

电气精品教材丛书

“十三五”江苏省高等学校重点教材

工业和信息化部“十四五”规划教材

电力电子技术 · Power Electronics

第4章 非隔离直流变换器

2023/11/10





★ 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



Buck变换器电路拓扑的推演

■ 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。

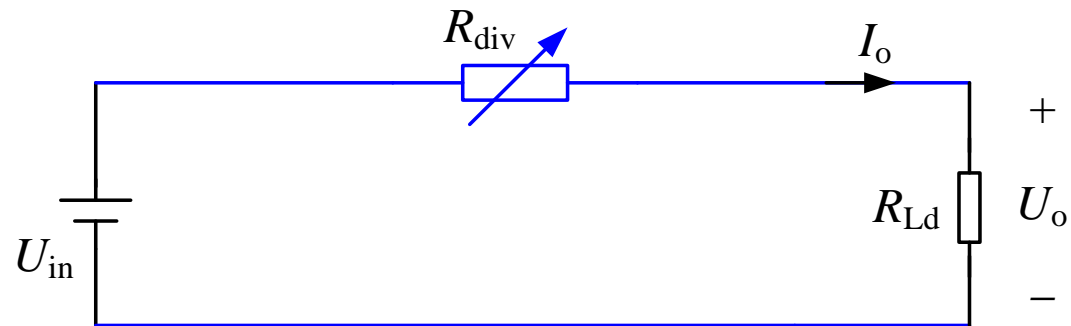


图4.2 电阻分压电路

- 缺点1：效率低
- 缺点2：无法自动调压



Buck变换器电路拓扑的推演

■ 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

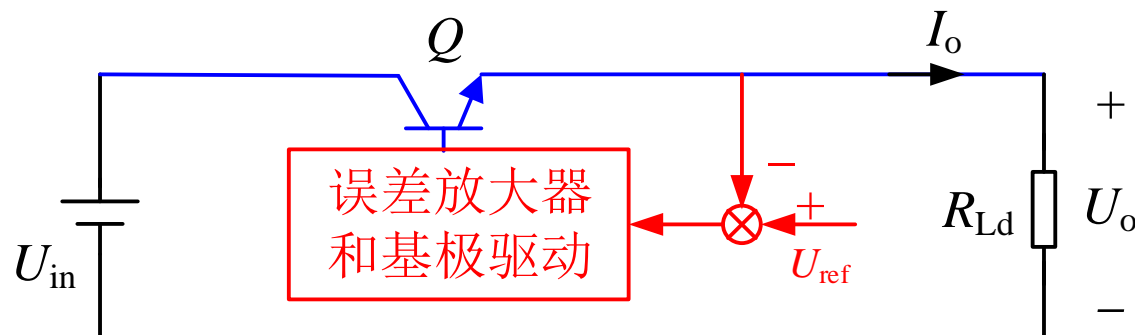


图4.3 线性调节器

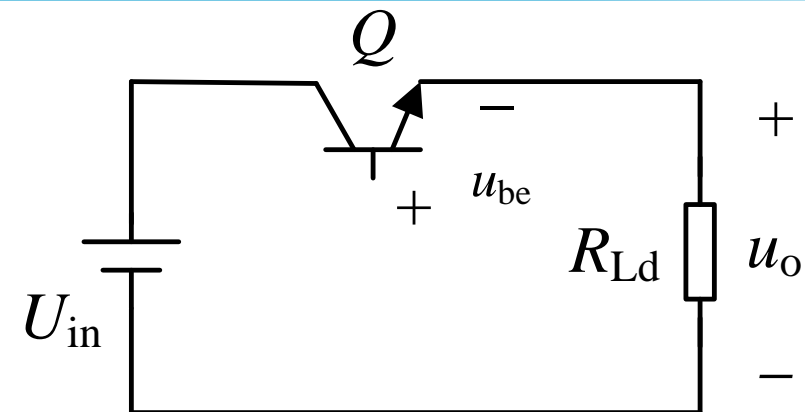
- 缺点：效率低
- 优点：可自动调压

Buck变换器电路拓扑的推演

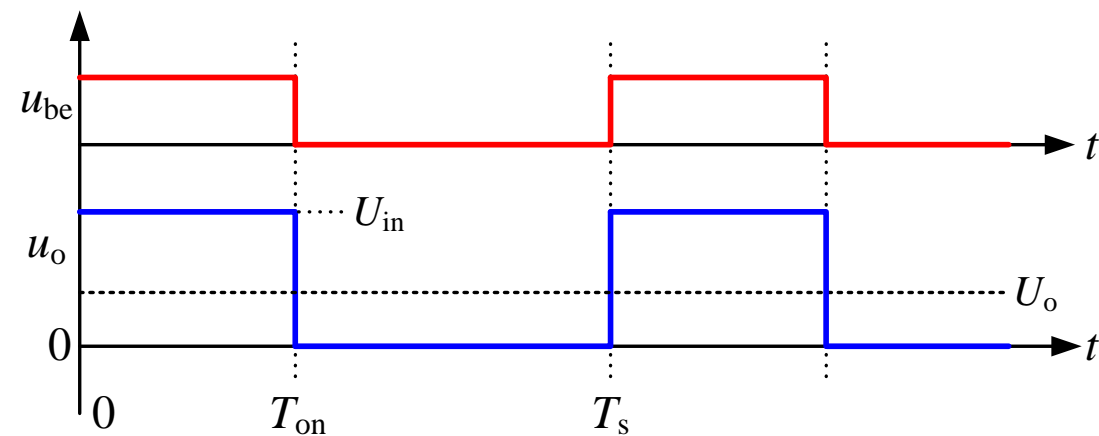
高效率的开关变换器

■ 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

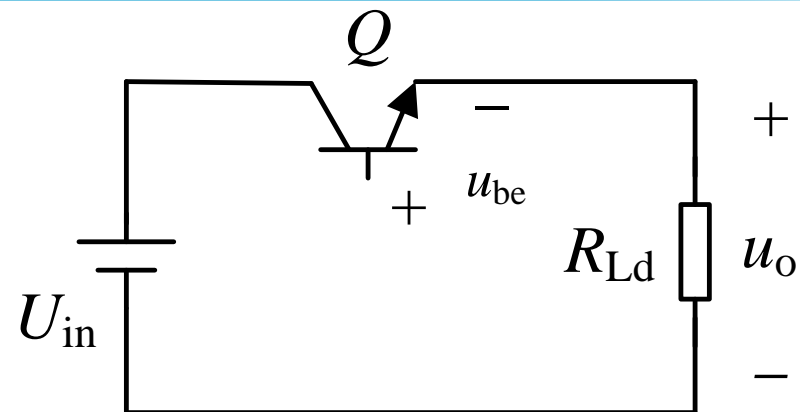
■ 基本工作原理

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：

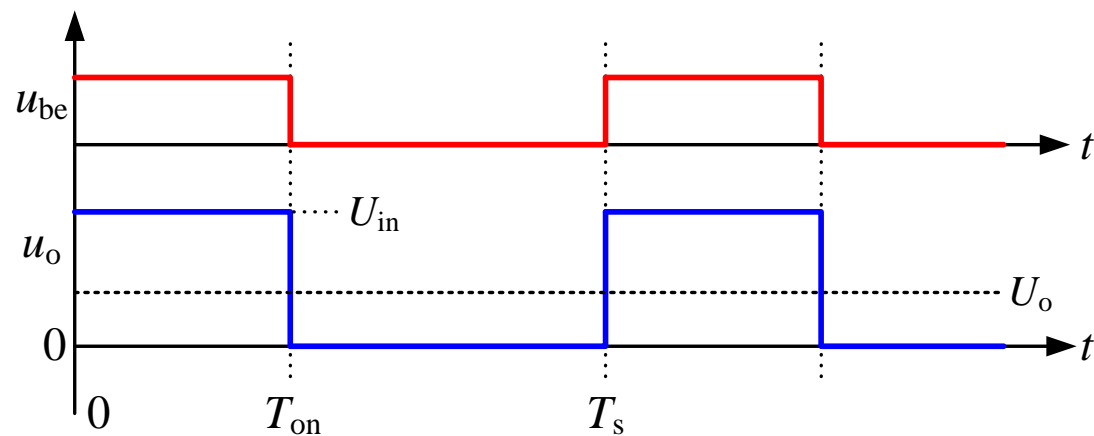
$$U_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_o dt = \frac{1}{T_s} U_{\text{in}} T_{\text{on}} = D_y U_{\text{in}}$$

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

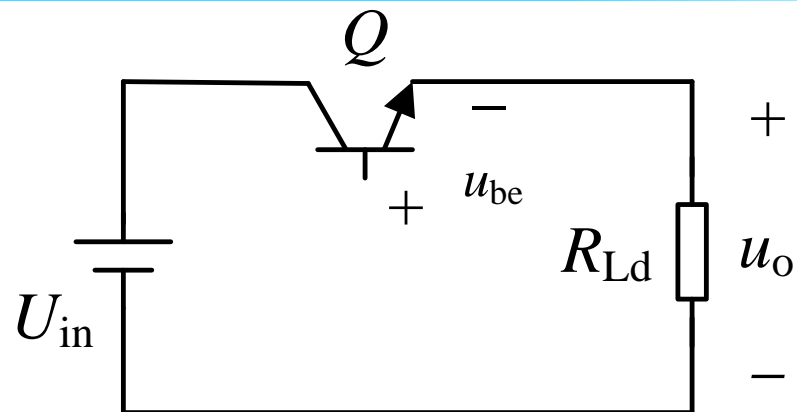


思考

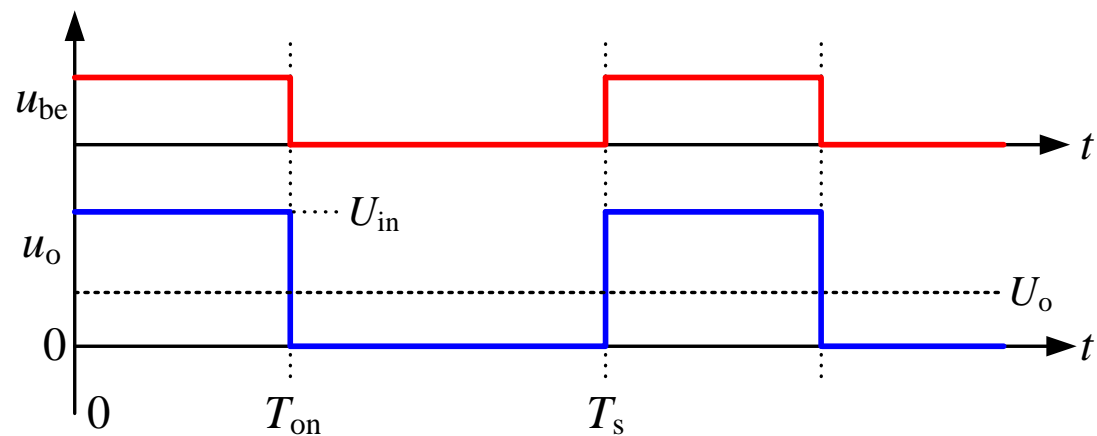
■ 开关变换器的输出供电

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

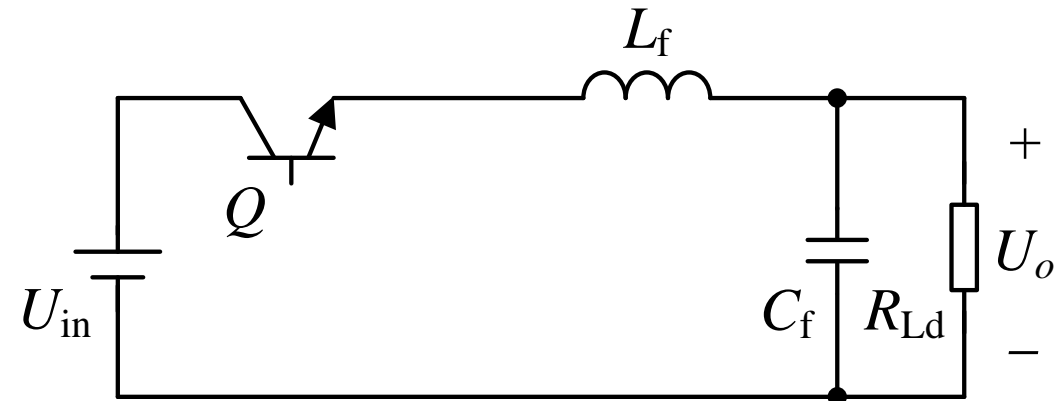
Buck变换器电路拓扑的推演

BUCK变换器

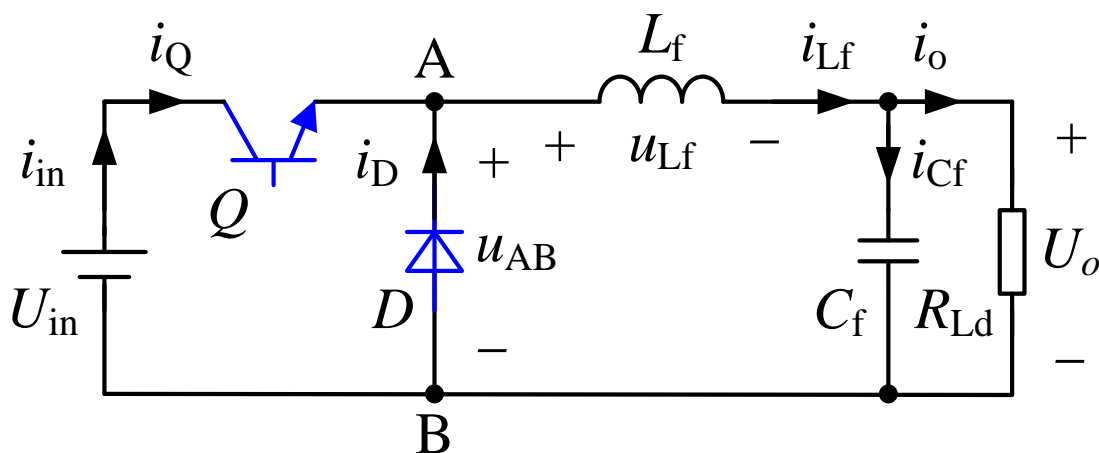
■ 推演过程

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。



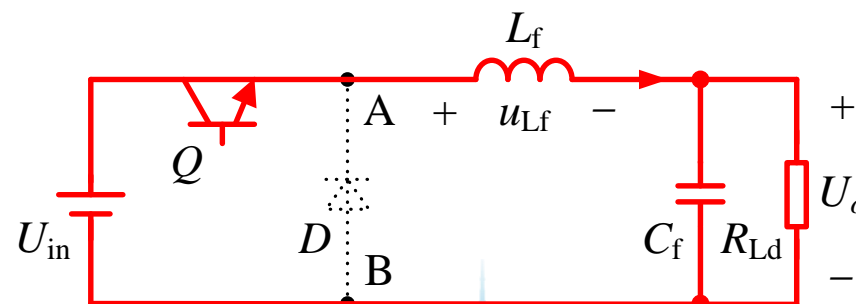
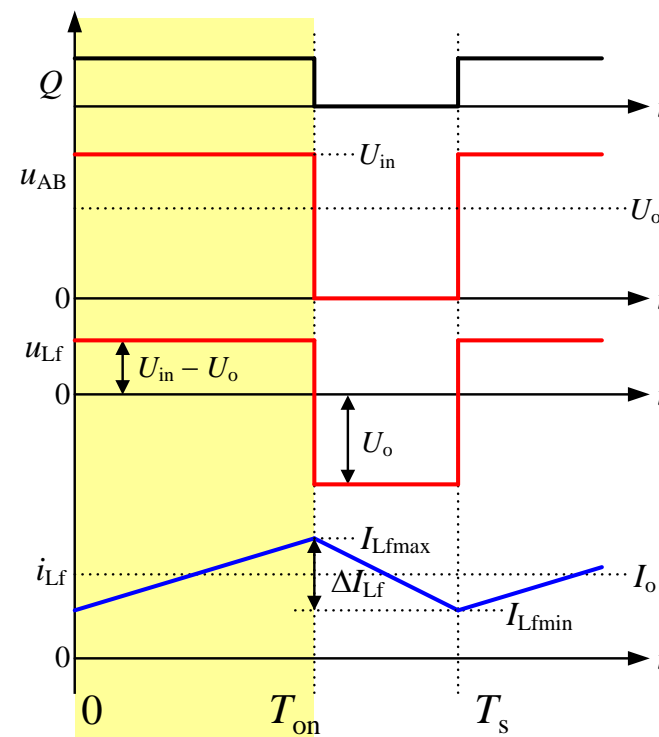
电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

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 $u_{L_f} = U_{in} - U_o$, 那么有:

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

■ 因为 U_o 低于 U_{in} , 故滤波电感电流 i_{L_f} 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}

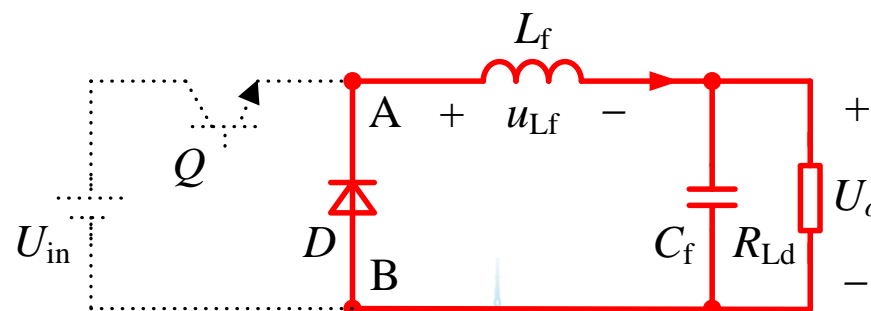
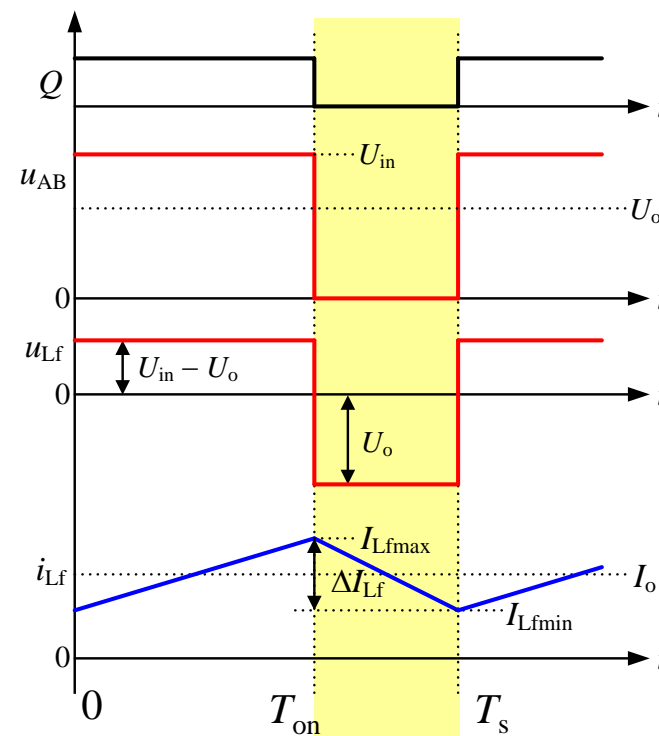
通过二极管 D 续流，如图所示。此时，

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

那么有：

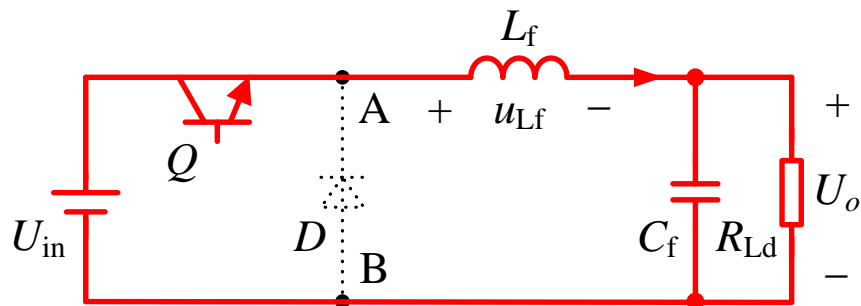
$$L_f \frac{di_{L_f}}{dt} = -U_o \quad (4.4)$$

- 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。

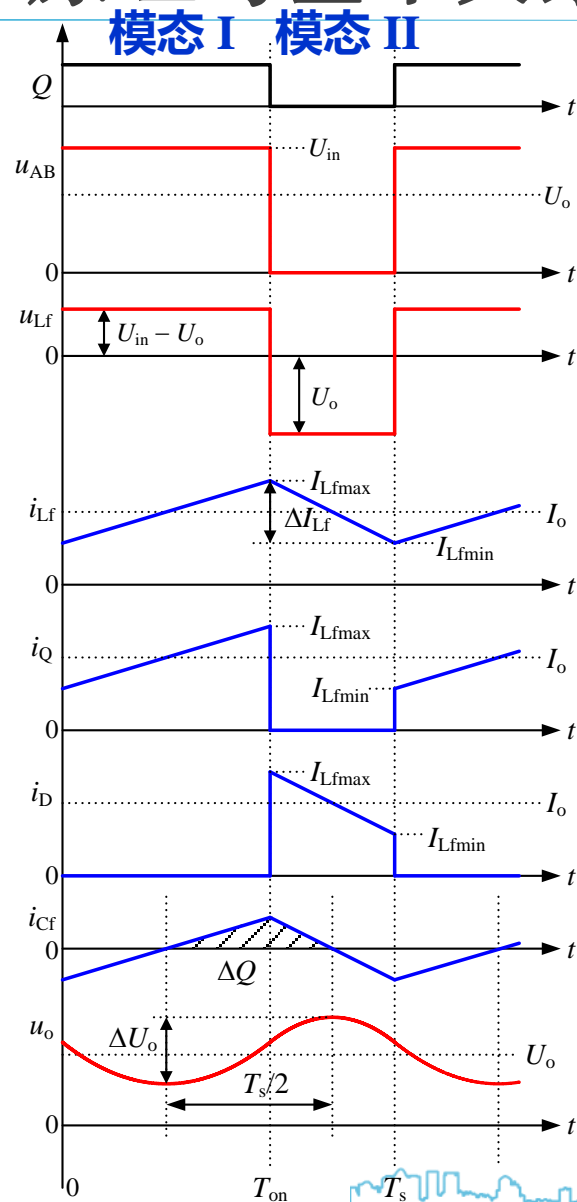
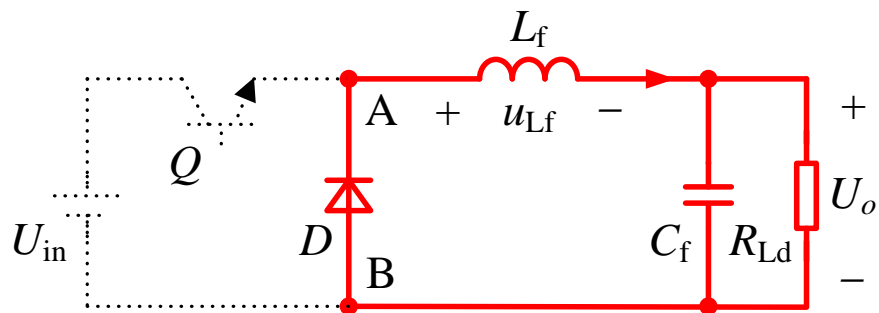


电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

1. 工作原理——模态 I



2. 工作原理——模态 II



电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

2. 基本关系

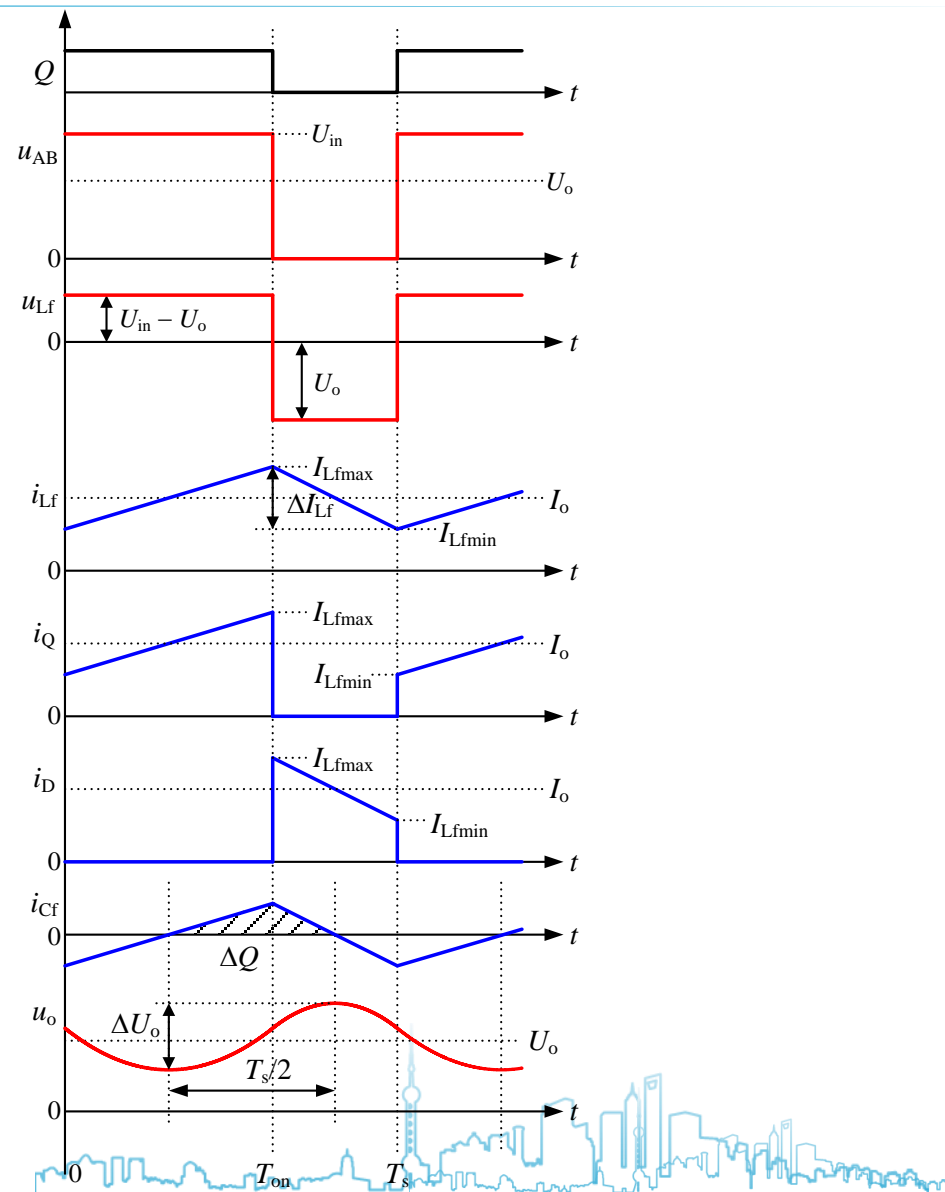
一个开关周期内， i_{L_f} 在 Q 导通期间的增长量等于 Q 截止期间的减小量 $I_{L_f}(T_s) = I_{L_f}(0)$ 。

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

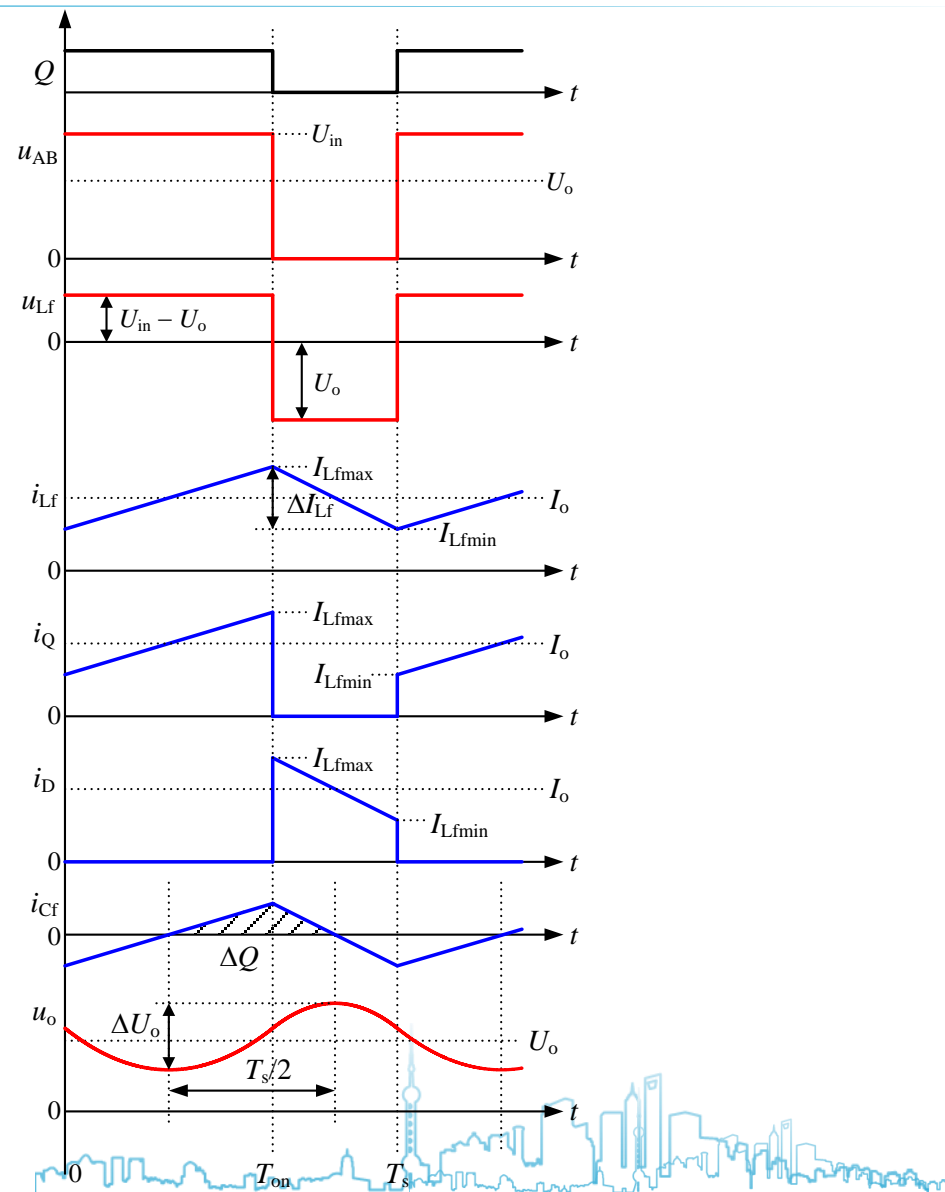
2. 基本关系

根据伏秒积平衡有：

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

由上式可得：

$$\frac{U_{\text{o}}}{U_{\text{in}}} = D_y \quad (4.8)$$



电流连续时Buck变换器的工作原理与基本关系

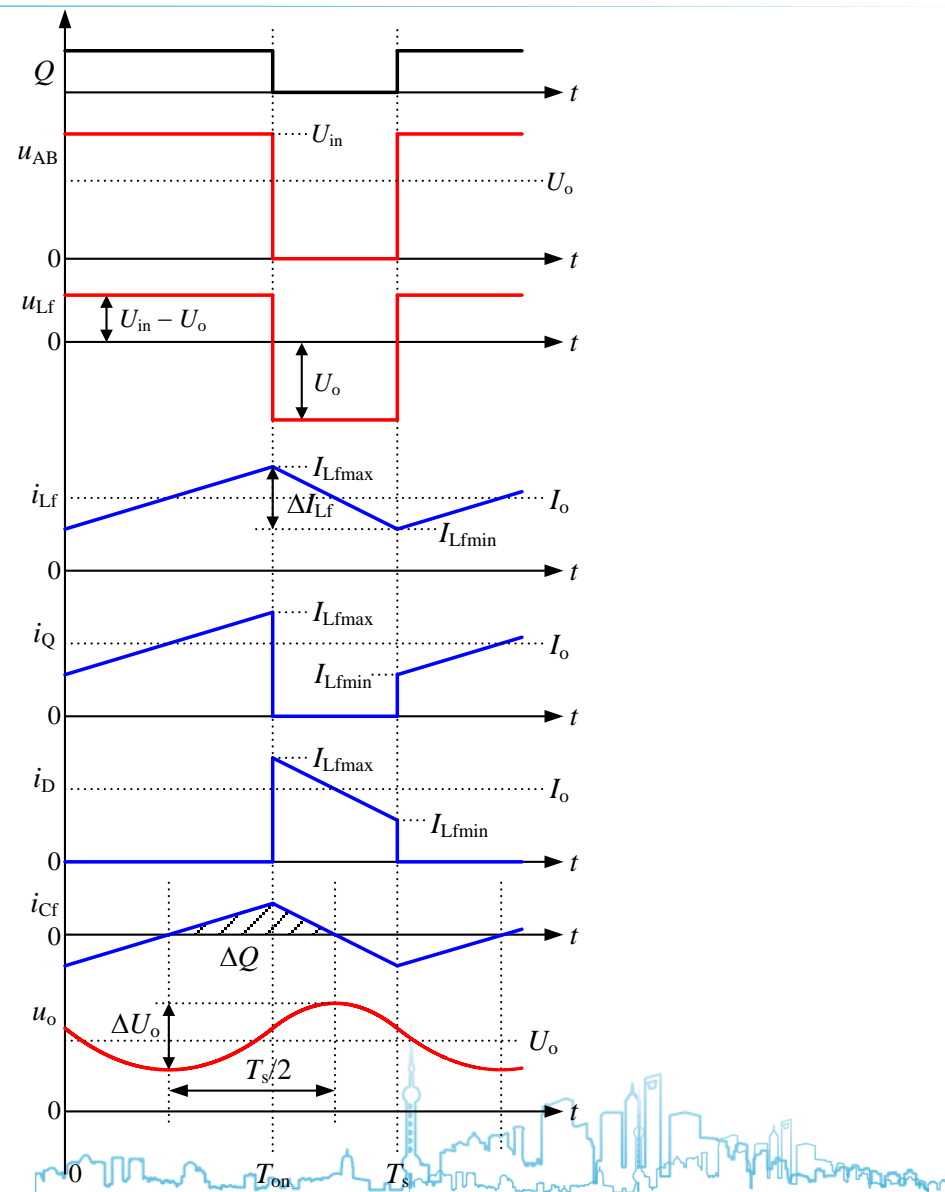
2. 基本关系

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

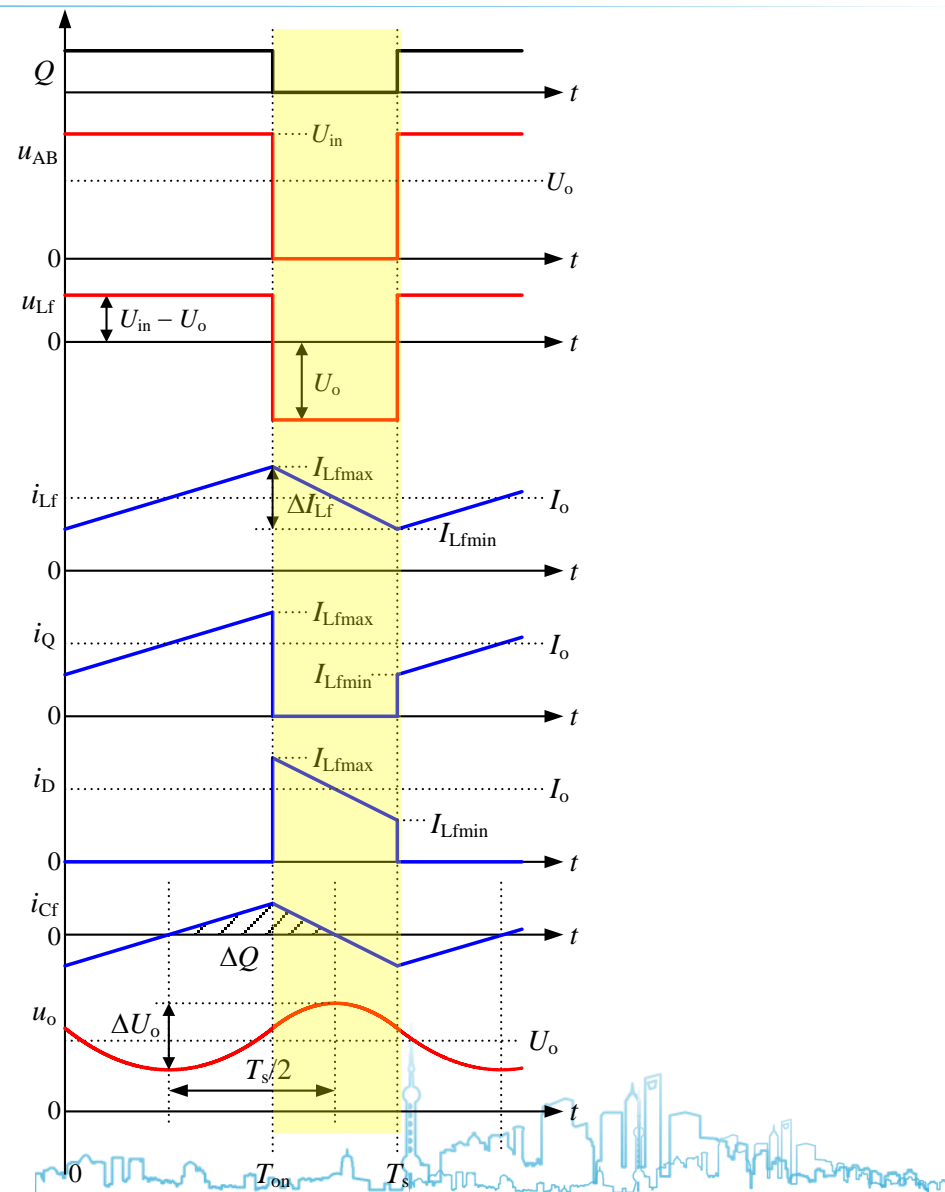
根据安秒积平衡，稳态时滤波电容平均电流为零，故Buck变换器的输出电流 I_o 等于 i_{Lf} 的平均值，即：

$$I_o = (I_{Lfmin} + I_{Lfmax})/2$$

滤波电感电流的最大值 I_{Lfmax} 和最小值 I_{Lfmin} 分别为：

$$I_{Lfmax} = I_o + \frac{\Delta I_{Lf}}{2} = I_o + \frac{U_o}{2L_f} \cdot (1 - D_y) T_s$$
$$I_{Lfmin} = I_o - \frac{\Delta I_{Lf}}{2} = I_o - \frac{U_o}{2L_f} \cdot (1 - D_y) T_s$$

式中， ΔI_{Lf} 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

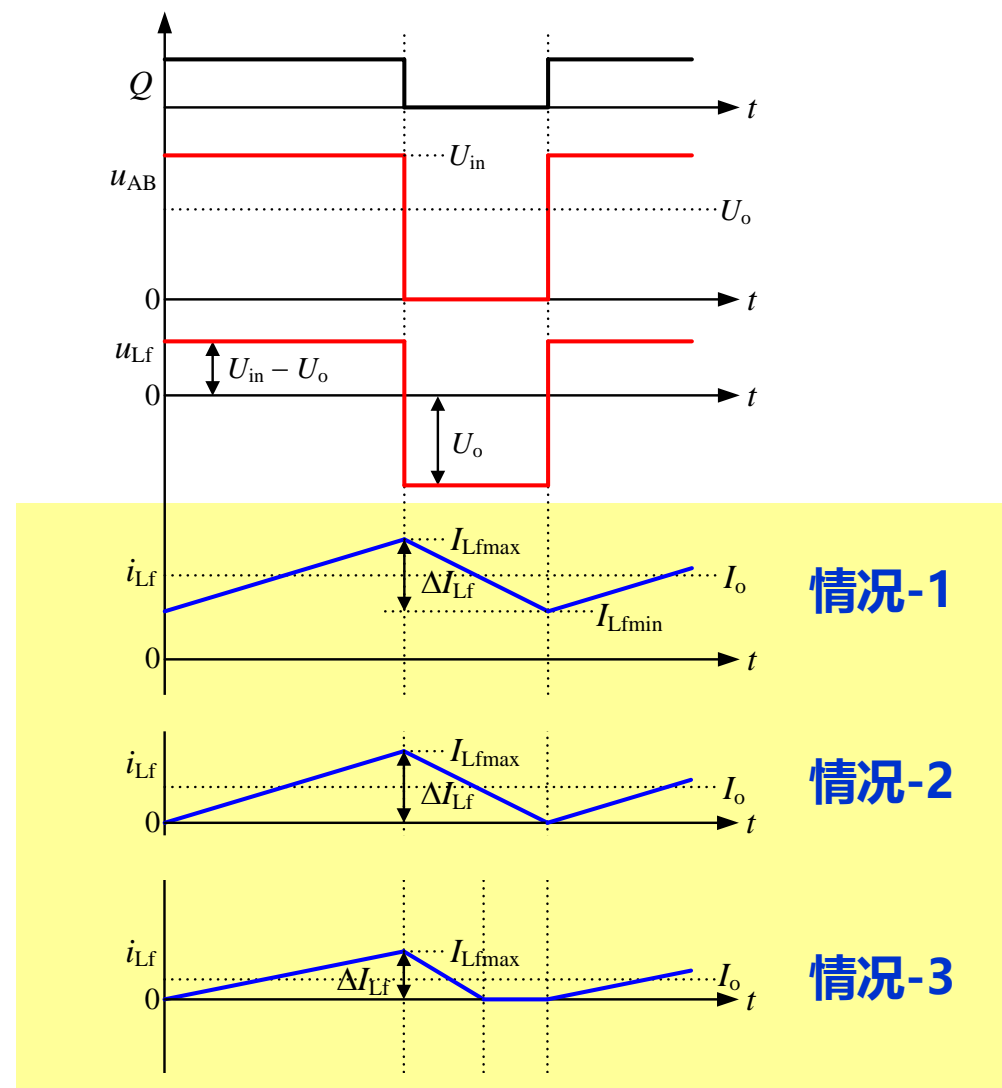
4.1.4 Buck变换器的外特性与调节特性

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

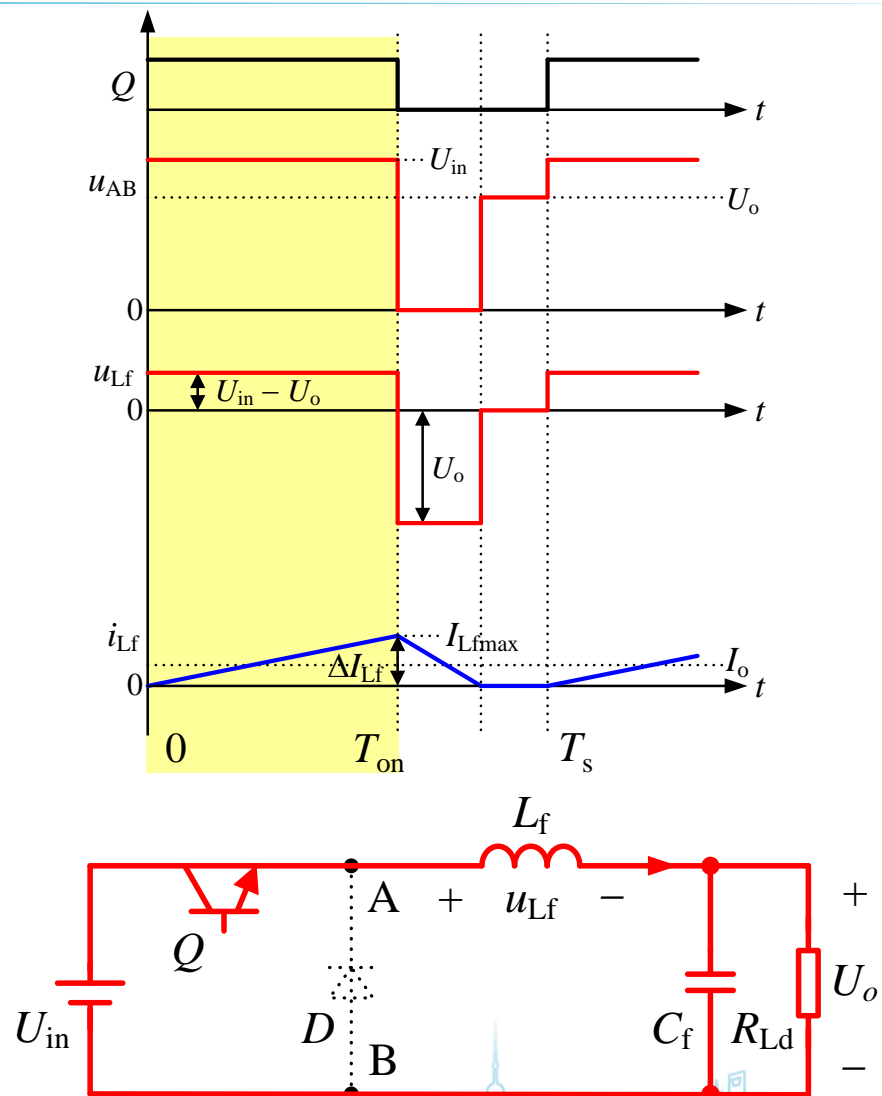
1. 工作原理——模态 I

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：

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



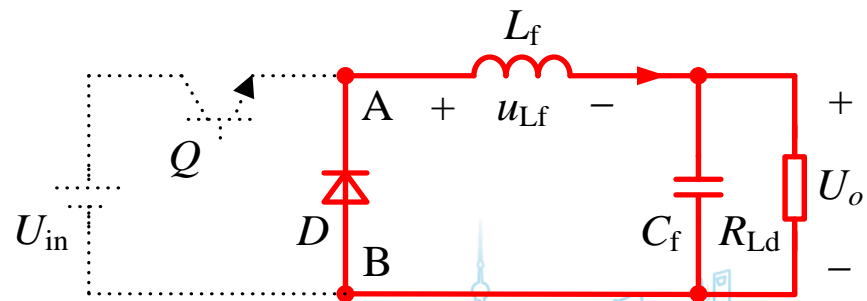
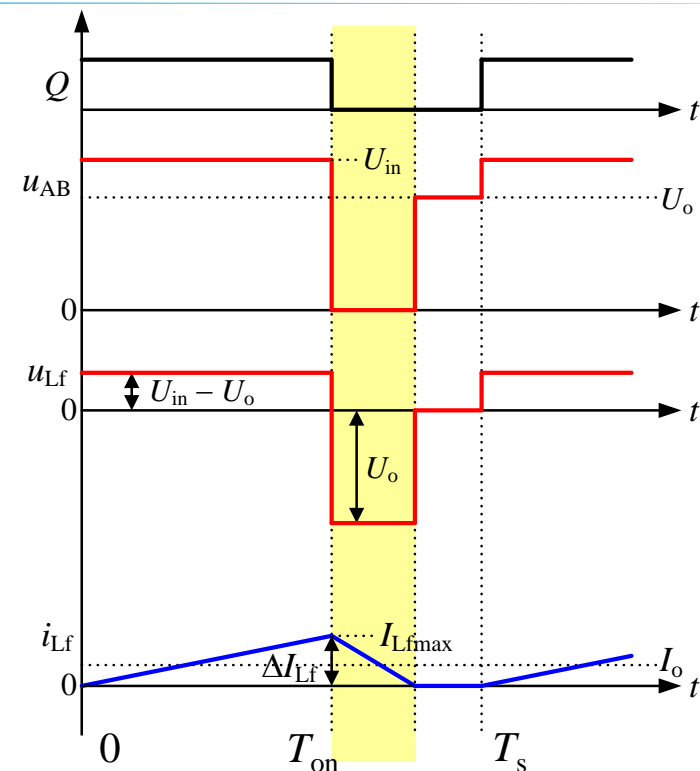
电流断续时Buck变换器的工作原理与基本关系

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:

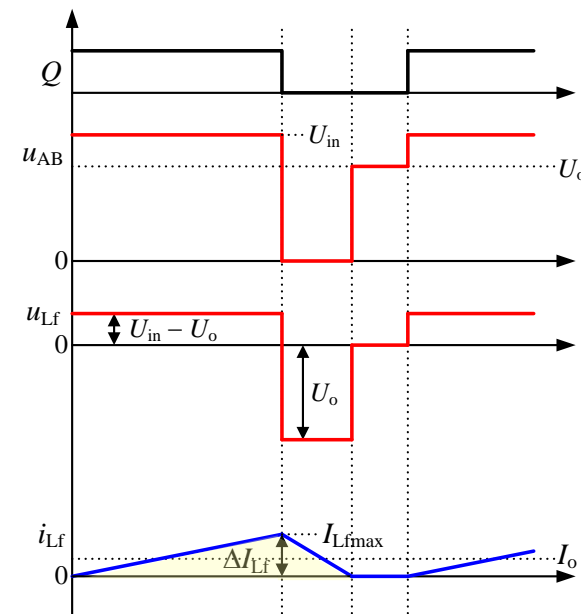
$$D_r = \frac{U_{in} - U_o}{U_o} D_y \quad (4.16)$$

输出电流同样等于滤波电感电流平均值:

$$I_o = \frac{1}{T_s} \cdot \frac{1}{2} I_{Lfmax} (T_{on} + T'_{off}) = \frac{1}{2} I_{Lfmax} (D_y + D_r) \quad (4.17)$$

将式(4.14)和式(4.16)代入式(4.17), 可得:

$$U_o = \frac{U_{in}^2}{\frac{2L_f I_o}{D_y^2 T_s} + U_{in}} \quad (4.18)$$



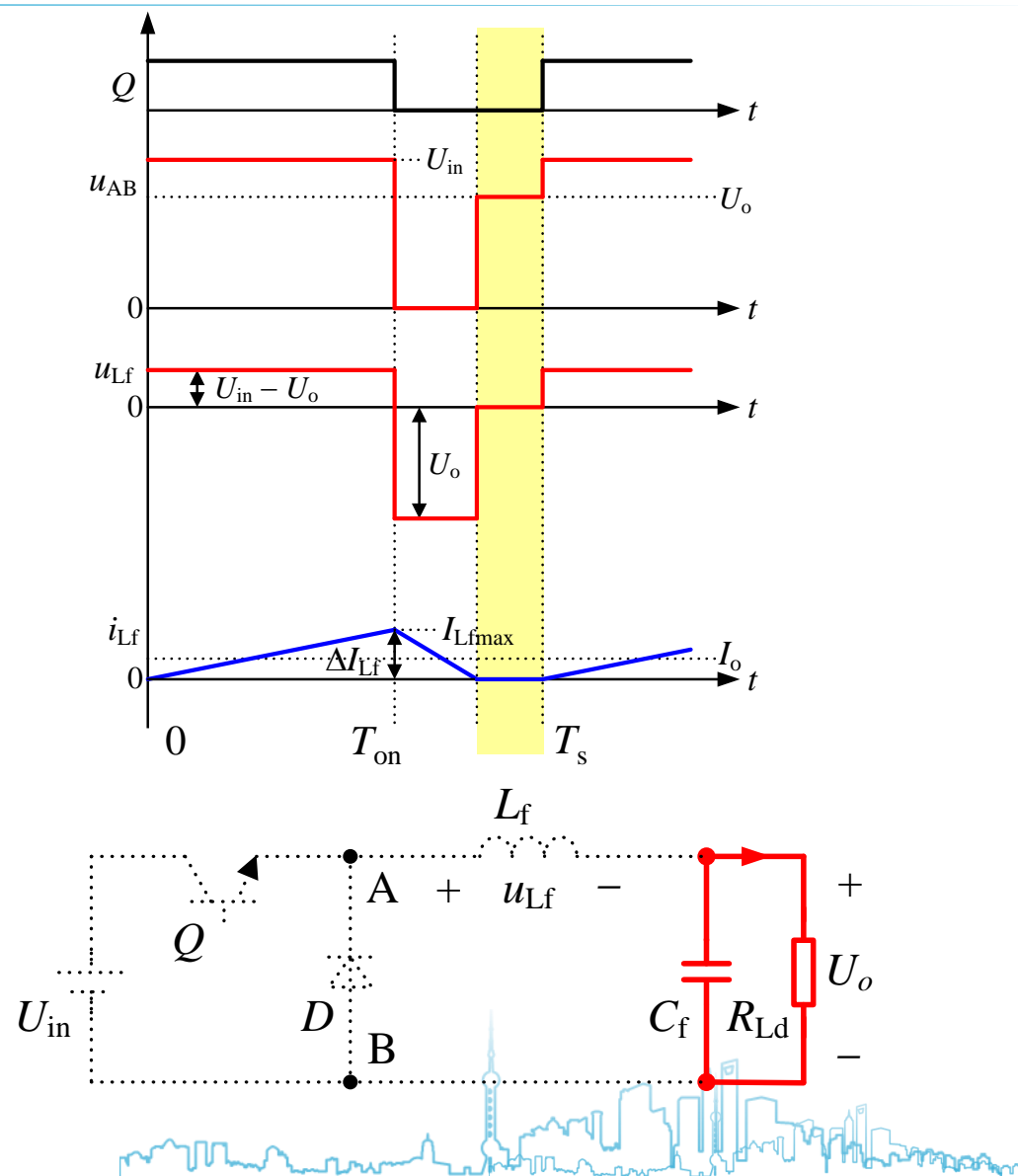
■ 式(4.18)表明, 电流断续时, 输出电压 U_o 不仅与占空比 D_y 有关, 而且与输出电流 I_o 有关。若 $I_o=0$, 则不论 D_y 多大, 必有 $U_o = U_{in}$ 。

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



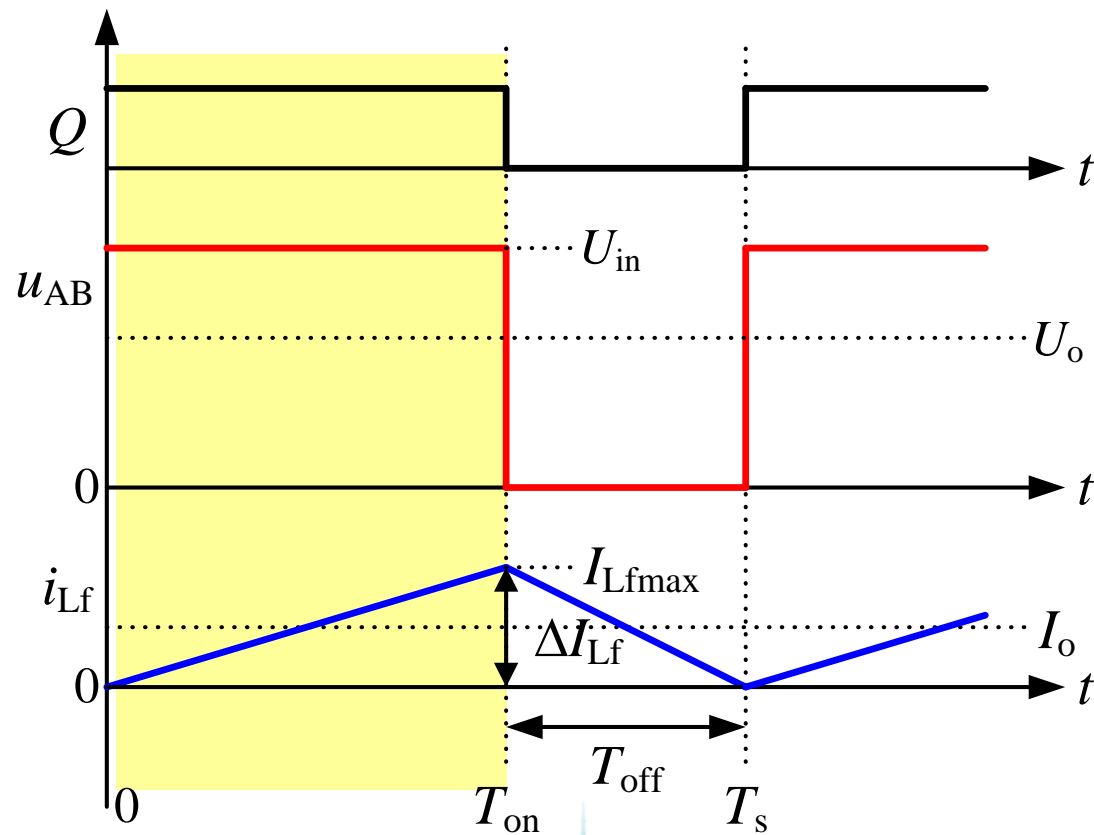
Buck变换器的外特性与调节特性

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：

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



Buck变换器的外特性与调节特性

2. 输入电压恒定不变时Buck变换器的外特性

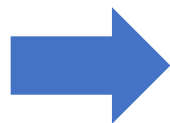
Buck变换器的外特性：是指当输入电压 U_{in} 恒定不变时，在某一占空比 D_y 下，输出电压 U_o 与输出电流 I_o 的关系式，

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：

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



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



Buck变换器的外特性与调节特性

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:

$$\frac{I_{oG}}{I_{oGmax}} = 4(1 - D_y) D_y \quad (4.22)$$

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:

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



Buck变换器的外特性与调节特性

2. 输入电压恒定不变时Buck变换器的外特性

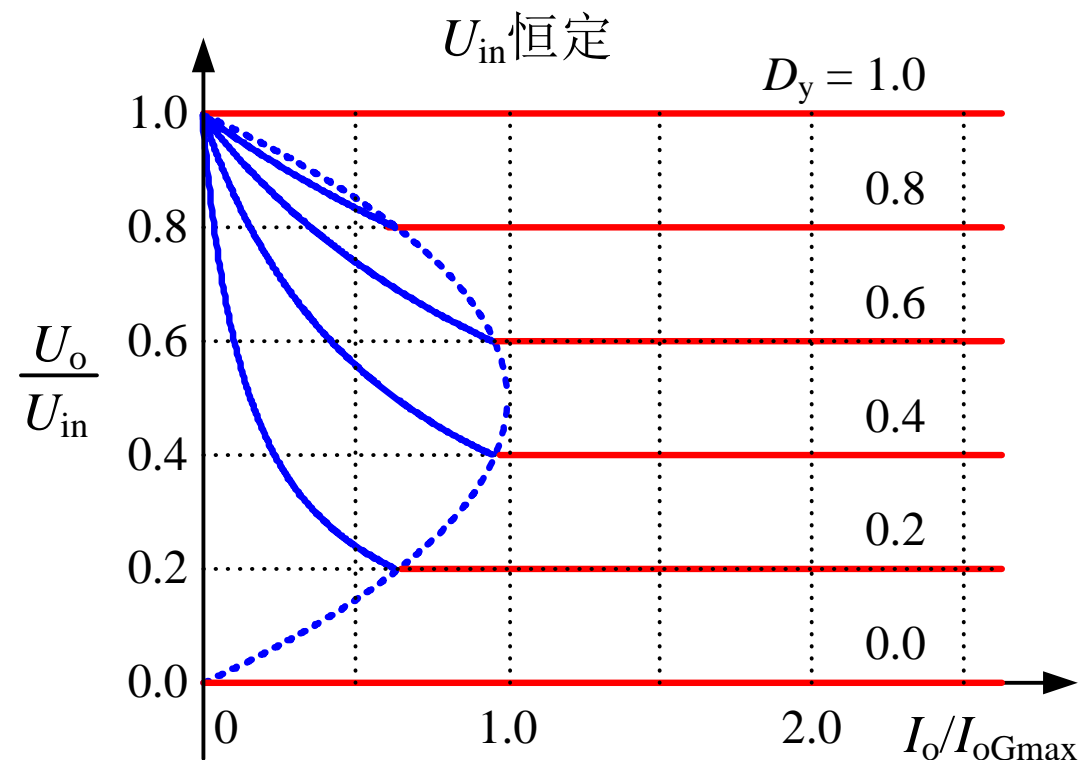
根据式(4.8)和式(4.23)，可以写出 U_{in} 恒定不变时Buck变换器的外特性表达式

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

Buck变换器的外特性与调节特性

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



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



Buck变换器的参数设计

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)



Buck变换器的参数设计

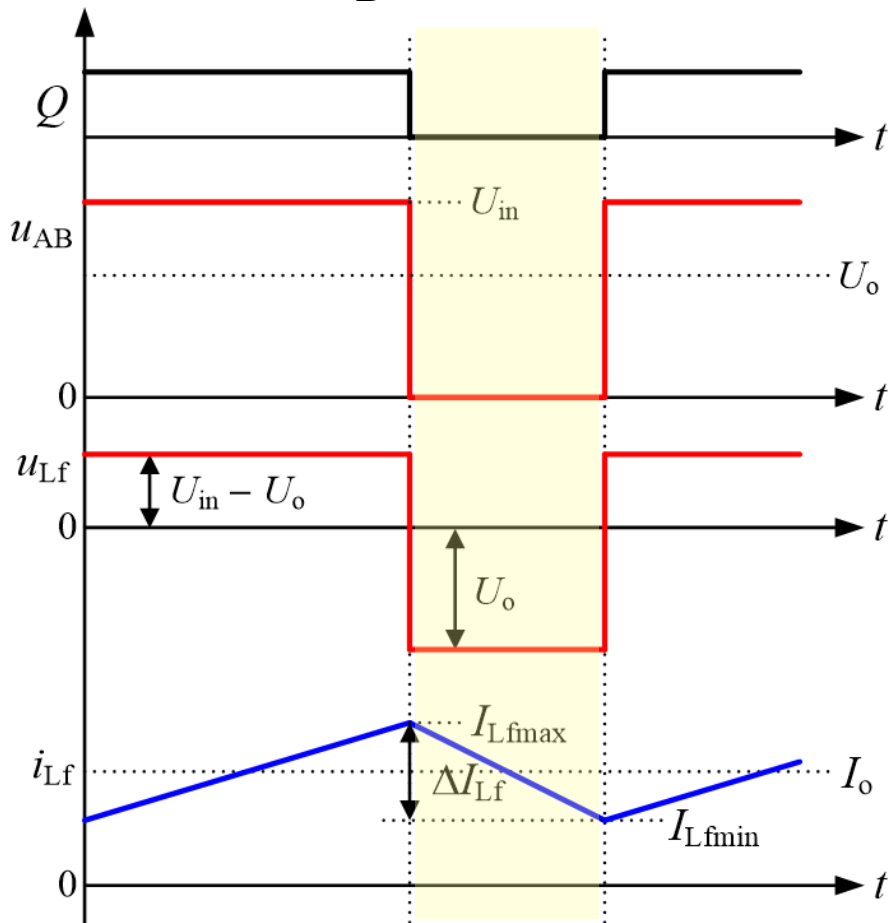
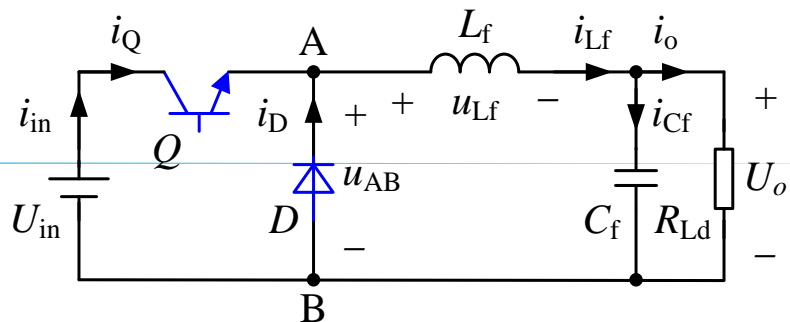
3. 开关管与续流二极管的电压和电流

- 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

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



Buck变换器的参数设计

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：

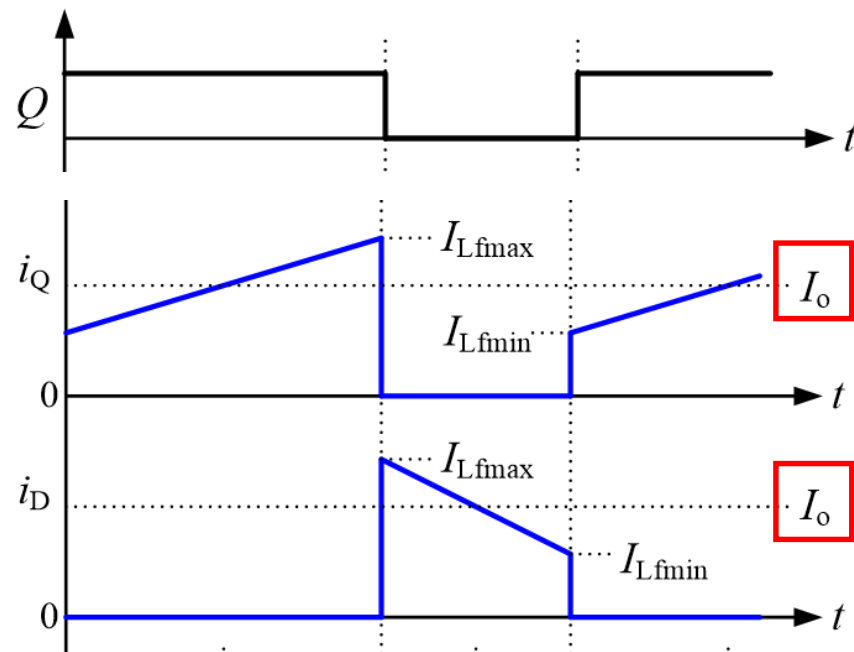
$$I_Q = D_y I_o$$

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

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

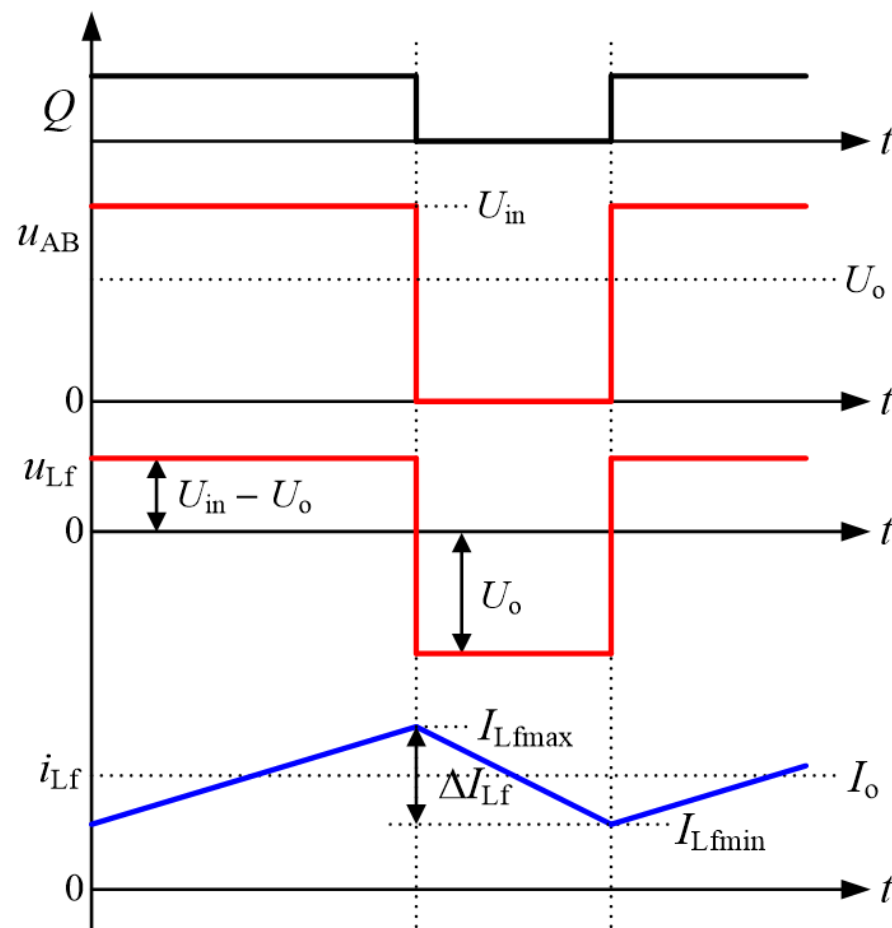
$$\Delta I_{L_f} = \frac{U_{in}}{L_f} (1 - D_y) D_y T_s \quad (4.37)$$

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:

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

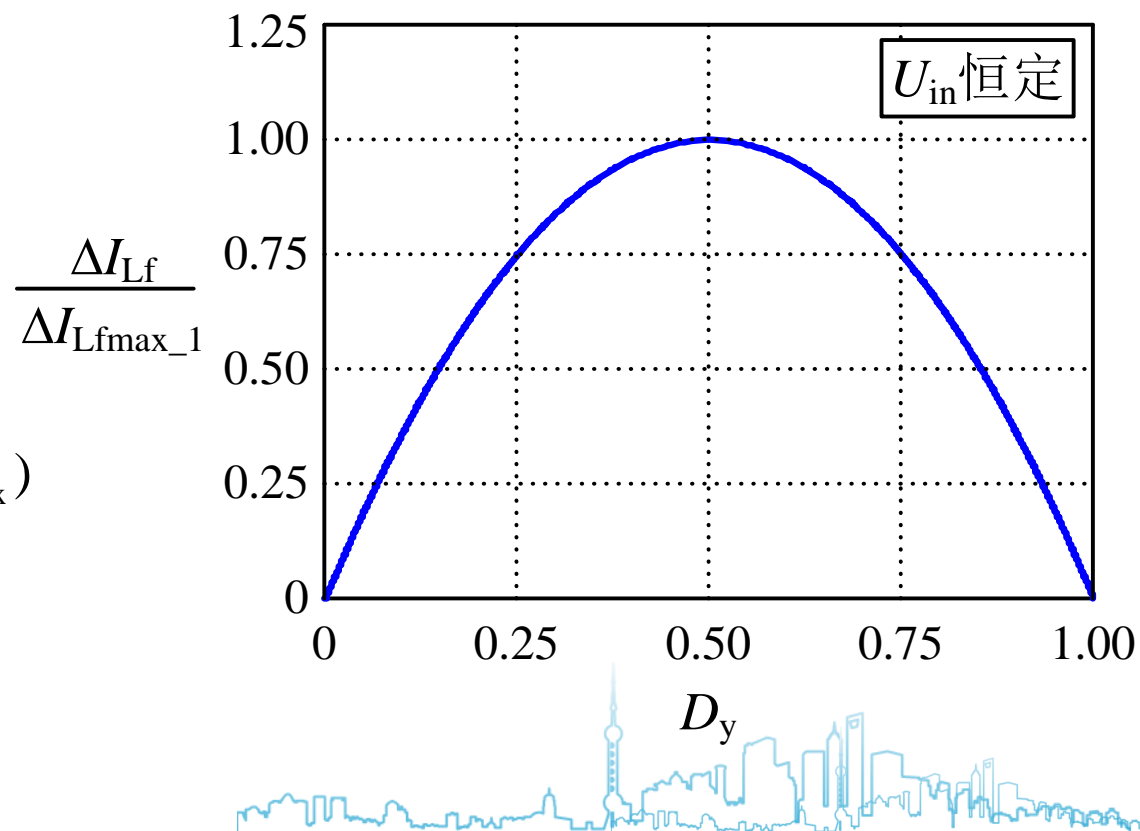


Buck变换器的参数设计

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

$$L_f = \begin{cases} \frac{U_{in}}{\Delta I_{L_{fmax_permit}}} (1 - D_{y_{max}}) D_{y_{max}} T_s & (D_y \leq 0.5) \\ \frac{U_{in}}{\Delta I_{L_{fmax_permit}}} (1 - D_{y_{min}}) D_{y_{min}} T_s & (D_y \geq 0.5) \\ \frac{U_{in}}{4\Delta I_{L_{fmax_permit}}} T_s & (D_{y_{min}} \leq 0.5 \leq D_{y_{max}}) \end{cases}$$



Buck变换器的参数设计

5. 滤波电容容量

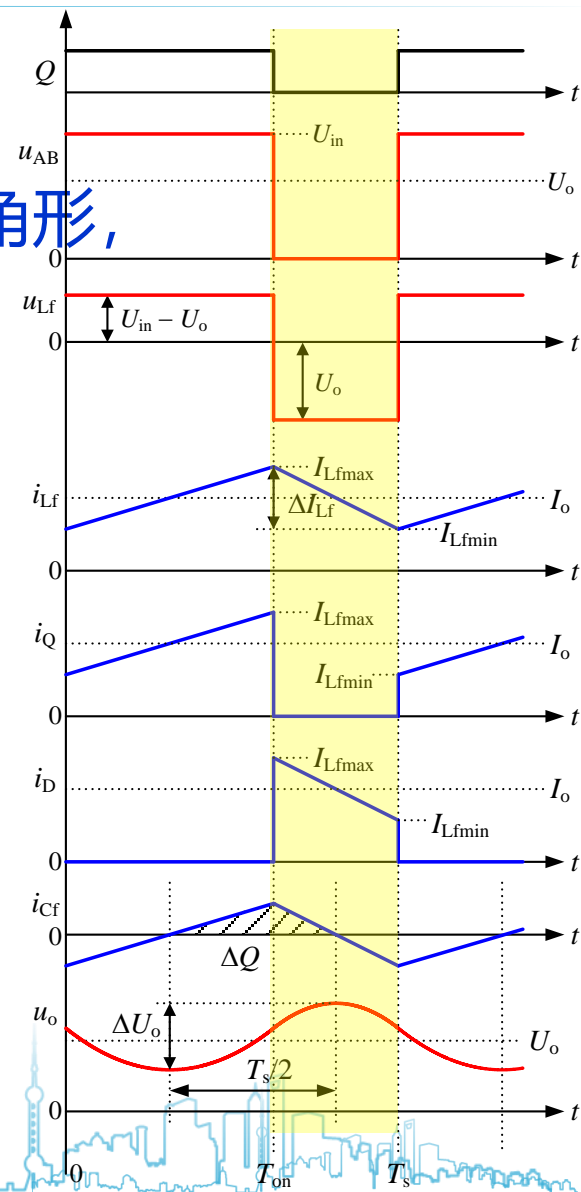
滤波电容 C_f 在一个开关周期内的充电电荷 ΔQ 。阴影部分是一个三角形，其高为 $\Delta I_{Lf}/2$ ，底为 $T_s/2$ 。因此， ΔQ 的表达式为：

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

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：
$$C_f = \frac{(1-D_y)U_o}{8L_f f_s^2 \Delta U_o}$$



Buck变换器的参数设计



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：

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



|| 本章内容

- 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

4.4 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



★ 4.2 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

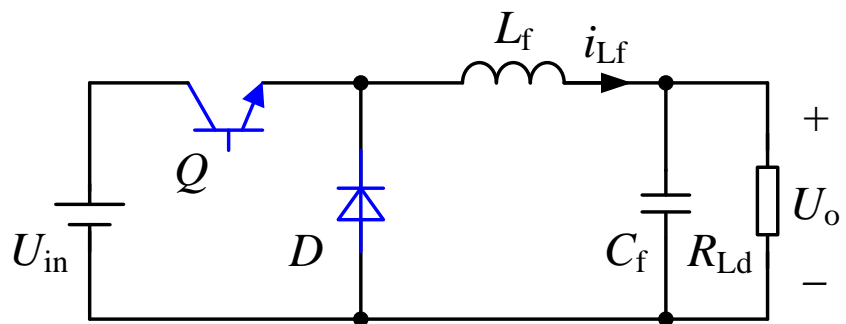
4.2.5 Boost变换器的参数设计



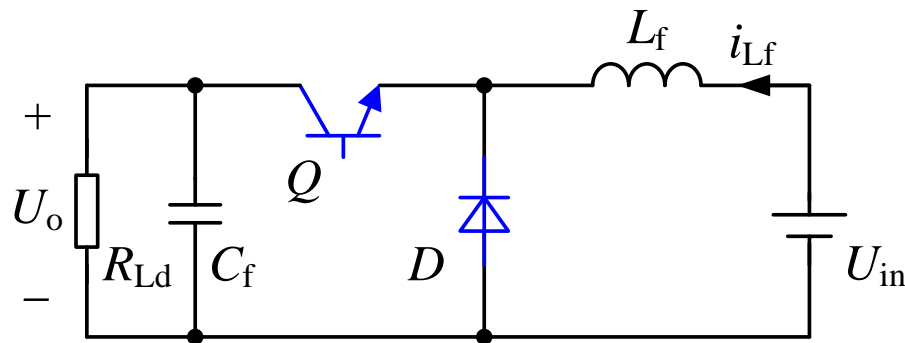
Boost变换器电路拓扑的推演



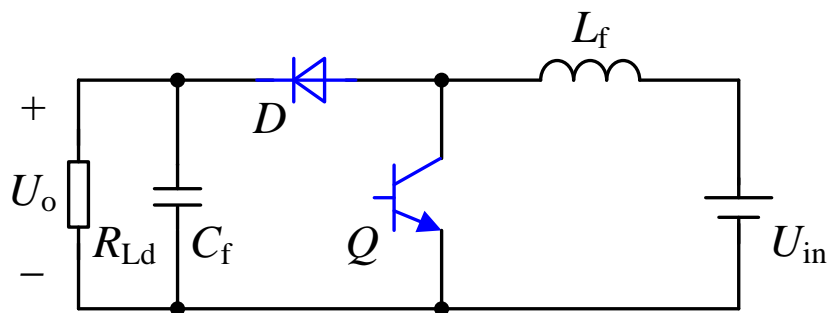
电路推演过程



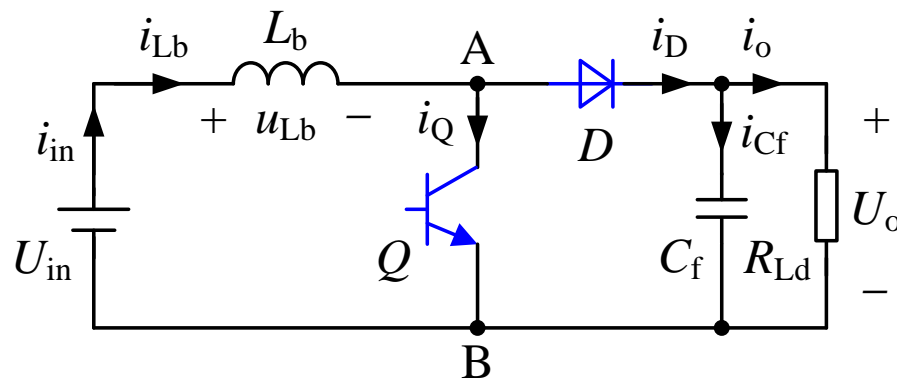
(a) Buck变换器



(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



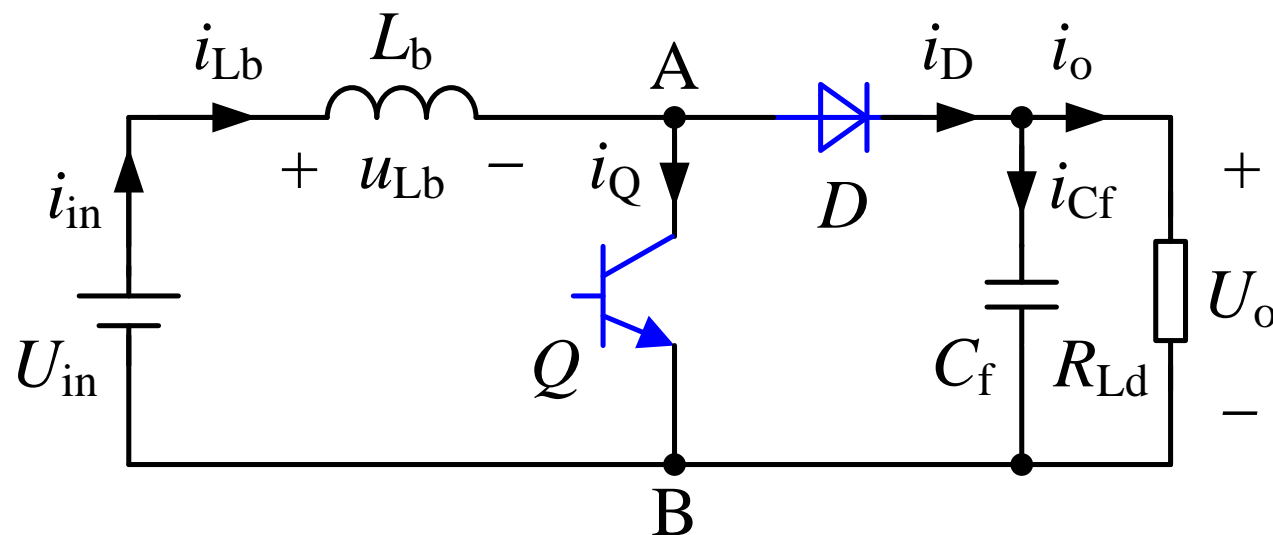
电路推演过程

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



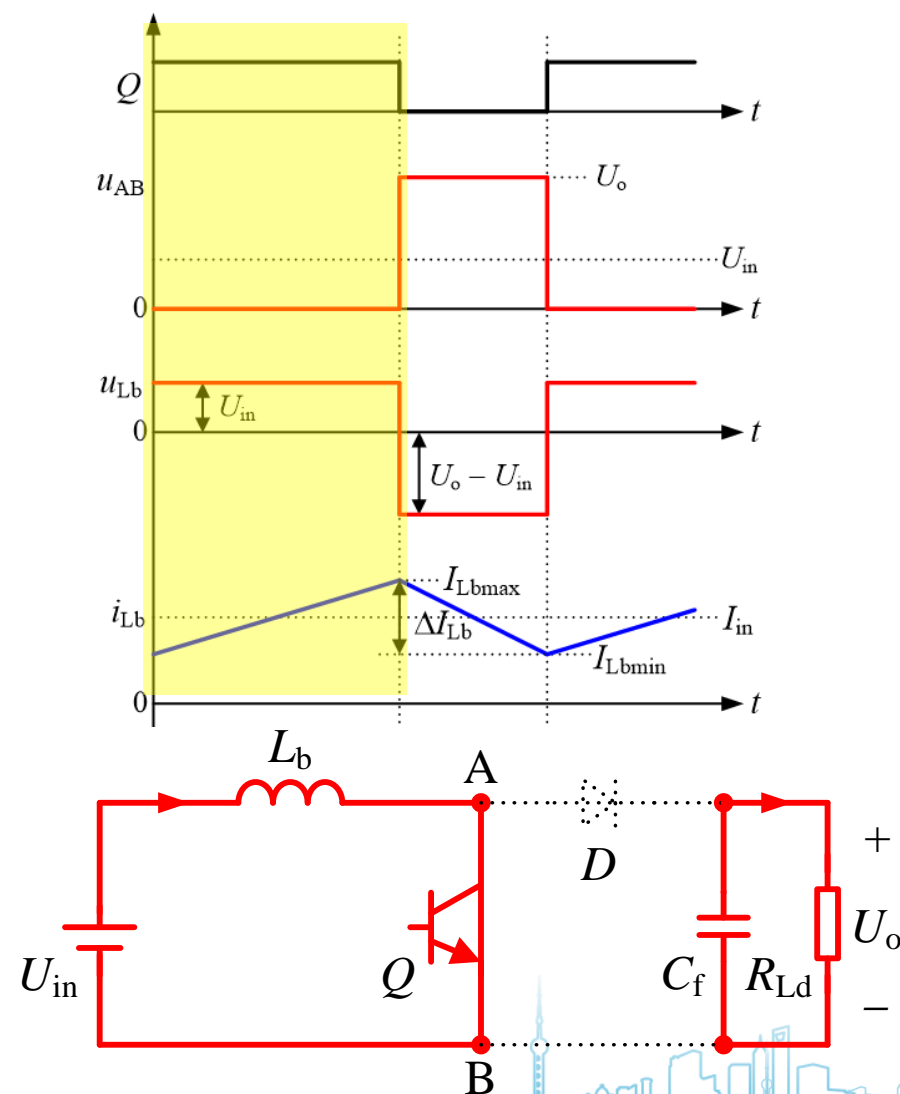
电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

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



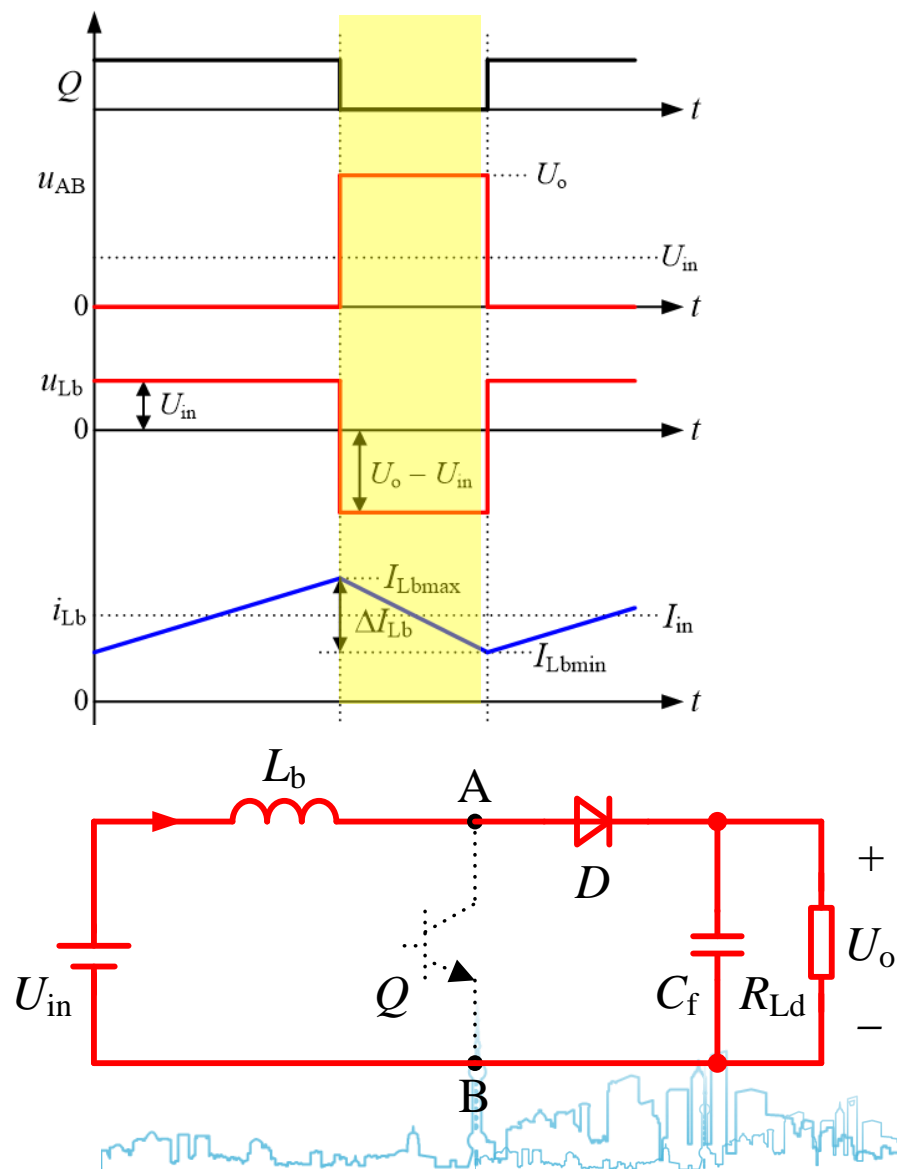
电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

1. 工作模态II

在 $t = T_{\text{on}}$ 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 $u_{Lb} = U_{\text{in}} - U_o$, 那么有:

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

- 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。



电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

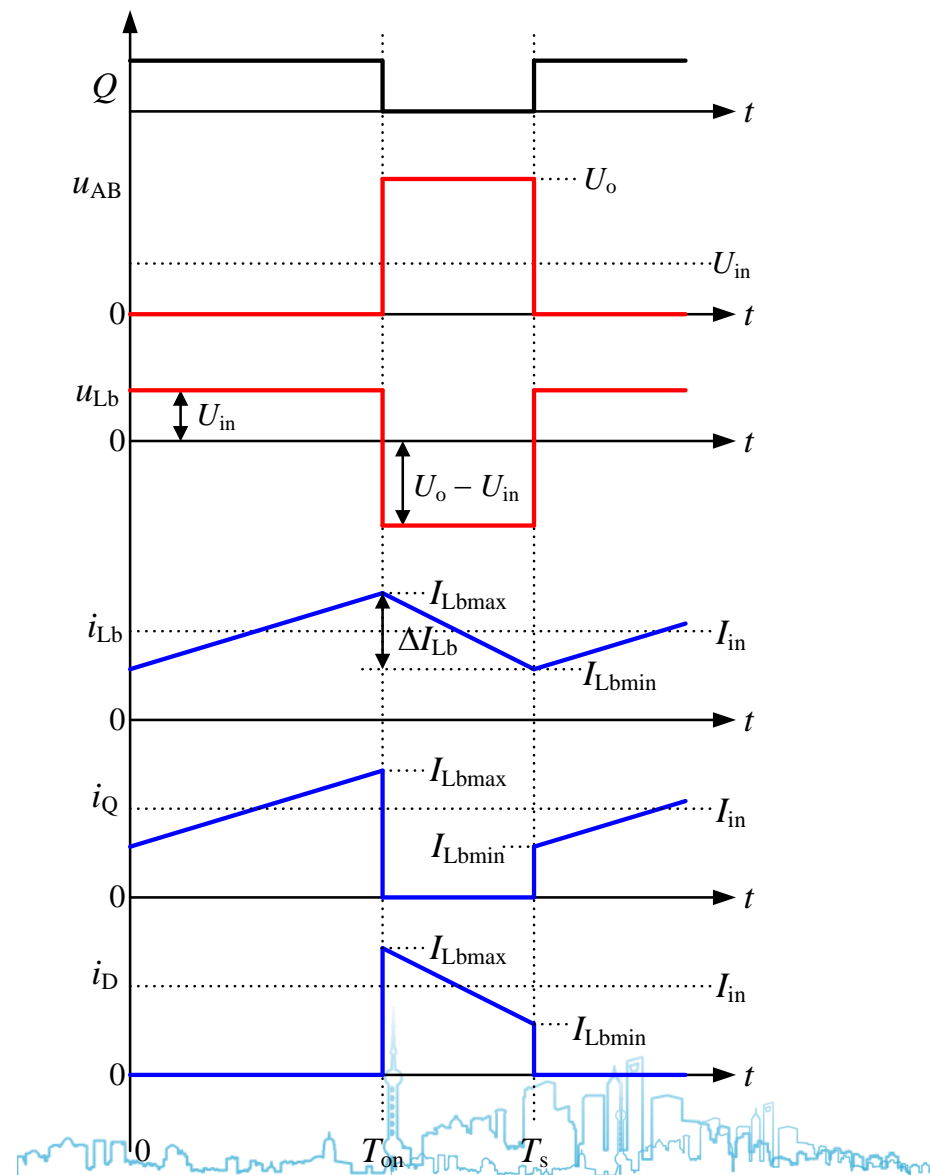
2. 基本关系

- 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：

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



电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

2. 基本关系

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

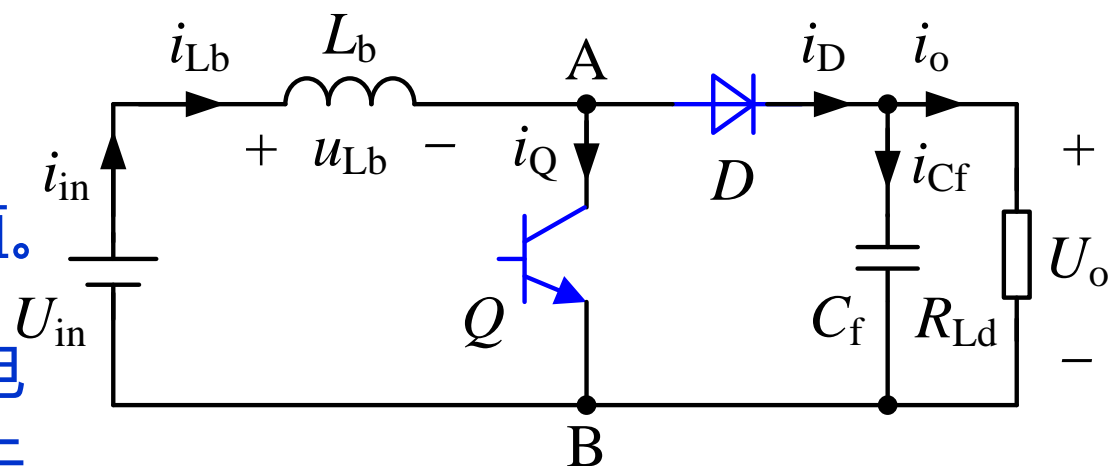
那么：

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

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：

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



电流连续时Boost变换器的工作原理与基本关系

2. 基本关系

升压电感电流脉动量 ΔI_{Lb} 为：

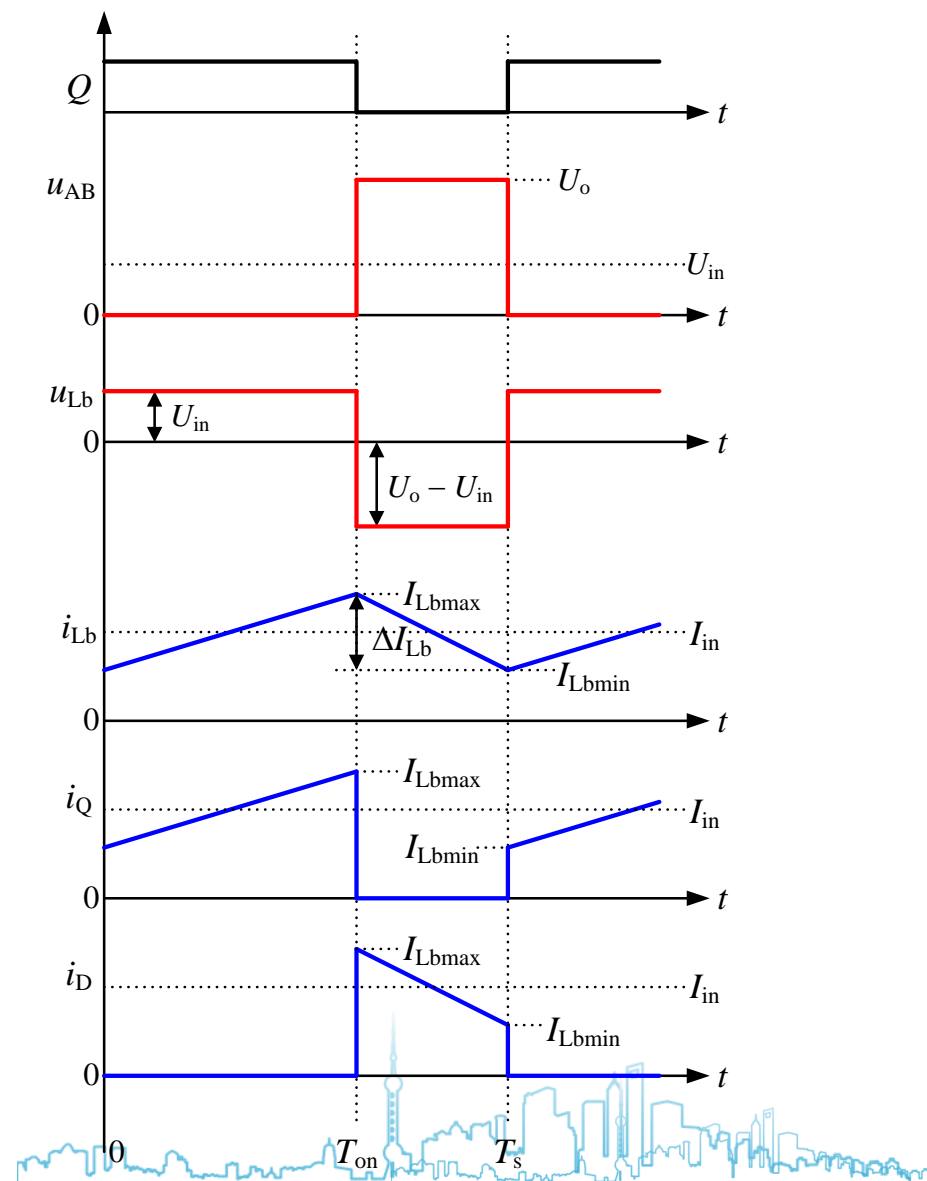
$$\Delta I_{Lb} = \frac{U_{in}}{L_b} D_y T_s$$

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

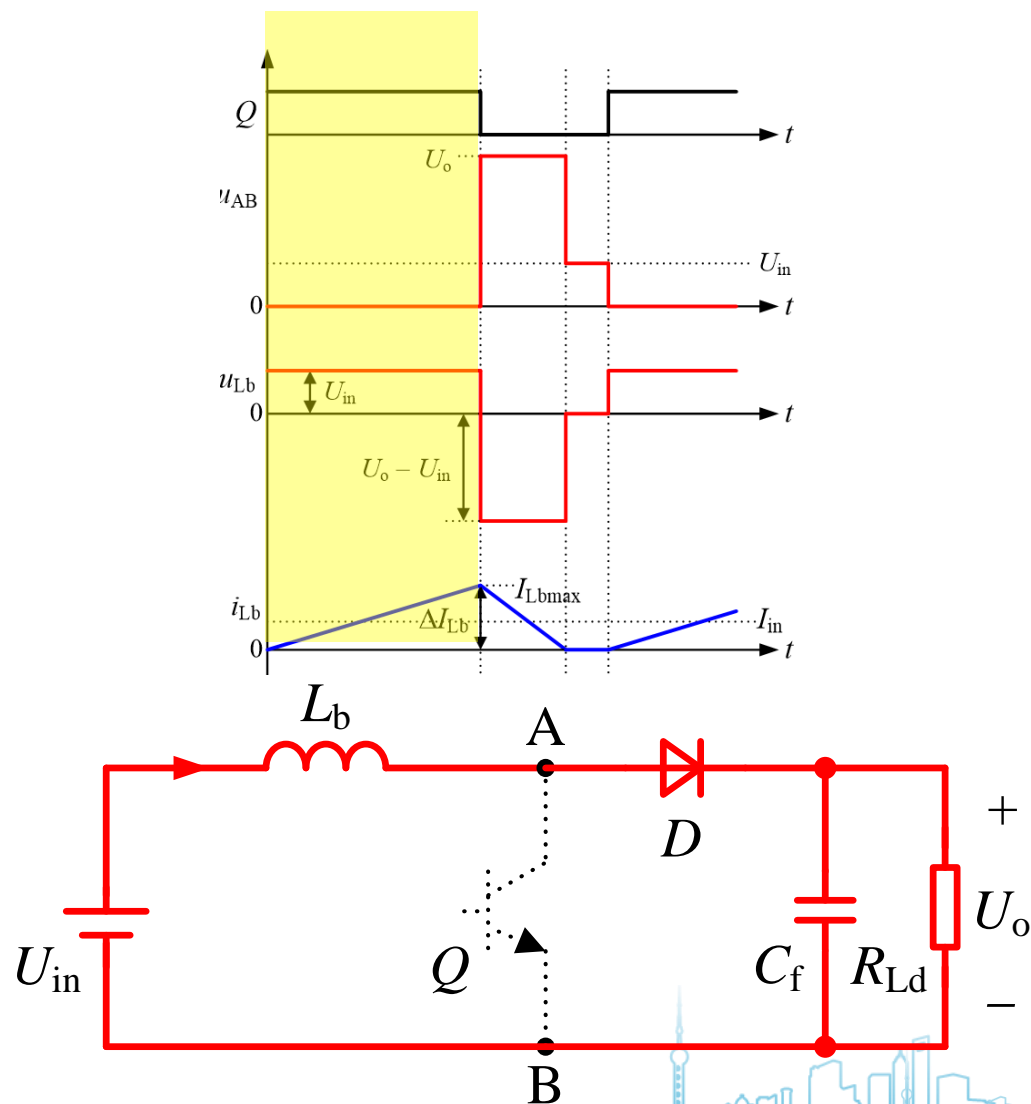


电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

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：

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



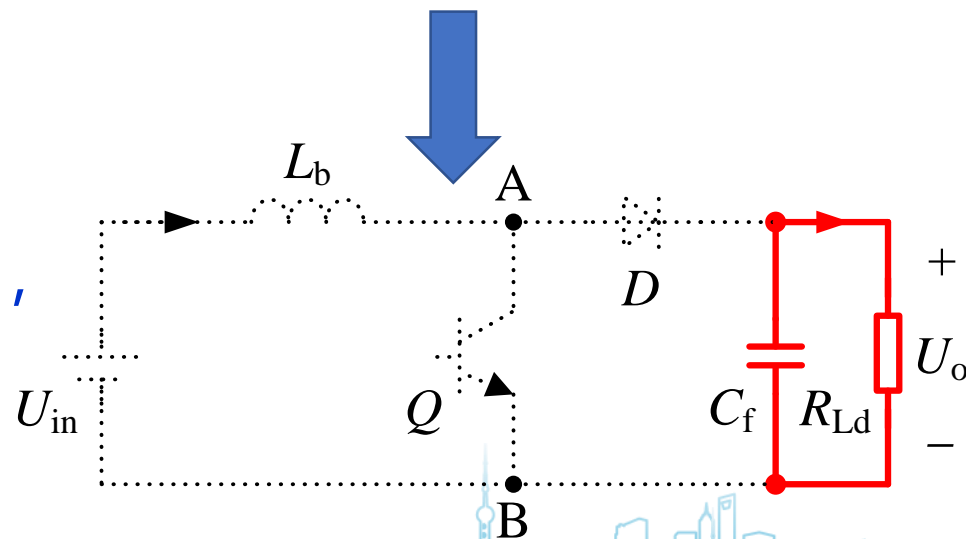
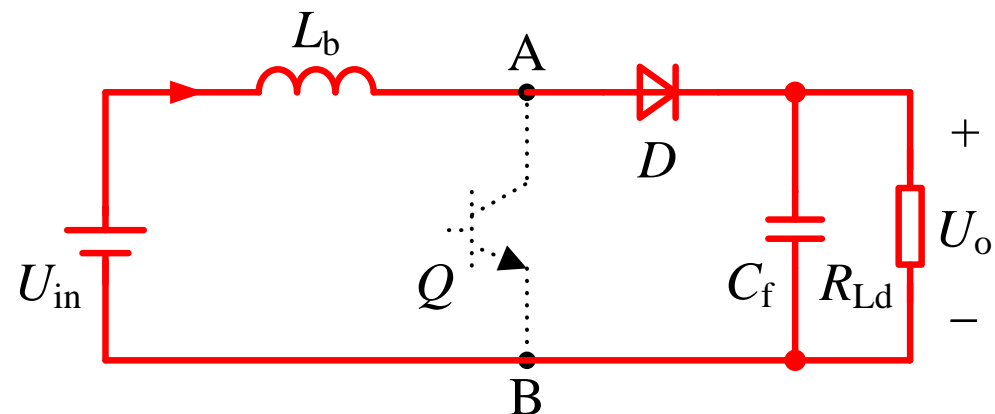
电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

1. 工作原理——模态II

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

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

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



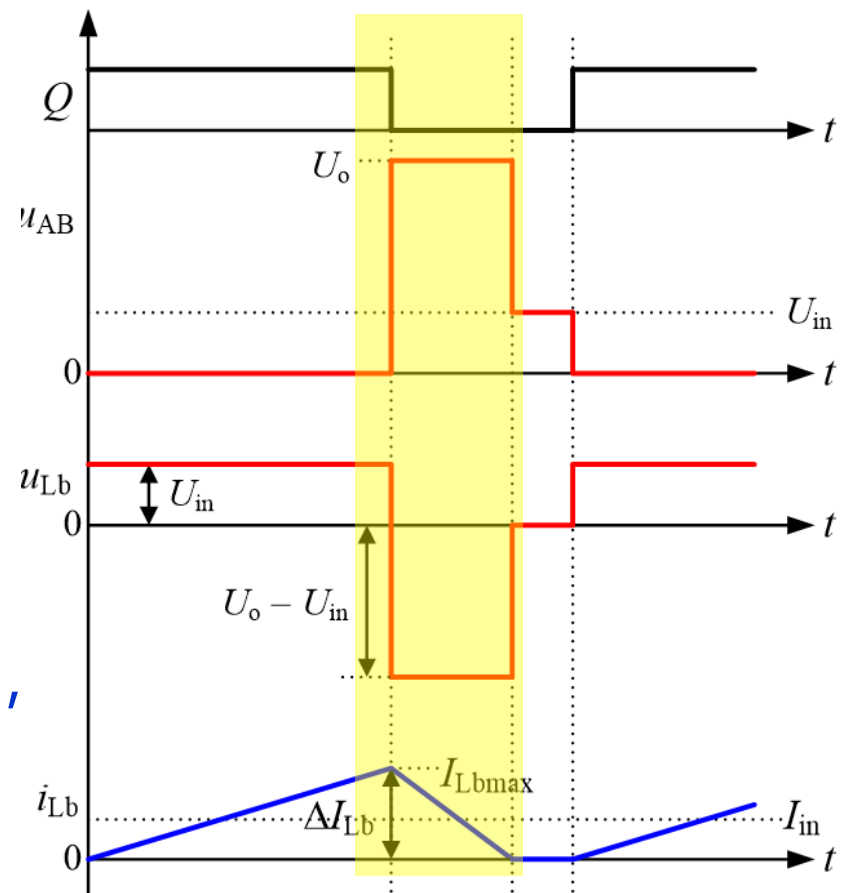
电流断续时Boost变换器的工作原理与基本关系

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(4.30)和式(4.31)代入式(4.32)，整理后可得：

$$U_o = \frac{D_y^2 T_s}{2 L_b I_o} U_{in}^2 + U_{in} \quad (4.62)$$

■ 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



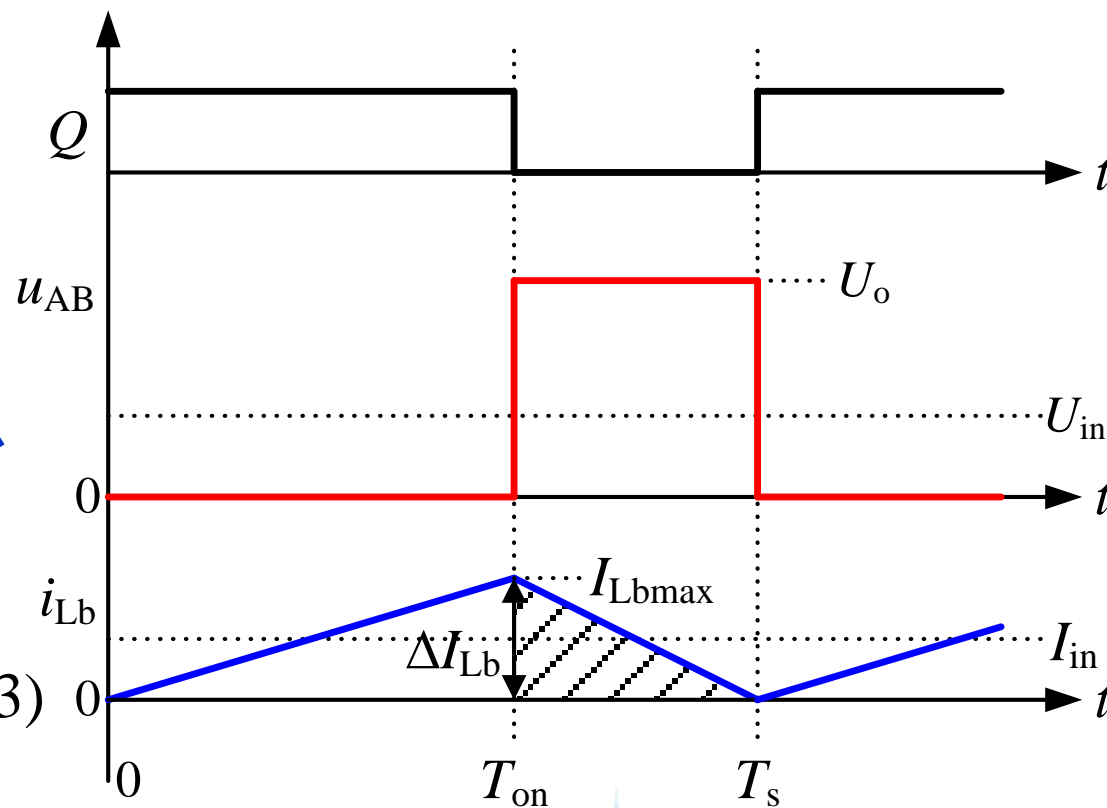
Boost变换器的外特性与调节特性

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：

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



Boost变换器的外特性与调节特性

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:

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

Boost变换器的外特性与调节特性

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

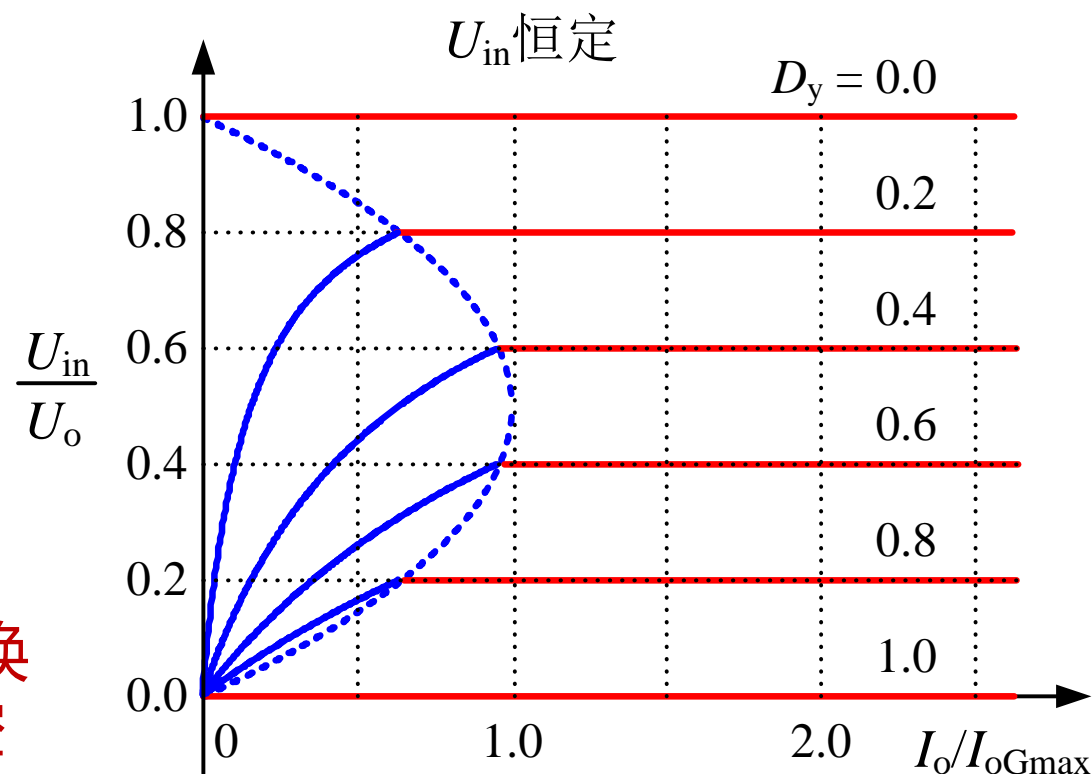
$$\text{即: } \frac{U_o}{U_{in}} = \begin{cases} \frac{1}{1-D_y} & \text{(电流连续模式)} \\ \frac{4D_y^2}{I_o/I_{oGmax}} + 1 & \text{(电流断续模式)} \end{cases} \quad (4.67)$$



Boost变换器的外特性与调节特性

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
- 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

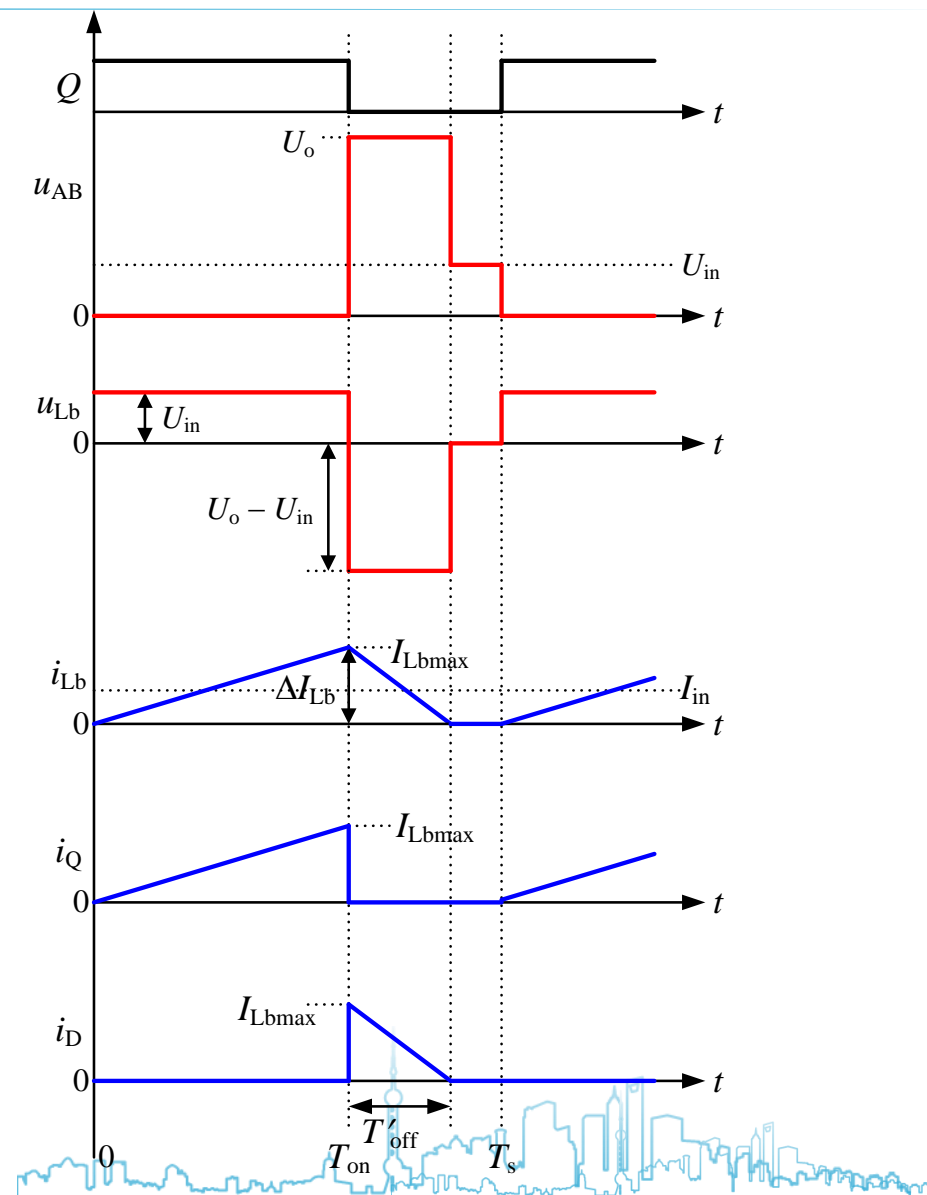
1. 开关管与续流二极管的电压和电流

- 开关管Q 和二极管D 的电压应力为：

$$U_Q = U_D = U_o$$

- 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

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



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：

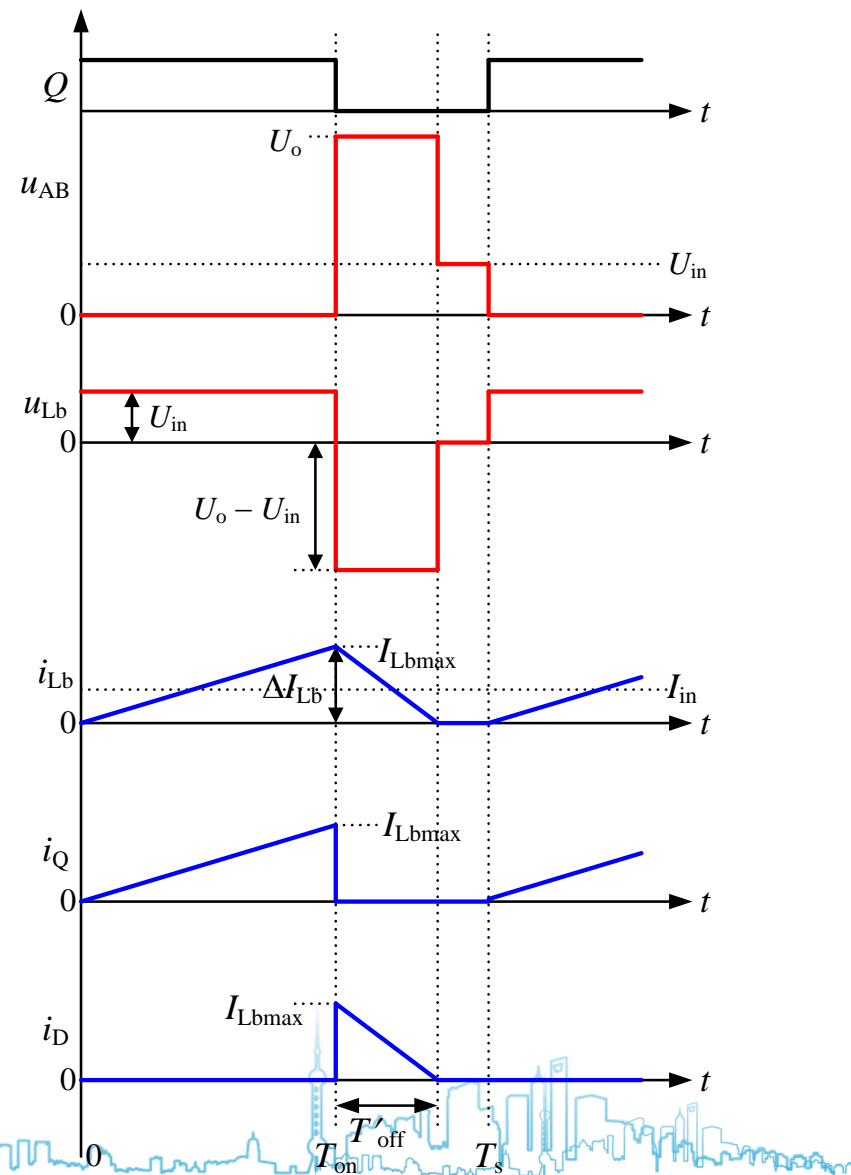
$$I_Q = D_y I_{in} = \frac{D_y}{1 - D_y} I_o$$

$$I_D = I_o$$

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

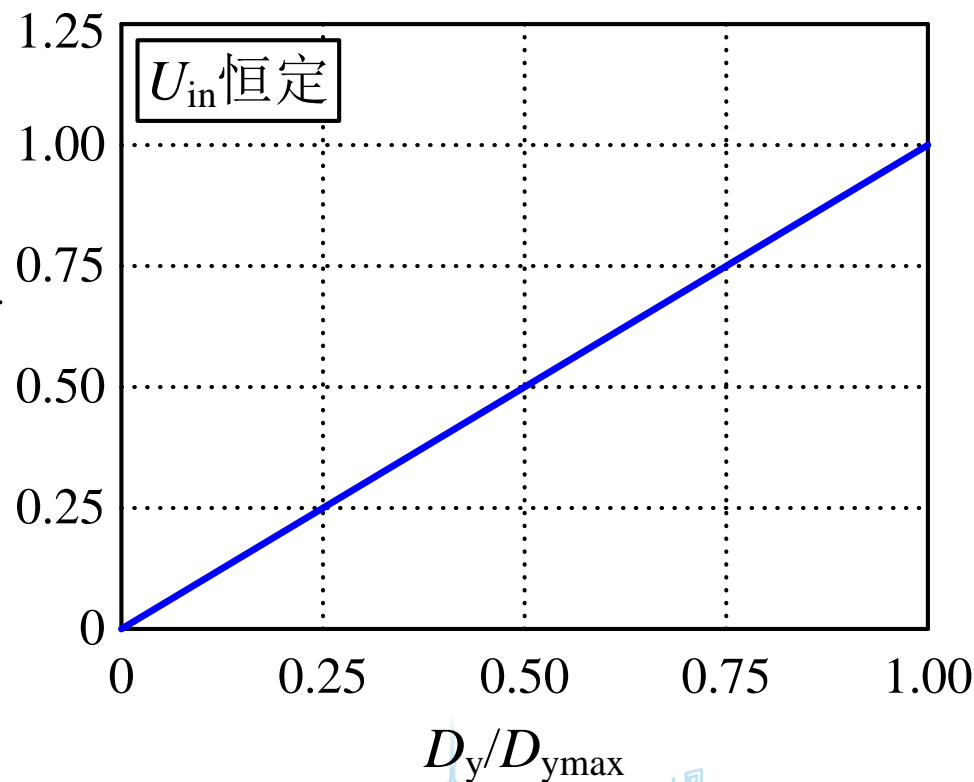
为：

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

电感根据最大允许电流脉动设计：

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

$$\frac{\Delta I_{Lb}}{\Delta I_{Lbmax_1}}$$



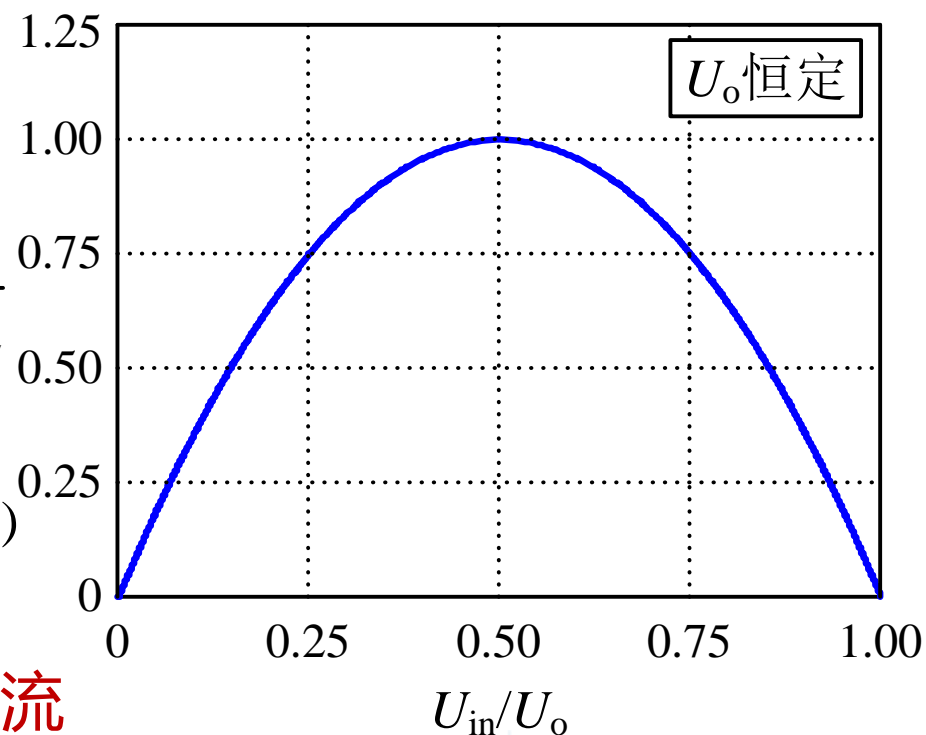
Boost变换器的参数设计

2. 升压电感量

根据最大允许脉动电流设计电感：

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

$$\frac{\Delta I_{Lb}}{\Delta I_{Lbmax_2}}$$



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。

Boost变换器的参数设计

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

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。



|| 本章内容

■ 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



★ 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





★ 4.3 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

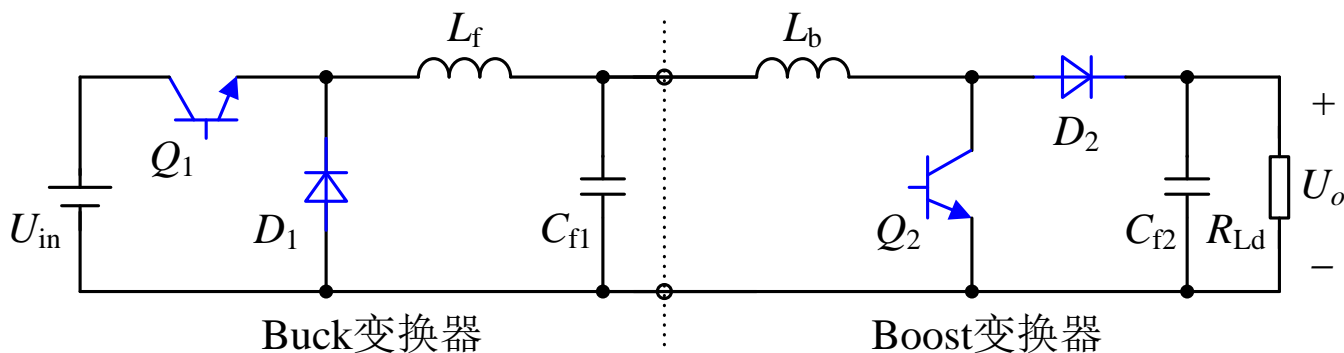
4.3.5 Buck-Boost变换器的参数设计



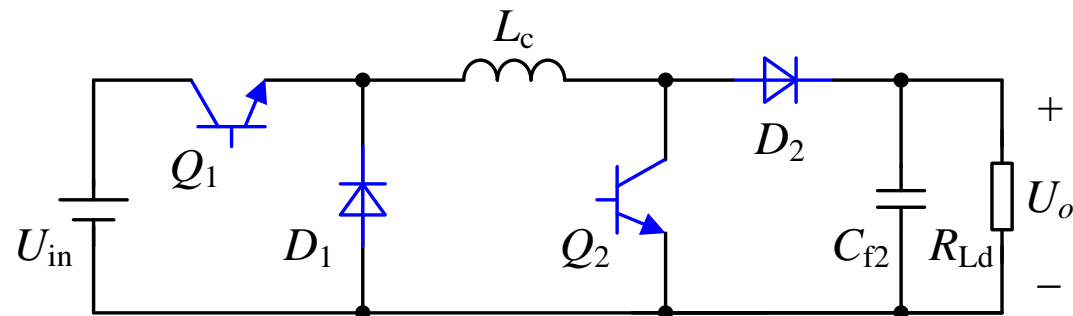
Buck-Boost变换器电路拓扑的推演



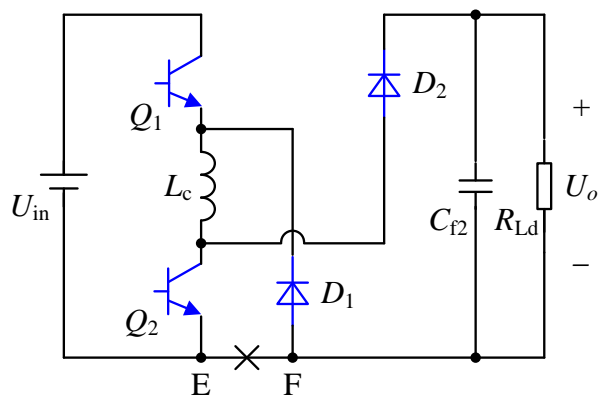
电路推演过程



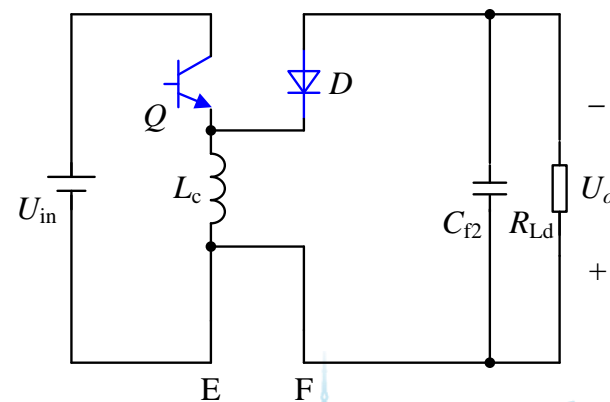
(a) Buck变换器与Boost变换器级联



(b) 去掉Cf1，并将两个电感合并



(c) 图(b)的变形



(d) 断开EF两点，并将Q1和Q2、D1和D2分别合并

Buck-Boost变换器电路拓扑的推演

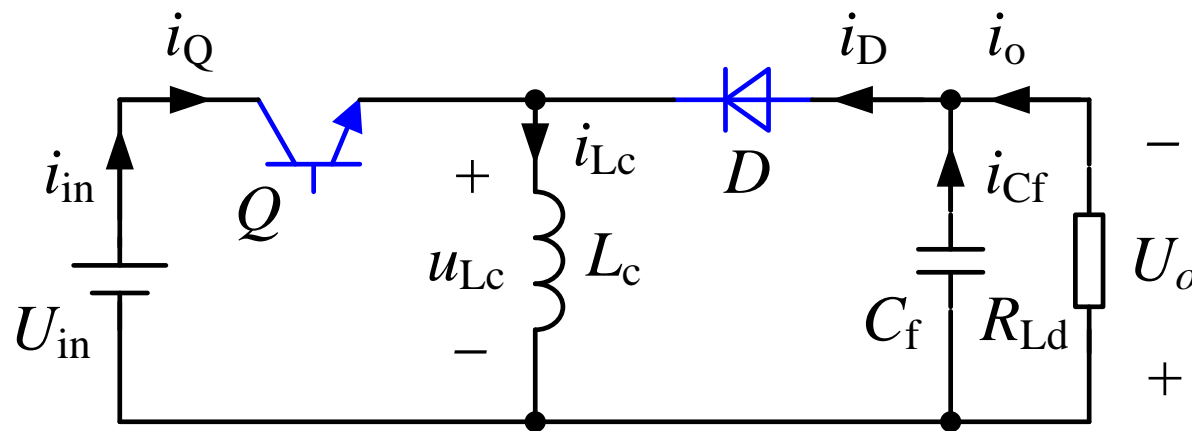


电路推演过程

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

4.3.5 Buck-Boost变换器的参数设计



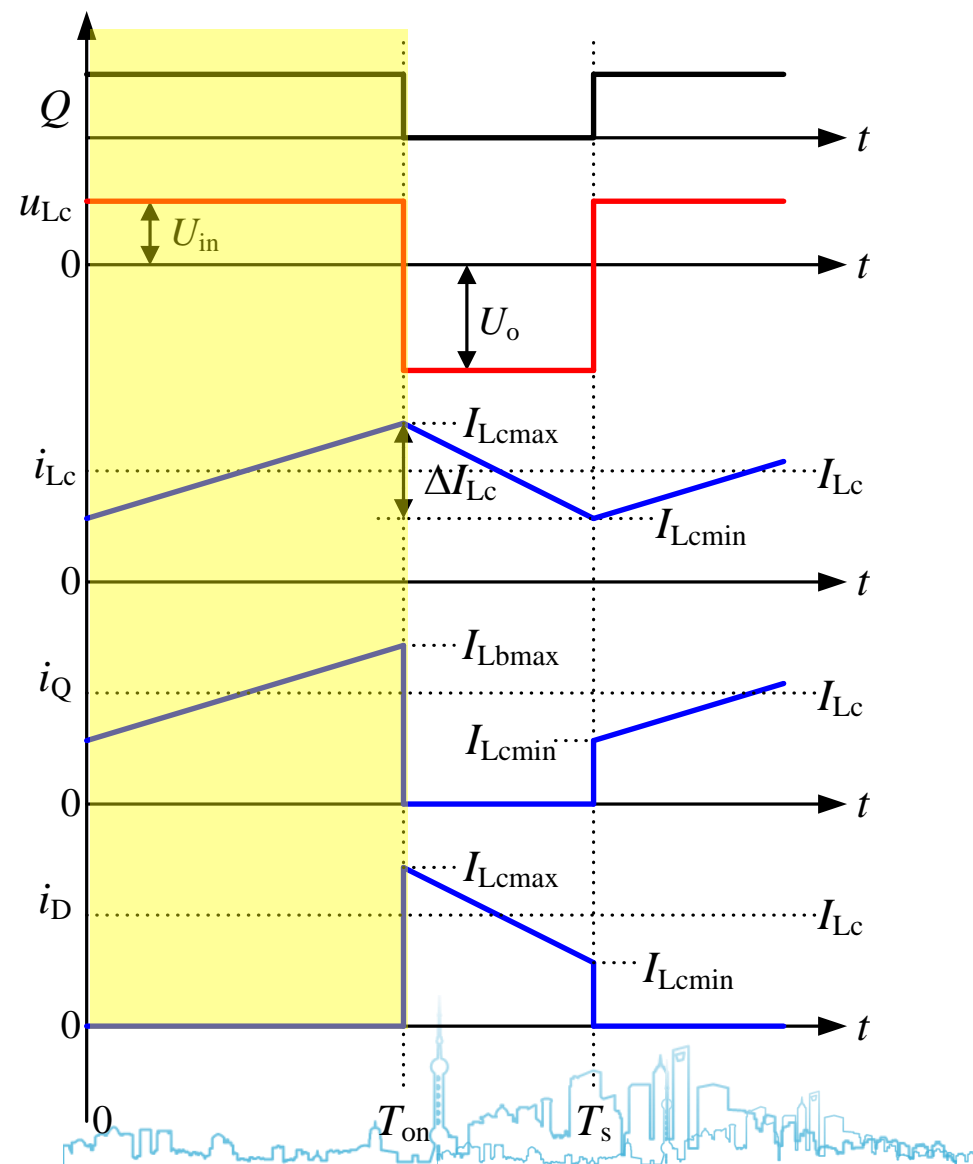
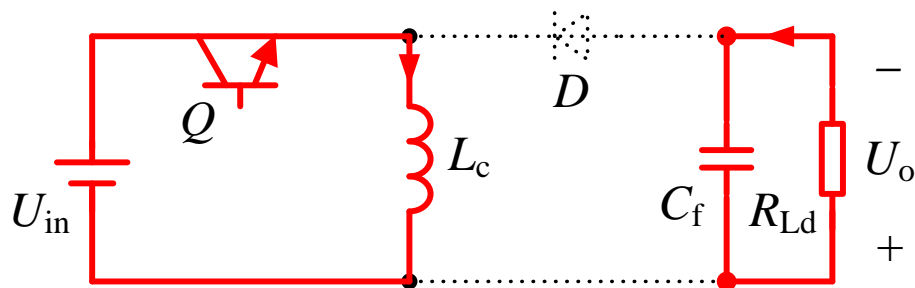
电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

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



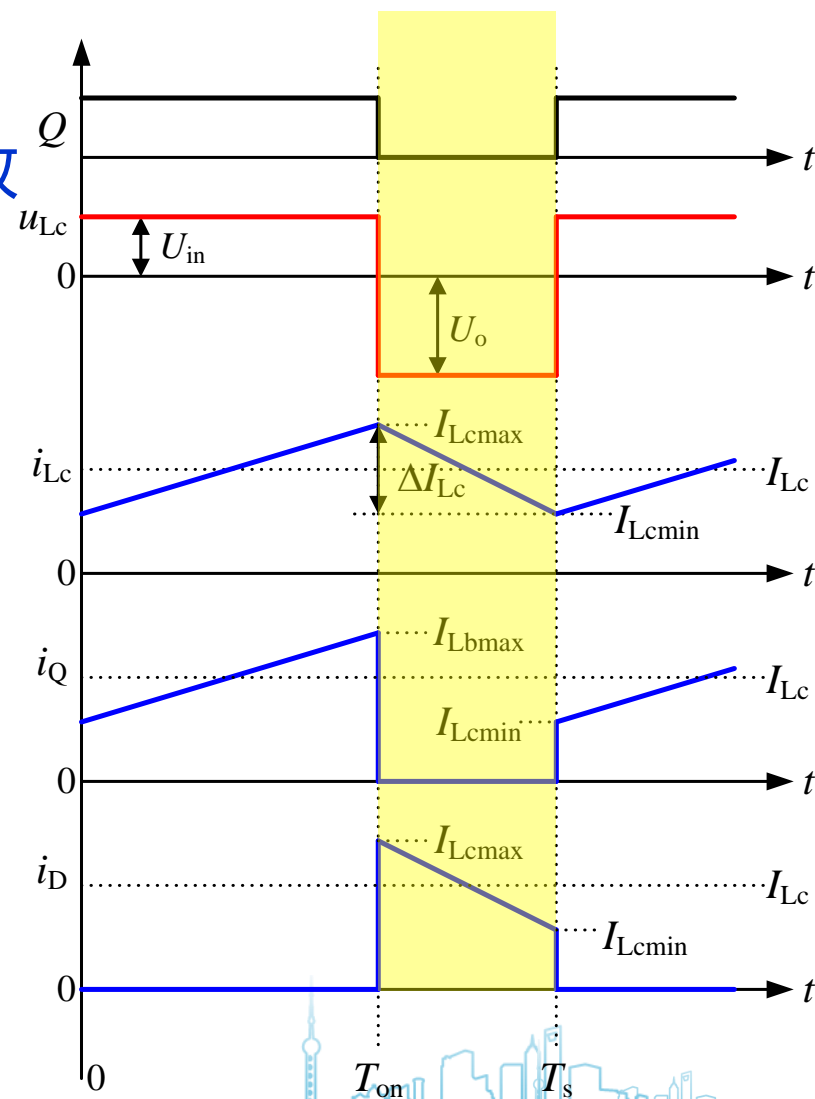
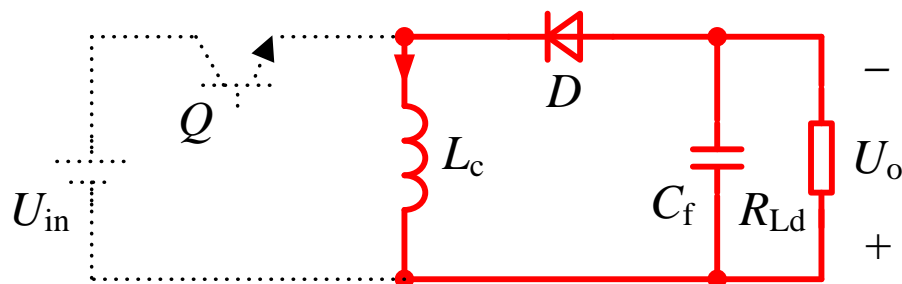
电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

1. 工作模态II

在 $t = T_{on}$ 时, Q 关断, i_{Lc} 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 $u_{Lc} = -U_o$, 那么有:

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

- 显然 i_{Lc} 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

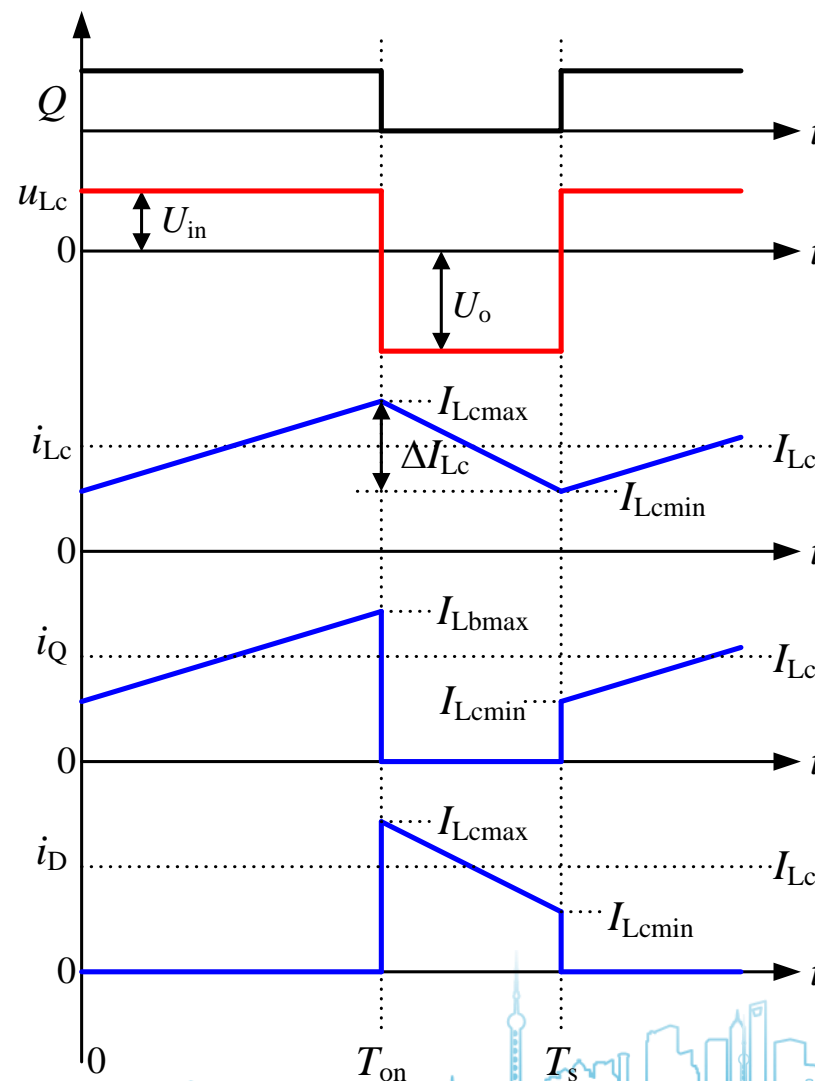
2. 基本关系

- 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：

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

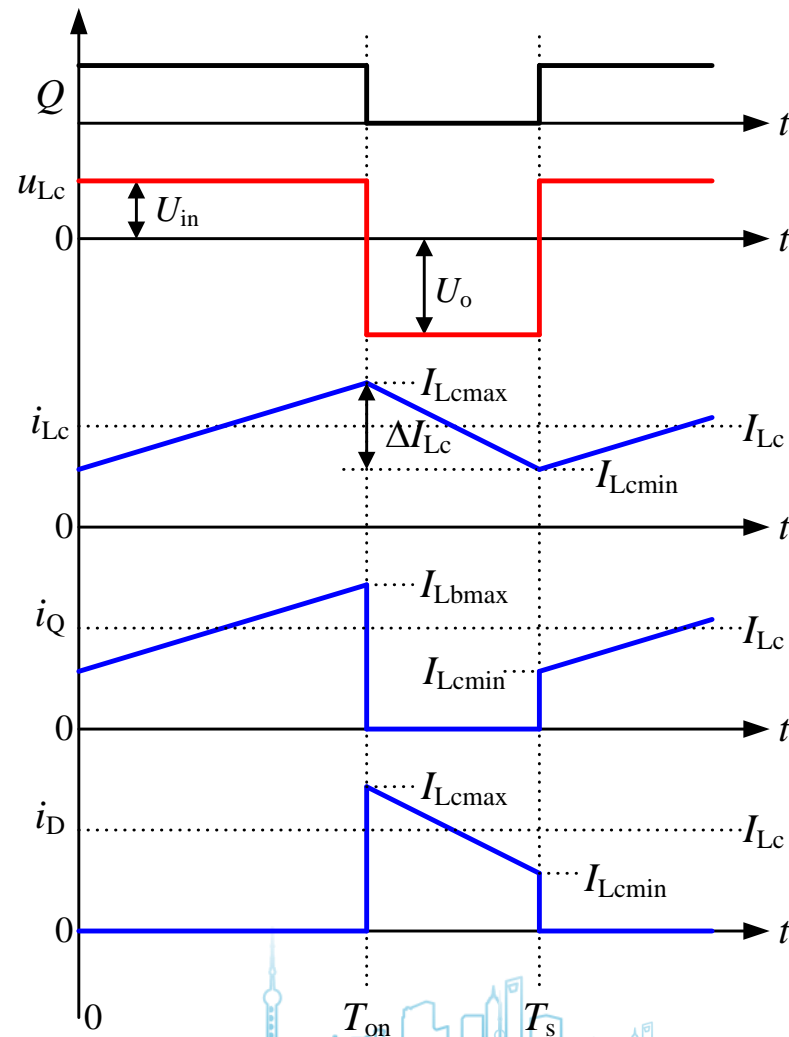
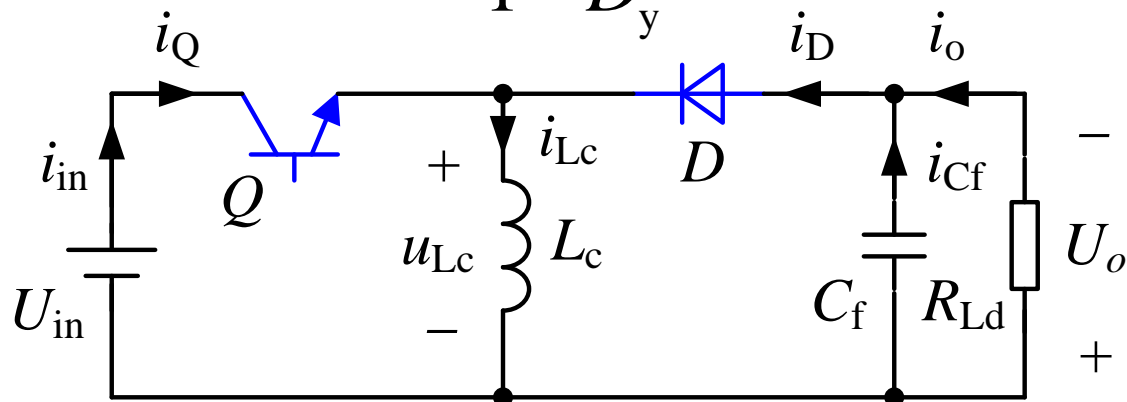


电流连续时Buck-Boost变换器的工作原理与基本关系

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:

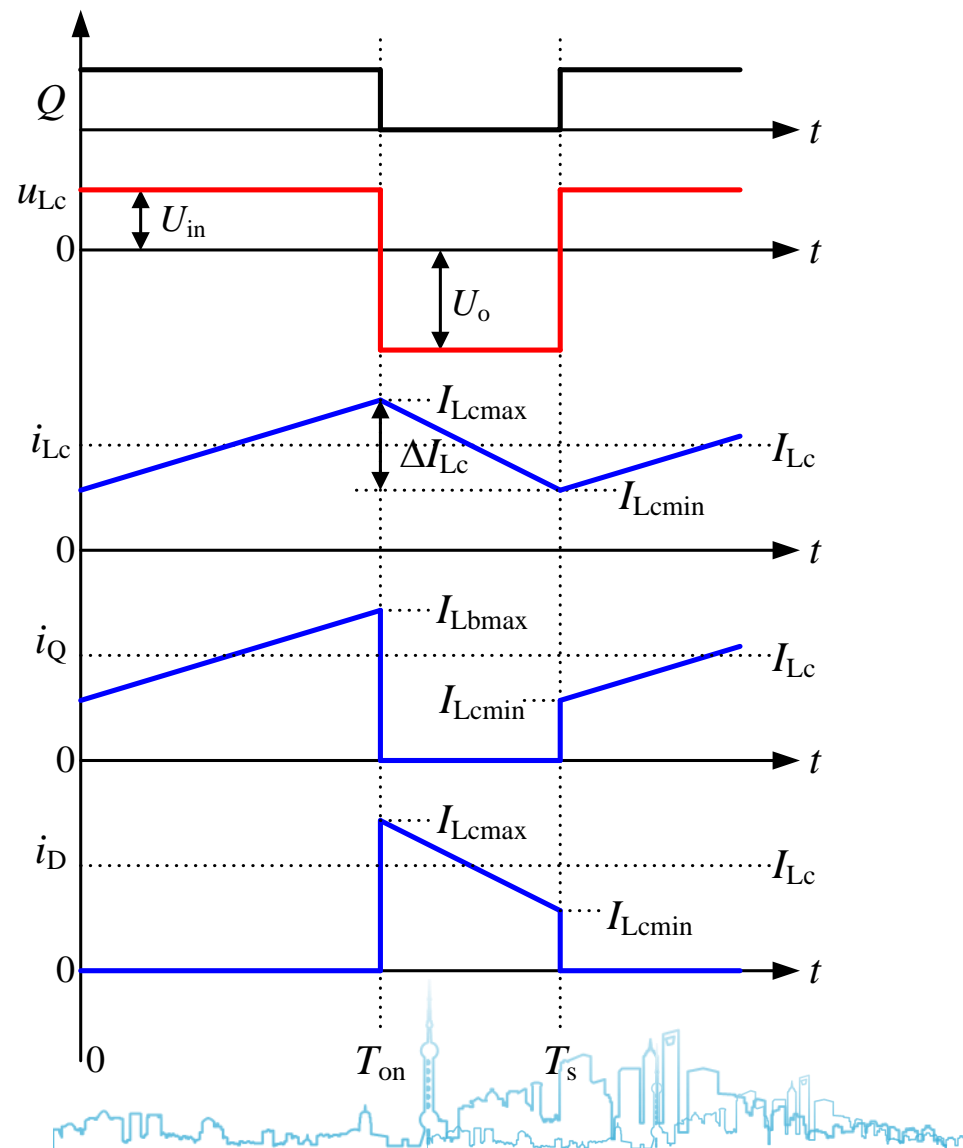
$$\Delta I_{Lc} = \frac{U_{in}}{L_c} D_y T_s$$

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

4.3.5 Buck-Boost变换器的参数设计



Buck-Boost变换器的参数设计

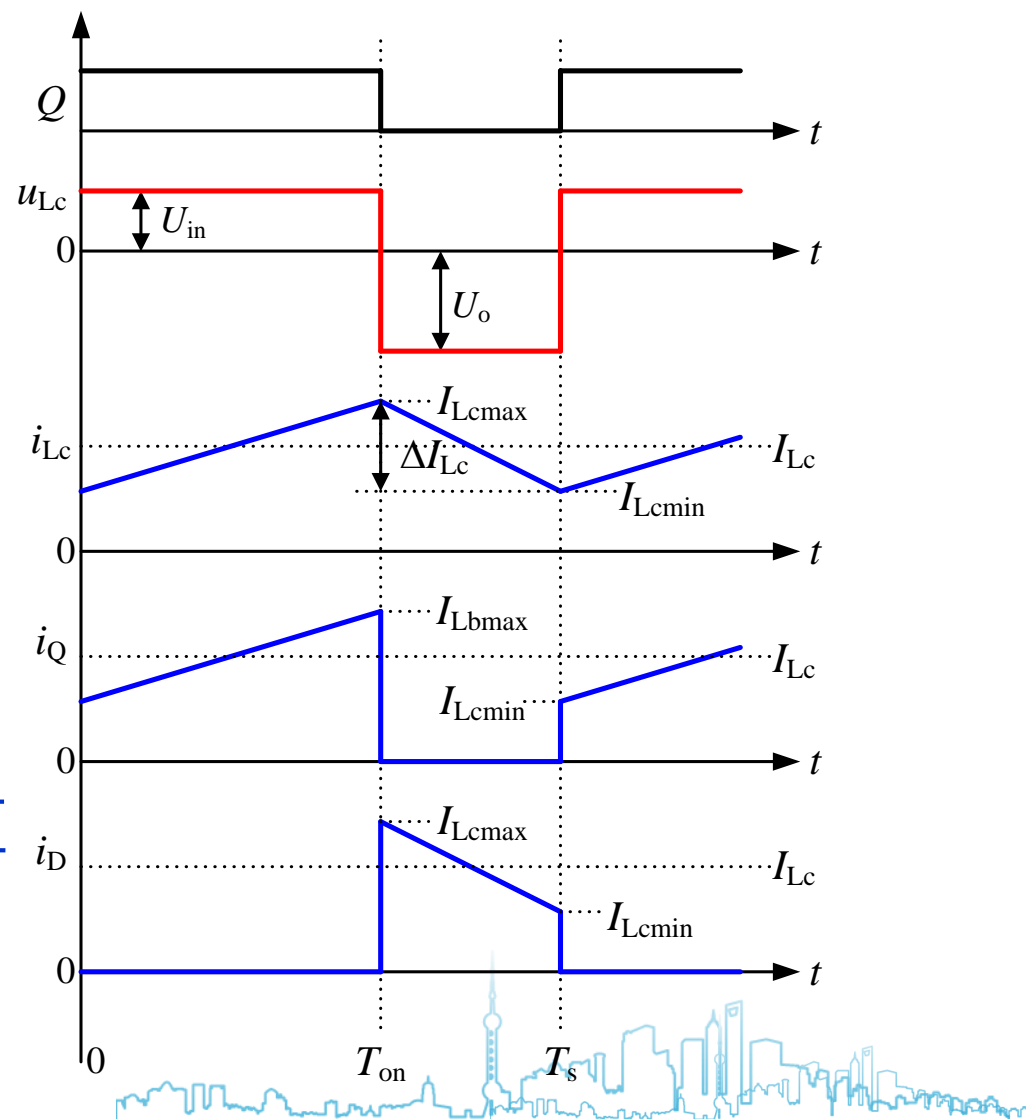
1. 开关管与续流二极管的电压和电流

- 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：

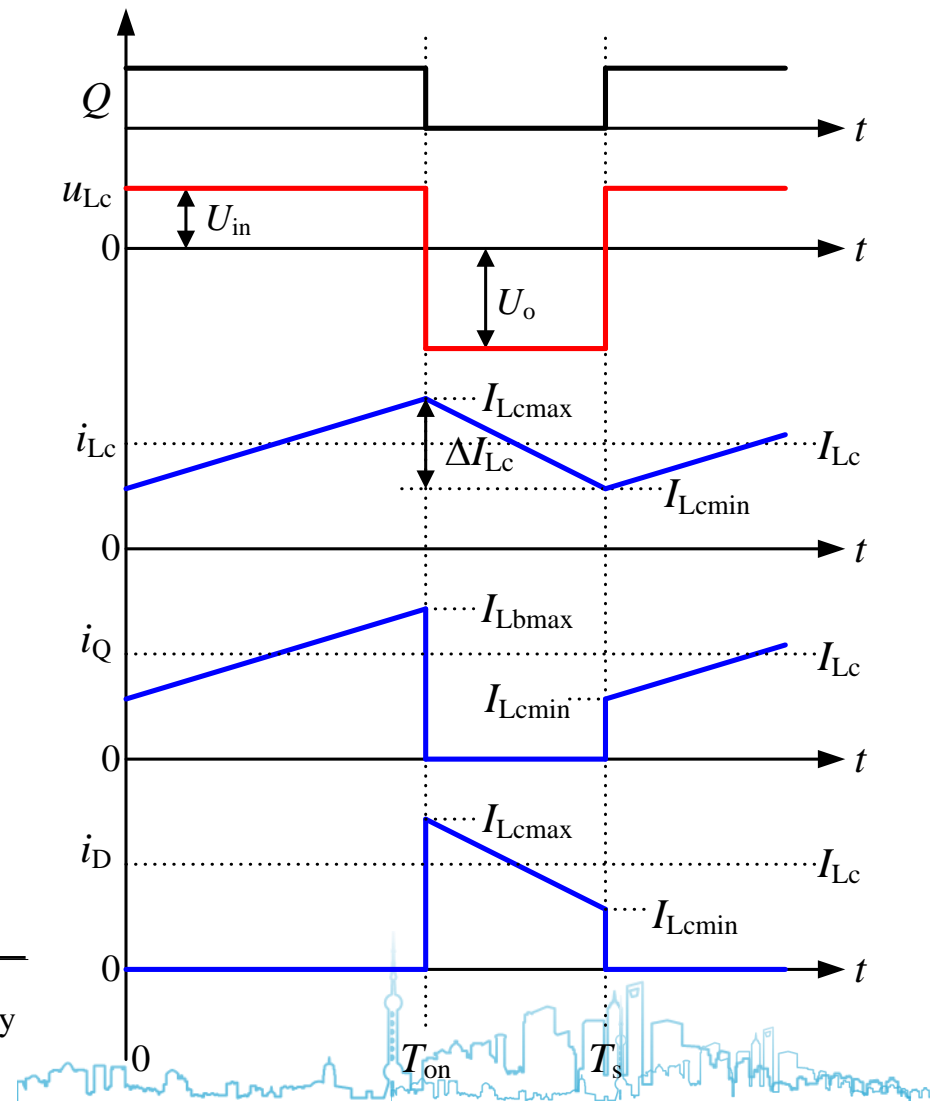
$$I_Q = D_y I_{Lc} = \frac{D_y}{1 - D_y} I_o$$

$$I_D = I_o$$

开关管 Q 和二极管 D 的电流有效值分别为：

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

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



Buck-Boost变换器的参数设计

2. 电感量

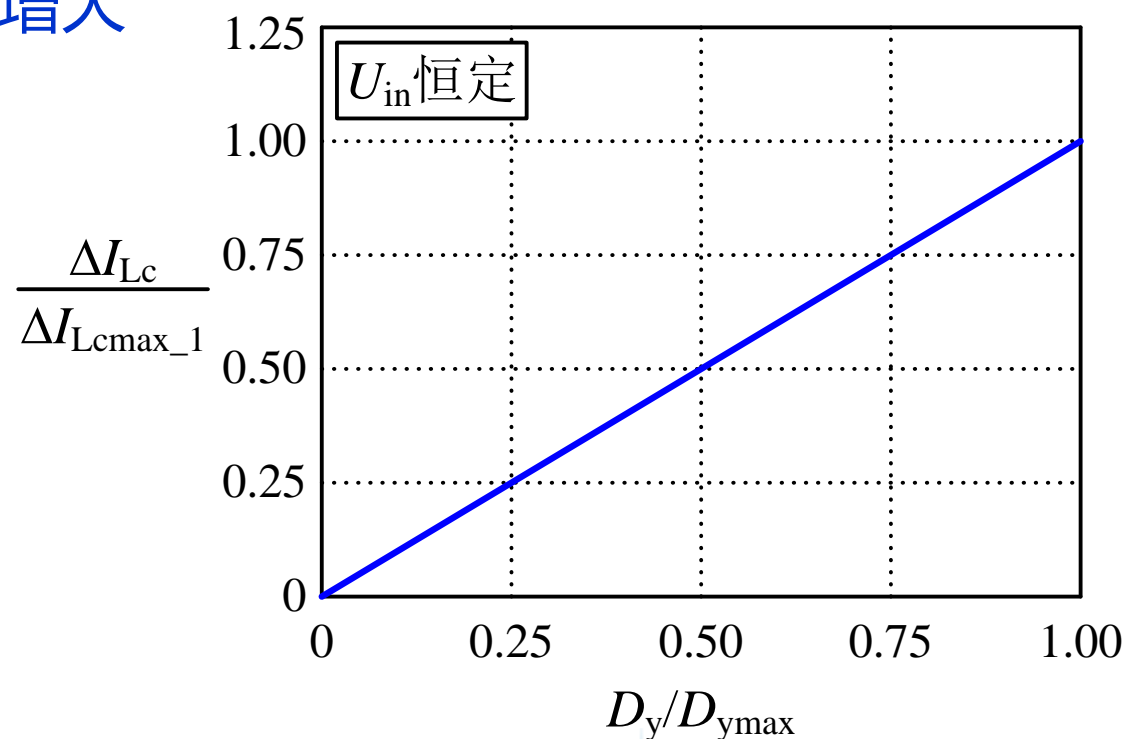
在输入电压不变条件下纹波电流随占空比增大而变大，在最大占空比处有最大脉动电流

为：

$$\Delta I_{Lcmax_1} = \frac{U_{in}}{L_c} D_{ymax} T_s$$

电感根据最大允许电流脉动设计：

$$L_c = \frac{U_{in}}{\Delta I_{Lcmax_permit}} D_{ymax} T_s$$



Buck-Boost变换器的参数设计

2. 电感量

在输出电压不变下，有：

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

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

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

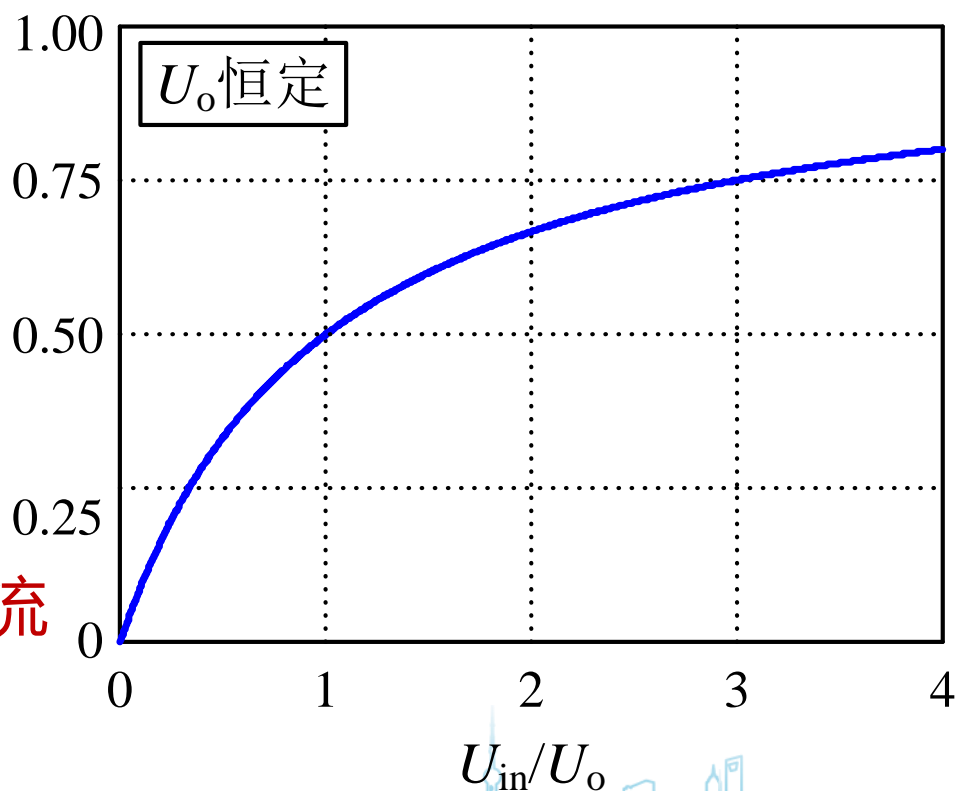
Buck-Boost变换器的参数设计

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。



Buck-Boost变换器的参数设计

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。



|| 本章内容

- 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

