

数字PWM控制器中的 几个关键技术问题

杨旭

西安交通大学



DianYuan.com

目录

- 数字与模拟PWM控制的差别
- 延时问题
- 量化精度与字长
- 数字PWM控制器的实现
- 总结

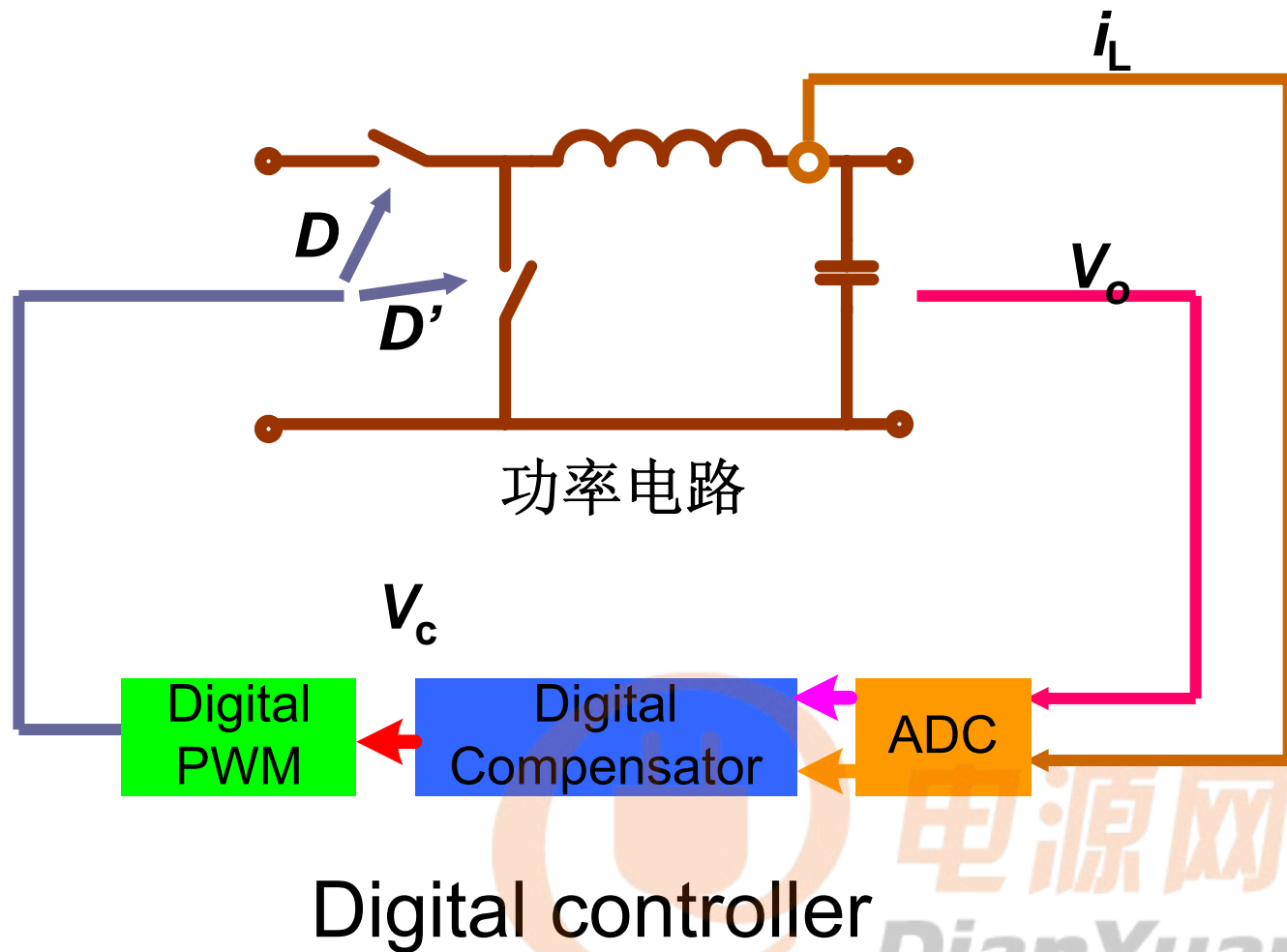


数字与模拟PWM控制的差别



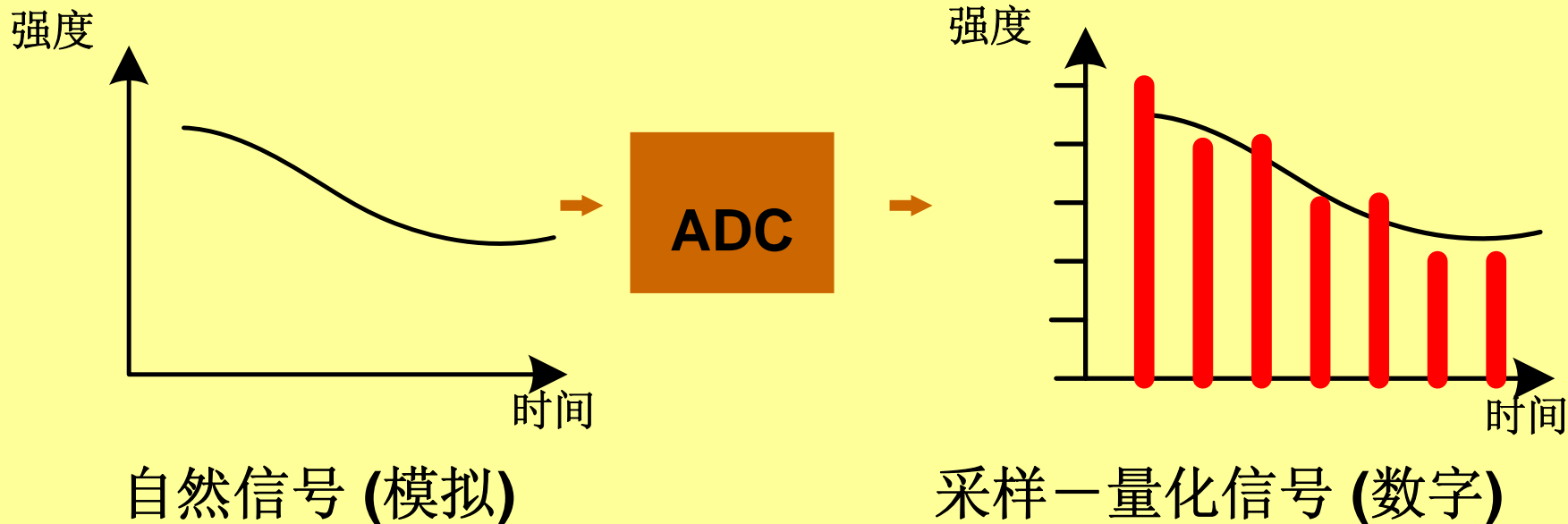
电源网
DianYuan.com

模拟与数字PWM控制变换器的比较



- 数字控制的主要差异： 利用采样和量化的信号进行控制。

模拟信号与数字信号的比较



- 模拟信号是连续时间、连续幅度信号。
- 数字信号是离散时间、离散幅度的信号。
- 数字化导致原信号中信息的大量丢失。
- 量化精度和采样率决定了数字信号的质量。



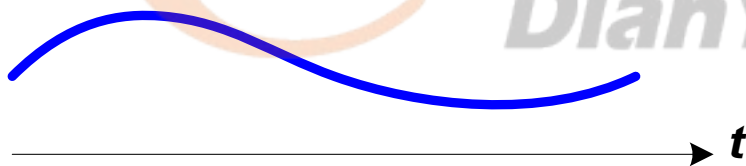
44.1k 16-bit



8k 8-bit

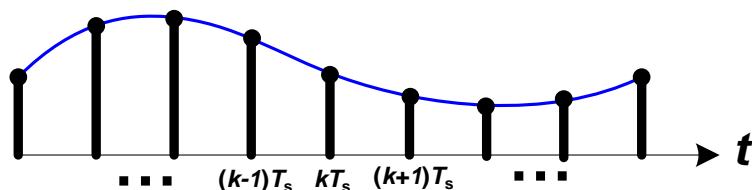
采样

连续信号



$x(t)$

采样信号

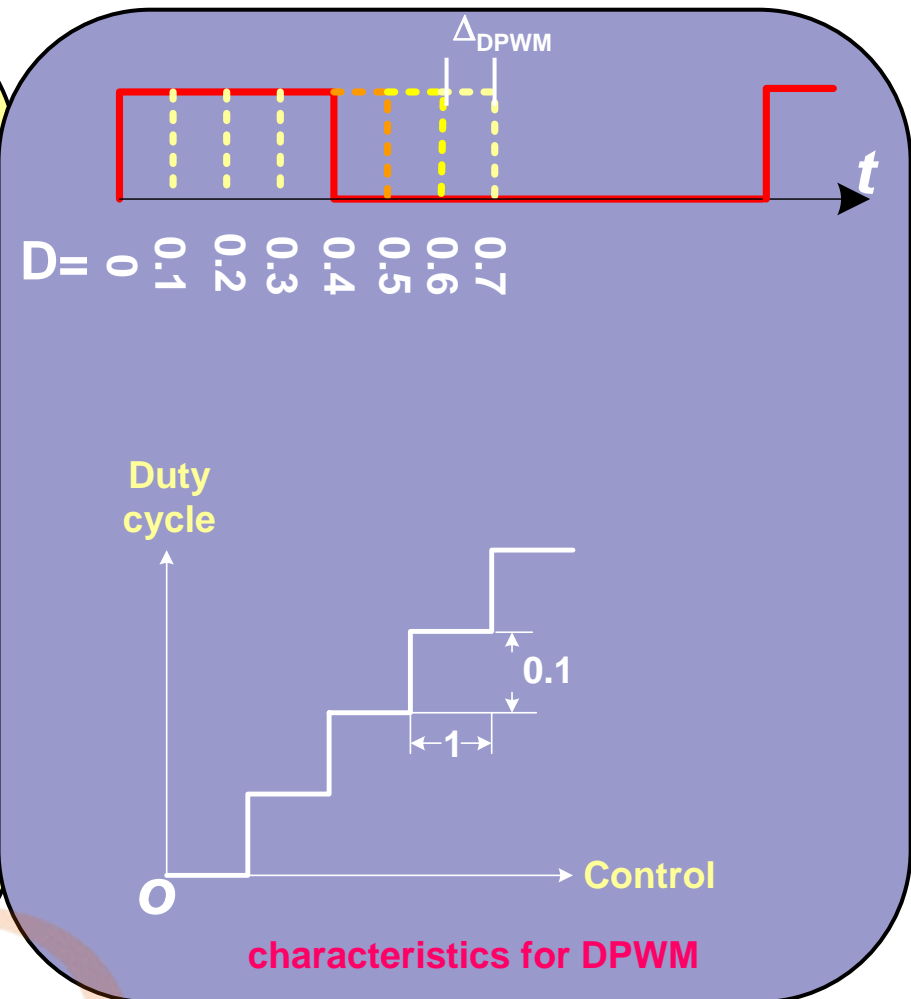
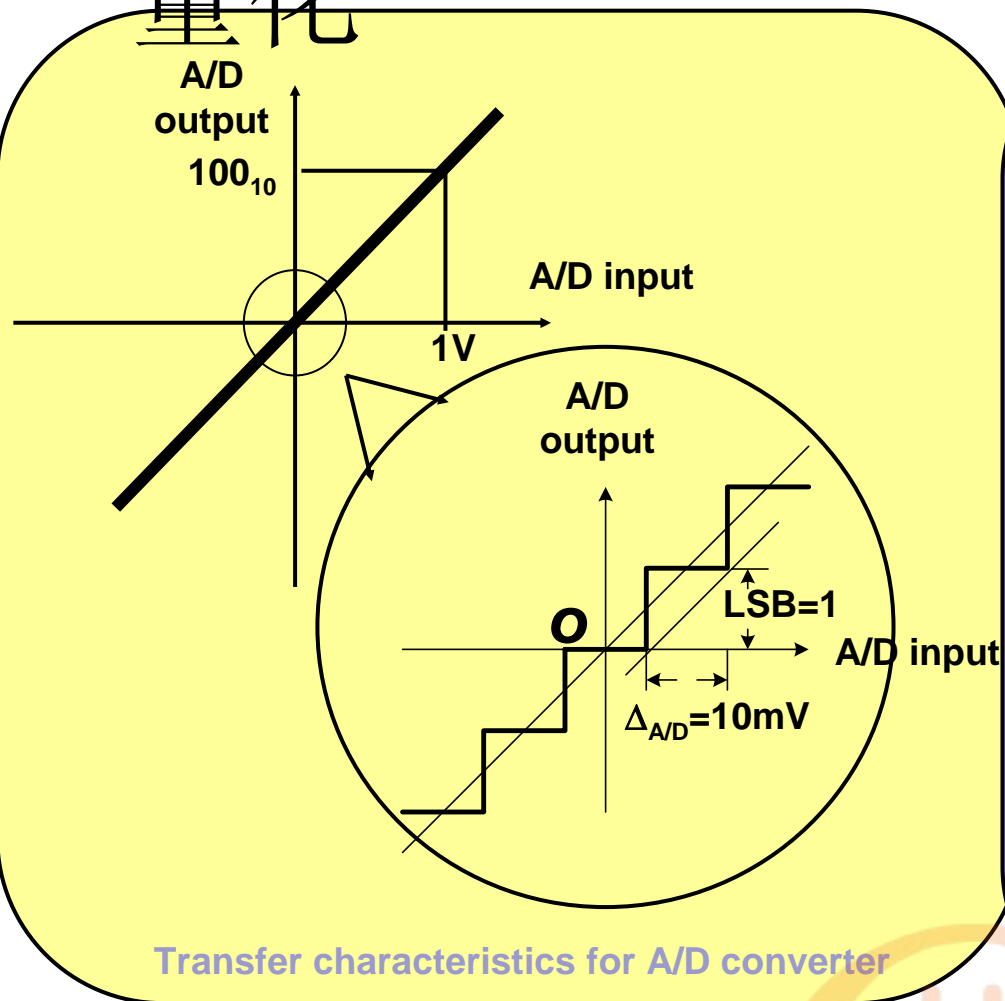


$x(kT_s)$

T_s : 采样周期

- 从原信号抽取离散时间点的信号。
- 采样点之间的信号被丢弃。
- 采样率必须足够高，以保证对于控制系统有重要影响的频率成分能够被保留下来。
- 对于PWM控制，此样率一般等于或大于开关频率。

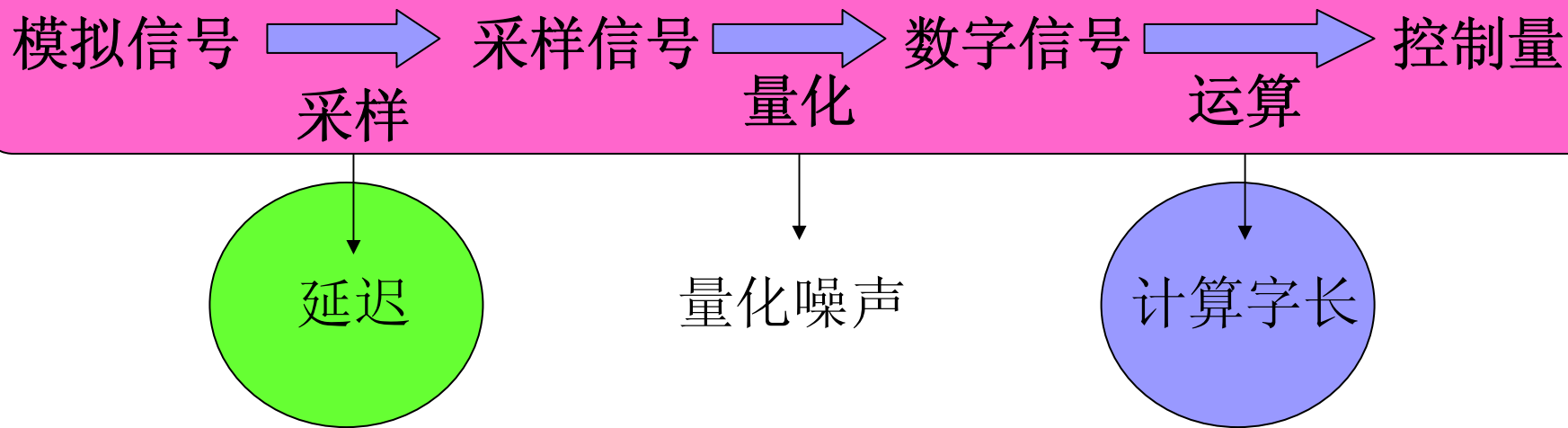
量化



■ A/D 和 DPWM 的输出都是量化的：

- A/D 决定反馈信号的量化精度。
- DPWM 决定占空比的量化精度。

采样和量化给数字控制带来的问题

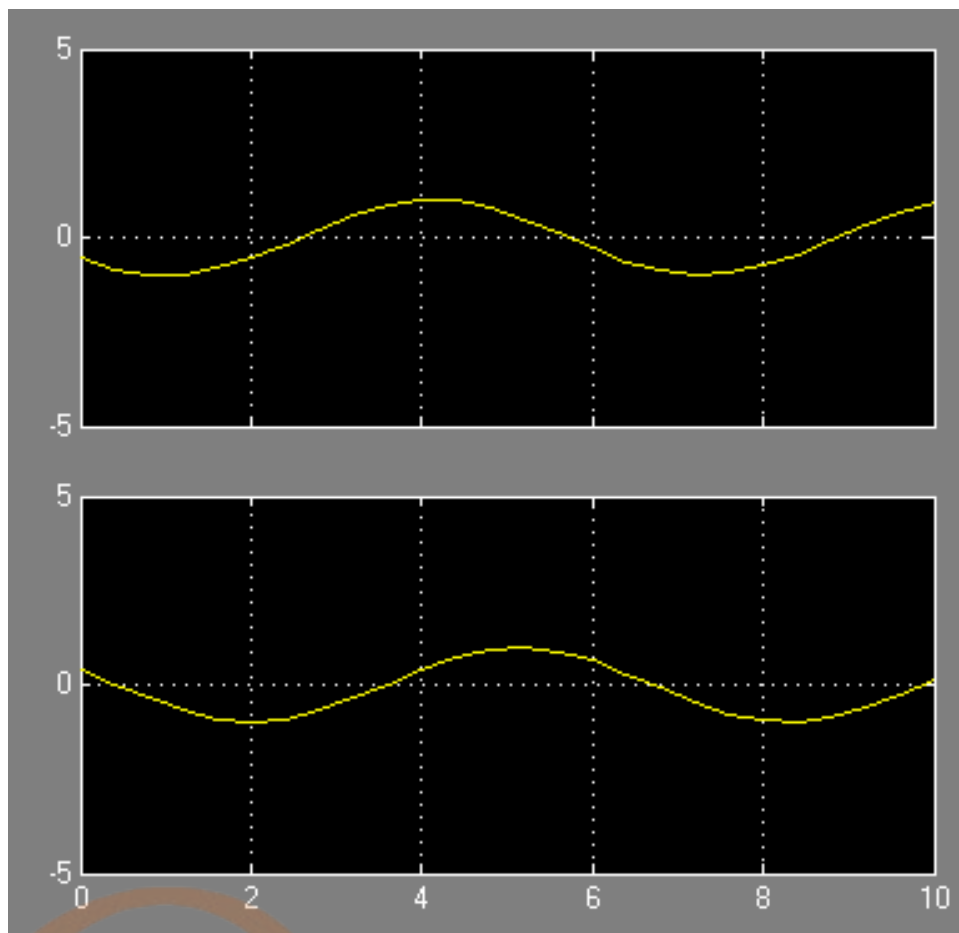
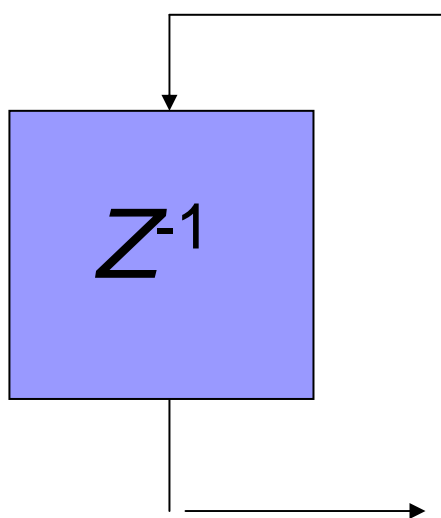


延时问题



电源网
DianYuan.com

延时的概念



- 幅度、波形不变
- 信号滞后固定时间。

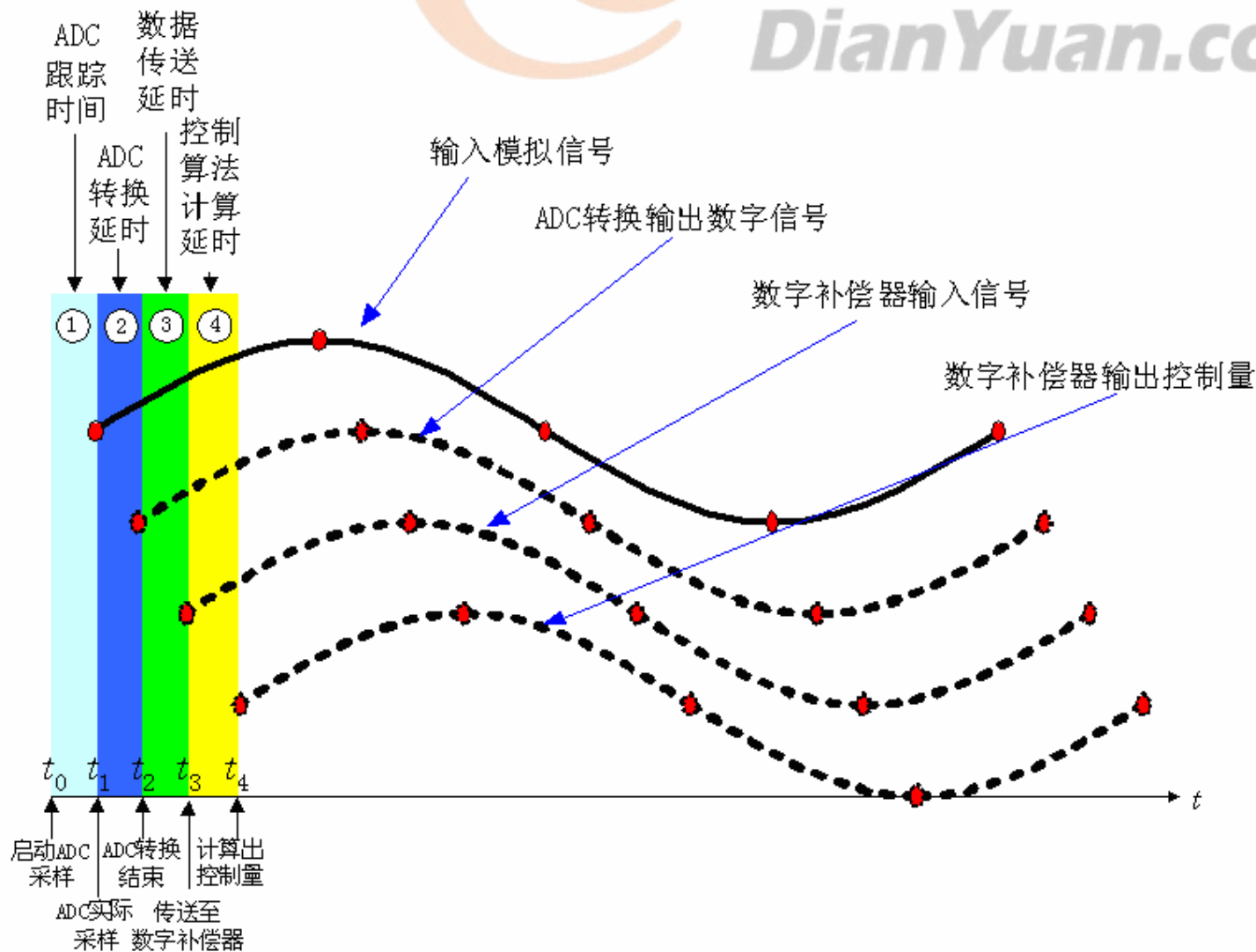


延时的分析

■ 传输型延时



电源网
DianYuan.com

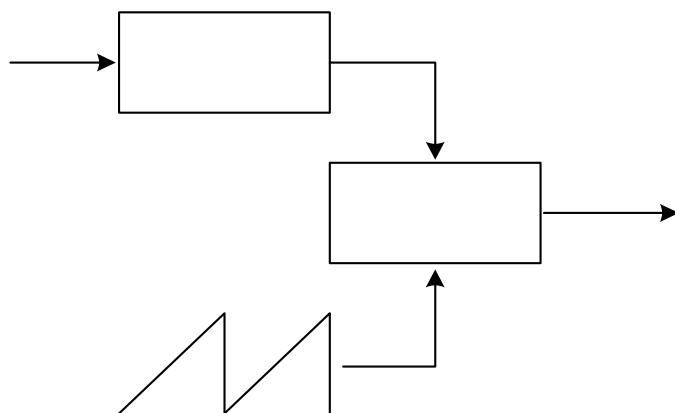


延时的分析

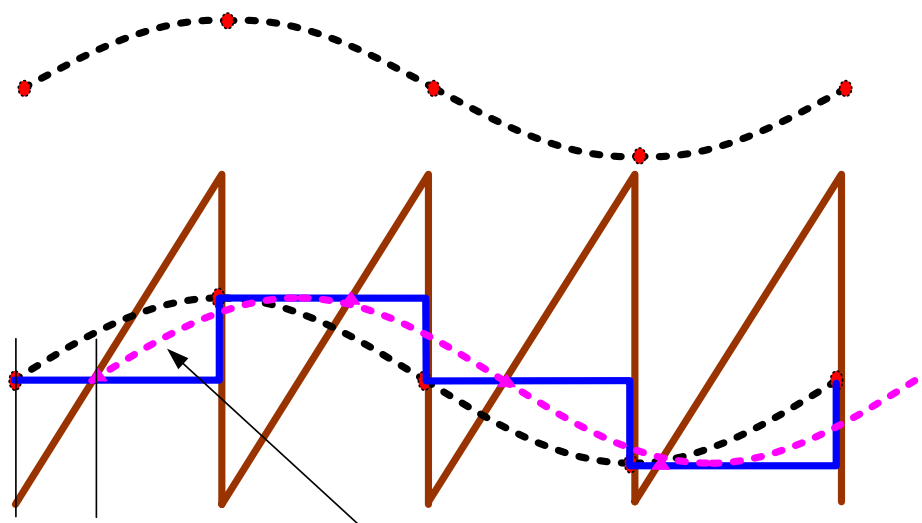


电源网
DianYuan.com

■ 采样造成的延时



a) DPWM电路的原理



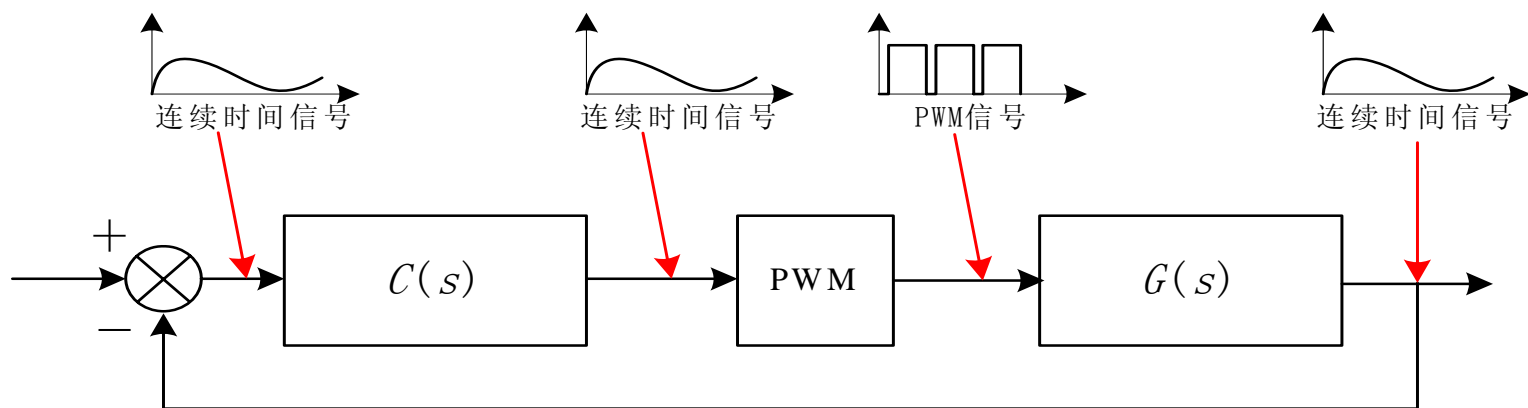
b) DPWM电路的延时

DPWM的原理和延时

数字控制量

锁存器

含有延时的数字系统建模



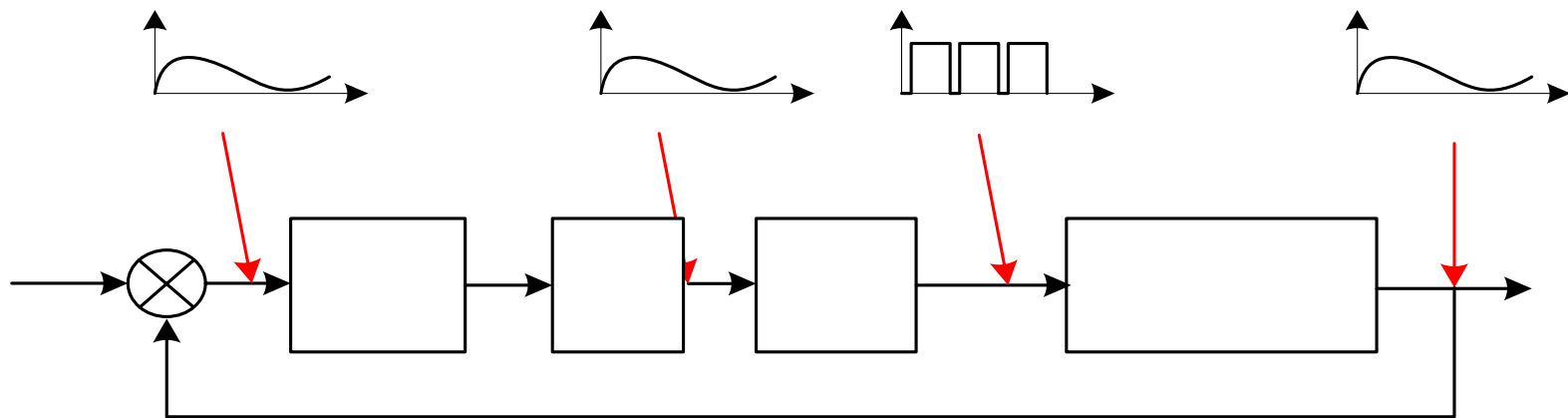
模拟PWM控制系统



电源网

DianYuan.com

含有延时的数字系统建模



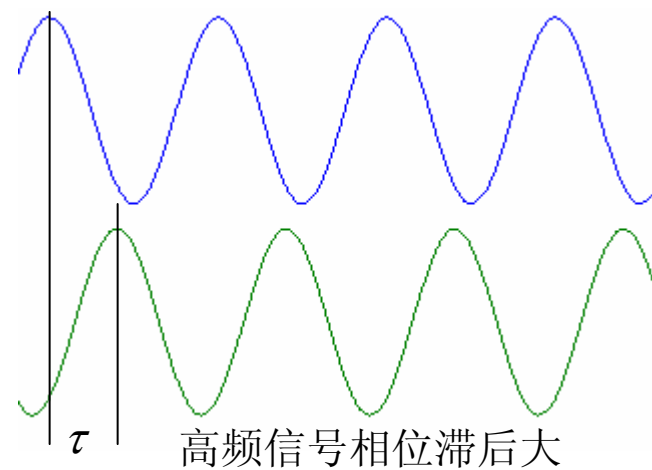
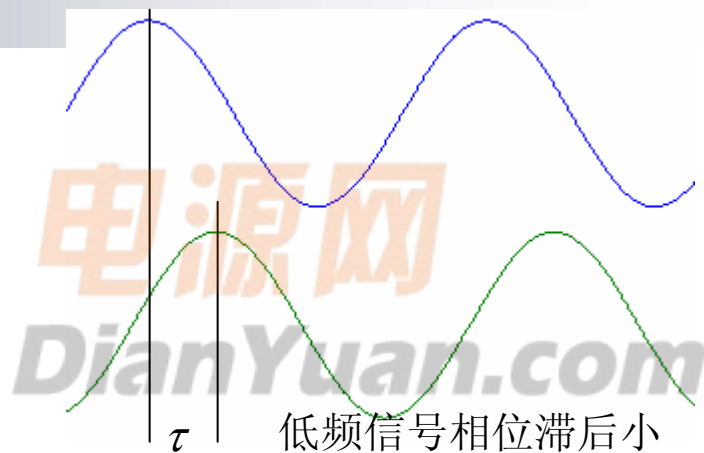
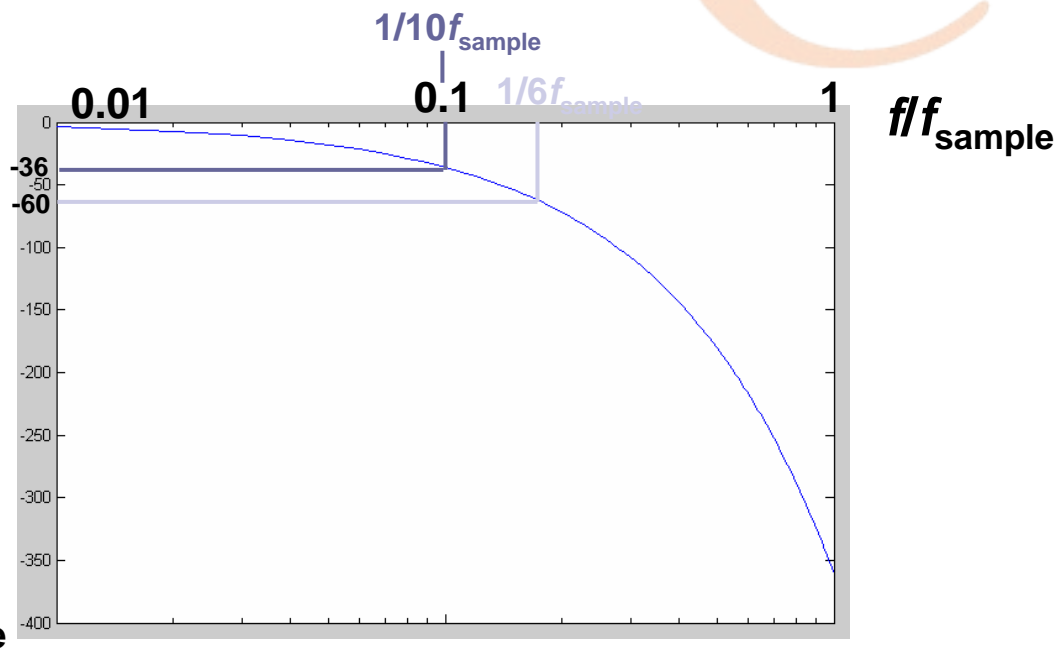
等效连续时间系统模型

(该模型可以较为方便的用于系统分析和设计，特别适合于Re-design)

连续时间信号

连续时间

延时的负面影响： 相位滞后



- 延时时间等于信号周期时，相位滞后为 360°
- 随着信号频率的减小，相位滞后角度也减小。

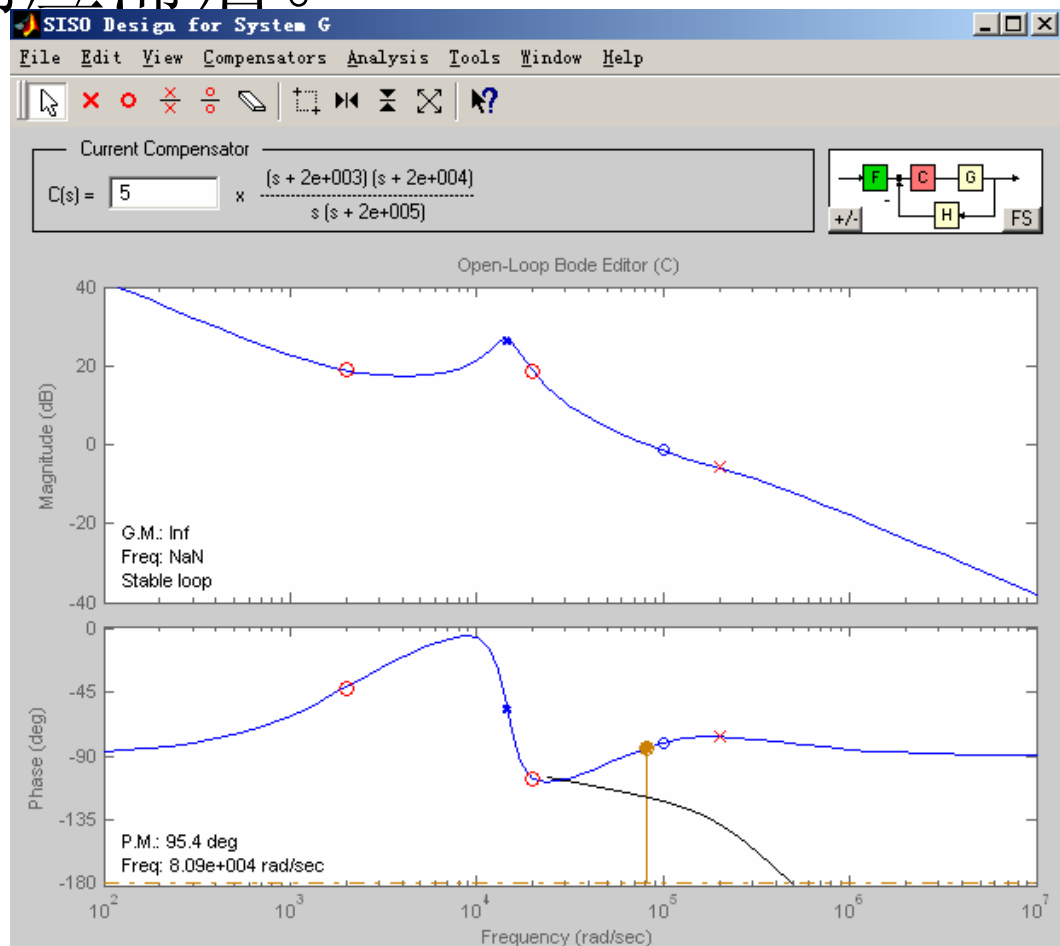
延时的负面影响

- 相位裕量减少。
- 动态响应滞后。



电源网

DianYuan.com

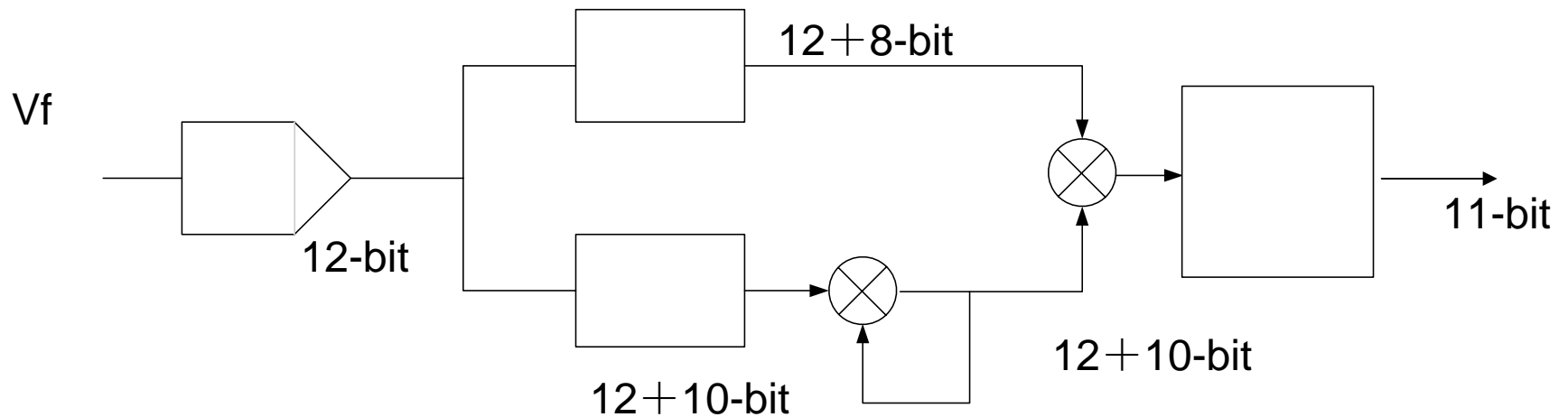


算法的字长



电源网
DianYuan.com

数字PI控制器的计算字长



- 当ADC和DPWM字长已知的条件下，确定系数字长就可以知道计算字长。

K_p :
8-bit

ADC

系数字长对于零极点精度的影响

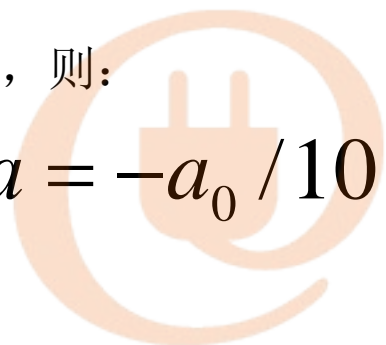
- 假设s域的零极点误差不超过10%，推导z域零极点的允许误差以及差分方程系数的允许误差。
 - 对于s域实零极点：

$$(s + a_0)$$

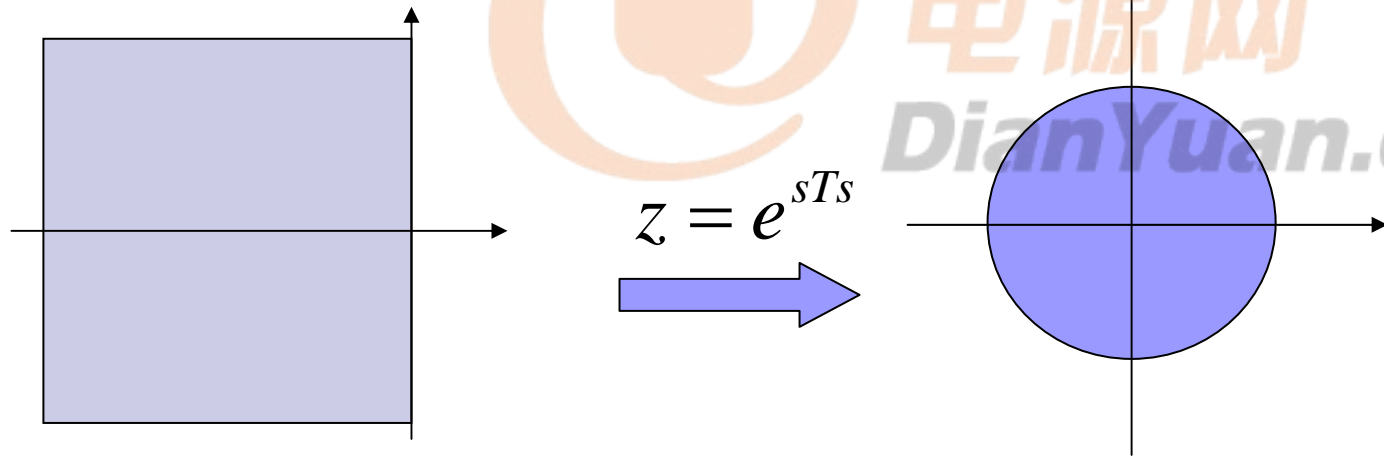
零极点为： $-a_0$

如要误差不超过10%，则：

$$\Delta a = -a_0 / 10$$



■ s域与z域的对应关系:



■ 零极点的对应关系:

$$z_0 = e^{-a_0 Ts}$$

要使s域零极点的误差在 $\pm 10\%$ 的范围内,
该z域零极点的位置为:

$$e^{-1.1a_0 Ts} < z < e^{-0.9a_0 Ts} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{e^{0.1a_0 Ts}} z_0 < z < e^{0.1a_0 Ts} z_0$$

讨论

$$\frac{1}{e^{0.1a_0T_s}} z_0 < z < e^{0.1a_0T_s} z_0$$

$e^{0.1a_0T_s}$ 的大小。

• 设 $T_s = 50 \times 10^{-6} \text{s}$

- 随着采样频率的降低，同样频率的零极点对字长的要求有所降低。
- 精度要求低使，对字长的要求也降低

a (Hz)	$e^{0.1a_0T_s}$	最小字长
1	1.000005	17.60964
10	1.00005	14.28768
100	1.0005001	10.96542
1000	1.0050125	7.640248
10000	1.0512711	4.28571
100000	1.6487213	0.624329

该值反映出s域零极点映射到z域后，保持足够的精度所需的字长。

Matlab 中的显示精度问题

- 利用以下Matlab 程序，将s域极点转换为z域极点：

```
Ts=1e-6;  
s=tf('s');  
z=tf('z',Ts);  
Gs=1/(s+2*pi*1)  
Gz=C2D(Gs,Ts,'matched')
```

转换结果为：

	1e-006

z - 1	

这一结果显然是错误的。



正确的结果



电源网

DianYuan.com

$$\frac{9.99996858420763e-007}{(z-0.999993716834432)}$$

- 产生这一问题的原因：
 - 从 $z=e^{sT_s}$ 来看， z 域的零极点总是非常接近1，而处理这样的数，即使用浮点数，也还是需要很长的字长来显示和运算。
- 因此，不能从Matlab的SISOTOOL或者C2D函数中直接抄录数据作为差分方程的系数，需要手工或者利用Matlab编程转换，以保证较高的显示精度。

数字PWM控制器的实现



电源网
DianYuan.com

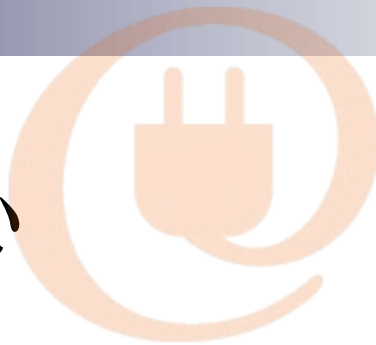
典型的数字控制器配置方案

- DSP为核心
- FPGA为核心
- DSP + FPGA混合

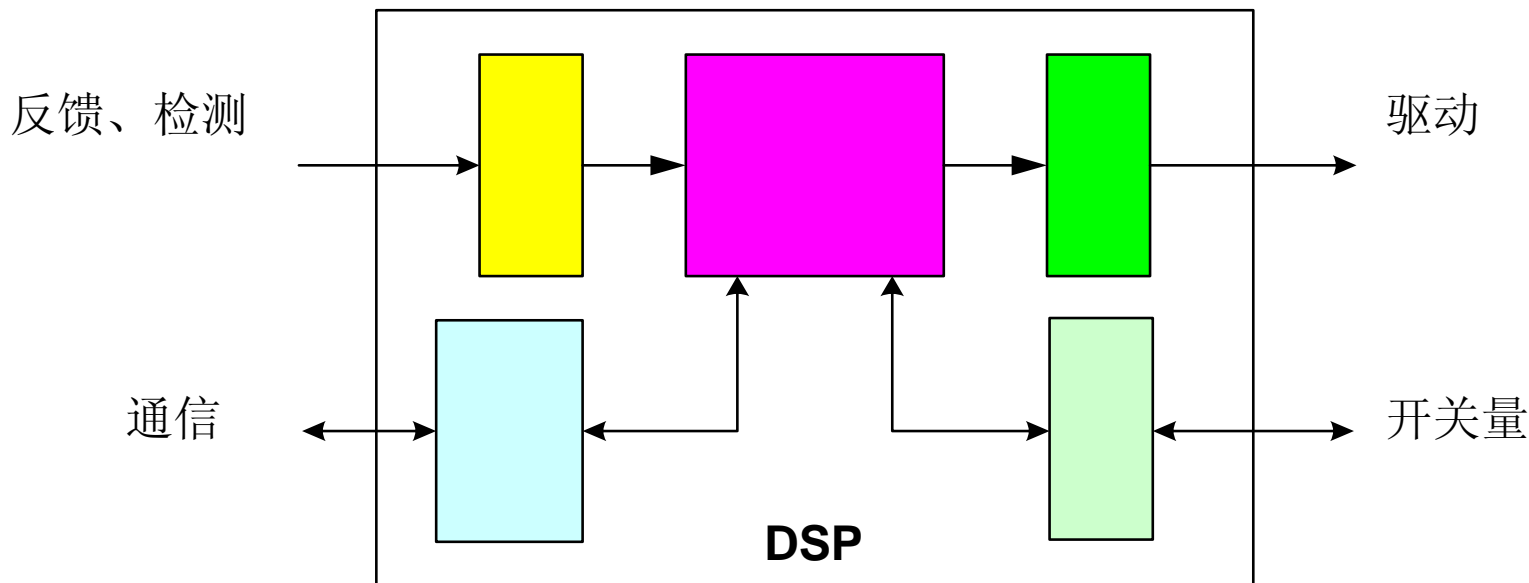


电源网
DianYuan.com

以DSP为核心



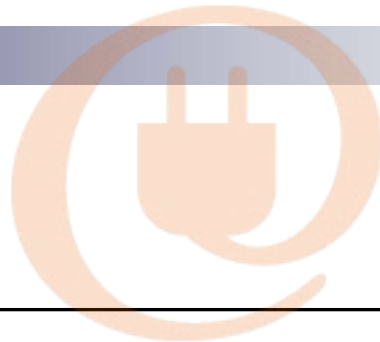
电源网
DianYuan.com



- 结构简单、成本低
- ADC较差、计算速度较差、资源有限
- 适合低端系统应用

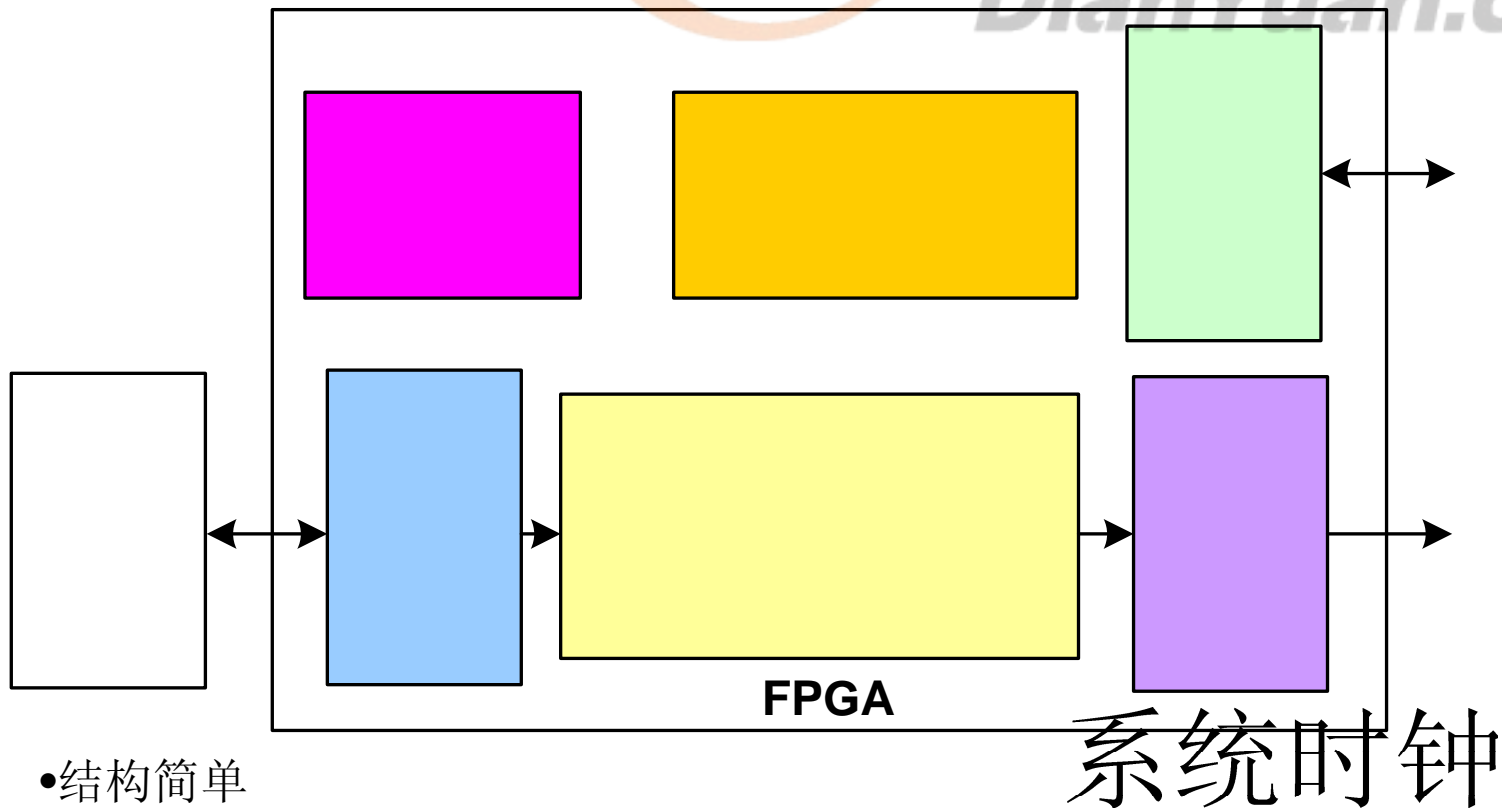
ADC

FPGA为核心



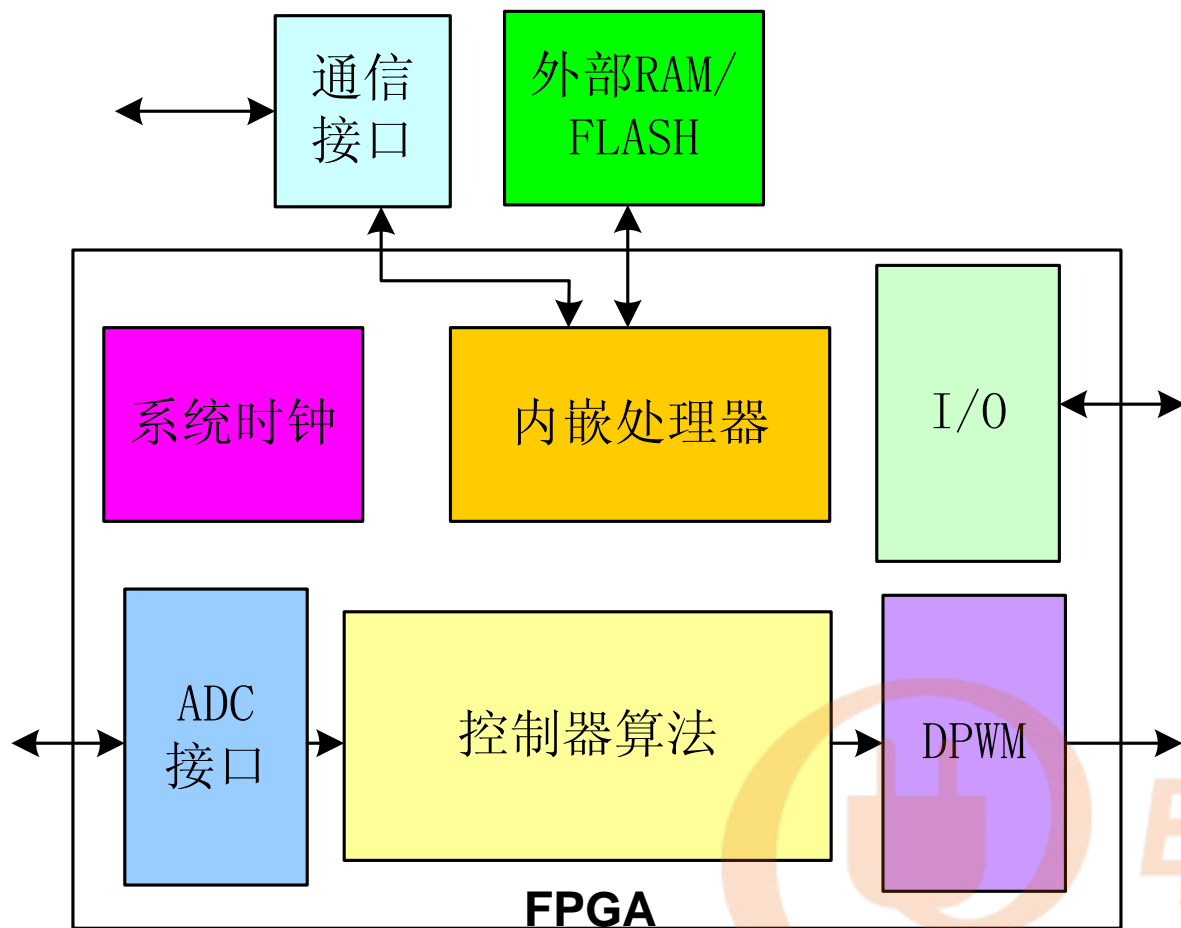
电源网

DianYuan.com



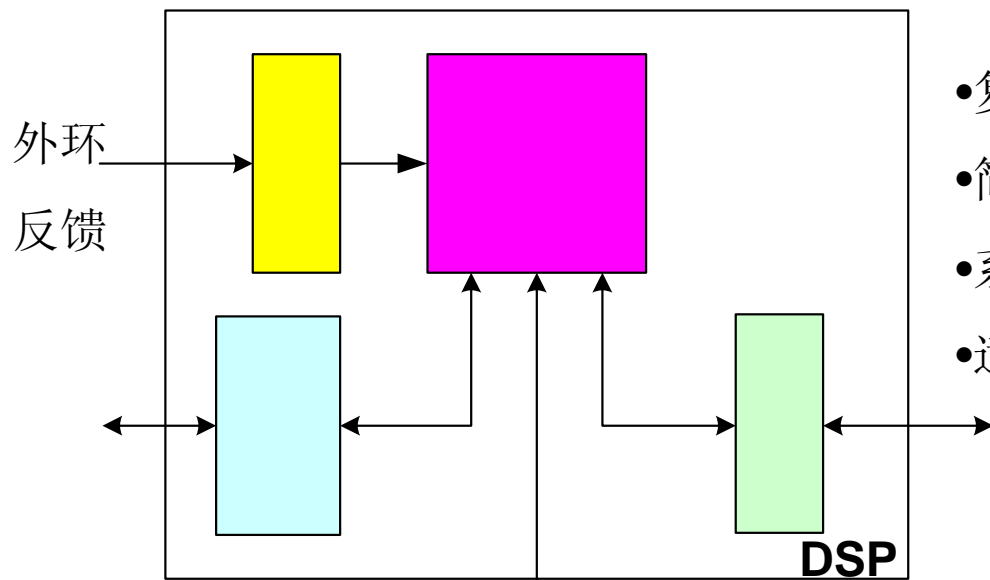
- 结构简单
- ADC选择灵活、计算速度快
- 实现复杂算法有难度、复杂的监控功能难以实现
- 适合于高开关频率、控制算法简单的应用

FPGA为核心 使用内嵌处理器

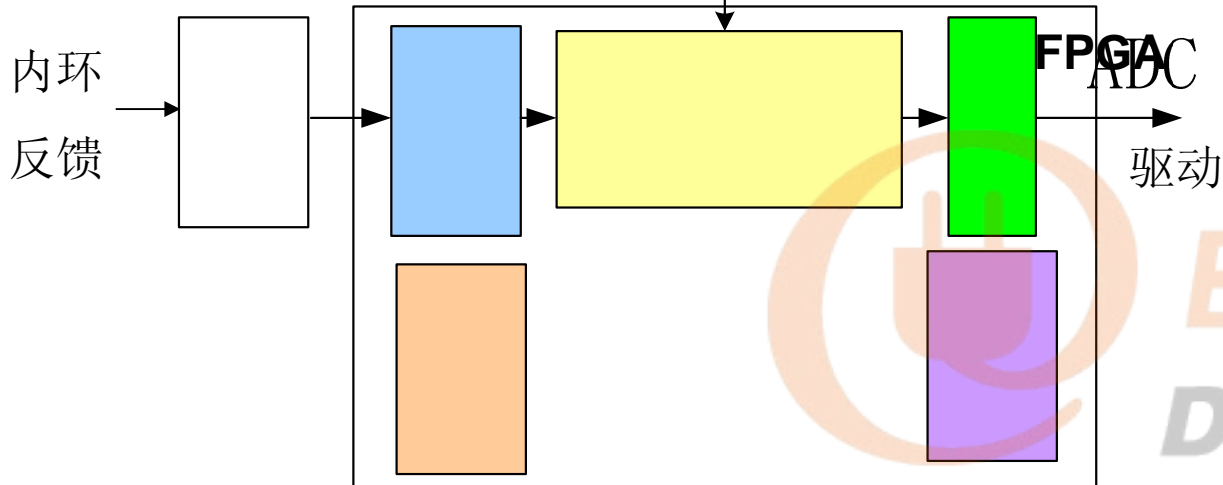


- 可以实现较为复杂的监控功能
- 部分复杂、但速度要求不高的算法可以在内嵌处理器中完成。
- 适合于低成本、复杂控制算法的应用。

DSP + FPGA混合



- 复杂的外环控制算法在DSP中
- 简单但高速的内环算法在FPGA中
- 系统复杂成本高
- 适合高端、高性能应用



DSP内核

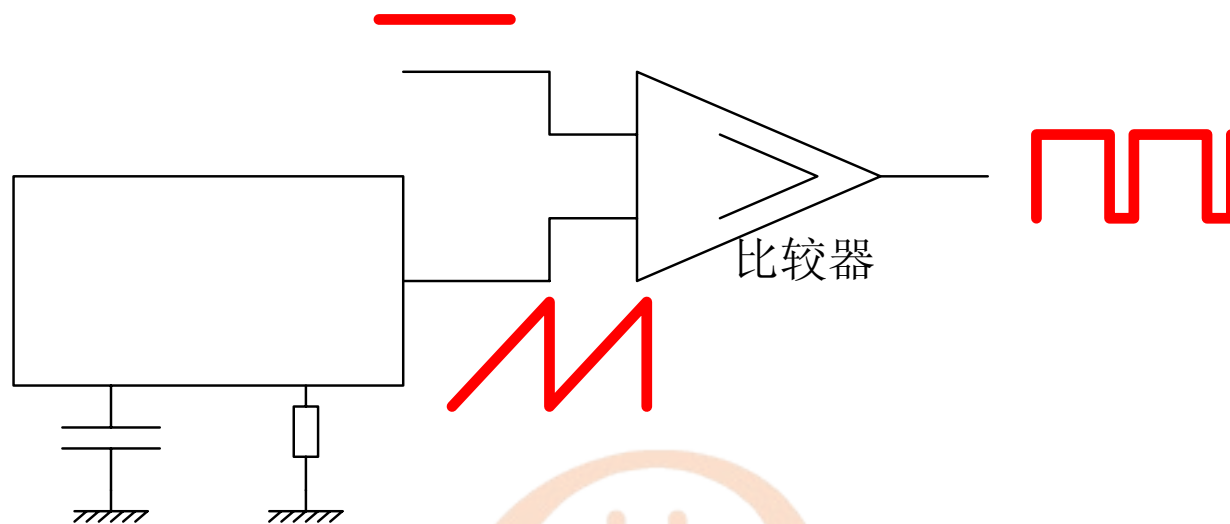
通信

适合PWM控制的ADC

ADC类型	采样率	延时	分辨率	成本
直接比较(Flash)	>100M	ns	<10-bit	高
逐次比较(SAR)	30~100 M	μ s	10~16- bit	较高
流水线(PipeLine)	30~100 M	μ s	10~18- bit	较高
Σ - Δ	1k~10M	>100 μ s	24~32- bit	低
V/F	<100k	ms	16~24- bit	低
双积分	1~10	>20ms	16~24- bit	低

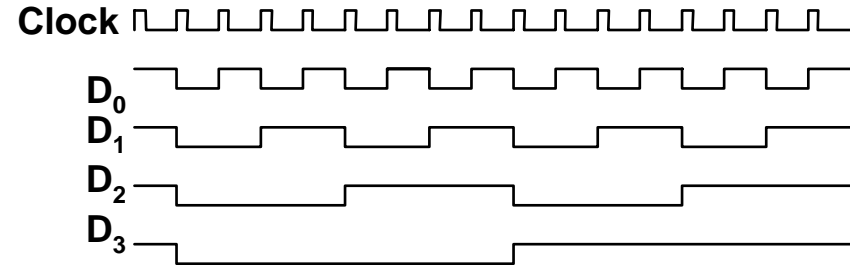
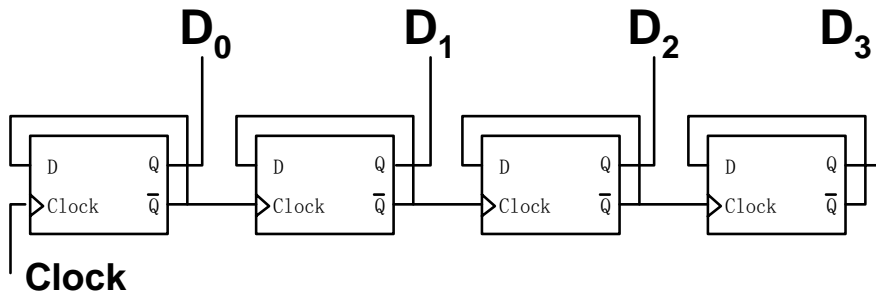
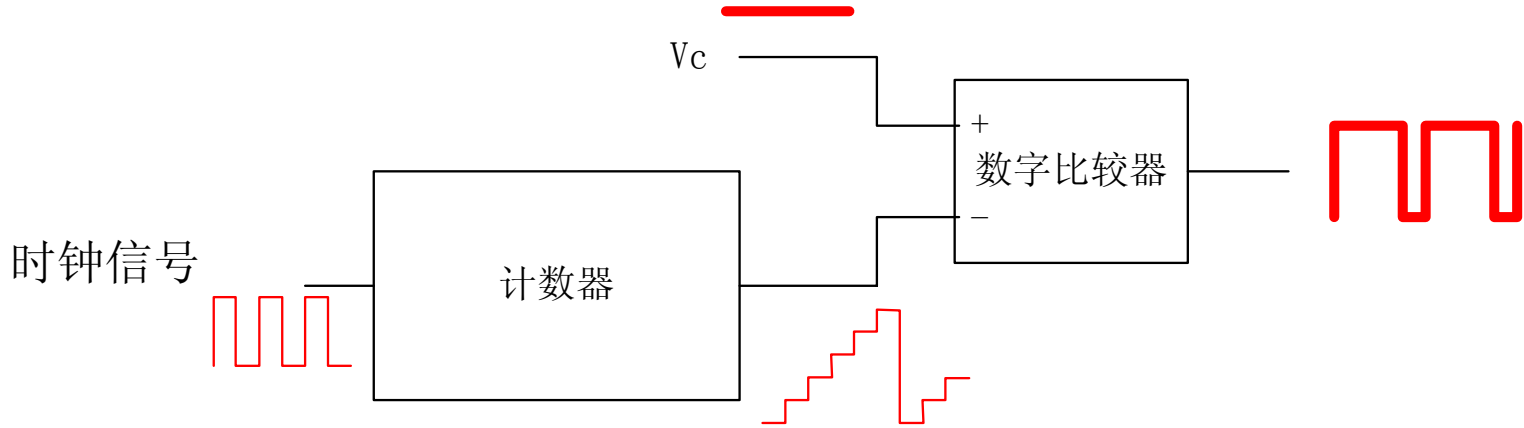
Digital PWM(DPWM)

■ 模拟PWM的原理



Digital PWM(DPWM)

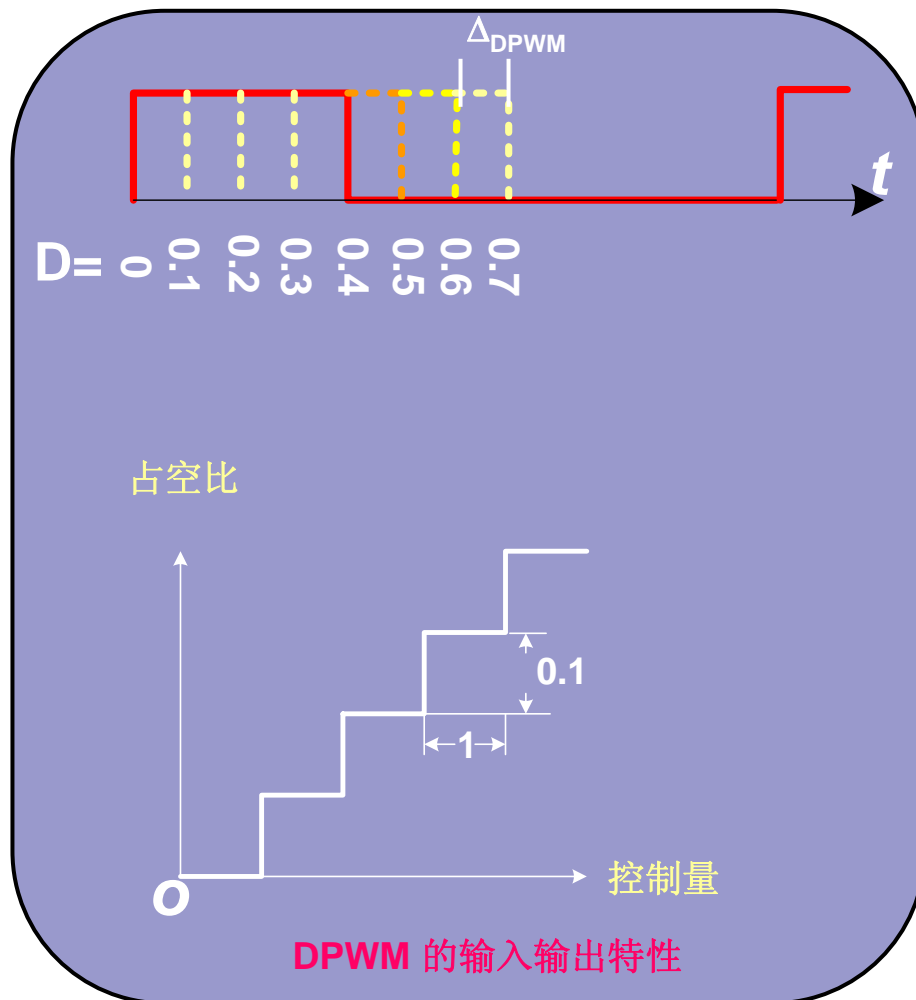
■ 数字PWM电路的原理



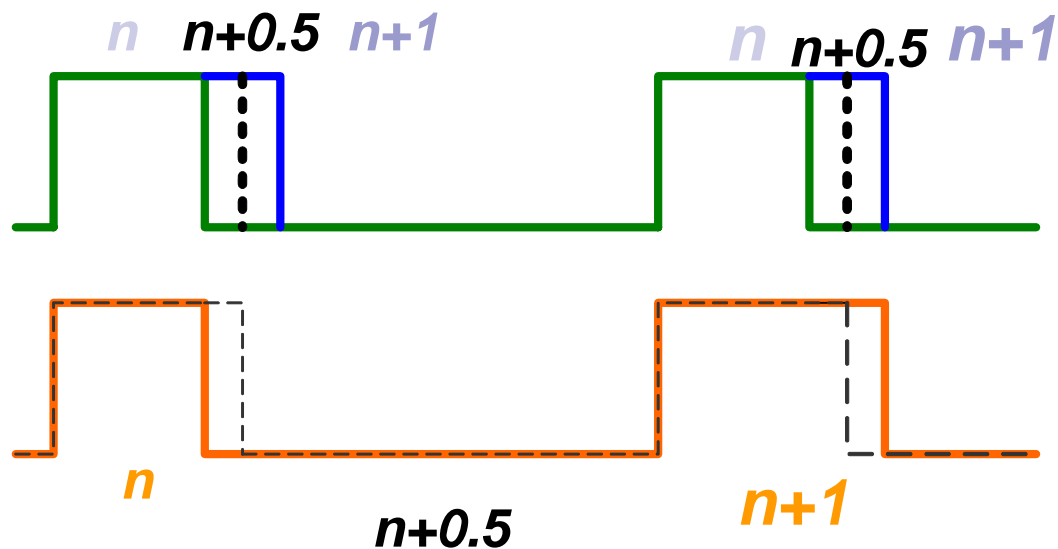


DPWM

■ DPWM的时间分辨率

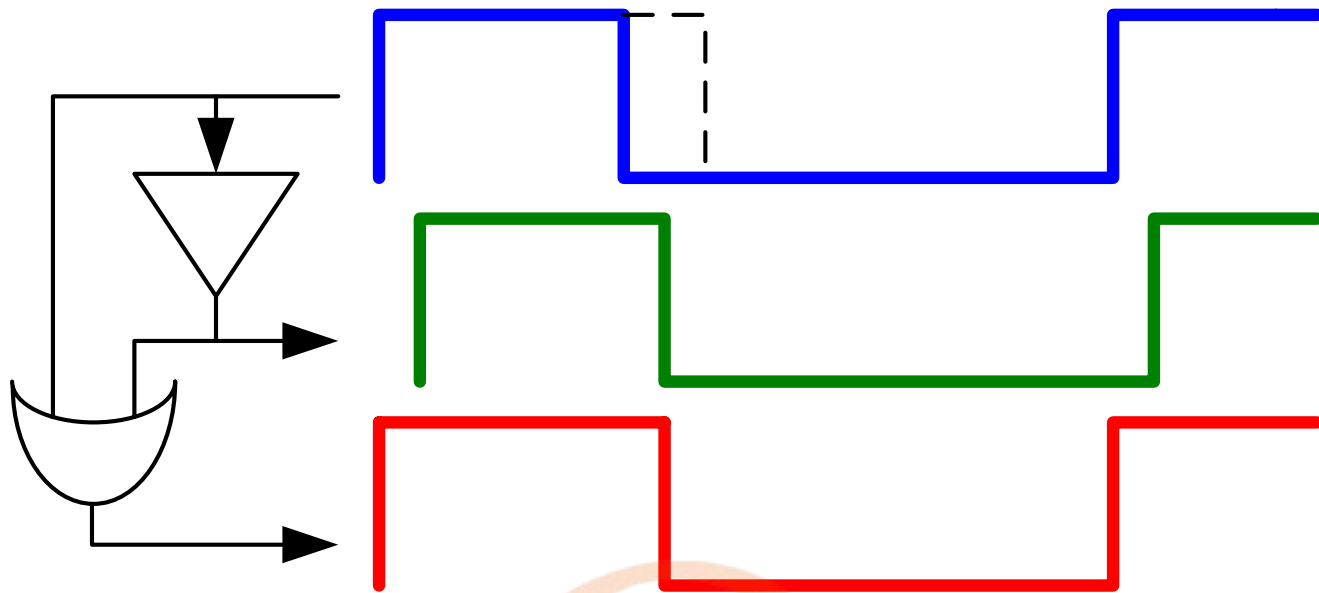


提高计数器的等效时间分辨率——抖动（Dither）



- 利用相邻周期不同占空比抖动获得介于时间分辨率之间的平均占空比。
- 可以提高1~2位分辨率
- 会在控制环内产生低频扰动。

延时线结构的 DPWM



- 时间分辨率由最小门延时时间决定



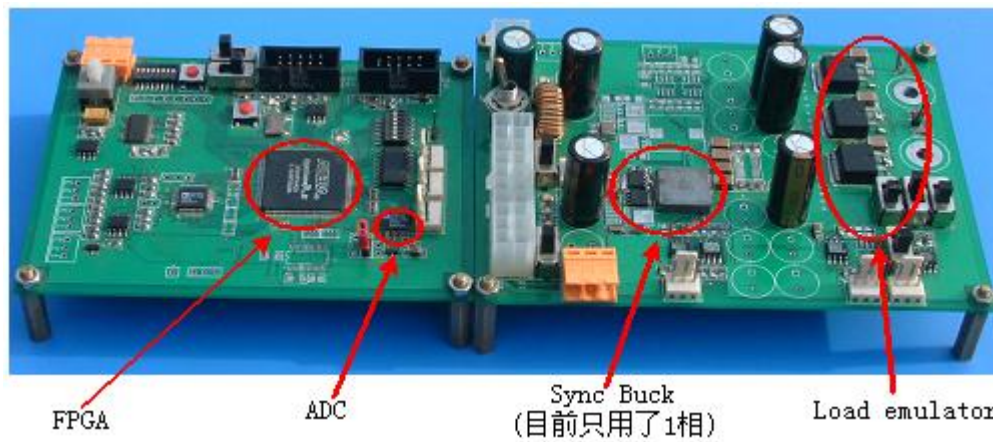
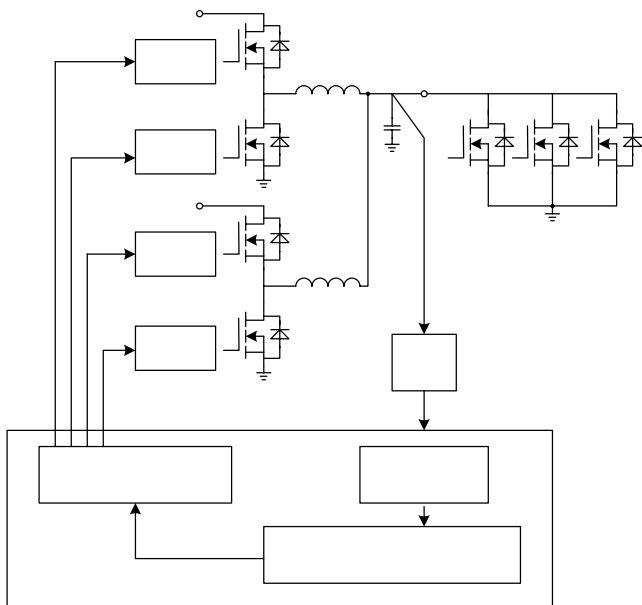
数字控制器实例

■ 2相 Buck 控制器

- 12V to 1V
- 30A 输出
- 开关 500kHz



电源网
DianYuan.com



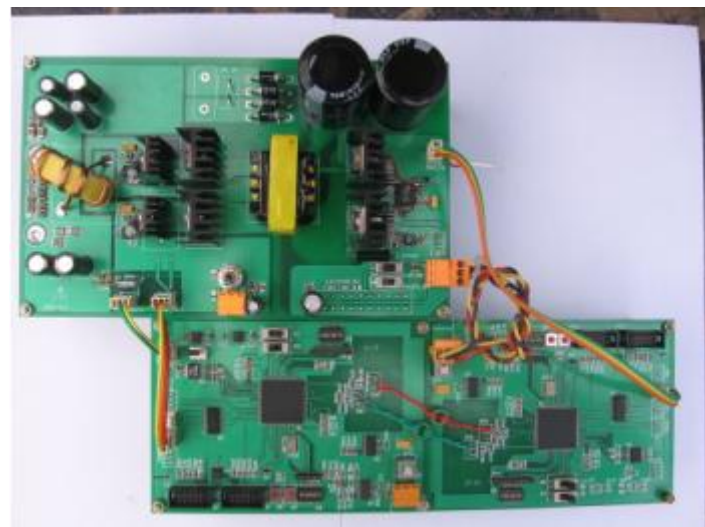
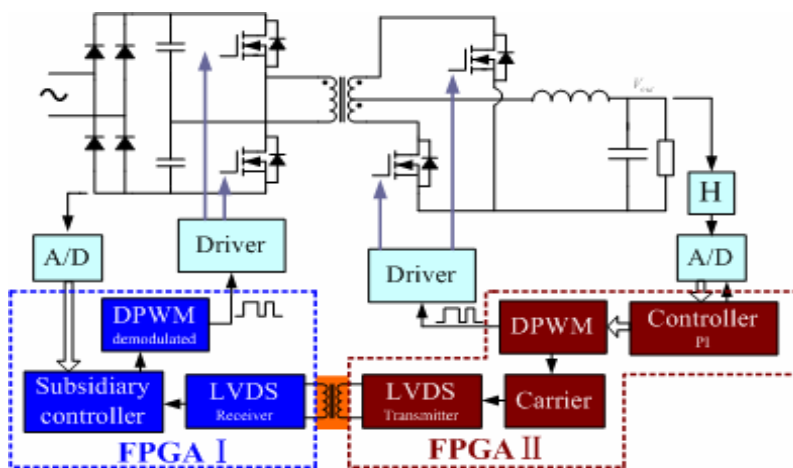
part	No.	features
FPGA	Cyclone II EP2C8T144C8	8256 LEs, 2 PLLs, 85 I/Os
ADC	ADI ADC9283	8bit, 100MSPS

数字控制器实例

■ 隔离型DC-DC电路

- 400V 输入, 12V 输出
- 控制信号磁隔离
- 含同步整流控制

电源网
DianYuan.com

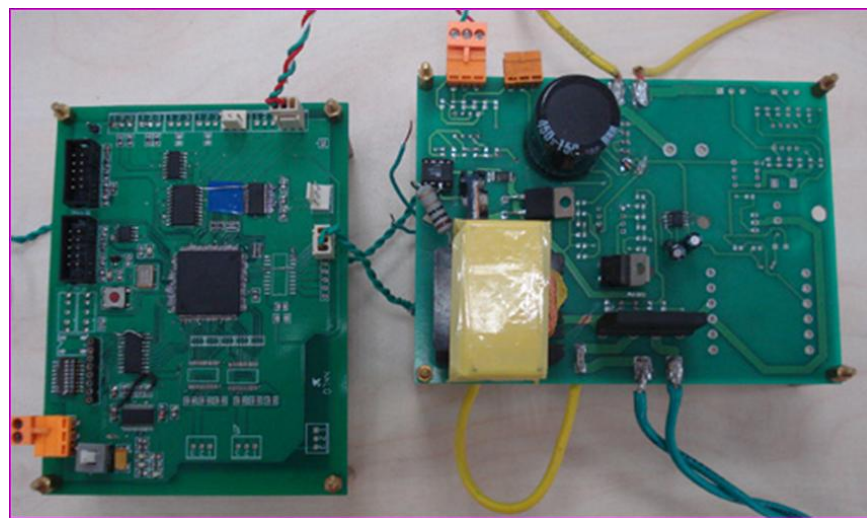
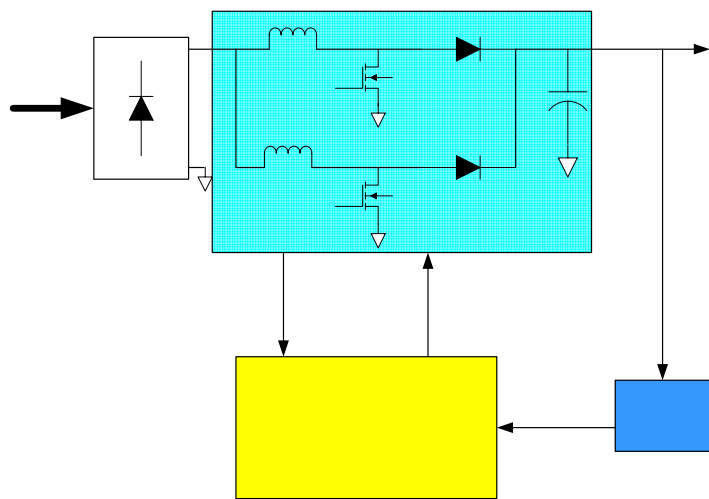


数字控制器实例

■ 2相错相并联临界导电PFC电路

□ 500W

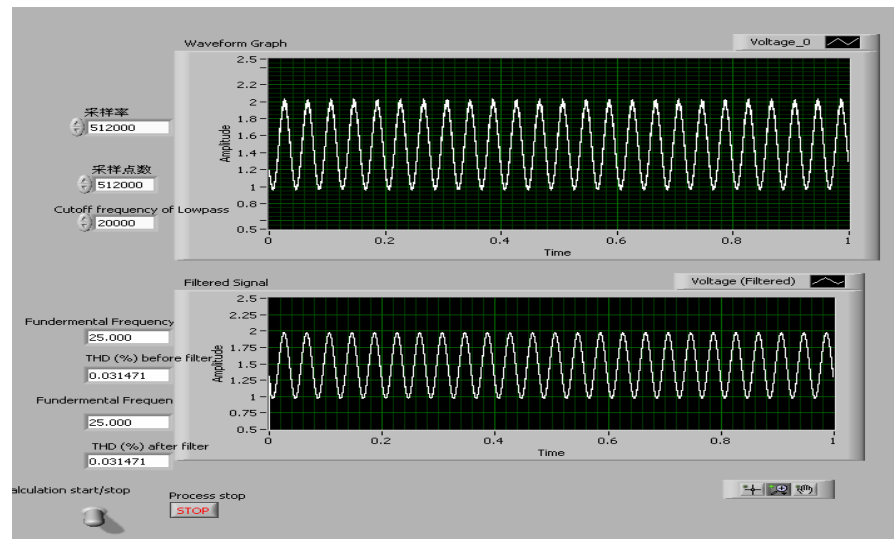
电源网
DianYuan.com



数字控制器实例

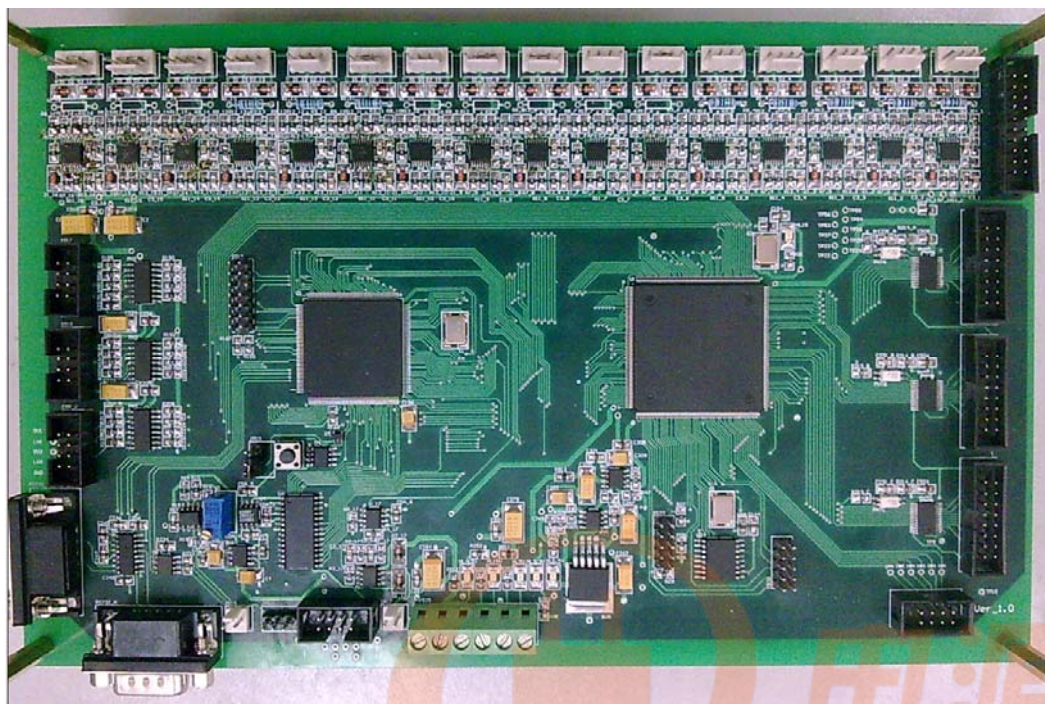
■ 高精度磁铁电源数字控制器

- 以 FPGA为核心
- 18-bit ADC
- 稳定度 4ppm
- 2kHz 控制带宽
- 0.1%跟踪精度(25Hz条件下)



数字控制器实例

- DSP+FPGA 方案
- 用于光伏逆变、APF和SVG等应用





总结

- 数字PWM控制在电力电子技术领域应用越来越普遍。
- 数字控制存在延时、量化精度等特殊问题，如果采用线性控制算法，在闭环稳定域、快速性等方面与模拟控制尚存在一定的差距，需要在参数优化、字长选择等方面引起特别注意。

谢谢！



电源网
DianYuan.com