

开关功率变换器中的 吸收式软开关技术

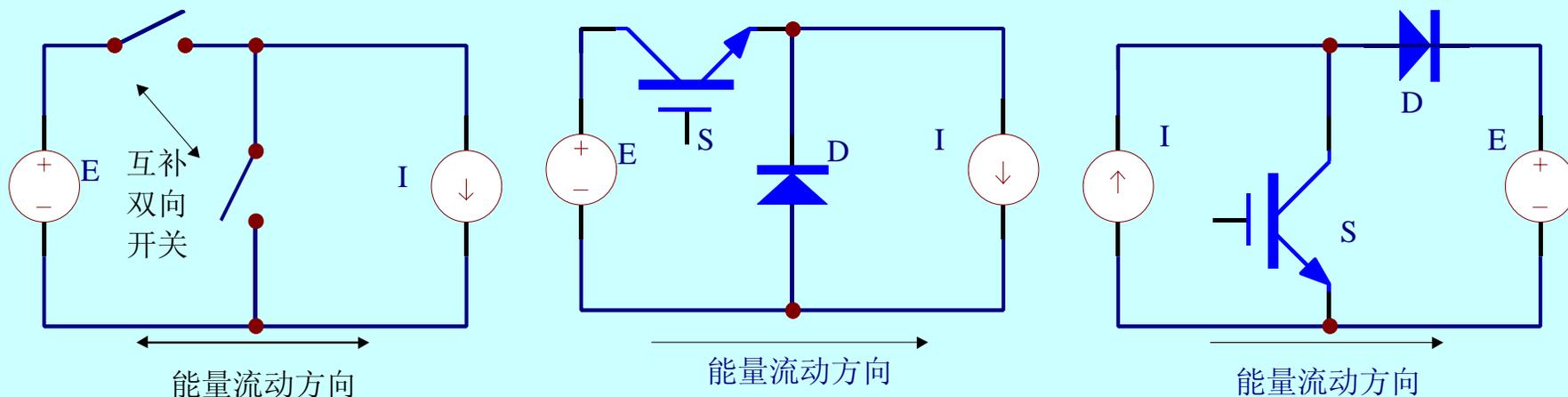
Snubber Type Soft Switching Technologies in
Switch Mode Power Converters

浙江大学电气工程学院

College of Electrical Engineering,
Zhejiang University,
China

开关功率变换器的基本结构

电压源——电流源——电压源交错级联模式



(a)

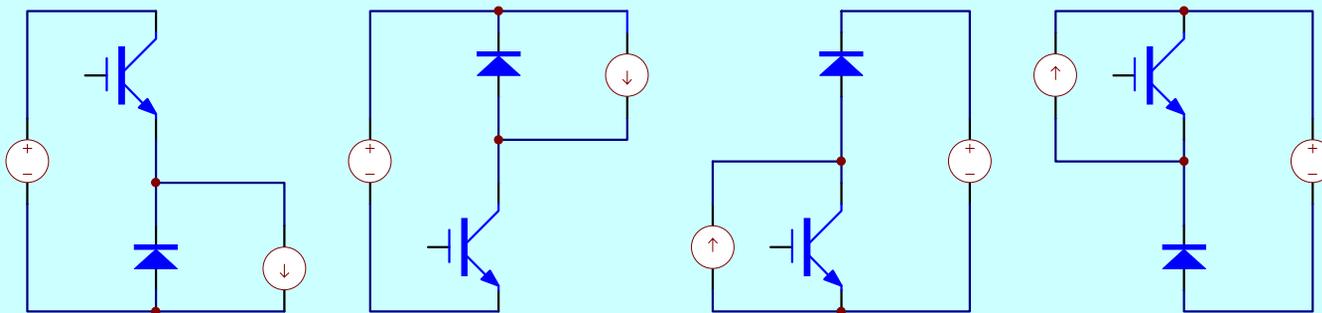
(b)

(c)

图一A 电能通过开关网络的传输

- (a) 电压源和电流源间能量双向传输的基本单元
- (b) 从电压源到电流源的单向能量传输单元
- (c) 从电流源到电压源的单向能量传输单元

开关功率变换器的基本结构（续）



(a)能量从电压源传递到电流源 (b)能量从电流源传递到电压源
图一B 电能通过开关网络传输的四个基本模式

脉宽调制（PWM, Pulse Width Modulation）的概念
何开关功率变换电路都由上述四个基本单元组合而成
基本结构：有源开关(S)—无源开关(D，二极管)对
实际应用中的对应关系：电压源——电容，电流源——电感

开关工作模式的优点

在理想化前提下：

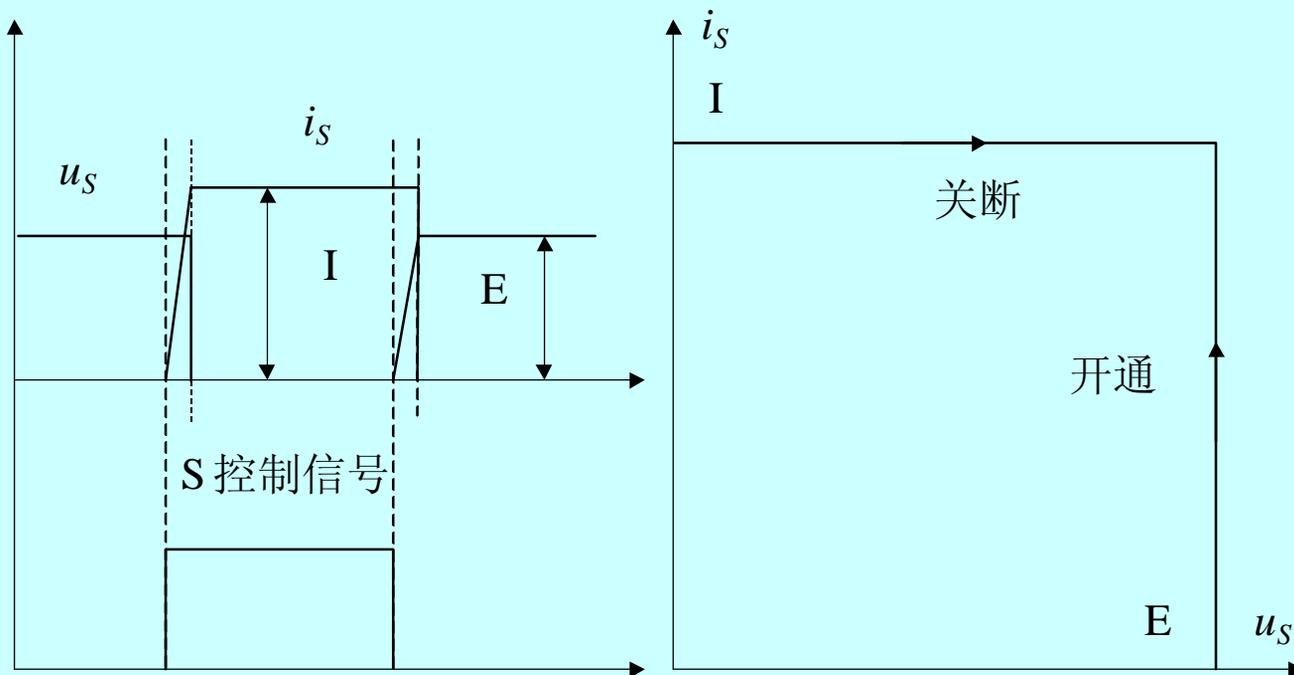
- 无源储能元件（电感L、电容C）没有能量损耗；
 - 功率开关元件在导通——零电压承载电流，和阻断——零电流承受电压这两种零损耗状态间**瞬间**切换，不消耗能量。
- 有实现高效率电功率变换的可能性。

从电、磁储能的角度考虑：

在同等功率级别下，开关频率提高，开关周期时间缩短，电能传递加快，无源储能元件所需存储的能量减小，体积、重量下降，使得变换器的高功率密度和快速响应成为可能。

——给出了开关功率变换的高频化要求。

硬开关PWM：不考虑二极管器件非理想特性和电路寄生参数的开关过程

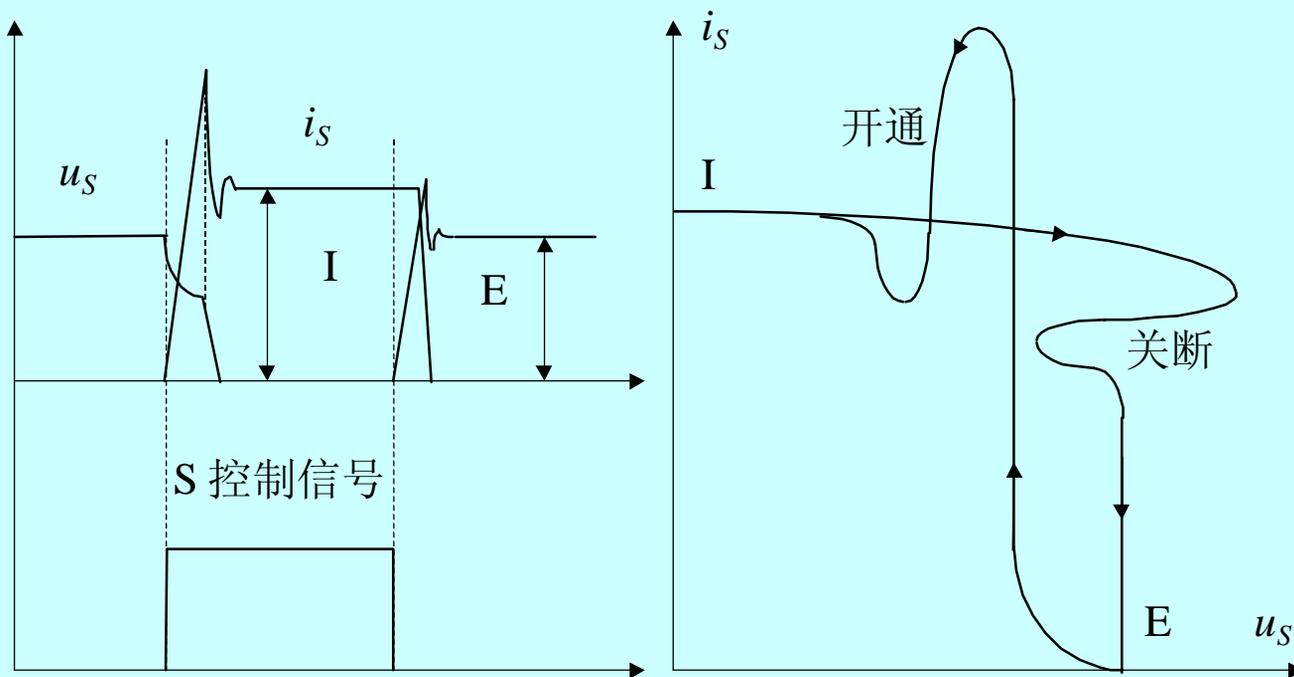


开关管电压电流示意

开关轨迹示意

图二 不考虑寄生参数的PWM变换器开关过程示意

硬开关PWM：考虑器件非理想特性和电路寄生参数的开关过程

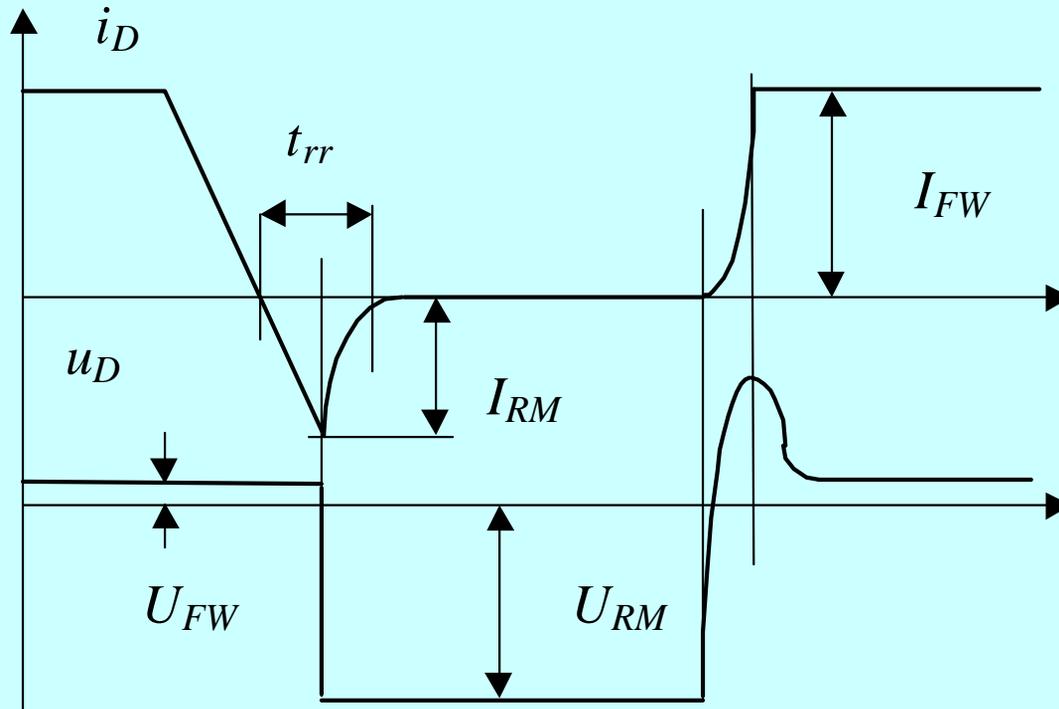


开关管电压电流示意

开关轨迹示意

图三A 实际的PWM变换器硬开关过程示意

硬开关PWM：考虑器件非理想特性和电路寄生参数的开关过程



二极管的非理想特性

图三B 实际的PWM变换器硬开关过程示意（续）

硬开关工作的缺点：

- 在开关状态切换期内，主开关上有高电压大电流重叠，相应的能量耗散正比于开关频率以及装置容量，影响变换效率
- 高的电压变化率、电流变化率（ du/dt 、 di/dt ）所致电磁兼容（EMC, Electro-Magnetic Compatibility）问题，随功率开关器件发展而日趋严重
- 开关轨迹（Loci）对器件特性和寄生参数敏感，对线路形状、布局以及辅助手段要求严格，影响电路可靠性

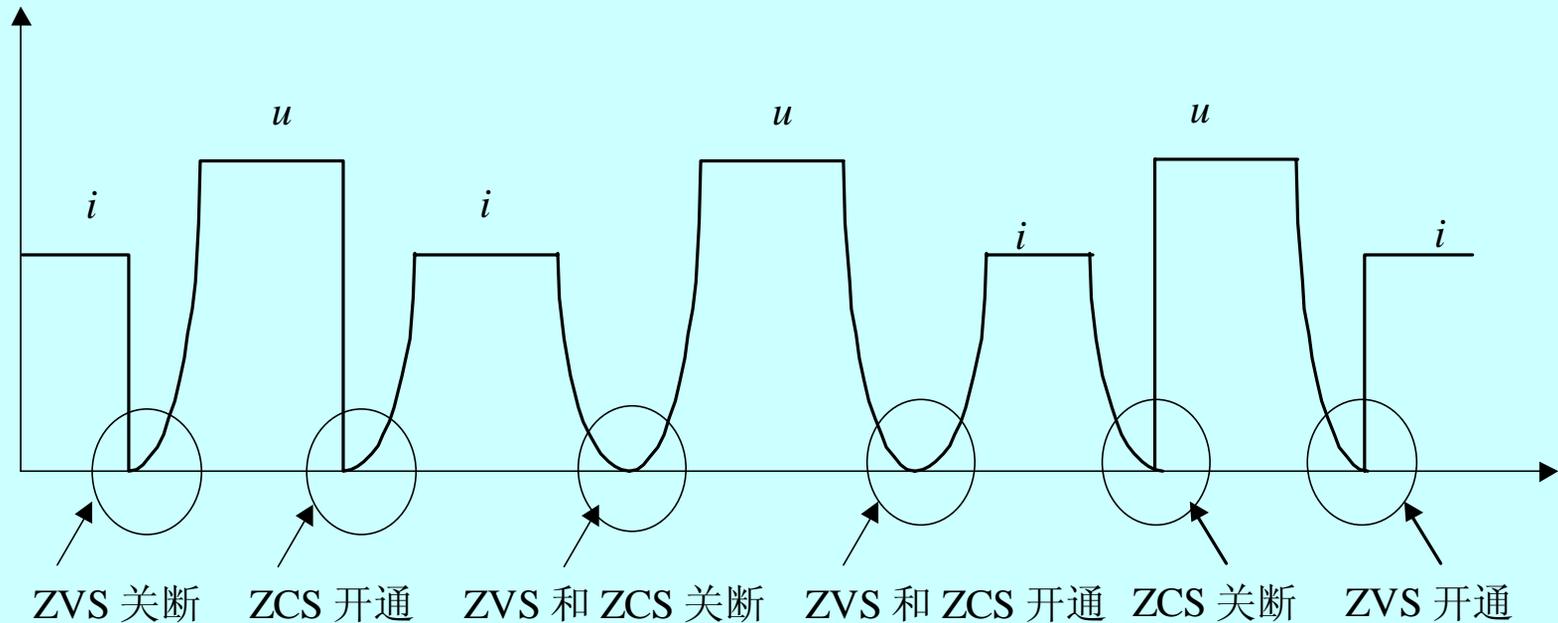
所谓“软开关”的含义：

- 消除或者近似消除开关状态切换期间功率器件同时承受电压、电流的情况
- 限制、降低功率开关瞬态过程中的电压变化率和/或电流变化率
- 达到上述目的，不应该通过开关损耗、开关应力的转嫁来实现

软开关的基本分类

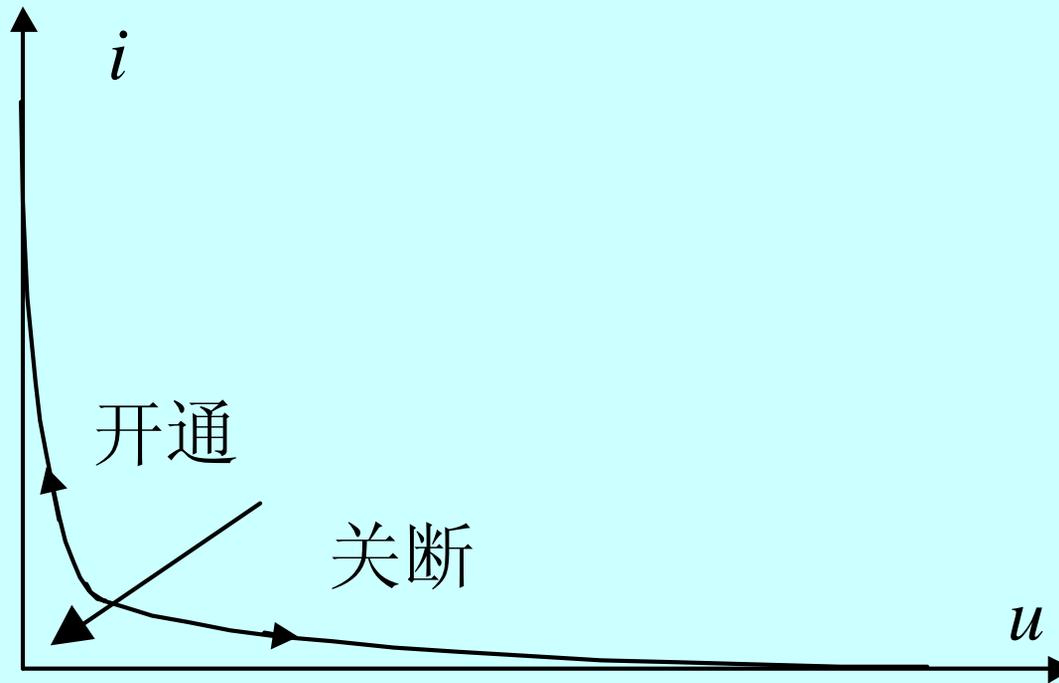
- 零电压型（ZVS, Zero Voltage Switching）——
开关转换过程中器件所承受电压维持在零或较低水平
- 零电流型（ZCS, Zero Current Switching）——
开关转换过程中器件所承载电流维持在零或较低水平
- 零电压和零电流型（ZVS & ZCS）——
兼备上两者特征

软开关示意图



图四 各种不同类软开关电压、电流波形示意

软开关示意图（续）

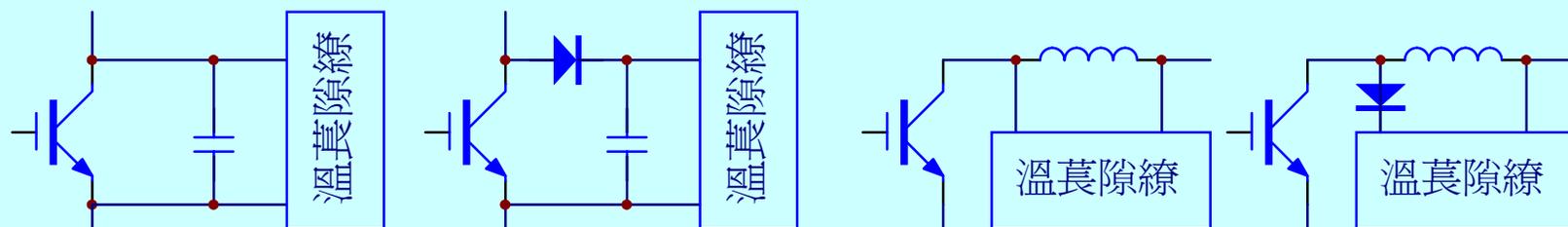


图五 软开关的电压——电流轨迹示意

吸收电路概述

- **Snubber**，吸收电路，或译缓冲电路
- **起源**：最早的开关辅助电路，如继电器（Relay）的R-C（R-C-D）灭弧电路，晶闸管（Thyristor）的开通、关断缓冲器，功率晶体管（GTR）关断吸收
- **早期功能**：抑制过高 di/dt 、 du/dt ，约束开关轨迹，确保器件工作在安全工作区(SOA, Safe Operation Area)缓解电磁干扰情况

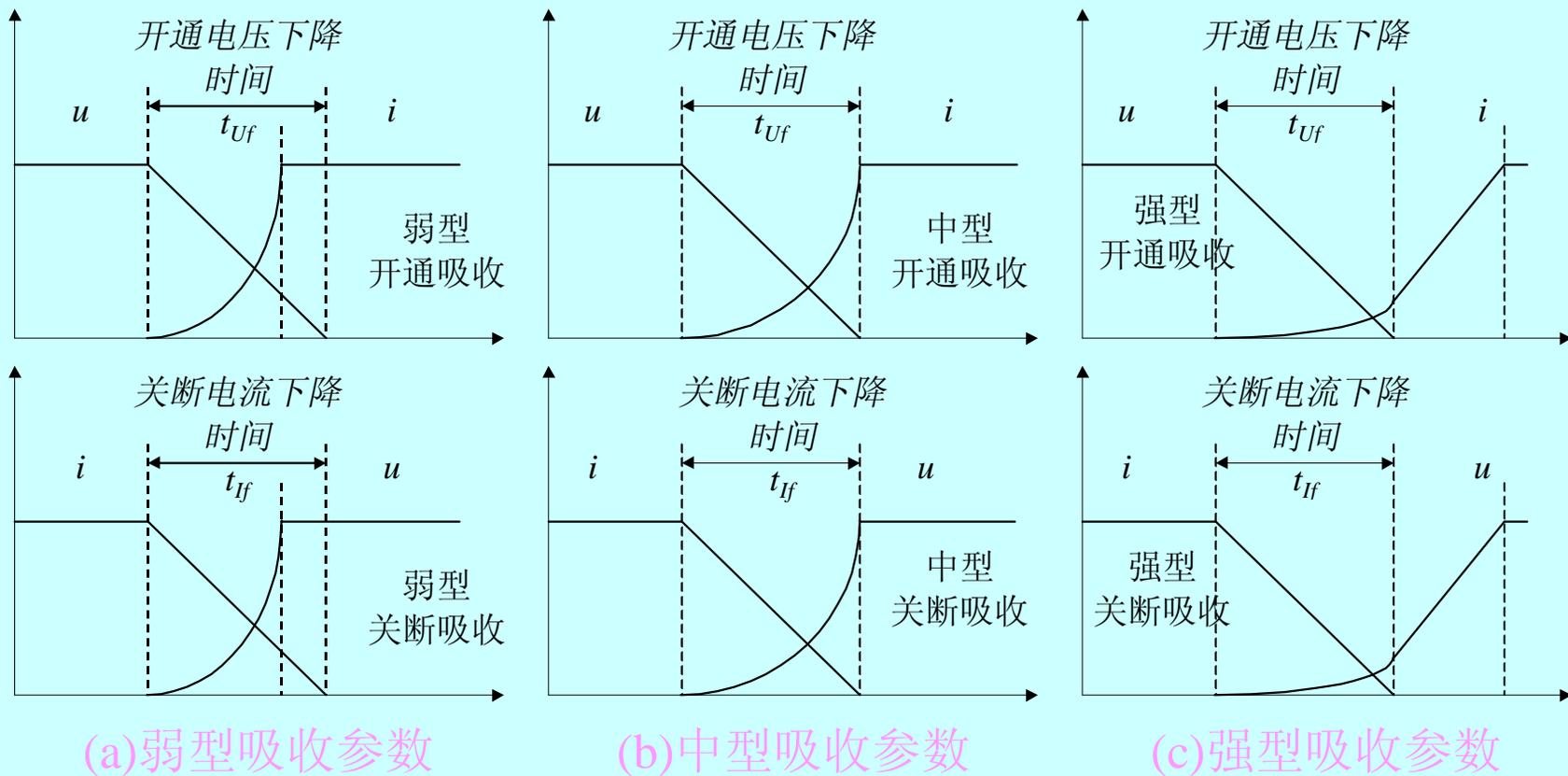
吸收电路的基本结构和工作原理



图六 吸收电路基本结构

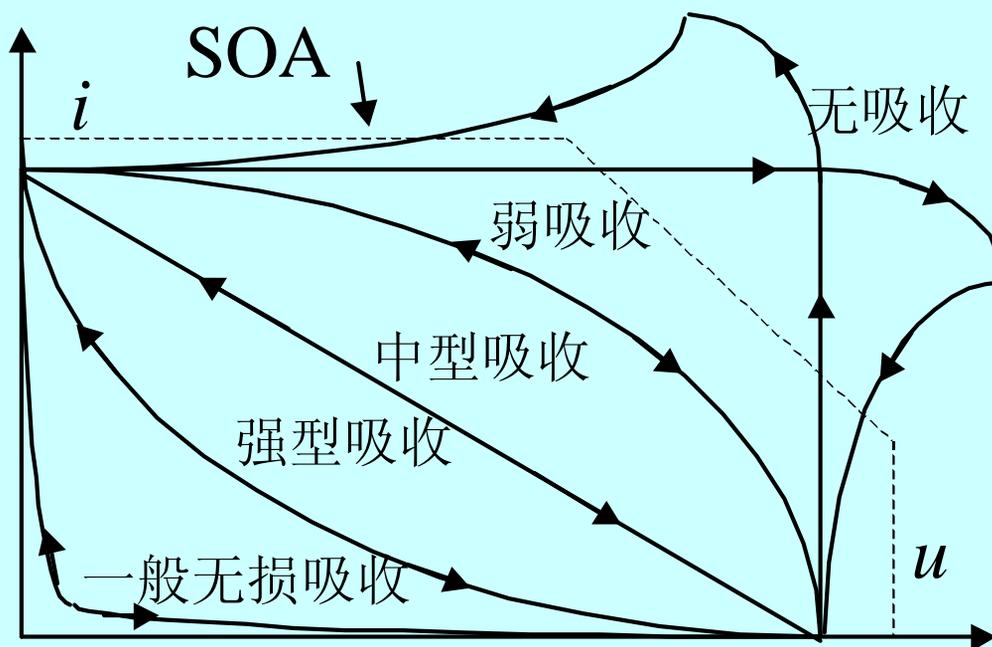
- 以一电容性支路与主功率开关并联，利用电容两端电压不能突变特性在关断期间为其提供一条分流路径，避免它同时承受高的电压，实现关断工况的“软化”
- 以一电感性元件与主功率开关串联，利用电感承载电流不能突变特性在开通期间为其提供一个分压元件，避免它同时承受大的电流，实现关断工况的“软化”
- 以电感性元件串联抑制续流二极管反向恢复（Reverse Recovery）的电流变化率，以电容性支路并联抑制二极管反向恢复后的电压变化率以及寄生参数震荡，改善二极管的关断工况

吸收电路的基本结构与工作原理（续）



图七 吸收电路基本波形示意

吸收电路的基本结构与工作原理（续）



图八 不同吸收参数下的开关轨迹

吸收电路的基本结构与工作原理（续）

- 功率开关器件的瞬态损耗(Transient Loss, Switching Loss)分为三种：
 - 开通(Turn-on)损耗
 - 关断(Turn-off)损耗
 - 寄生电容放电(Parasitic Parallel Capacitor Discharge)损耗
- 从理论上讲，吸收电路不能影响器件开通时寄生电容自放电过程（这种损耗对大多数器件而言可以忽略，在此不作讨论），也不能完全消除器件开通和关断损耗。但吸收电感、电容取值越大，开关轨迹越靠近坐标轴，越接近理想的软开关情况
- 吸收元件应当在一个开关周期内复位（Reset），即吸收电感在主开关下一次开通前电流回零，吸收电容支路在下次关断前电压回零，以保证电路效能的维持
- 吸收元件所存储的能量正比于电感/电容量值和导通电流/阻断电流的平方，吸收式软开关技术的关键就在于恰当处理、利用这一能量

吸收式软开关技术的主要作用

以大的吸收参数，达到以下一项或多项目的：

- 降低开关损耗
- 降低变换器EMI
- 改善续流二极管反向恢复情况
- 降低续流二极管过压
- 提高变换效率
- 提供短路保护、过压抑制的可能手段

吸收式软开关技术的主要评价因素

主要成本、性能考虑：

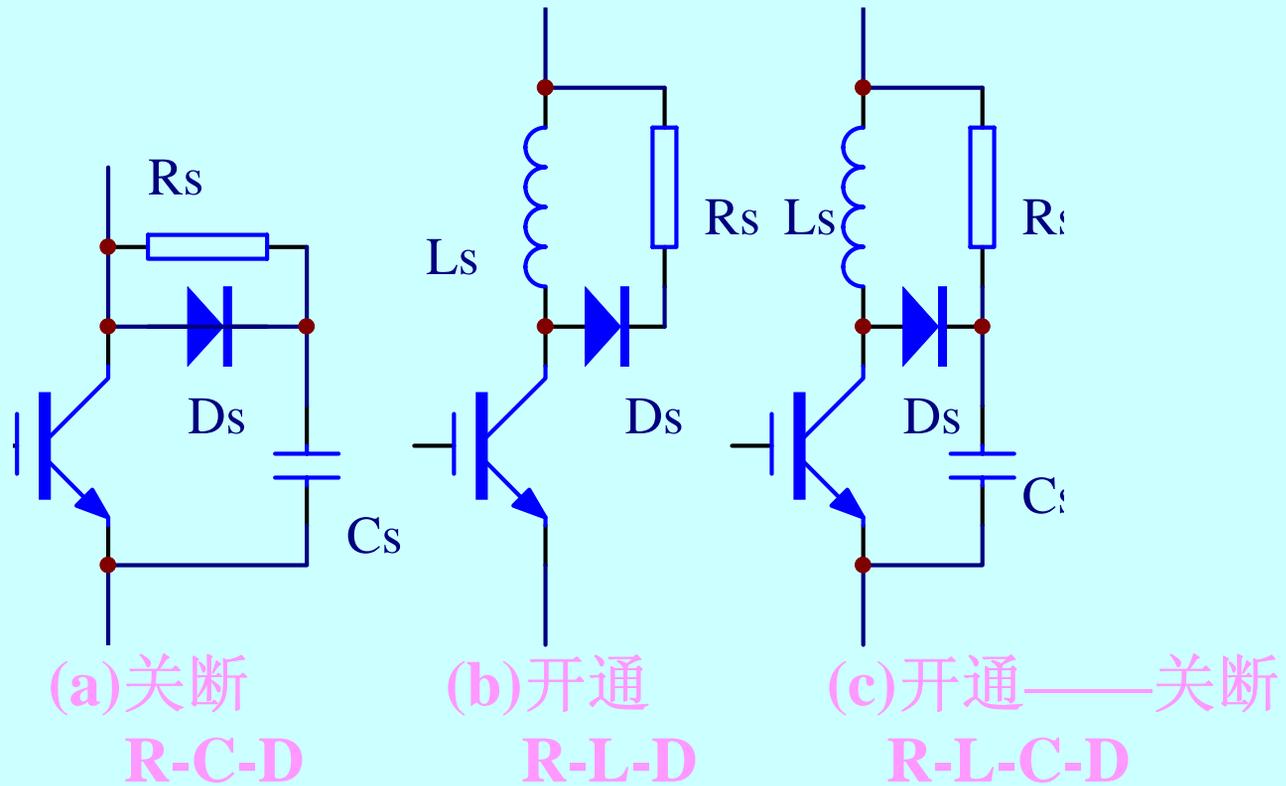
- 附加元件数量（成本）
- 附加损耗
- 额外检测与控制
- 所致主管附加稳态应力（如电流、电压过冲等）
- 对主电路工作的不良影响
- 占空比限制要求，电路工作的速度和负载依赖性

吸收式软开关技术的主要分类

按不同的分类方法，吸收电路可作如下划分：

- 按能耗： 无损耗（Lossless, Nondissipative）（低损耗）电路，耗能式（Dissipative）电路；
- 按参数大小： 强型、中型和弱型电路；
- 按作用过程： 开通（Turn-on）、关断（Turn-off）和混合（Unified）式；
- 按工作方式： 无源（Passive）式、有源（Active）式；
- 按电路极性： 有极性(Polarized)、无极性(Un-polarized)；
- 按工作场合： 单端变换器(Single-Ended Converter)吸收电路，桥臂(Bridge Leg)吸收电路；
- 按吸收元件： 线性(Linear)电路，(Nonlinear)非线性电路

耗能式吸收电路



图九 基本耗能吸收单元

非线性耗能式吸收电路

思路： 吸收参数可变，以小的吸收储能获得强的吸收效果

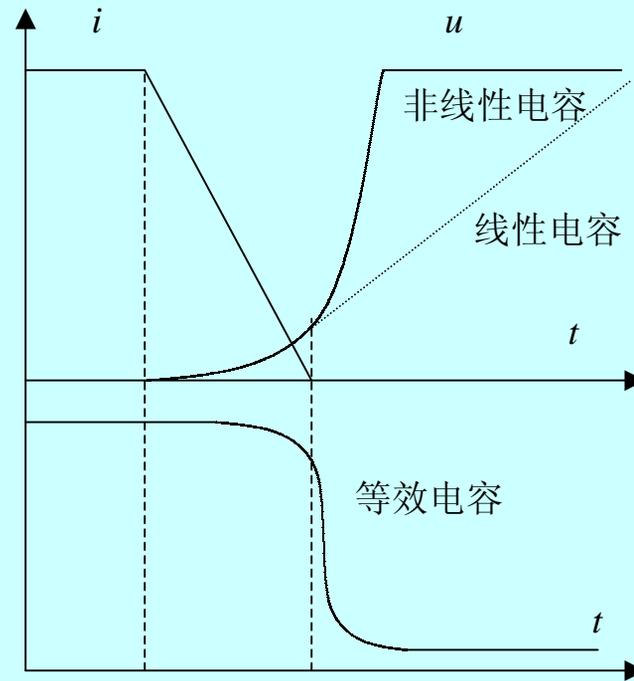
手段：

使用一般耗能吸收电路结构，在开关过程中，采用饱和器件（Saturable Component）保持吸收元件在低电流/电压水平下的较高电感/电容量，当开关过程结束，再于设定的电流/电压门限(Threshold)值适时地饱和，剩余L/C值很低，元件电流/电压很快到达稳态值，吸收元件储能近似与饱和门限电流/电压值的平方成正比

优点： 低功耗，高速度，附加结构简单（饱和电感得到广泛运用）

缺陷： 非线性器件（尤其是饱和电容）的价格和性能限制

耗能式吸收电路图示



图十 以关断吸收为例的非线性吸收原理图示

无损耗吸收电路

有源方式

需要附加额外开关器件、辅助电源、检测控制的方式或改变变换器的基本工作模式，来转移、回馈、利用吸收能量

有源方式特点

拓扑较简单，设计较灵活，较强的针对性，工作速度、负载依赖性指标比较理想；检测控制复杂，可靠性相对较低，变换效率不高

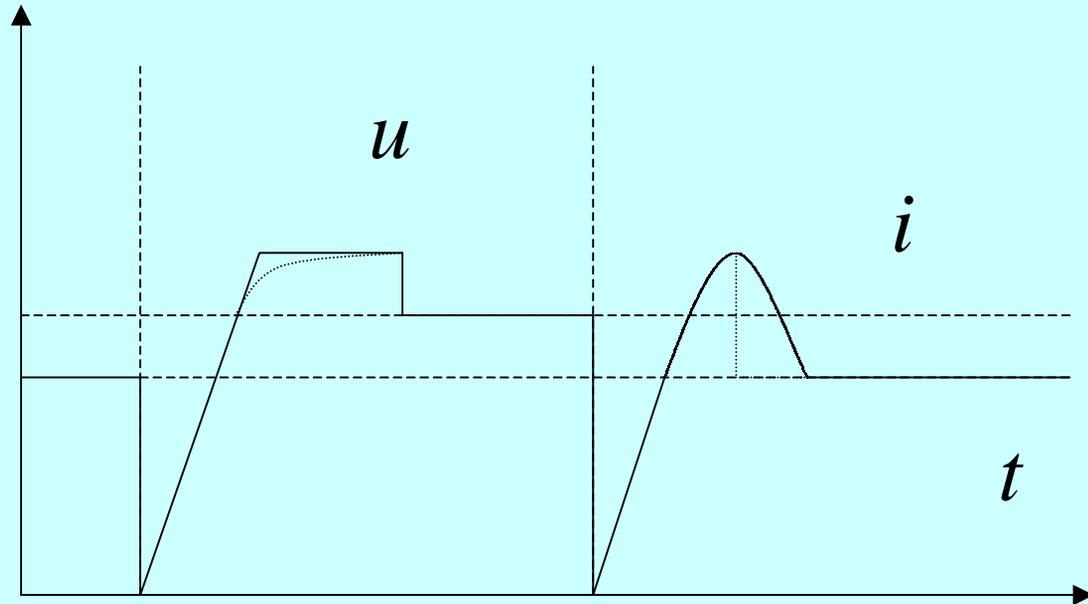
无源方式

按照原有控制方式，仅以电阻（无损式一般不使用电阻）、电容、电感、互感、二极管等构成的网络来实现吸收能量回馈

无源方式特点

不改变原有工作模式，工作可靠，变换效率高；附加网络拓扑往往复杂，工作原理分析烦琐，负载及频率适应性相对较差，主功率器件承受必然的附加应力

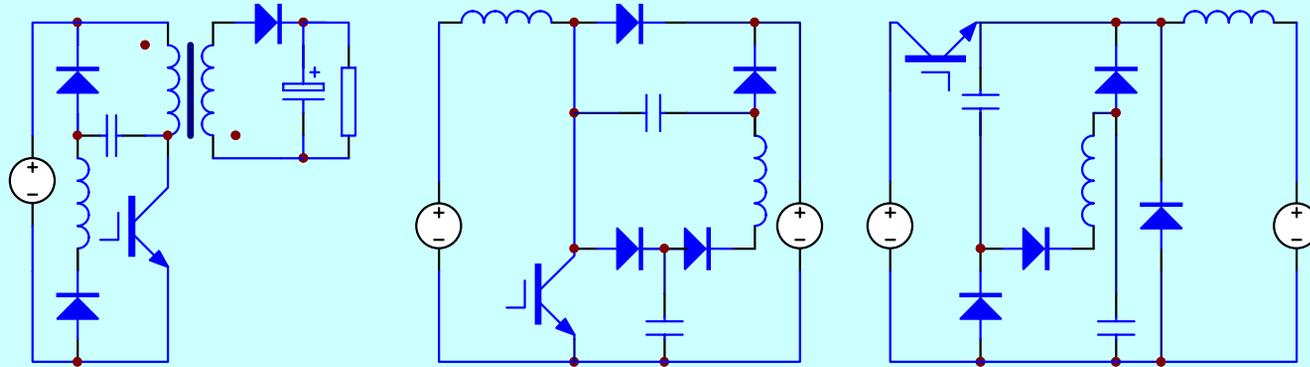
无源吸收电路的典型波形



图十一 无源吸收的典型开关过程图示

ZCS开通，ZVS关断
开关必然承受附加应力

无源单端无损耗关断吸收电路



图十二 几种常见的单端无损耗无源关断吸收电路

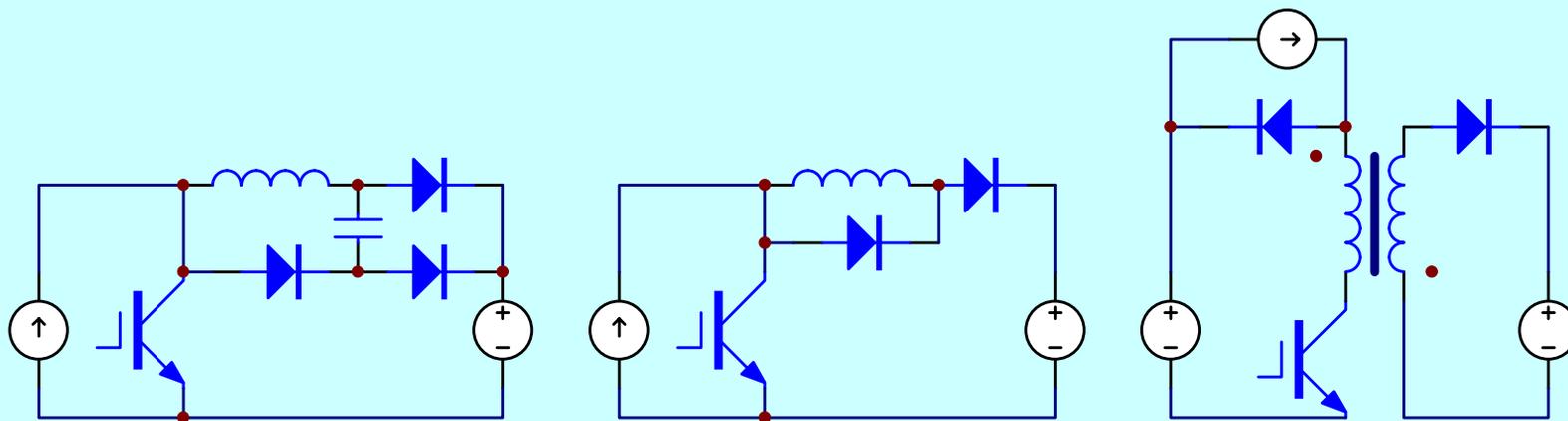
对于断续电流模式DCM（Discontinuous Conduction Mode），主开关开通是零电流开关的，只需要关断吸收电路；

对于电压源供电的变换电路，只考虑关断吸收的电压源单端无源无损电路较容易以少的附加元件实现，有较高的理论和实际意义。

无源单端无损耗关断吸收电路（续）

早期器件和某些特定器件对关断吸收要求比较高，如功率双极型晶体管BJT（Bipolar Junction Transistor）的二次击穿（Secondary Break-Down）效应，门极可关断晶闸管GTO（Gate Turn-off Thyristor）的关断电流约束（Constriction）效应，促成最早的无源无损吸收形式。

无源单端无损耗开通吸收电路



图十三 几种常见的单端无损耗无源开通吸收电路

本类电路原本很少单独使用，多与关断电路配合用；

随着功率开关关断特性改善，二极管的反向恢复与功率、频率的矛盾上升为开关损耗、EMI来源中的主要成分，单独的开通吸收电路越来越受到重视。

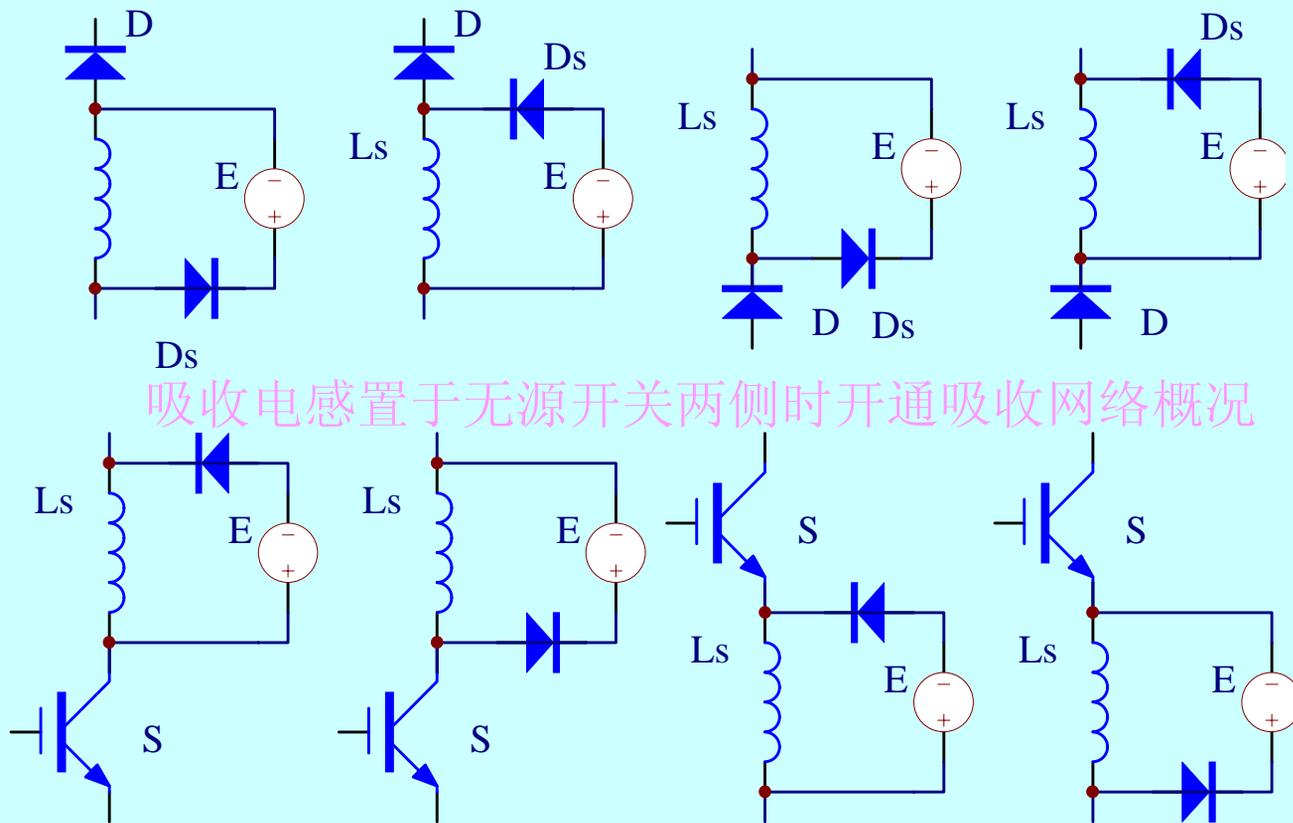
无源单端无损耗开通关断吸收电路

- 把前述的开通和关断电路加以组合就可以实现完全的开关吸收
- 通过合并简化，可以用较少的附加元件实现完整的开通——关断无损吸收
- 吸收单元(Snubber Cell)是单端无源无损吸收电路研究的主要方法，单端非隔离式无源无损耗吸收技术已经成熟

从拓扑学原理看：

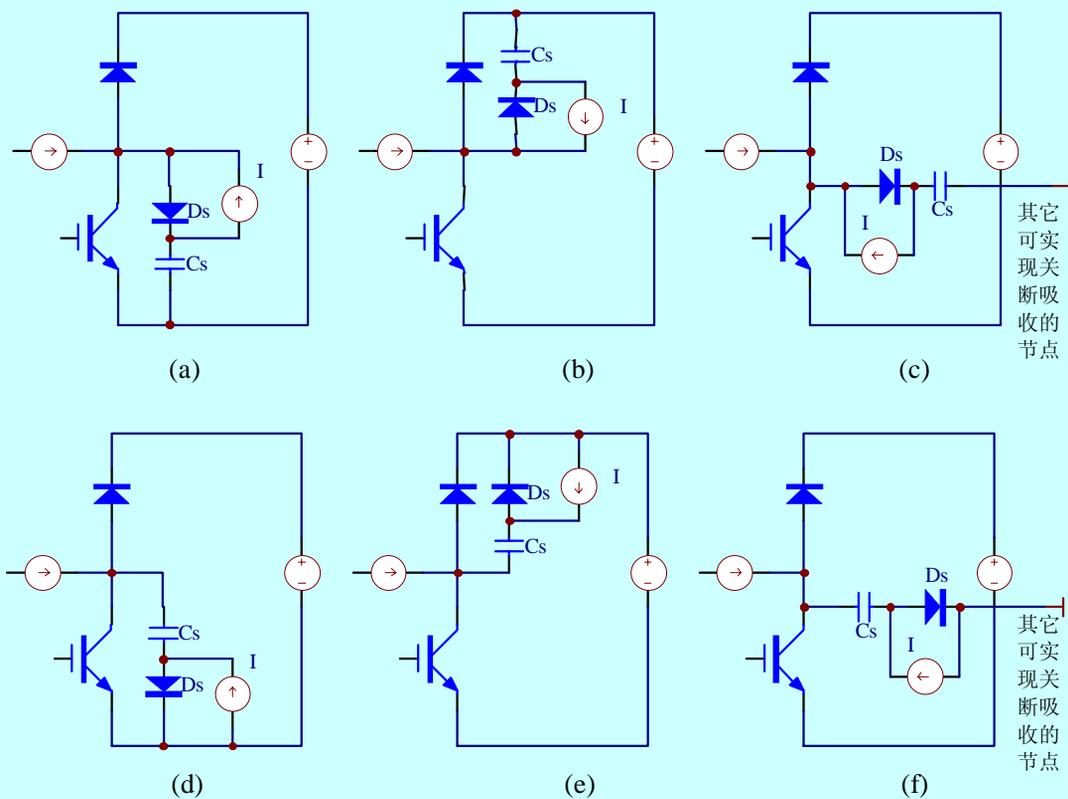
- **吸收电感的位置**：所有只包含主有源开关和电压源（电容）、二极管以及和其它有源开关的回路（Loop）中都应有吸收电感的串入
- **吸收电容的位置**：必须存在这样的支路（Branch）与主开关并联，由吸收电容和二极管、电压源（电容）（次二者可以缺省）串联而成
- **吸收电感的复位**：吸收电感应该有电压源（电容）与二极管按恰当极性串联后与之并联，向电压源传递能量
- **吸收电容的复位**：吸收电容应该有电流源（电感）与二极管按恰当极性并联后与之串联，向电流源传递能量

无源单端无损耗开通吸收电路基本单元图示



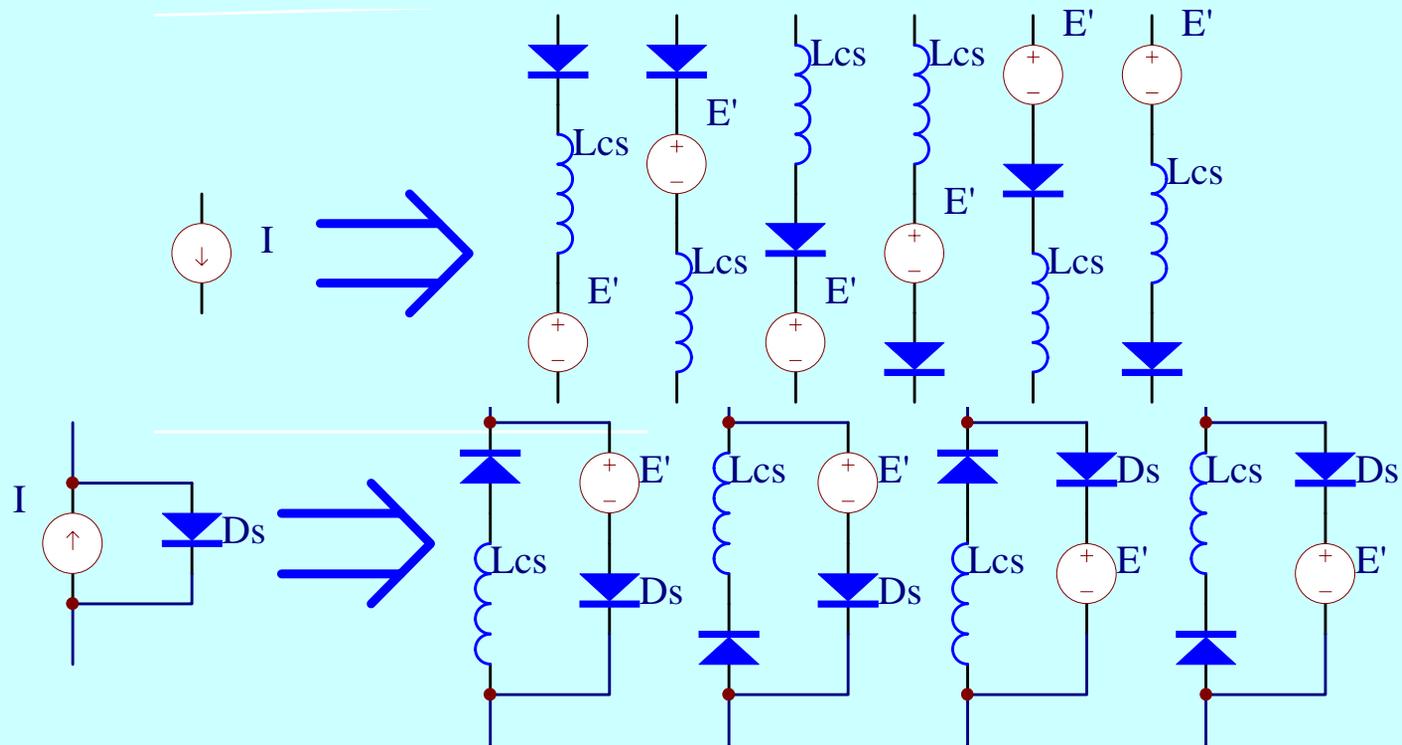
图十四 吸收电感位置与相应复位电路

无源单端无损关断吸收电路基本单元的图示



图十五 吸收电容位置与相应复位电路

无源单端无损耗关断吸收电路基本单元的推演



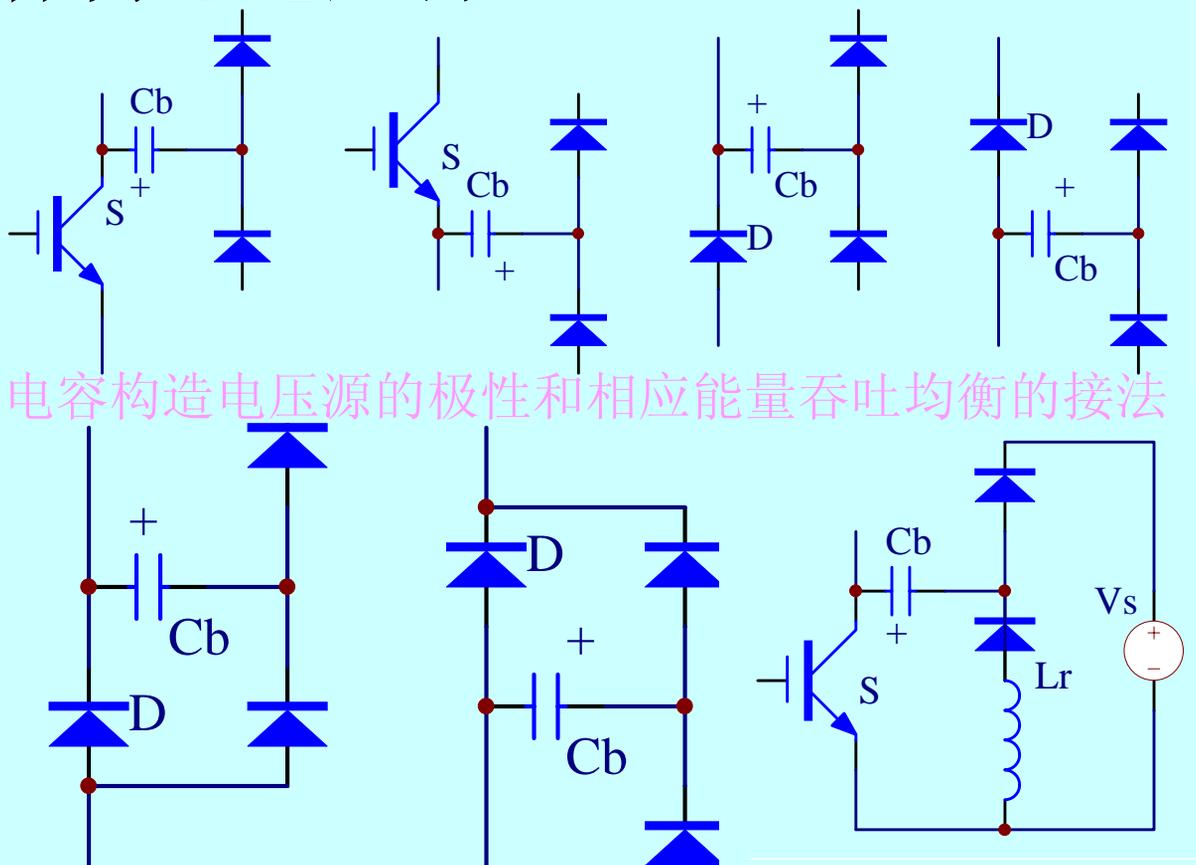
图十六 关断吸收电路中能量转移电流源的实现和连接

无源单端无损耗开通——关断吸收电路基本单元的推演

——电压源的构造和能量回馈

- 在吸收电感电容位置确定情况下，考虑吸收能量的处理：回馈到负载和/或电源
- 电压源可以解决吸收电感和电容存储能量的传递问题
- 无源的电压源构造方法：
 - 电容
 - 互感器

以电容构造电压源

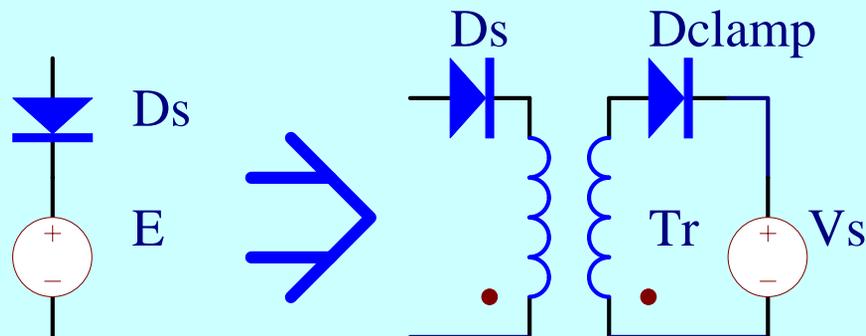


电容构造电压源的极性和相应能量吞吐均衡的接法

能量转移回馈的方案举例

图十七 吸收电路以电容构造无源电压源

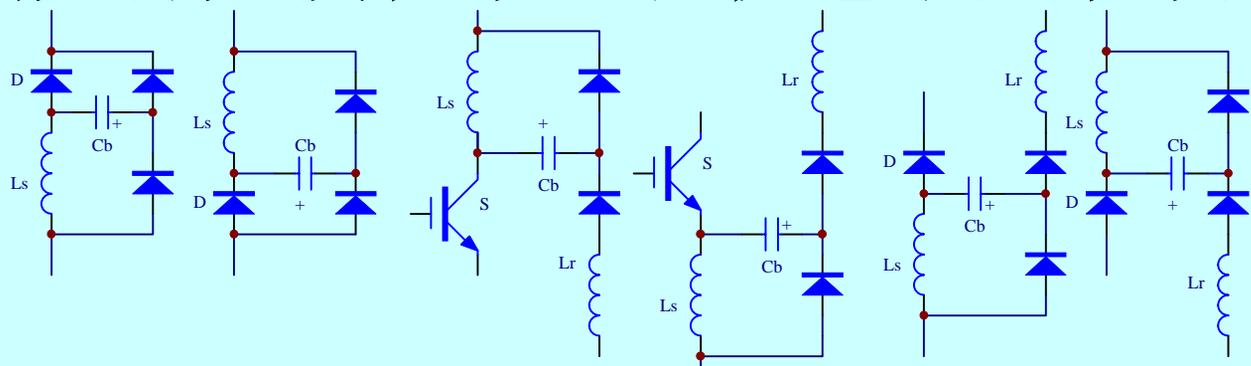
以互感器构造电压源



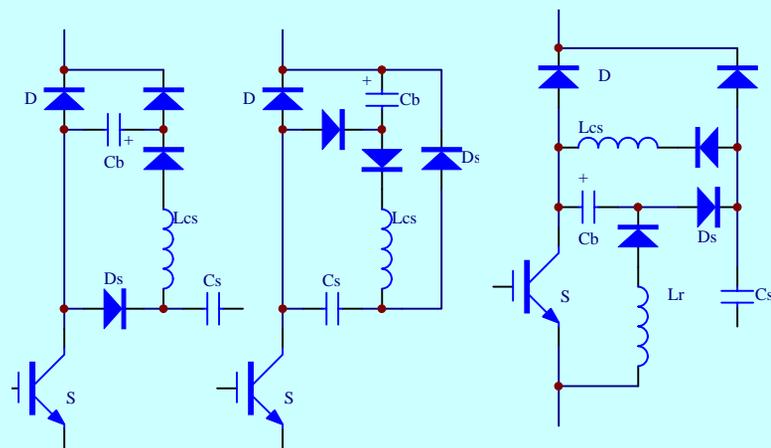
图十八 吸收电路以互感器构造无源电压源

- 原理简单，思路直接
- 以此方法构造的无源电压源等效内阻抗较大，不可以视为理想电压源，尤其不可以插入关断吸收回路，这降低了无源无损耗吸收电路的设计灵活性
- 磁通复位问题，副边二极管的高耐压问题

单端无源无损耗单一吸收电路基本单元

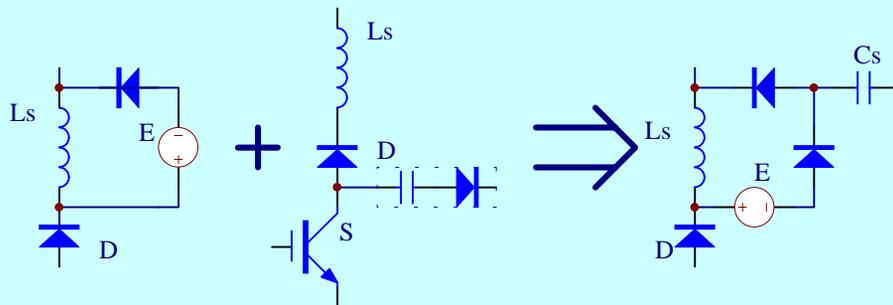


图十九 基本开通吸收单元

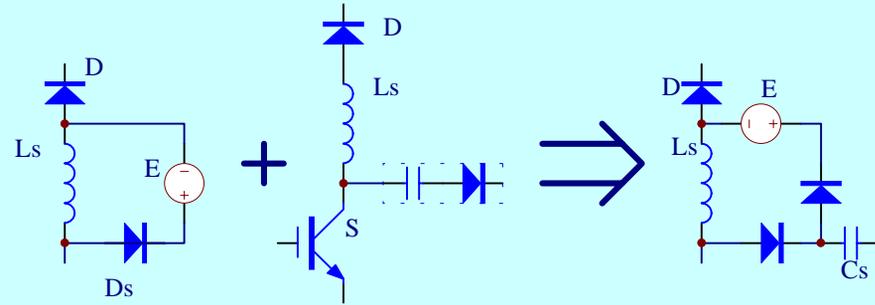


图二十 基本关断吸收单元

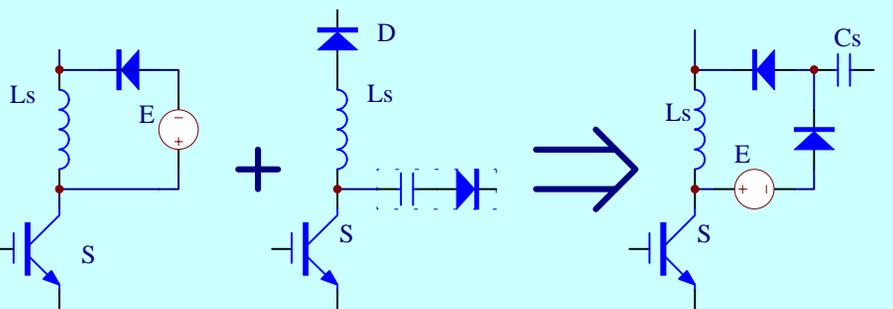
单端无源无损耗完全吸收电路基本单元推演过程



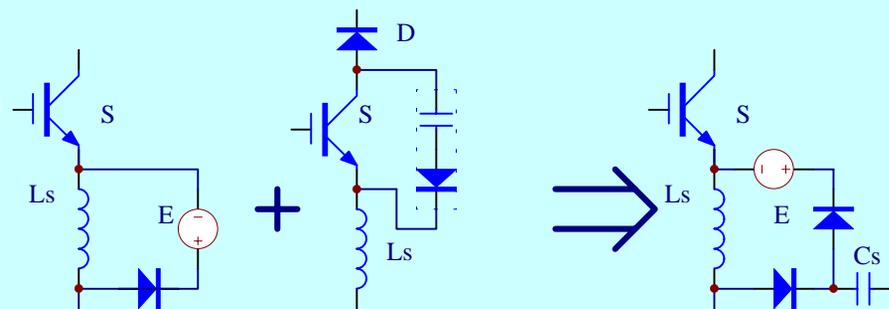
(a)



(b)



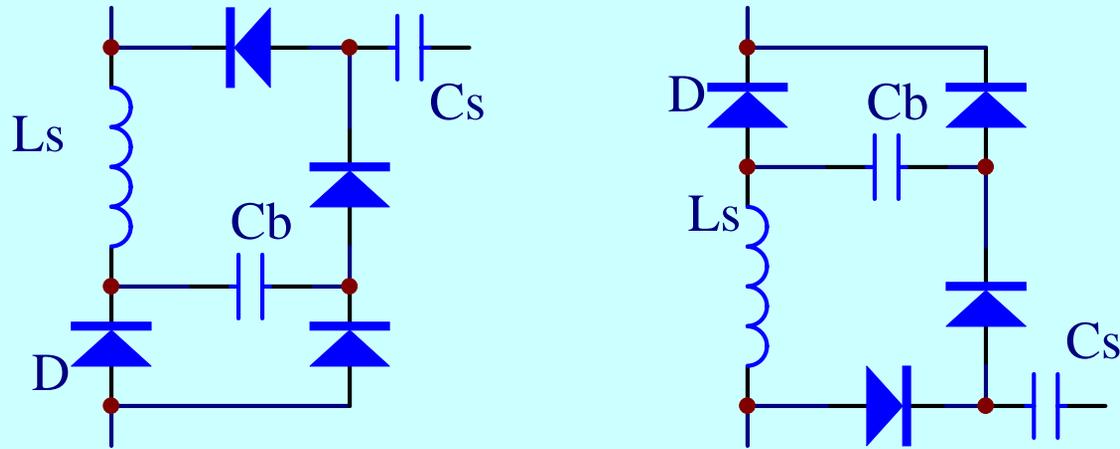
(c)



(d)

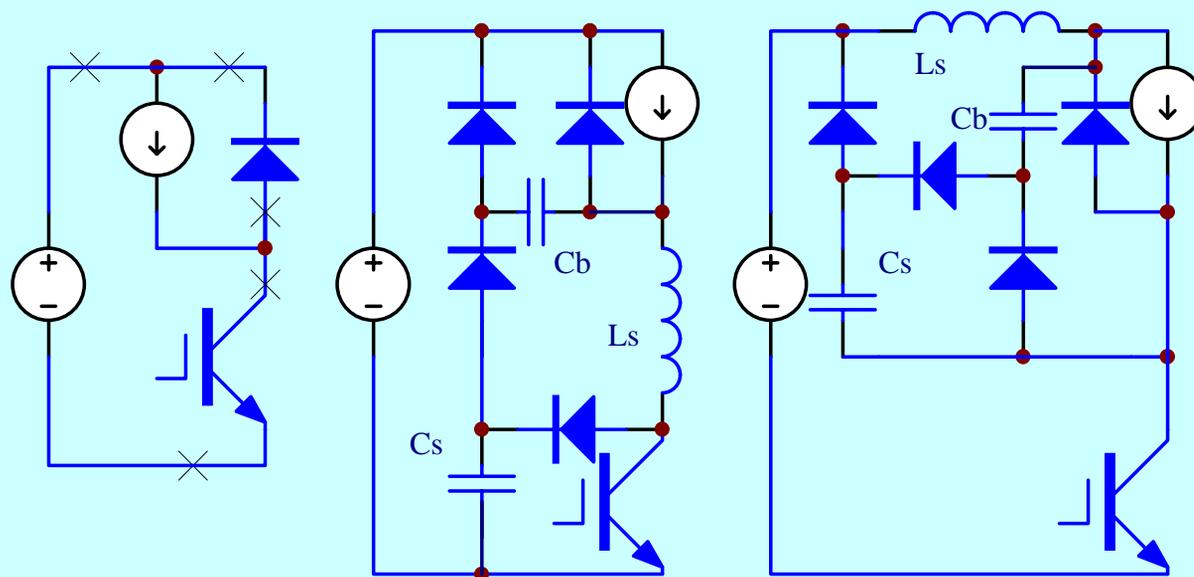
图二十一 四种基本的开通——关断无源无损耗吸收单元电路拓扑推演

单端变换器完全无源无损耗吸收单元的实际形式



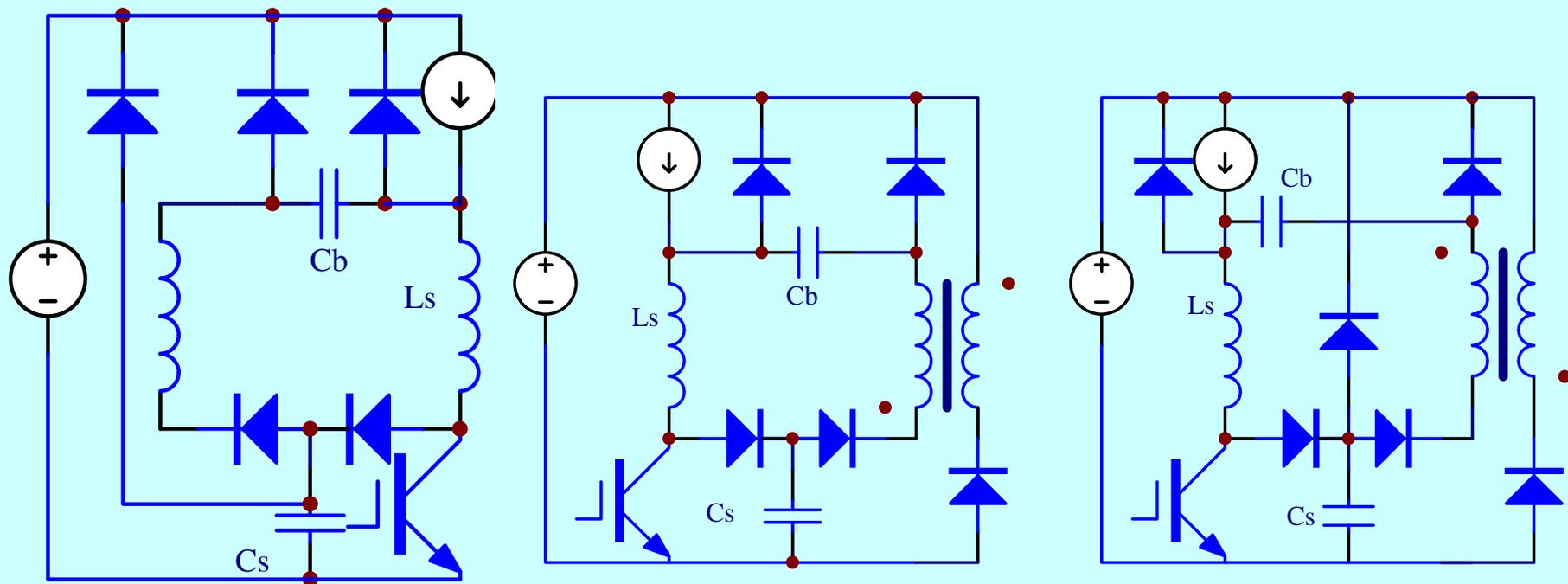
图二十二 非隔离式单端变换器适用的主开关无过压开通——关断
无源无损耗吸收单元

无源单端无损耗开通关断吸收电路实例



图二十三 单端DC-DC斩波器的无源无损耗
开通——关断吸收电路

无源单端无损耗开通关断吸收电路实例（续）



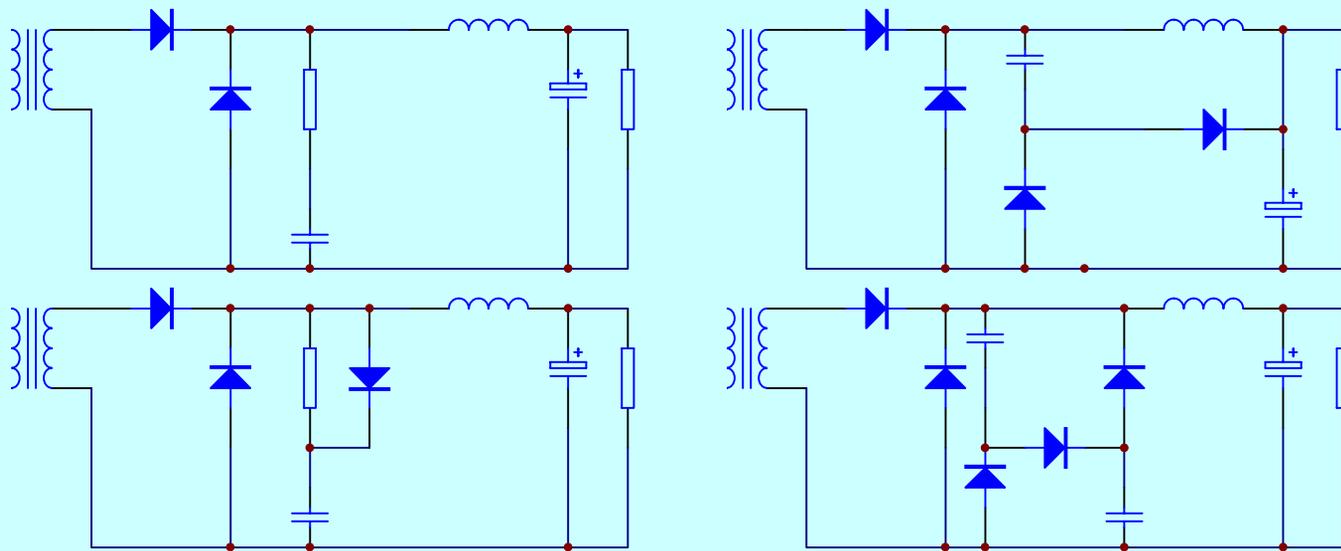
图二十四 单端DC-DC斩波器的无源无损耗
开通——关断吸收电路的改进

非隔离式单端变换器无源无损耗吸收技术总结

- 已经进行了全面深入的研究，提出了大量结构；
- 理论成熟，归功于以图论（Graph Theory）为代表的拓扑学分析，所有DC-DC非隔离单端变换器结构都有相应解决方案；
- 已经有商品化电源产品和大功率工程化的验证，逐渐成为学术界和业界主流
 - 某Boost Type PFC Front-end Pre-regulator
 - 某interleaved GTO DC-DC Chopper for Subway Traction Drive

隔离式单端变换器完全无源无损耗吸收技术

- 目前尚无非常有体系的研究和普遍适用的结构
- 一般结构是：在原边进行关断吸收，在副边进行开通吸收
- 比较强调对副边续流二极管关断的电压尖峰（Voltage Spike）和震荡（Ringing）的抑制，这一类研究比较有代表性，凸显了吸收电路跟电压箝位（Voltage Clamp）电路的原理和运用相似之处

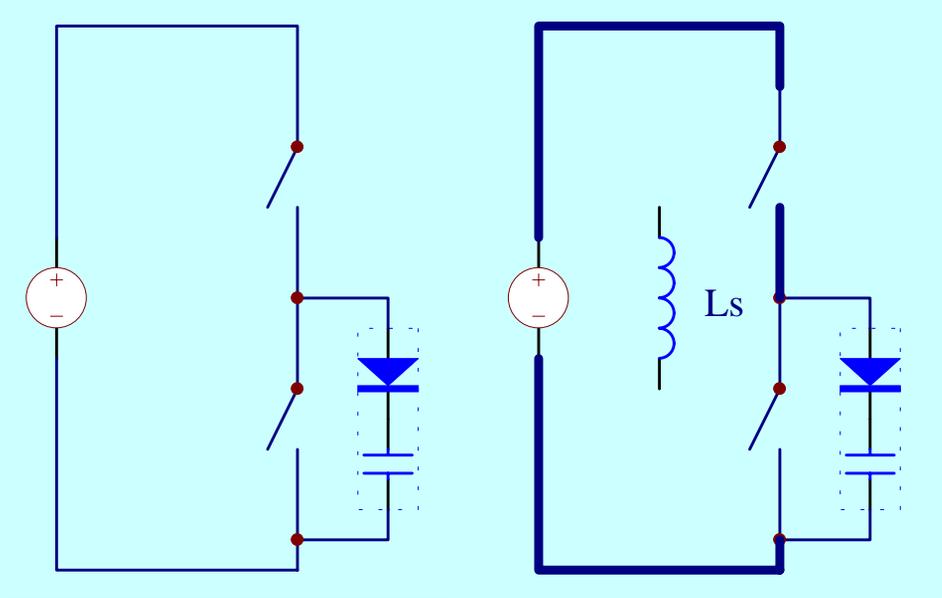


图二十五 隔离单端变换器副边二极管关断吸收电路

桥臂无源吸收技术

- 桥式(Bridge)（半桥、全桥及三相、多相桥）电路是电力电子变换器中最常见的基本拓扑，涉及中、大功率的电能的变换，大多采用此类结构，逆变(Inversion)桥则是桥式电路的典型代表
- 到目前为止，实用的逆变器普遍采用耗能式缓冲，桥臂用耗能式缓冲拓扑的研究已经达到相当完善、成熟的地步

桥臂吸收技术的拓扑特点和技术困难

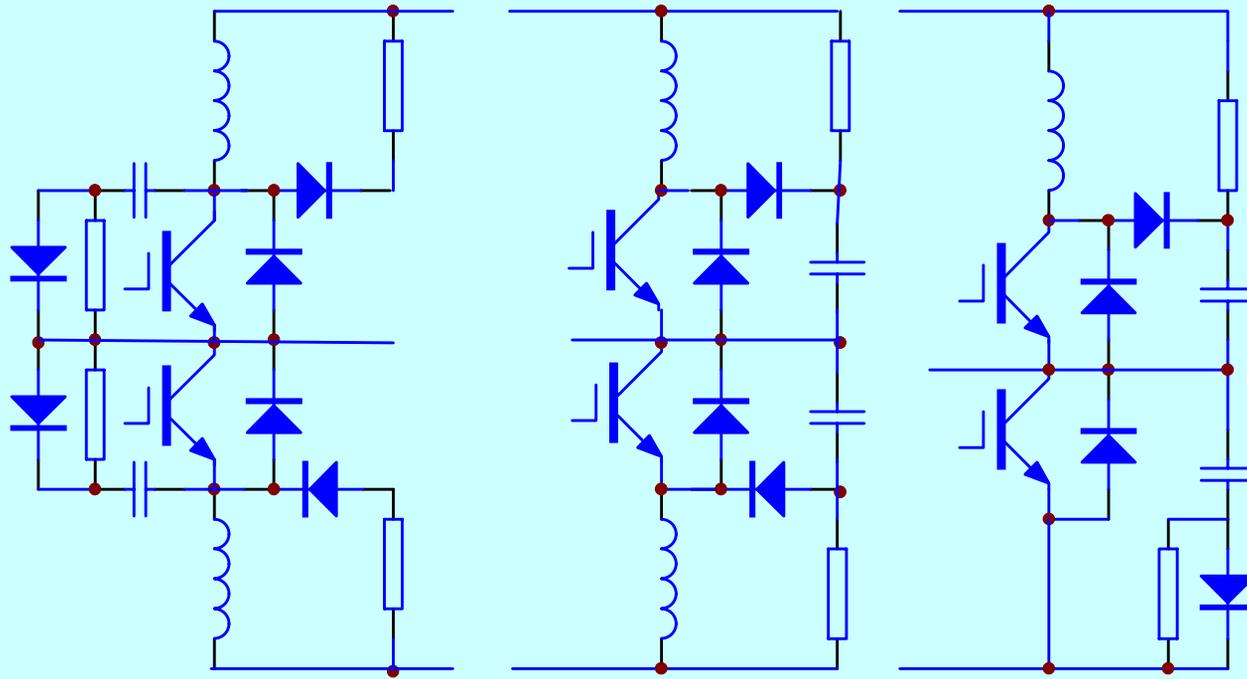


图二十六 单纯关断吸收电路对桥臂主电路的病态影响

桥臂吸收技术的拓扑特点和技术困难

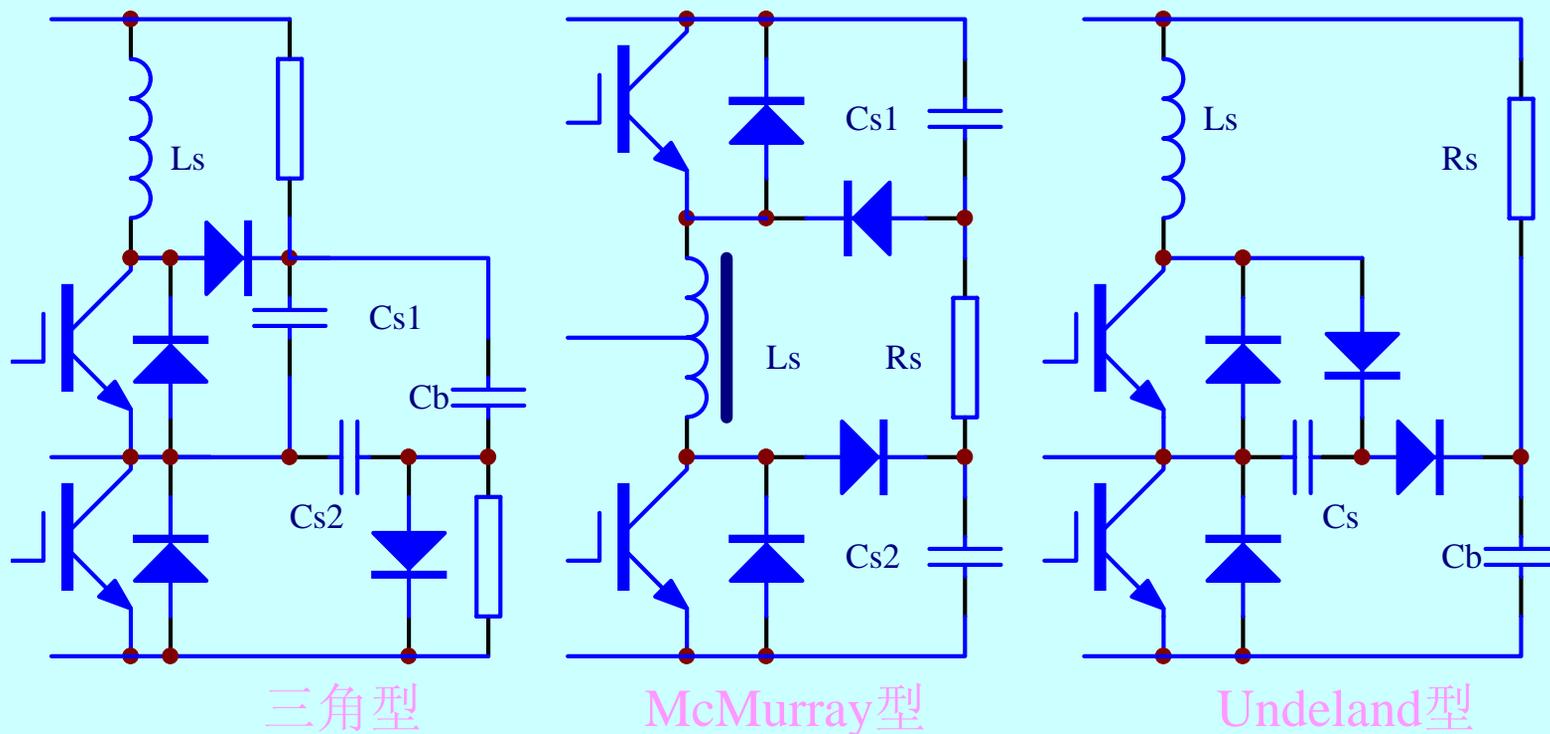
- 桥式电路结构上可以视为两套斩波电路(Chopper)的组合
- 其中电源、开关和负载之间特定的相互连接方式使得所用吸收电路并不等同于二者的简单组合：上下两套电路之间可产生改变基本工作原理的相互作用，主要是吸收及其辅助电容通过主管的对管进行的冲放电
- 一些元件可以合并简化，必须增加一些元件或改变原参数以适用于新的工作过程，开关元件开通时要承载对管关断吸收电容的充放电电流（Cross Current），开通吸收电感因为兼备限制这一过程所致附加电流过冲的作用而不可缺省，取值较之于一般单端变换器情况为大，且不适用饱和电抗器
- 桥臂吸收电路的元件归并、结构优化，使吸收附加元件数量最小化，拓扑简明，耗能比常规方案有较大幅度（一半左右）降低，这是在大功率场合应用上优化型桥臂耗能式吸收技术仍居统治地位的重要原因

桥臂无源耗能吸收技术



图二十七 耗能式桥臂吸收电路的简化

桥臂无源耗能式吸收技术（续）



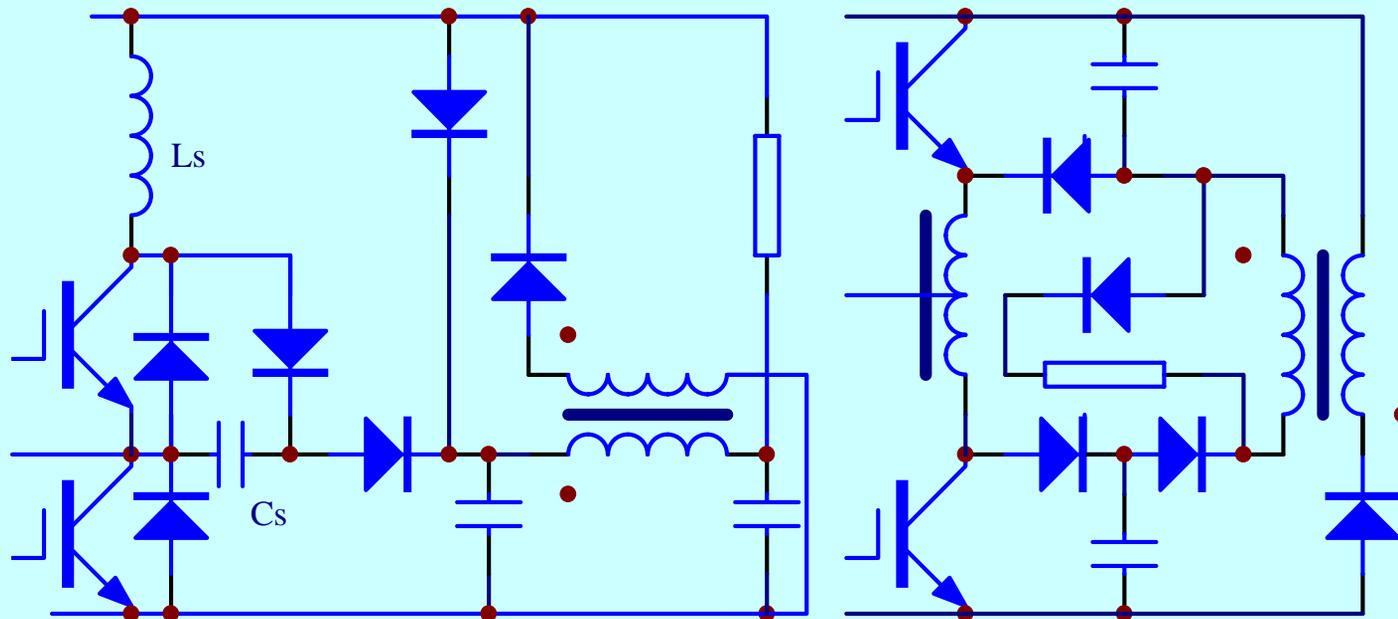
图二十八 优化的耗能式桥臂吸收电路

桥臂无源无（低）损耗式吸收技术

两种思路

- 基于优化的桥臂耗能式缓冲器拓扑，设法以无源网络替代电阻，实现无（低）损吸收
- 基于单端变换器无损吸收结构，加以合理归并、改动，或另辟途径，构造新的无源网络以达到目的

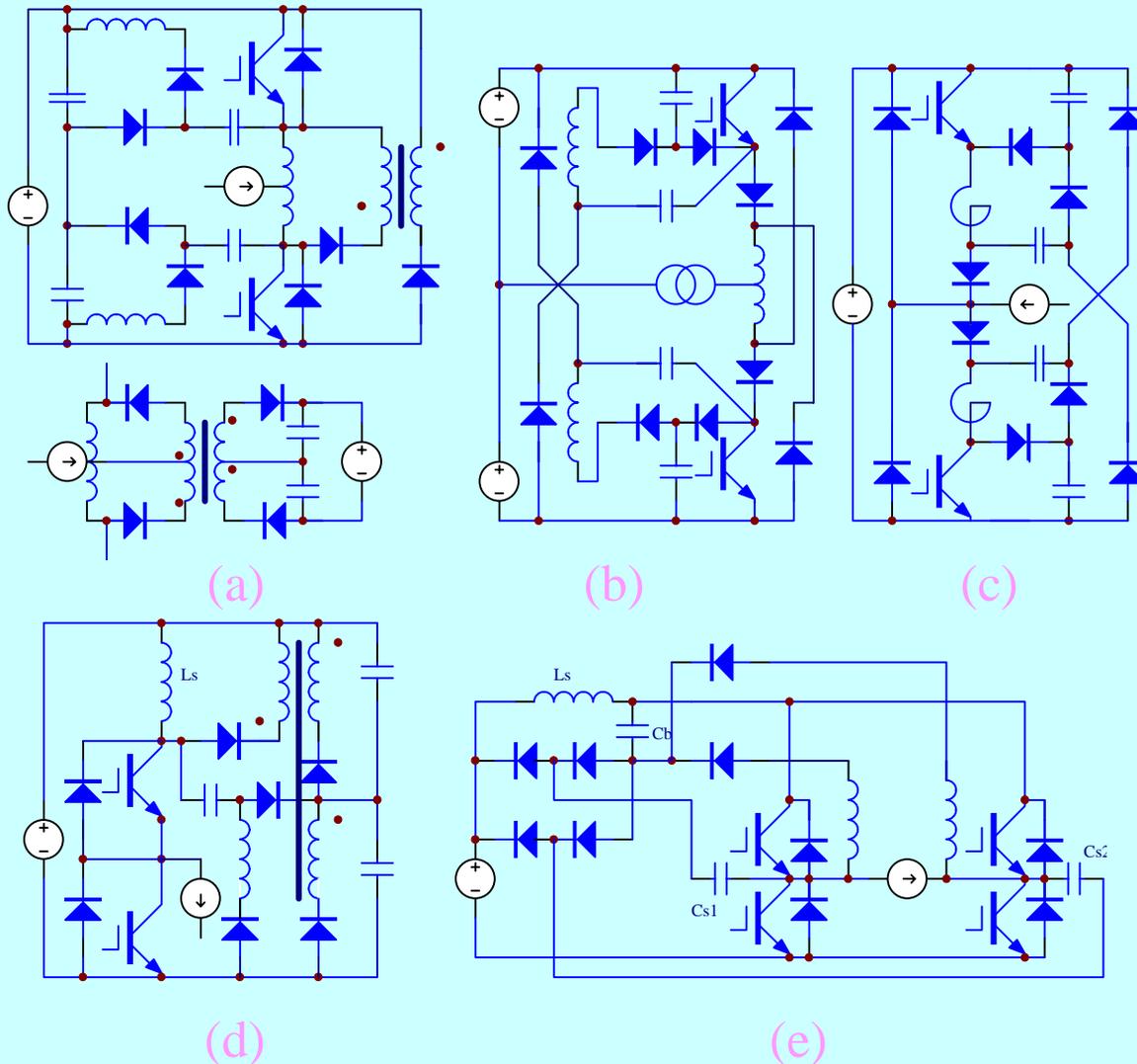
基于第一种思路的桥臂无源低损耗式吸收技术



图二十九 由Undeland和McMurray电路发展出的部分吸收能量回馈结构

一般采用互感回馈能量，理论上约损失25~40%在励磁电流电阻性复位

基于第二种思路的桥臂无源无（低）损耗式吸收技术



图三十 一些无源无损耗桥臂吸收电路

多有附加网络庞大，分析繁杂，元器件应力高，负载依赖性等优点；尤其要注意的是，以单端变换器对应技术“拼装”的桥臂无源无损吸收电路，在相当于双DCM工作的桥式DC-DC变换器是可用的，在负载电流等效为电流源的逆变桥上起不到软开关作用。

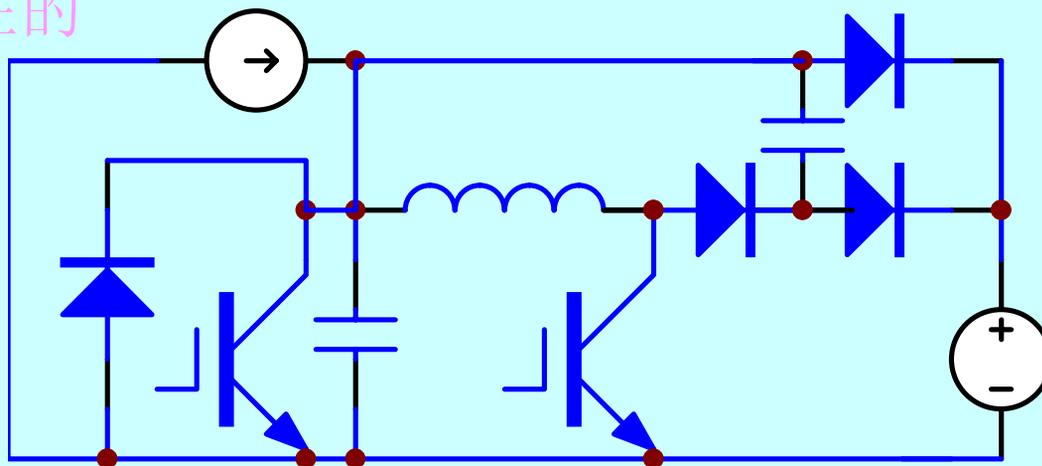
有源无损耗吸收技术

考虑仅作用于开关状态变换附近时区的软开关技术

- 对“吸收”式软开关的概念界定
 - 狭义的：通过与主开关串联电感性元件和并联电容性支路来实现的软开关的技术
 - 广义的：凡是与狭义吸收式软开关技术有关联的软开关技术
- 以狭义的吸收式软开关实现的（近似）ZCS开通和/或ZVS关断，是唯一的无源软开关可能，也只能以无源方式实现
- 学术界对PWM软开关技术的名称归类并没有严格区分，其理由在于：
 - 有源软开关的直接作用对象是开关管的电压/电流，而开关管电压/电流的载体是其寄生或外加的并联/串联电容/电感

有源无损吸收技术（续）

- 见于文献的有源实现的软开关多为单边，即着重开通或关断中某一个方面，有源作用的对象对其对偶开关过程而言是天然的吸收元件，可以轻易加以结合，达到完整的软开关效果
 - 有源技术所用辅助开关大多工作于类似DCM的工况，吸收技术是实现其软开关工作的必然途径
- 综上所述，在软开关技术中，吸收的原理和手段是无所不在的



图三十一 全软开关的ZVT（Zero Voltage Transit）升压变换电路

有源无损耗吸收技术的分类

- 技术思路一：

软开关纯吸收实现，有源构造电压源转移利用吸收能量

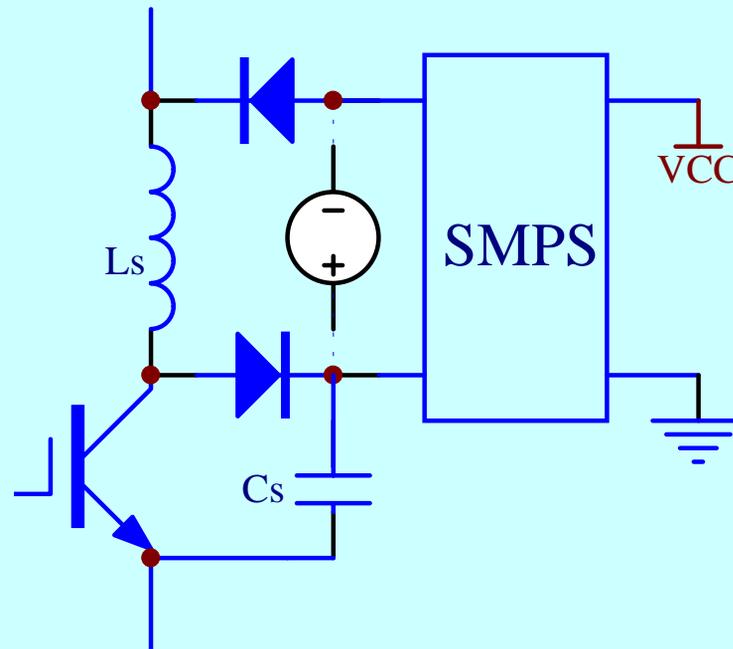
- 技术思路二：

软开关纯吸收实现，有源谐振（Resonance）转移利用吸收能量

- 技术思路三：

软开关吸收——有源转移（Actively Transit）实现

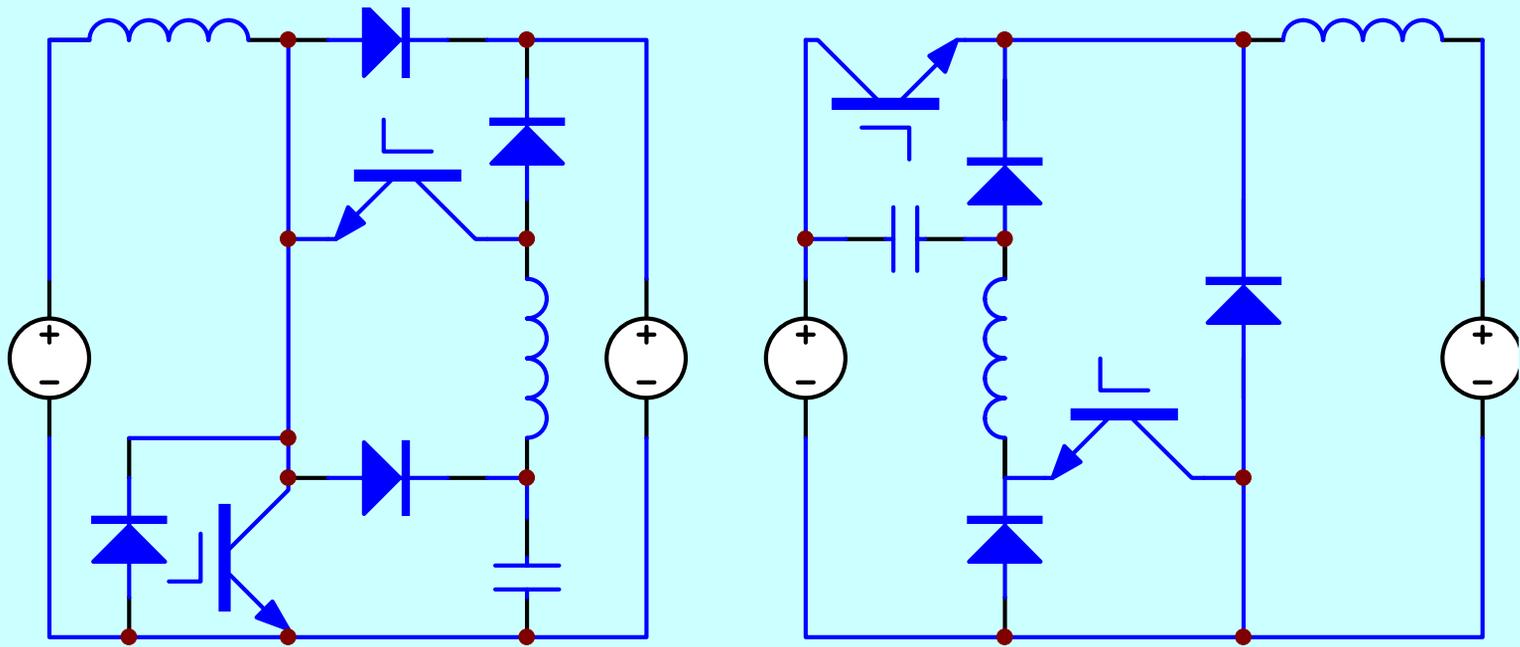
有源无损耗吸收技术一：



图三十二 采用SMPS (Switch Mode Power Supply) 的基本吸收能量回馈单元之一

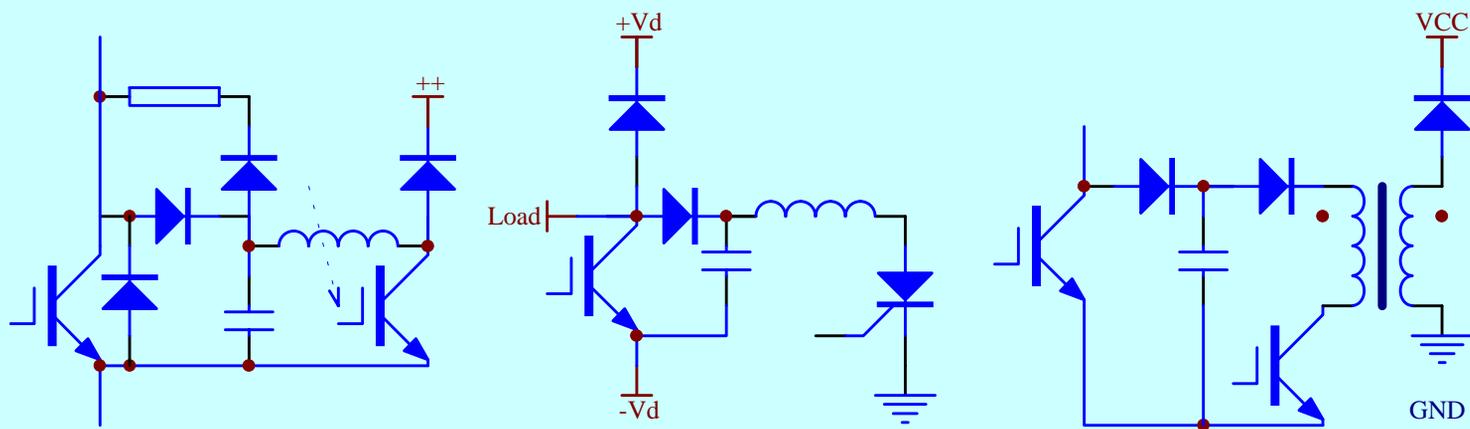
特殊的输入端稳压馈能电源，要求效率、可靠性

有源无损耗吸收技术二：



图三十三 两种单端变换器有源关断吸收电路

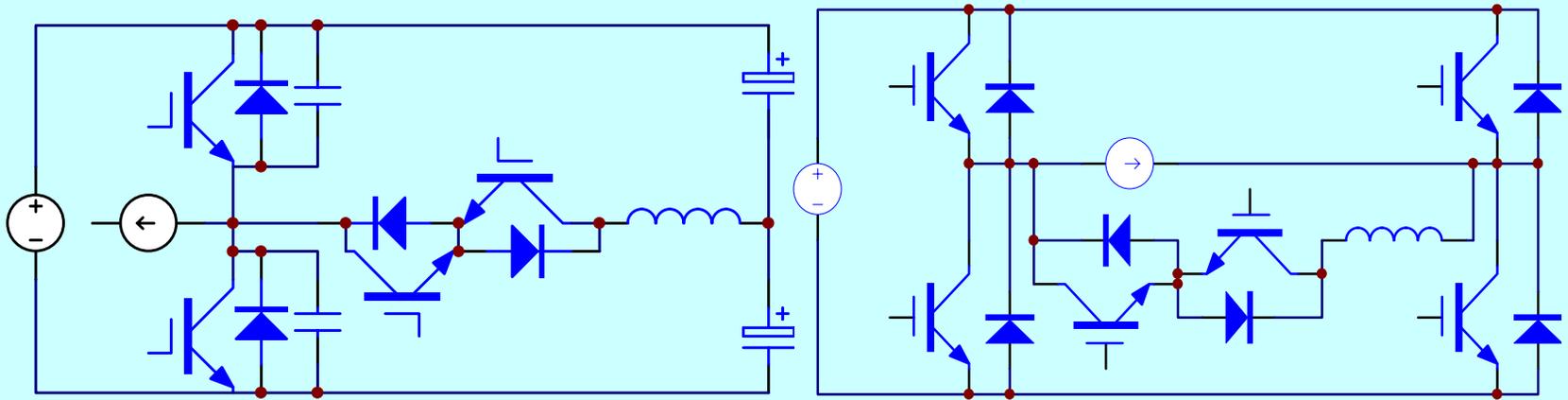
有源无损耗吸收技术二：



图三十四 几种单端变换器有源关断吸收电路

由于大部分开关功率变换器是电压源供电，出于拓扑上的原因，按照“电容——电感——电压源”的能量传递模式，非SMPS型有源关断吸收复位电路相对容易实现，受到较多研究。

有源无损耗吸收技术三：

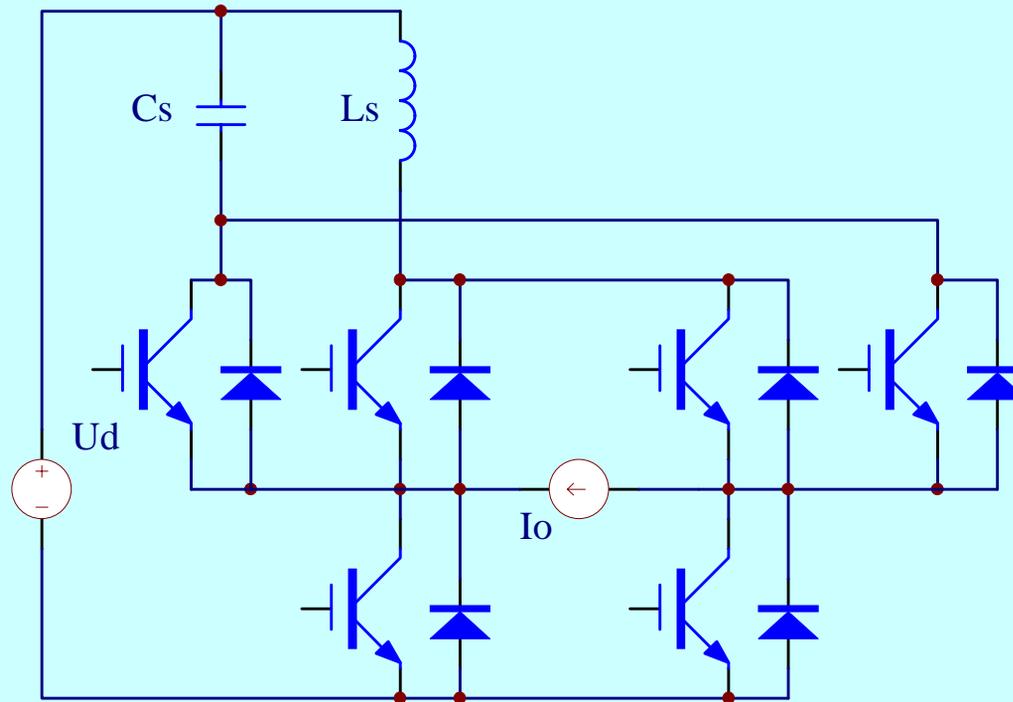


ARCP(Active Resonant Commutated Pole)
(Resonant Snubbers with Auxiliary Switches)

Delta Connected Active Snubber
in Single H-Bridge Inverter

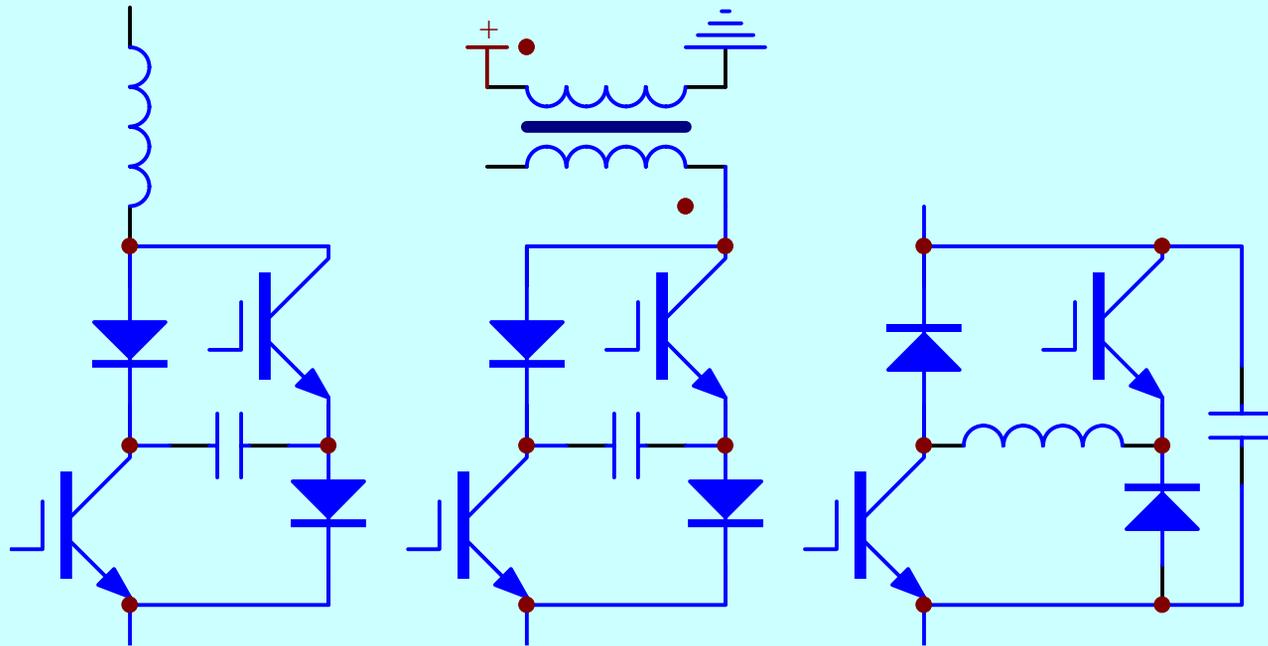
图三十五 两种逆变桥有源关断吸收电路

有源无损耗吸收技术三：



图三十六 单相逆变桥的组合（Composite）软开关结构

一些特殊的无损吸收技术



图三十七 几种基于吸收原理的软开关单元 (Unit)

吸收技术的发展趋势

- 有源与无源技术相融合

- 有源技术的“无源化”——电路状态检测的简化，以定延时省略检测，或者以逻辑固化的驱动电路替代检测
- 无源技术的“有源化”——吸收能量的回馈不仅仅依赖某单个主开关，在多开关变换器中，充分利用各开关时序、逻辑组合，辅以相应器件，如二极管、互感，在主电路基础上构造性能优化的吸收能量回馈机制

- 吸收元件、驱动模块化

- 顺应功率器件模块化趋势，将吸收电感、电容、二极管、辅助开关集成，甚至与主功率管相集成

- 专门化

- 在超大功率和超高功率密度两个极端发展

感谢光临！

Thanks for Your Attendance!

Dengyan@cee.zju.edu.cn