

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

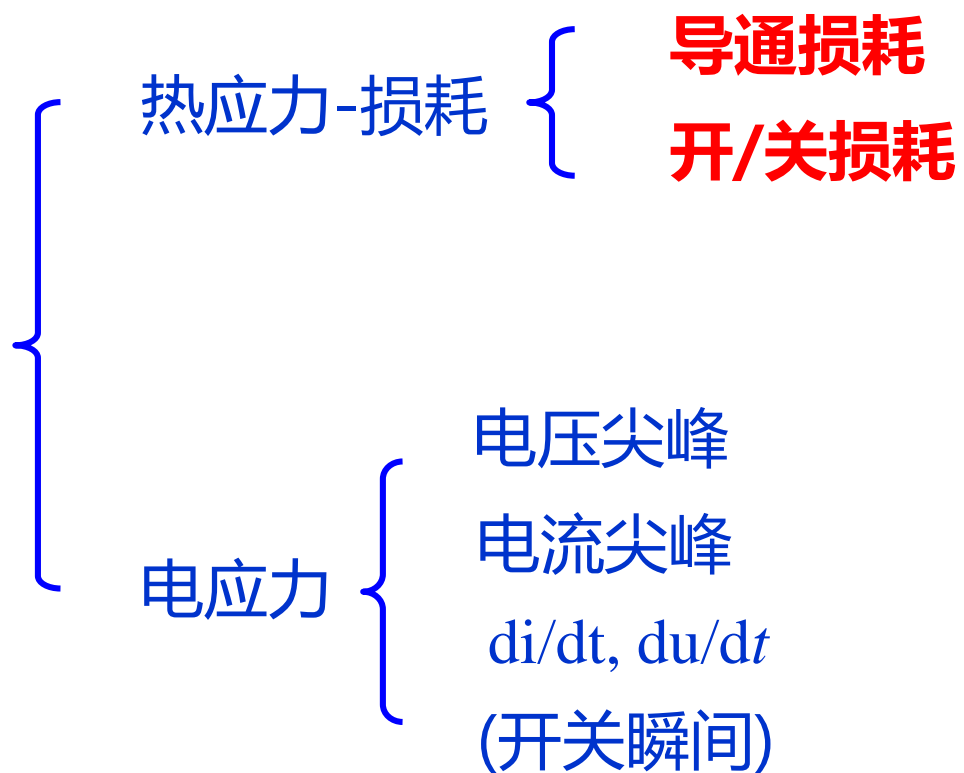
电力电子技术 · Power Electronics

第7章 缓冲电路

2024/1/2



■ 影响电力电子器件/装置可靠性的因素



缓冲电路的作用

- 改善开/关过程电压电流变化曲线
- 从而改善开关管的
 - 开通/关断损耗
 - di/dt , du/dt
 - 电流/电压尖峰
- 提高变换器的可靠性





7.1 开关管的开通和关断特性

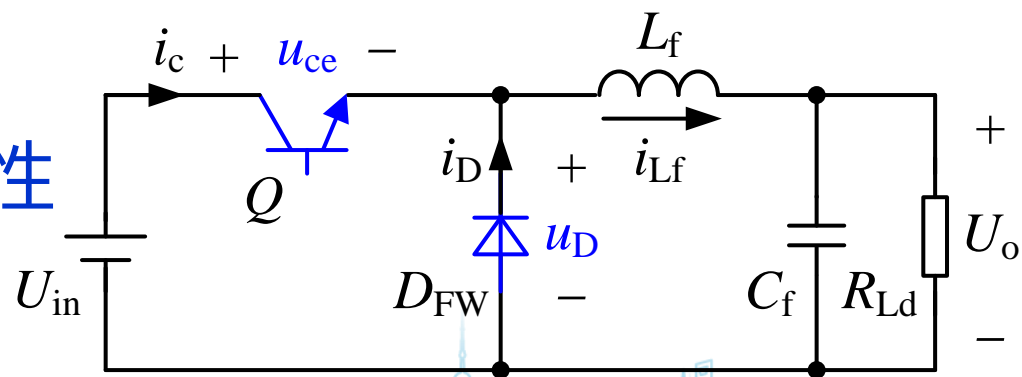
7.2 直流变换器的基本缓冲电路

7.3 直流变换器的无损缓冲电路



开关管的开通和关断特性

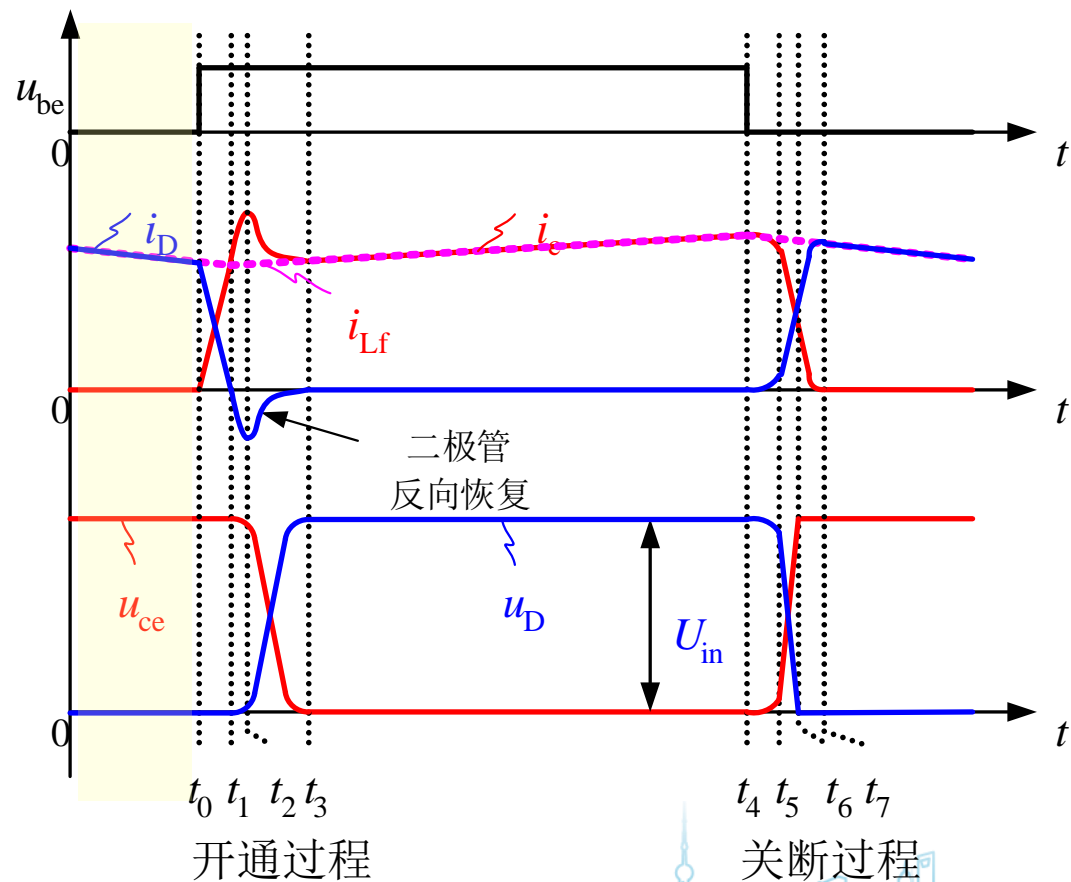
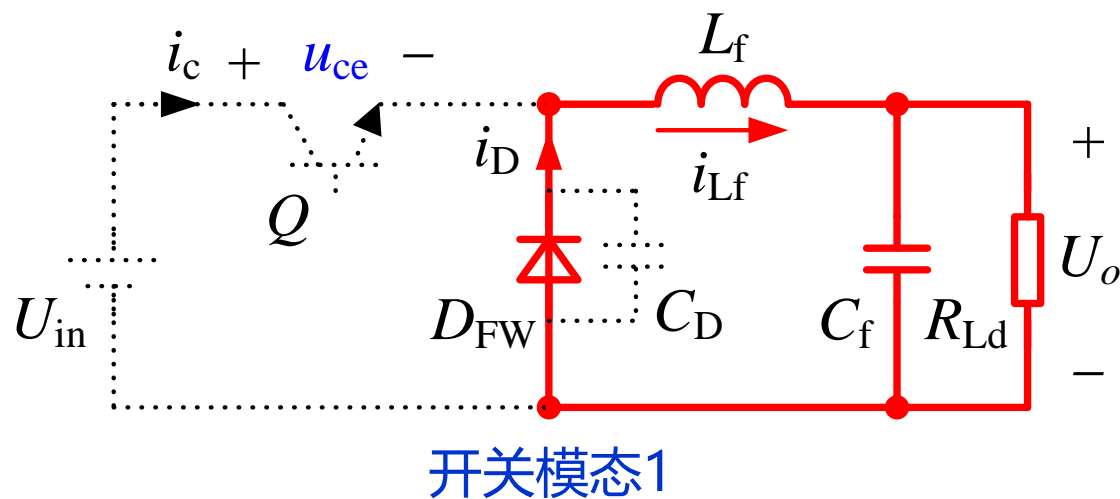
- 开通：当开关管从截止状态变为导通状态
- 关断：开关管从导通状态变为截止状态
- 直流变换器的工作原理分析，假设开关管是理想器件，开通时间和关断时间均为零
- 开关管开通和关断过程是需要时间的，开通时，开关管的电压和电流都有一个变化过程
- 以BUCK电路，分析开关管的开通和关断特性



电路工作模态分析1

■ 模态1 [t_0 时刻之前]: Q 管关断稳态过程

- Q 截止, D_{FW} 导通
- 电感电流 i_{Lf} 线性下降
- 功率管电压 u_{ce} 为 U_{in}
- 二极管电容电压为零

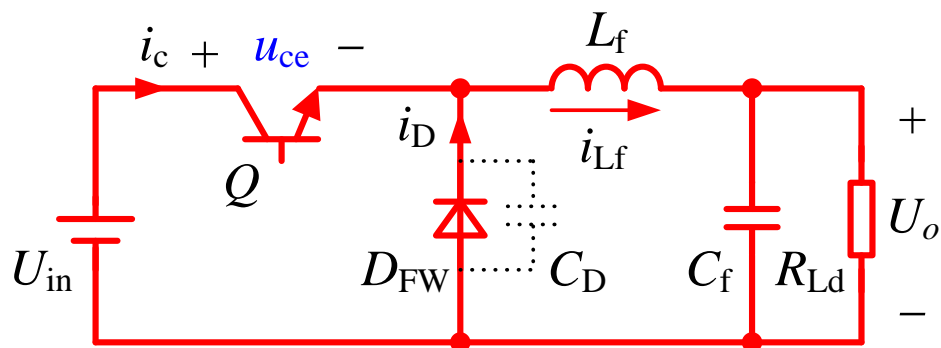


开关管的主要波形

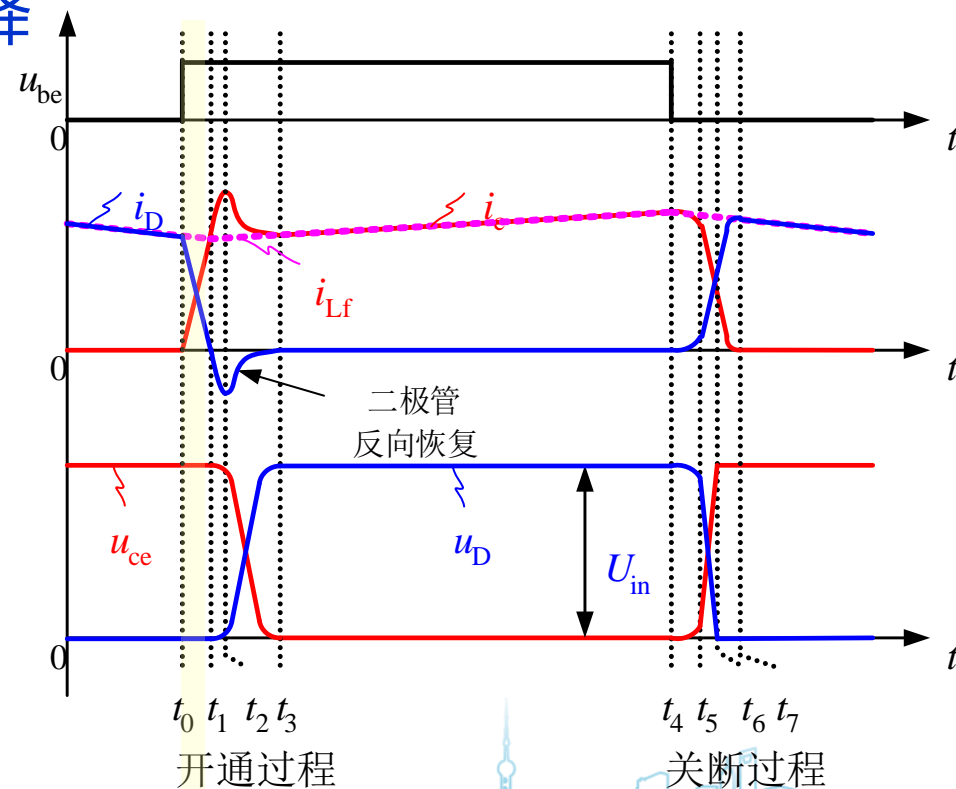
电路工作模态分析2

■ 模态2 $[t_0, t_1]$: Q 管电流上升/ D 电流下降过程

- 开通 Q , 集电极电流 i_c 开始上升
- 由于 i_c 小于 i_{Lf} , D_{FW} 依然导通, 二极管电流下降
- 二极管与功率管电流之和为 i_{Lf}
- Q 电压 u_{ce} 为 U_{in}
- t_1 时刻, i_c 上升到 i_{Lf}



开关模态2

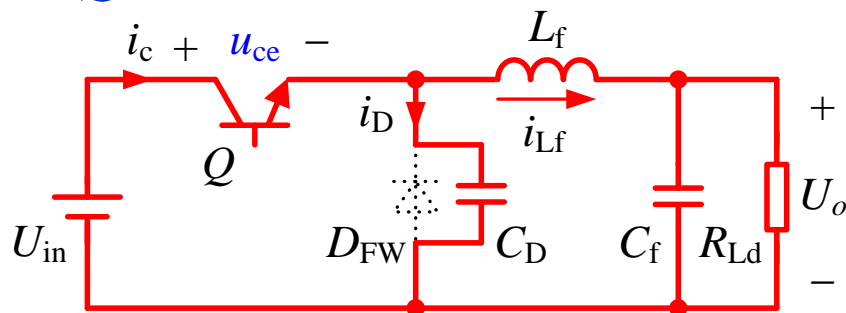


开关管的主要波形

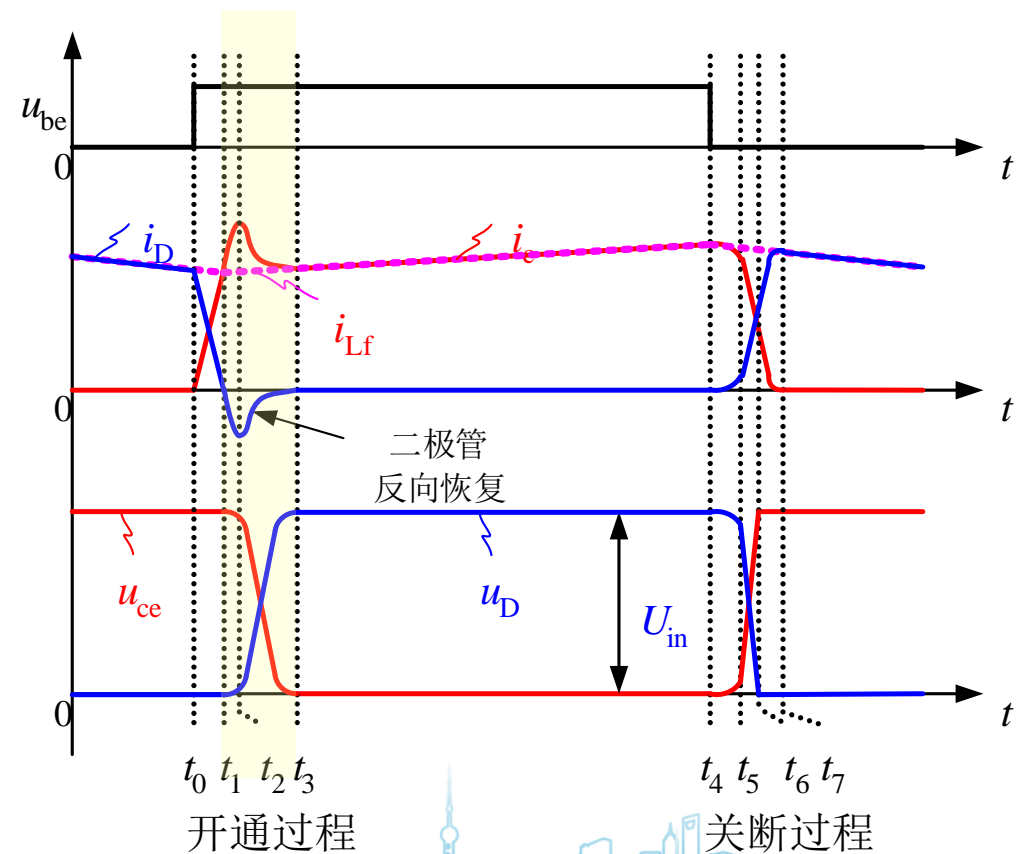
电路工作模态分析3

■ 模态3 $[t_1, t_3]$: D_{FW} 反向恢复过程

- D_{FW} 反向恢复, 电流 i_D 为负, 结电容 C_D 被充电
- i_D 在 t_2 时刻达到负向最大值, 而后开始减小, 并在 t_3 时刻减小到零, D_{FW} 反向恢复过程结束
- $i_c = i_{Lf} - i_D$, 开通尖峰
- D_{FW} 电压从0上升到 U_{in} , u_{ce} 从 U_{in} 下降到 0
- t_3 时刻, Q 完成开通



开关模态3

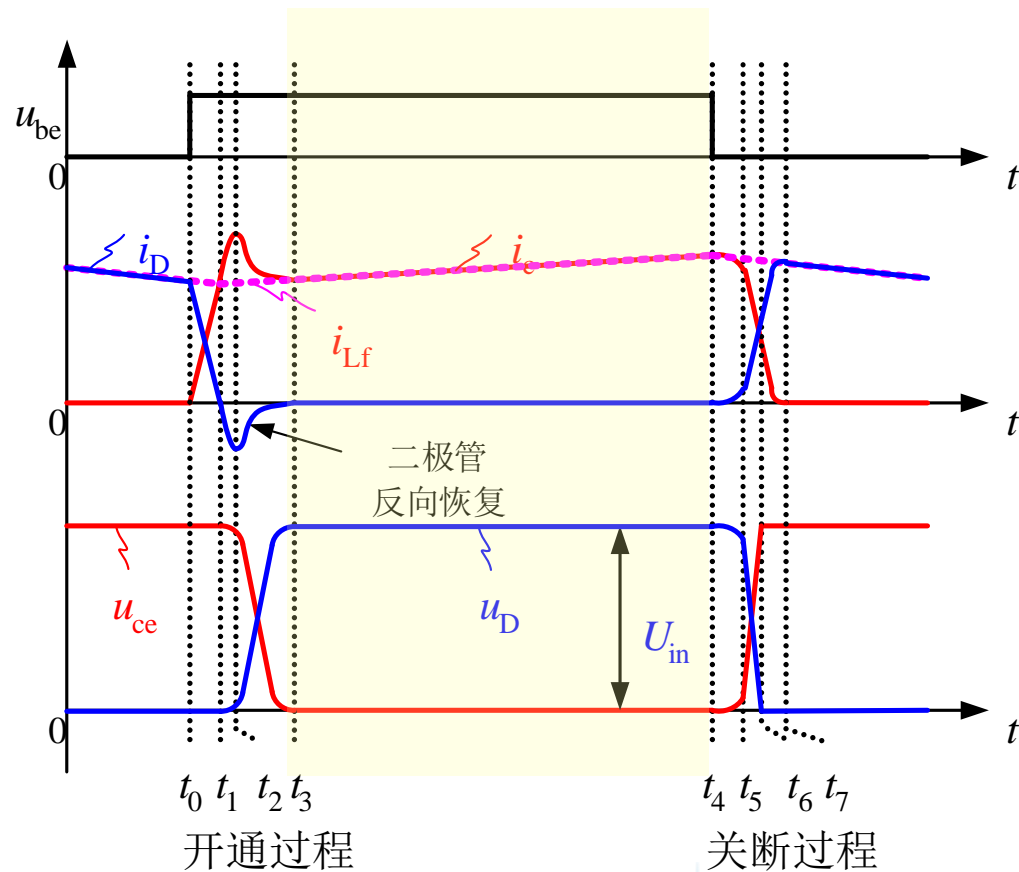
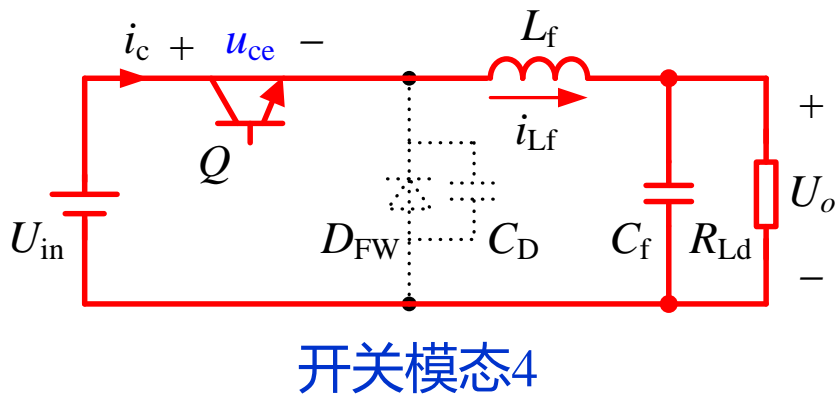


开关管的主要波形

电路工作模态分析4

■ 模态4 $[t_3, t_4]$: Q 稳态导通过程

- t_3 时刻之后, Q 导通, D_{FW} 关断
- 滤波电感电压为 $U_{in} - U_o$
- 功率管电压 u_{ce} 为零
- 二极管电压为 U_{in}

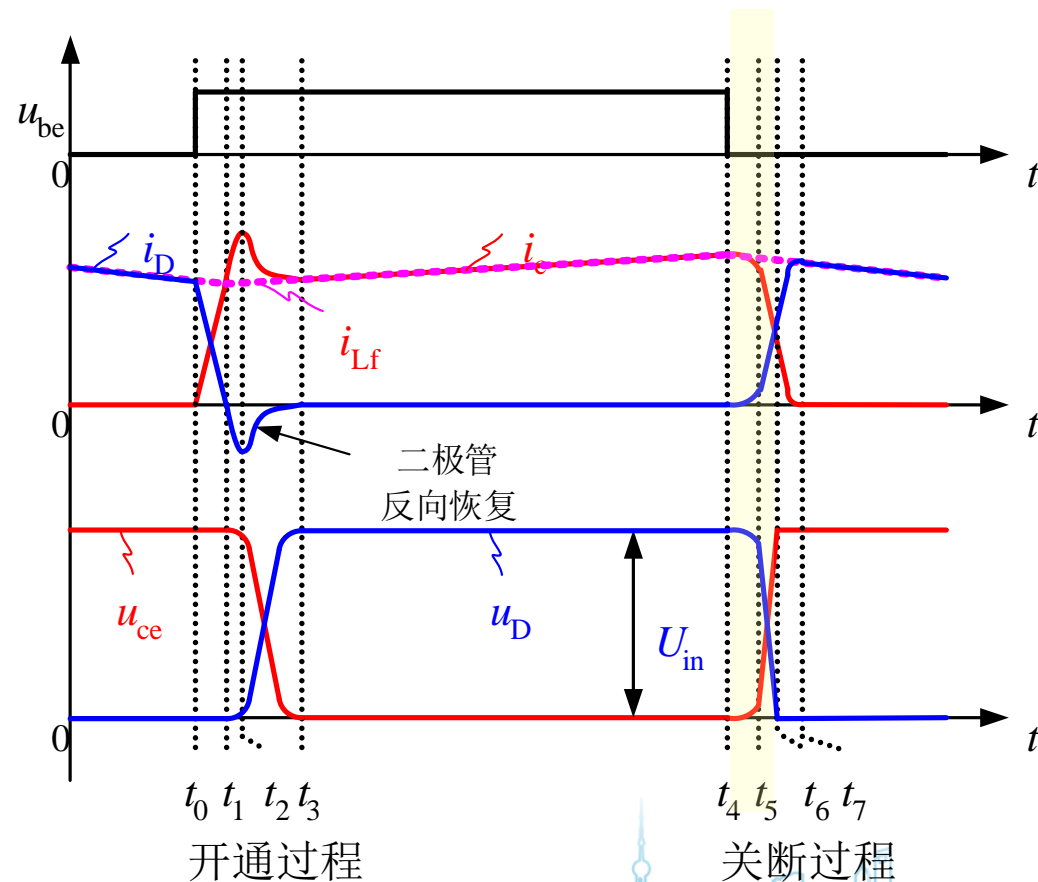
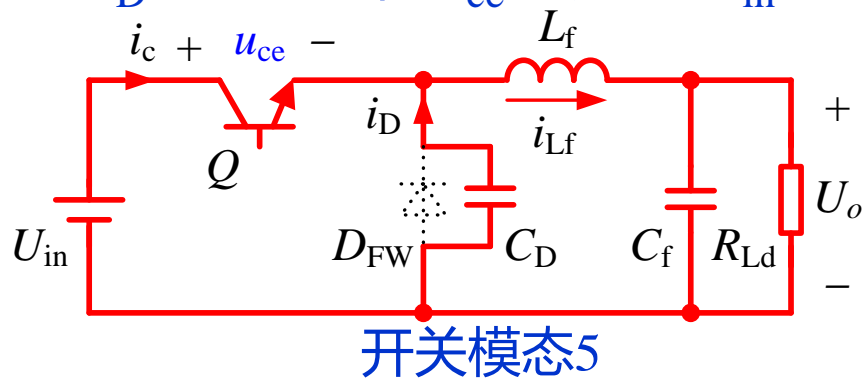


开关管的主要波形

电路工作模态分析5

■ 模态5 $[t_4, t_6]$: Q 管关断电压上升过程

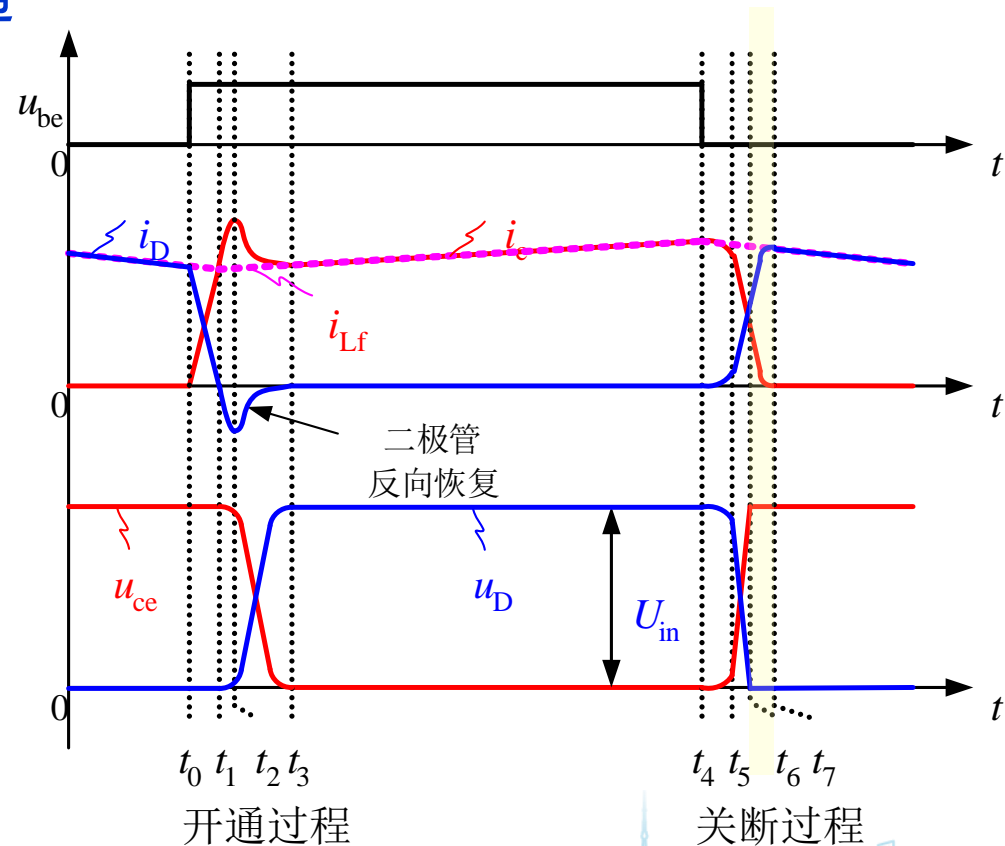
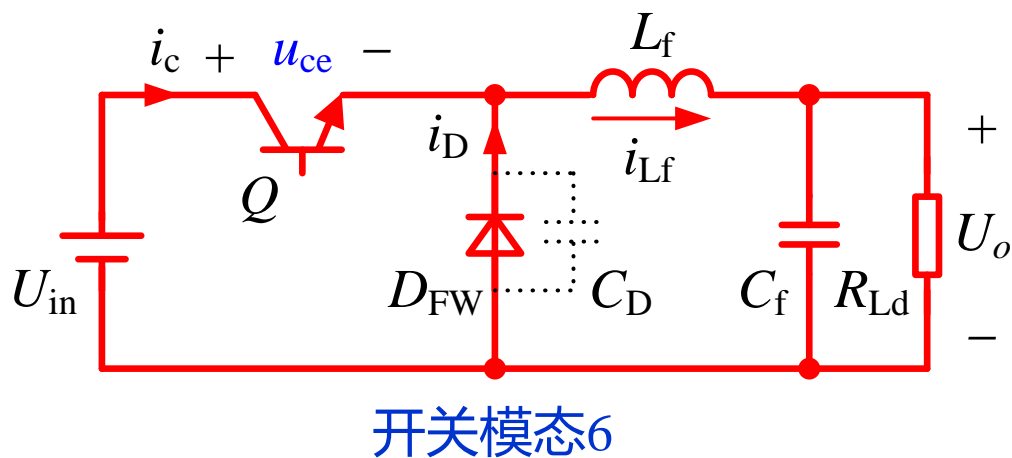
- 关断 Q , i_c 开始下降
- D_{FW} 结电容 C_D 放电, 电流为 $i_D = i_{Lf} - i_c$
- D_{FW} 电压 u_D 开始下降
- Q 电压 u_{ce} 开始上升
- t_6 时刻, C_D 电荷释放完毕
- u_D 下降到0, u_{ce} 上升到 U_{in}



电路工作模态分析6

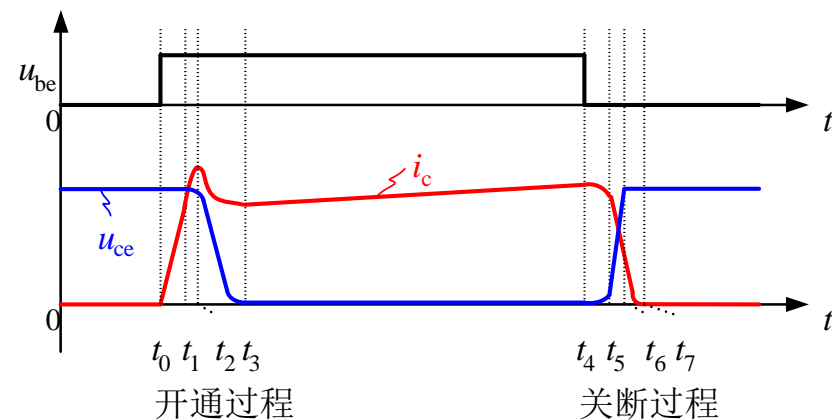
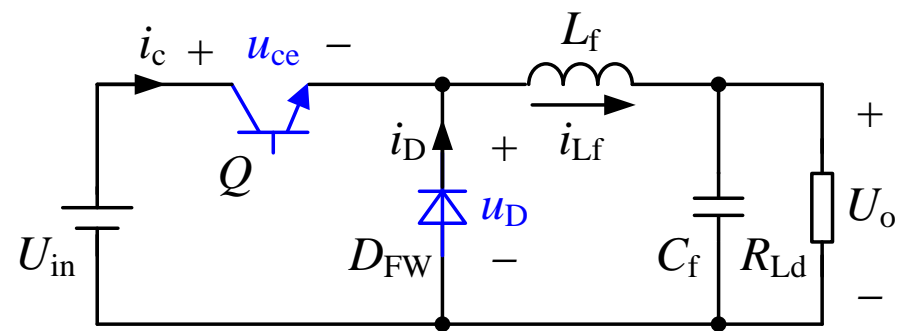
■ 模态6 $[t_6, t_7]$: Q 管电流下降至零, 完成关断

- i_c 继续下降, 由于 i_c 小于 i_{Lf} , D_{FW} 依然导通
- 二极管与功率管电流之和为 i_{Lf}
- t_7 时刻, i_c 下降到零, i_D 增大到 i_{Lf}
- Q 完成关断过程



开关管的开通和关断特性

- 开关管的开通与关断过程， i_c 与 u_{ce} 存在交叠区，产生开关损耗，包括开通损耗和关断损耗
- 每个开关周期内的开关损耗是恒定的，随着开关频率的提高，总的开关损耗也呈比例增大
- 开关管开通时，电流上升快， di/dt 很大；
开关管关断时，电压上升很快， du/dt 很大
- 硬开关方式，会产生很大的电磁干扰





7.1 开关管的开通和关断特性

7.2 直流变换器的基本缓冲电路





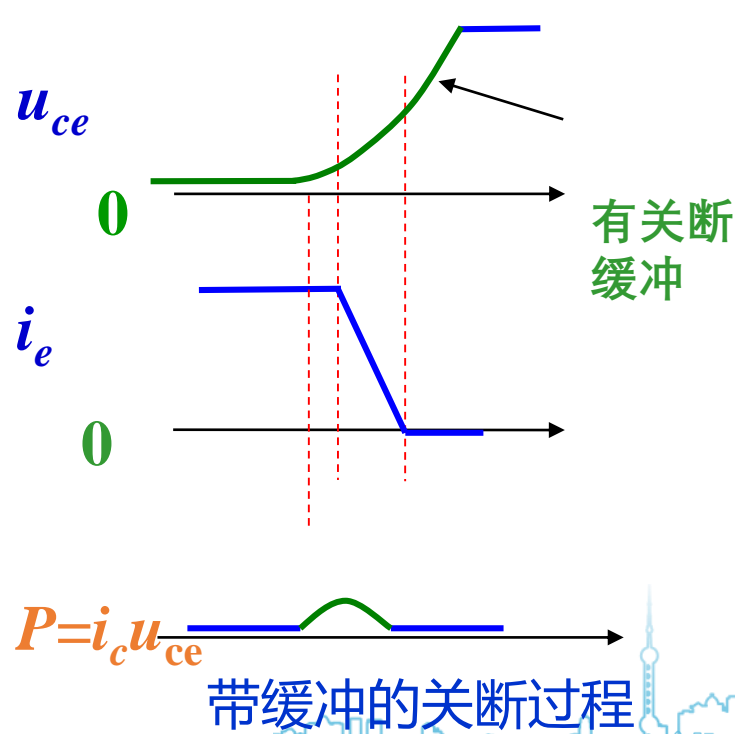
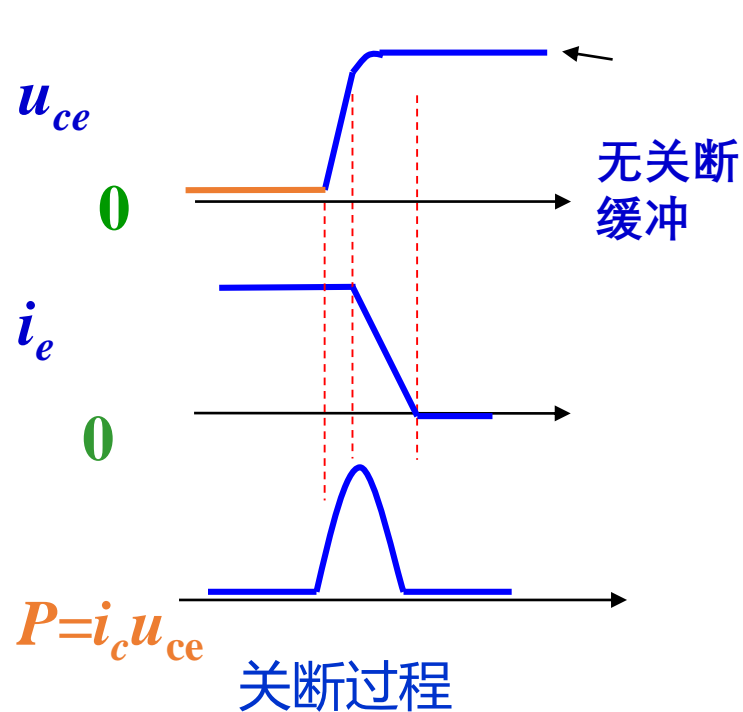
7.2 直流变换器的基本缓冲电路

7.2.1 RCD缓冲电路



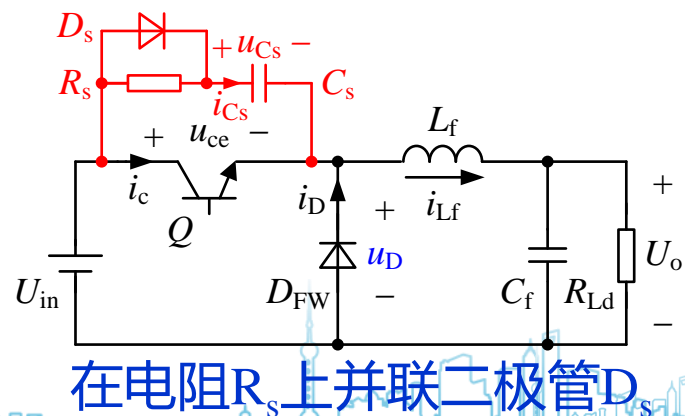
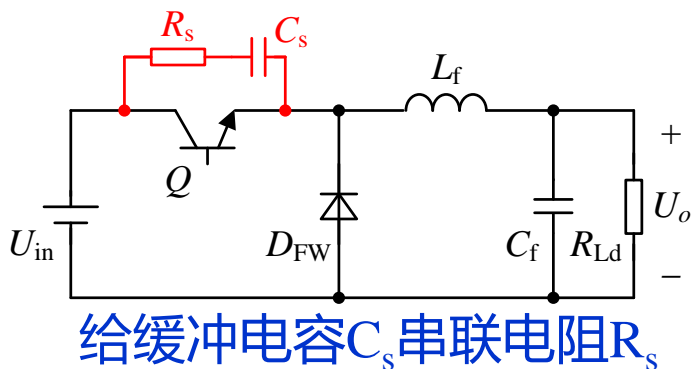
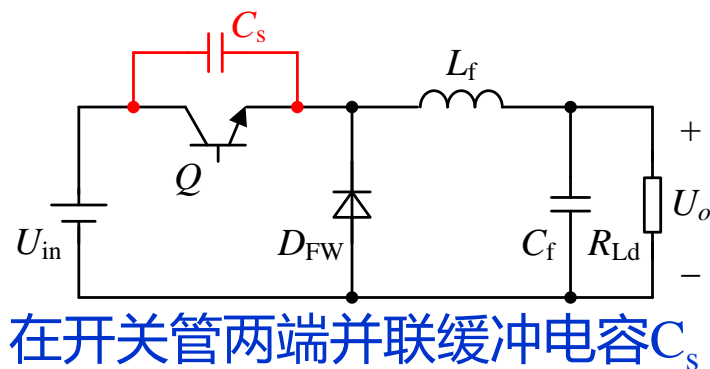
关断缓冲电路过程分析

- 为了减小开关管的关断损耗，可以减小开关管关断时电压电流交叠区的电压大小
- 可通过加入一个缓冲电路以降低开关管两端电压的上升率来实现



直流变换器关断缓冲电路推导过程

- 通过并联电容，可降低开关管两端电压变化
- 在关管截止 C_s 电压为 U_{in} ，开关管开通时 C_s 直接被短路，会导致 i_c 存在很大电流尖峰
- 为减小开关管开通时电流尖峰，在 C_s 串联电阻 R_s
- 但 R_s 会削弱 C_s 的作用，使得开关管关断时电压上升速度变快
- 在 R_s 上并联一个二极管 D_s ，构成RCD缓冲电路



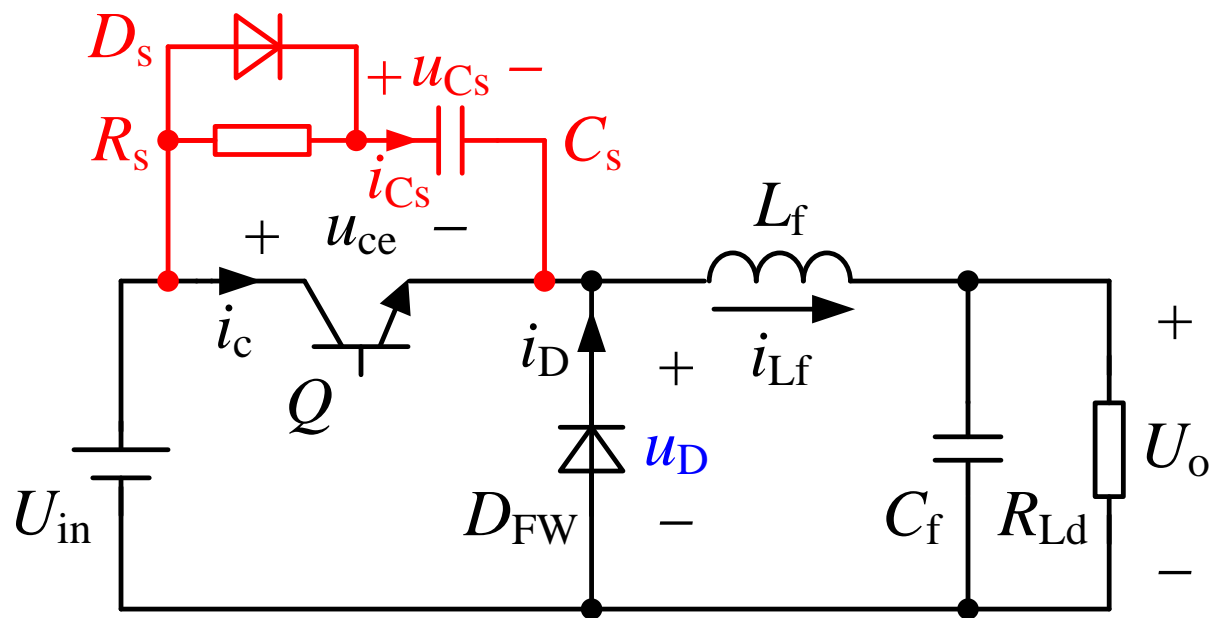
直流变换器关断缓冲电路推导过程

■ 开关管关断时

- D_s 导通
- 电容 C_s 直接并联在开关管两端
- 减缓开关管两端电压的上升率

■ 开关管开通时

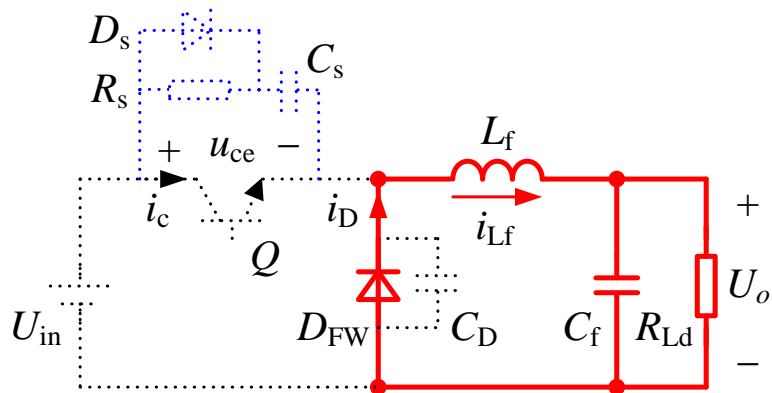
- D_s 关断
- 电容 C_s 通过串联电阻 R_s 放电
- 减缓了开关管的电流尖峰



RCD缓冲电路工作模态分析1

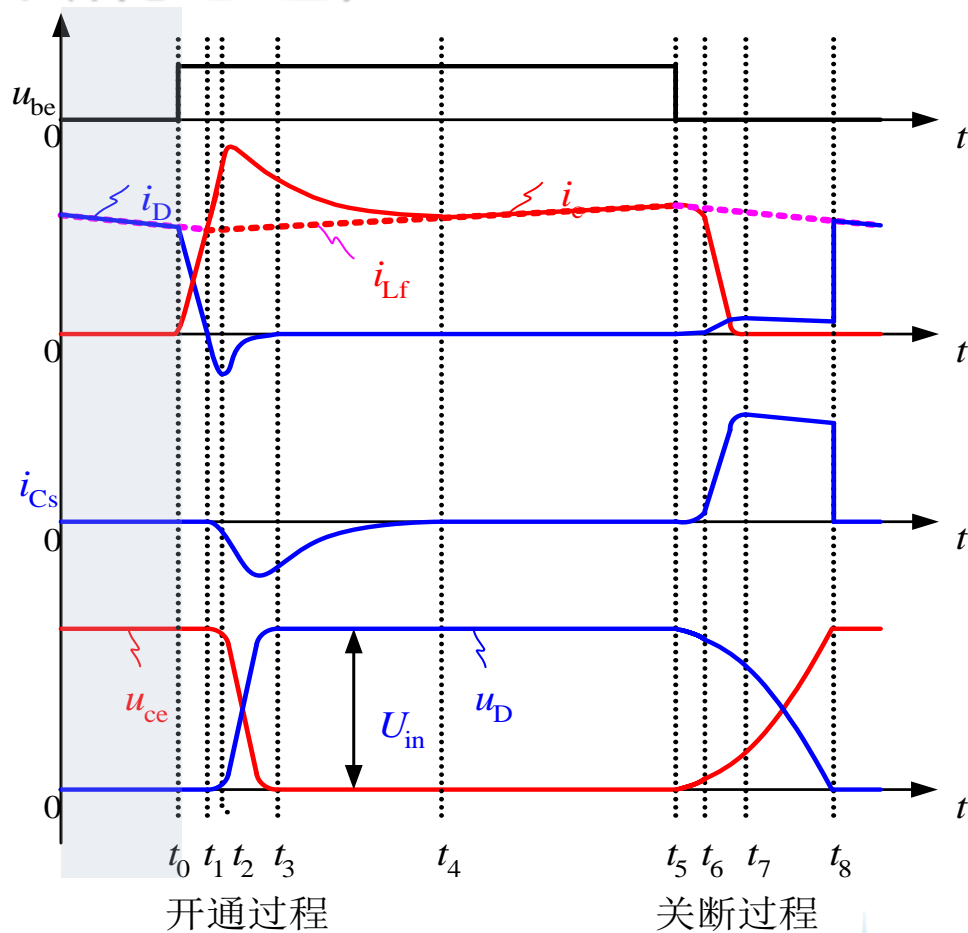
■ 模态1 [t_0 时刻之前]:

- Q 截止, D_{FW} 导通
- 电感电流 i_{L_f} 线性下降
- 功率管电压 u_{ce} 为 U_{in}
- 缓冲电容 C_s 电压 u_{Cs} 为 U_{in}
- 二极管电容电压为零



开关模态1

Q 管关断稳态过程

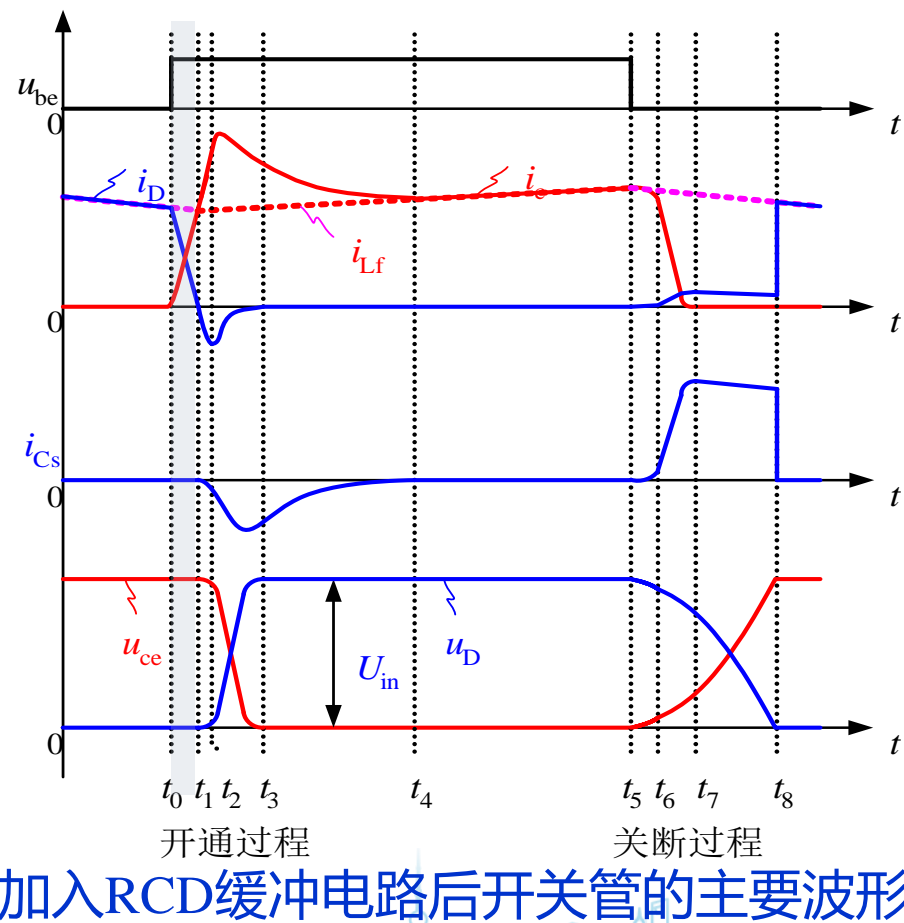
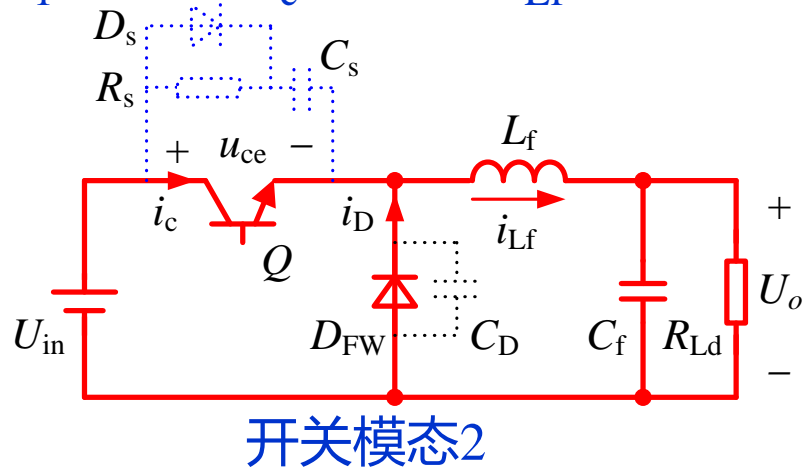


加入RCD缓冲电路后开关管的主要波形

电路工作模态分析2

■ 模态2 $[t_0, t_1]$: Q 管电流上升/ D 电流下降过程

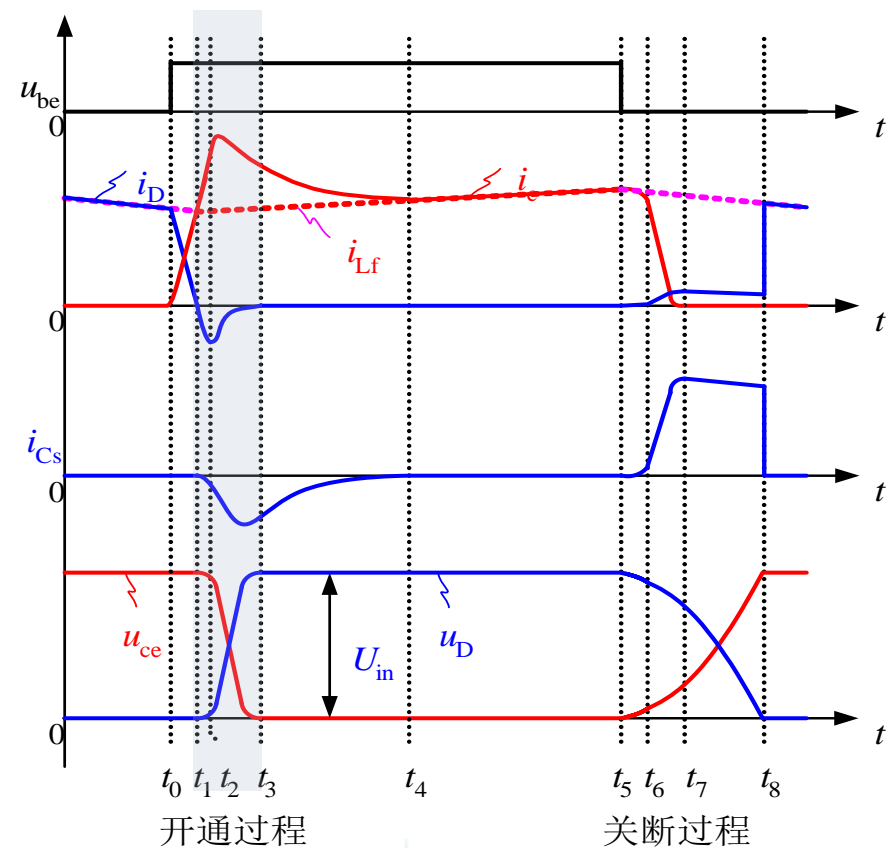
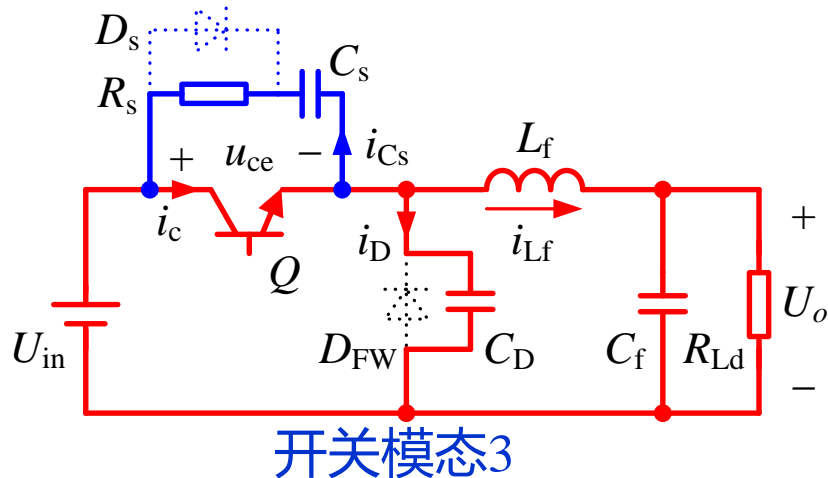
- 开通 Q , 集电极电流 i_c 开始上升
- 由于 i_c 小于 i_{Lf} , D_{FW} 依然导通, 二极管电流下降
- 二极管与功率管电流之和为 i_{Lf}
- Q 电压 u_{ce} 仍然为 U_{in}
- t_1 时刻, i_c 上升到 i_{Lf}



电路工作模态分析3

■ 模态3 $[t_1, t_3]$: D_{FW} 反向恢复过程

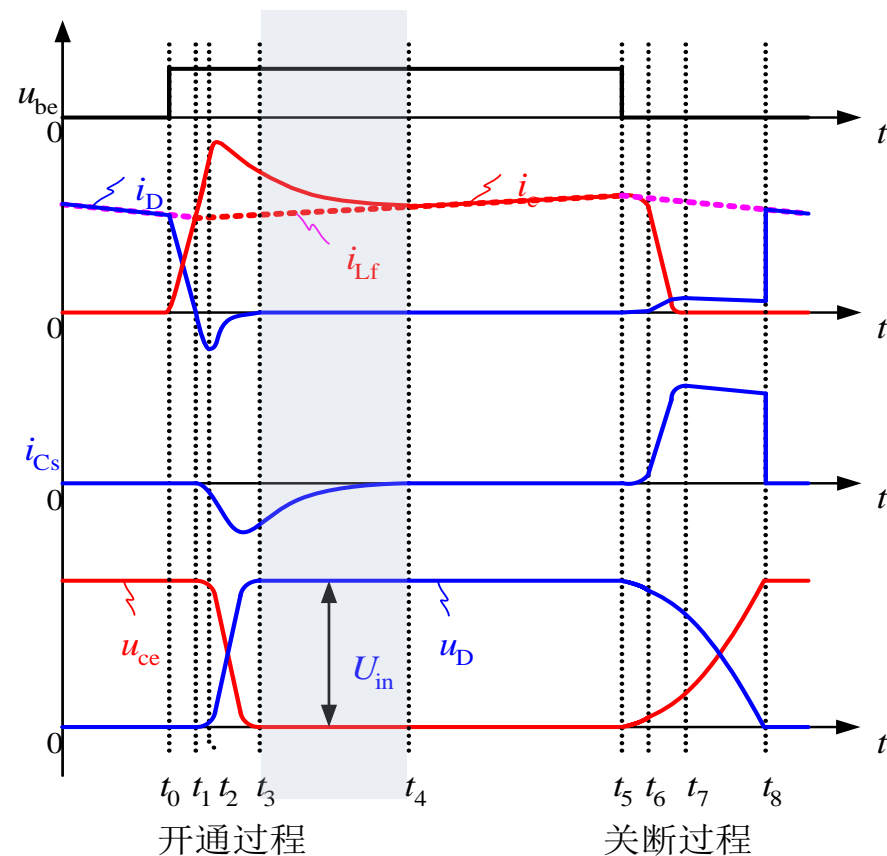
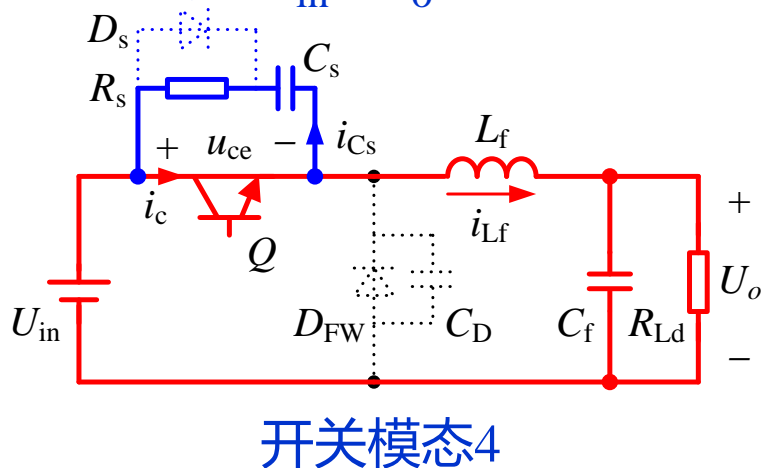
- D_{FW} 反向恢复, 结电容 C_D 被充电, 电流 i_D 为负
- C_D 电压上升, u_{ce} 开始下降, C_s 通过 R_s 放电
- $i_c = i_{Lf} + i_D + i_{Cs}$ (C_s 放电电流)
- t_2 之后, i_D 反向减小, u_{DFW} 从 0 至 U_{in} , u_{ce} 从 U_{in} 至 0
- t_3 时刻, D_{FW} 完成反向恢复, Q 完成开通过程



电路工作模态分析4

■ 模态4 $[t_3, t_4]$: C_s 继续放电过程

- t_3 时刻之后, Q 导通, D_{FW} 关断
- C_s 继续通过 R_s 和 Q 放电, 其电压在 t_4 时刻至零
- $i_c = i_{Lf} + i_{Cs}$ (C_s 放电电流)
- 功率管电压 u_{ce} 为零, 二极管电压为 U_{in}
- 滤波电感电压为 $U_{in} - U_o$

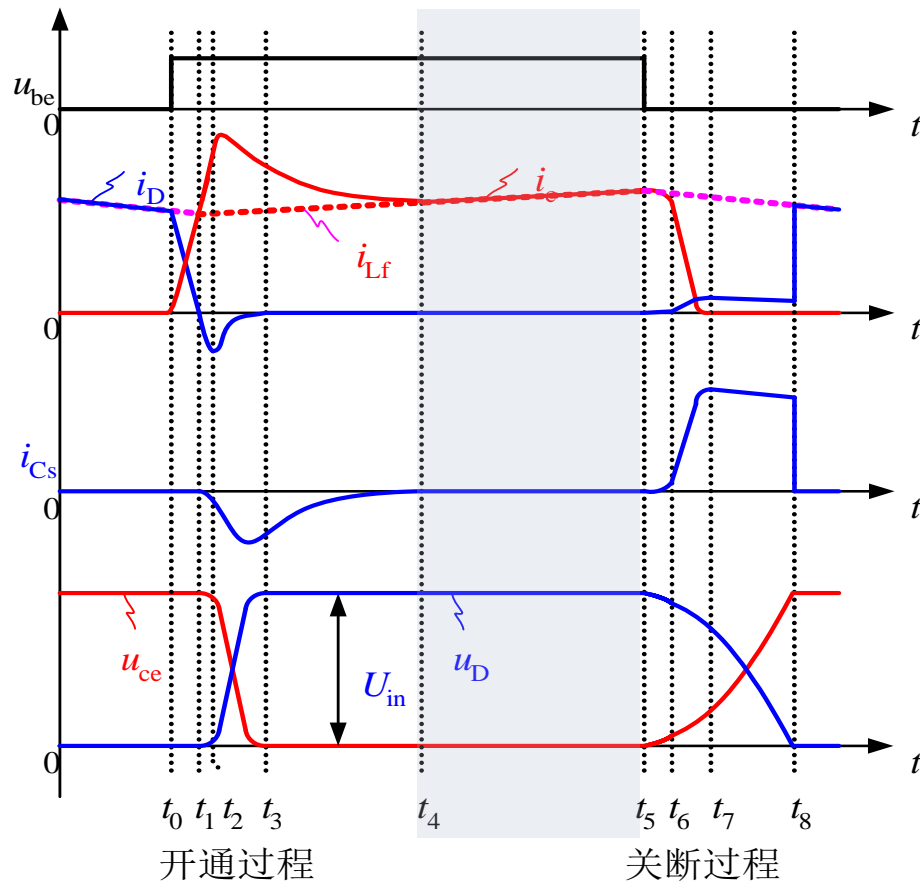
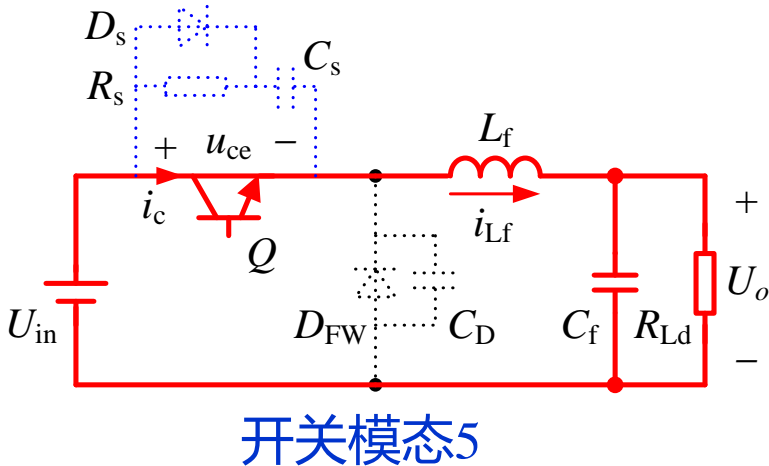


加入RCD缓冲电路后开关管的主要波形

电路工作模态分析5

■ 模态5 $[t_4, t_5]$: Q 管稳态导通过程

- t_4 时刻之后, 缓冲电路停止工作
- Q 导通, D_{FW} 关断
- 滤波电感电压为 $U_{in} - U_o$
- 功率管电压 u_{ce} 为零, C_s 电压为零
- 二极管电压为 U_{in}

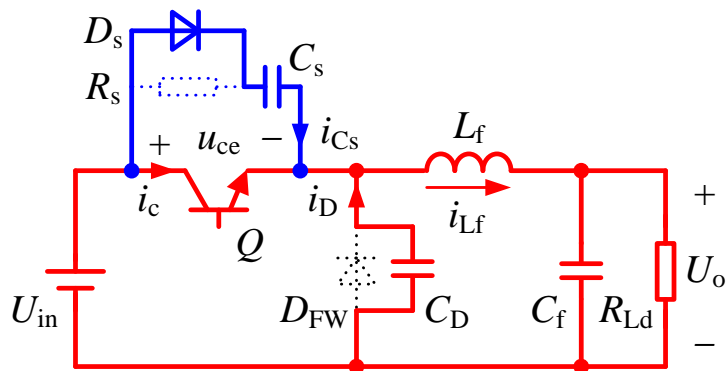


加入RCD缓冲电路后开关管的主要波形

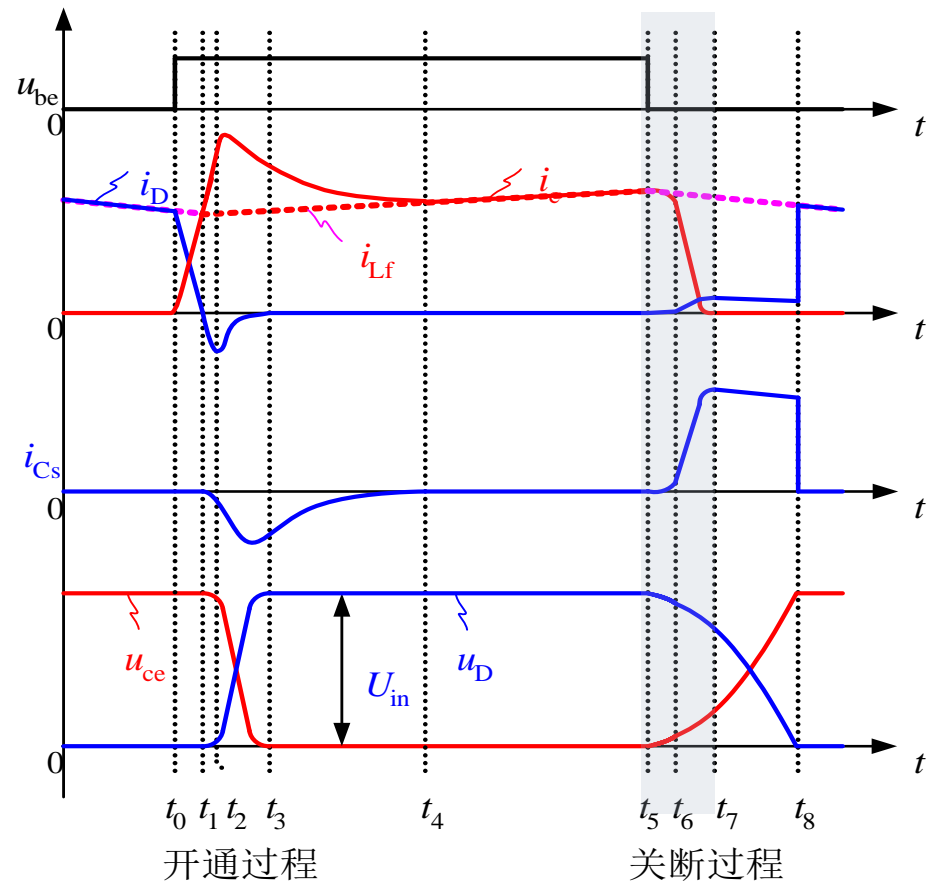
电路工作模态分析6

■ 模态6 $[t_5, t_7]$: Q 管关断过程

- 关断 Q , i_c 开始下降
- D_{FW} 结电容 C_D 放电, 而 C_s 充电, $i_D + i_C + i_{CS} = i_{Lf}$
- D_{FW} 电压 u_D 开始下降
- C_s 限制 u_{ce} 上升, u_{ce} 缓慢上升
- t_7 时刻, i_{CS} 下降至零, Q 管完成关断过程



开关模态6

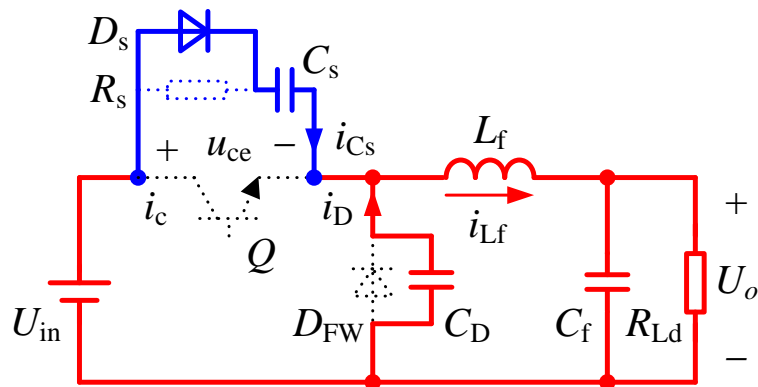


加入RCD缓冲电路后开关管的主要波形

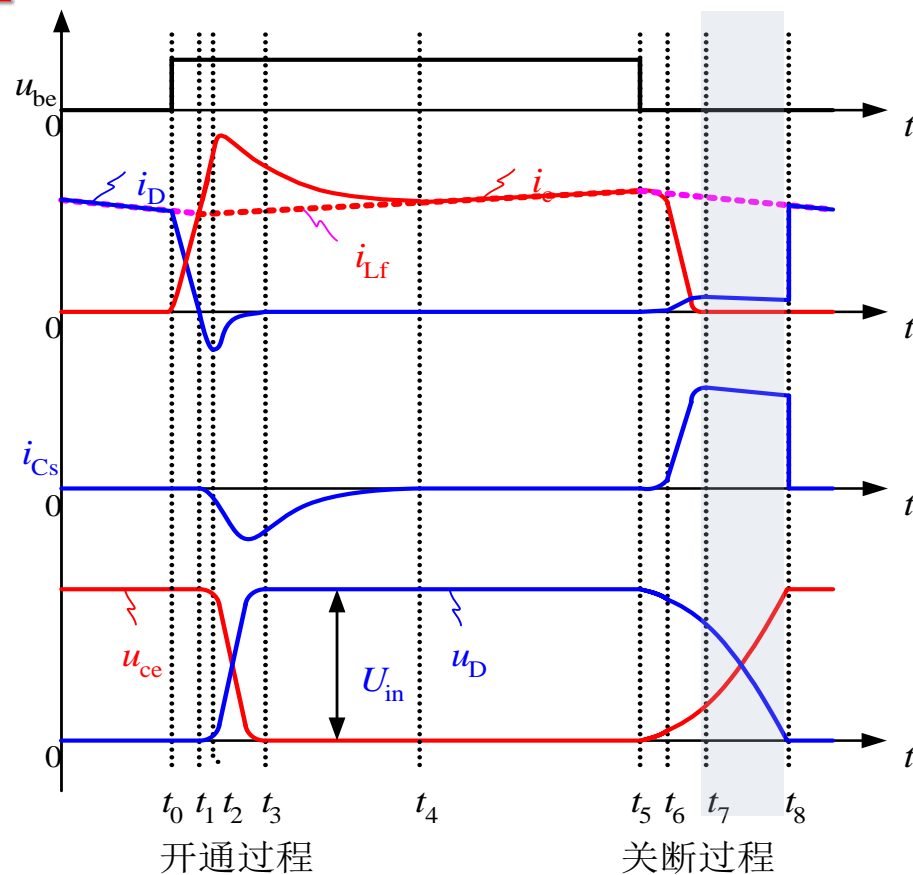
电路工作模态分析7

■ 模态7 $[t_7, t_8]$: Q 管电压上升到 U_{in} 过程

- C_s 继续充电, 而 C_D 继续放电
- t_8 时刻, C_s 电压上升到 U_{in} , C_D 电压下降到零
- i_{Lf} 通过 D_{FW} 续流, $i_{Lf}=i_D+i_{Cs}$
- t_8 时刻之后, D_{FW} 导通, 缓冲电路停止工作



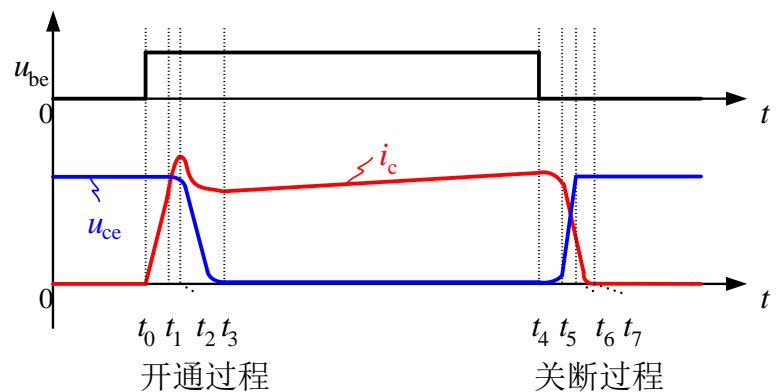
开关模态7



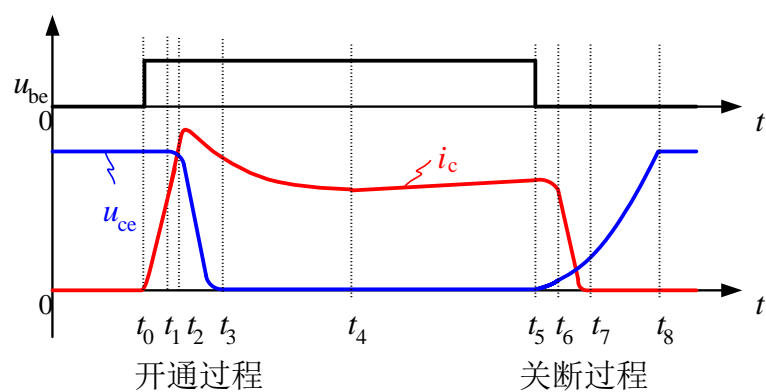
加入RCD缓冲电路后开关管的主要波形

加入RCD 缓冲电路的工作特性

- Q 关断过程中, C_s 限制了 u_{ce} 的上升率, i_c 与 u_{ce} 的交叠区中 u_{ce} 较低, 大大减小 Q 关断损耗
- Q 开通时, C_s 通过 Q 放电, Q 存在一定开通电流尖峰, Q 开通损耗有所增加
- C_s 存储能量主要消耗在 R_s 上, RCD缓冲电路是有损耗



未加缓冲电路



加入缓冲电路

关断缓冲电路参数设计

■ 电容 C_s 设计:

- 缓冲电容大, u_{ce} 上升慢, 有助于减小关断损耗
- 缓冲电容大, 缓冲电容能量损耗大
- 应折衷选取, u_{ce} 上升到 U_{in} 的时间为开关管电流下降时间3~5 倍

$$T_{rise} = C_s U_{in} / I_o = (3 \sim 5) t_f$$

- **电容值设计:** $C_s = (3 \sim 5) \frac{I_o}{U_{in}} t_f$
- 应选等效电感较小的薄膜电容或金属膜电容
- 缓冲电容承受的最高电压为 U_{in} , 电压定额按照 $(1.5 \sim 2) U_{in}$ 选取



关断缓冲电路参数设计

■ 电阻 R_s 设计:

- 开关管导通时，缓冲电容电压应下降到零

$$(3 \sim 5)\tau_{RC} < T_{on} \quad \tau_{RC} = R_s C_s$$

- 缓冲电阻最大值为: $R_s < \frac{T_{on}}{(3 \sim 5)C_s}$

- 尽量按照最大值选取，以减小开关管开通时电流尖峰

- 缓冲电阻消耗的功率为: $P_{loss_Rs} = \frac{1}{2} C_s U_{in}^2 f_s$

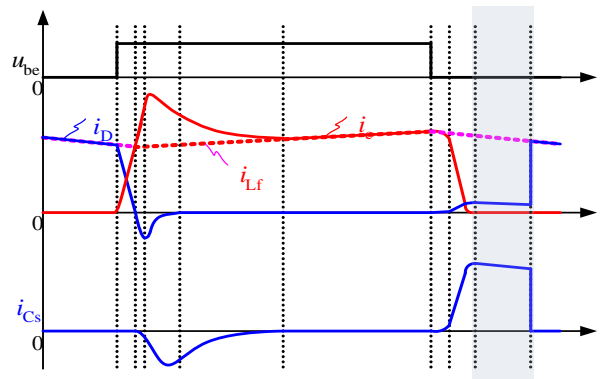
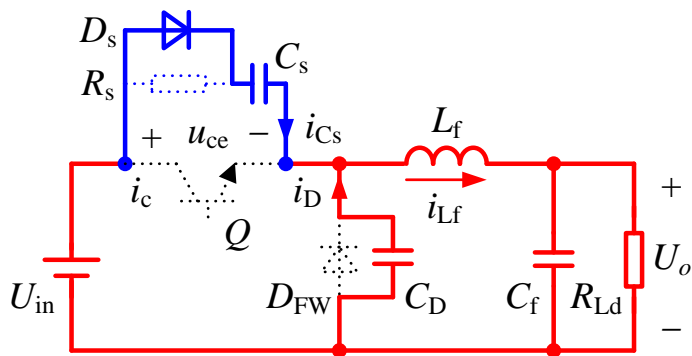
- 选择等效电感较小金属膜电阻或者碳膜电阻
- 存在较大功率消耗，还应选择功率较大电阻



关断缓冲电路参数设计

■ 缓冲二极管 D_s 设计:

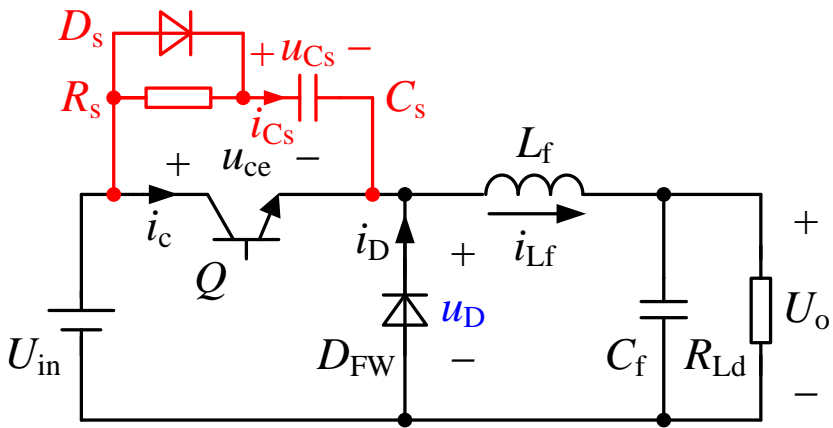
- 缓冲二极管承受的电压应力为 U_{in}
- 如果忽略续流二极管 D_{FW} 反向恢复，开关管关断时缓冲二极管流过最大电流近似为 I_o ，流过时间约为 $(3\sim 5)t_f$
- 缓冲二极管电流有效值: $I_{D_s_rms} = I_o \sqrt{(3\sim 5)t_f / T_s}$
- 应选用快恢复二极管，按照其电压应力和电流有效值选取



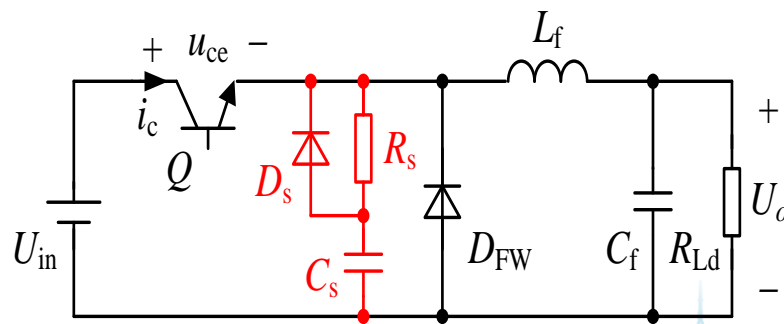
另一种RCD缓冲电路设计

- 关断时在 Q 两端等效并联电容延缓电压变化
- 同时将等效电容放于 D 两端延缓 Q 管关断电压变化
- 衍生出第二种RCD缓冲电路
- 特别注意二极管方向

工作原理?



RCD缓冲电路并联在开关管上

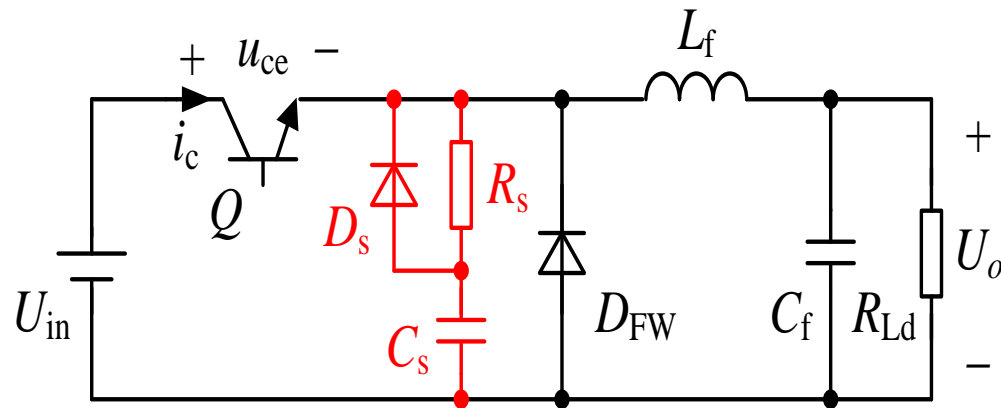


RCD缓冲电路并联在续流二极管上

另一种RCD缓冲电路工作原理

■ 开关管 Q 关断过程:

- 关断前: Q 稳态导通, D_{FW} 截止, C_s 电压为 U_i (上正下负)
- 关断瞬间, Q 电流下降, D_s 会导通, 弥补 Q 电流减小量
- 由于 C_s 作用, 续流二极管 D_{FW} 电压从 U_{in} 缓慢下降到零, Q 电压 u_{ce} 从零慢慢上升到 U_{in} , 因此减小 Q 关断损耗
- 注意: 当 C_s 上电压减小到零时, D 方会导通续流



另一种RCD缓冲电路工作原理

■ 当开关管 Q 导通时:

- 导通前: Q 关断, D 稳态续流, C_s 上电荷为零
- 输入电压通过缓冲电阻 R_s 给缓冲电容 C_s 充电
- Q 电流除了电感电流分量外, 还有 C_s 的充电电流
- 当 C_s 电压上升到 U_{in} 时, 充电过程结束

