in}} \quad \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{4D_y^2} \frac{I_o}{I_{oGmax}} + 1} \quad (4.23)$$



2. 输入电压恒定不变时Buck变换器的外特性

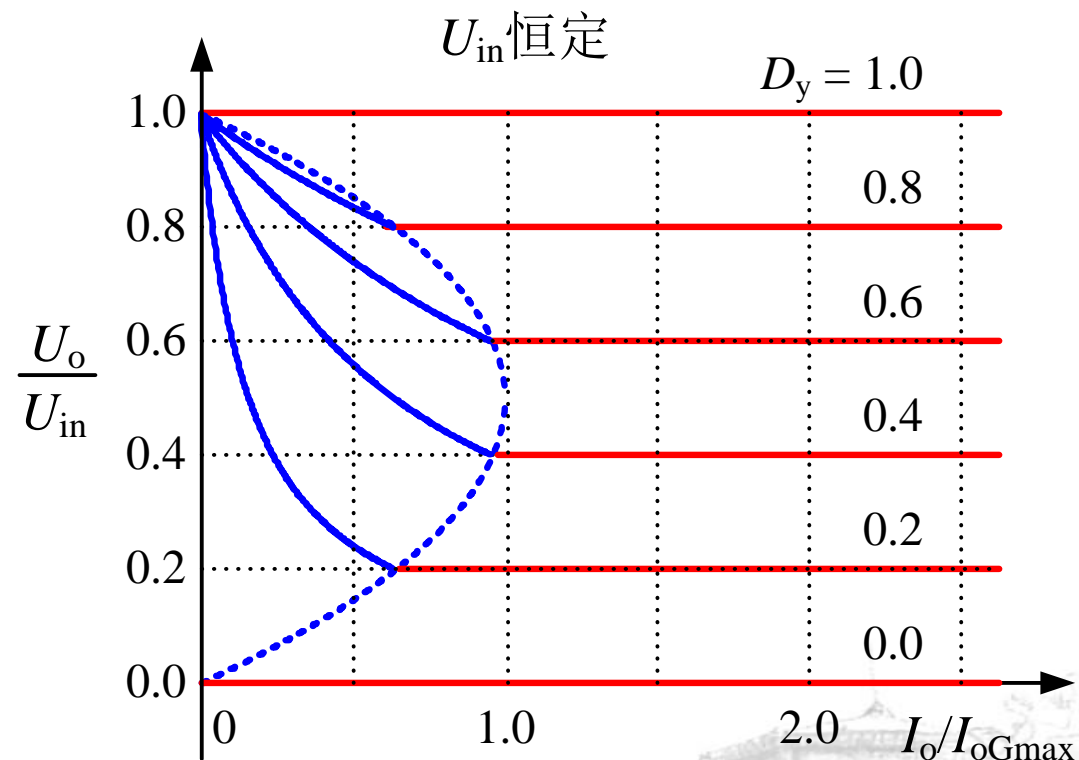
根据式(4.8)和式(4.23)，可以写出 U_{in} 恒定不变时Buck变换器的外特性表达式

$$\text{即: } \frac{U_o}{U_{in}} = \begin{cases} D_y & (\text{电流连续模式}) \\ \frac{1}{\frac{1}{4D_y^2} \frac{I_o}{I_{o\max}} + 1} & (\text{电流断续模式}) \end{cases} \quad (4.24)$$



2. 输入电压恒定不变时Buck变换器的外特性

- **输出特性**：输出电压与输出电流关系（输入恒定）
- 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





★ 4.1 Buck变换器

4.1.1 Buck变换器电路拓扑的推演

4.1.2 电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.3 电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

4.1.4 Buck变换器的外特性与调节特性

4.1.5 Buck变换器的参数设计



1. 二极管的类型

■ 普通二极管

反向恢复时间长，适用于低频，如1kHz整流电路

■ 快恢复二极管

反向恢复时间 $t_{rr} < 5 \text{ us}$ ，开关二极管，用于高频整流/斩波和逆变

■ 肖特基二极管

反向恢复时间很短(10~40ns)，在耐压较低时压降很小；但电压定额低，呈现
低压高频应用特点



2. 功率管分类

■ **功率能力**：功率晶体管>IGBT>MOSFET

■ **开关速度**：功率晶体管<IGBT<MOSFET

根据工作频率选功率管的类型

■ 在20kHz以下，可选择普通低频功率管

■ 20—50kHz可选开关功率管

■ 50kHz以上应选择功率MOSFET

■ 大功率应用，可选择IGBT(频率不超过50kHz)



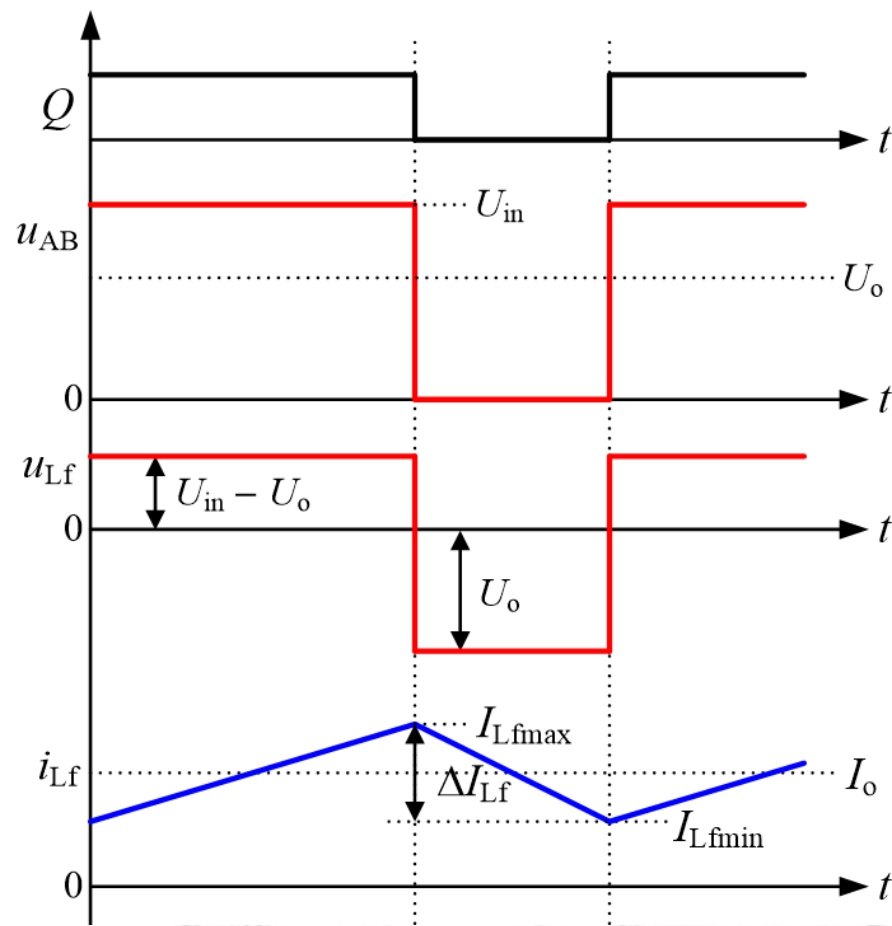
3. 开关管与续流二极管的电压和电流

- 开关管Q 和二极管D 的电压应力为：

$$U_Q = U_D = U_{in}$$

- 功率管电流为电感电流上升段。
- 二极管电流为电感电流下降段
- 功率管与二极管最大电流即为电感电流最大值

$$I_{Qmax} = I_{Dmax} = I_{Lmax} = I_o + \frac{U_o}{2L_f} \cdot (1 - D_y) T_s$$



3. 开关管与续流二极管的电压和电流

开关管 Q 和二极管 D 的电流平均值分别为：

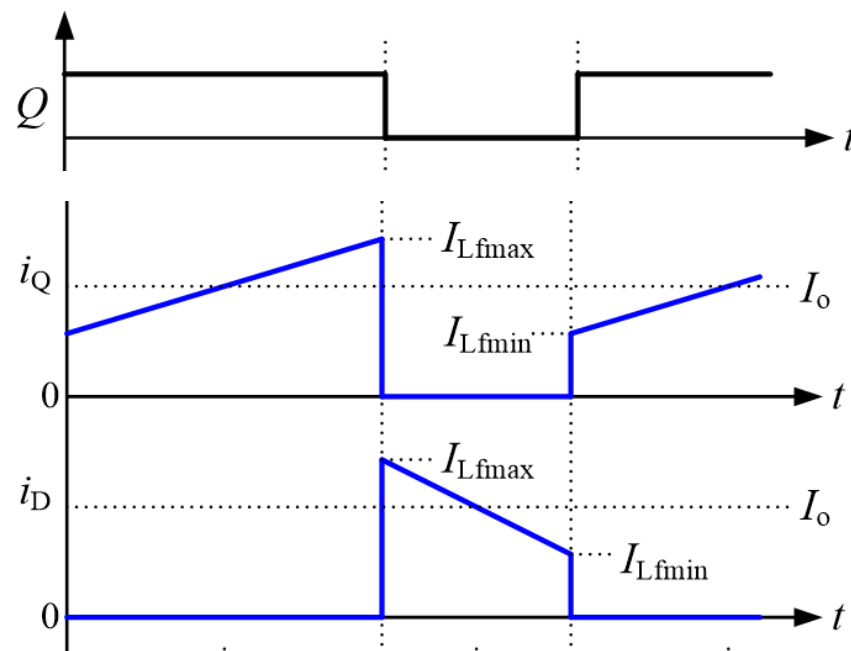
$$I_Q = D_y I_o$$

$$I_D = (1 - D_y) I_o$$

开关管 Q 和二极管 D 的电流有效值分别为：

$$I_{Qrms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{D_y T_s} i_Q^2 dt} = \sqrt{I_o^2 + \frac{1}{12} \left[\frac{U_o}{L_f} (1 - D_y) T_s \right]^2} \sqrt{D_y}$$

$$I_{Drms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{D_y T_s}^{T_s} i_D^2 dt} = \sqrt{I_o^2 + \frac{1}{12} \left[\frac{U_o}{L_f} (1 - D_y) T_s \right]^2} \sqrt{1 - D_y}$$



Buck变换器的参数设计

4. 滤波电感量

电感电流脉动:

$$\Delta I_{L_f} = \frac{U_{in} - U_o}{L_f} \cdot D_y T_s \quad (4.36)$$

在输入电压不变条件下

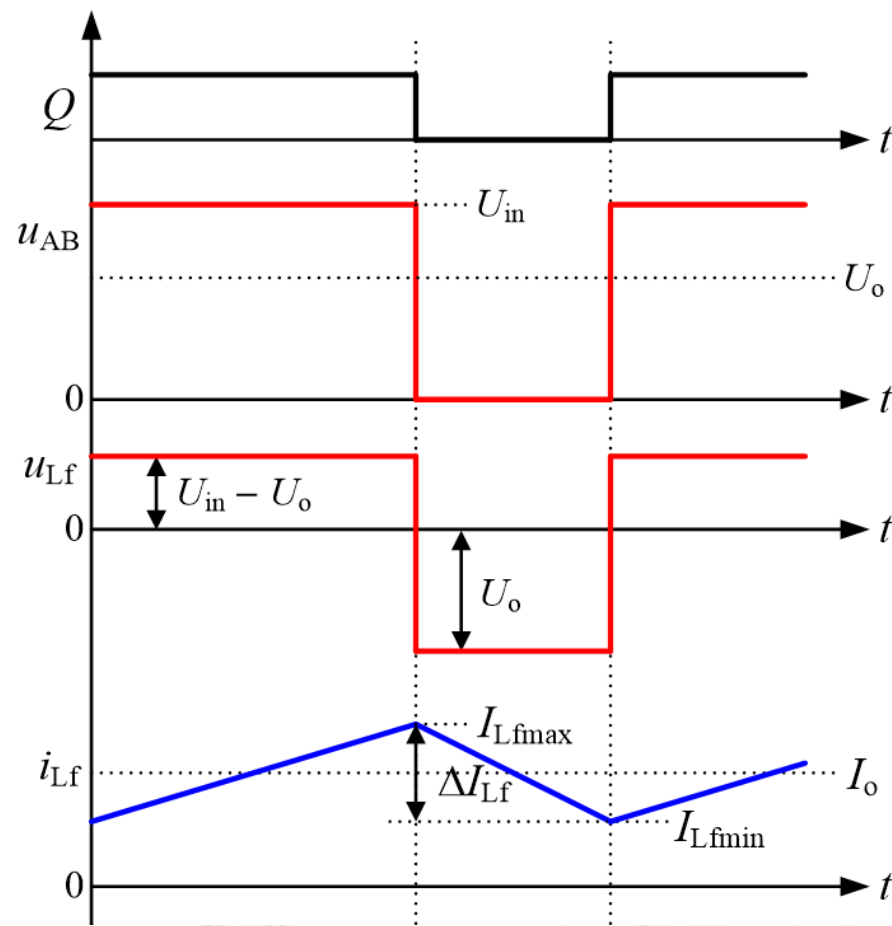
$$\Delta I_{L_f} = \frac{U_{in}}{L_f} (1 - D_y) D_y T_s \quad (4.37)$$

占空比=0.5时, 有最大脉动电流

$$\Delta I_{L_{fmax_1}} = \frac{U_{in}}{4L_f} T_s \quad (4.38)$$

由式(4.37)和式(4.38), 可得:

$$\frac{\Delta I_{L_f}}{\Delta I_{L_{fmax_1}}} = 4(1 - D_y) D_y \quad (4.39)$$

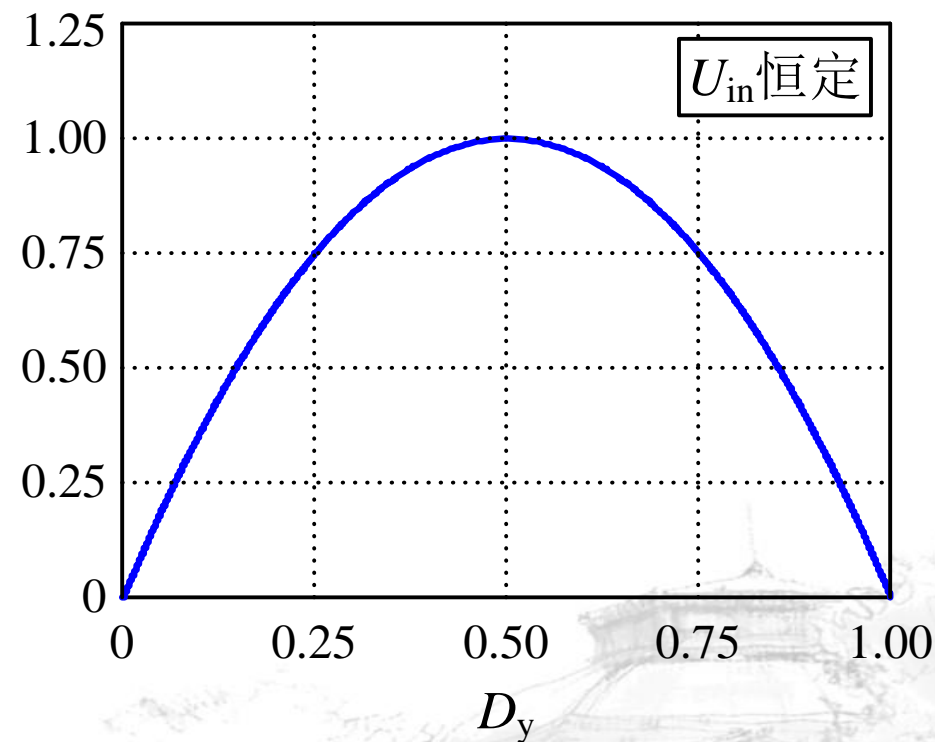


4. 滤波电感量

当 U_{in} 恒定不变时，由式(4.37)可确定滤波电感的大小为

$$L_f = \begin{cases} \frac{U_{in}}{\Delta I_{Lfmax_permit}} (1 - D_{ymax}) D_{ymax} T_s & (D_y \leq 0.5) \\ \frac{U_{in}}{\Delta I_{Lfmax_permit}} (1 - D_{ymin}) D_{ymin} T_s & (D_y \geq 0.5) \\ \frac{U_{in}}{4\Delta I_{Lfmax_permit}} T_s & (D_{ymin} \leq 0.5 \leq D_{ymax}) \end{cases}$$

$$\frac{\Delta I_{Lf}}{\Delta I_{Lfmax_1}}$$



5. 滤波电容容量

滤波电容 C_f 在一个开关周期内的充电电荷 ΔQ 。阴影部分是一个三角形，其高为 $\Delta I_{Lf}/2$ ，底为 $T_s/2$ 。因此， ΔQ 的表达式为：

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_{Lf}}{2} \cdot \frac{T_s}{2} = \frac{\Delta I_{Lf}}{8f_s}$$

即电容电流在1/2周期内充电，在1/2周期内放电。

那么输出电压的脉动 ΔU_o 为：
$$\Delta U_o = \frac{\Delta Q}{C_f} = \frac{\Delta I_{Lf}}{8C_f f_s} = \frac{(1-D_y)U_o}{8L_f C_f f_s^2}$$

根据输出纹波大小即可以确定输出电容大小：
$$C_f = \frac{(1-D_y)U_o}{8L_f f_s^2 \Delta U_o}$$





注意

- 以上计算过程都是以电容为理想电容时计算的，实际的电容存在等效串联电阻(Equivalent Series Resistor, ESR)，此时输出电压脉动还应考虑ESR上的脉动，其大小为：

$$\Delta U_{o_ESR} = ESR \cdot \Delta I_{Lf} = ESR \cdot \frac{(1 - D_y)U_o}{L_f f_s}$$



本节内容

■ 各种模态工作原理、电压比推导、波形

CCM方式:

- 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

CRM方式:

- 临界电流 I_G 的定义与推导

DCM方式:

- 输出滤波电感电流平均值= I_o

■ 参数设计（功率管、二极管、电感和电容）





★ 4.1 Buck变换器

★ 4.2 Boost变换器

★ 4.3 Buck-Boost变换器





★ 4.2 Boost变换器

4.2.1 Boost变换器电路拓扑的推演

4.2.2 电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.3 电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.4 Boost变换器的外特性与调节特性

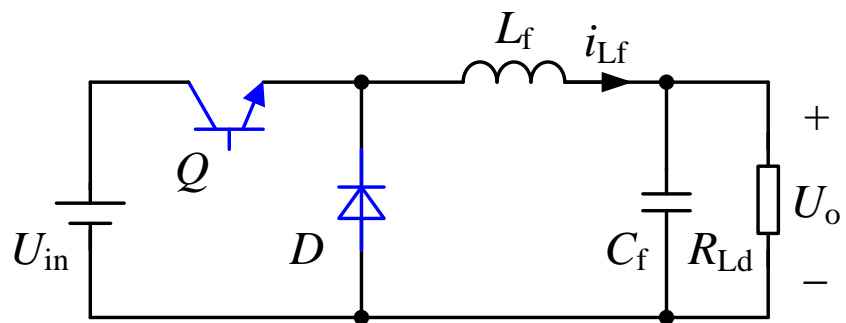
4.2.5 Boost变换器的参数设计



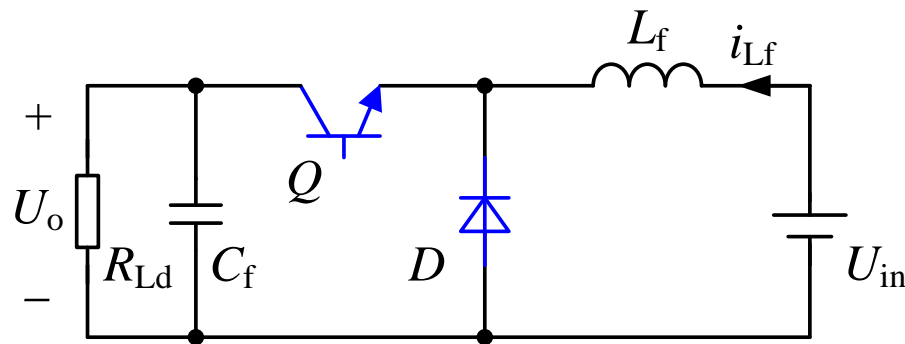
Boost变换器电路拓扑的推演



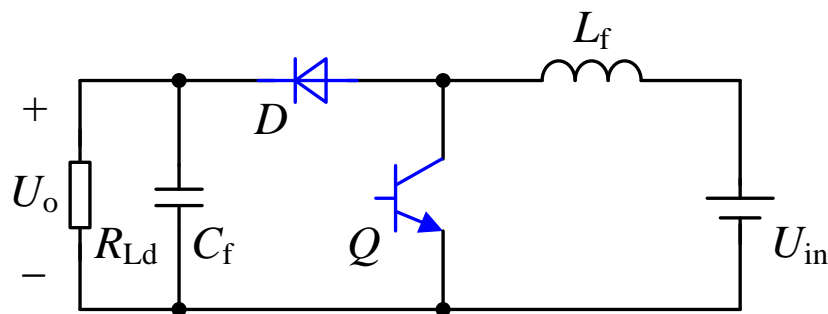
电路推演过程



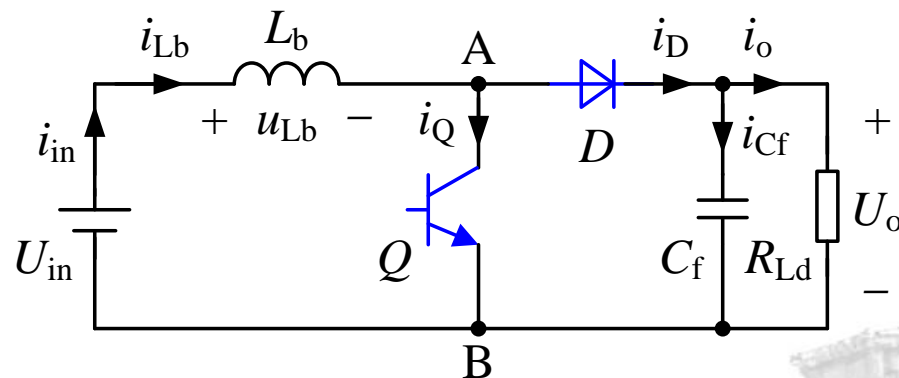
(a) Buck变换器



(b) 将输入电压与负载交换位置



(c) 将开关管和二极管互换位置



(d) 将图(c)水平翻转



Boost变换器电路拓扑的推演



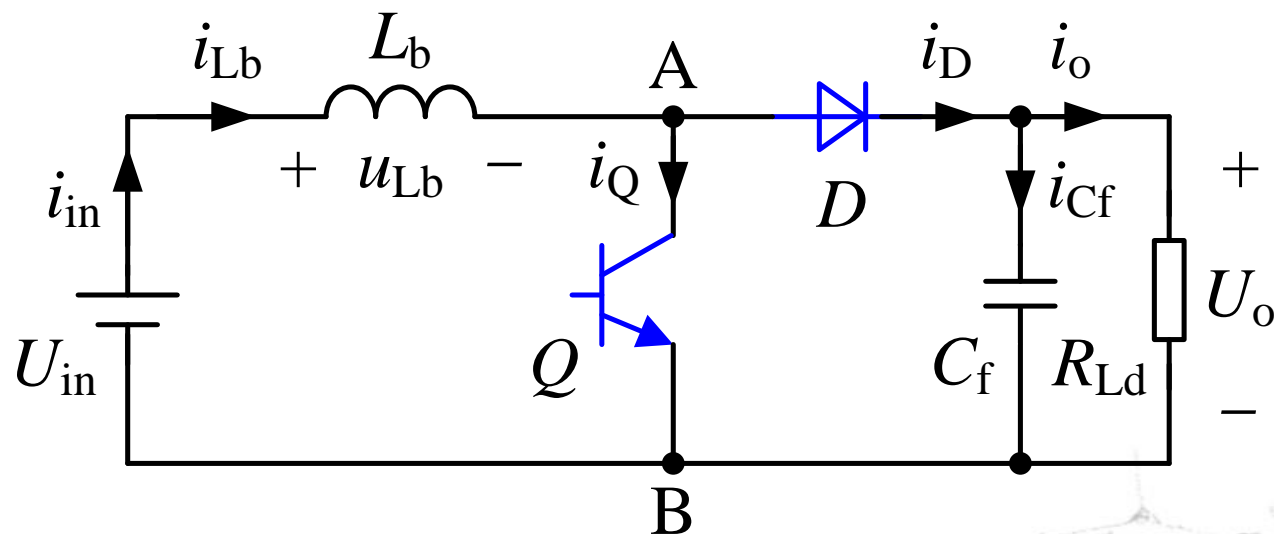
电路推演过程

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





★ 4.2 Boost变换器

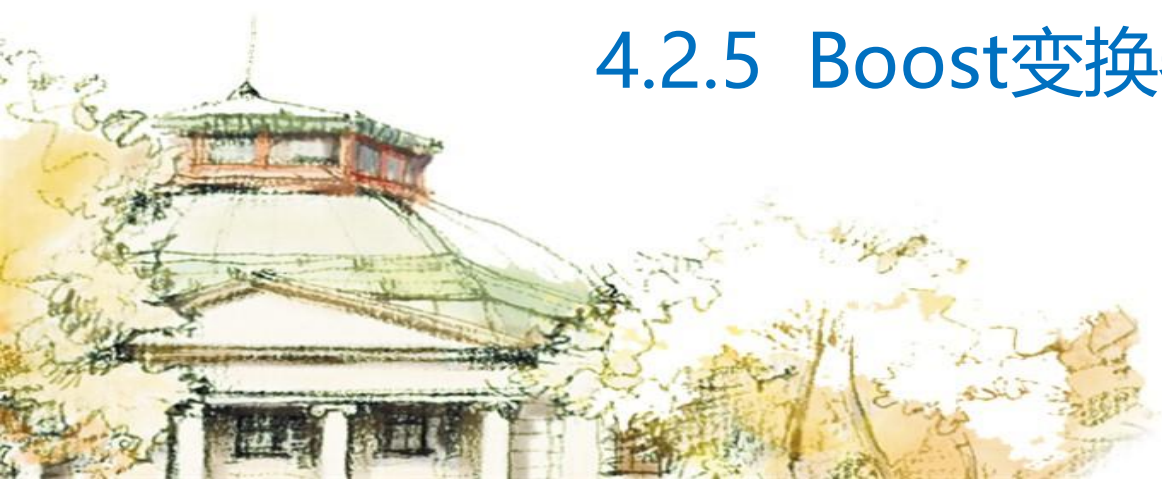
4.2.1 Boost变换器电路拓扑的推演

4.2.2 电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.3 电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.4 Boost变换器的外特性与调节特性

4.2.5 Boost变换器的参数设计



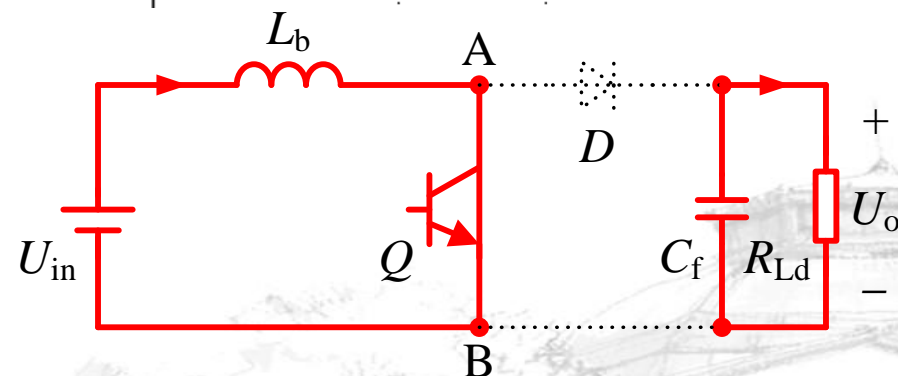
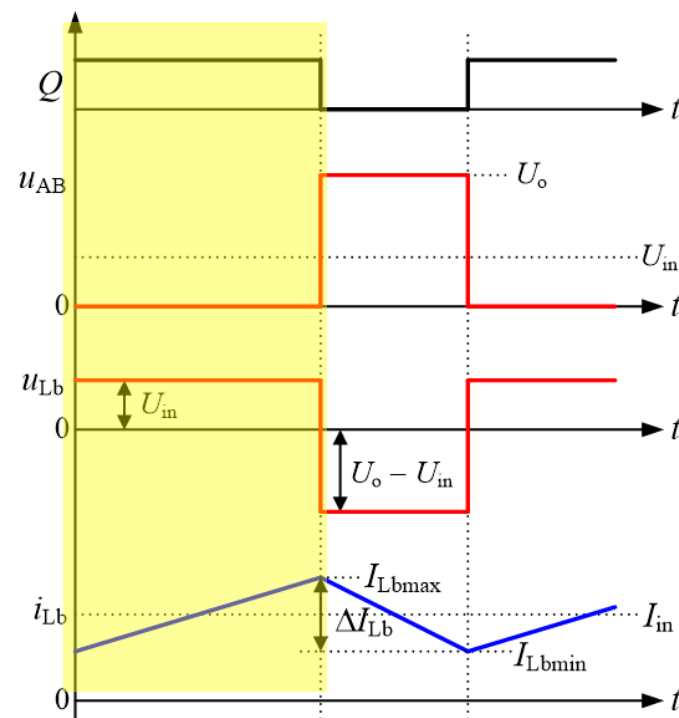
电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

1. 工作模态I

在 $t = 0$ 时，开关管 Q 导通，那么 $u_{AB} = 0$ ，二极管 D 截止，负载由滤波电容 C_f 供电，如电路图所示。在此开关模态中，输入电压 U_{in} 加到升压电感 L_b 上，那么有：

$$L_b \frac{di_{Lb}}{dt} = U_{in} \quad (4.49)$$

显然，升压电感电流 i_{Lb} 线性增长



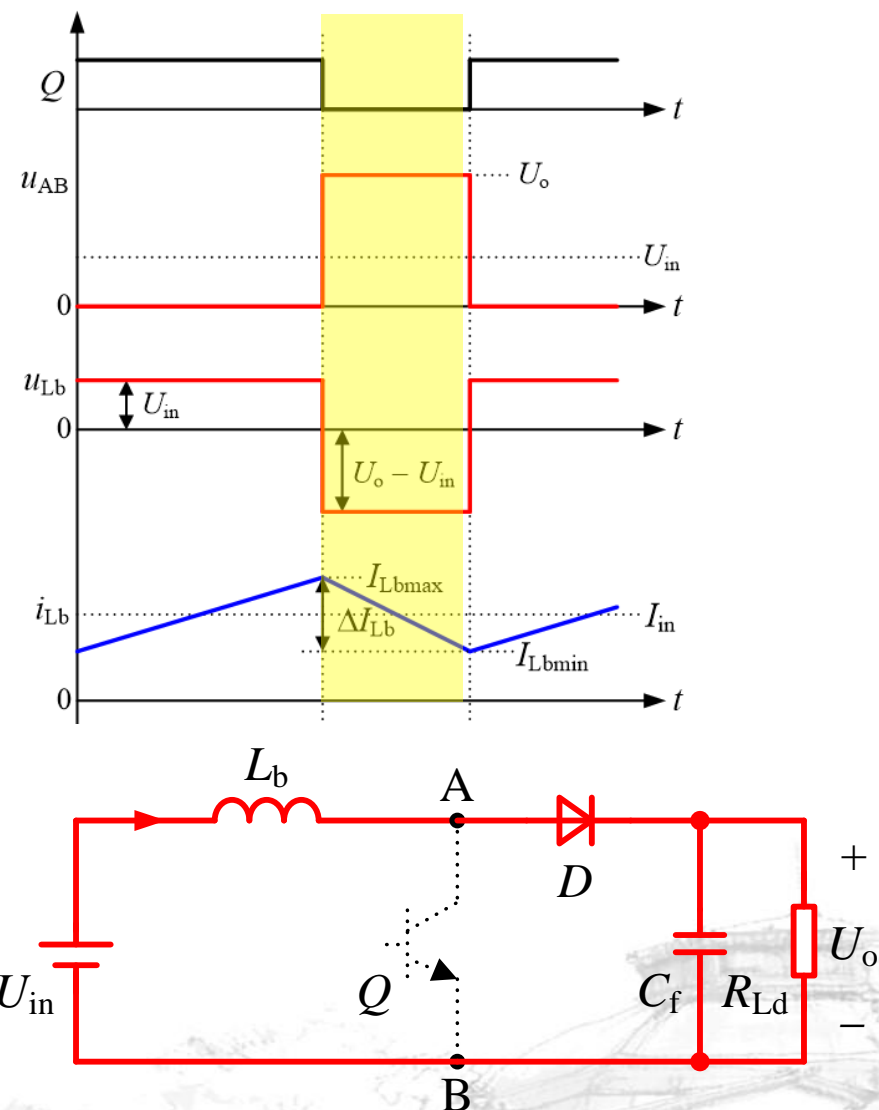
电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

1. 工作模态II

在 $t = T_{on}$ 时刻, Q 关断, i_{Lb} 通过 D 向负载侧流动, 一方面给负载提供能量, 另一方面给滤波电容 C_f 充电, 如波形图所示。此时, $u_{AB} = U_o$, 加在 L_b 上的电压为 $u_{Lb} = U_{in} - U_o$, 那么有:

$$L_b \frac{di_{Lb}}{dt} = U_{in} - U_o \quad (4.50)$$

- 因为 U_o 高于 U_{in} , 因此 i_{Lb} 线性减小。
- 在 $t = T_s$ 时, Q 再次开通, 进入下一个开关周期。



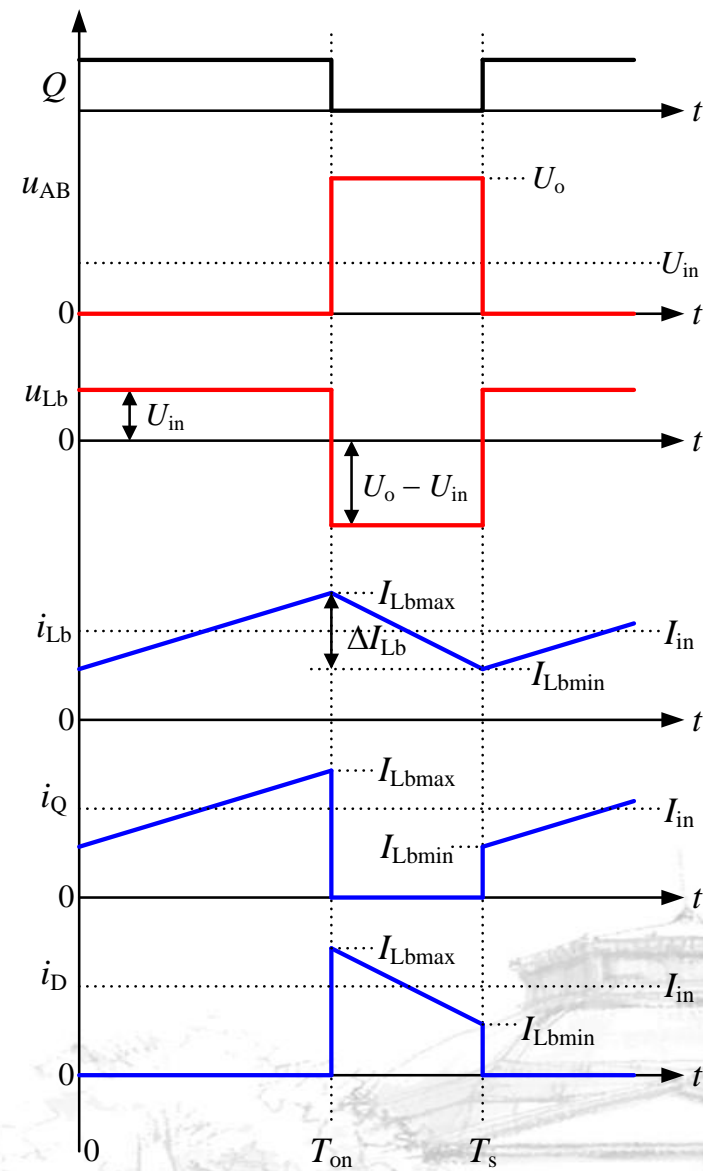
2. 基本关系

- 稳态工作时，在一个开关周期内加在电感 L_b 上的电压伏秒面积是平衡的，那么根据图中 u_{Lb} 的波形有：

$$U_{in} D_y T_s = (U_o - U_{in})(1 - D_y) T_s$$

上式可简化为：

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{1}{1 - D_y} \quad (4.52)$$



2. 基本关系

根据输入功率 P_{in} 等于输出功率 P_o 有 $U_{in}I_{in} = U_oI_o$

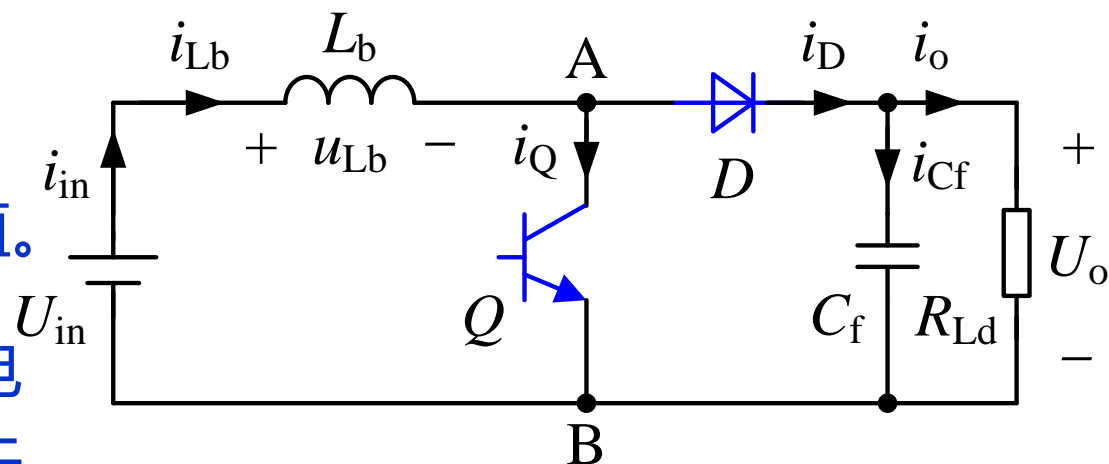
那么：

$$I_{in} = \frac{1}{1-D_y} I_o$$

I_{in} 和 I_o 分别为变换器的输入电流和输出电流平均值。

从图可知，Boost变换器的输入电流 i_{in} 等于升压电感电流 i_{Lb} ，因此升压电感电流 i_{Lb} 的平均值 I_{Lb} 等于 I_{in} ，即有：

$$I_{Lb} = I_{in} = \frac{1}{1-D_y} I_o$$



2. 基本关系

升压电感电流脉动量 ΔI_{Lb} 为：

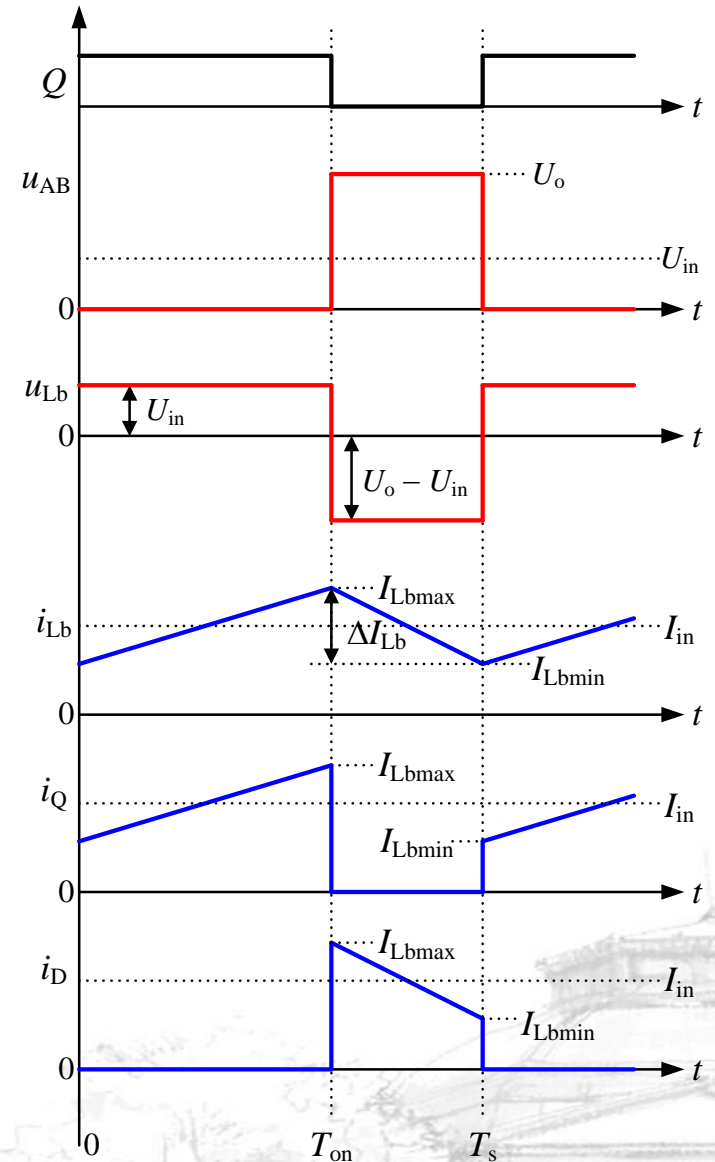
$$\Delta I_{Lb} = \frac{U_{in}}{L_b} D_y T_s$$

升压电感电流的最大值 I_{Lbmax} 和最小值 I_{Lbmin} 分别为：

$$I_{Lbmax} = I_{Lb} + \frac{\Delta I_{Lb}}{2} = \frac{1}{1-D_y} I_o + \frac{U_{in}}{2L_b} D_y T_s$$

$$I_{Lbmin} = I_{Lb} - \frac{\Delta I_{Lb}}{2} = \frac{1}{1-D_y} I_o - \frac{U_{in}}{2L_b} D_y T_s$$

式中， ΔI_{Lb} 为升压电感电流脉动量。





★ 4.2 Boost变换器

4.2.1 Boost变换器电路拓扑的推演

4.2.2 电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.3 电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.4 Boost变换器的外特性与调节特性

4.2.5 Boost变换器的参数设计

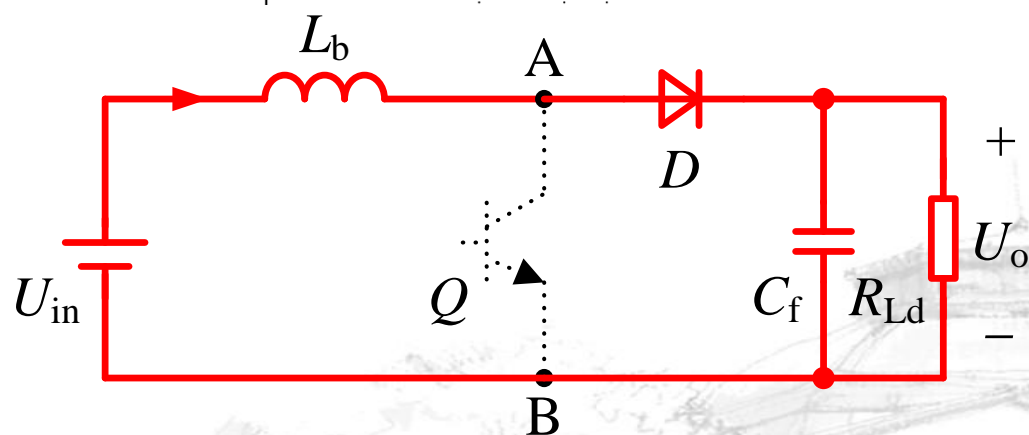
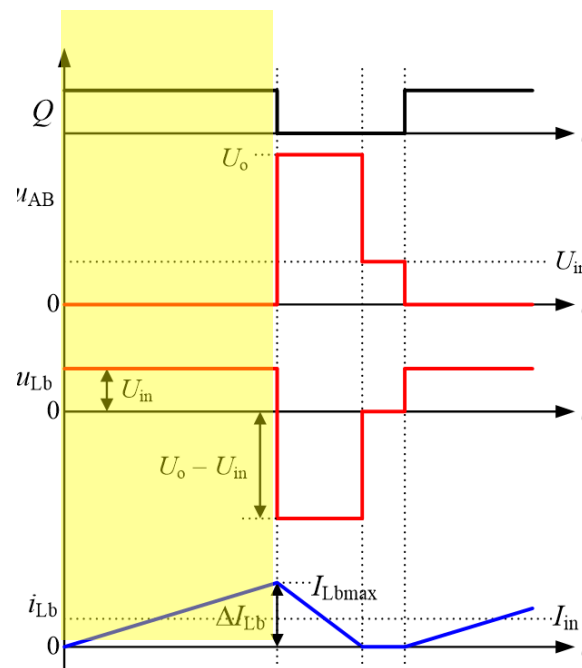


电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

1. 工作原理——模态I

Q 导通期间，升压电感电流 i_{Lb} 从零增加到 I_{Lbmax} ，那么有：

$$I_{Lbmax} = \frac{U_{in}}{L_b} D_y T_s \quad (4.58)$$



电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

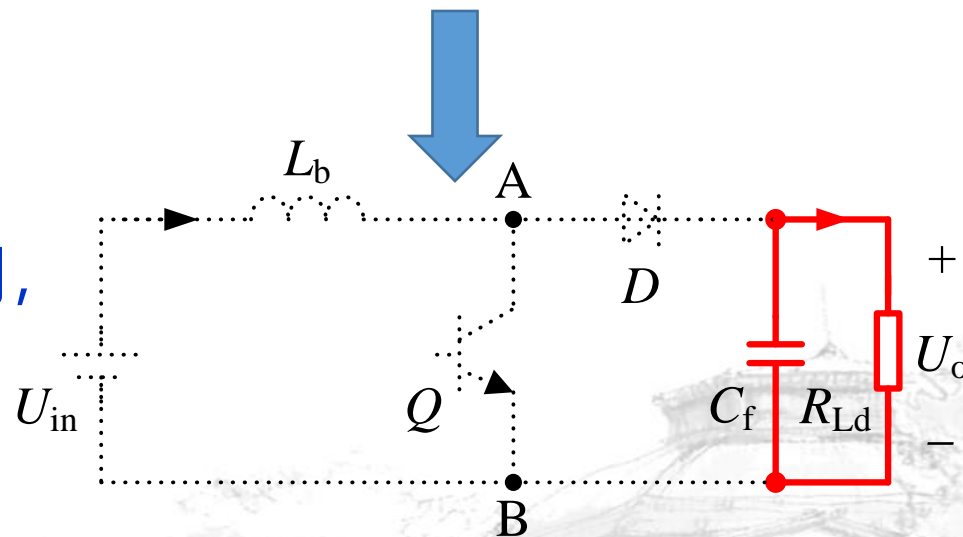
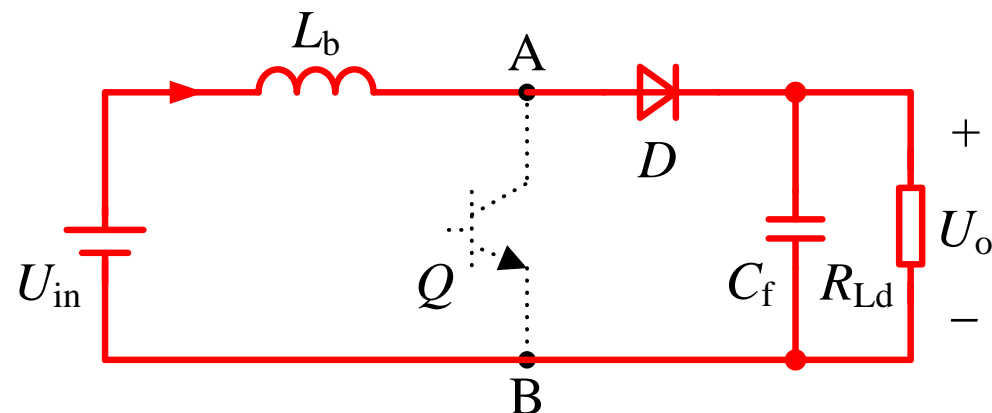
1. 工作原理——模态II

Q 截止后, i_{Lb} 从 I_{Lbmax} 线性下降, 并且在 $t = T_{on} + T'_{off}$ 时刻下降到零。那么有:

$$I_{Lbmax} = \frac{U_o - U_{in}}{L_b} \cdot T'_{off} = \frac{U_o - U_{in}}{L_b} \cdot D_r \cdot T_s \quad (4.58)$$

式中, T'_{off} 为升压电感电流从 I_{Lbmax} 下降到零的时间,

$$D_r = T'_{off}/T_s。$$

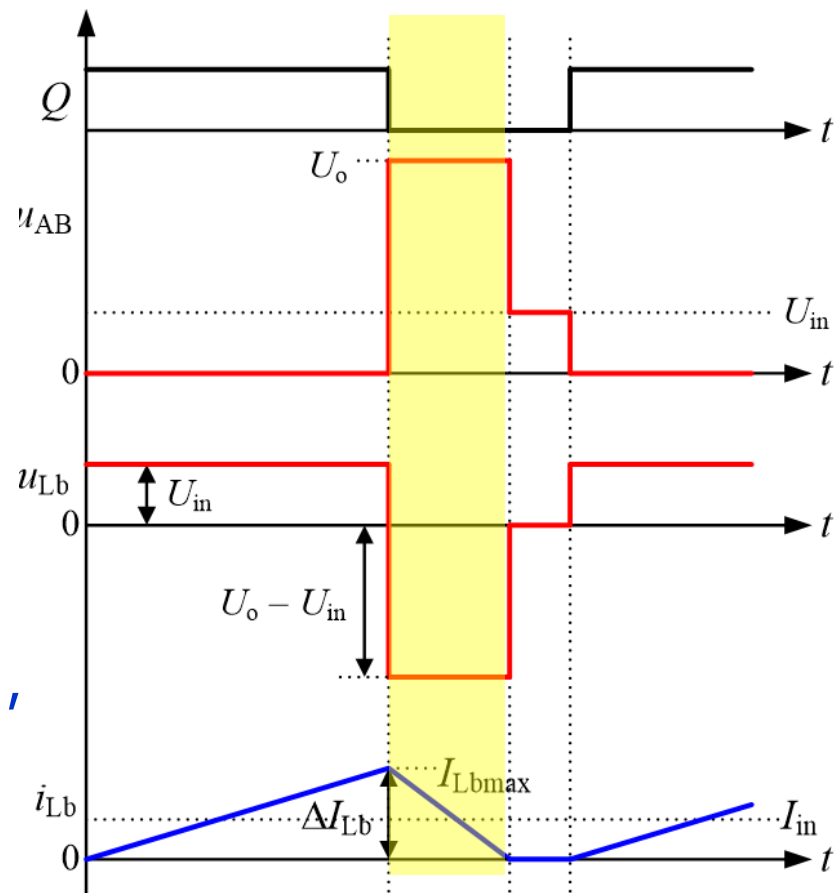


1. 工作原理——模态II

Q 截止后, i_{Lb} 从 I_{Lbmax} 线性下降, 并且在 $t = T_{on} + T'_{off}$ 时刻下降到零。那么有:

$$I_{Lbmax} = \frac{U_o - U_{in}}{L_b} \cdot T'_{off} = \frac{U_o - U_{in}}{L_b} \cdot D_r \cdot T_s \quad (4.59)$$

式中, T'_{off} 为升压电感电流从 I_{Lbmax} 下降到零的时间, $D_r = T'_{off}/T_s$ 。



电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

由式(4.58)和式(4.59)可得:

$$D_r = \frac{U_{in}}{U_o - U_{in}} D_y \quad (4.60)$$

稳态工作时, 一个开关周期内 i_{Cf} 的平均值为零, 因此 I_o 等于 i_D 的平均值。

$$I_o = \frac{1}{2} I_{Lbmax} T'_{off} \frac{1}{T_s} = \frac{1}{2} I_{Lbmax} D_r \quad (4.61)$$

将式(4.58)和式(4.60)代入式(4.61), 整理后可得:

$$I_{Lbmax} = \frac{U_o - U_{in}}{L_b} \cdot T'_{off} = \frac{U_o - U_{in}}{L_b} \cdot D_r \cdot T_s \quad U_o = \frac{D_y^2 T_s}{2 L_b I_o} U_{in}^2 + U_{in} \quad (4.62)$$

■ 从式(4.62)可以看出, 电流断续时, Boost变换器的输出电压 U_o 不仅与输入电压 U_{in} 和占空比 D_y 有关, 还与输出电流 I_o 有关。





★ 4.2 Boost变换器

4.2.1 Boost变换器电路拓扑的推演

4.2.2 电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.3 电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.4 Boost变换器的外特性与调节特性

4.2.5 Boost变换器的参数设计

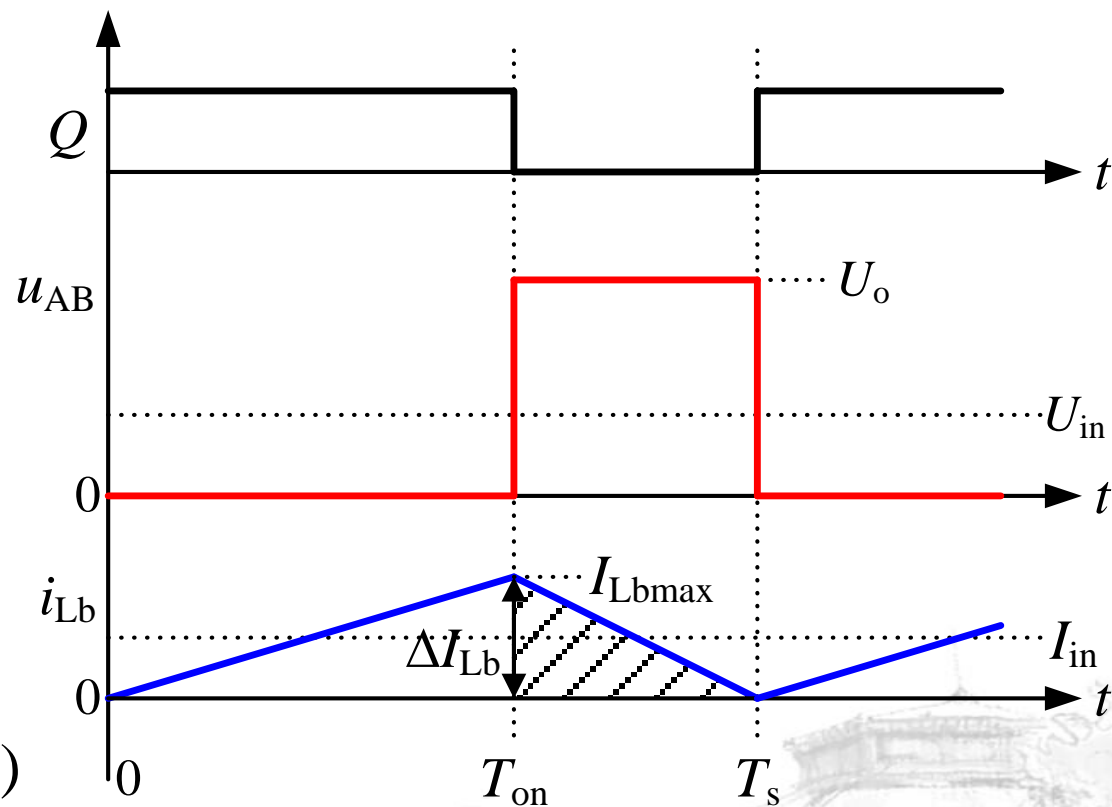


1. 电流临界连续时的输出电流

- $t = T_s$ 时, 升压电感电流 i_{Lb} 刚好下降到零, 如图所示, 那么Boost变换器工作在电流临界连续模式

用 I_{oG} 表示电流临界连续时的输出电流 I_o , 那么有:

$$I_{Lbmax} = \frac{U_{in}}{L_b} D_y T_s$$
$$I_{oG} = \frac{1}{2} I_{Lbmax} (T_s - T_{on}) \frac{1}{T_s} = \frac{D_y (1 - D_y) T_s}{2 L_b} U_{in} \quad (4.63)$$



2. 输入电压恒定不变时Boost变换器的外特性

从式(4.63)可以看出, 如果输入电压 U_{in} 恒定不变, 则 I_{oG} 在 $D_y = 0.5$ 时最大, 为:

$$I_{oGmax} = \frac{T_s}{8L_b} U_{in} \quad (4.64)$$

那么由式(4.63)和式(4.64)可得:

$$\frac{I_{oG}}{I_{oGmax}} = 4D_y (1 - D_y) \quad (4.65)$$

根据式(4.62)和式(4.64), 电流断续时输出电压的表达式可改写为:

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{4D_y^2}{I_o / I_{oGmax}} + 1 \quad (4.66)$$



2. 输入电压恒定不变时Boost变换器的外特性

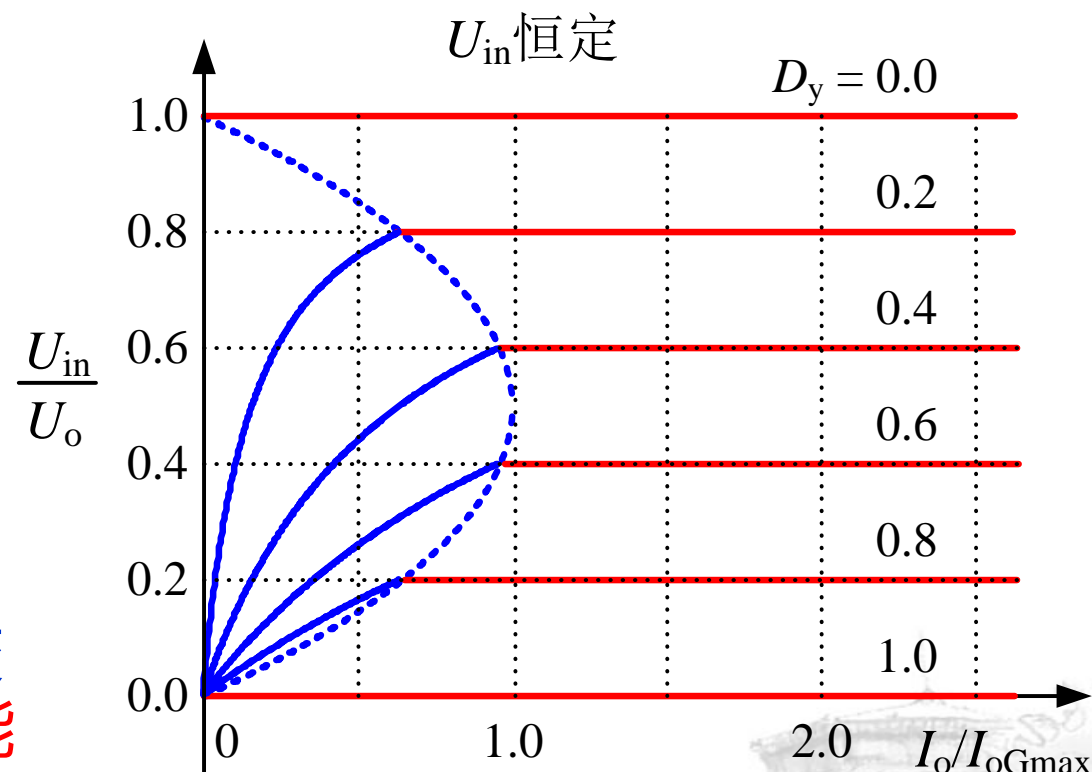
根据式(4.52)和式(4.66)，可以写出 U_{in} 恒定不变时Boost变换器的外特性表达式

$$\text{即: } \frac{U_o}{U_{in}} = \begin{cases} \frac{1}{1-D_y} & (\text{电流连续模式}) \\ \frac{4D_y^2}{I_o/I_{o\text{Max}}} + 1 & (\text{电流断续模式}) \end{cases} \quad (4.67)$$



2. 输入电压恒定不变时Boost变换器的外特性

- 输出特性：输出电压与输出电流关系（输入恒定）
- 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系
- 当 $I_o = 0$ 时， U_o 将为无穷大。因此，Boost变换器必须采用输出电压闭环控制，否则不能在空载下工作。





★ 4.2 Boost变换器

4.2.1 Boost变换器电路拓扑的推演

4.2.2 电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.3 电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

4.2.4 Boost变换器的外特性与调节特性

4.2.5 Boost变换器的参数设计



Boost变换器的参数设计

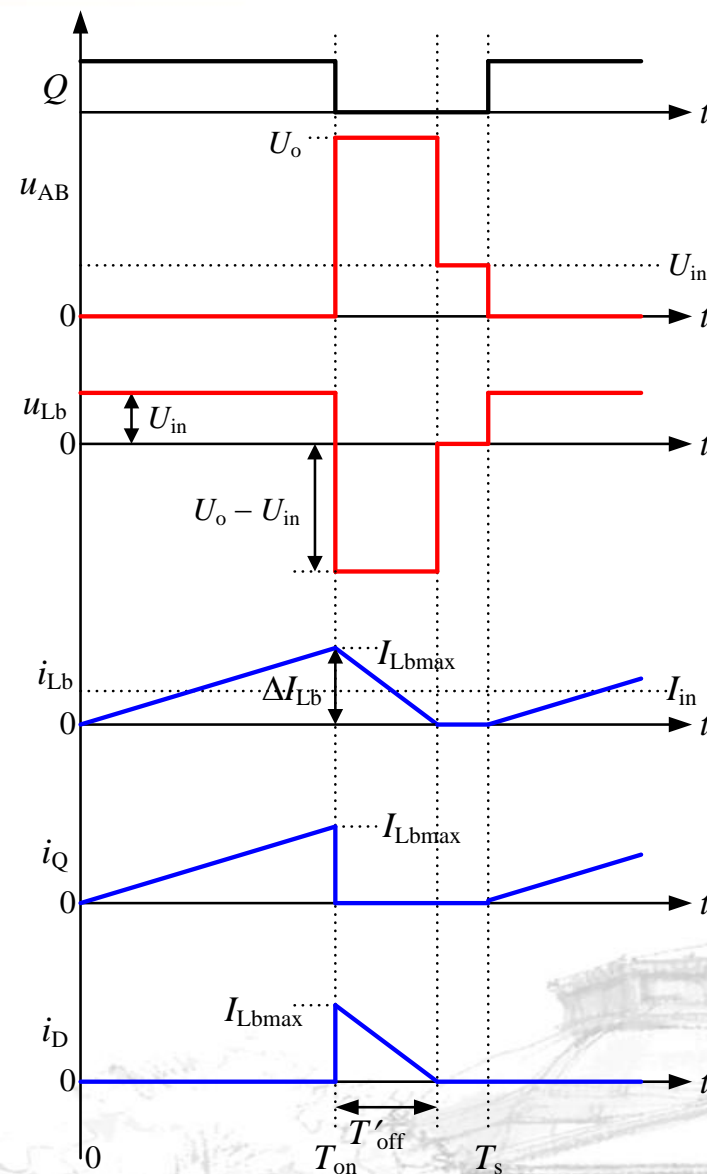
1. 开关管与续流二极管的电压和电流

- 开关管Q 和二极管D 的电压应力为：

$$U_Q = U_D = U_{in}$$

- 功率管电流为电感电流上升段。
- 二极管电流为电感电流下降段
- 功率管与二极管最大电流即为电感电流最大值

$$I_{Qmax} = I_{Dmax} = I_{Lbmax} = \frac{1}{1-D_y} I_o + \frac{U_{in}}{2L_b} D_y T_s$$



Boost变换器的参数设计

1. 开关管与续流二极管的电压和电流

开关管 Q 和二极管 D 的电流平均值分别为：

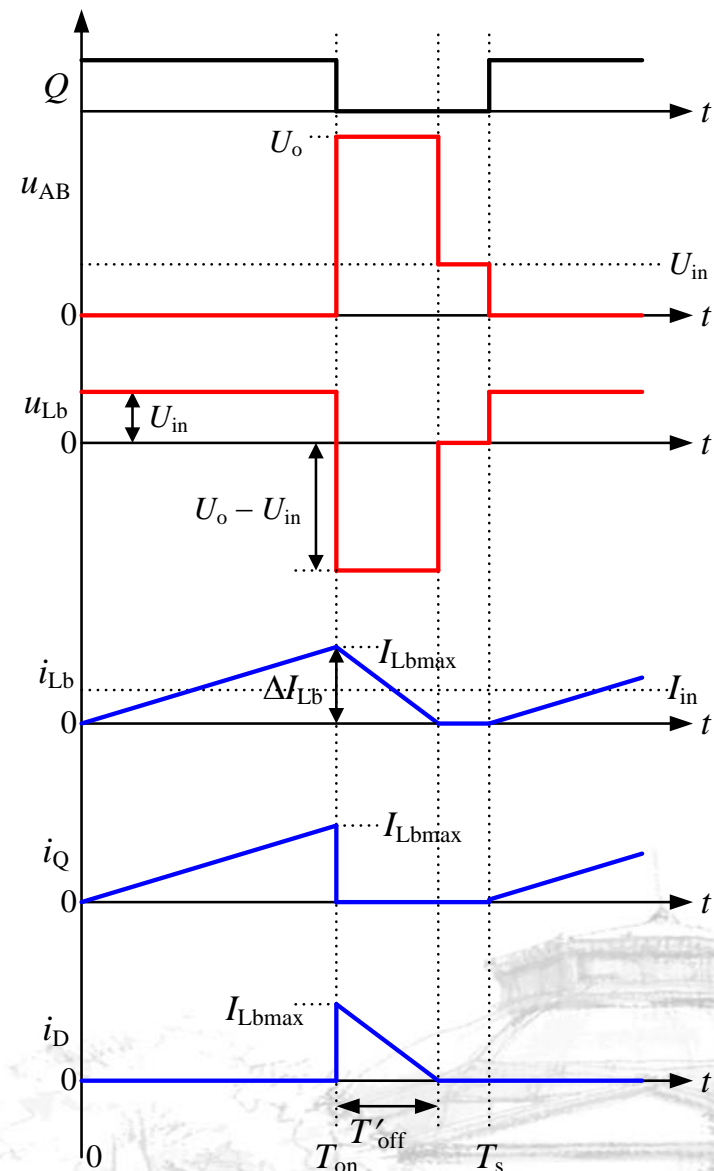
$$I_Q = D_y I_{in} = \frac{D_y}{1 - D_y} I_o$$

$$I_D = I_o$$

开关管 Q 和二极管 D 的电流有效值分别为：

$$I_{Qrms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{D_y T_s} i_Q^2 dt} = \sqrt{\left(\frac{1}{1 - D_y} I_o \right)^2 + \frac{1}{12} \left[\frac{U_o}{L_b} (1 - D_y) D_y T_s \right]^2} \sqrt{D_y}$$

$$I_{Drms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{D_y T_s}^{T_s} i_D^2 dt} = \sqrt{\left(\frac{1}{1 - D_y} I_o \right)^2 + \frac{1}{12} \left[\frac{U_o}{L_b} (1 - D_y) D_y T_s \right]^2} \sqrt{1 - D_y}$$



Boost变换器的参数设计

2. 升压电感量

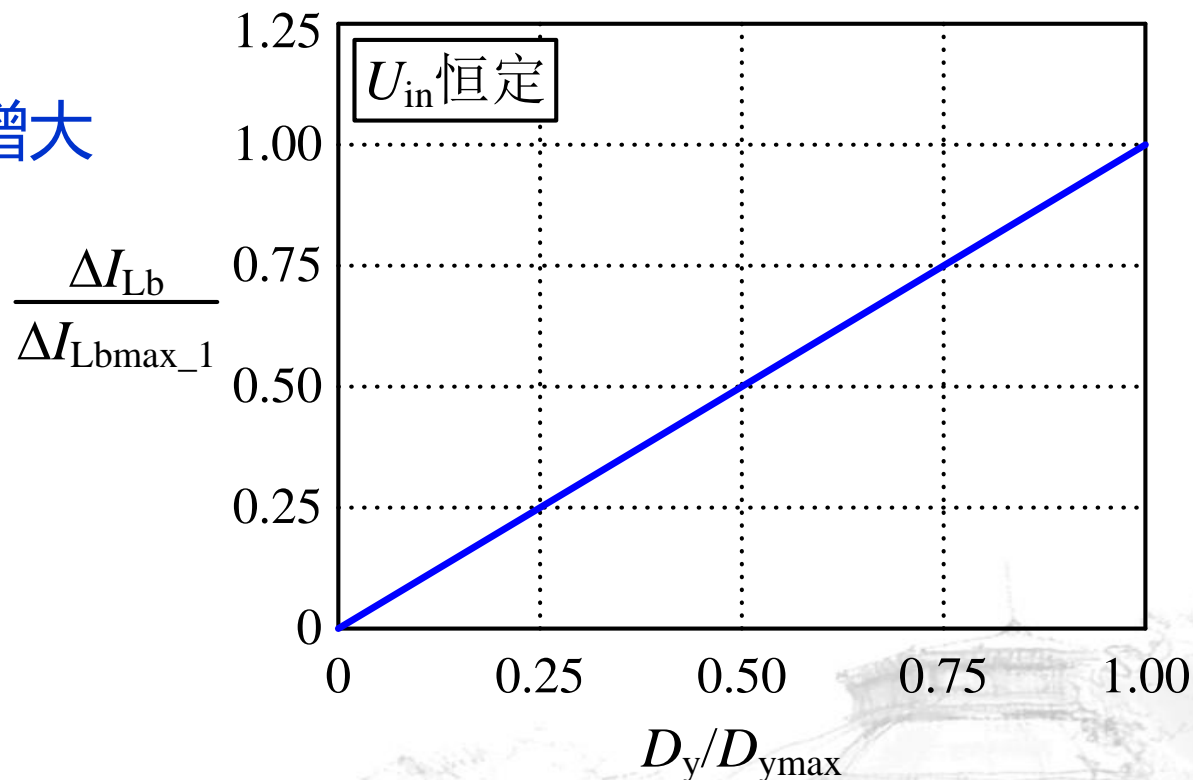
电感电流脉动:
$$\Delta I_{Lb} = \frac{U_{in}}{L_b} D_y T_s$$

在输入电压不变条件下纹波电流随占空比增大而变大，在最大占空比处有最大脉动电流为：

$$\Delta I_{Lbmax_1} = \frac{U_{in}}{L_b} D_{ymax} T_s$$

电感根据最大允许电流脉动设计：

$$L_b = \frac{U_{in}}{\Delta I_{Lb_permit}} D_{ymax} T_s$$



2. 升压电感量

在输出电压不变下，有：

$$\Delta I_{Lb} = \frac{U_{in}}{L_b} \left(1 - \frac{U_{in}}{U_o} \right) T_s$$

纹波电流在 $U_{in}=0.5$ 处 U_o 最大：

$$\Delta I_{Lbmax_2} = \frac{U_o T_s}{4L_b}$$

得到纹波电流随 U_{in} 变化曲线

$$\frac{\Delta I_{Lb}}{\Delta I_{Lbmax_2}} = 4 \frac{U_{in}}{U_o} \left(1 - \frac{U_{in}}{U_o} \right)$$

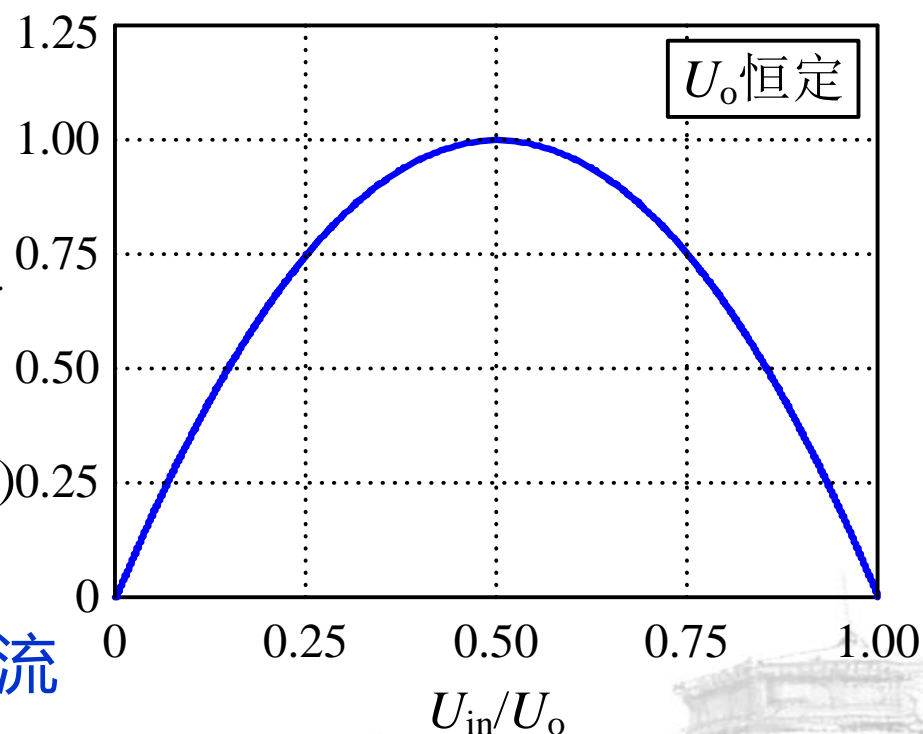


Boost变换器的参数设计

2. 升压电感量

根据最大允许脉动电流设计电感：

$$L_b = \begin{cases} \frac{U_{inmax}}{\Delta I_{Lbmax_permit}} \left(1 - \frac{U_{inmax}}{U_o} \right) T_s & (U_{in} / U_o \leq 0.5) \\ \frac{U_{inmin}}{\Delta I_{Lbmax_permit}} \left(1 - \frac{U_{inmin}}{U_o} \right) T_s & (U_{in} / U_o \geq 0.5) \\ \frac{U_o}{4\Delta I_{Lfmax_permit}} T_s & (U_{inmin} / U_o \leq 0.5 \leq U_{inmax} / U_o) \end{cases} \quad \frac{\Delta I_{Lb}}{\Delta I_{Lbmax_2}}$$



实际工程中，一般选取 ΔI_{Lbmax} 为额定输出时输入电流的20%，也可根据实际情况选取更大或更小的值。



3. 滤波电容容量

Q 导通时，滤波电容 C_f 放电；当 Q 截止时， C_f 充电。输出电压脉动 ΔU_o 可用 C_f 放电时的电压下降量来表示，而放电电流为输出电流 I_o ，因此 ΔU_o 的表达式为：

$$\Delta U_o = \frac{I_o}{C_f} D_y T_s$$

可得滤波电容容量为：

$$C_f = \frac{I_o}{\Delta U_o} D_y T_s$$

根据所允许的输出电压脉动值 ΔU_o ，可以由上式计算出滤波电容容量。



本节内容

- 升压电路的构成和工作原理

注意电路的电感在输入侧

- CCM时升压电路的电压变换关系推导

电感电流变化量相等（或伏秒平衡）

- CRM的 I_G 定义和推导

- DCM的输出电压推导和波形分析

利用电流变化量相等或伏秒平衡推导关断时间，根据输出电流平均值推导输出电压大小

- 元器件参数的设计





目录

止於至善

★ 4.1 Buck变换器

★ 4.2 Boost变换器

★ 4.3 Buck-Boost变换器



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU



★ 4.3 Buck-Boost变换器

4.3.1 Buck-Boost变换器电路拓扑的推演

4.3.2 电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

4.3.3 电流断续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

4.3.4 Buck-Boost变换器的外特性与调节特性

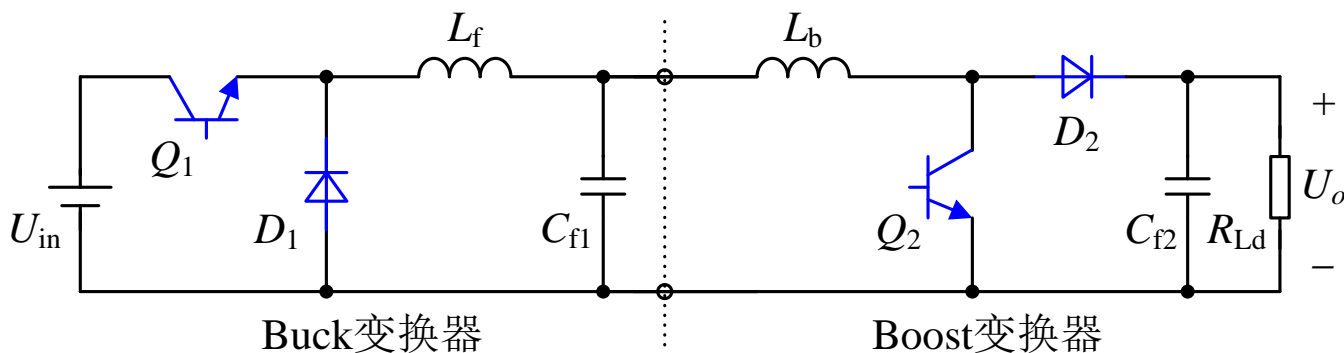
4.3.5 Buck-Boost变换器的参数设计



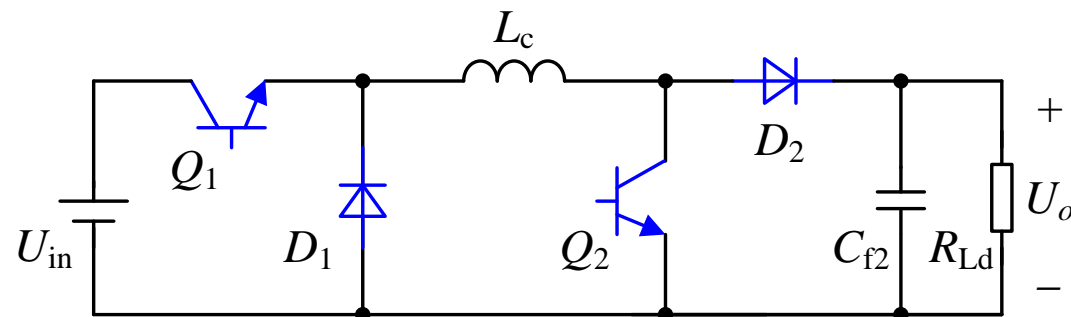
Buck-Boost变换器电路拓扑的推演



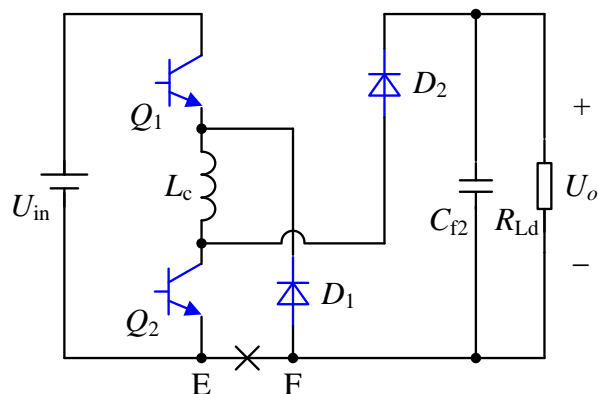
电路推演过程



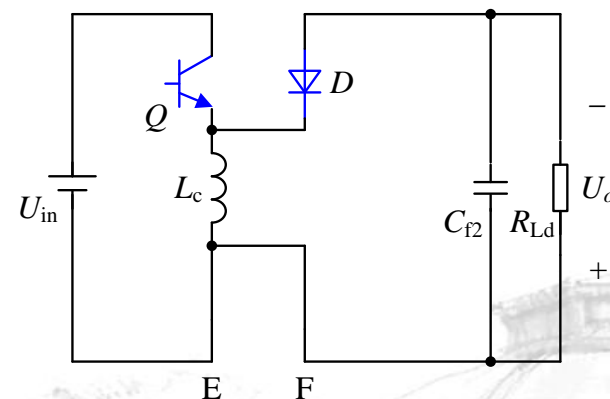
(a) Buck变换器与Boost变换器级联



(b) 去掉 C_{f1} ，并将两个电感合并



(c) 图(b)的变形



(d) 断开EF两点，并将 Q_1 和 Q_2 、 D_1 和 D_2 分别合并

见教材P101



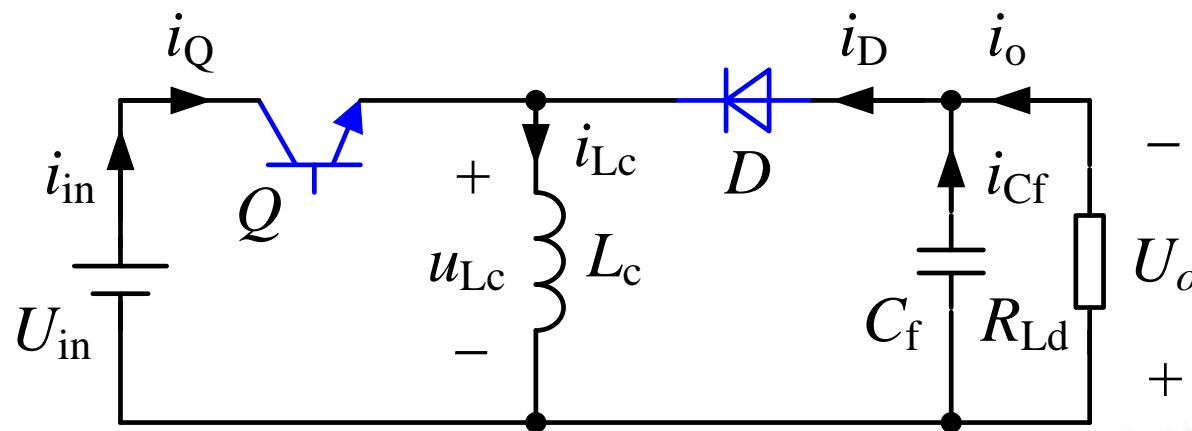


电路推演过程

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





★ 4.3 Buck-Boost变换器

4.3.1 Buck-Boost变换器电路拓扑的推演

4.3.2 电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

4.3.3 电流断续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

4.3.4 Buck-Boost变换器的外特性与调节特性

4.3.5 Buck-Boost变换器的参数设计



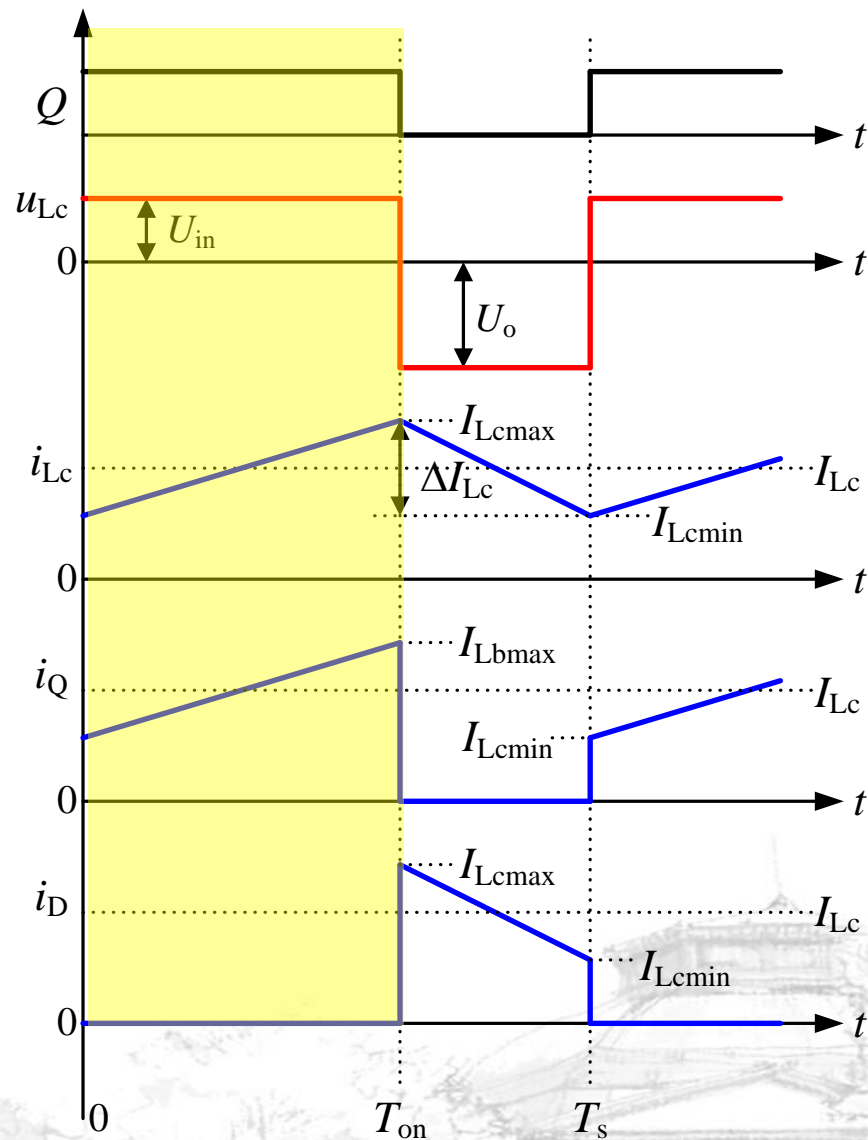
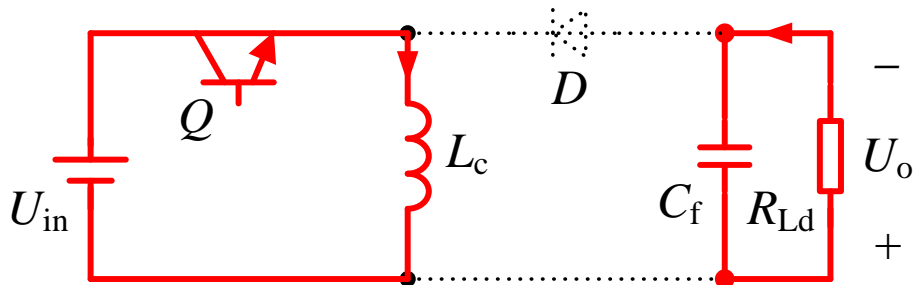
电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

1. 工作模态I

- 在 $t = 0$ 时，开关管 Q 导通，二极管 D 截止，负载由滤波电容 C_f 供电，如图所示。此时，输入电压 U_{in} 加到电感 L_c 上，那么有：

$$L_c \frac{di_{Lc}}{dt} = U_{in} \quad (4.90)$$

显然，升压电感电流 i_{Lc} 线性增长



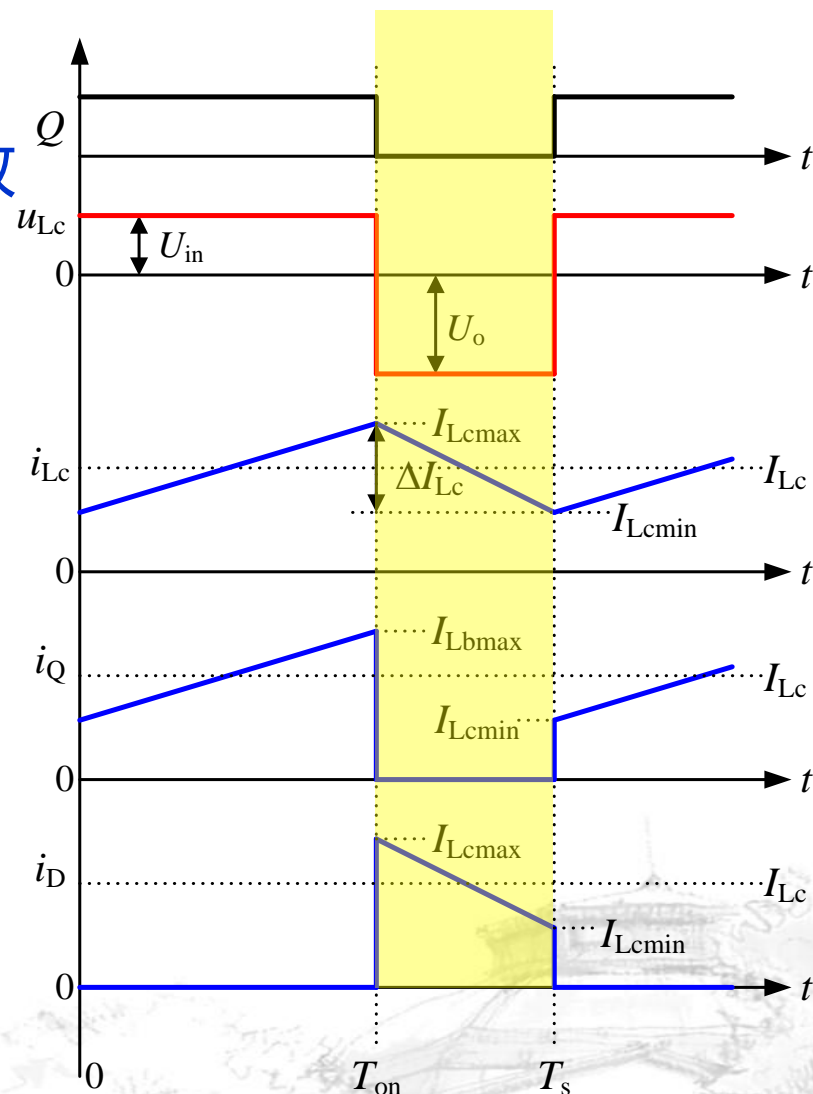
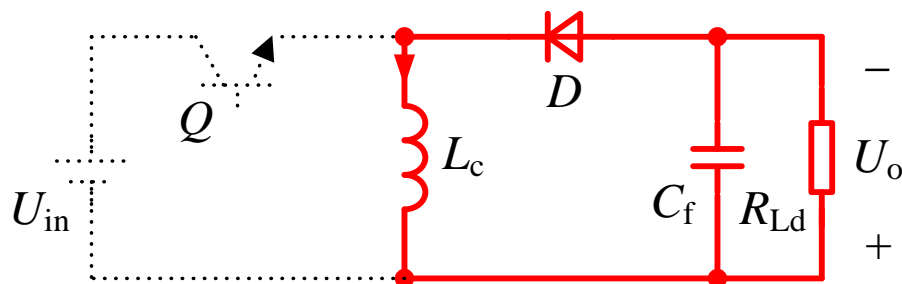
电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

1. 工作模式II

在 $t = T_{\text{on}}$ 时, Q 关断, i_{L_c} 通过 D 向负载侧流动, 电感 L_c 释放储能给负载和滤波电容 C_f , C_f 被充电, 如图4.21(b)所示。此时电感 L_c 上的电压为 $u_{L_c} = -U_o$, 那么有:

$$L_c \frac{di_{L_c}}{dt} = -U_o \quad (4.91)$$

- 显然 i_{L_c} 线性减小。
- 在 $t = T_s$ 时, Q 再次开通, 进入下一个开关周期。



电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

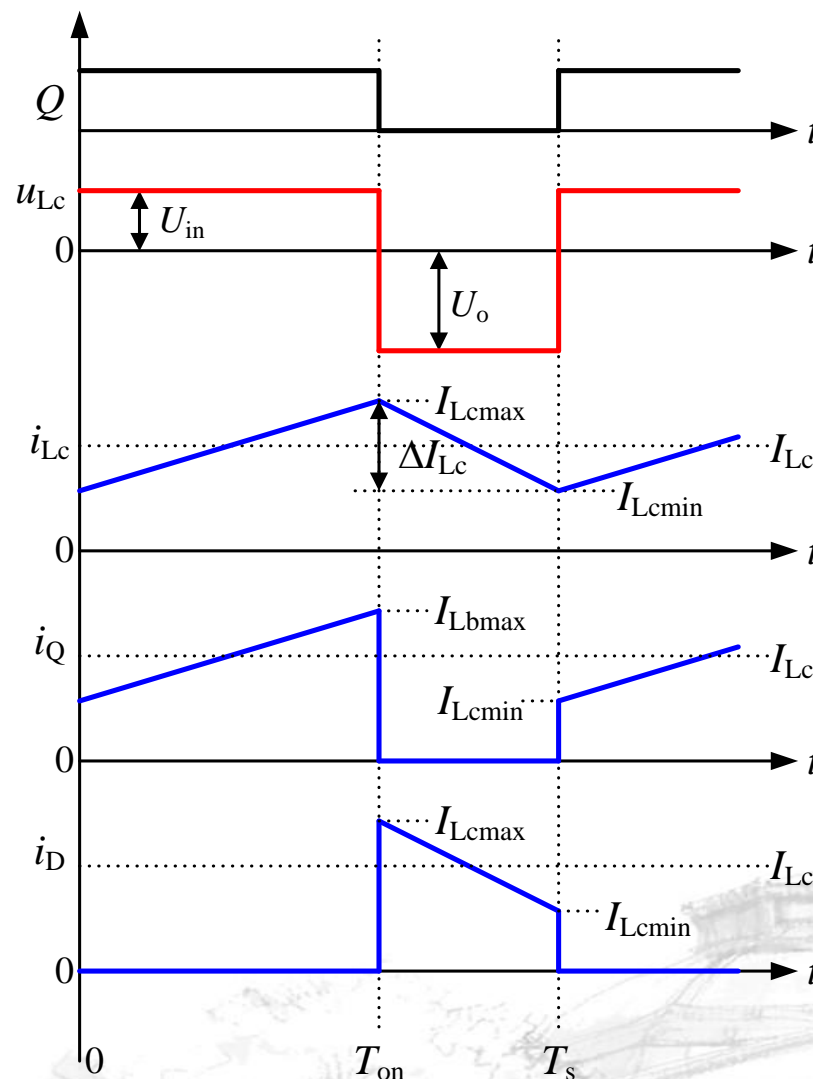
2. 基本关系

- 稳态工作时，在一个开关周期内，电感 L_c 的电压伏秒面积时平衡的。那么，根据图中 u_{Lc} 的波形可得：

$$U_{in} D_y T_s = U_o (1 - D_y) T_s$$

上式可解得：

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{D_y}{1 - D_y} \quad (4.93)$$

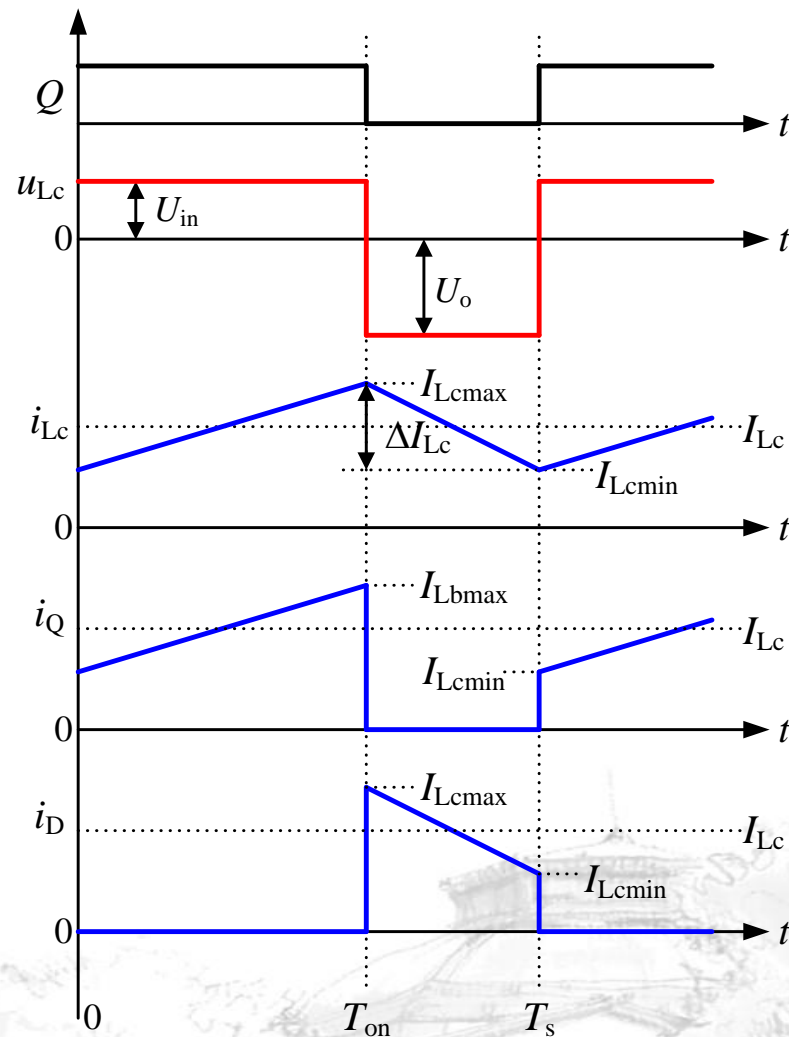
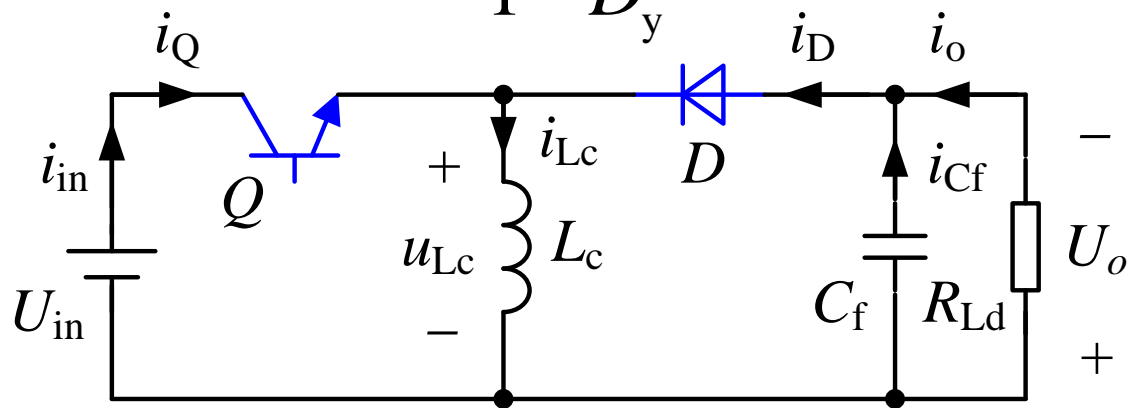


电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

2. 基本关系

稳态工作时，滤波电容电流 i_{Cf} 的平均值为零。那么，根据电路图可知，输出电流 I_o 等于二极管电流 i_D 的平均值，即 $I_D = I_o$ 。观察波形图可知，二极管电流 i_D 的平均值可表示为 $I_D = (1-D_y)I_{Lc}$ ，其中 I_{Lc} 为电感电流平均值。因此，有：

$$I_{Lc} = \frac{I_o}{1-D_y}$$



电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

2. 基本关系

电感电流脉动量 ΔI_{Lc} 为:

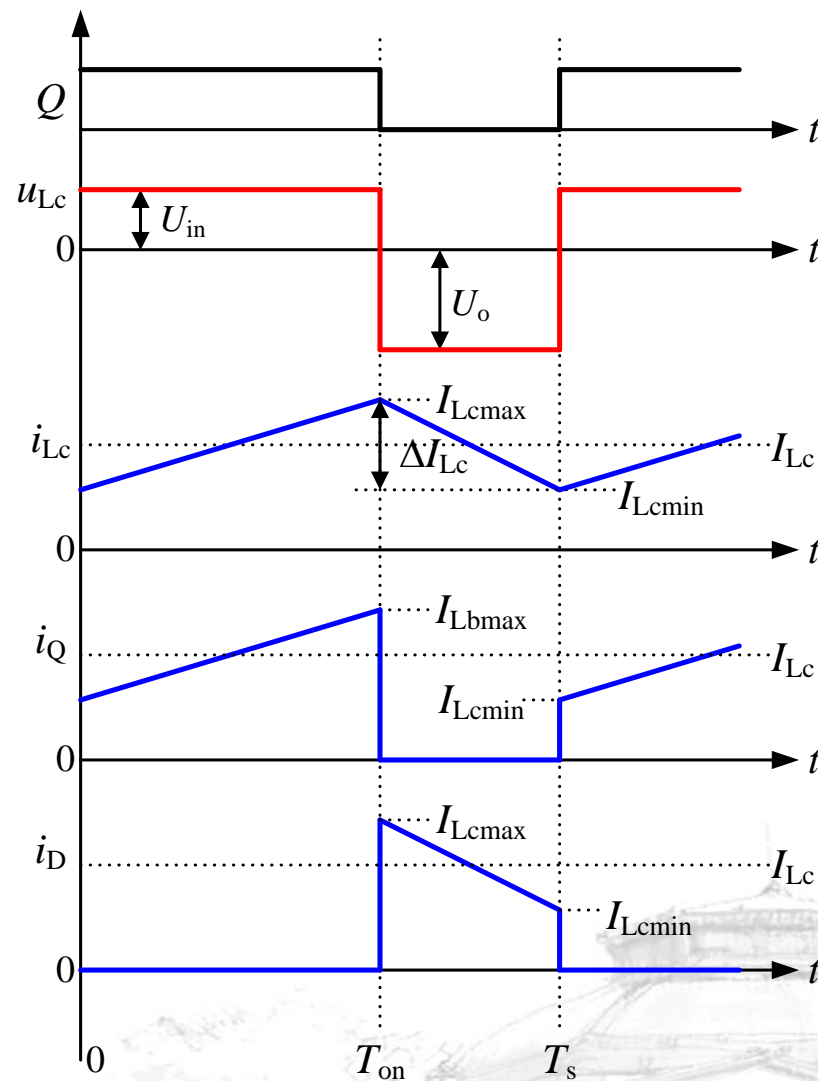
$$\Delta I_{Lc} = \frac{U_{in}}{L_c} D_y T_s$$

电感电流的最大值 I_{Lcmax} 和最小值 I_{Lcmin} 分别为:

$$I_{Lcmax} = I_{Lc} + \frac{\Delta I_{Lc}}{2} = \frac{1}{1-D_y} I_o + \frac{U_{in}}{2L_c} D_y T_s$$

$$I_{Lcmin} = I_{Lc} - \frac{\Delta I_{Lc}}{2} = \frac{1}{1-D_y} I_o - \frac{U_{in}}{2L_c} D_y T_s$$

式中, ΔI_{Lc} 为电感电流脉动量。





★ 4.3 Buck-Boost变换器

4.3.1 Buck-Boost变换器电路拓扑的推演

4.3.2 电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

4.3.3 电流断续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

4.3.4 Buck-Boost变换器的外特性与调节特性

4.3.5 Buck-Boost变换器的参数设计



Buck-Boost变换器的参数设计

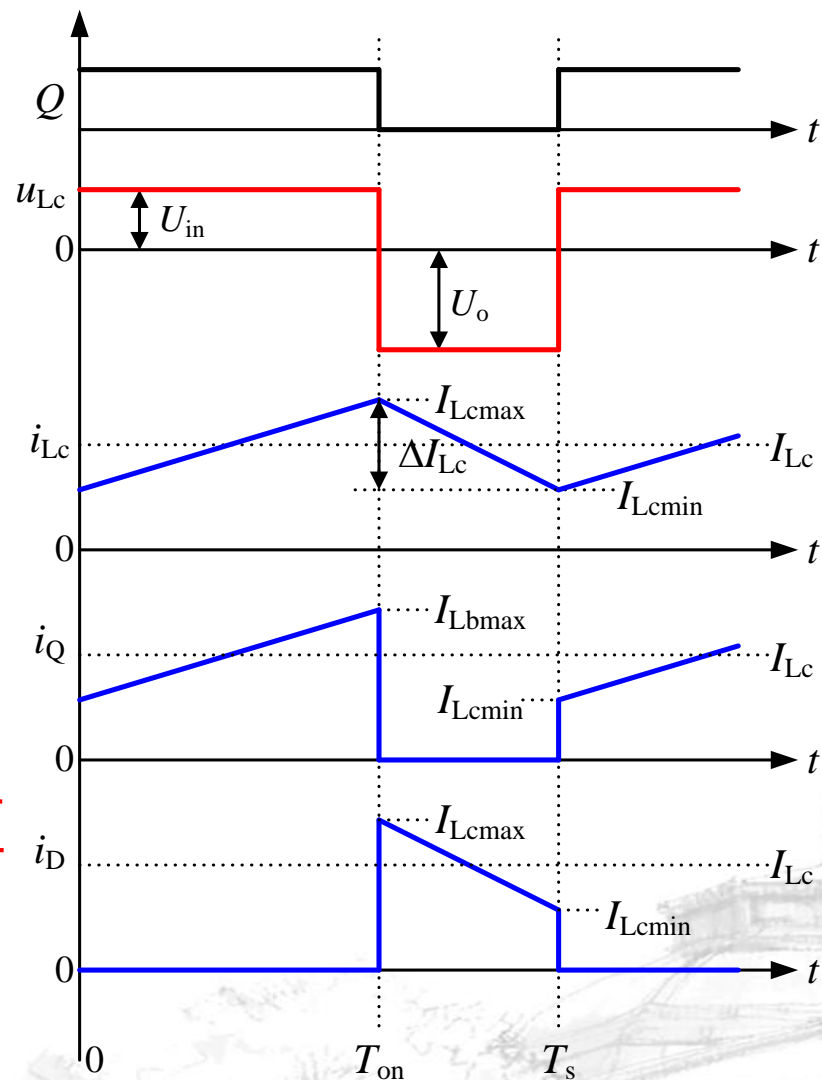
1. 开关管与续流二极管的电压和电流

- 开关管Q 和二极管D 的电压应力为：

$$U_Q = U_D = U_{in} + U_o$$

- 功率管电流为电感电流上升段。
- 二极管电流为电感电流下降段
- 功率管与二极管最大电流即为电感电流最大值

$$I_{Qmax} = I_{Dmax} = I_{Lcmax} = \frac{1}{1-D_y} I_o + \frac{U_{in}}{2L_c} D_y T_s$$



Buck-Boost变换器的参数设计

1. 开关管与续流二极管的电压和电流

开关管 Q 和二极管 D 的电流平均值分别为：

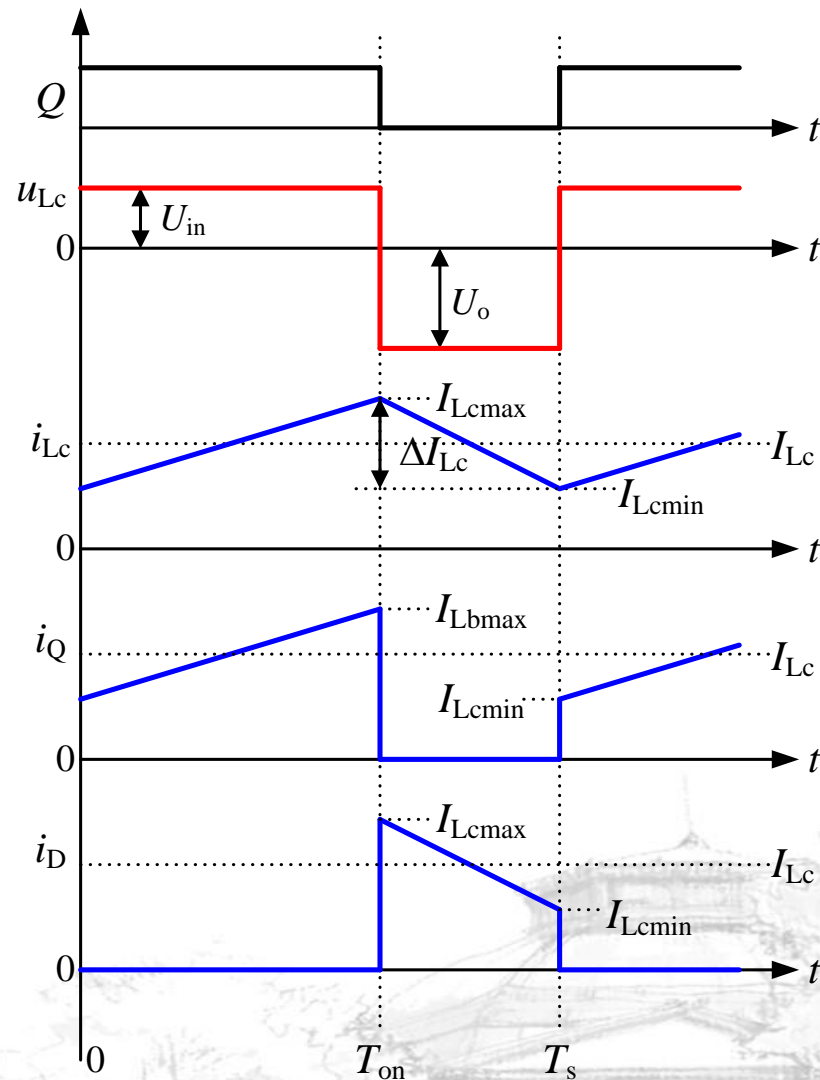
$$I_Q = D_y I_{Lc} = \frac{D_y}{1 - D_y} I_o$$

$$I_D = I_o$$

开关管 Q 和二极管 D 的电流有效值分别为：

$$I_{Qrms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{D_y T_s} i_Q^2 dt} = \sqrt{\left(\frac{I_o}{1 - D_y} \right)^2 + \frac{1}{12} \left[\frac{U_o}{L_c} (1 - D_y) T_s \right]^2} \sqrt{D_y}$$

$$I_{Drms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{D_y T_s}^{T_s} i_D^2 dt} = \sqrt{\left(\frac{I_o}{1 - D_y} \right)^2 + \frac{1}{12} \left[\frac{U_o}{L_c} (1 - D_y) T_s \right]^2} \sqrt{1 - D_y}$$



2. 电感量

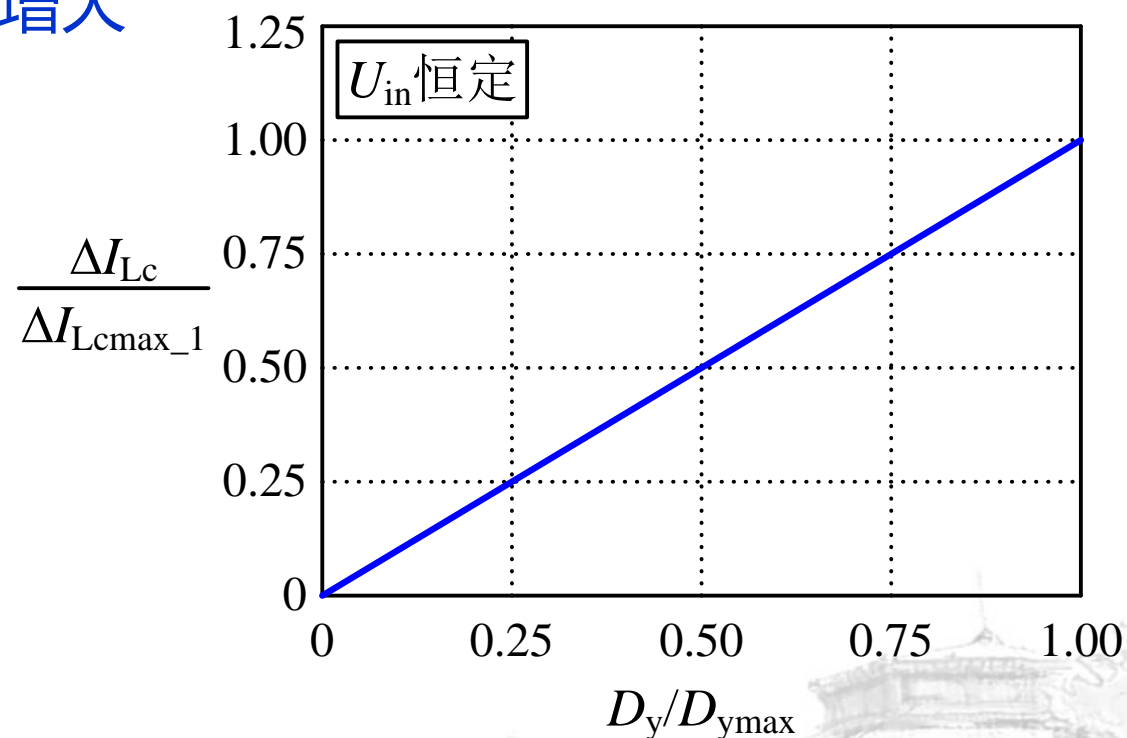
在输入电压不变条件下纹波电流随占空比增大而变大，在最大占空比处有最大脉动电流

为：

$$\Delta I_{L_{cmax_1}} = \frac{U_{in}}{L_c} D_{y_{max}} T_s$$

电感根据最大允许电流脉动设计：

$$L_c = \frac{U_{in}}{\Delta I_{L_{cmax_permit}}} D_{y_{max}} T_s$$



2. 电感量

在输出电压不变下，有：

$$\Delta I_{Lc} = \frac{U_o}{L_c} \frac{U_{in}}{U_{in} + U_o} T_s \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta I_{Lc} = \frac{U_{in}}{L_c} D_y T_s \\ \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{D_y}{1 - D_y} \end{array} \right.$$

纹波电流在 $U_{in} = U_{inmax}$ 处最大：

$$\Delta I_{Lcmax_2} = \frac{U_o}{L_c} \frac{U_{inmax}}{U_{inmax} + U_o} T_s$$

得到纹波电流随 U_{in} 变化曲线

$$\frac{\Delta I_{Lc}}{\Delta I_{Lcmax_2}} = \frac{\frac{U_{in}}{U_o}}{\frac{U_{in}}{U_o} + 1} \frac{\frac{U_{inmax}}{U_o} + 1}{\frac{U_{inmax}}{U_o}}$$

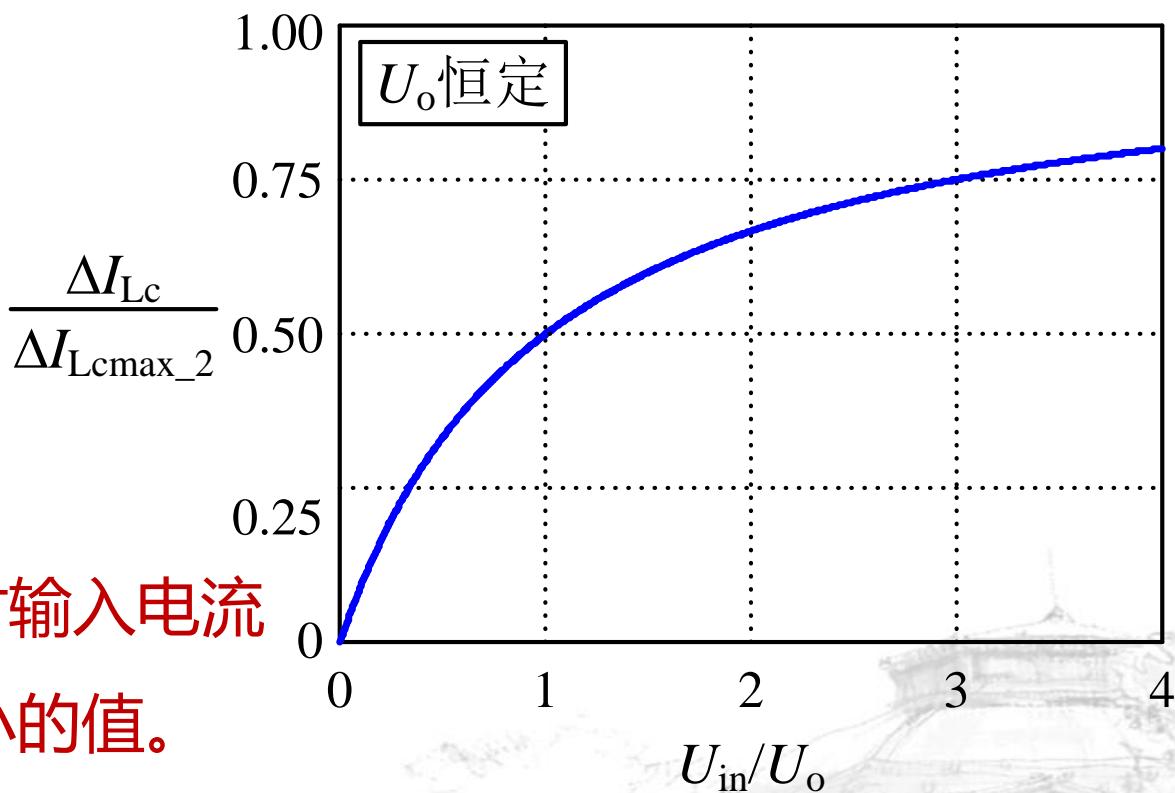


2. 电感量

根据最大允许脉动电流设计电感：

$$L_c = \frac{U_o}{\Delta I_{Lcmax_permit}} \frac{U_{inmax}}{U_{inmax} + U_o} T_s$$

实际工程中，一般选取 ΔI_{Lcmax} 为额定输出时输入电流的20%，也可根据实际情况选取更大或更小的值。



3. 滤波电容容量

Q 导通时，滤波电容 C_f 放电；当 Q 截止时， C_f 充电。输出电压脉动 ΔU_o 可用 C_f 放电时的电压下降量来表示，而放电电流为输出电流 I_o ，因此 ΔU_o 的表达式为：

$$\Delta U_o = \frac{I_o}{C_f} D_y T_s$$

可得滤波电容容量为为：
$$C_f = \frac{I_o D_y T_s}{\Delta U_o}$$

根据所允许的输出电压脉动值 ΔU_o ，可以由上式计算出滤波电容容量。





本节内容

止於至善

- 升降压电路的构成和工作原理
注意电路的电感位置
- CCM时升降压电路的电压变换关系推导
电感电流变化量相等（或伏秒平衡）
- CRM的 I_G 定义和推导
- DCM的输出电压推导和波形分析
- 元器件参数的设计



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU