

MICROCHIP 2019 MASTERS

C20L21

开关电源基本原理、控制及其 数字化



课程目标

- **完成本课程后，您将能够：**
 - 描述电感和电容如何用作储能元件
 - 描述降压转换器和部分其他拓扑转换器的结构和工作原理
 - 了解控制环的基本构建模块和补偿器的重要性
 - 创建并应用一个稳定的数字离散时域控制环



课程安排

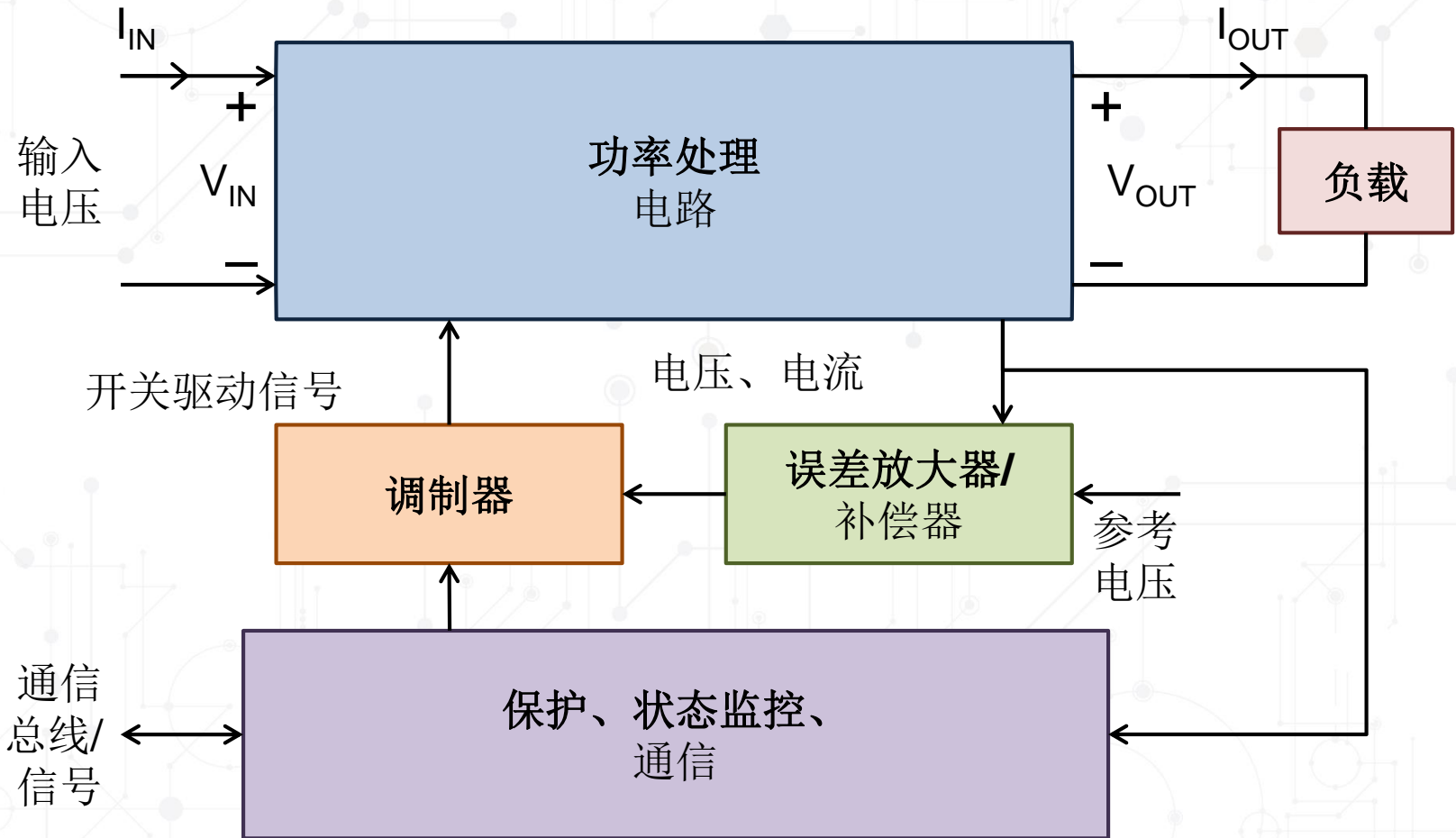
- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**



课程安排

- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

开关模式转换器





课程安排

- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

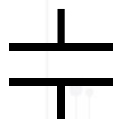


构建模块

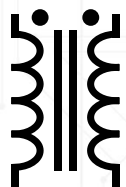
- 控制电能传递的开关



- 储能元件

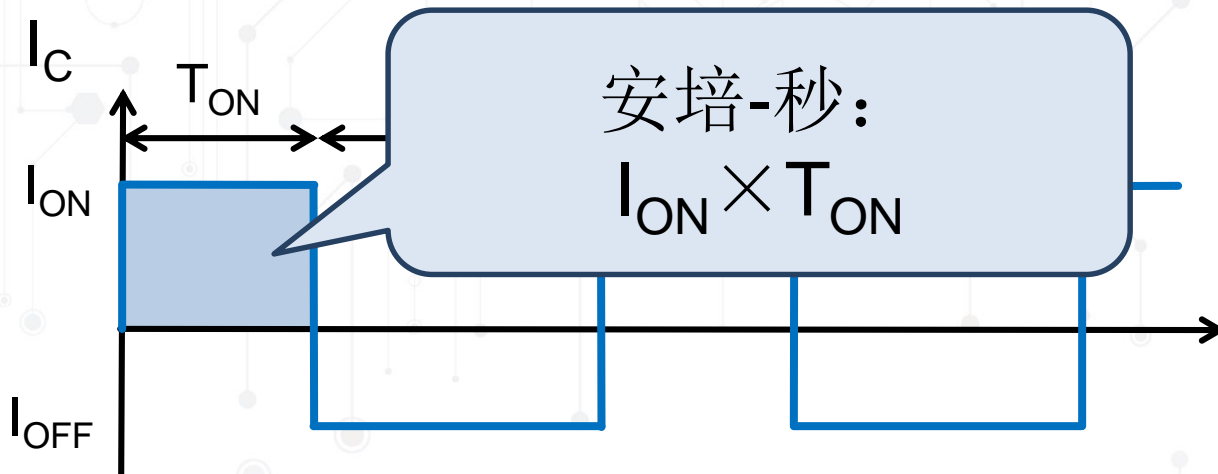
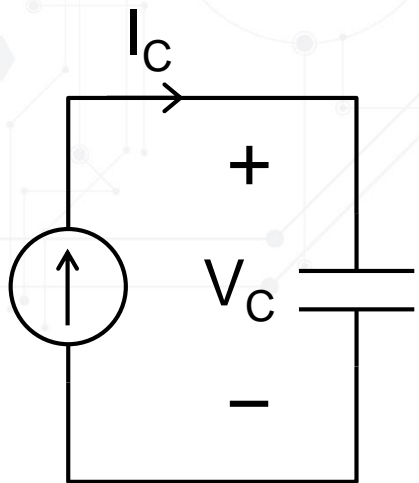


- 变压器



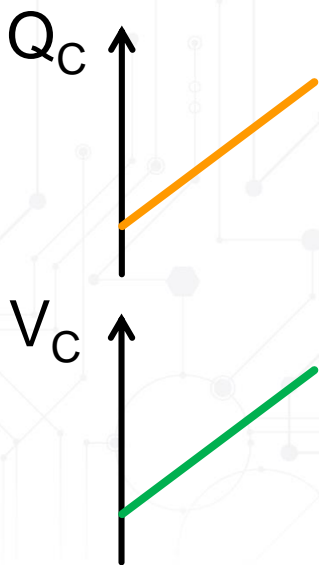


电容纹波电压



$$I_{ON} \cdot T_{ON} \Rightarrow \Delta Q_{ON}$$

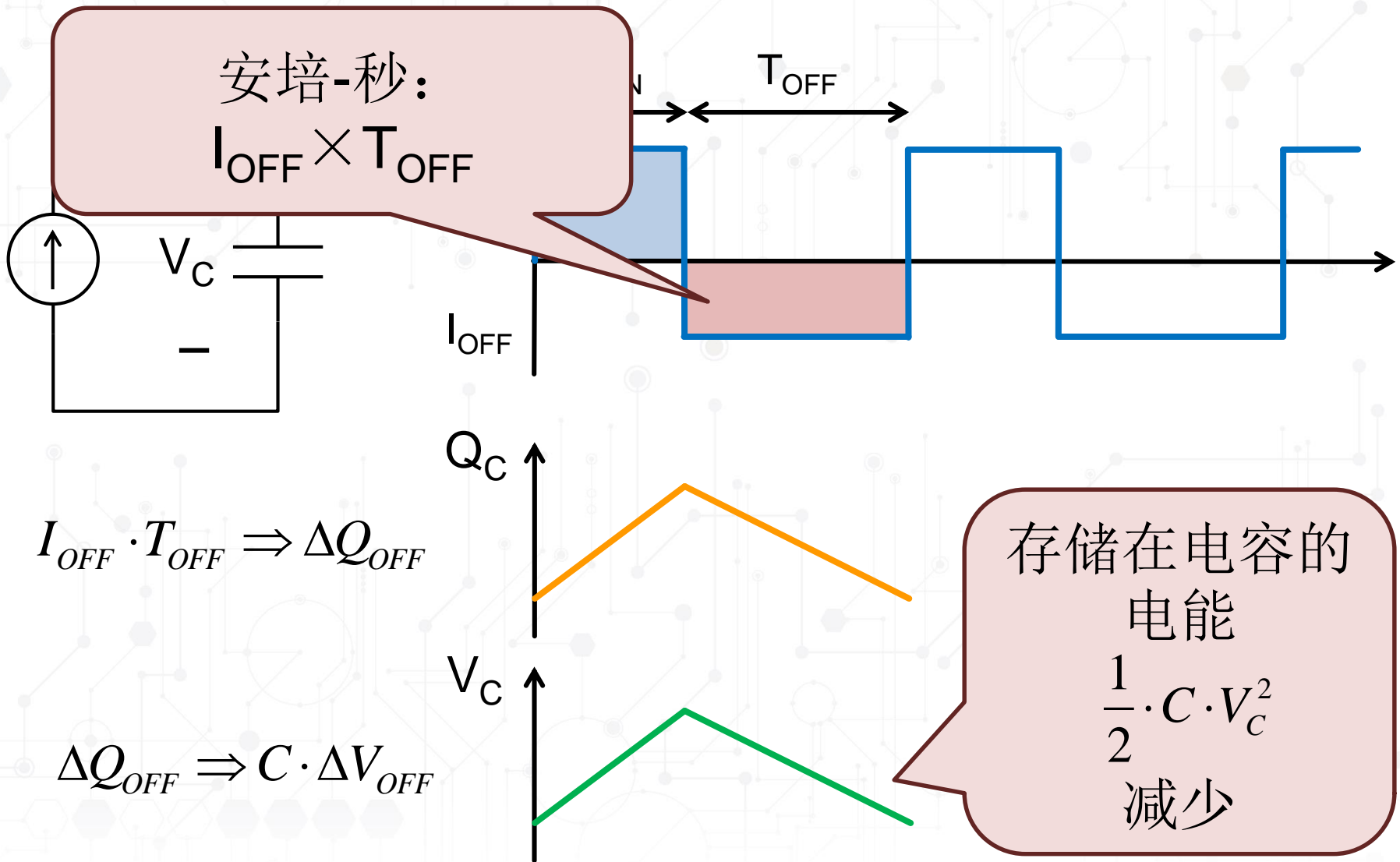
$$\Delta Q_{ON} \Rightarrow C \cdot \Delta V_{ON}$$



存储在电容中的
电能
 $\frac{1}{2} \cdot C \cdot V_C^2$
增加

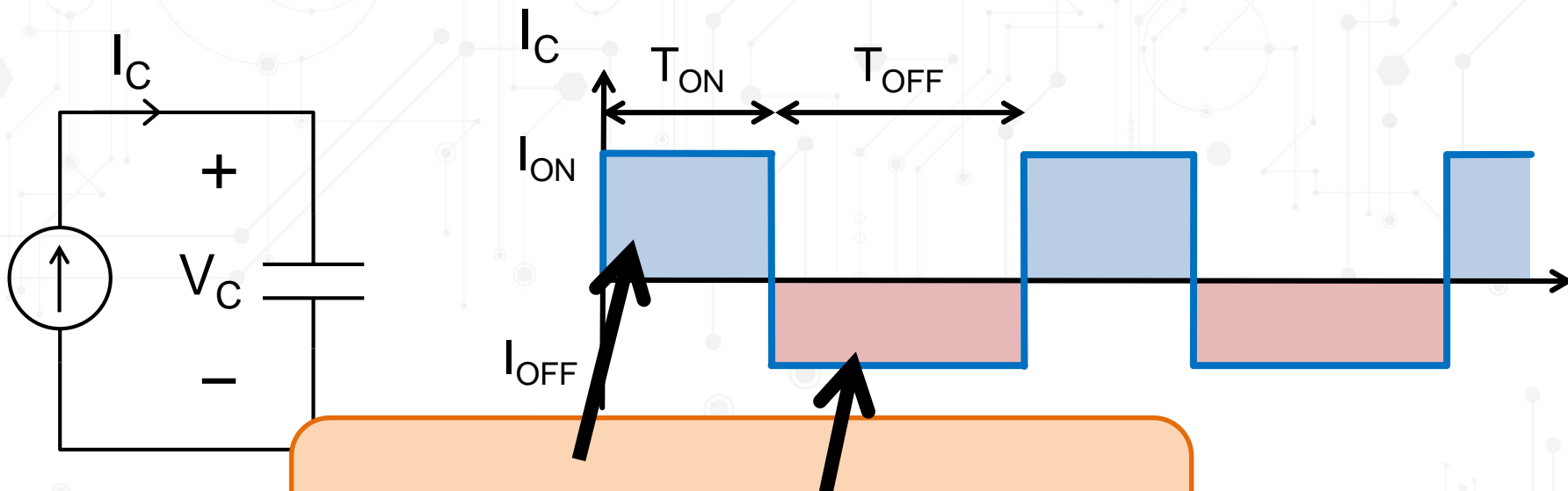


电容纹波电压





电容纹波电压

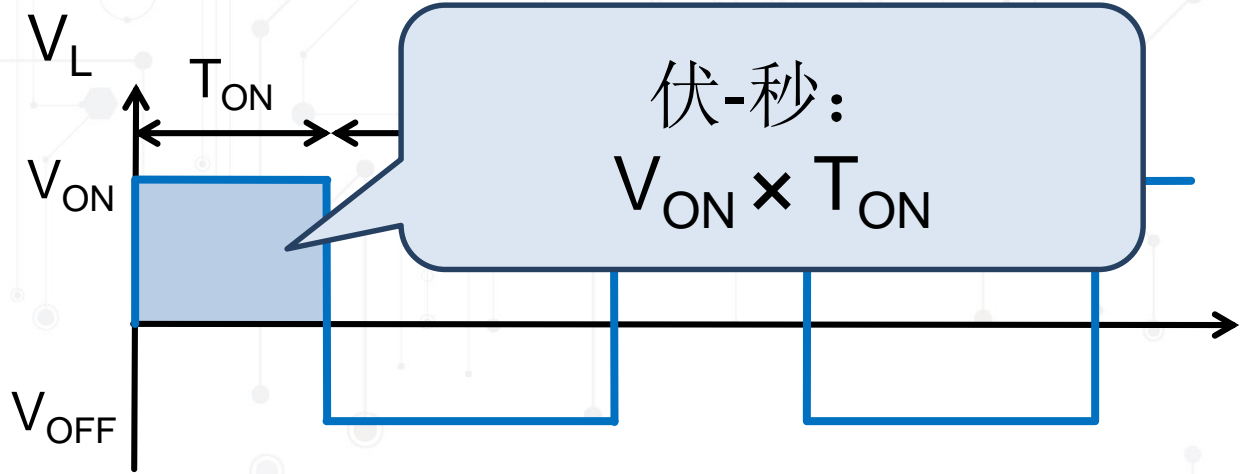
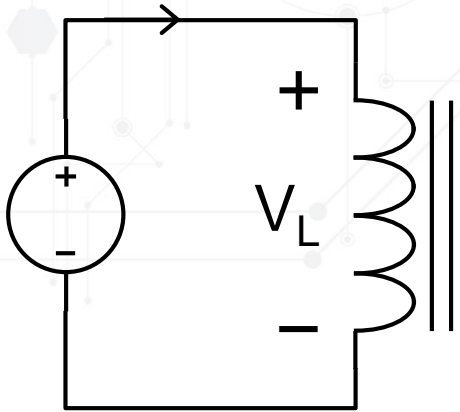


$$I_{ON} \cdot T_{ON} + I_{OFF} \cdot T_{OFF} = 0$$

电容电荷平衡



电感纹波电流



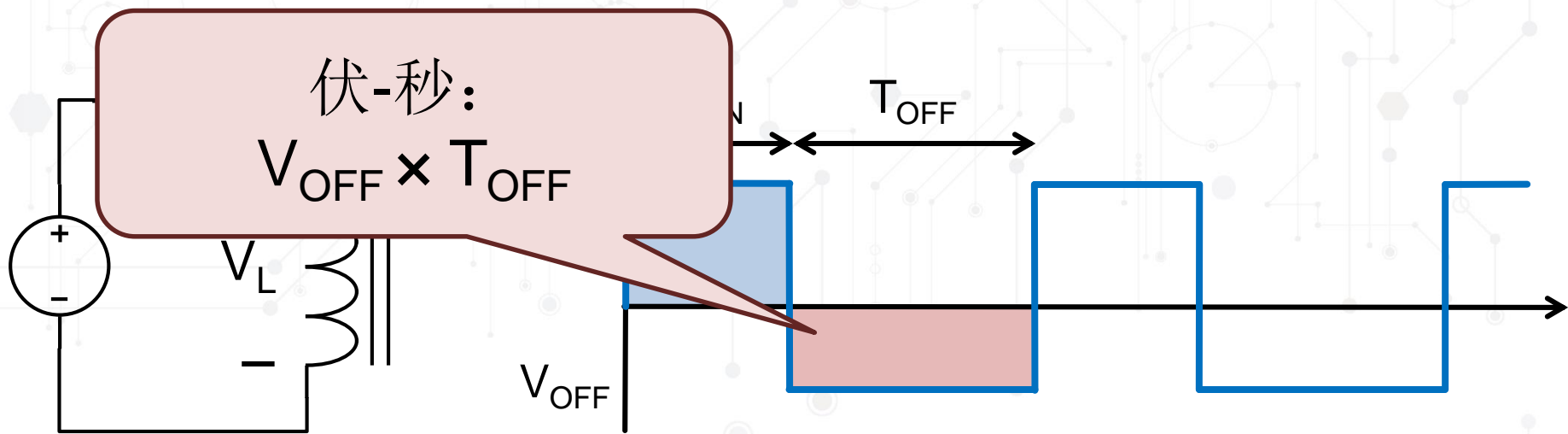
$$V_{ON} \cdot T_{ON} \Rightarrow \Delta \lambda_{ON}$$

$$\Delta \lambda_{ON} \Rightarrow L \cdot \Delta I_{ON}$$



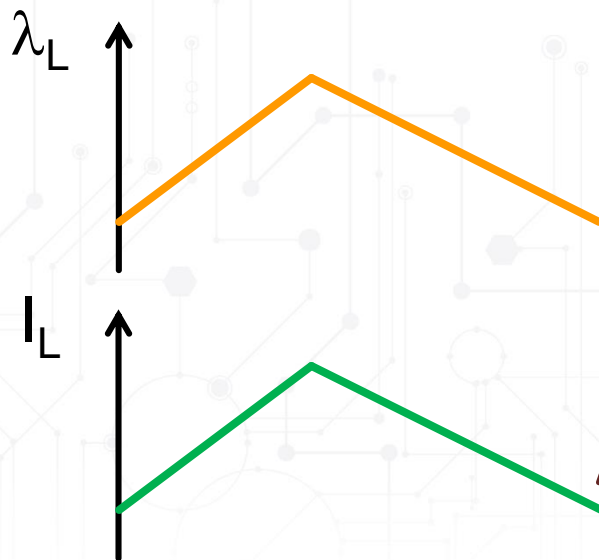
电感中存储的
电能
 $\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2$
增加

电感纹波电流



$$V_{OFF} \cdot T_{OFF} \Rightarrow \Delta \lambda_{OFF}$$

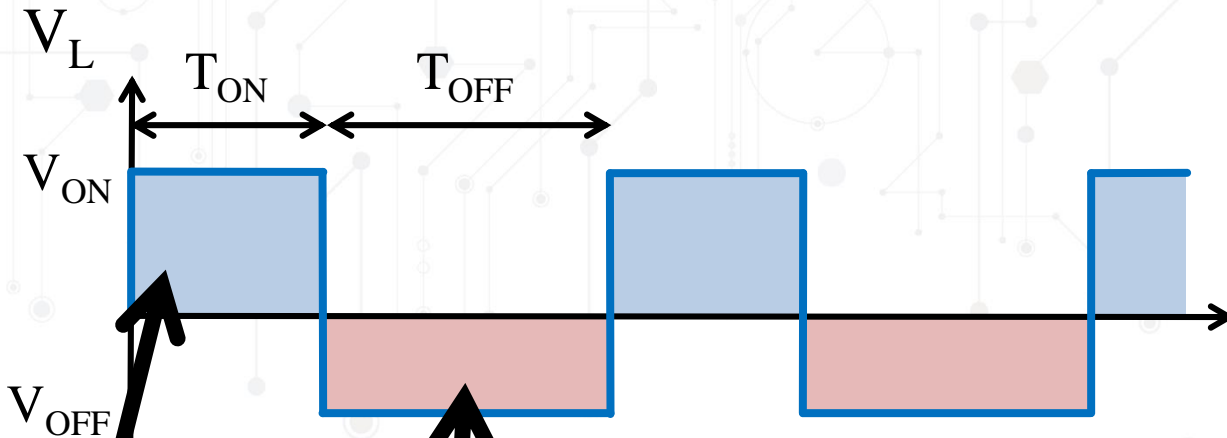
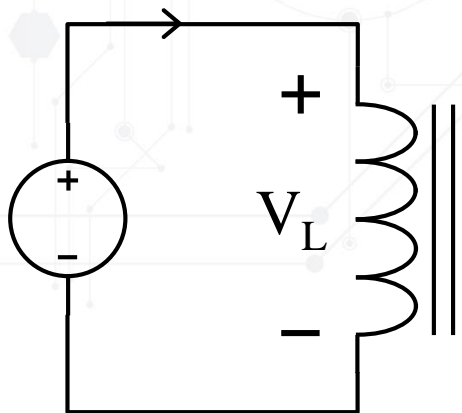
$$\Delta \lambda_{OFF} \Rightarrow L \cdot \Delta I_{OFF}$$



电感中存储的
电能
 $\frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2$
减少



电感纹波电流



$$V_{ON} \cdot T_{ON} + V_{OFF} \cdot T_{OFF} = 0$$

电感伏秒平衡



课程安排

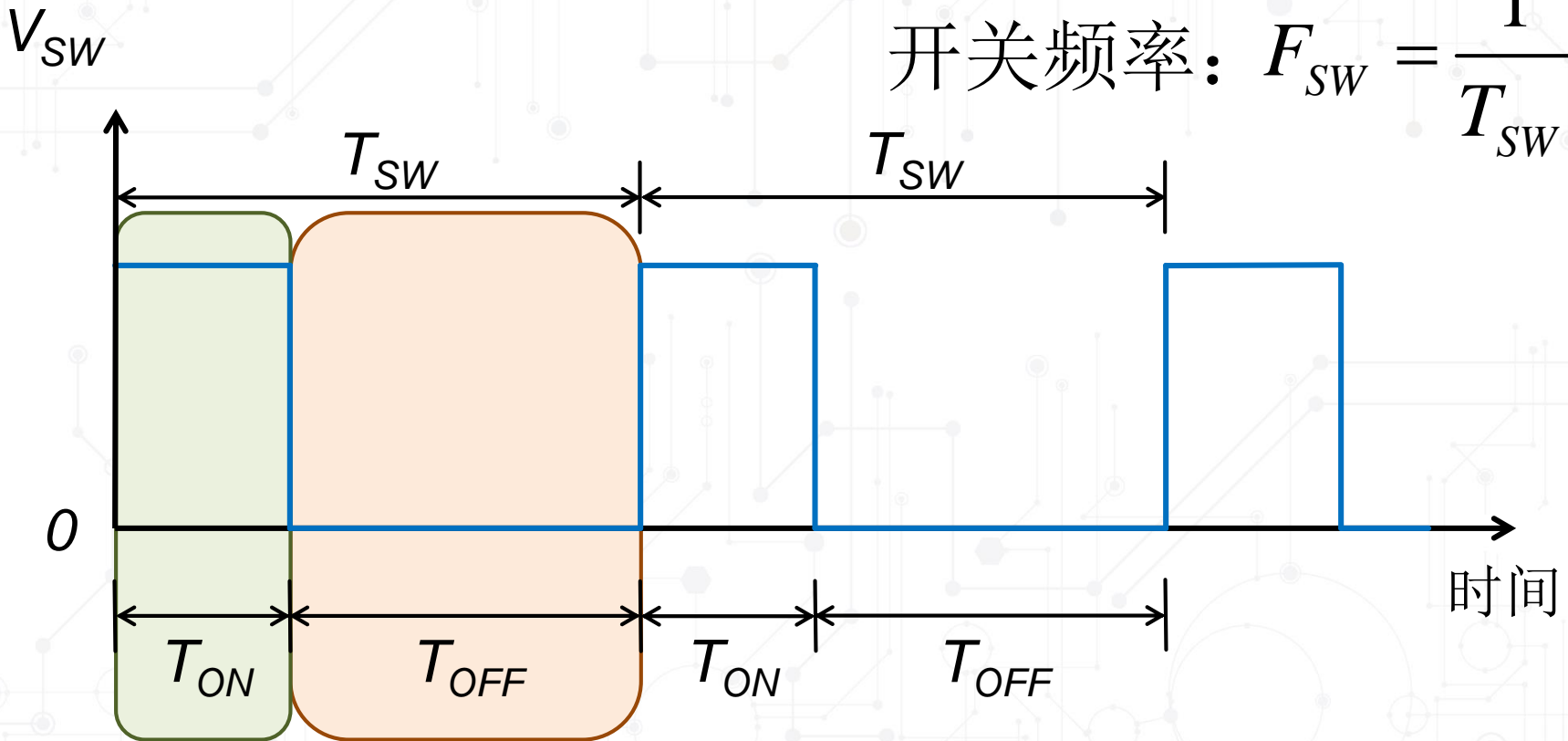
- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**



术语

开关周期: $T_{SW} = T_{ON} + T_{OFF}$

开关频率: $F_{SW} = \frac{1}{T_{SW}}$

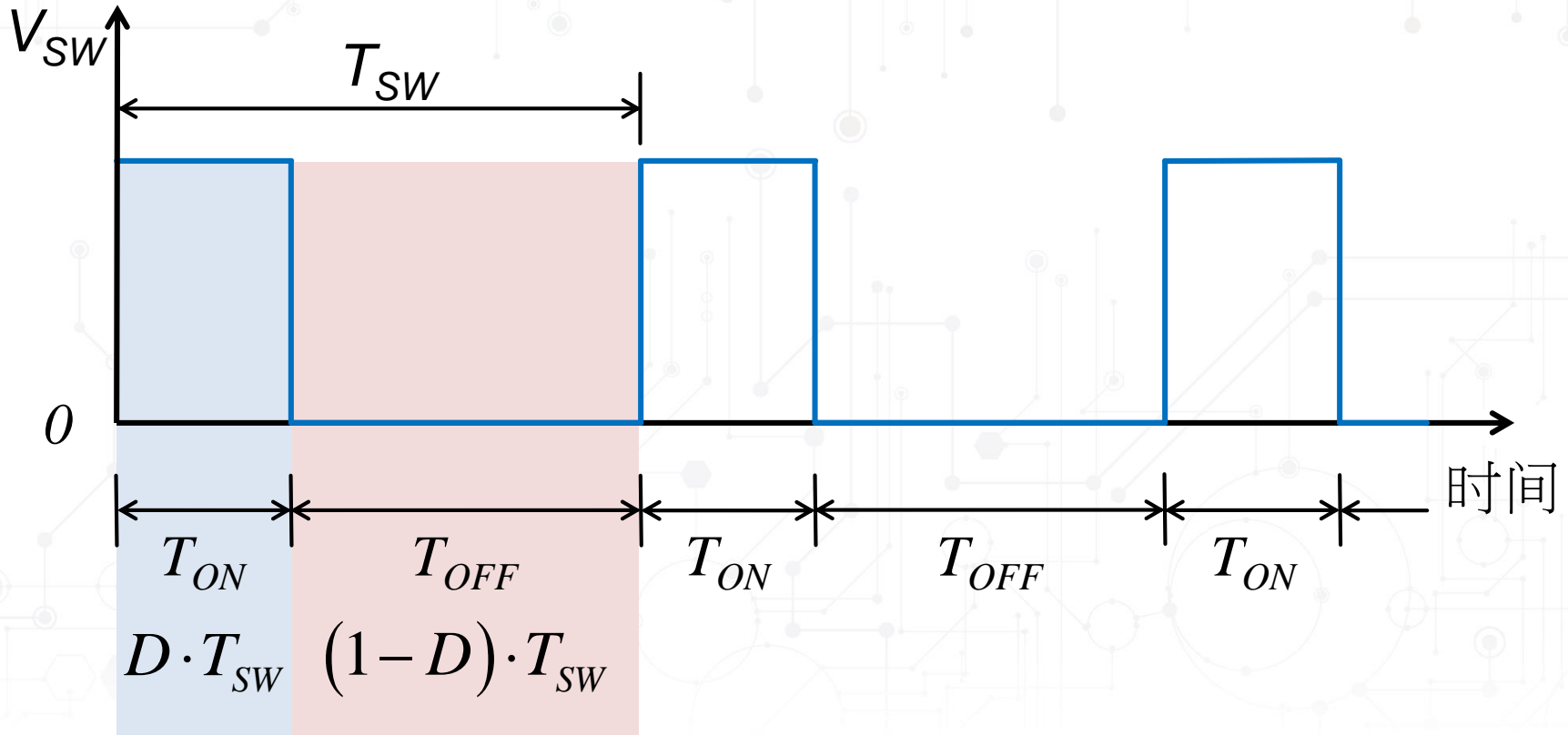




术语

占空比: $D = \frac{T_{ON}}{T_{SW}}$

$$D' = \frac{T_{OFF}}{T_{SW}} = 1 - D$$

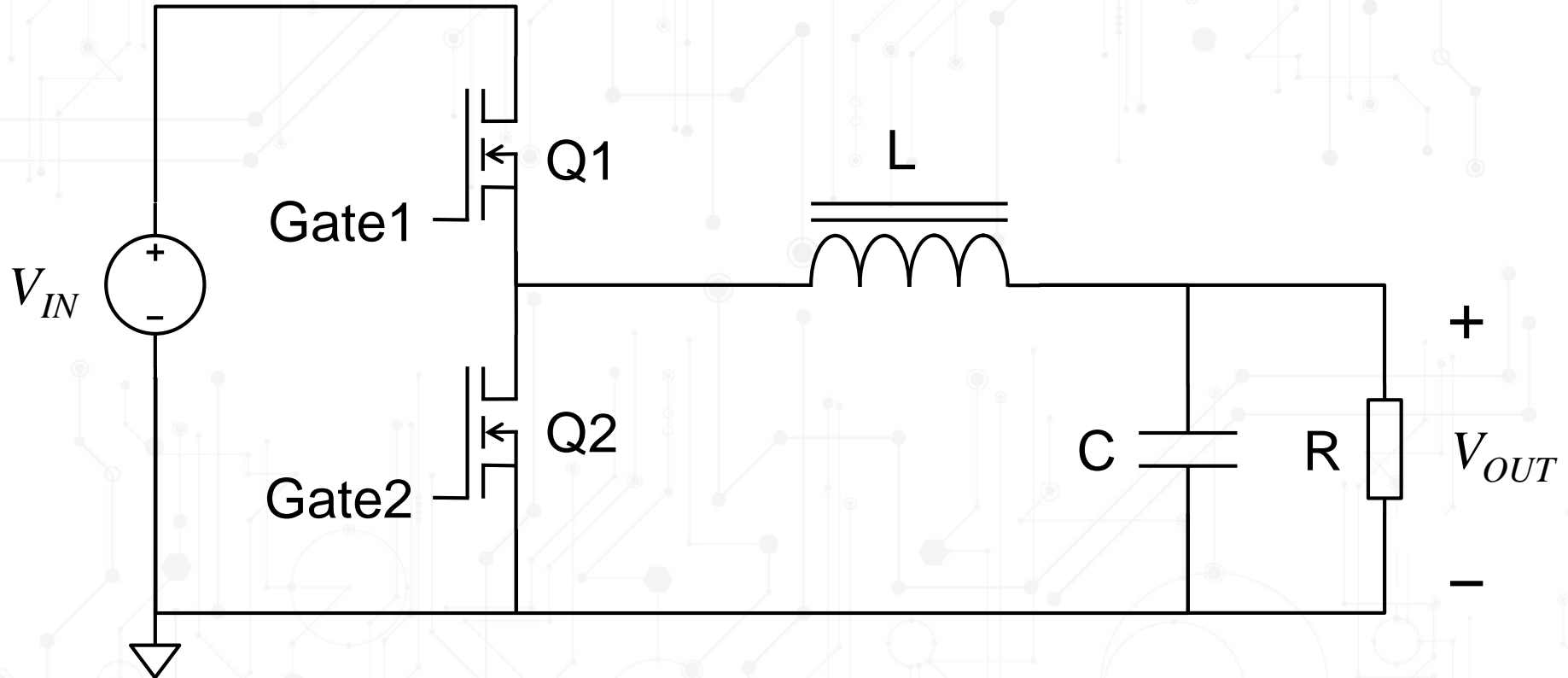




课程安排

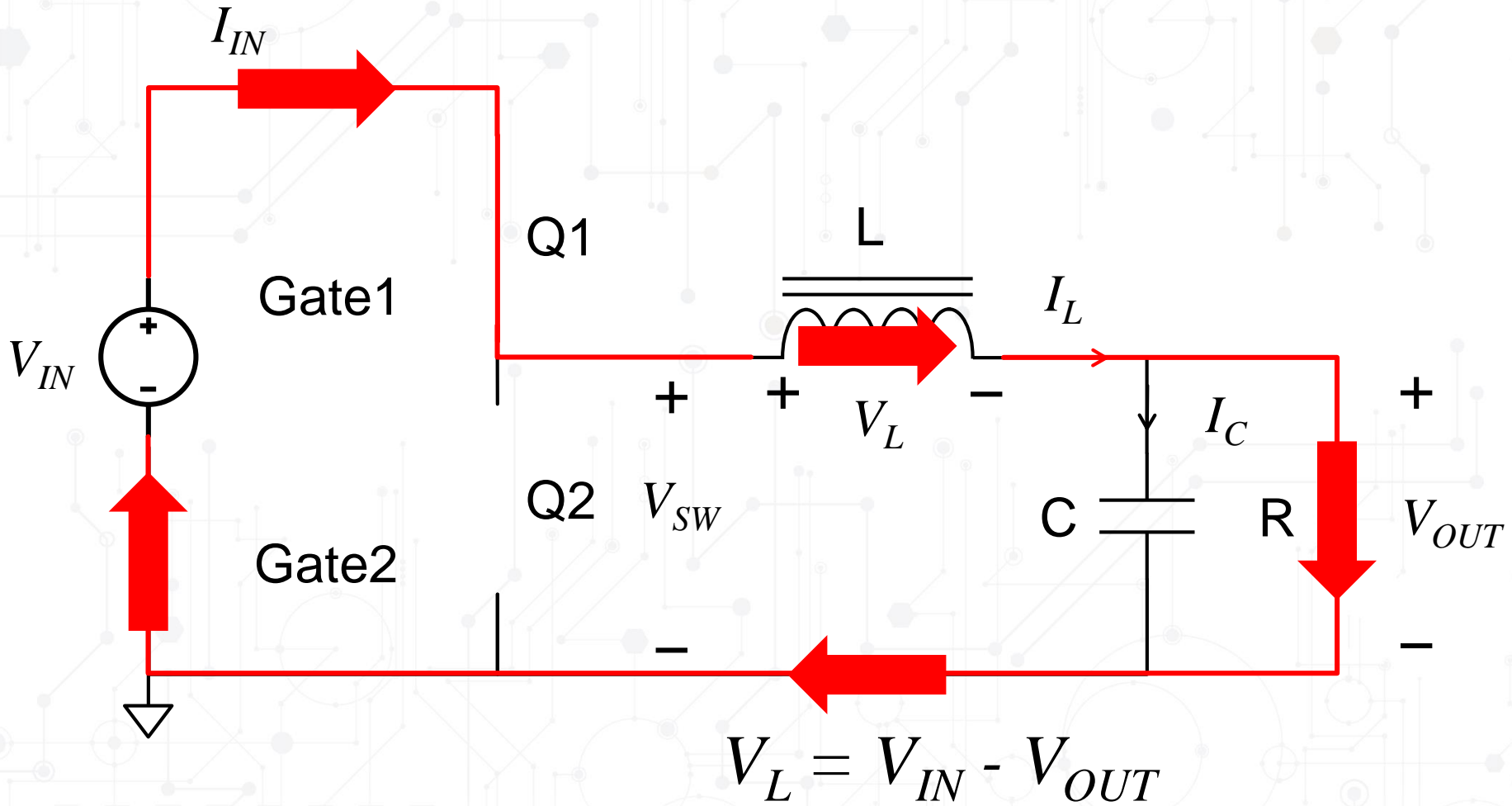
- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

降压变换器



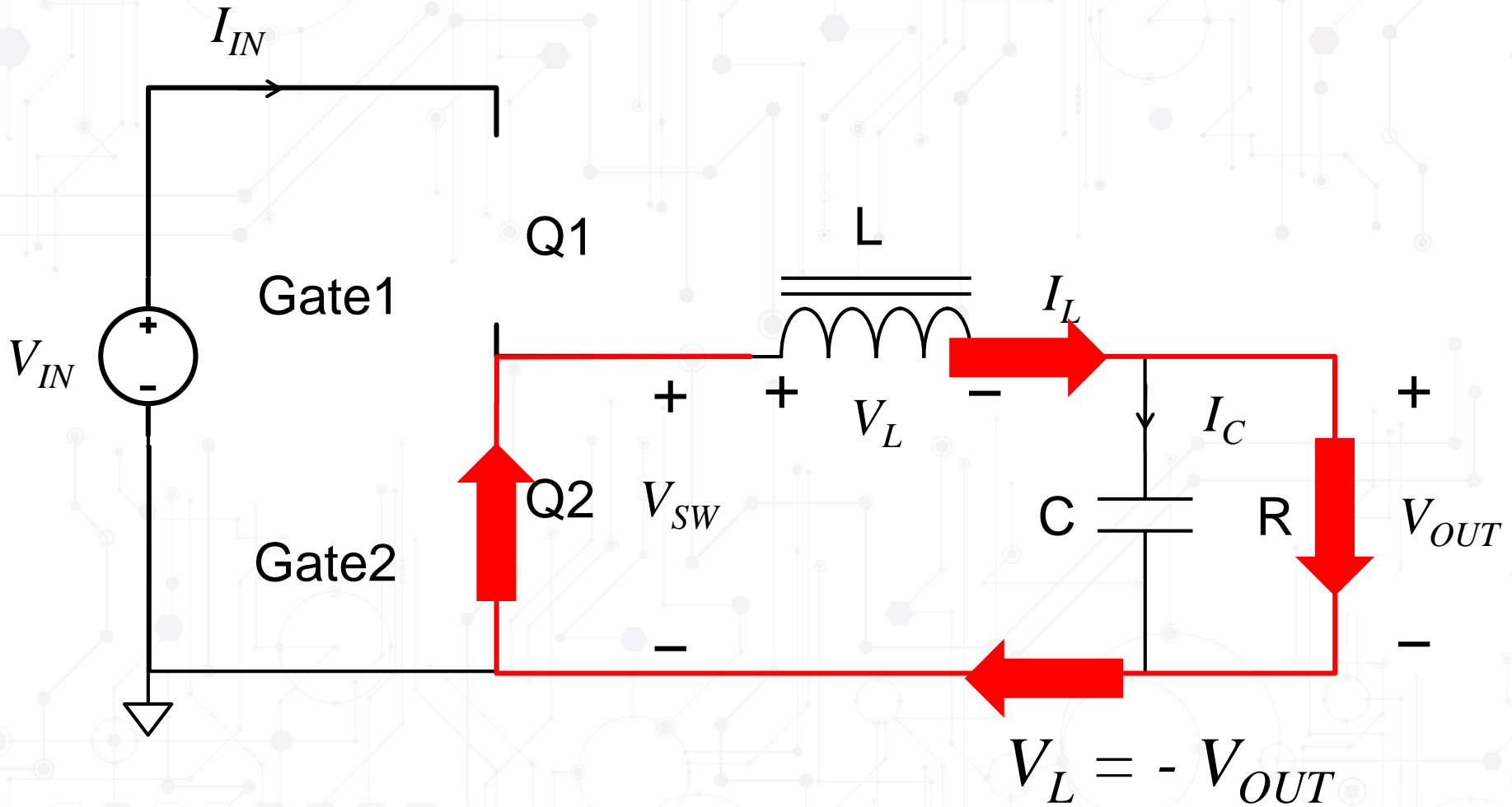


降压变换器导通时间

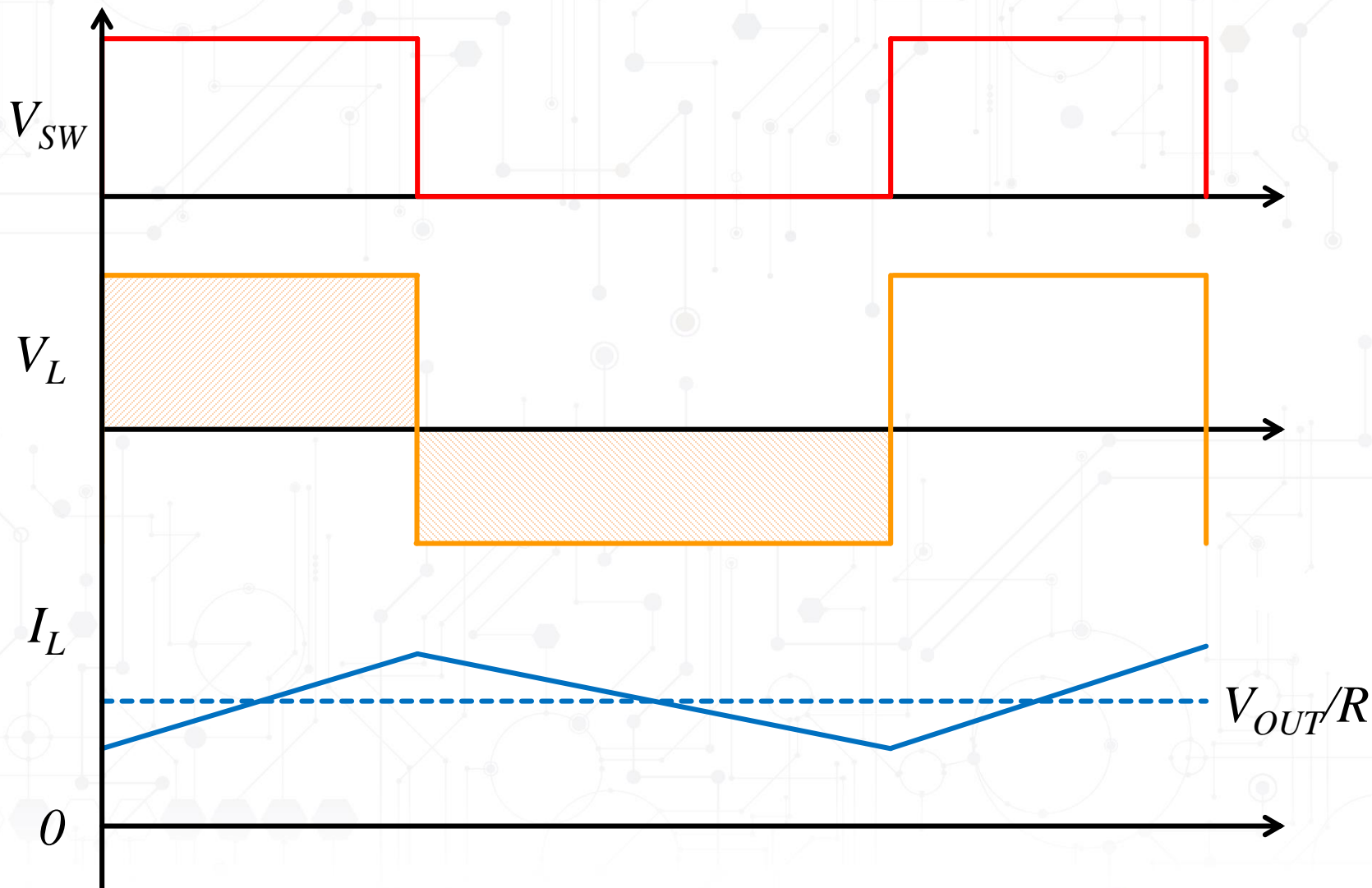




降压变换器截止时间



降压变换器电感电压和电流





电感伏秒平衡

$$V_L(T_{ON}) \cdot T_{ON} + V_L(T_{OFF}) \cdot T_{OFF} = 0$$

$$(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot T_{ON} + (-V_{OUT}) \cdot T_{OFF} = 0$$

$$(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot D \cdot T_{SW} + (-V_{OUT}) \cdot (1 - D) \cdot T_{SW} = 0$$

$$(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot D + (-V_{OUT}) \cdot (1 - D) = 0$$

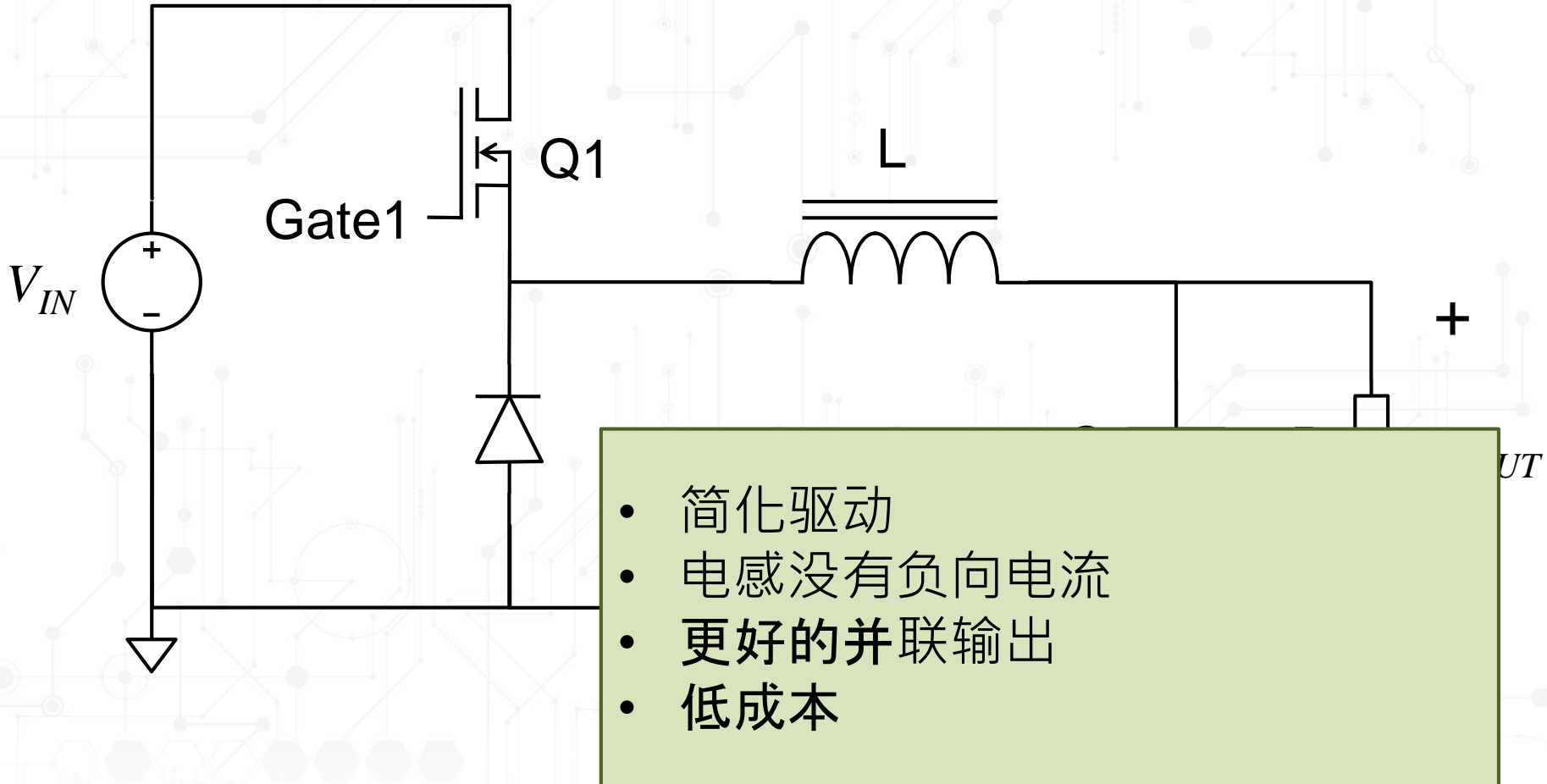
$$D \cdot V_{IN} - D \cdot V_{OUT} - V_{OUT} + D \cdot V_{OUT} = 0$$

$$D \cdot V_{IN} - V_{OUT} = 0$$

$$V_{OUT} = D \cdot V_{IN}$$



降压变换器二极管续流



降压转换器

优点

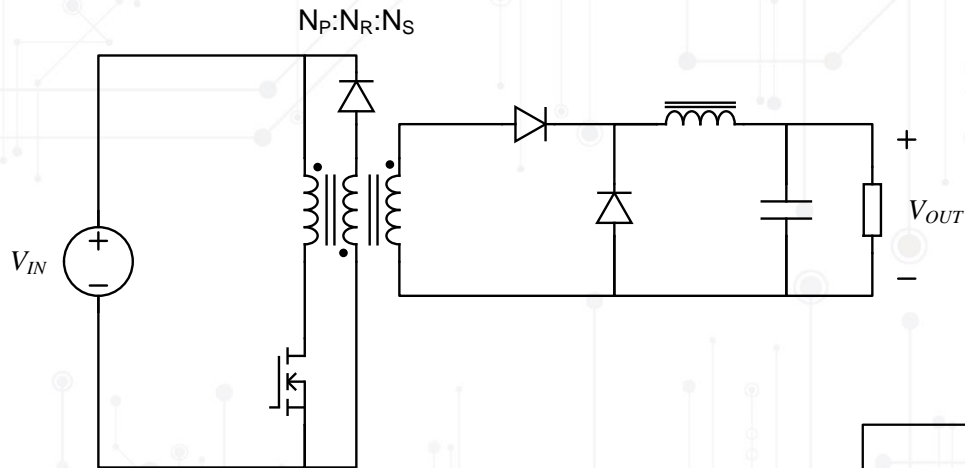
- 成本低
- 器件数量少
- 效率高
- 易于控制
- 许多控制器**IC**可用
- 可用作完全集成式转换器

缺点

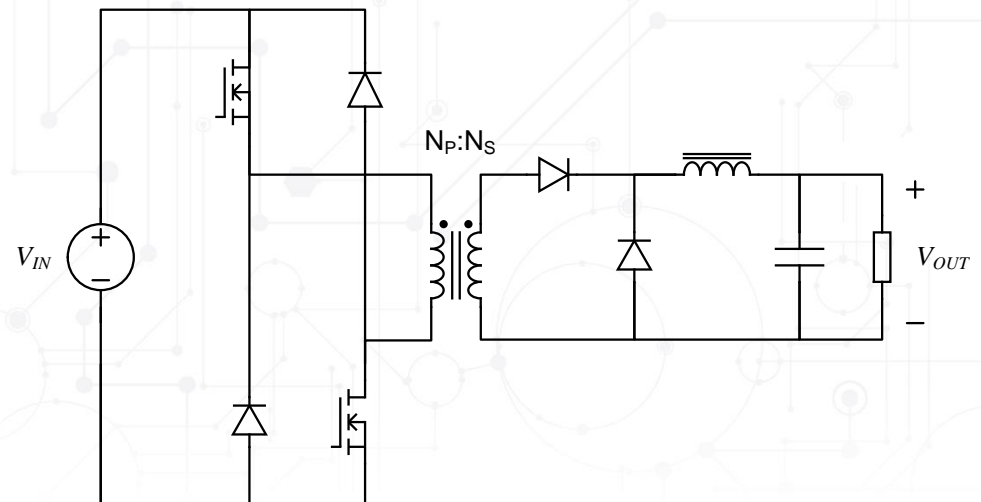
- 非隔离式
- 只能用于降压
- 控制**MOSFET**的栅极驱动悬空
- 需要防止控制开关短路故障

变压器隔离型降压转换器 正激转换器

单晶体管正激转换器

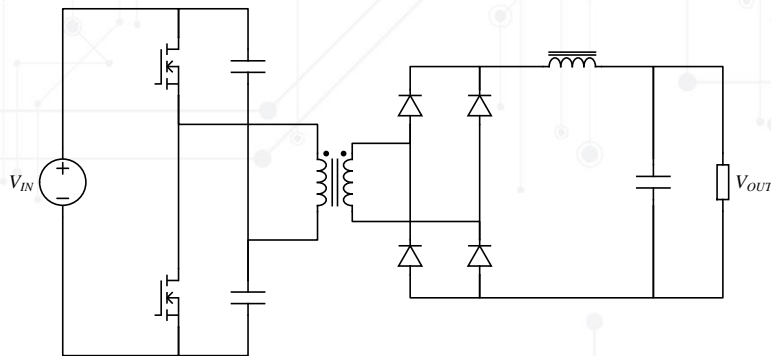


双晶体管正激转换器

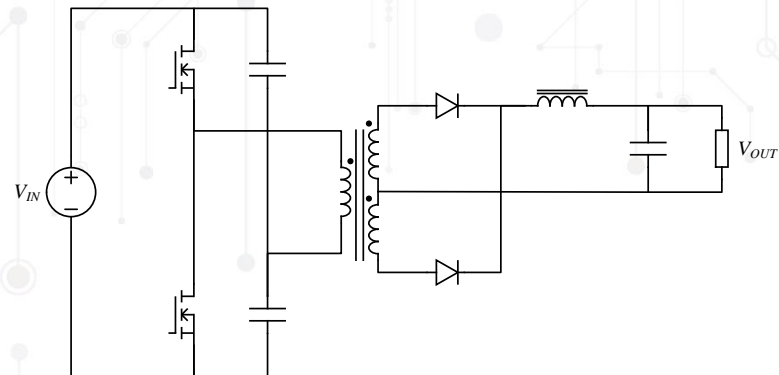


变压器隔离型降压转换器 半桥和全桥转换器

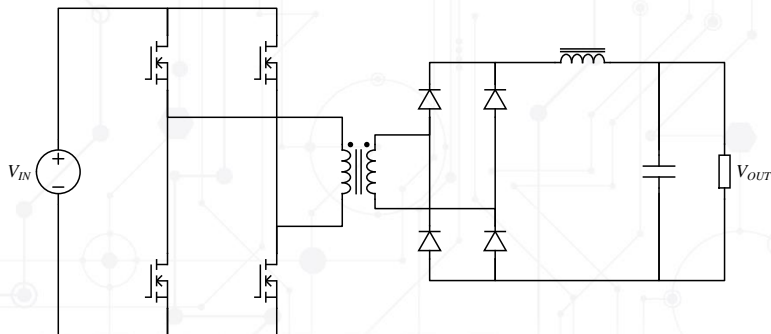
提供
全波整流器输出的半桥转换器



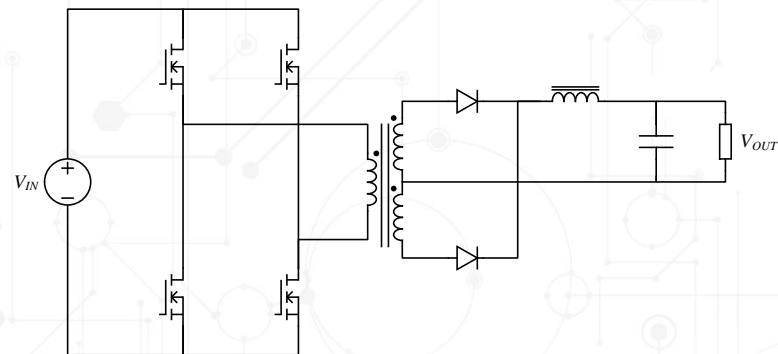
提供
中心抽头整流器输出的半桥转换器



提供
全波整流器输出的全桥转换器



提供
中心抽头整流器输出的全桥转换器

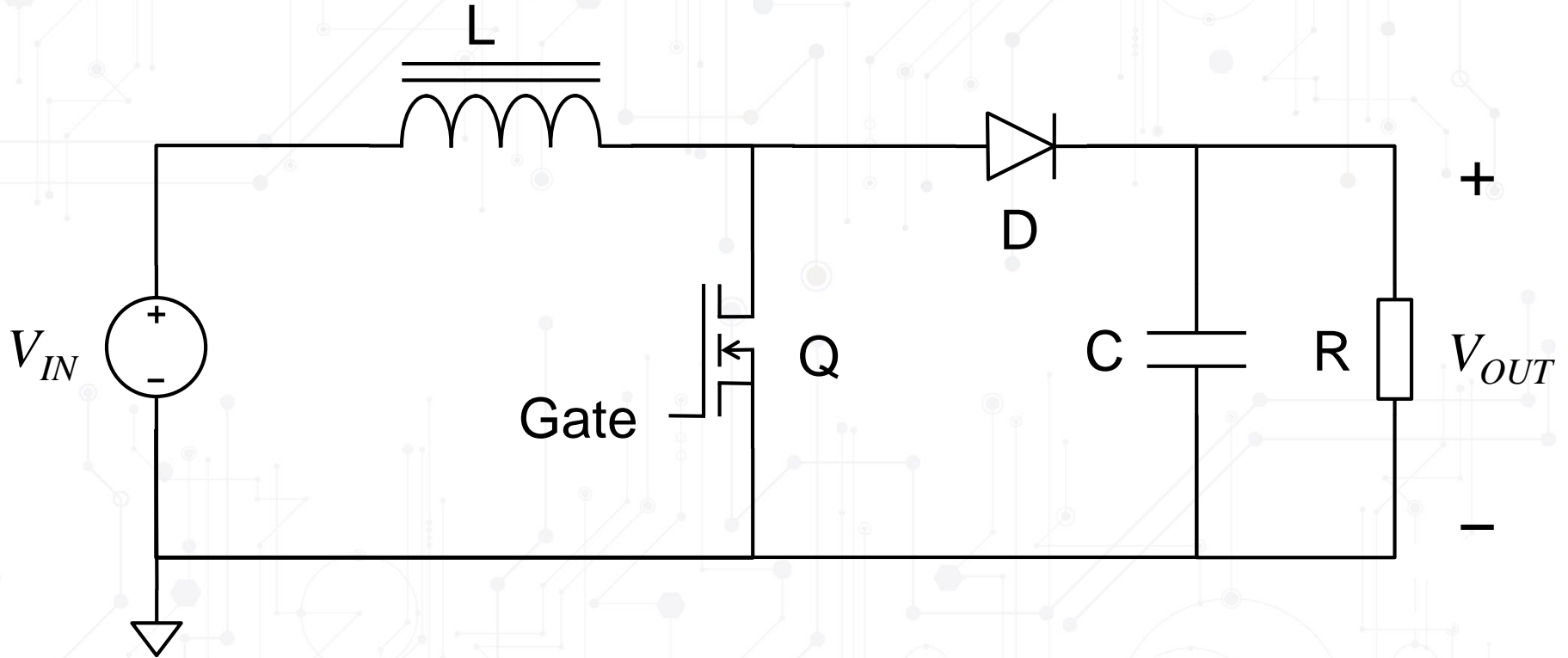




课程安排

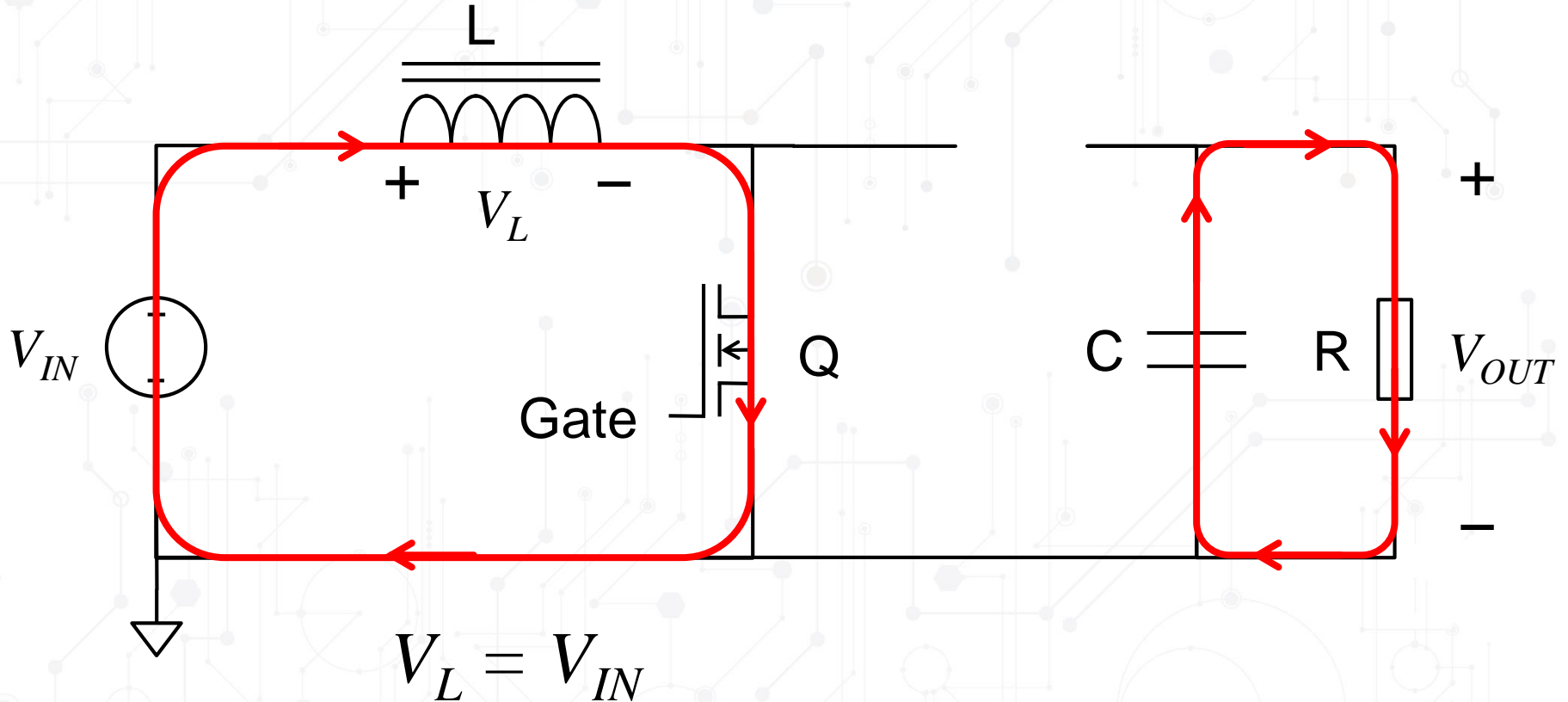
- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

升压变换器



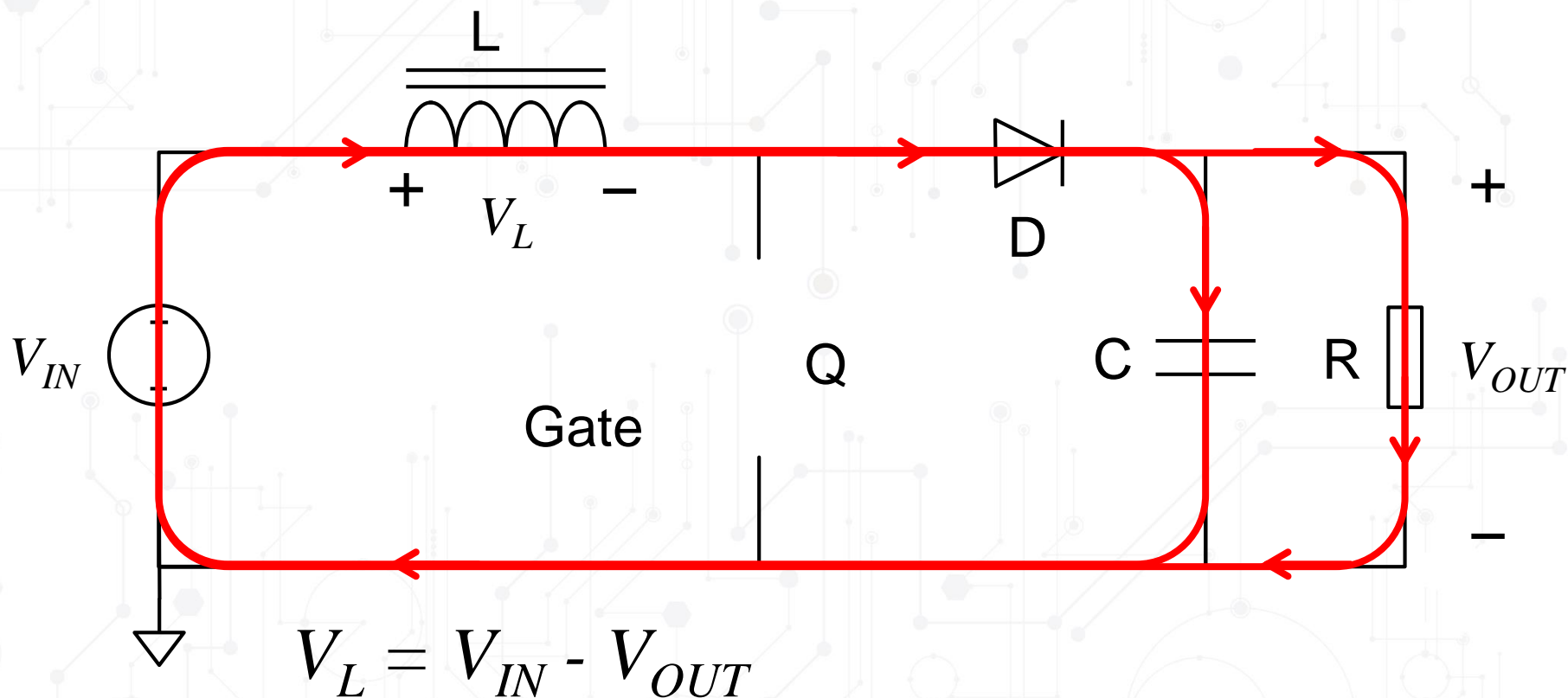


升压变换器:开通时间



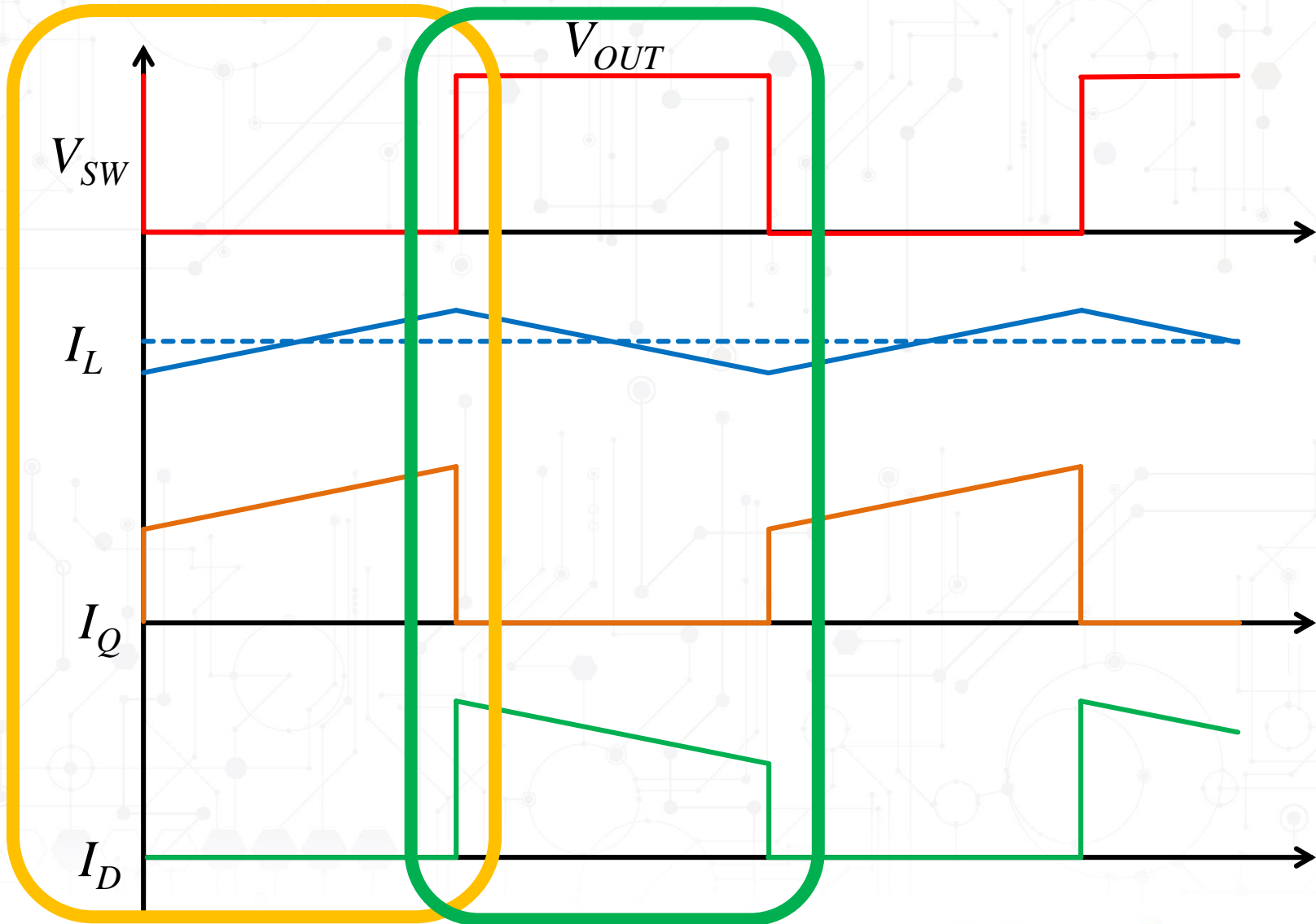


升压变换器：截止时间



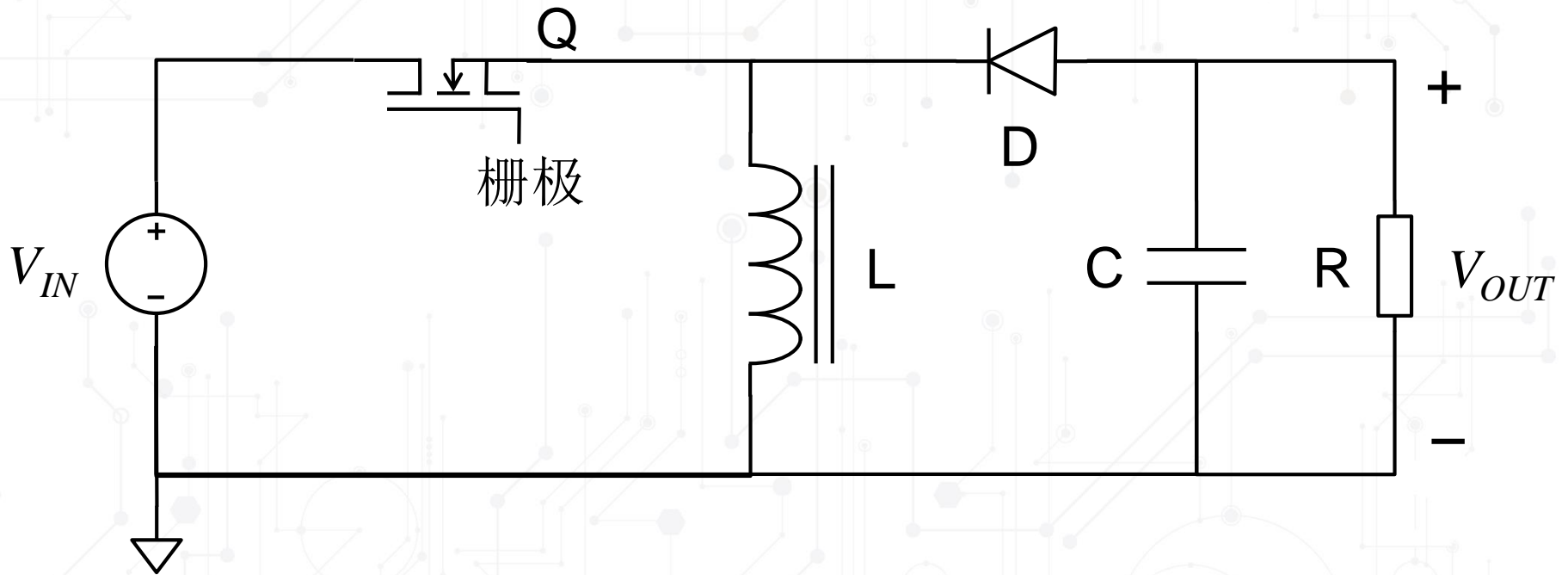


升压变换器波形



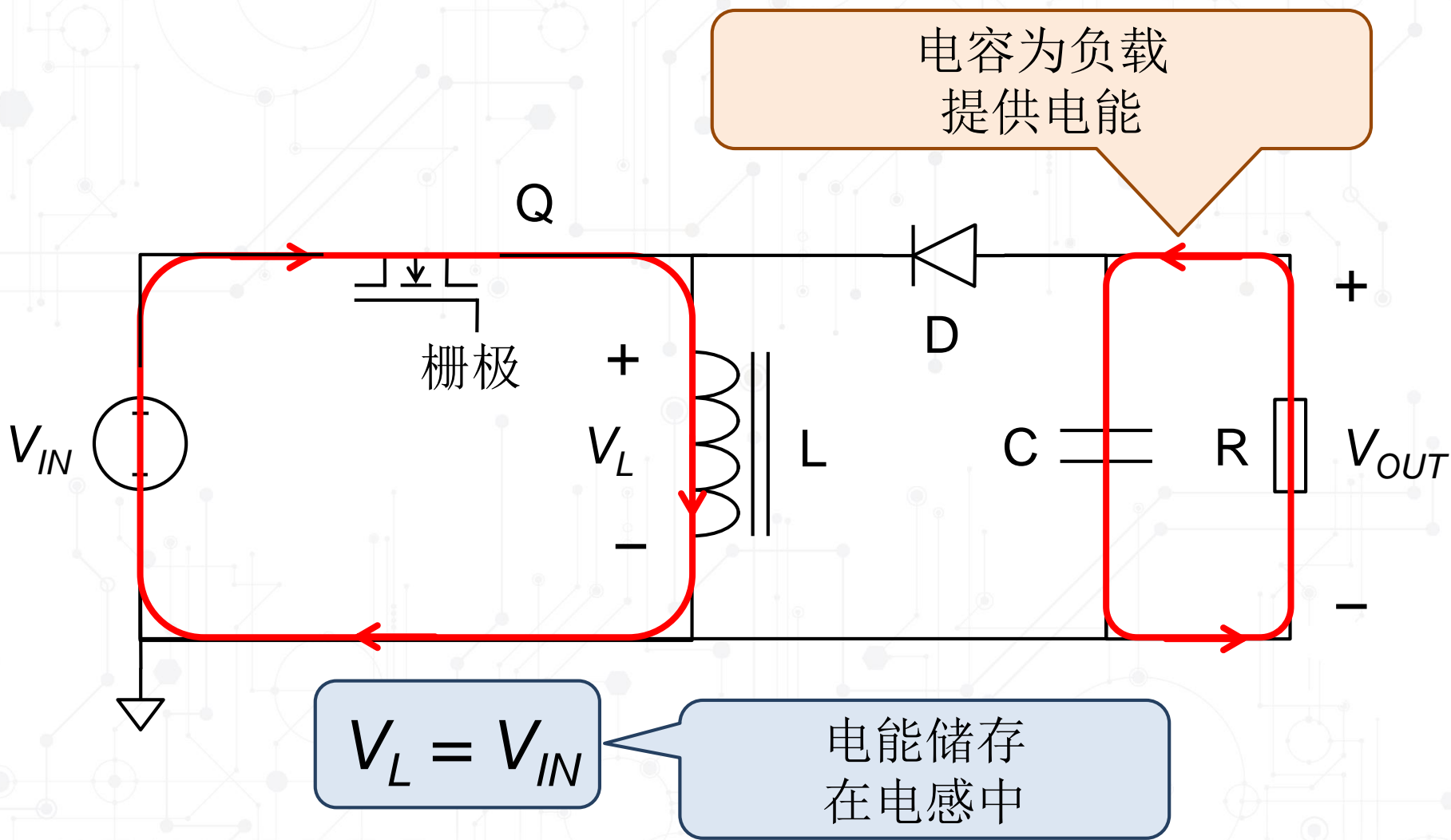


升降压变换器



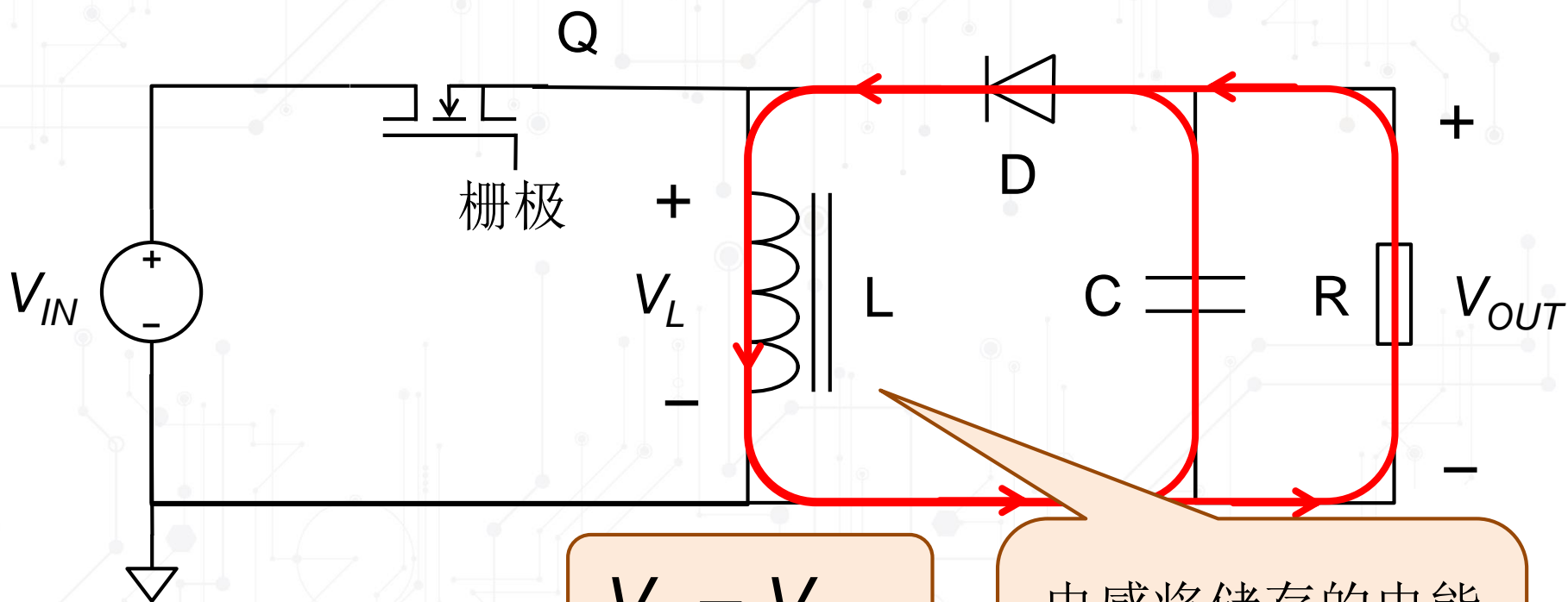


升降压转换器导通时间





升降压转换器关断时间



$$V_L = V_{OUT}$$

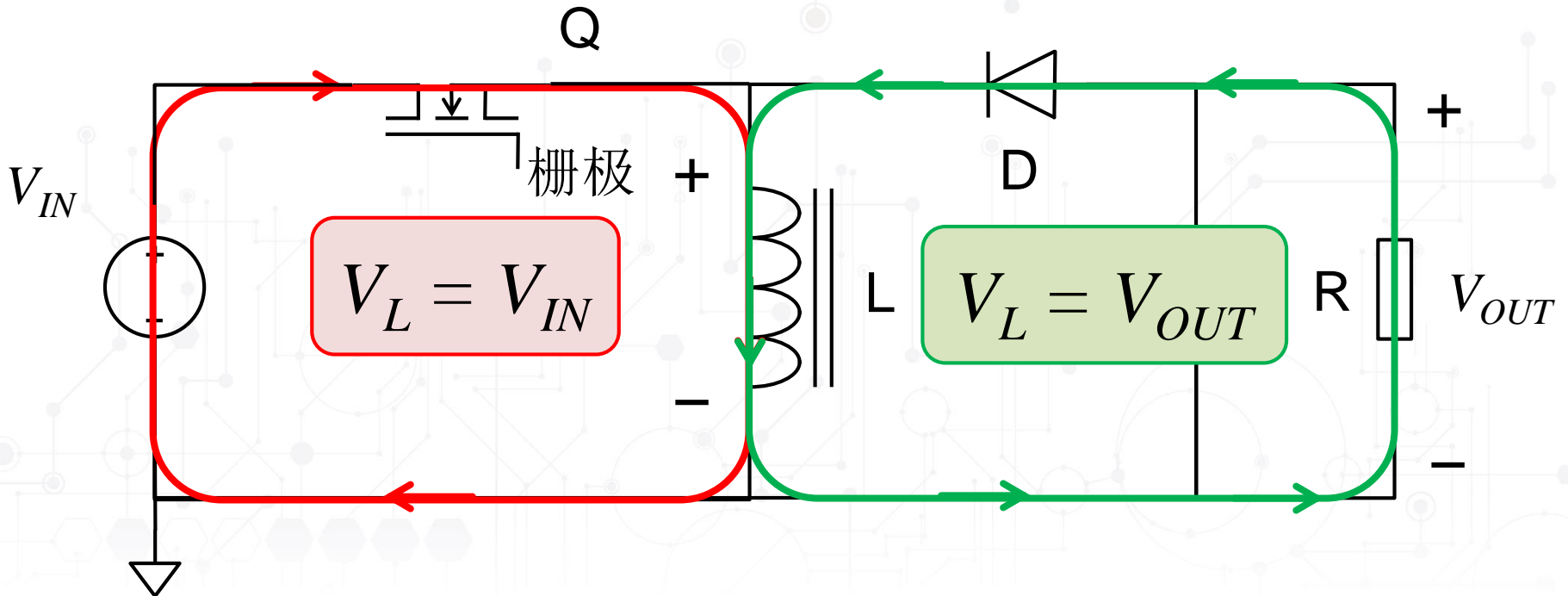
电感将储存的电能
输送到负载和输出
电容



升降压转换器

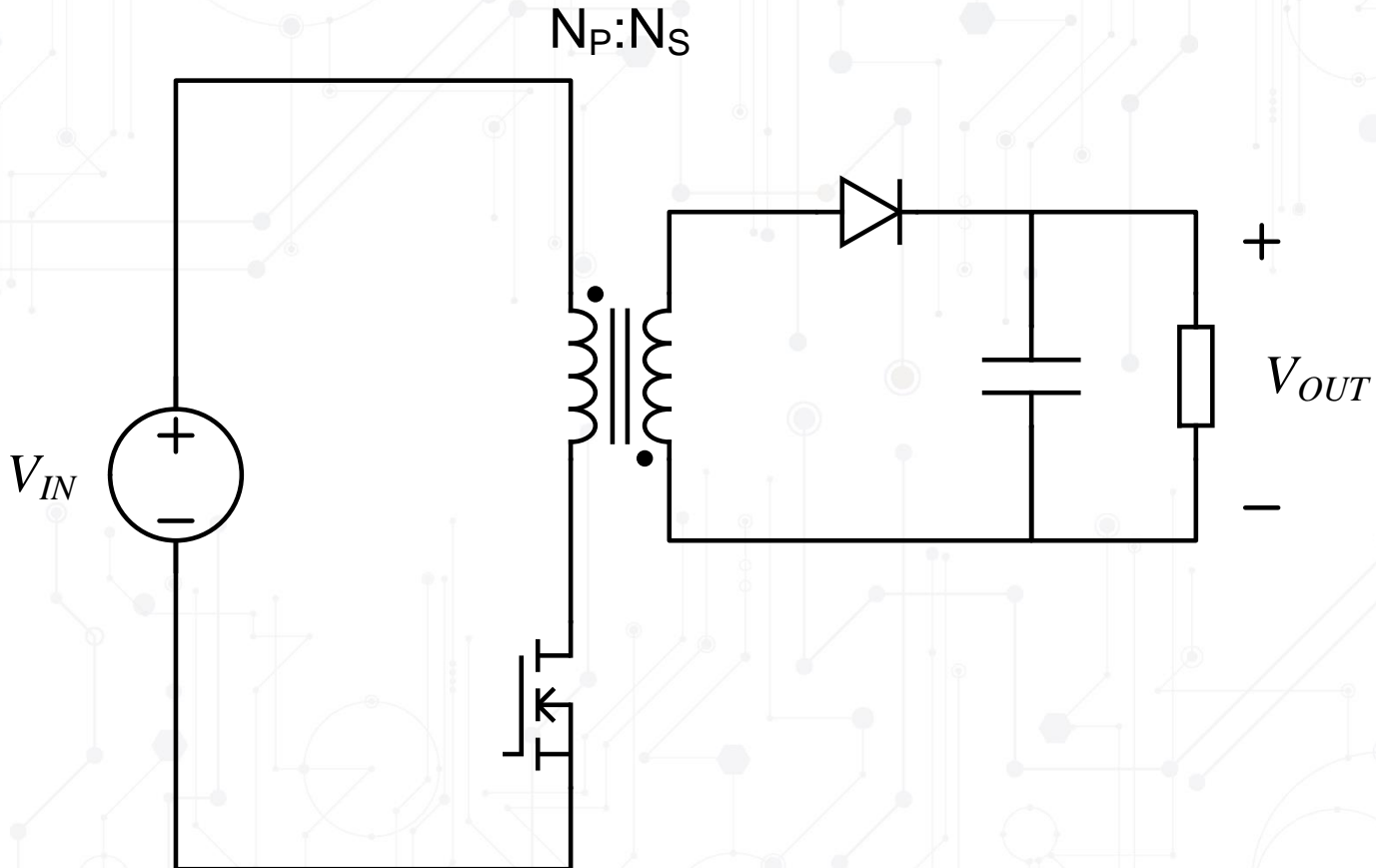
$$V_{IN} \cdot T_{ON} + V_{OUT} \cdot T_{OFF} = 0$$

$$V_{OUT} = -\frac{T_{ON}}{T_{OFF}} \cdot V_{IN}$$





反激式转换器



谐振转换器

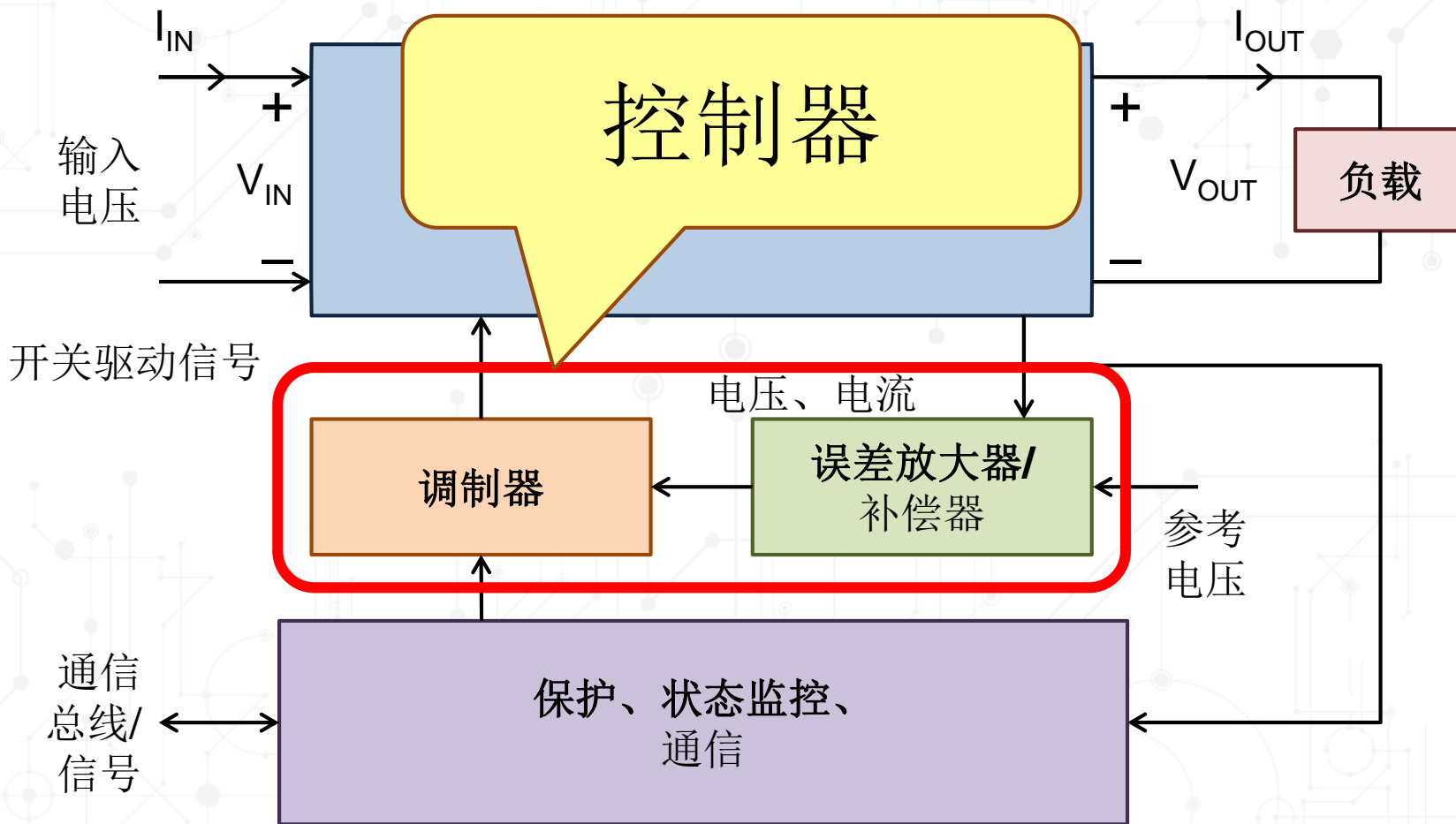
- 更复杂的典型专业应用
 - 十分常见：CCFL镇流器
- **LLC谐振转换器是当今一种重要的拓扑**
 - 操作复杂
 - 设计复杂
 - 提供高效率



课程安排

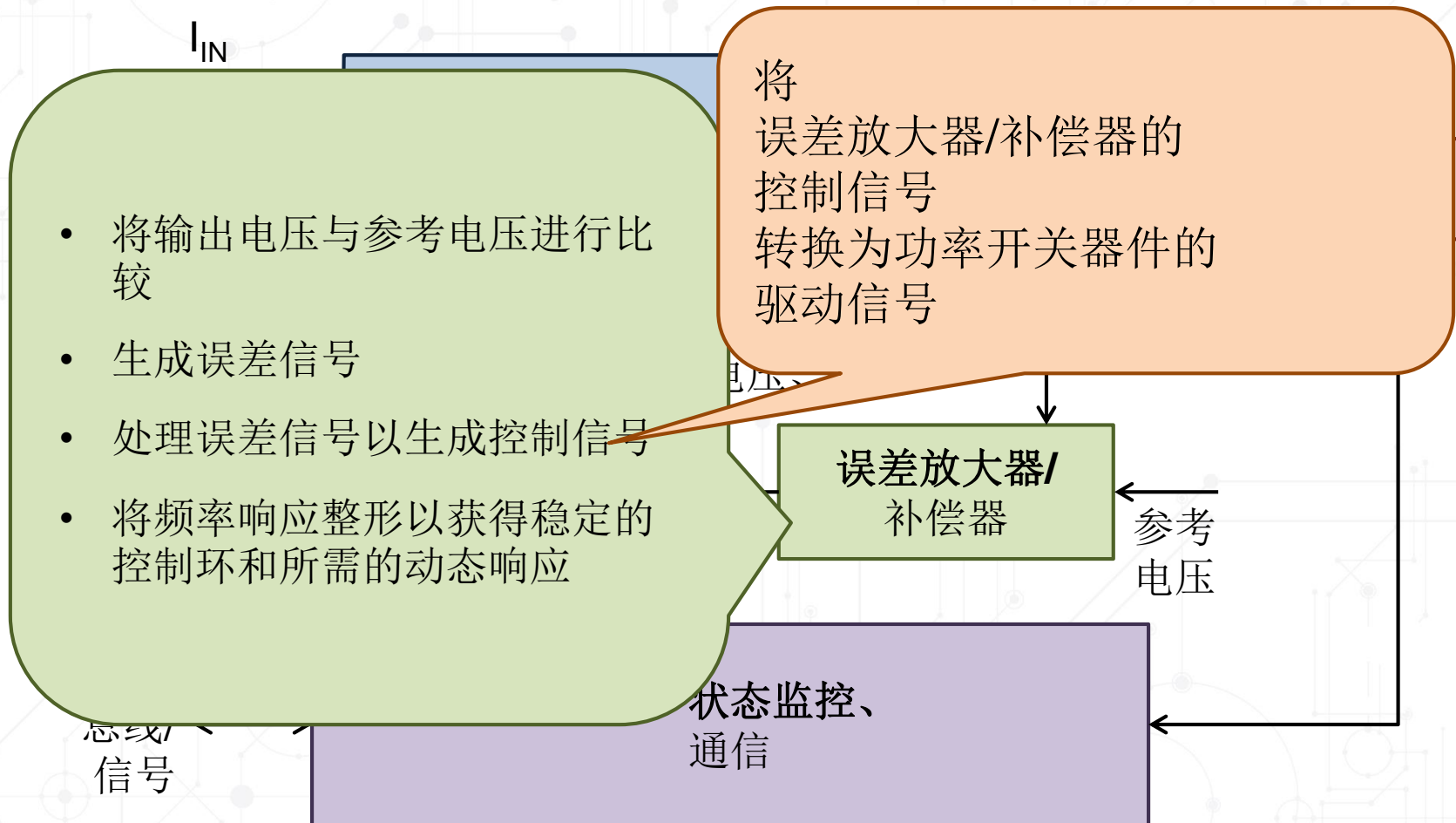
- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

开关模式转换器



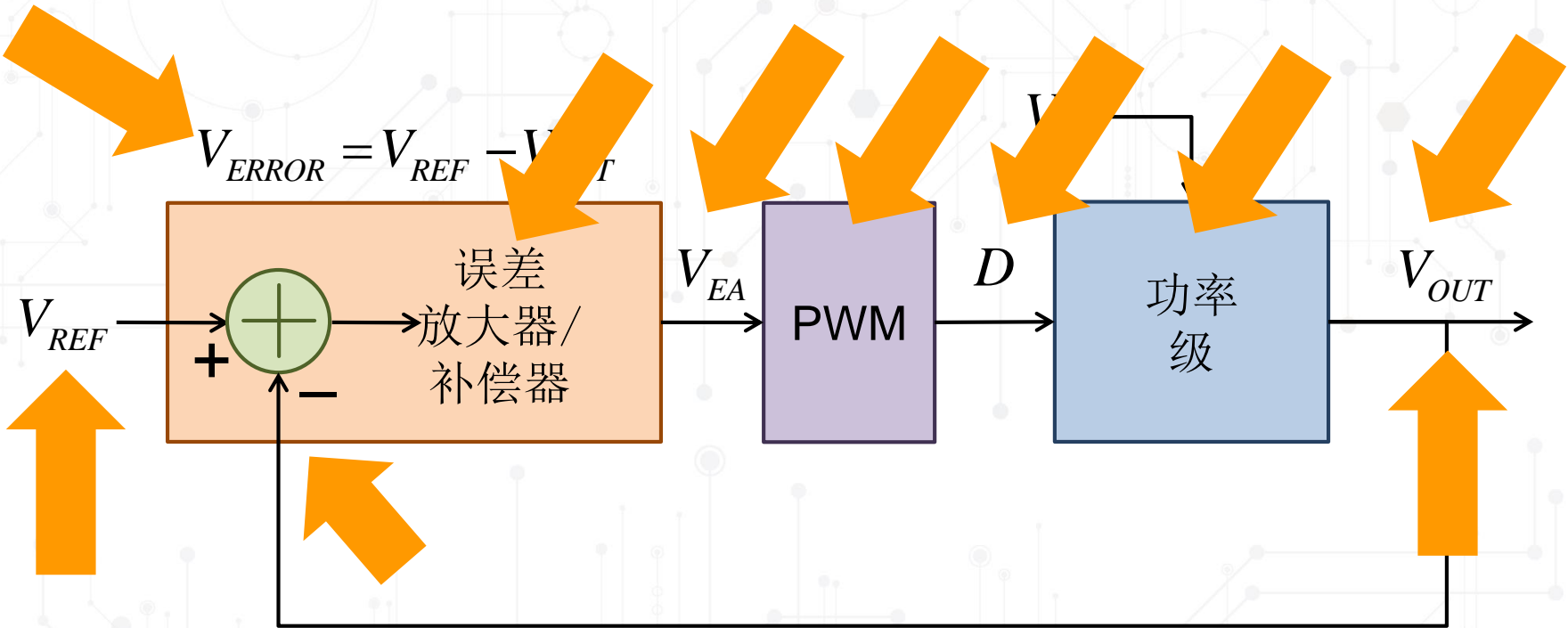


开关模式转换器

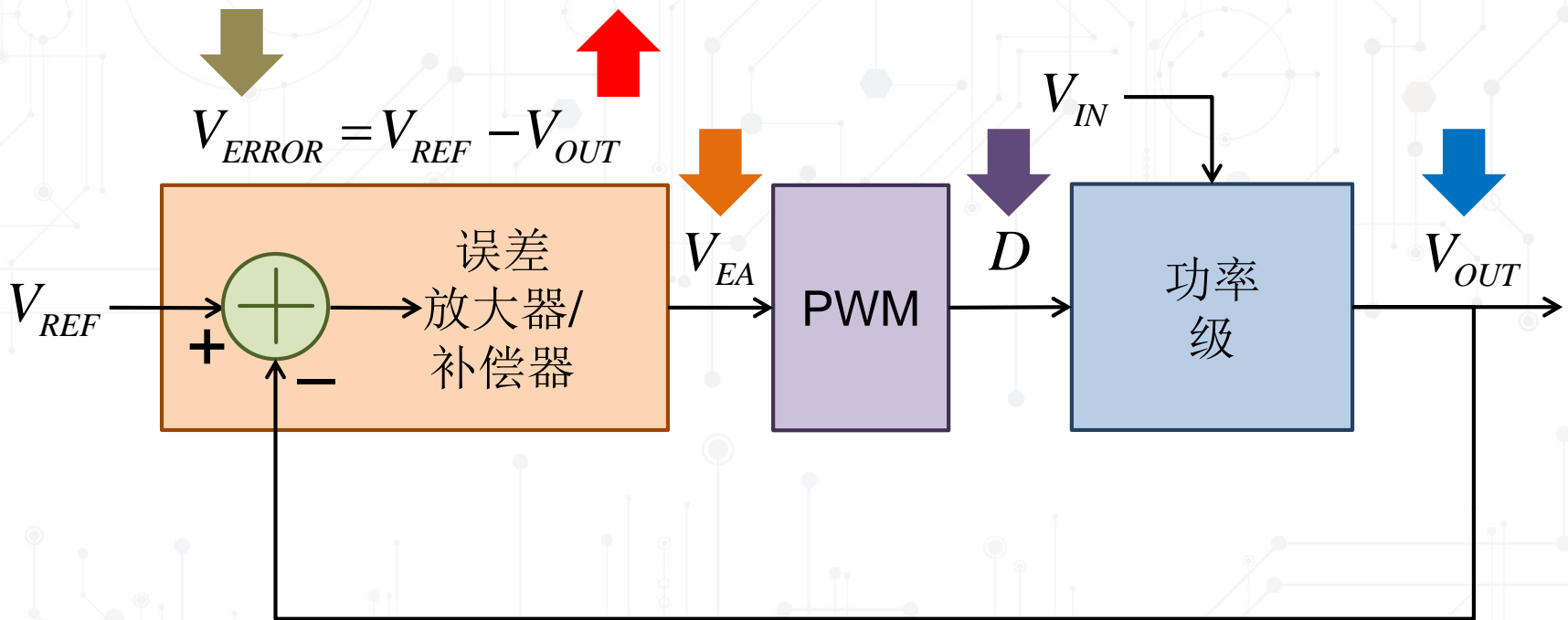




带反馈的降压转换器

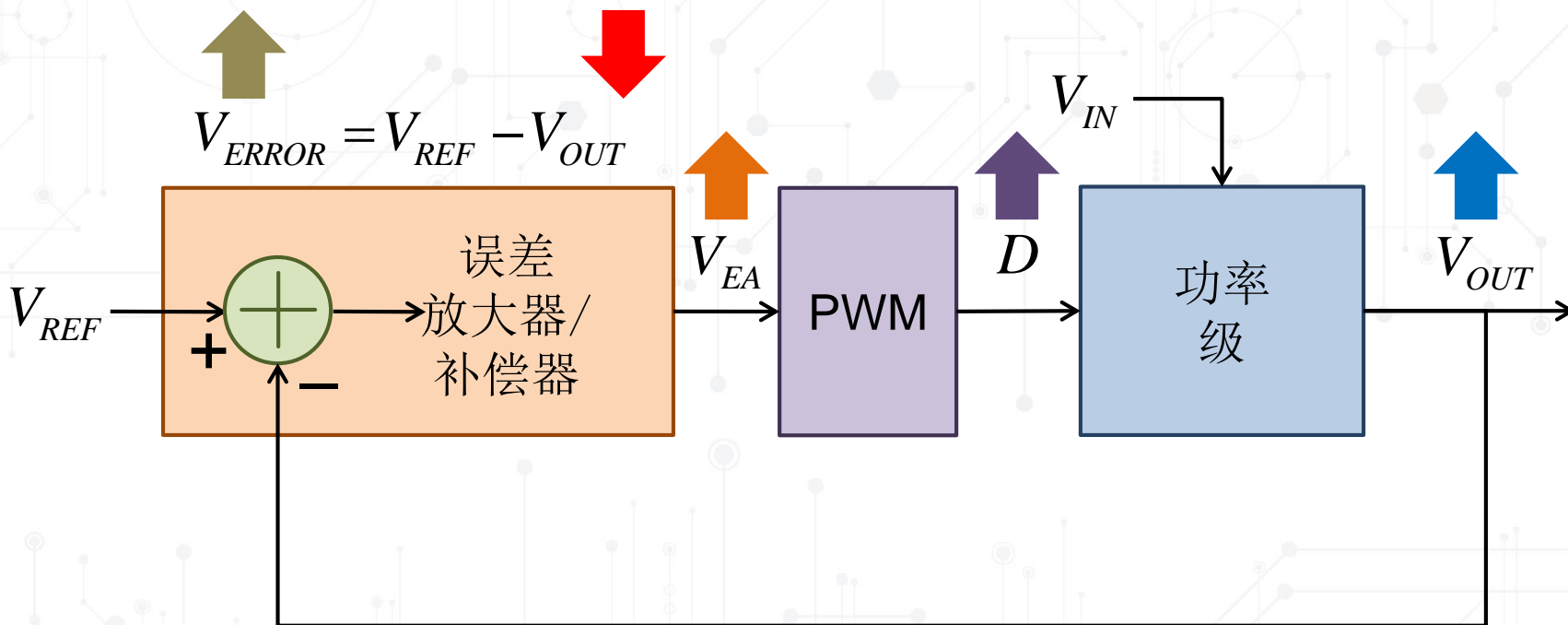


带反馈的降压转换器



输出电压过高 ⇒
误差电压为负值 ⇒
占空比降低 ⇒
输出电压降低

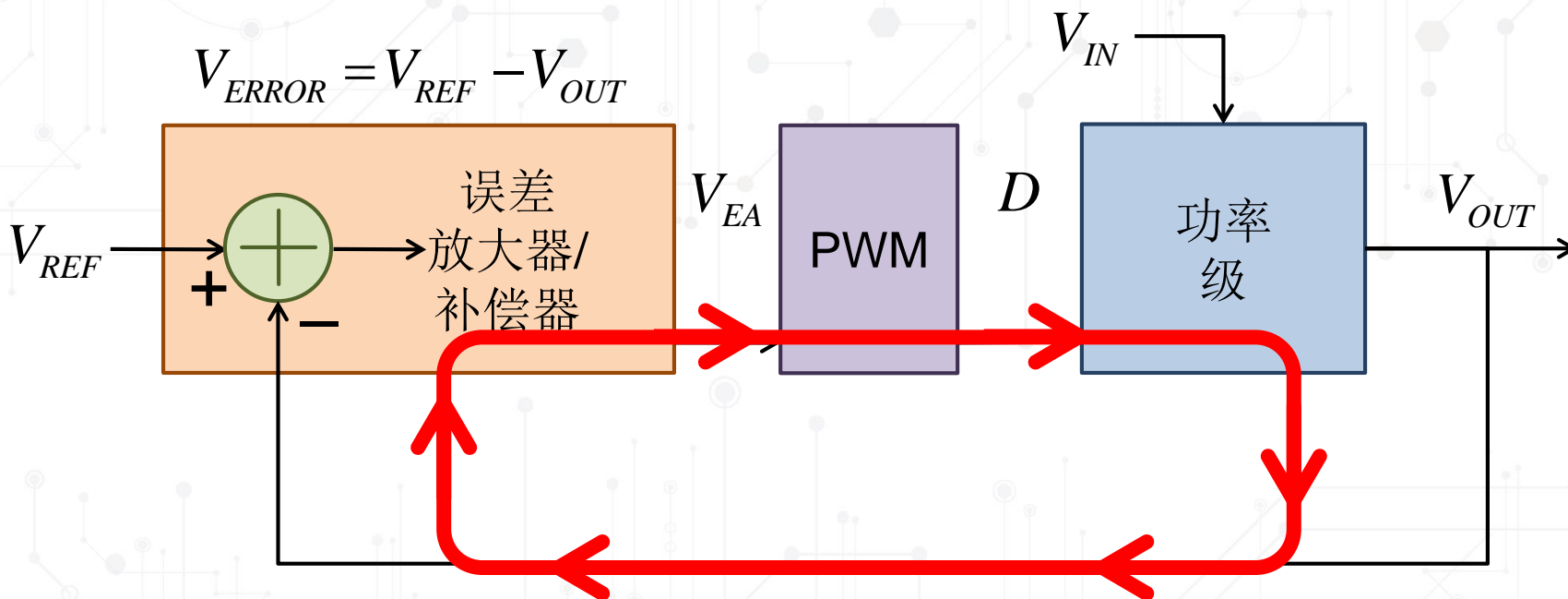
带反馈的降压转换器



输出电压过低⇒
误差电压为正值⇒
占空比升高⇒
输出电压升高



提供反馈的降压转换器



开环增益, $T(s)$

$$T(s) = H_{EA}(s) \cdot G_{PWM}(s) \cdot G_{VD}(s)$$



课程安排

- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

补偿器设计：设计步骤

设计误差放大器时，我们需要用到其他所有的传递函数： $T(s)$ 、 $G_{PWM}(s)$ 、 $G_{VD}(s)$

求解误差放大器传递函数



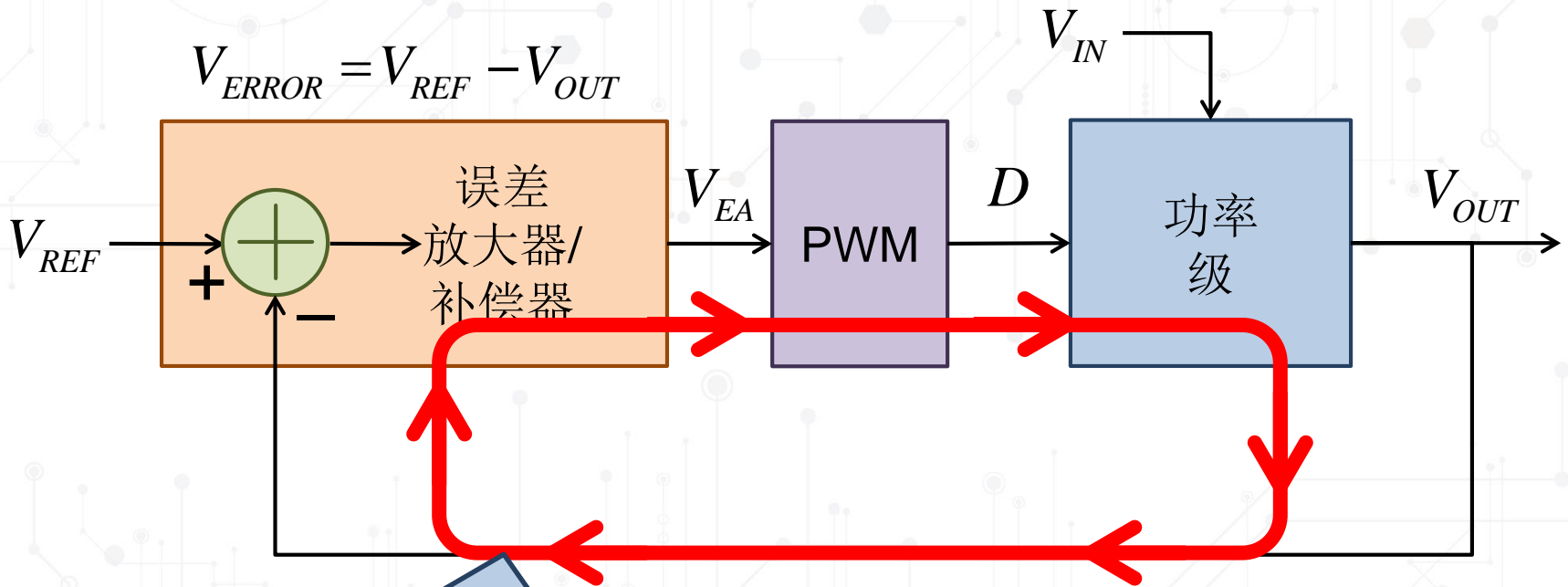
$$H_{EA}(s) = \frac{T(s)}{G_{PWM} \cdot G_{VD}(s)}$$



第一步：开环增益T(s)

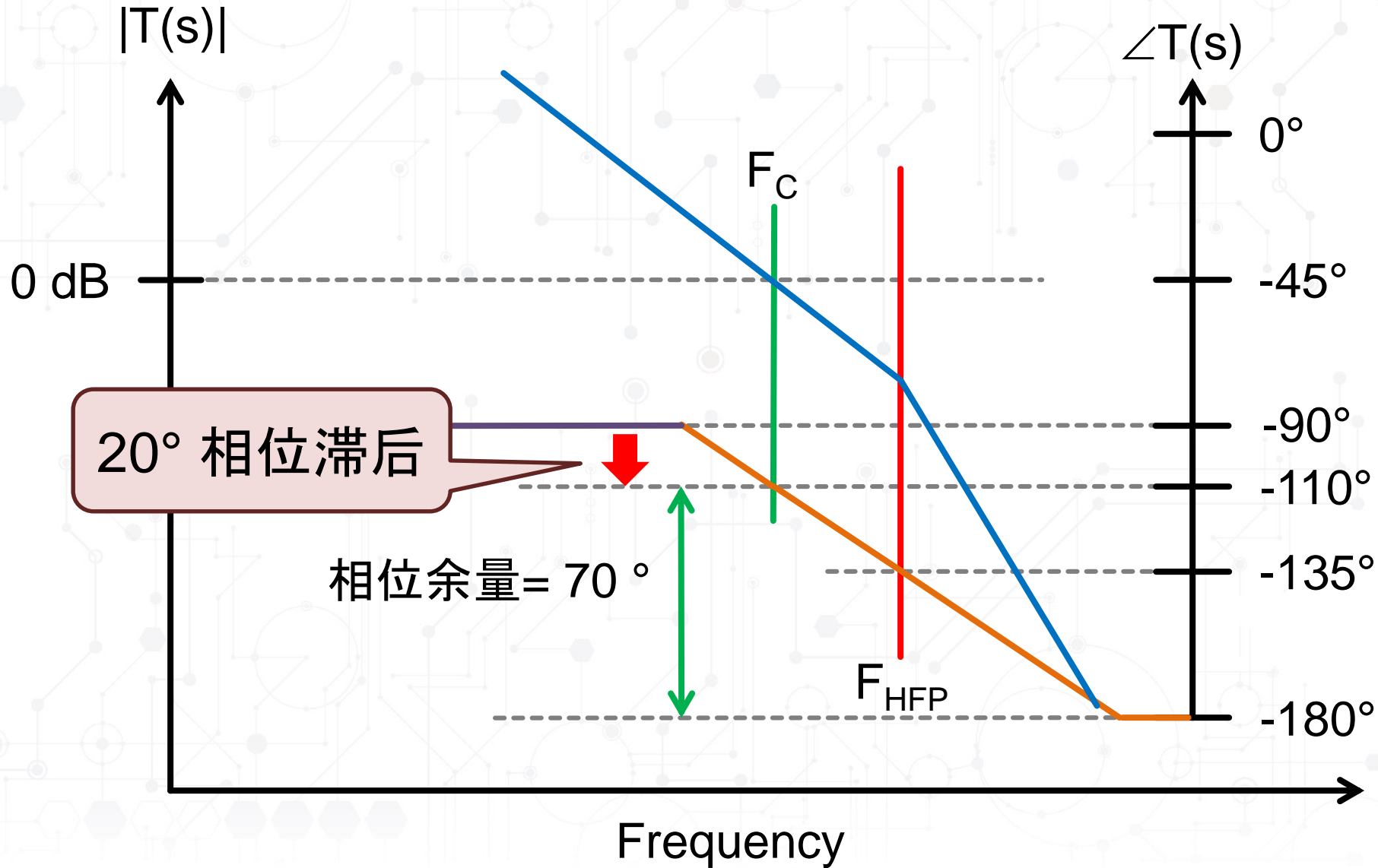
$$H_{EA}(s) = \frac{T(s)}{G_{PWM} \cdot G_{VD}(s)}$$

带反馈的降压转换器



我们先计算出所需的环路增益： $T(s)$

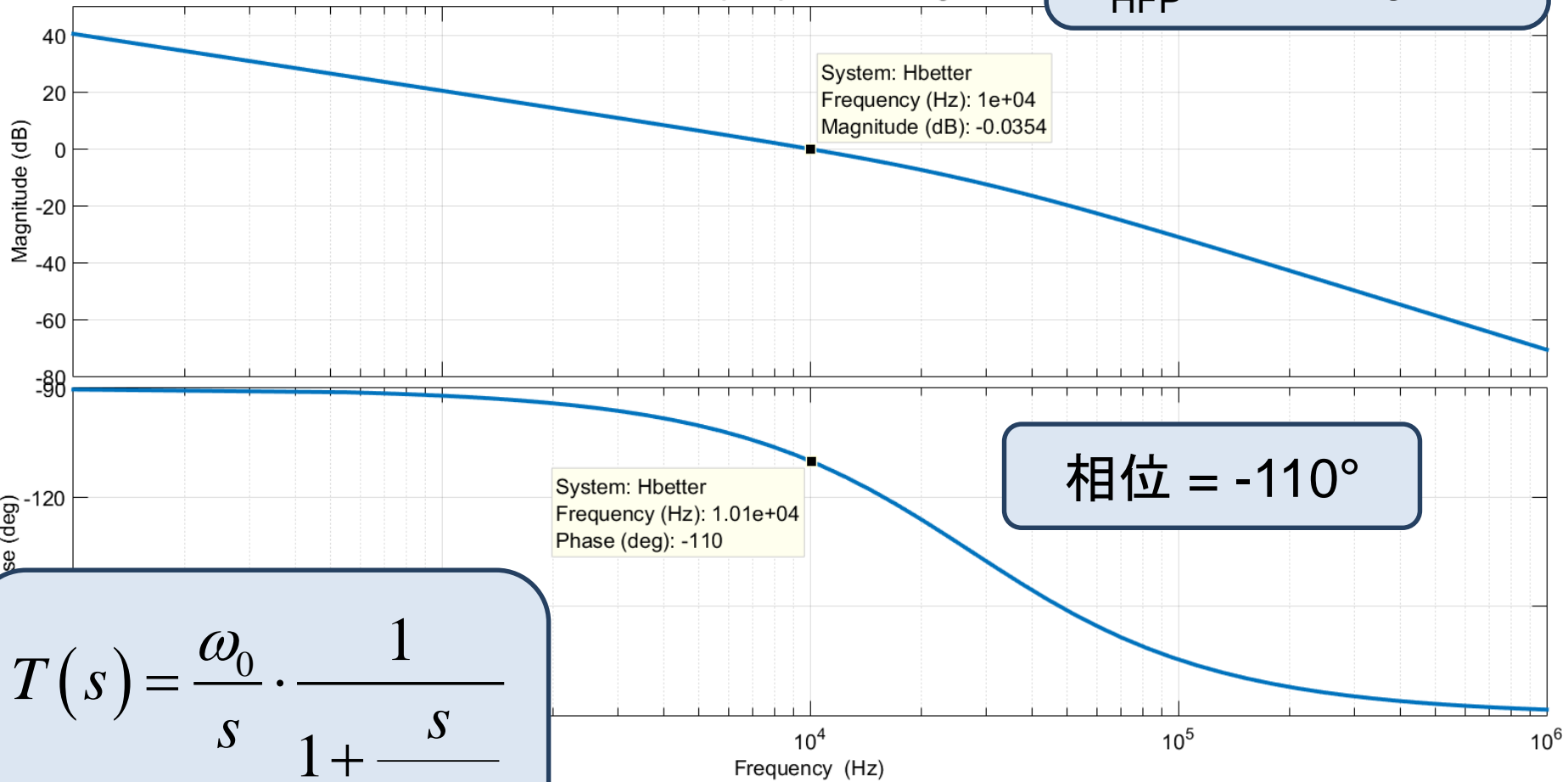
更优的T(s): 70° 相位余量



更优的 T(s)

$F_C = 10 \text{ kHz}$
 $F_{HFP} = 27.475 \text{ kHz}$

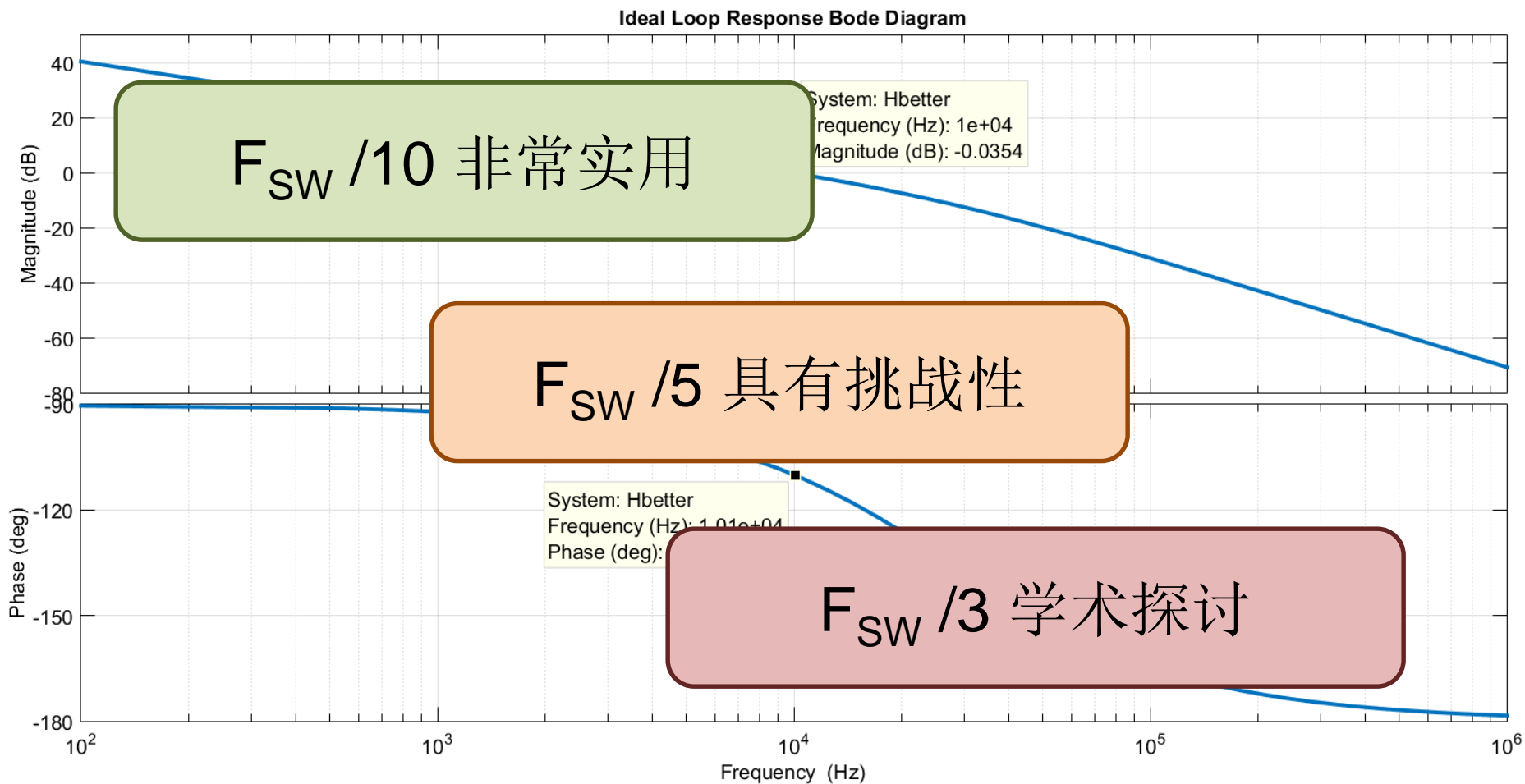
Ideal Loop Response Bode Diagram



相位 = -110°

$$T(s) = \frac{\omega_0}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{HFP}}}$$

更优的T(s): 实际交越频率

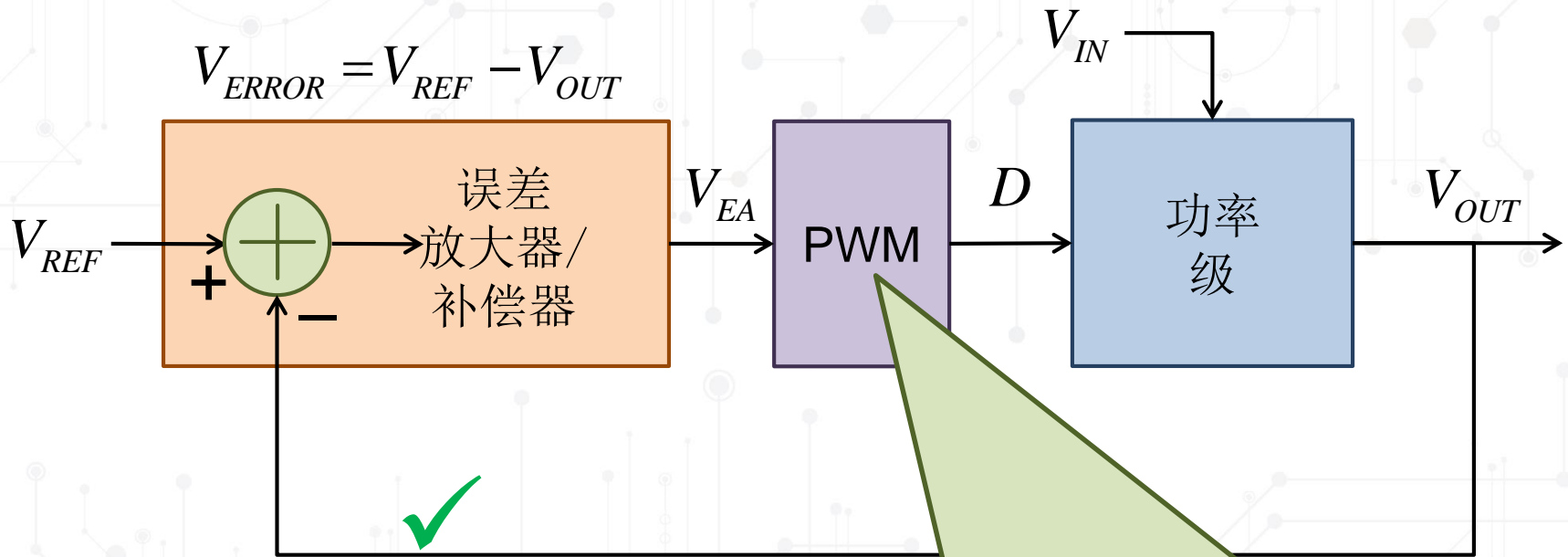




第2步：脉宽调制器 传递函数， $G_{PWM}(s)$

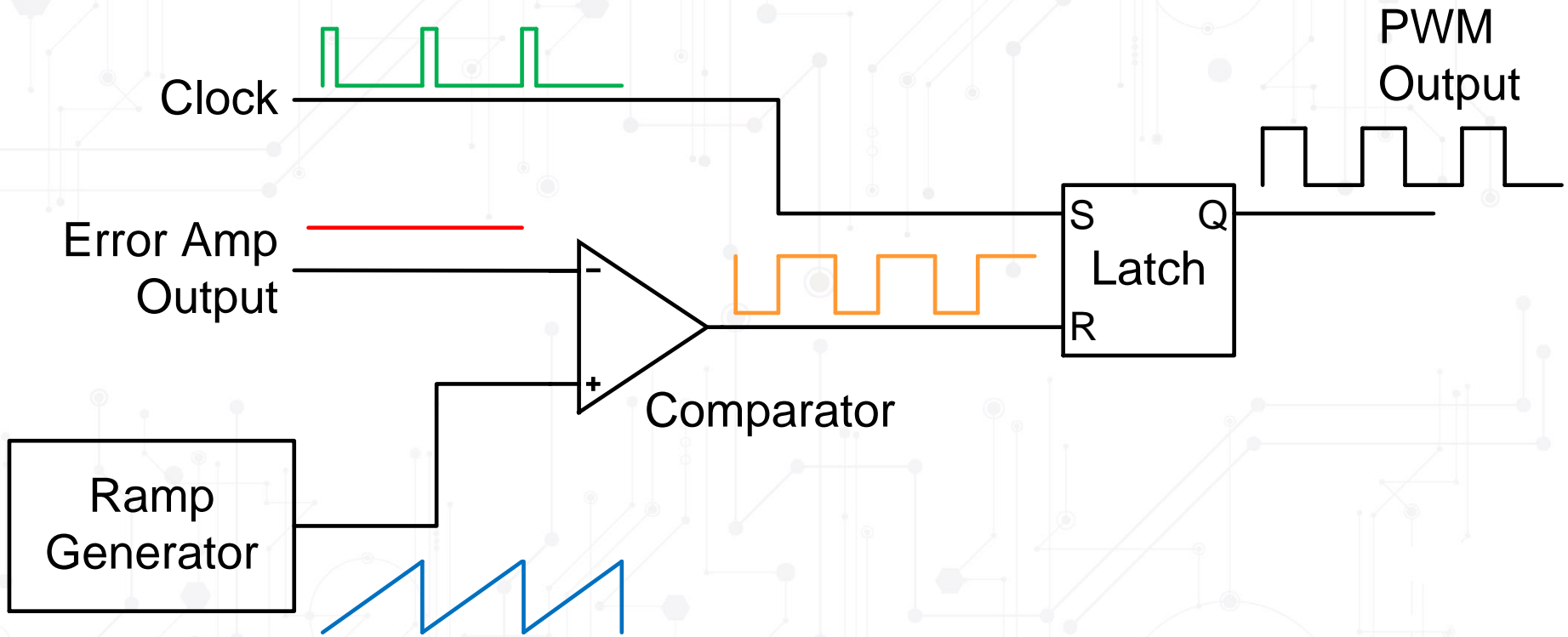
$$H_{EA}(s) = \frac{T(s)}{G_{PWM} \cdot G_{VD}(s)}$$

带反馈的降压转换器



现在我们需要计算调制器的
传递函数： $G_{PWM}(s)$

脉宽调制器





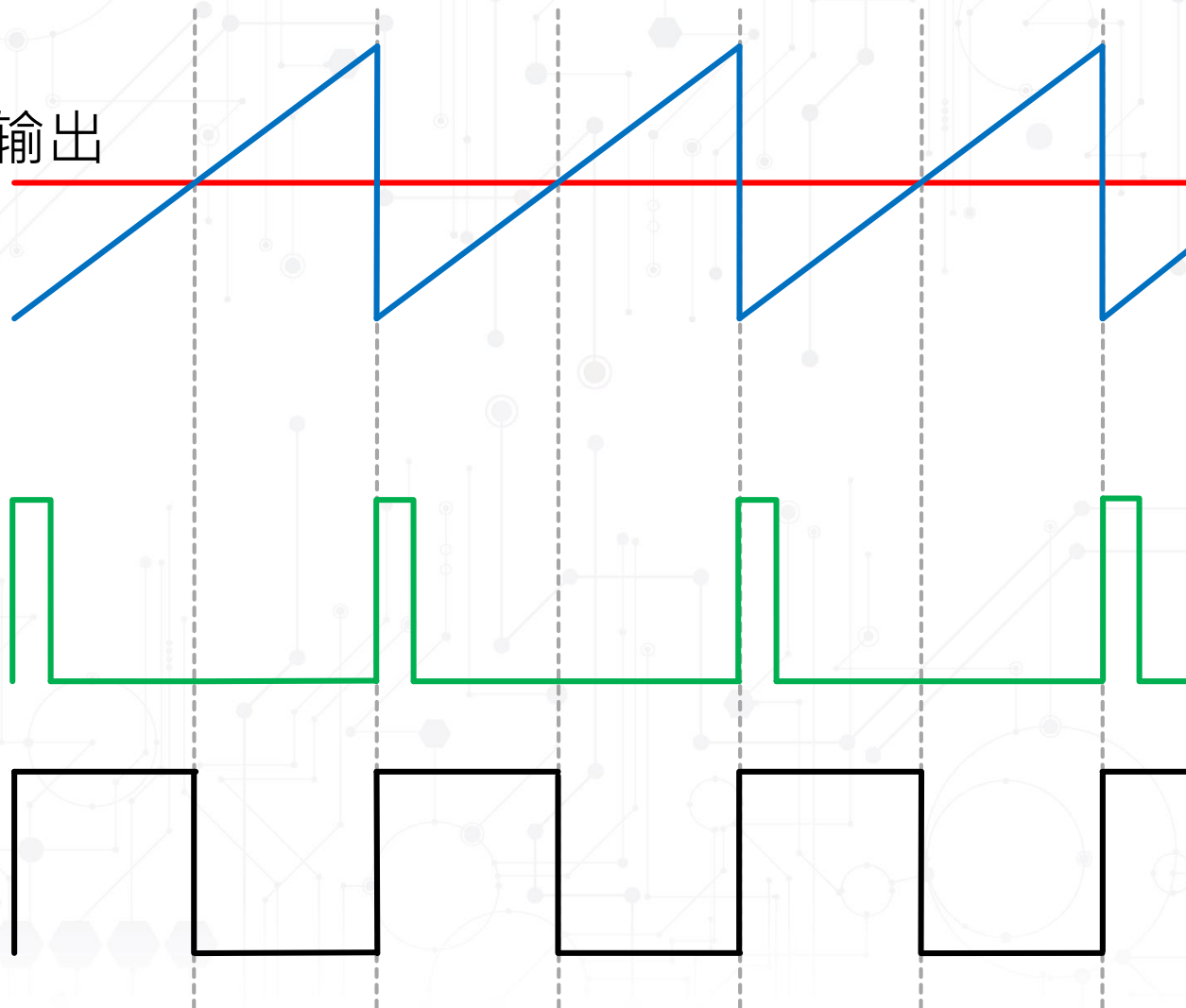
模拟脉宽调制器

误差放大器输出

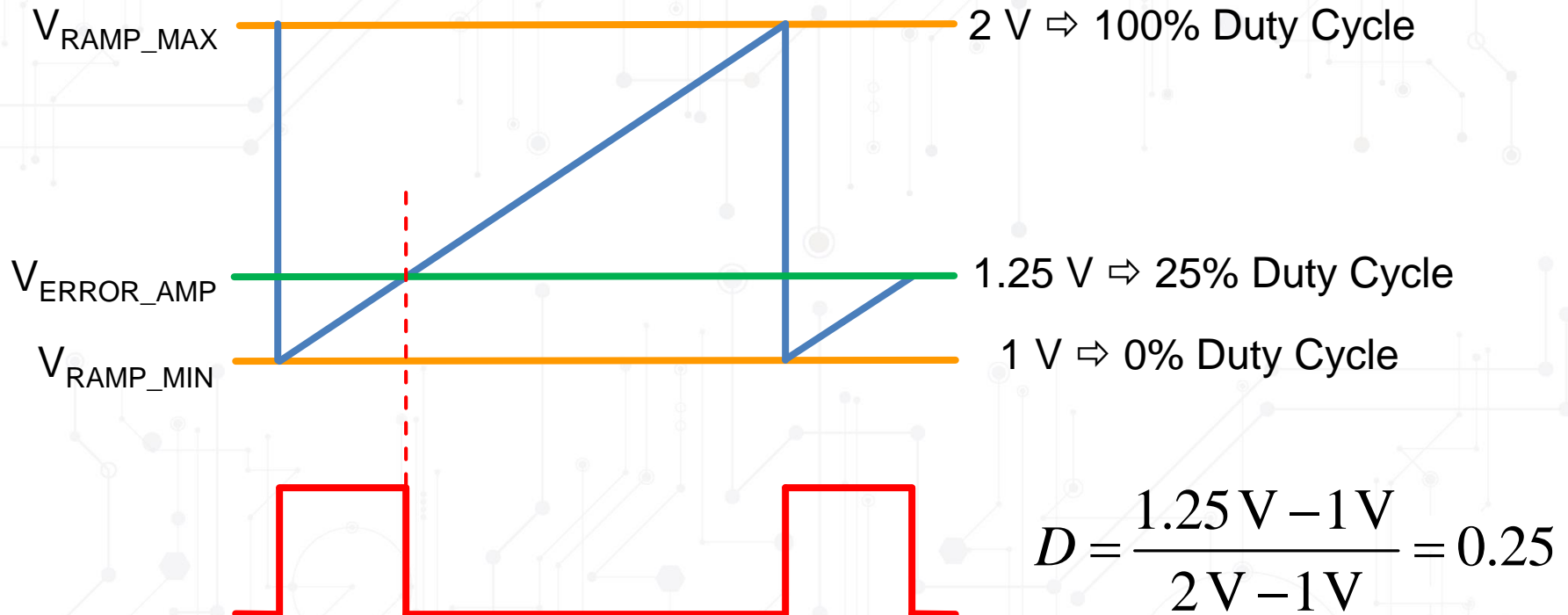
斜坡信号

时钟

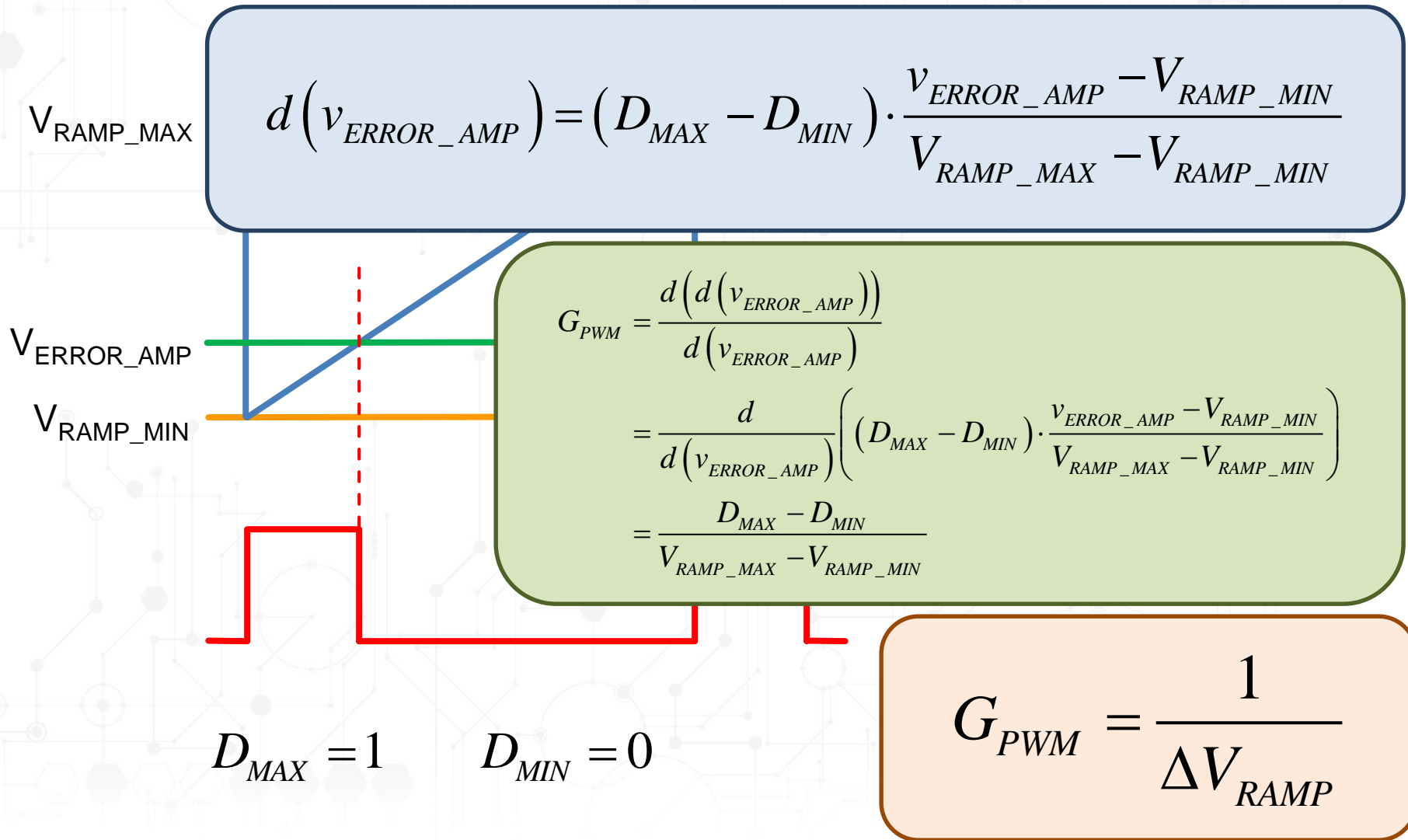
PWM
信号



脉宽调制器的小信号模型



脉宽调制器的小信号模型

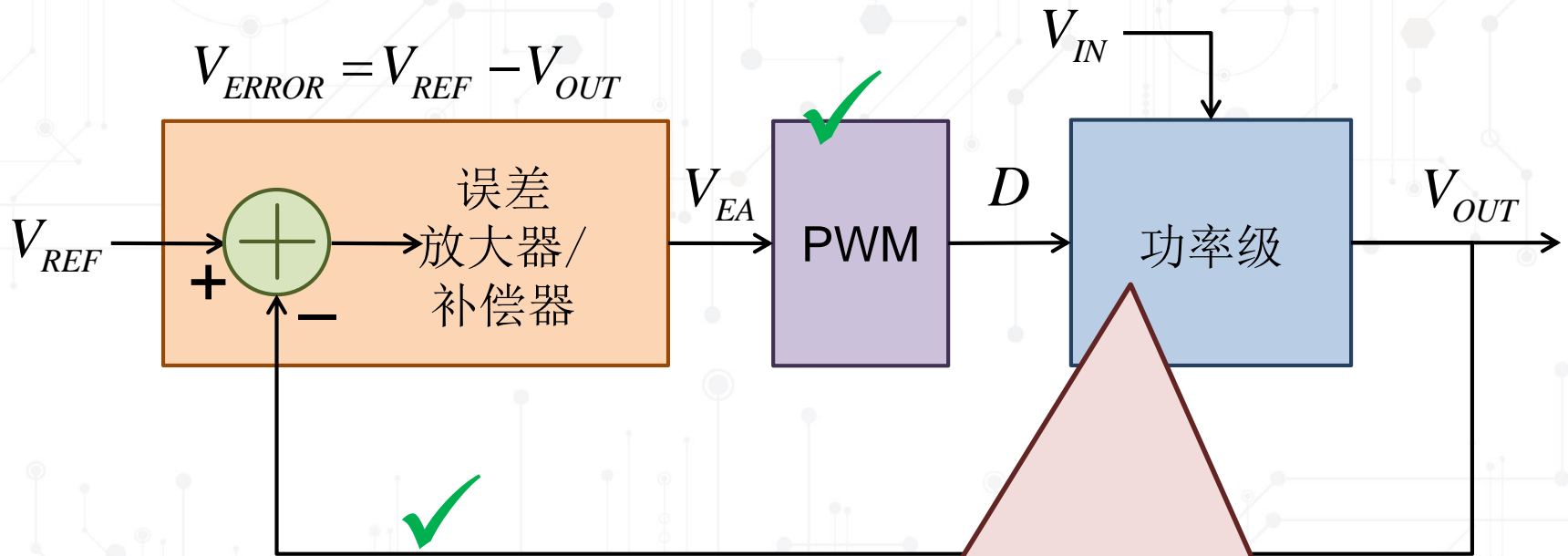




第三步:控制到输出的传递函数, $G_{VD}(s)$

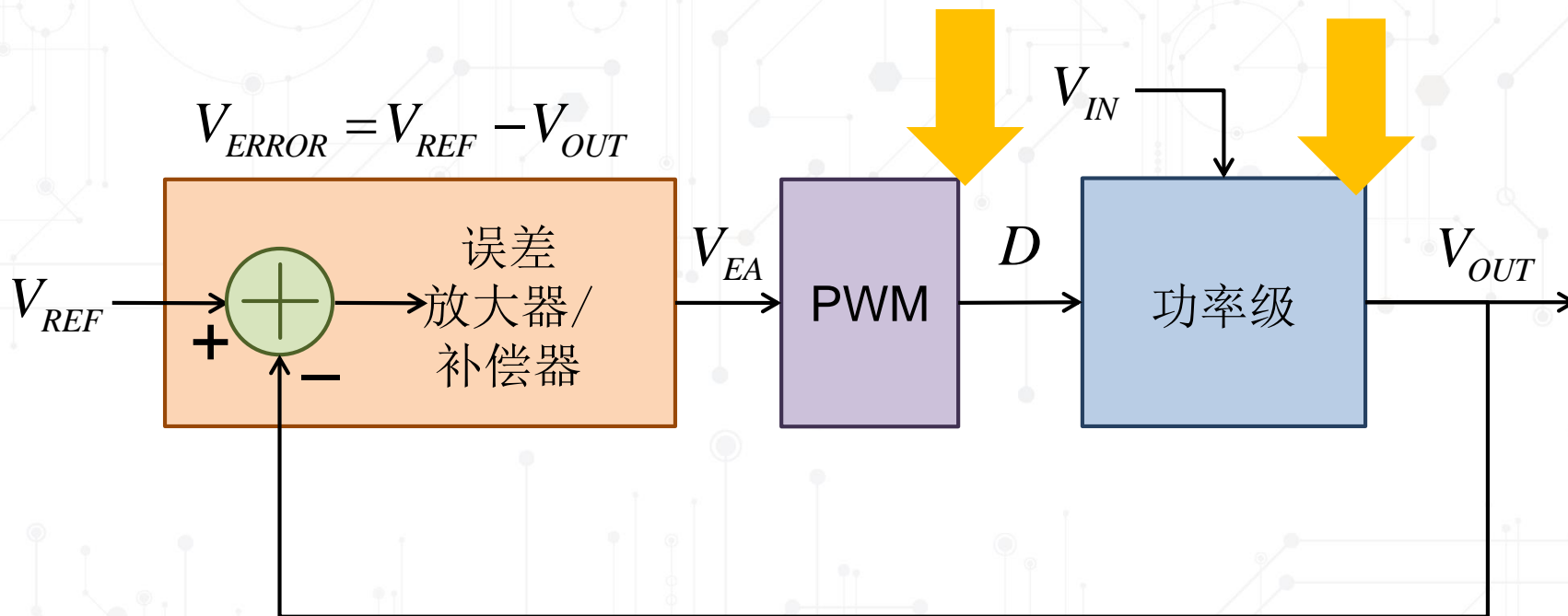
$$H_{EA}(s) = \frac{T(s)}{G_{PWM} \cdot G_{VD}(s)}$$

降压转换器 $G_{VD}(s)$



现在我们需要计算控制输出传递函数: $G_{VD}(s)$


降压转换器 $G_{VD}(s)$



- 控制输出传递函数的推导过程通常并不简单
 - 更多信息请参见其他资源

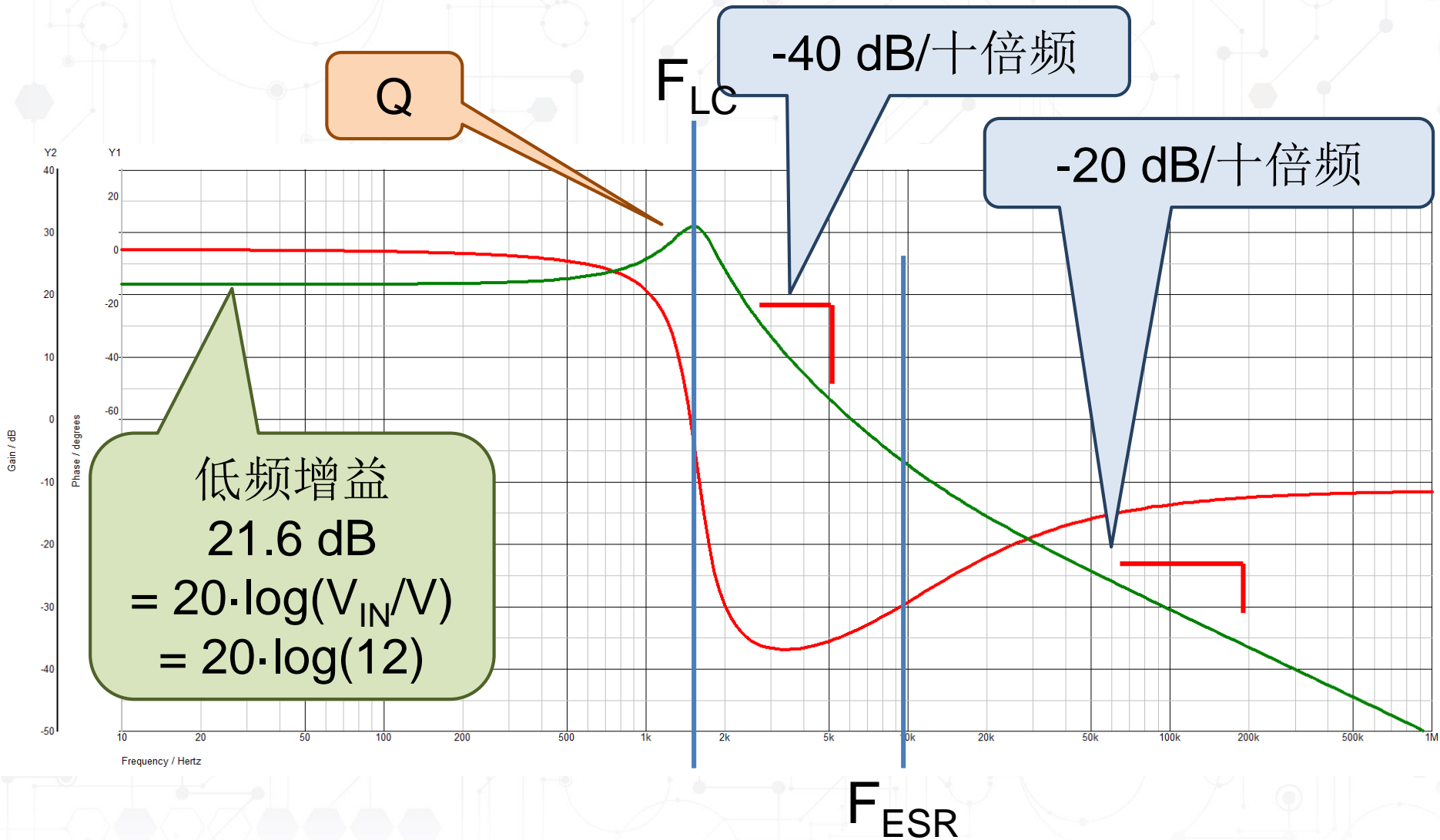


降压变换器 $G_{VD}(s)$


$$G_{VD}(s) = V_{IN} \cdot H_{LC}(s)$$



降压转换器 $G_{VD}(s)$

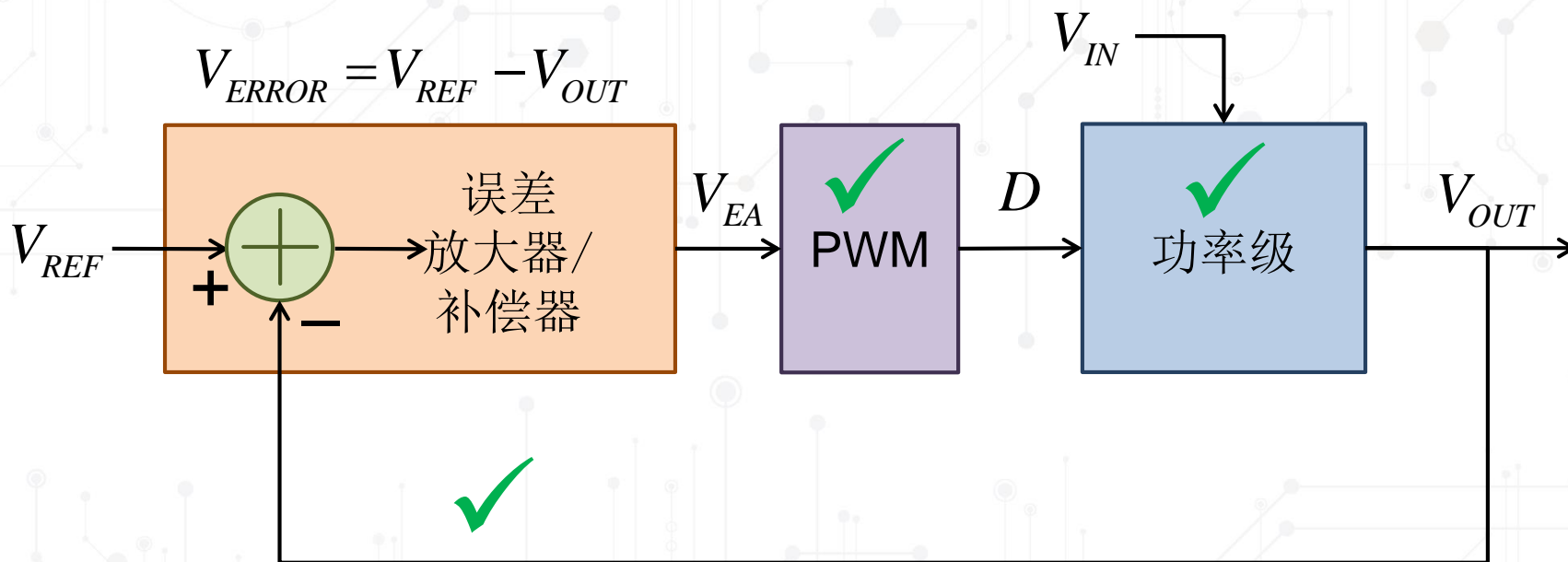




第4步：求解 误差放大器传递函数

$$H_{EA}(s) = \frac{T(s)}{G_{PWM} \cdot G_{VD}(s)}$$

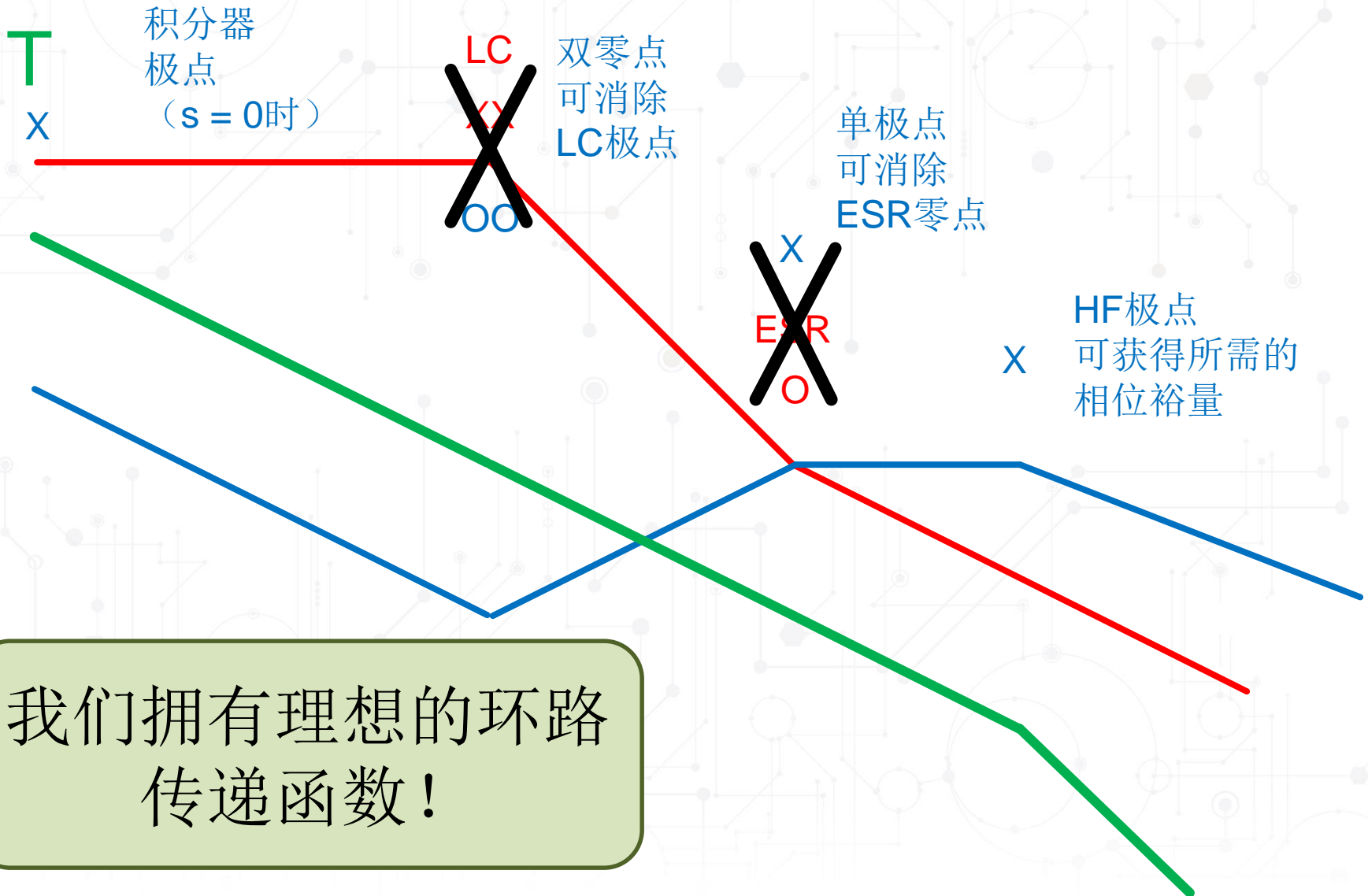
我们有所有需要的参数



现在我们可以求解
误差放大器传递函数



补偿器极点和零点



我们拥有理想的环路
传递函数！



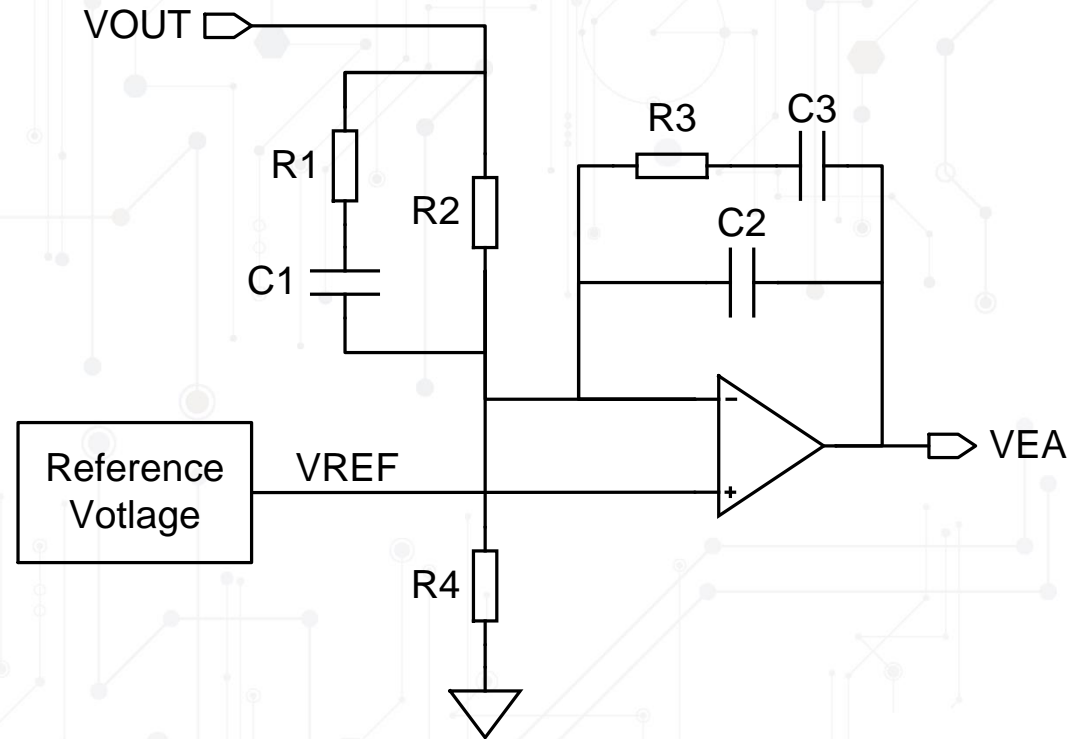
实际补偿器传递函数

$$H_{EA}(s) = \frac{\omega_{PC}}{s} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{Z1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{Z2}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)}$$

如何选择
极点和零点频率？

如何在电路中实现？

III型 补偿器



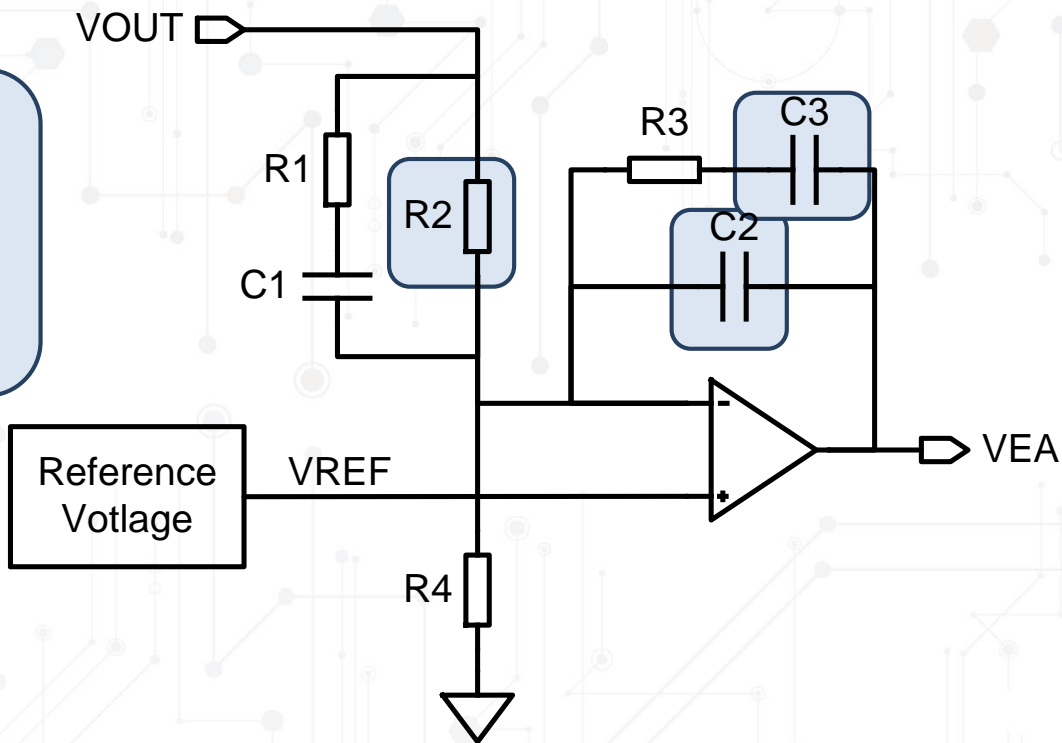
$$\begin{aligned}
 H_{EA}(s) &= \frac{v_{EA}(s)}{v_{OUT}(s)} \\
 &= \frac{1}{s \cdot R_2 \cdot (C_2 + C_3)} \cdot \frac{1 + s \cdot R_3 \cdot C_3}{1 + s \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{1 + s \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1}{1 + s \cdot R_3 \cdot \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3}}
 \end{aligned}$$



III型 补偿器

零极点

$$\omega_{P0} = \frac{1}{R_2 \cdot (C_2 + C_3)}$$



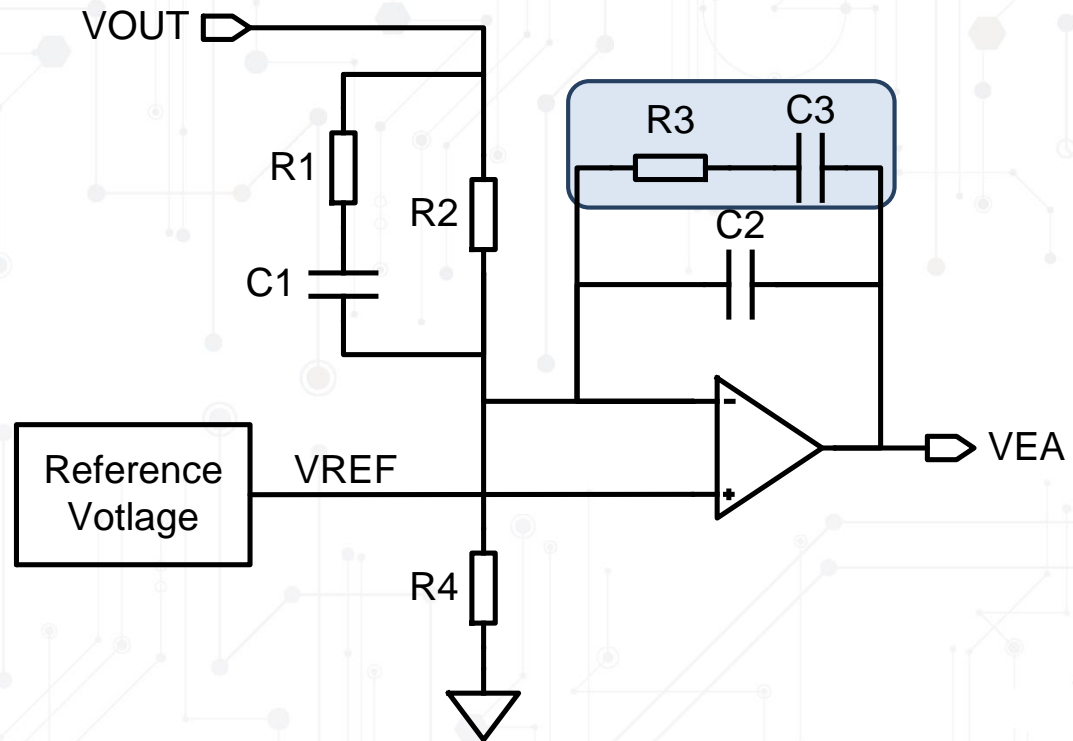
$$H_{EA}(s) = \frac{v_{EA}(s)}{v_{OUT}(s)}$$

$$= \frac{1}{s \cdot R_2 \cdot (C_2 + C_3)} \cdot \frac{1 + s \cdot R_3 \cdot C_3}{1 + s \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{1 + s \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1}{1 + s \cdot R_3 \cdot \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3}}$$

III型 补偿器

第一零点

$$\omega_{Z1} = \frac{1}{R_3 \cdot C_3}$$



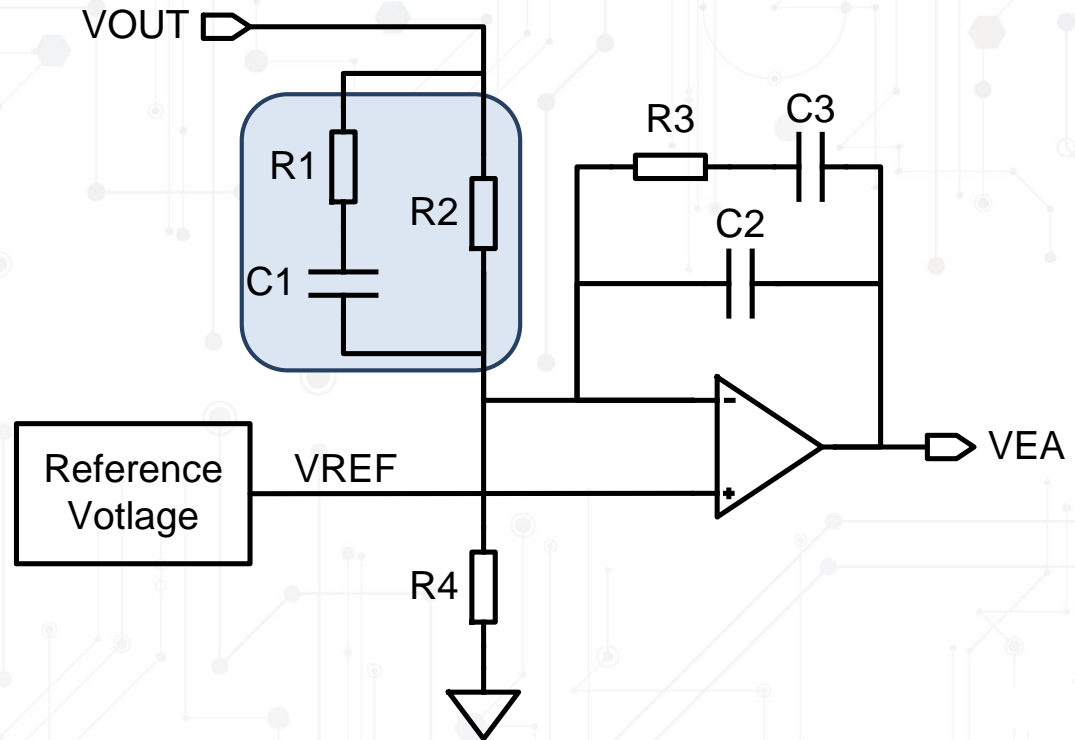
$$H_{EA}(s) = \frac{v_{EA}(s)}{v_{OUT}(s)}$$

$$= \frac{1}{s \cdot R_2 \cdot (C_2 + C_3)} \cdot \frac{1 + s \cdot R_3 \cdot C_3}{1 + s \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{1 + s \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1}{1 + s \cdot R_3 \cdot \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3}}$$

III型 补偿器

第二零点

$$\omega_{Z2} = \frac{1}{(R_1 + R_2) \cdot C_1}$$



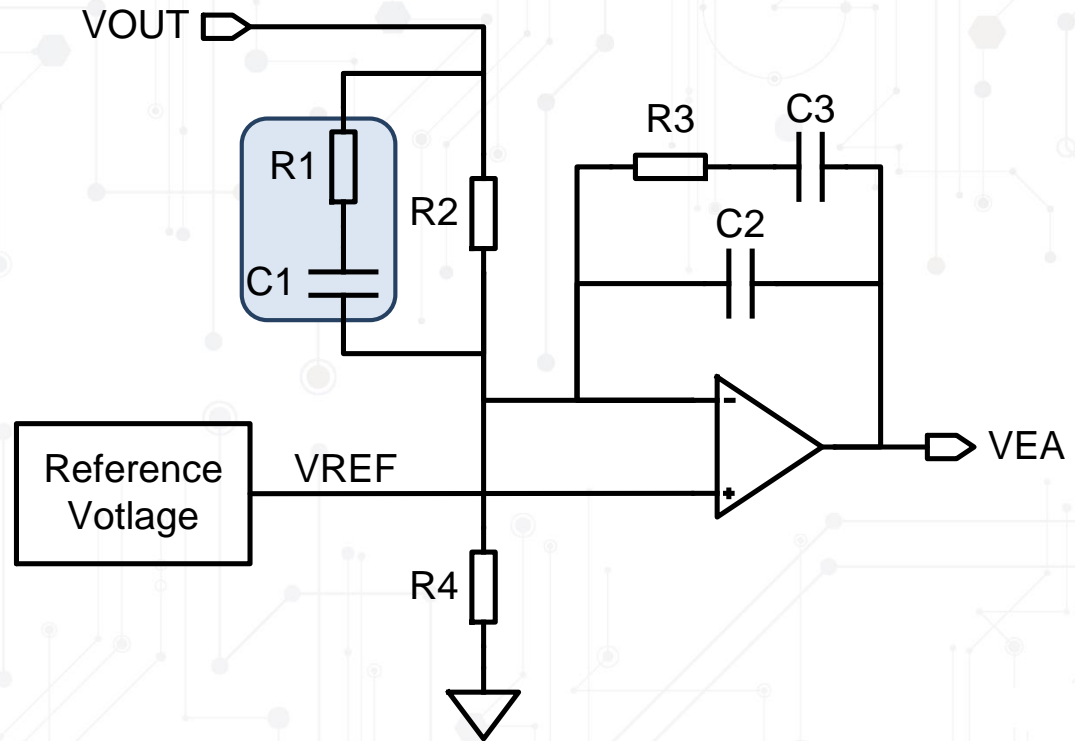
$$H_{EA}(s) = \frac{v_{EA}(s)}{v_{OUT}(s)}$$

$$= \frac{1}{s \cdot R_2 \cdot (C_2 + C_3)} \cdot \frac{1 + s \cdot R_3 \cdot C_3}{1 + s \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{1 + s \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1}{1 + s \cdot R_3 \cdot \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3}}$$

III型 补偿器

第二极点

$$\omega_{P1} = \frac{1}{R_1 \cdot C_1}$$



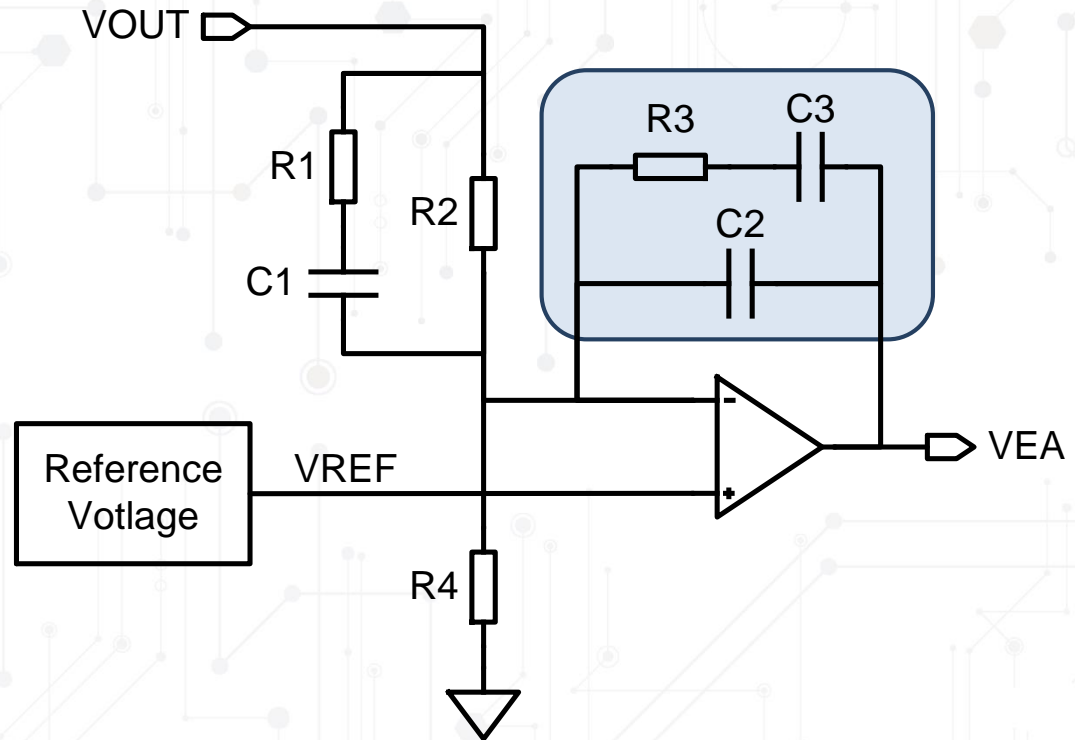
$$H_{EA}(s) = \frac{v_{EA}(s)}{v_{OUT}(s)}$$

$$= \frac{1}{s \cdot R_2 \cdot (C_2 + C_3)} \cdot \frac{1 + s \cdot R_3 \cdot C_3}{1 + s \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{1 + s \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1}{1 + s \cdot R_3 \cdot \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3}}$$

III型 补偿器

第三极点

$$\omega_{P2} = \frac{1}{R_3 \cdot \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3}}$$



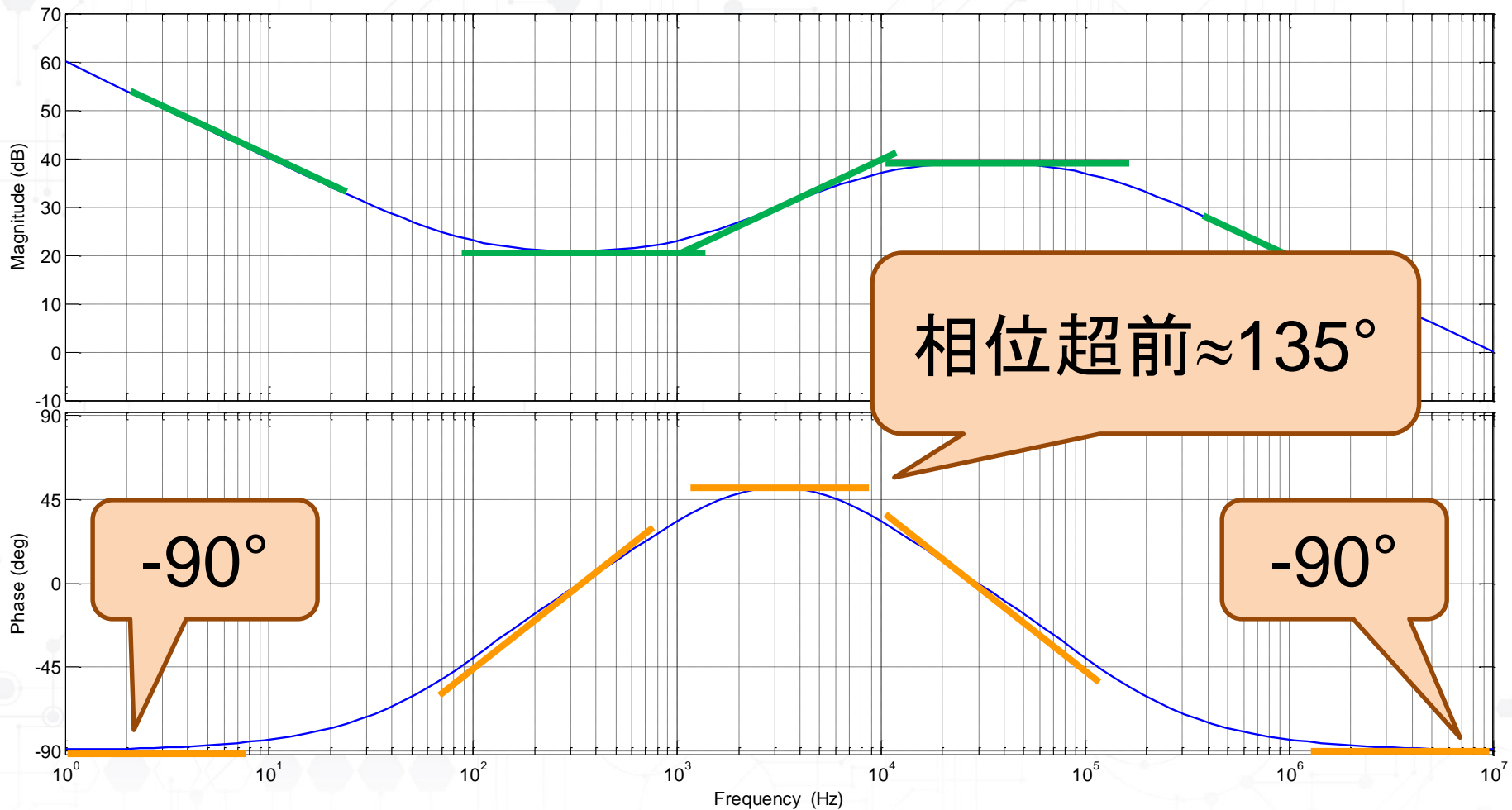
$$H_{EA}(s) = \frac{v_{EA}(s)}{v_{OUT}(s)}$$

$$= \frac{1}{s \cdot R_2 \cdot (C_2 + C_3)} \cdot \frac{1 + s \cdot R_3 \cdot C_3}{1 + s \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{1 + s \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1}{1 + s \cdot R_3 \cdot \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3}}$$



III 型伯德图

$$f_{P0} = 1000\text{Hz} \quad f_{Z1} = 100\text{Hz} \quad f_{Z2} = 1000\text{Hz} \quad f_{P1} = 10\text{kHz} \quad f_{P2} = 100\text{kHz}$$





选择补偿器的零极点

$$T(s) = K(s) \cdot H_{EA}(s) \cdot G_{PWM}(s) \cdot G_{VD}(s)$$

$$T(s) = \frac{\omega_0}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{HFP}}} = \left[\frac{\omega_{P0}}{s} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{Z1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{Z2}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)} \right] \cdot \frac{1}{V_{RAMP}} \cdot \left[V_{IN} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_{Z_ESR}}}{1 + \frac{1}{Q} \cdot \left(\frac{s}{\omega_{LC}}\right) + \left(\frac{s}{\omega_{LC}}\right)^2} \right]$$



选择补偿器的零极点

$$T(s) = K(s) \cdot H_{EA}(s) \cdot G_{PWM}(s) \cdot G_{VD}(s)$$

$$T(s) = \frac{\omega_0}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{HFP}}} = \frac{\omega_{P0}}{s} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{Z1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{Z2}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)} \cdot \frac{1}{V_{RAMP}} \cdot \left[V_{IN} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_{L_ESR}}}{1 + \frac{1}{Q} \cdot \frac{s}{\omega_{LC}} \cdot \left(\frac{s}{\omega_{LC}}\right)^2} \right]$$

DC Gain Term:

$$\omega_0 = \omega_{P0} \cdot \frac{V_{IN}}{V_{RAMP}} = \left(\frac{V_{RAMP} \cdot \omega_0}{V_{IN}} \right) \cdot \frac{V_{IN}}{V_{RAMP}}$$

环设计考虑因素

环

您必须进行一些
最差情形分析

大!

负载下GVD

会有变化

- 输出滤波器和补偿器的
元件容差不同
- 常用的倍频程
交越频率会有变化

您必须测量环路伯
德图



其他标准补偿器

- 标准运算放大器模拟补偿器
 - 需要多少相位提升？
 - I型：不需要相位提升
 - II型：相位提升高达 90°
 - III型：相位提升高达 180°
- **PID**（比例、积分、微分）

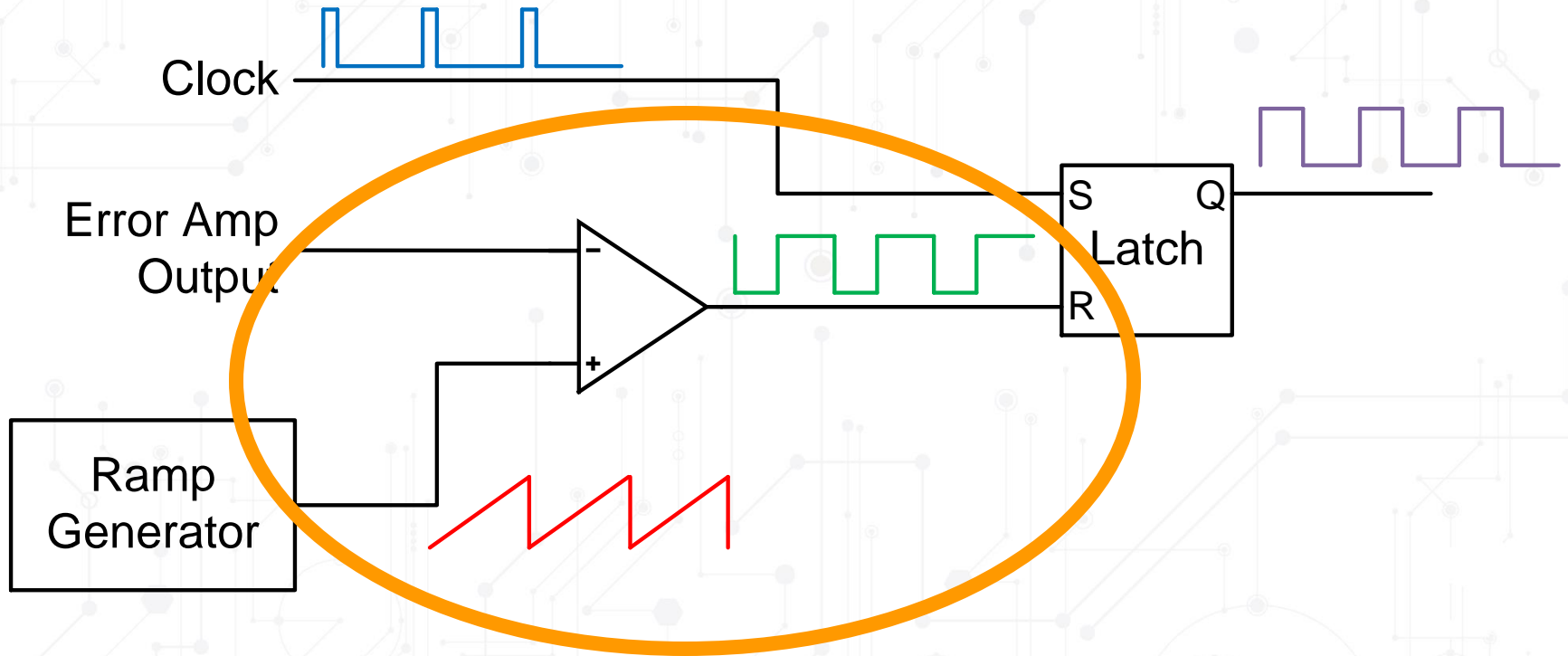


课程安排

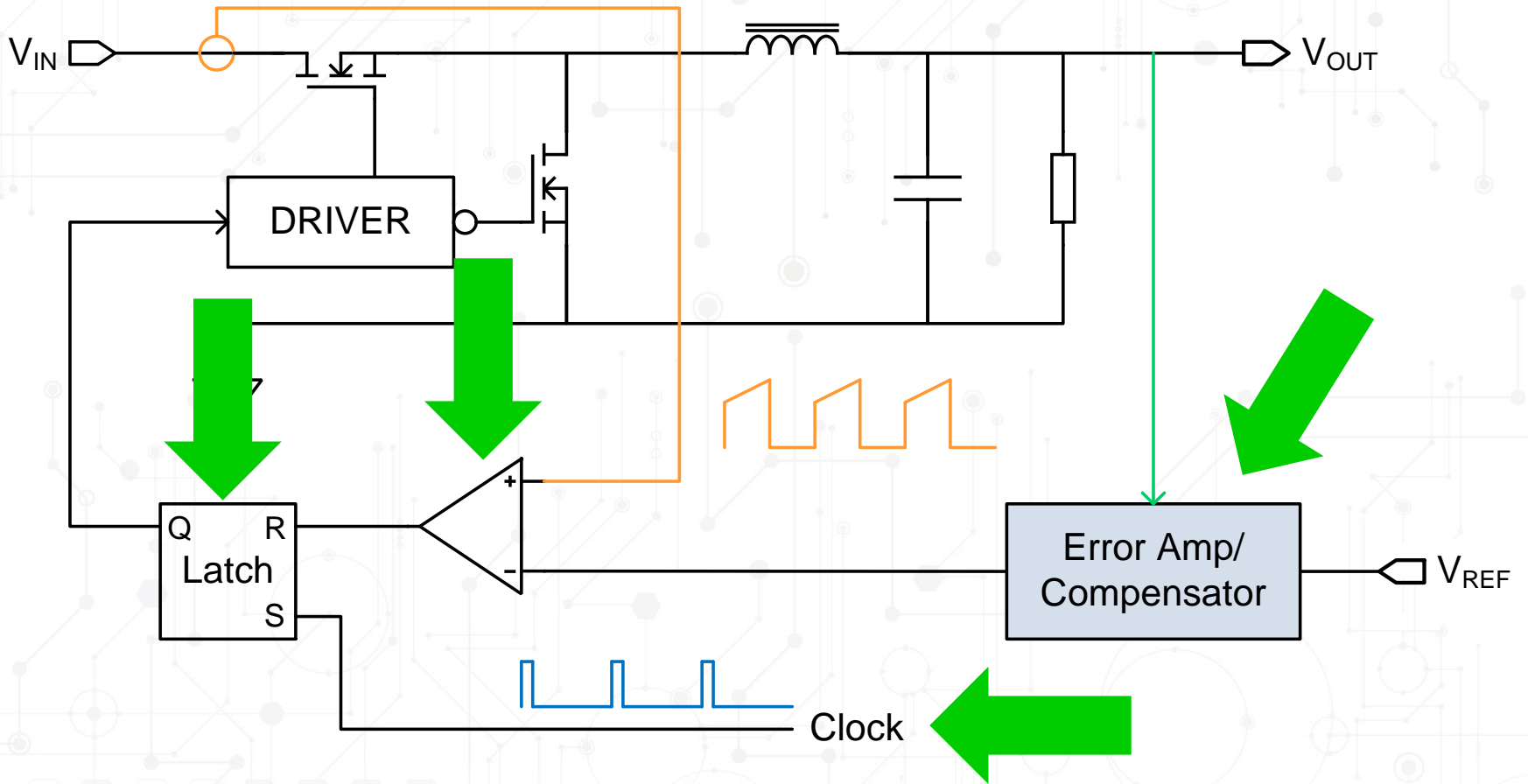
- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**



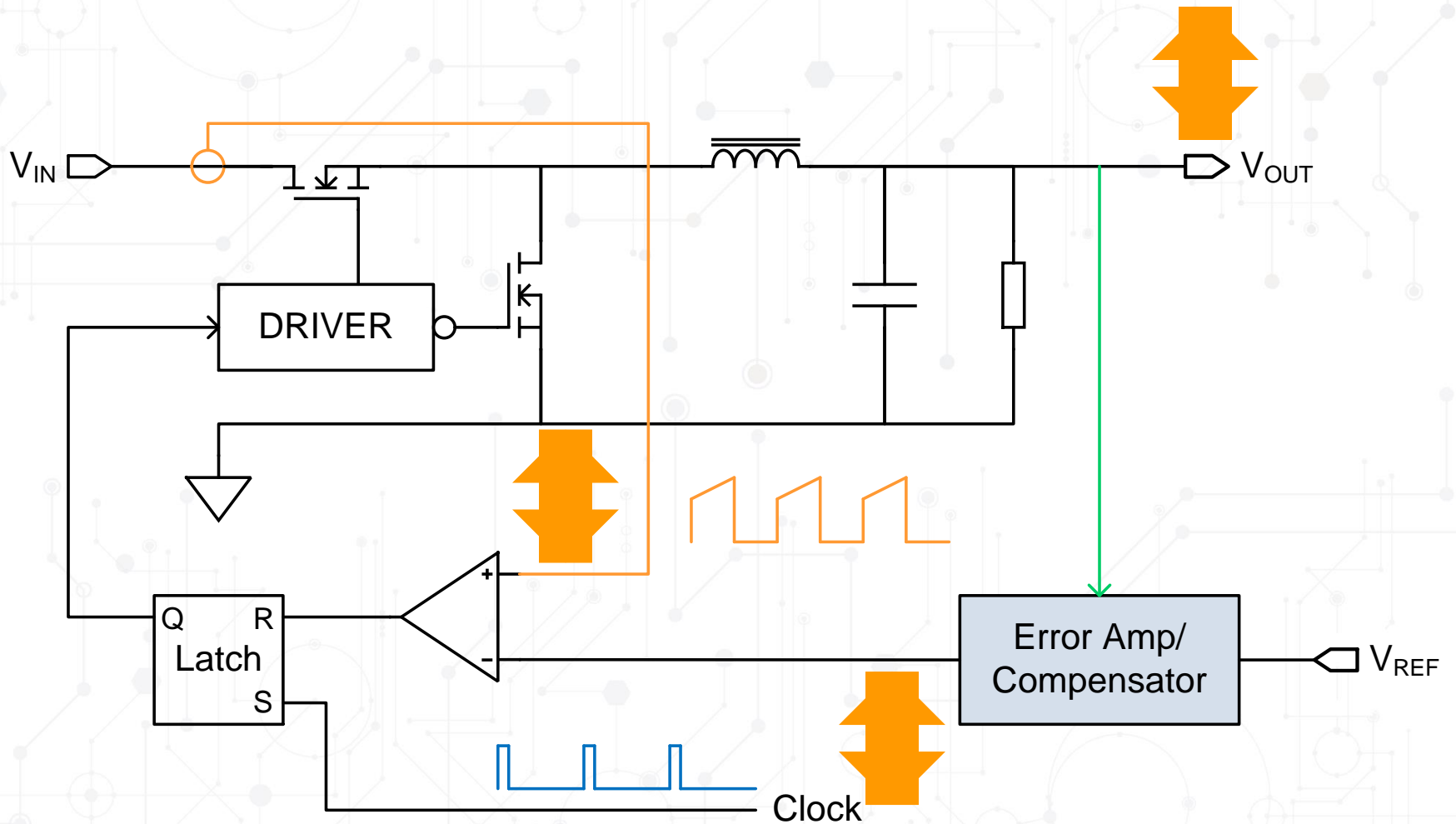
模拟脉宽调制器回顾



峰值电流模式控制



峰值电流模式控制



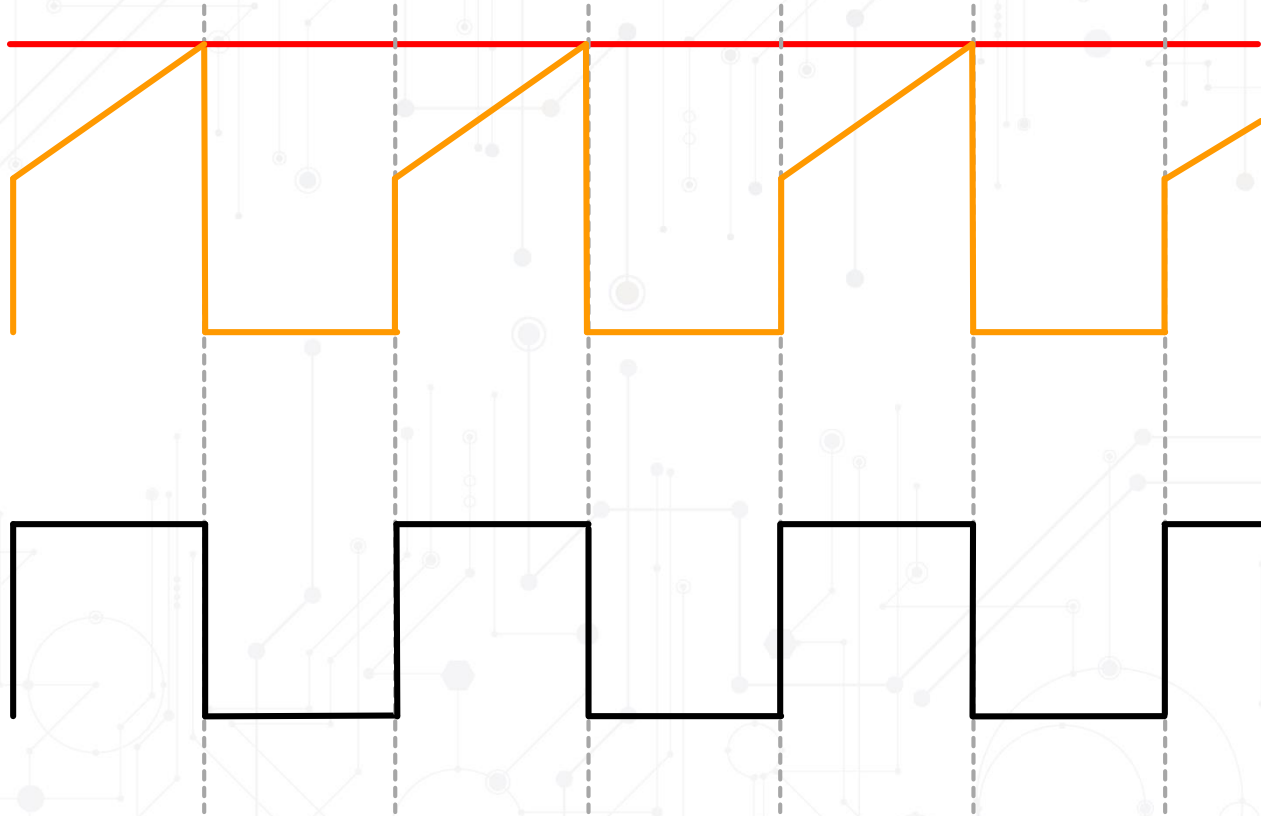


峰值电流控制模式

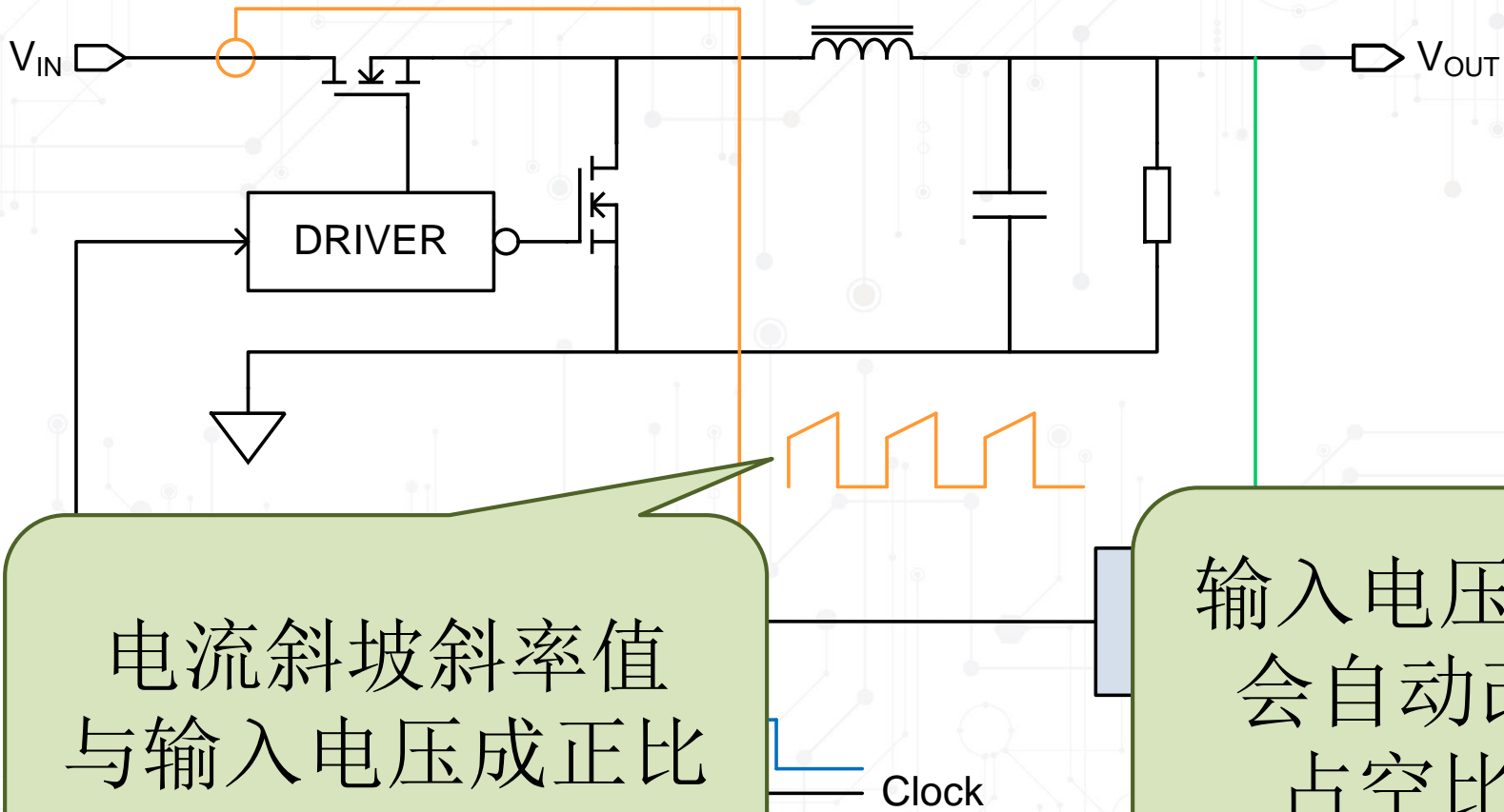
Error Amp
Output

Current
Sense
Signal

Gate
Drive
Signal



电流前馈



电流斜坡斜率值
与输入电压成正比

输入电压变化
会自动改变
占空比!



斜率补偿

时钟

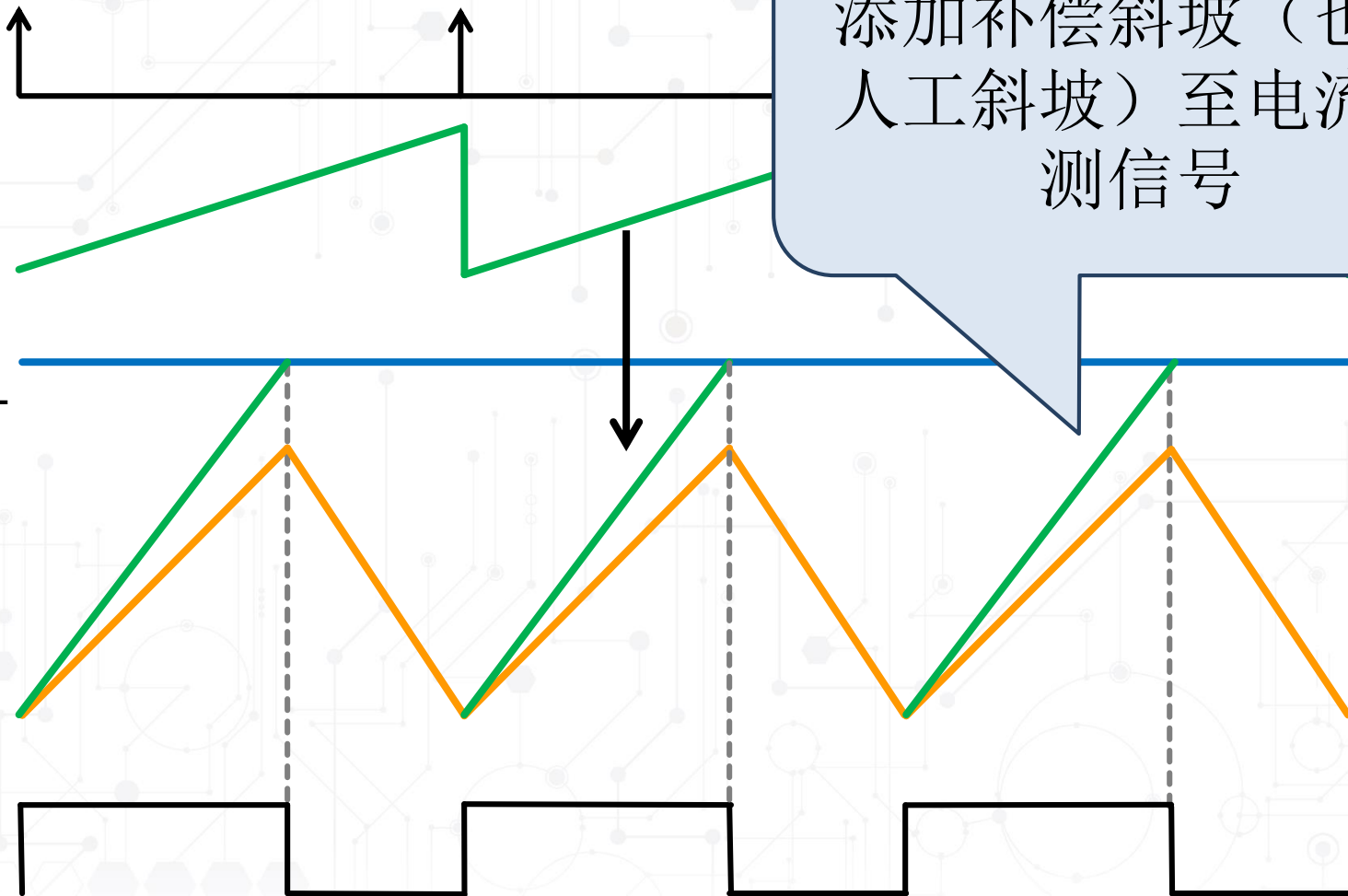
斜坡信号

V_{CTRL}

i_L

栅极驱动

添加补偿斜坡（也称人工斜坡）至电流检测信号





斜率补偿

有多种方法可以实现人工斜坡
有关实现斜坡的方法，请参见所选电
流模式控制IC的数据手册

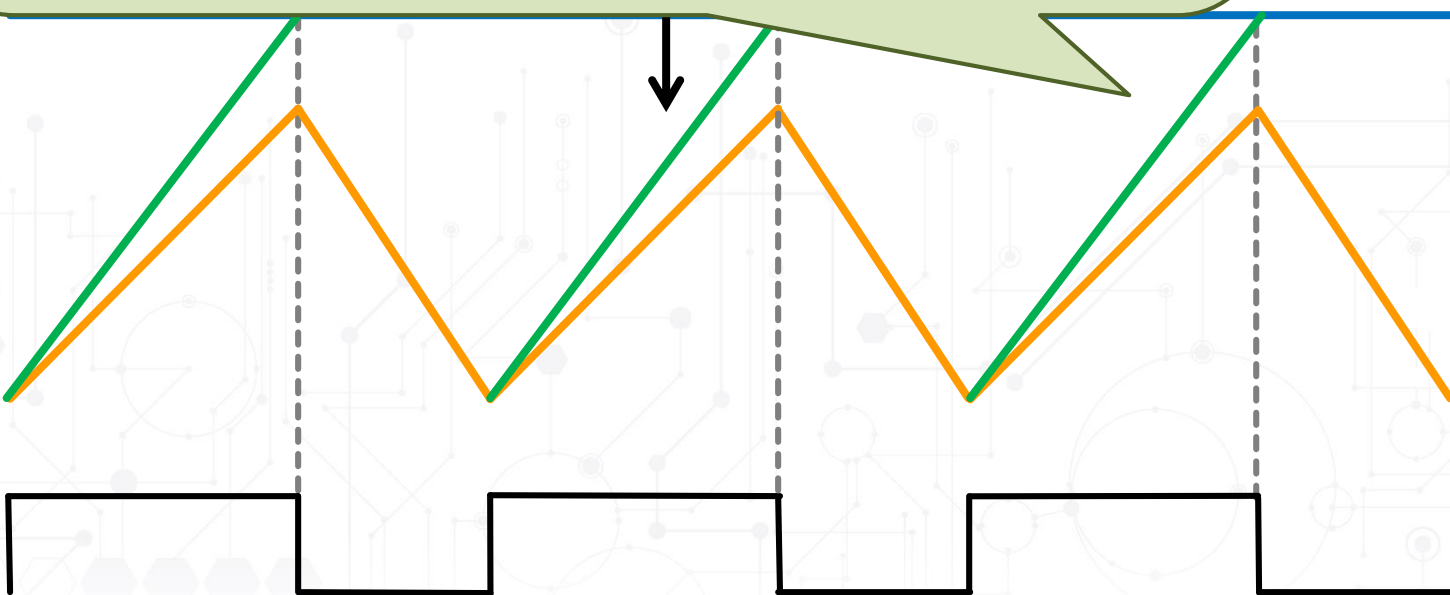
时钟

斜坡
信号

V_{CTRL}

i_L

栅极
驱动



为什么选择峰值电流模式控制？

优点

- 控制环更快
- 前馈
- 由于从回路中移除了电感，补偿器更简单
- 内置限流

这些优点通常起了决定性作用

缺点

- 必须检测电流
- 噪声敏感度
- “斜率补偿”
 - 必须向电流检测信号加入额外的斜坡信号，以避免次谐波振荡

这些是缺点！



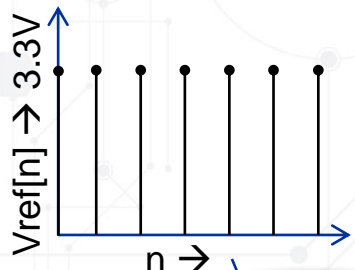
课程安排

- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

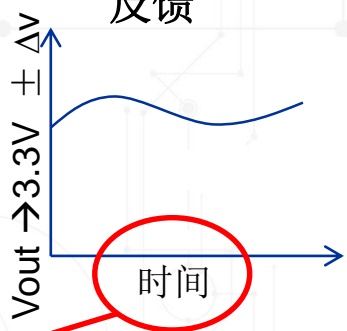
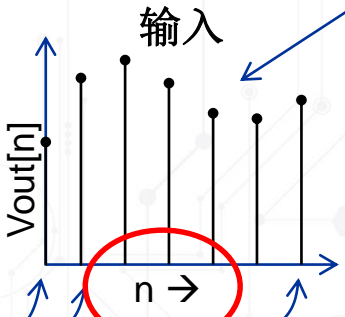
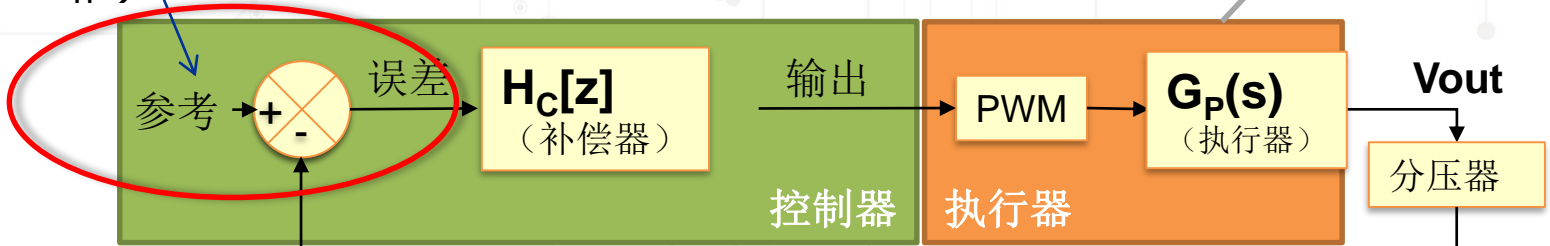


数字补偿器数据路径

参考



模拟执行器 +
PWM; 即功率级



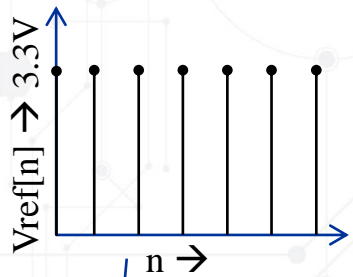
- $n = 0 \rightarrow V_{out}[0]$
- $n = 1 \rightarrow V_{out}[1]$
- ...
- $n = 6 \rightarrow V_{out}[6]$

重要提示:
x轴现在表示“采样次数” [n], 即一个采样区间

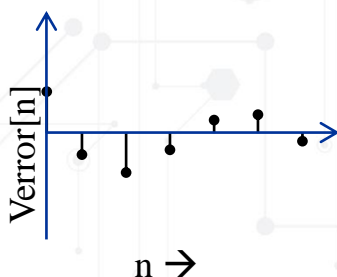


数字补偿器数据路径

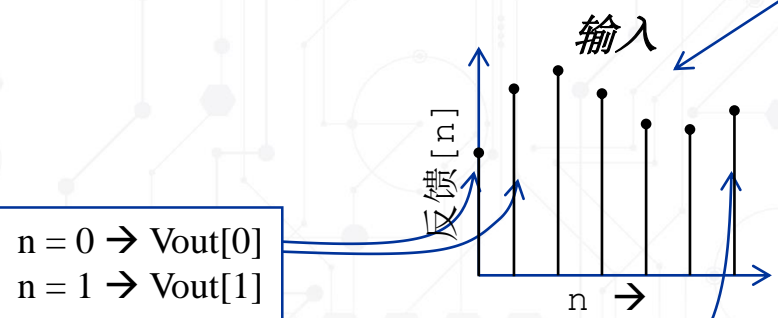
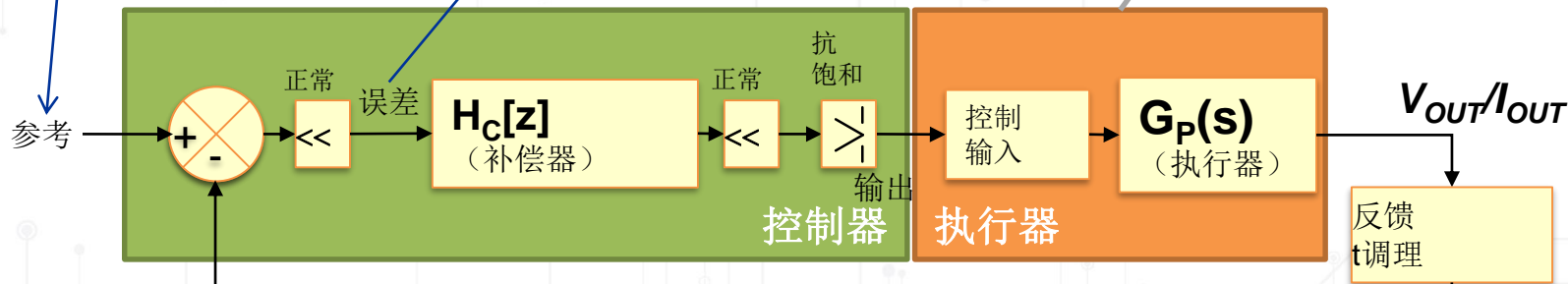
参考



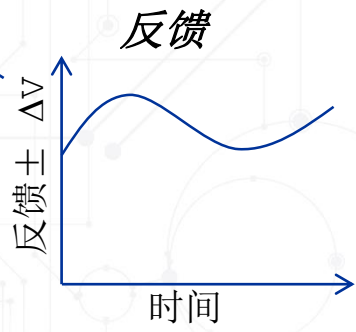
$V_{REF} - V_{FB}^*$



模拟执行器 +
PWM; 即功率级



- $n = 0 \rightarrow V_{out}[0]$
- $n = 1 \rightarrow V_{out}[1]$
- ...
- $n = 6 \rightarrow V_{out}[6]$





课程安排

- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

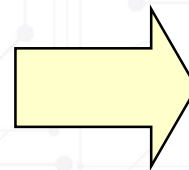
选择滤波器

- H. Dean Venable的II型和III型补偿滤波器提供全面、科学的方法来补偿开关电源
- 我们选择这些滤波器并 **不是** 因为我们懒
- 这些滤波器型号能够满足所有要求，可提供出色的灵活性，近**25**年来一直在业内得到广泛应用，尚无其他方法可与之媲美

积分器

超前-滞后补偿器

$$H_c(s) = \frac{\omega_{p0}}{s} \frac{\left(\frac{s}{\omega_{z1}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{z2}} + 1\right)}{\left(\frac{s}{\omega_{p2}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{p3}} + 1\right)}$$



$$y[n] = \dots?$$

数字补偿器 设计路径

首先，我们选择一个已知合适的原型滤波器传递函数

(III型超前-滞后补偿器)

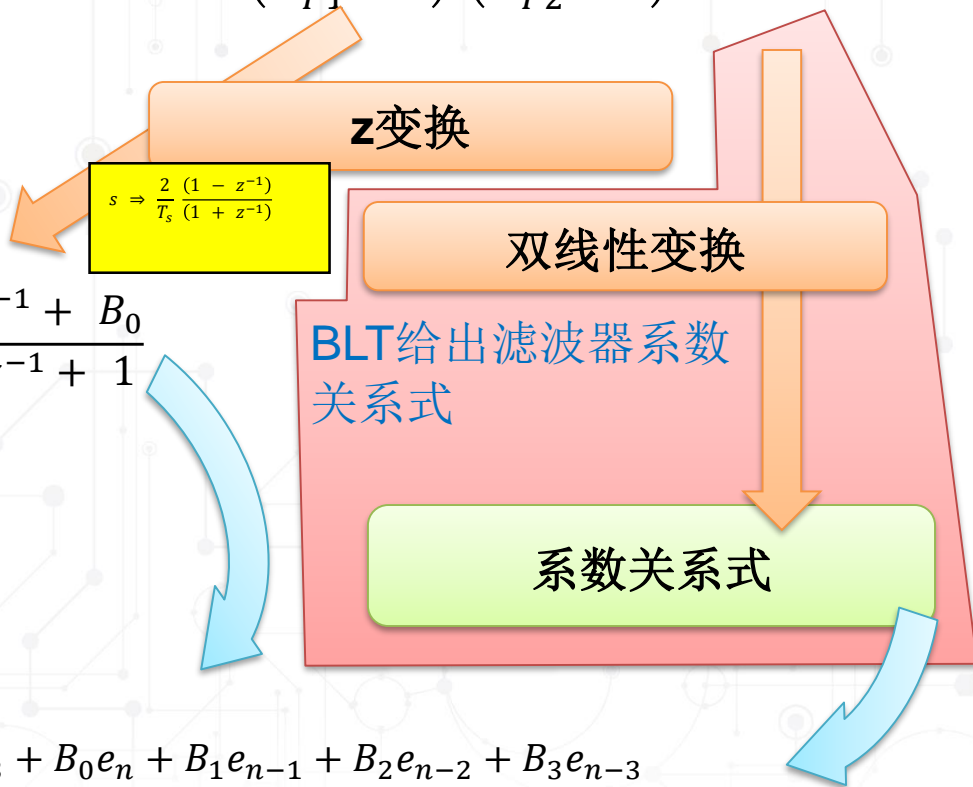
$$H_c(s) = \frac{\omega_{P0} \left(\frac{s}{\omega_{Z1}} + 1 \right) \left(\frac{s}{\omega_{Z2}} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{\omega_{P1}} + 1 \right) \left(\frac{s}{\omega_{P2}} + 1 \right)}$$

然后，将此原型滤波器的s域传递函数映射到z域

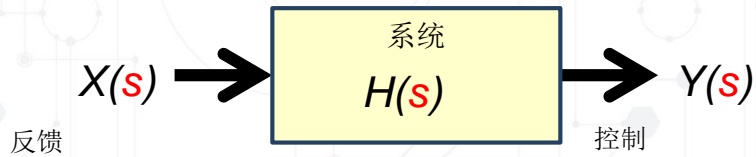
$$H_c[z] = \frac{y[z]}{x[z]} = \frac{B_3 z^{-3} + B_2 z^{-2} + B_1 z^{-1} + B_0}{-A_3 z^{-3} - A_2 z^{-2} - A_1 z^{-1} + 1}$$

然后沿着延时线对z域进行排序，
得到时域中的线性差分方程

$$u_n = A_1 u_{n-1} + A_2 u_{n-2} + A_3 u_{n-3} + B_0 e_n + B_1 e_{n-1} + B_2 e_{n-2} + B_3 e_{n-3}$$



双线性变换



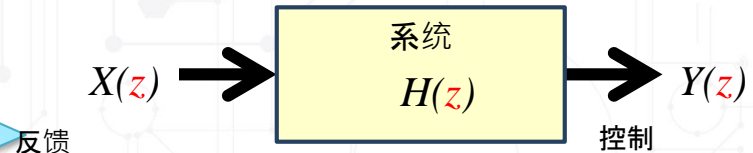
$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$
$$Y(s) = H(s) \times X(s)$$

我们需要做的就是用如下所示代替H(s)中的s运算符:

$$s \Rightarrow \frac{2}{T_s} \frac{(1 - z^{-1})}{(1 + z^{-1})}$$

其中 $T_s =$ 采样区间 $= 1/f_s$

- Tustin或Trapezoidal
- 它将s域的模拟传递函数转换为z域的等效数字传递函数
- 这是一个近似值 (!!!)
- 相对于采样频率, 交越频率越低, 近似度越高
- 出于保守设计考虑 $f_x \leq f_s / 10$



$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}$$
$$Y(z) = H(z) \times X(z)$$



设计3P3Z控制器

III型超前-滞后补偿器

$$H_c(s) = \frac{\omega_{P0} \left(\frac{s}{\omega_{Z1}} + 1 \right) \left(\frac{s}{\omega_{Z2}} + 1 \right)}{s \left(\frac{s}{\omega_{P1}} + 1 \right) \left(\frac{s}{\omega_{P2}} + 1 \right)}$$

利用 $s \Rightarrow \frac{2}{T_s} \frac{(1 - z^{-1})}{(1 + z^{-1})}$

我们得到：

$$H \left(\frac{2 \left(1 - \frac{1}{z} \right)}{T \left(\frac{1}{z} + 1 \right)} \right) = \frac{T \omega_{P0} \left(\frac{2 \left(1 - \frac{1}{z} \right)}{T \omega_{Z1} \left(\frac{1}{z} + 1 \right)} + 1 \right) \left(\frac{2 \left(1 - \frac{1}{z} \right)}{T \omega_{Z2} \left(\frac{1}{z} + 1 \right)} + 1 \right) \left(\frac{1}{z} + 1 \right)}{2 \left(\frac{2 \left(1 - \frac{1}{z} \right)}{T \omega_{P1} \left(\frac{1}{z} + 1 \right)} + 1 \right) \left(\frac{2 \left(1 - \frac{1}{z} \right)}{T \omega_{P2} \left(\frac{1}{z} + 1 \right)} + 1 \right) \left(1 - \frac{1}{z} \right)}$$

现在我们需要对此项进行因式分解，以得到所需的多项式



设计3P3Z控制器

.....开始计算时可能会有些混乱.....

$$\frac{2Twp0wp1wp2z^3}{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}wz1wz2z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{2Twp0wp1wp2z^2}wz1wz2z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{2Twp0wp1wp2z}wz1wz2z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{2Twp0wp1wp2}wz1wz2$$

$$- \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{2Twp0wp1wp2z^2}wz1wz2z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{2Twp0wp1wp2z}wz1wz2z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{2Twp0wp1wp2}wz1wz2z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{2Twp0wp1wp2}wz1wz2$$

$$+ \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{2Twp0wp1wp2}wz1wz2z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{2Twp0wp1wp2z}wz1wz2z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{2Twp0wp1wp2}wz1wz2z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{2Twp0wp1wp2}wz1wz2$$

$$+ \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{T^2wp0wp1wp2z^3}wz2z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{T^2wp0wp1wp2z^2}wz2z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{T^2wp0wp1wp2z}wz2z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{T^2wp0wp1wp2}wz2$$

$$+ \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{T^2wp0wp1wp2z}wz2z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{T^2wp0wp1wp2z^2}wz2z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{T^2wp0wp1wp2}wz2z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{T^2wp0wp1wp2}wz2$$

$$- \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{T^2wp0wp1wp2}wz2z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{T^2wp0wp1wp2z}wz2z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{T^2wp0wp1wp2z}wz2z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{T^2wp0wp1wp2}wz2$$

$$+ \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{T^2wp0wp1wp2z^3}wz1z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{T^2wp0wp1wp2z^2}wz1z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{T^2wp0wp1wp2z}wz1z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{T^2wp0wp1wp2}wz1$$

$$+ \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{T^2wp0wp1wp2z}wz1z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{T^2wp0wp1wp2z^2}wz1z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{T^2wp0wp1wp2z}wz1z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{T^2wp0wp1wp2}wz1$$

$$- \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{T^2wp0wp1wp2}wz1z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{T^2wp0wp1wp2z}wz1z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{T^2wp0wp1wp2z}wz1z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{T^2wp0wp1wp2}wz1$$

$$+ \frac{(T^2wp1 + 2T)wp2 + 2Twp1 + 4}{T^3wp0wp1wp2z^3}wz1z^3 + \frac{(T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 - 12}{3T^3wp0wp1wp2z^2}wz1z^2 + \frac{(-T^2wp1 - 2T)wp2 - 2Twp1 + 12}{3T^3wp0wp1wp2z}wz1z + \frac{(2T - T^2wp1)wp2 + 2Twp1 - 4}{3T^3wp0wp1wp2}wz1$$

$$+ \frac{2T^2wp1wp2z^3 + 4Twp2z^3 + 4Twp1z^3 + 8z^3 + 2T^2wp1wp2z^2 - 4Twp2z^2 - 4Twp1z^2 - 24z^2 - 2T^2wp1wp2z - 4Twp2z - 4Twp1z + 24z - 2T^2wp1wp2 + 4Twp2 + 4Twp1 - 8}{3T^3wp0wp1wp2z^2}$$

$$+ \frac{2T^2wp1wp2z^3 + 4Twp2z^3 + 4Twp1z^3 + 8z^3 + 2T^2wp1wp2z^2 - 4Twp2z^2 - 4Twp1z^2 - 24z^2 - 2T^2wp1wp2z - 4Twp2z - 4Twp1z + 24z - 2T^2wp1wp2 + 4Twp2 + 4Twp1 - 8}{3T^3wp0wp1wp2z}$$

$$+ \frac{2T^2wp1wp2z^3 + 4Twp2z^3 + 4Twp1z^3 + 8z^3 + 2T^2wp1wp2z^2 - 4Twp2z^2 - 4Twp1z^2 - 24z^2 - 2T^2wp1wp2z - 4Twp2z - 4Twp1z + 24z - 2T^2wp1wp2 + 4Twp2 + 4Twp1 - 8}{T^3wp0wp1wp2}$$

$$+ \frac{2T^2wp1wp2z^3 + 4Twp2z^3 + 4Twp1z^3 + 8z^3 + 2T^2wp1wp2z^2 - 4Twp2z^2 - 4Twp1z^2 - 24z^2 - 2T^2wp1wp2z - 4Twp2z - 4Twp1z + 24z - 2T^2wp1wp2 + 4Twp2 + 4Twp1 - 8}{T^3wp0wp1wp2}$$

幸运的是，Mathematica/WolframAlpha Online、Maple、Reduce、Maxima 等符号方程求解器可以帮助我们（!!!）



设计3P3Z控制器

现在我们得到了完全通用的补偿器方程，并且可使用常见的s域设计规则和技术对其进行设置！

$$H[z] = \frac{y[z]}{x[z]} = \frac{B_3 z^{-3} + B_2 z^{-2} + B_1 z^{-1} + B_0}{-A_3 z^{-3} - A_2 z^{-2} - A_1 z^{-1} + 1}$$

利用

$$A_1 = -\frac{(-12 + T_S^2 \omega_{P1} \omega_{P2} - 2T_S(\omega_{P1} + \omega_{P2}))}{(2 + T_S \omega_{P1})(2 + T_S \omega_{P2})}$$

$$A_2 = \frac{(-12 + T_S^2 \omega_{P1} \omega_{P2} + 2T_S(\omega_{P1} + \omega_{P2}))}{(2 + T_S \omega_{P1})(2 + T_S \omega_{P2})}$$

$$A_3 = \frac{(-2 + T_S \omega_{P1})(-2 + T_S \omega_{P2})}{(2 + T_S \omega_{P1})(2 + T_S \omega_{P2})}$$

$$B_0 = \frac{(T_S \omega_{P0} \omega_{P1} \omega_{P2} (2 + T_S \omega_{Z1})(2 + T_S \omega_{Z2}))}{(2\omega_{Z1} \omega_{Z2} (2 + T_S \omega_{P1})(2 + T_S \omega_{P2}))}$$

$$B_1 = \frac{(T_S \omega_{P0} \omega_{P1} \omega_{P2} (-4 + 3T_S^2 \omega_{Z1} \omega_{Z2} + 2T_S(\omega_{Z1} + \omega_{Z2})))}{(2\omega_{Z1} \omega_{Z2} (2 + T_S \omega_{P1})(2 + T_S \omega_{P2}))}$$

$$B_2 = \frac{(T_S \omega_{P0} \omega_{P1} \omega_{P2} (-4 + 3T_S^2 \omega_{Z1} \omega_{Z2} - 2T_S(\omega_{Z1} + \omega_{Z2})))}{(2\omega_{Z1} \omega_{Z2} (2 + T_S \omega_{P1})(2 + T_S \omega_{P2}))}$$

$$B_3 = \frac{(T_S \omega_{P0} \omega_{P1} \omega_{P2} (-2 + T_S \omega_{Z1})(-2 + T_S \omega_{Z2}))}{(2\omega_{Z1} \omega_{Z2} (2 + T_S \omega_{P1})(2 + T_S \omega_{P2}))}$$

在延时线使用z传递函数

$$\frac{y[z]}{x[z]} \neq \frac{B_3z^{-3} + B_2z^{-2} + B_1z^{-1} + B_0}{-A_3z^{-3} - A_2z^{-2} - A_1z^{-1} + 1}$$

$$x[z] \times (B_3z^{-3} + B_2z^{-2} + B_1z^{-1} + B_0) = y[z] \times (-A_3z^{-3} - A_2z^{-2} - A_1z^{-1} + 1)$$

$$(B_3x_{n-3} + B_2x_{n-2} + B_1x_{n-1} + B_0x_n) = (-A_3y_{n-3} - A_2y_{n-2} - A_1y_{n-1} + 1y_n)$$

这是下一个控制输出!

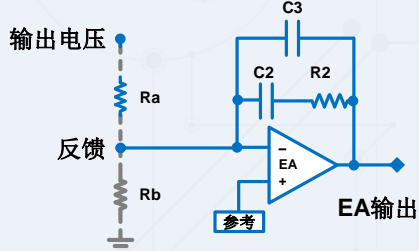
$$y_n = +A_3y_{n-3} + A_2y_{n-2} + A_1y_{n-1} + B_3x_{n-3} + B_2x_{n-2} + B_1x_{n-1} + B_0x_n$$

现在，此LDE可在DSP内核上实现高效运行



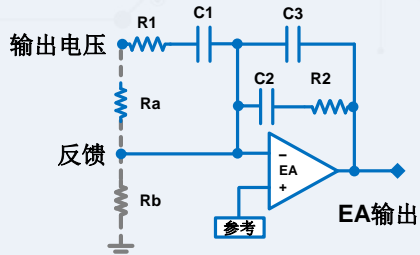
新的控制灵活性

II型



$$H_c(s) = \frac{\omega_{P0}}{s} \frac{\left(\frac{s}{\omega_{Z1}} + 1\right)}{\left(\frac{s}{\omega_{P1}} + 1\right)}$$

III型



$$H_c(s) = \frac{\omega_{P0}}{s} \frac{\left(\frac{s}{\omega_{Z1}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z2}} + 1\right)}{\left(\frac{s}{\omega_{P1}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P2}} + 1\right)}$$

IV型



$$H_c(s) = \frac{\omega_{P0}}{s} \frac{\left(\frac{s}{\omega_{Z1}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z2}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z3}} + 1\right)}{\left(\frac{s}{\omega_{P1}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P2}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P3}} + 1\right)}$$

XII型

$$H_c(s) = \frac{\omega_{P0}}{s} \frac{\left(\frac{s}{\omega_{Z1}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z2}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z3}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z4}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z5}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z6}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z7}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z8}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z9}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z10}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{Z11}} + 1\right)}{\left(\frac{s}{\omega_{P1}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P2}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P3}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P4}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P5}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P6}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P7}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P8}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P9}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P10}} + 1\right) \left(\frac{s}{\omega_{P11}} + 1\right)}$$

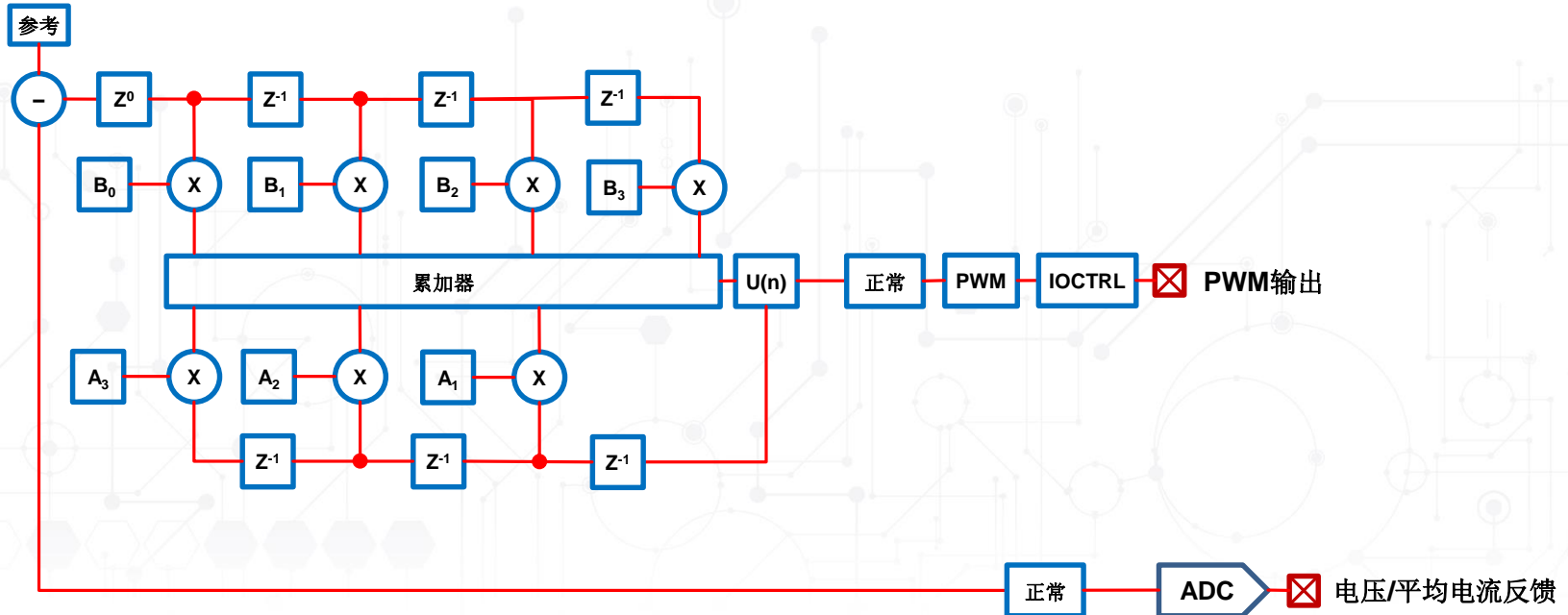


课程安排

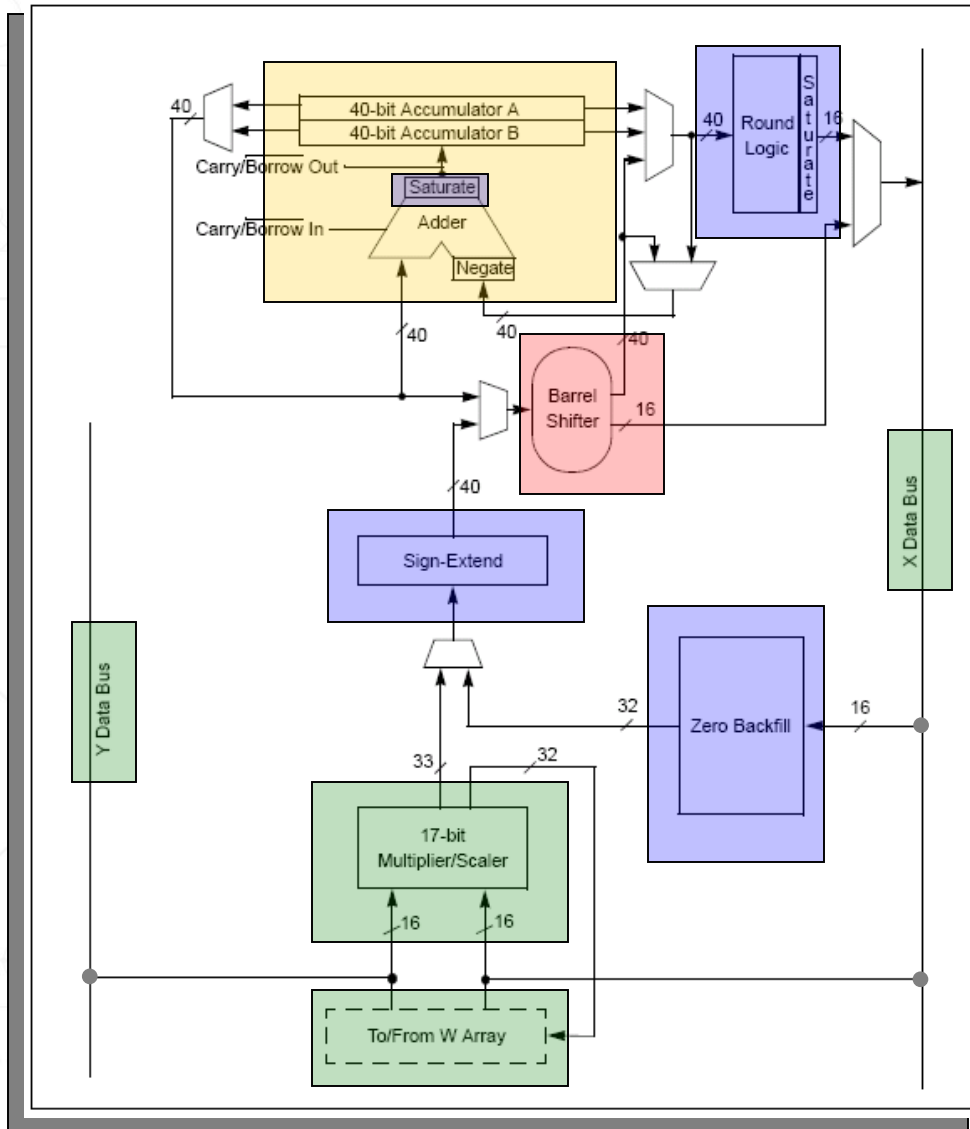
- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

III型数字控制器 — 基本实现 —

- 这是我们刚刚设计的常见且完全通用的3p3z补偿器的框图
- 其输出经归一化处理，可提供PWM占空比、相移、开关周期、参考电流和幅度调制因数等



dsPIC[®] DSP框图



加法器
⇒输出到累加器

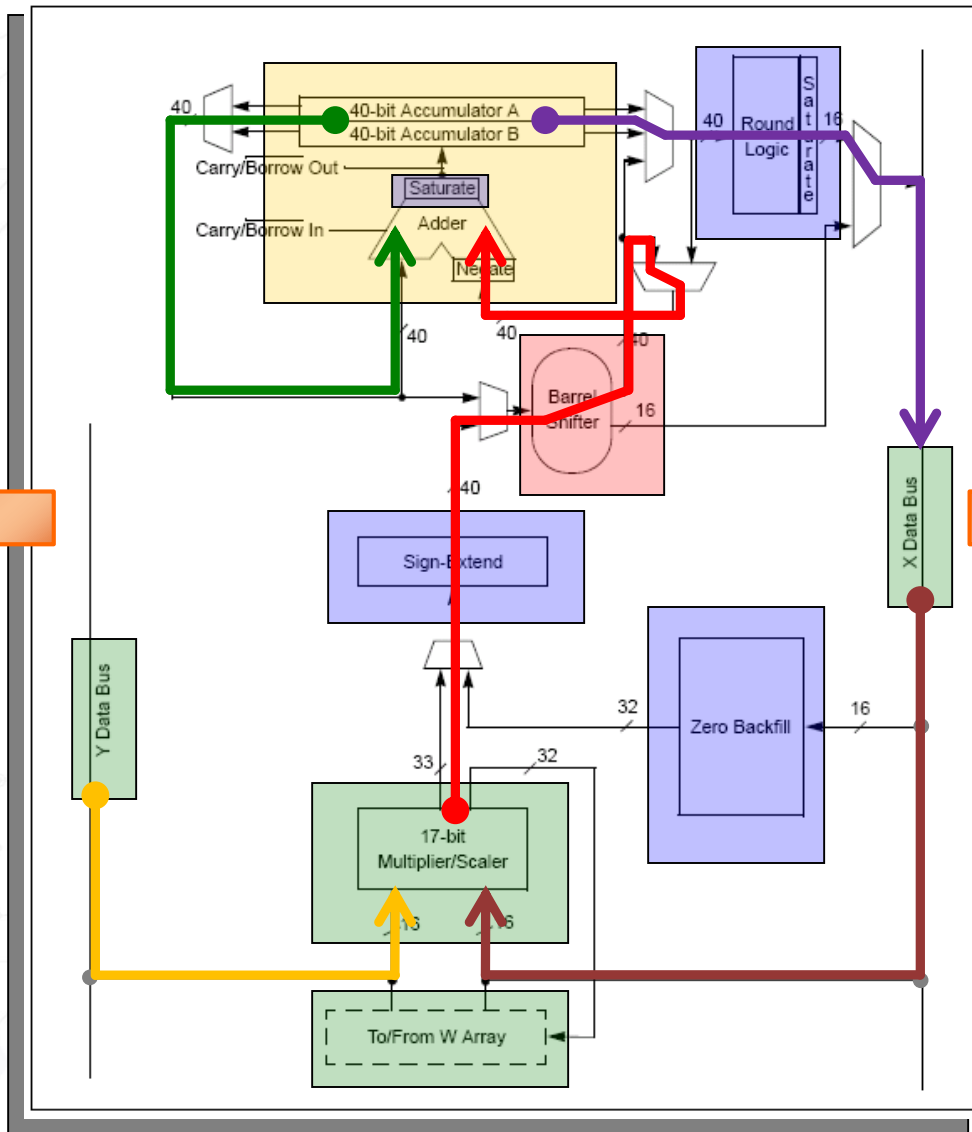
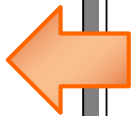
桶形移位器
⇒可单独使用
或作为数据路径的一部分

乘法器
⇒将来自X/Y数据总线或
WREG的两个值相乘

格式化逻辑
符号位控制
零回填
四舍五入逻辑
饱和

dsPIC[®] DSP框图

利用程序空间
 可视性指向专
 门的闪存地址
 范围
(PSV)



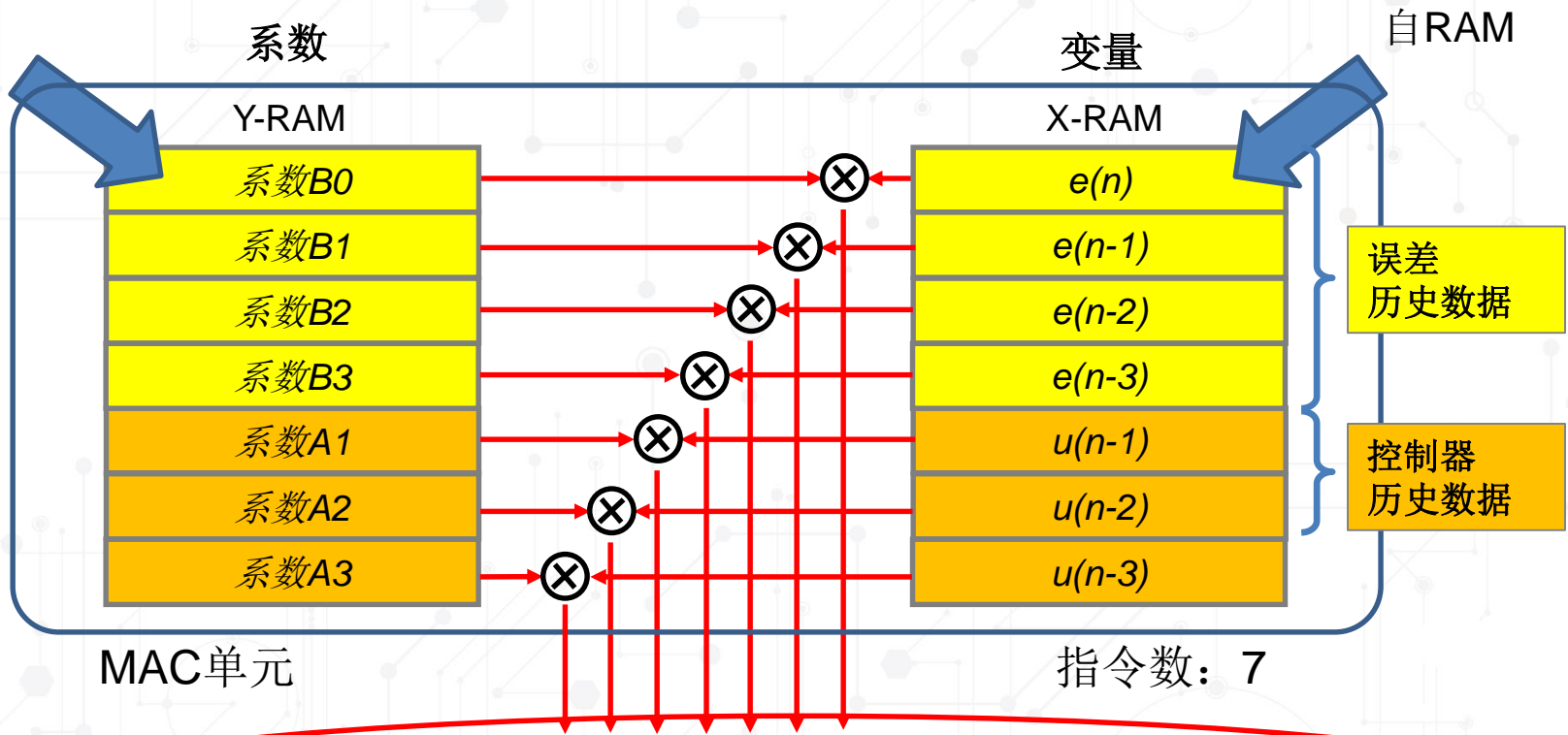
指向
RAM地址





数字控制环实现

自闪存或
RAM



$$u(n) = A1 u(n-1) + A2 u(n-2) + A3 u(n-3) + B0 e(n) + B1 e(n-1) + B2 e(n-2) + B3 e(n-3)$$

累加器

数字III型 (3p3z) 补偿器的线性差分方程



课程安排

- **开关电源转换器的基本原理**
 - 开关模式转换器框图
 - 电能存储
 - 开关模式转换器的原理
 - 降压转换器
 - 部分其他拓扑
- **开关电源转换器控制的基本原理**
 - 反馈特性回顾
 - 设计控制器
 - 电流模式控制概述
- **设计数字补偿器**
 - 误差放大器
 - 数字补偿器设计
 - 控制环集成
- **总结**

总结

- 开关转换器的工作原理
- 基本开关转换器拓扑
- 反馈控制基础知识和误差放大器/补偿器设计
- 通过推导z域传递函数来创建和应用稳定的离散时域控制环，提供了一种安全快速的迁移路径



法律声明

软件:

Microchip软件仅允许用于Microchip产品。此外，Microchip软件的使用受软件附带的版权声明、免责声明以及任何授权许可条款的限制，无论这些内容是在安装各个程序时阐明还是在头文件或文本文件中公告。

尽管有上述限制，但Microchip和第三方提供的软件的某些组件仍可能被“开源”软件许可覆盖，其中包括要求分发者提供软件源代码的许可。在开源软件许可要求的范围内，许可条款将起主导作用。

注意事项和免责声明:

这些材料和随附信息（例如，包括任何软件以及对第三方公司和第三方网站的引用）仅供参考，并且按“现状”提供。Microchip对第三方公司做出的声明或第三方可能提供的材料或信息不承担任何责任。

MICROCHIP不承担任何形式的保证，无论是明示的、暗示的或法定的，包括有关无侵权性、适销性和特定用途的暗示保证。在任何情况下，对于与MICROCHIP或其他第三方提供的材料或随附信息有关的任何直接或间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销，MICROCHIP不承担任何责任，即使MICROCHIP已被告知可能发生损害或损害可以预见。请注意，使用此处所述的知识产权时可能需要第三方许可。

商标:

Microchip的名称和徽标组合、Microchip徽标、Adapttec、AnyRate、AVR、AVR徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、chipKIT、chipKIT徽标、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi徽标、MOST、MOST徽标、MPLAB、OptoLyzzer、PackeTime、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TempTrackr、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron及XMEGA均为Microchip Technology Inc.在美国和其他国家或地区的注册商标。

APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、FlashTec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、PrecisionEdge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、Vite、WinPath和ZL均为Microchip Technology Inc.在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、EtherGREEN、In Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、KleerNet、KleerNet徽标、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、SAM-ICE、Serial Quad I/O、SMART-I.S.、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、ViewSpan、WiperLock、Wireless DNA和ZENA均为Microchip Technology Inc.在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP为Microchip Technology Inc.在美国的服务标记。

Adapttec徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology和Symmcom为Microchip Technology Inc.在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC为Microchip Technology Inc.的子公司Microchip Technology Germany II GmbH & Co. & KG在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2019, Microchip Technology Inc.版权所有。