



MICROCHIP 2010

MASTERS Conference

C11L09 PTM

使用CTMU实现精确
时间测量和传感应用

课程目标

- 完成本课程后，您将：
 - 熟悉**CTMU**模块
 - 了解如何将**CTMU**用于精确时间测量
 - 了解如何将**CTMU**用于各种传感应用的电容、电感和电阻测量

课程安排

- CTMU模块简介
- 精确时间测量
- 电容测量
- 其他测量和应用
 - 温度
 - 湿度
 - 电感
 - 脉冲延时



MICROCHIP 2010

MASTERs Conference

什么是CTMU?

充电时间测量单元

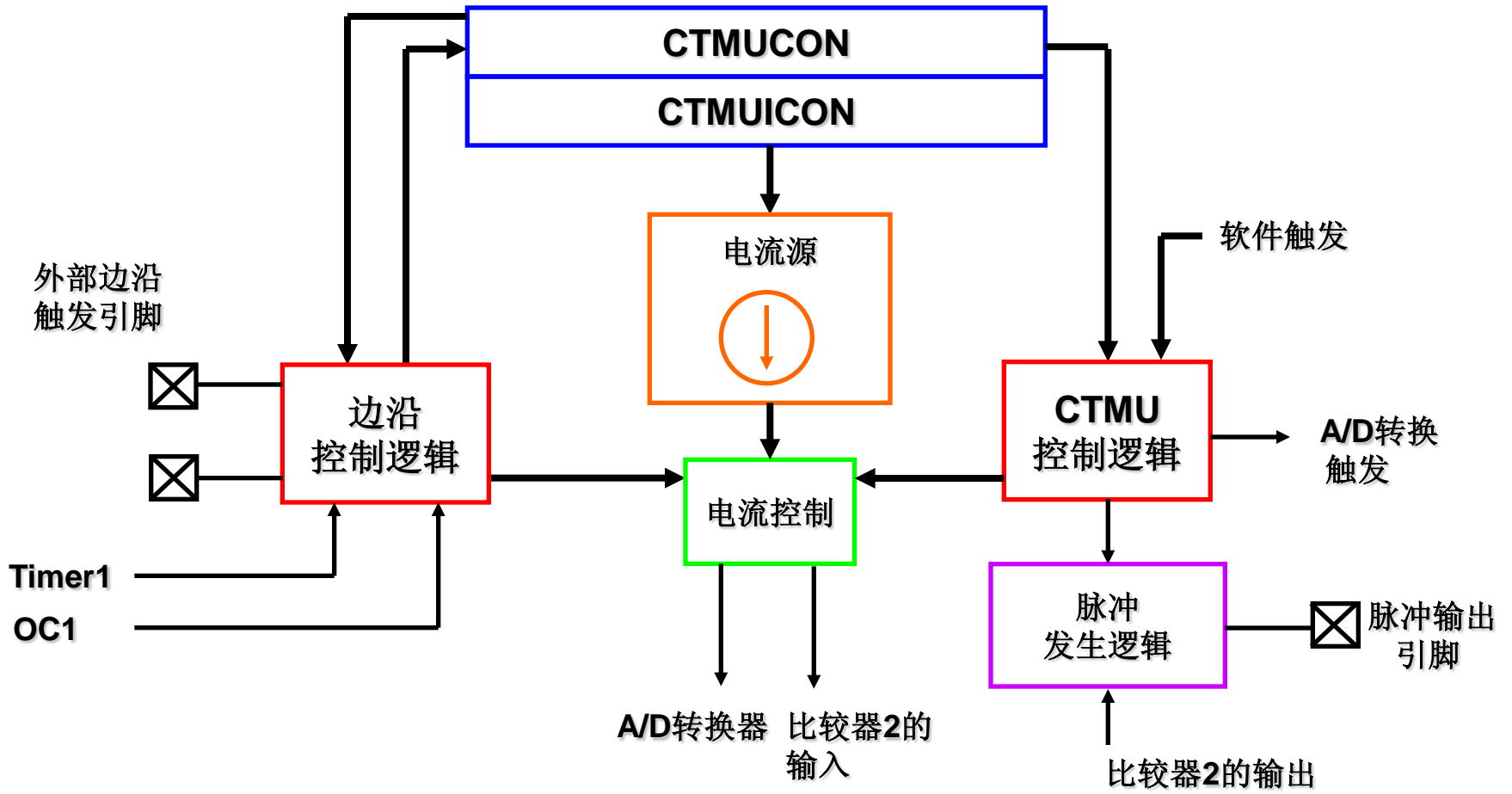
什么是CTMU?

- **CTMU**代表“**充电时间测量单元**”
- 它是一种灵活的模拟模块，与其他片上模拟模块配合使用时，可以精确地测量时间、电容、电容相对变化或产生异步输出脉冲
- 许多**PIC24F**和**PIC18F**系列单片机中都有提供

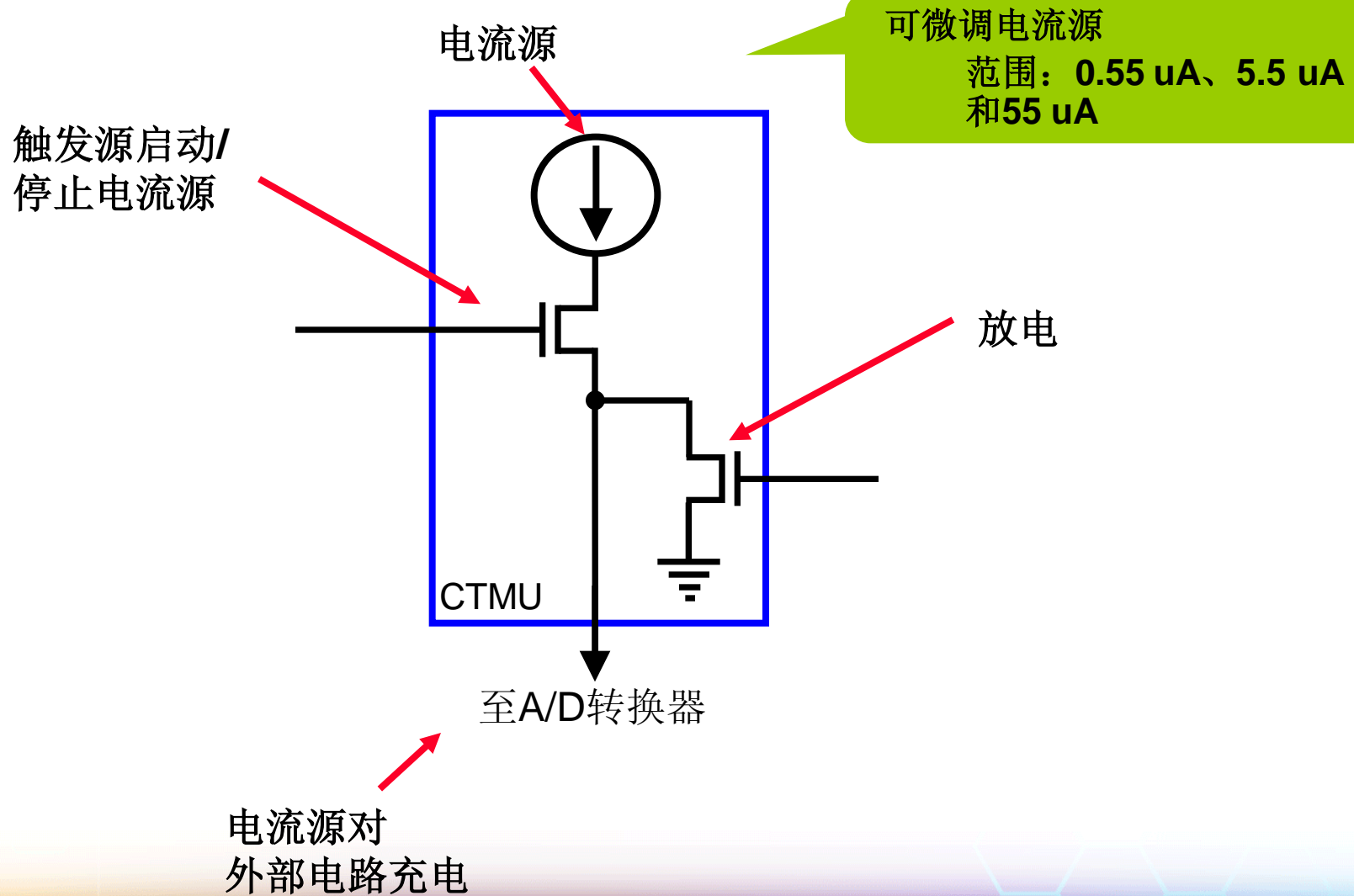
CTMU的关键特性

- 恒流源
 - 范围：**0.55 uA**、**5.5 uA**和**55 uA**电流源
 - 在每个范围中，可按**2%**的步幅进行微调，最高可调至**+/- 62%**
- 通过外部或内部触发源触发
 - **Timer1**、输出比较、软件触发和两个外部引脚的任意组合
 - **4个**边沿输入触发源
 - 每个边沿源的极性控制
 - 边沿顺序控制
 - 控制对边沿的响应
- 电荷测量
- **1纳秒**的时间测量分辨率
- 精确的延时输出
- 与**ADC**配合工作

CTMU框图

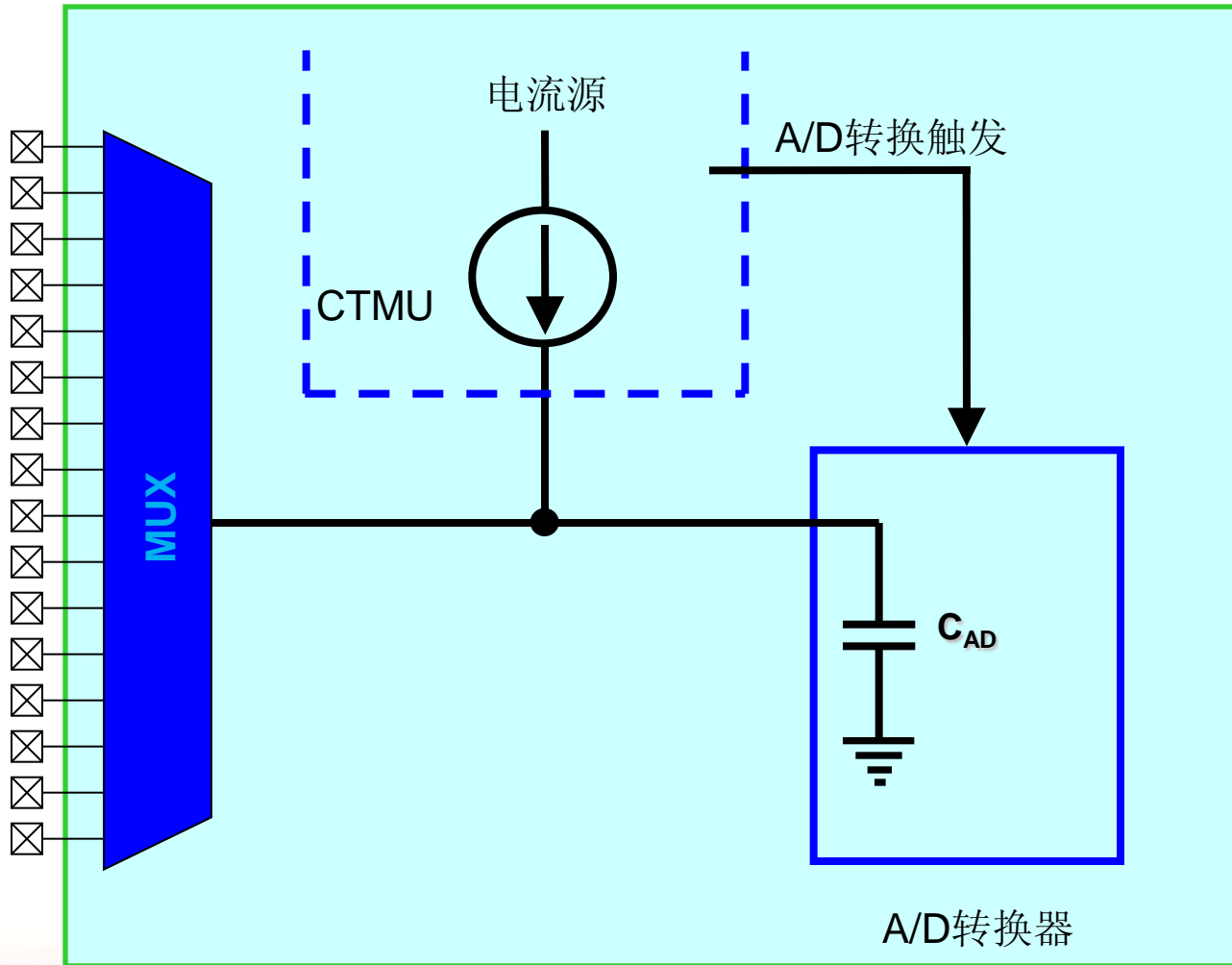


CTMU电流源



CTMU与ADC接口

PIC[®] MCU A/D与CTMU



CTMU 的用途

- 时间测量
 - TDR 电缆长度测量
 - 时差测量（超声波）
 - 流量
 - 距离
- 电容测量（相对）
 - 电容触摸
 - 接近
- 电容测量（绝对）
 - 湿度或其他电容传感器
 - 电容计
- 电阻测量
 - 传感器
- 电感测量
 - 流量计
 - LCR 测量仪
- 温度测量
 - 自动调温器

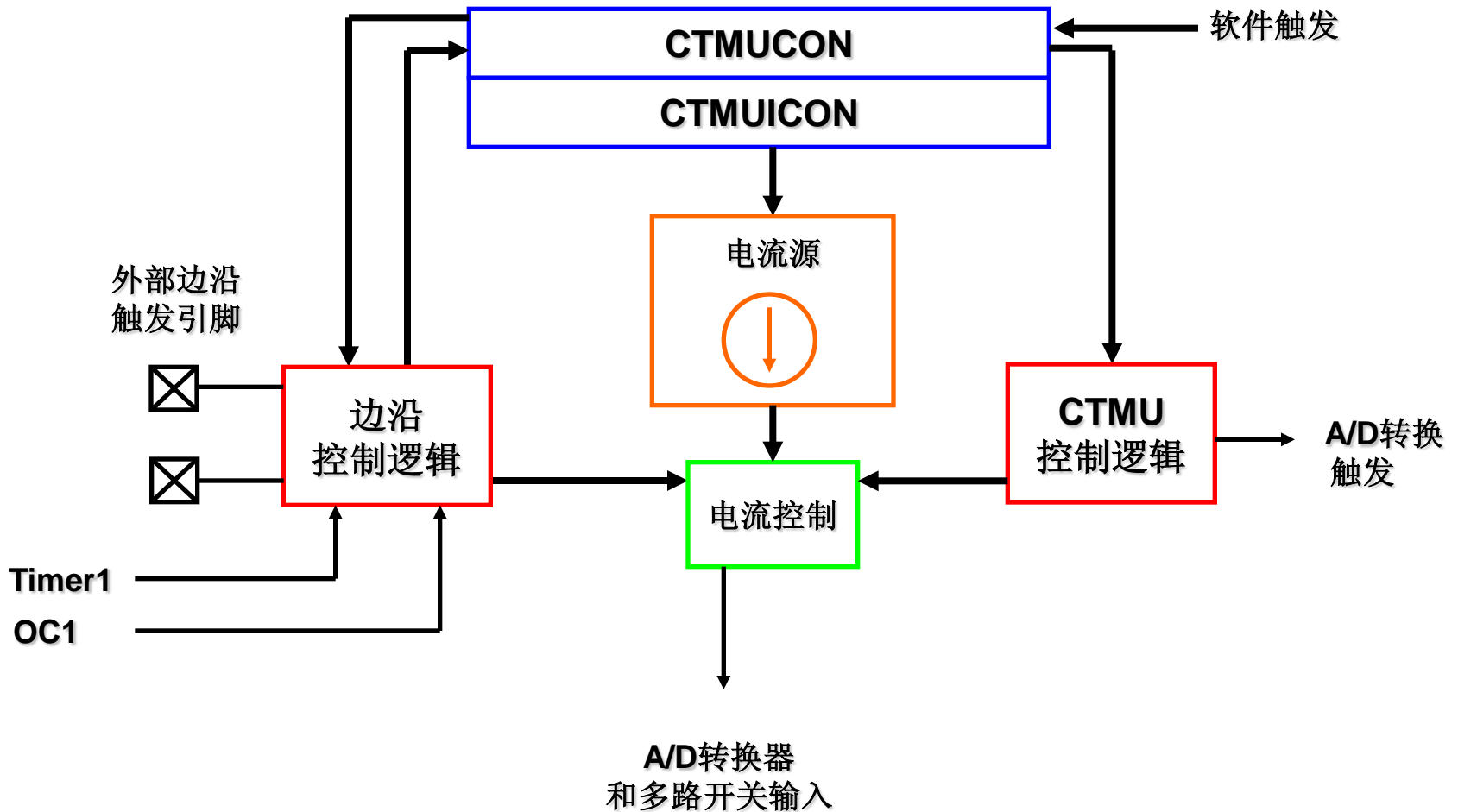


MICROCHIP 2010

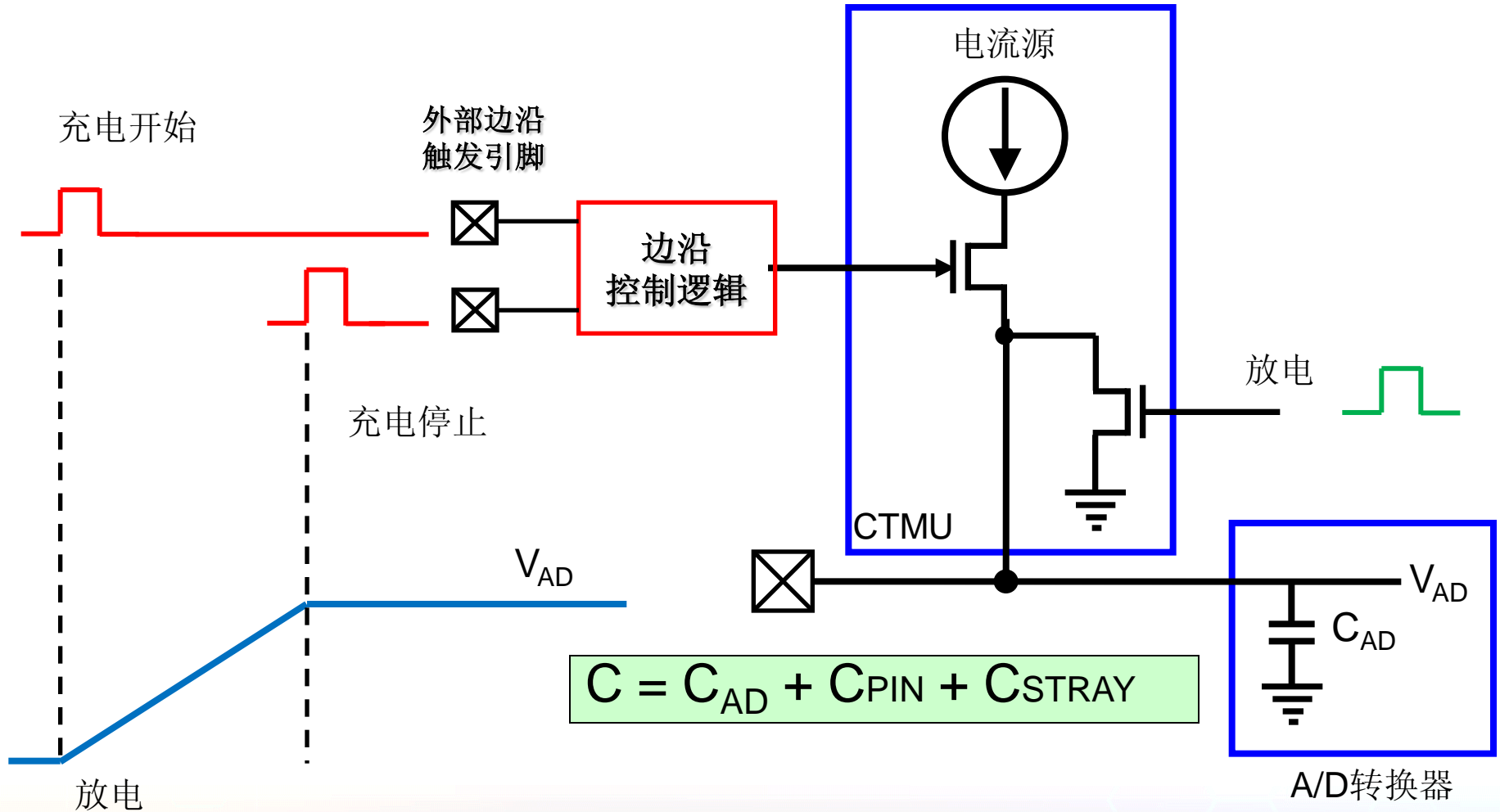
MASTERS Conference

使用CTMU 进行时间测量

时间测量的CTMU框图



CTMU如何测量时间



时间测量的基本公式

- EE101基本公式:

- 电容中的瞬时电流

$$i = C * (dv / dt)$$

- I和C是常量，所以重新调整公式...

$$dt = (C / I) * dv$$

- 积分之后:

$$T = (C / I) * V + K$$

公式1

- 通常K将为0
- 因此，T与V成正比

CTMU分辨率

- 使用10位A/D（1024个计数）

- 假设

- $I = 55 \text{ uA}$
- $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ pF}$
- A/D $V_{REF} = V_{DD}$

- 如果 $V_{DD} = 3.0V$ ，则1个A/D计数 =
 $V = 3.0/1024 = 2.93 \text{ mV}$

- CTMU时间分辨率为

$$T = (15 \text{ pF}/55 \text{ uA}) * 2.93 \text{ mV} = 0.799\text{nS}$$

$$T = \frac{C}{I} V$$

因此，分辨率可达到 < 1纳秒

如何提高分辨率

存在一些方法...

- 降低A/D VREF

- 使用外部2.5v VREF
 - $T = (15 \text{ pF}/55 \text{ uA}) * (2.5/1024) = 0.666 \text{ nS}$
- 使用内部带隙参考电压作为VREF

- 使用内部CTMU通道（无外部引脚连接）

- 只有 C_{AD} ，消除 $C_{PIN} + C_{STRAY}$
 - C越小，T就越小
 - $T = (4 \text{ pF}/55 \text{ uA}) * (3.0/1024) = 0.213 \text{ nS}$

- 使用外部高分辨率ADC

- 使用外部16位ADC
- 假设电容倍增为30 pF
- $T = (30 \text{ pF}/55 \text{ uA}) * (3.0/65536) = 24.9 \text{ pS} !!!$

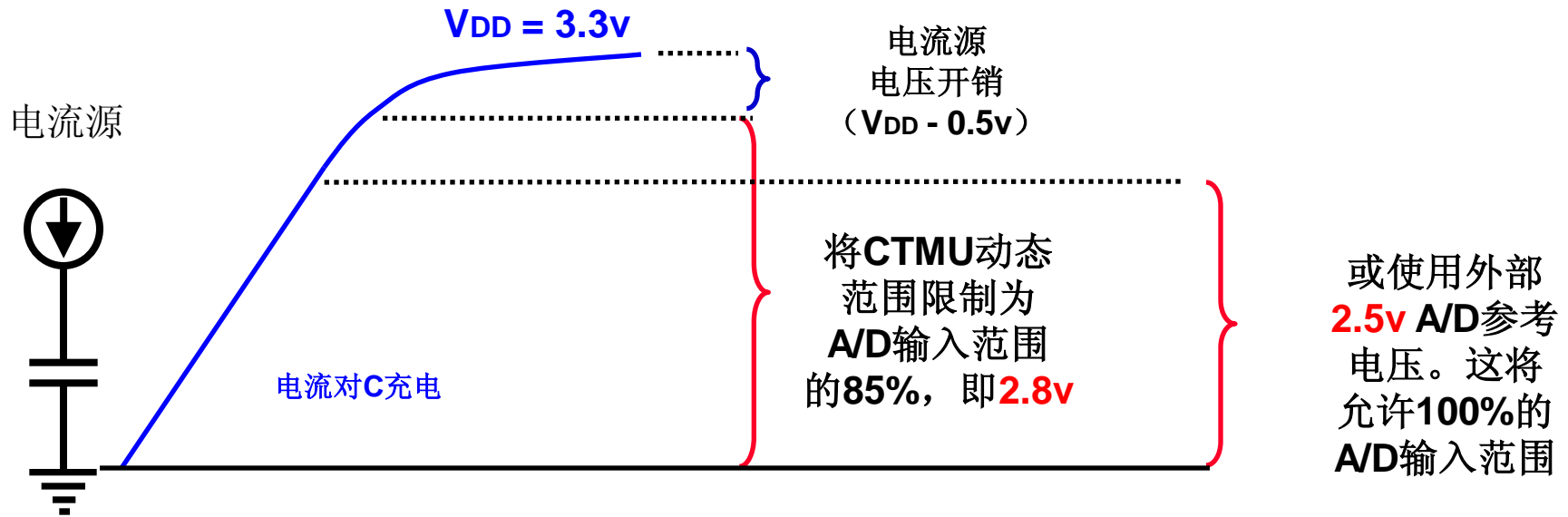
CTMU动态范围

- 动态测量范围受以下因素限制：
 - 总电容 ($C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY}$)
 - 充电电流
 - 最大A/D输入电压
- 假设
 - 10位A/D (1024个计数)
 - $I = 55 \text{ uA}$
 - $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ pF}$
- 分辨率为 (基于前面的幻灯片)
 - $T = (15 \text{ pF}/55 \text{ uA}) * 2.93 \text{ mV} = 0.799 \text{ nS}$
- 因此, 动态范围为
 - $0.799 \text{ nS} * 1024 \text{ 个A/D计数} = 818 \text{ nS}$
 - 或
 - $(15 \text{ pF}/55 \text{ uA}) * 3.0\text{v} = 818 \text{ nS}$

$$T = \frac{C}{I} V$$

动态范围注意事项

- 为了维持恒流，CTMU电流源需要一个很小的电压开销
 - 通常为 $V_{DD} - 0.5v$



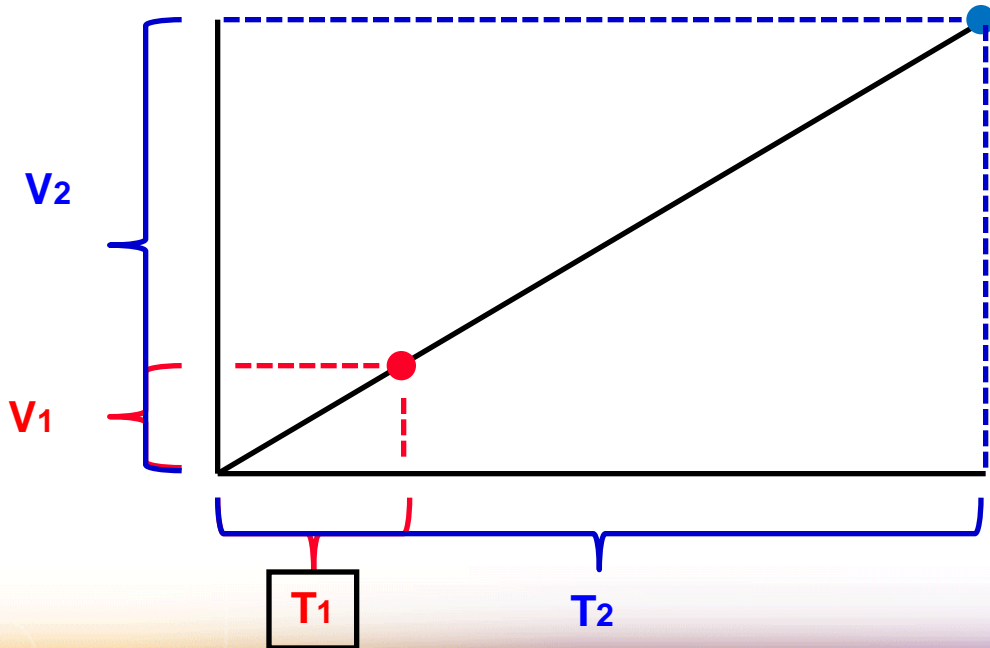
CTMU精度

- 根据设计，校准之后CTMU电流源的精度为（~ 1%）
 - 线性工作范围内的典型值
 - VDD电压范围内的典型值
 - 不同温度下的典型值
- 假设
 - $I = 55 \text{ uA}$
 - $C = C_{AD} + C_{PIN} + C_{STRAY} = 15 \text{ pF}$
 - A/D $V_{REF} = \text{外部} 2.5\text{V}$
- 动态范围T为
 - $(15 \text{ pF}/55 \text{ uA}) * 2.5\text{V} = 682 \text{ nS}$
- 线性工作范围内的精度为
 - $\sim 1\% * 682 \text{ ns} = \sim 6.8 \text{ nS}$
- A/D精度（0.1%）
 - 假设1 LSB $(1/1024) = 0.0009765$
 - CTMU精度是主要决定因素

校准CTMU

- 校准决定CTMU的增益和失调
- 无需确定C和I的精确值；只需确定斜率即可
- 步骤1——已知T₁（充电2个T_{cy}的时间）；测量V₁
- 步骤2——已知T₂（充电8个T_{cy}的时间）；测量V₂
- 步骤3——确定两点之间的斜率 $(T_2 - T_1) / (V_2 - V_1) = C/I$
- 步骤4——代入并求解失调K

➢ 根据EE101基本公式： $T = (C / I) * V + K$ 公式1



$$T_1 = (C/I) * V_1 + K$$

$$T_2 = (C/I) * V_2 + K$$

计算C/I

求解失调K:

如果 $y = mx + b$,
则代入...

$$T_2 = (C/I * V_2) + K$$

且

$$K = T_2 - (C/I * V_2)$$

如何测量更长的时间

- 是否可以扩大CTMU的动态范围？
- 绝对可以！——存在几种方式...

- 增大电容

- C增大时，T会增大

$$T = (100 \text{ pF} / 55 \text{ uA}) * 2.5\text{v} = 4.54 \text{ uS}$$

- 降低电流

- I降低时，T会增大

$$T = (15 \text{ pF} / 34 \text{ uA}) * 2.5\text{v} = 1.1 \text{ uS}$$

- 在两种情况下，C的充电时间都会变长，扩大时间测量的周期
- 但是，这两种方法都会降低分辨率

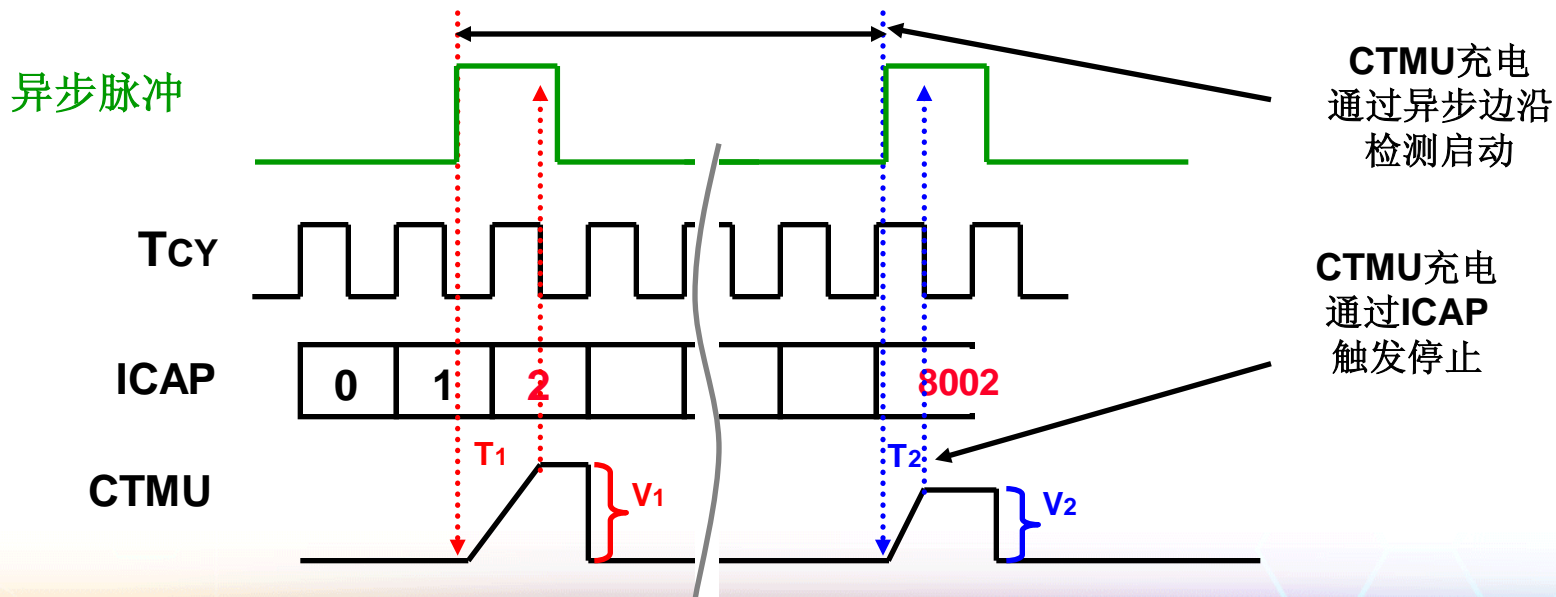
$$T = \frac{C}{I} V$$

- 如何才能既扩大CTMU动态范围而又不损失分辨率？

- 这是CTMU的一个**关键特性**，所以我们将下一张幻灯片中详细介绍它...

测量更长的时间

- 将CTMU与输入捕捉 (ICAP)、输出比较 (OCMP) 或Timer1组合使用
 - 基于指令时钟周期 T_{CY} 提供“粗粒度的”同步时间间隔 (例如, 对于PIC24F, 以16 MIPS工作时, 指令时钟周期为62.5纳秒)
 - CTMU用于测量“细粒度的”异步时间间隔
 - 测量总时间等于粗粒度时间 + 细粒度时间
- ICAP示例 = $T_{CY} * (8002 - 2) + (T_1 - T_2) = 500\text{微秒} + (T_1 - T_2)$



测量更长时间时的精度

- 精度
 - 粗粒度测量
 - 精度取决于晶振
 - 100 ppm晶振 (0.01%)
 - 精度是晶振精度 (或0.02%) 的一半
 - 抖动影响——抖动可通过对多个读数求平均值来消除
 - 细粒度测量
 - 校准之后的CTMU误差影响
 - 假设CTMU动态范围为500纳秒
 - 500 nS范围内CTMU的精度为1% (基于前面的幻灯片)
 - $1\% * (0.500 \text{ us} / 500 \text{ us}) \sim 0.001\%$
- 结论
 - 粗粒度 (0.02%) + 细粒度 (0.001%) = 0.021%
 - 精度主要由晶振精度决定

时间测量应用

- 超声波
 - 时差流量计
 - 距离测量
- 时域反射仪 (TDR)
- 激光或射频
 - 距离测量
 - 自适应巡航控制
 - 安全制动
- 脉宽测量



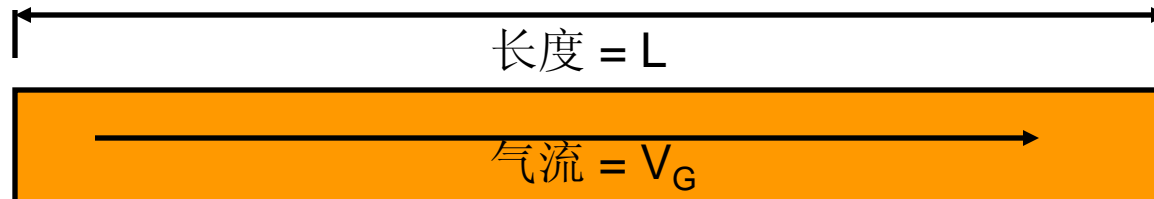
MICROCHIP 2010

MASTERS Conference

使用CTMU 进行超声波时差测量

使用CTMU模块 进行超声波流量测量

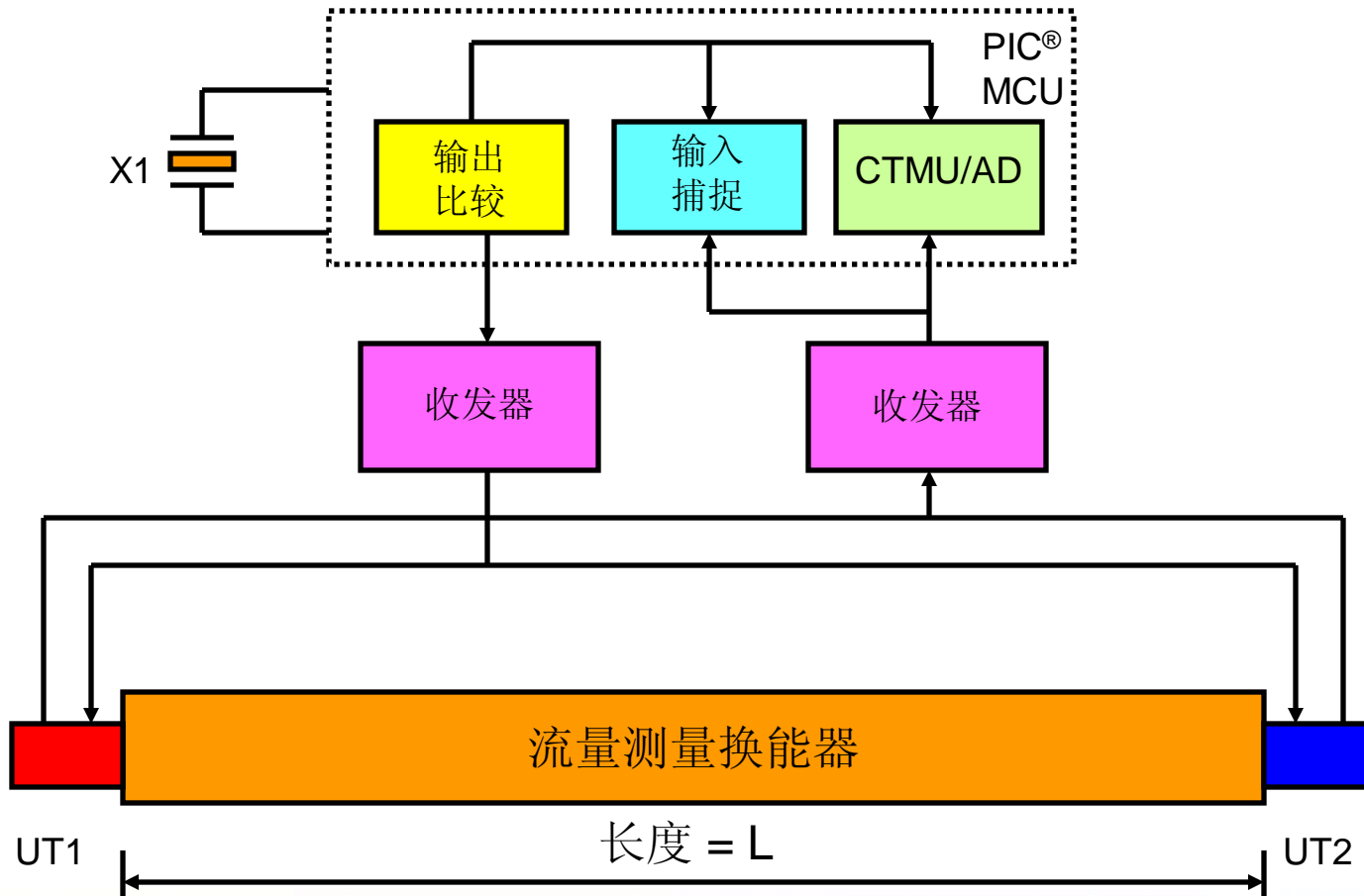
- 超声波时差测量需要测量超声波信号从发送器传播到接收器的时间
- 声速 $V_S = 1,125$ 英尺/秒 (342.9米/秒)
 - 干燥空气
 - 20摄氏度
 - 时间 $T = L / (V_S + V_G)$
 - $V_G = (L - T * V_S) / T$
 - 两次测量
 - 每个方向测量一次



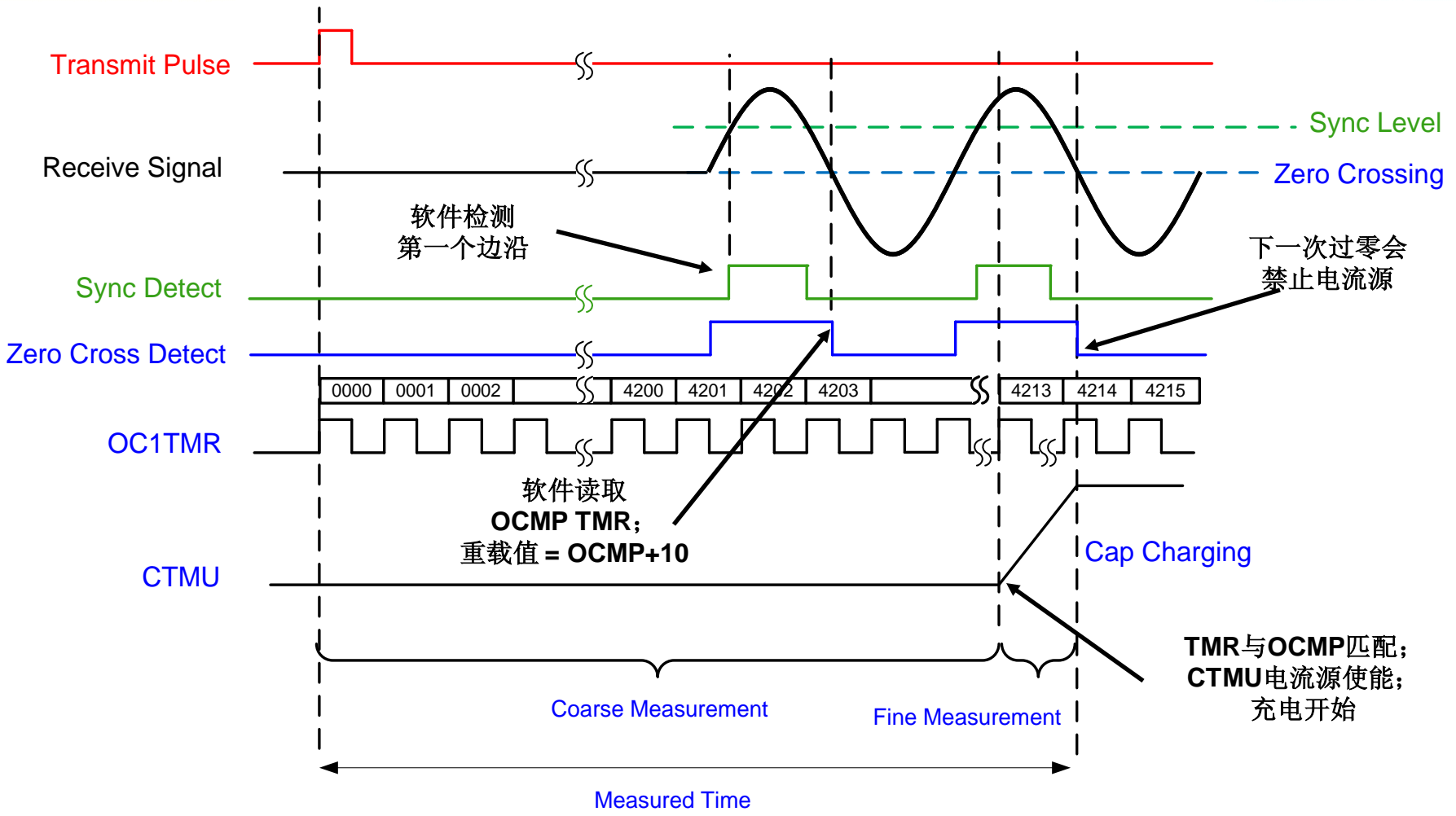
流量测量换能器

使用CTMU模块 进行超声波流量测量

框图



时差测量技术



使用CTMU模块 进行超声波流量测量

● 结论

● 测量范围

- 理论上，最大测量范围为声速，即可测量**0至100英尺/秒的范围**
- 在实践中，它受限于可保持层流的最大流速，这是一个**机械问题**

● 时间分辨率可达到1 nS；根据公式，这等价于

- **0英尺/秒时， $T = 888.257 \text{ us}$**
- **$V_g = (1 - (1125.8 * 888.256 \text{ uS})) / 888.256 \text{ uS} = 0.0013 \text{ 英尺/秒}$**
- 可达到**0.002英尺/秒**

流量测量——CTMU





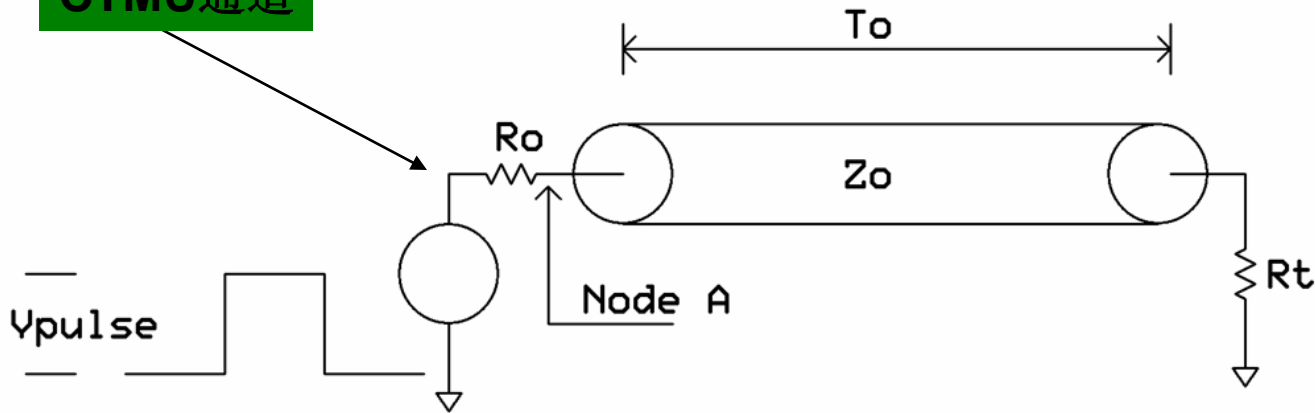
MICROCHIP 2010

MASTERS Conference

使用CTMU 进行TDR时间测量

TDR——工作原理

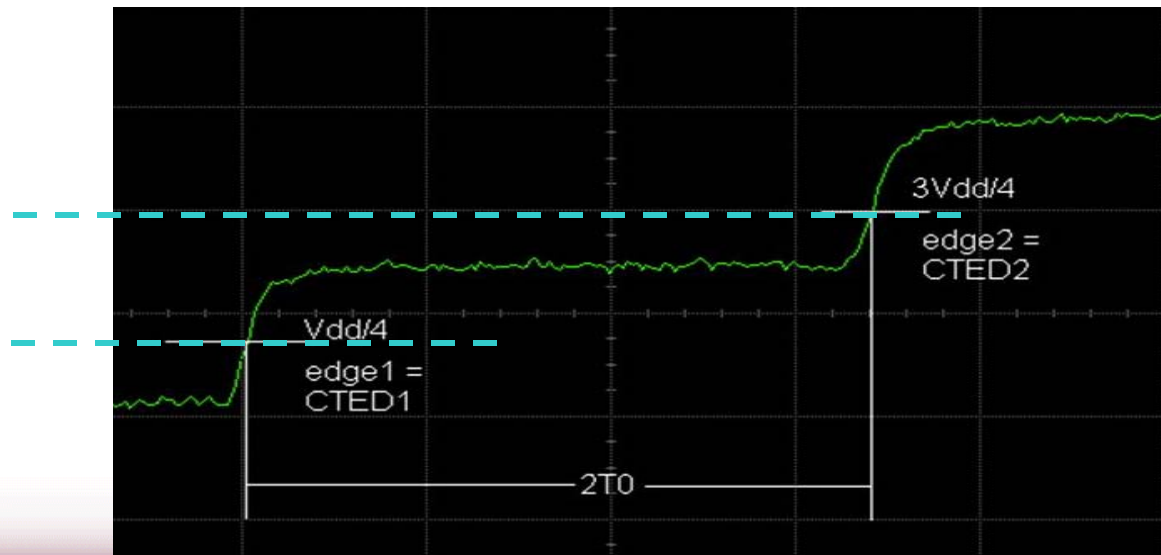
CTMU通道



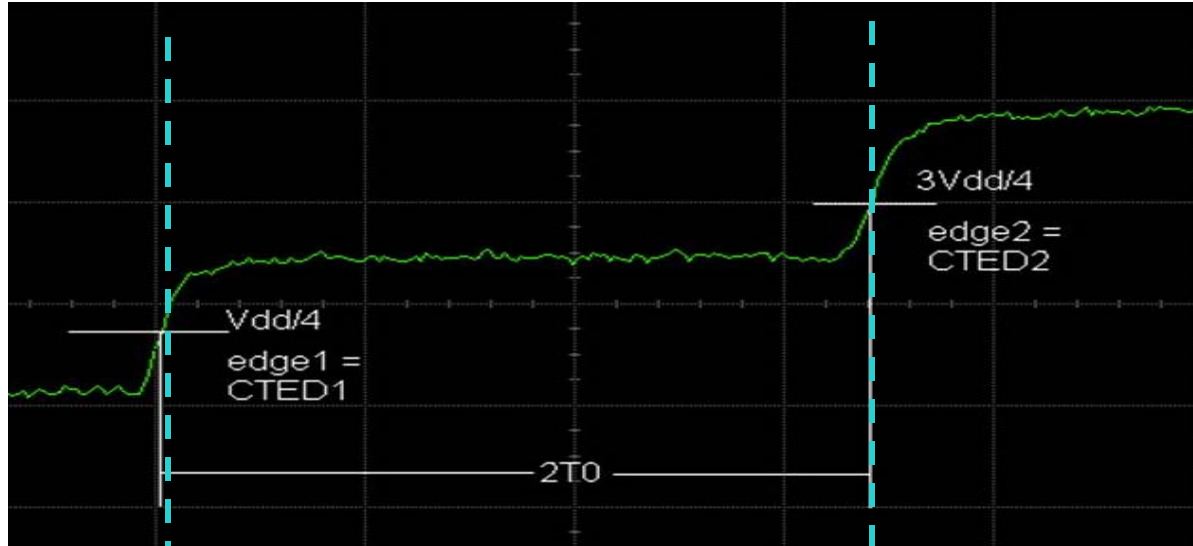
$R_o = 50$ 欧姆
 $Z_o = 50$ 欧姆
 $R_t =$ 无穷大 (开路)

$T = 2T_0$ ns 时
 节点A电压 =
 $V_p * (R_t / (R_t + R_o))$

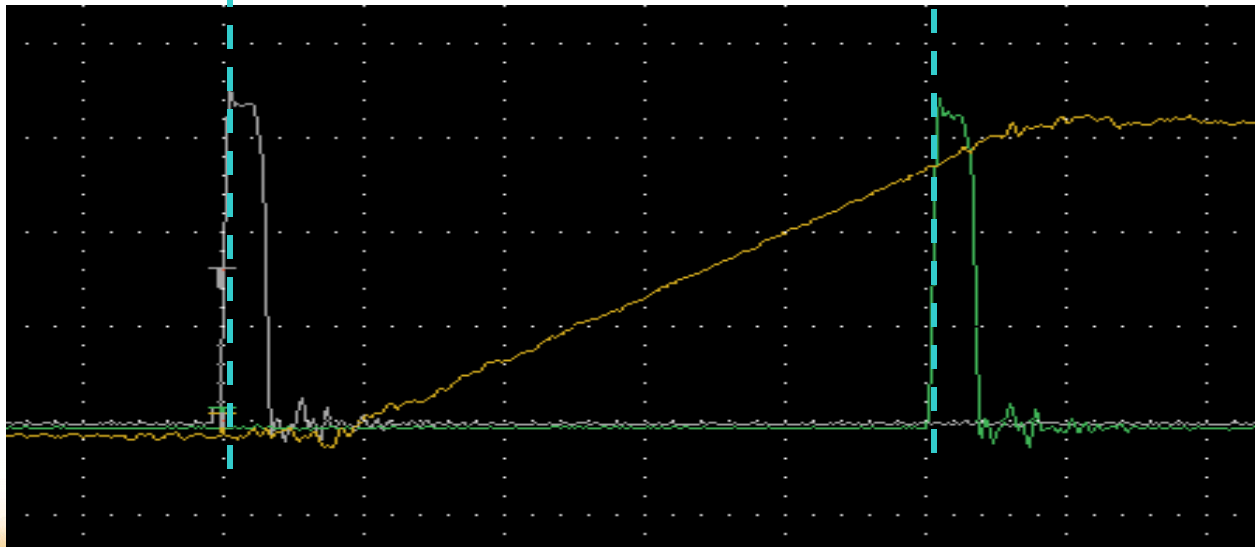
$T = 0$ ns 时
 节点A电压 (V_A)
 $= V_p * (Z_o / (R_o + Z_o))$



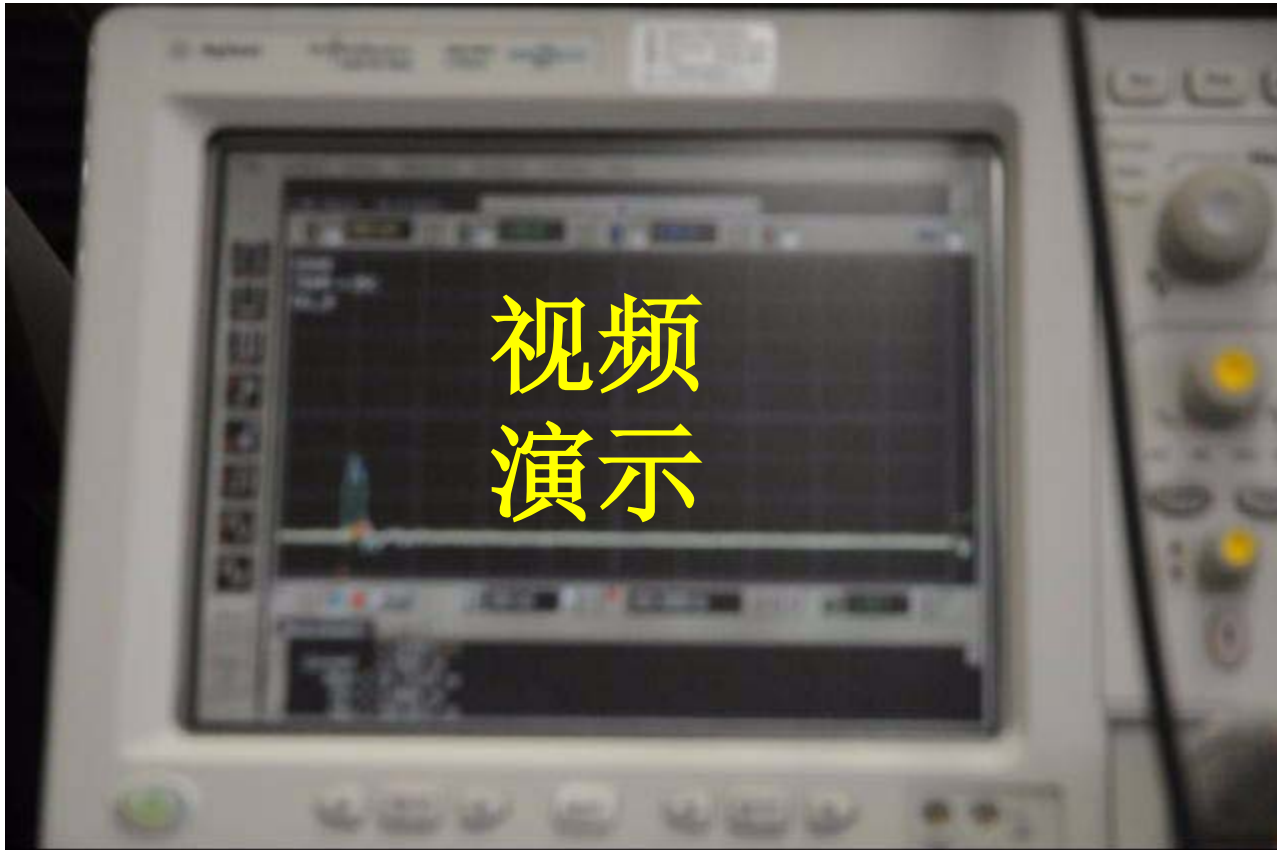
TDR测量



$2T_0$ 与电缆长度
直接关联



TDR测量——CTMU



CTMU的其他用途？

- 电容测量

- 绝对

- 相对

- 电容触摸——涉及**Bruce**的课程

- 温度测量

- 电感测量



MICROCHIP 2010

MASTERS Conference

使用CTMU 进行电容测量

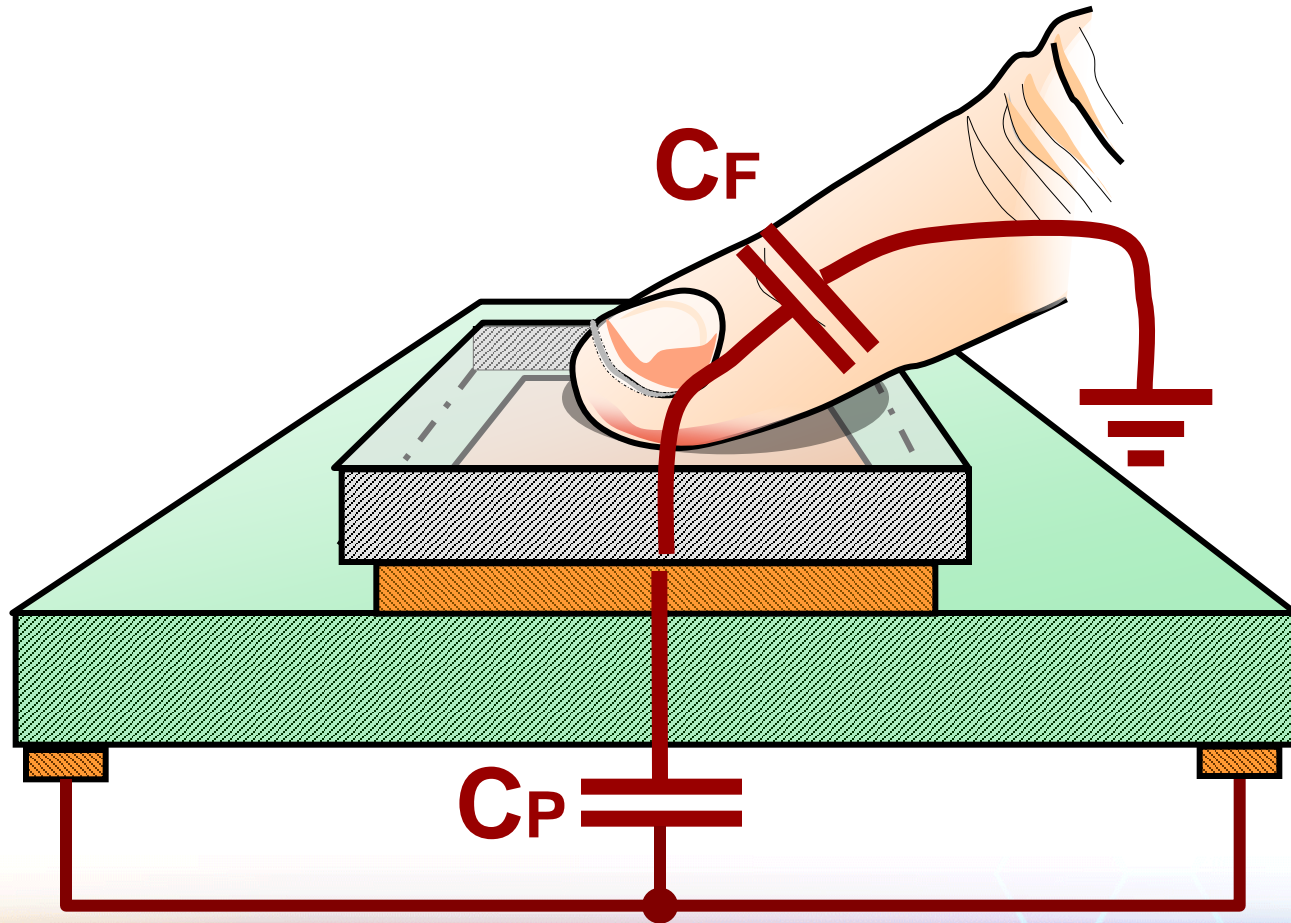
使用CTMU进行电容测量

典型应用

- 相对测量
 - 电容触摸 
 - 电容式麦克风
- 绝对测量
 - LCR测量仪
 - 湿度测量

电容触摸 它如何工作？

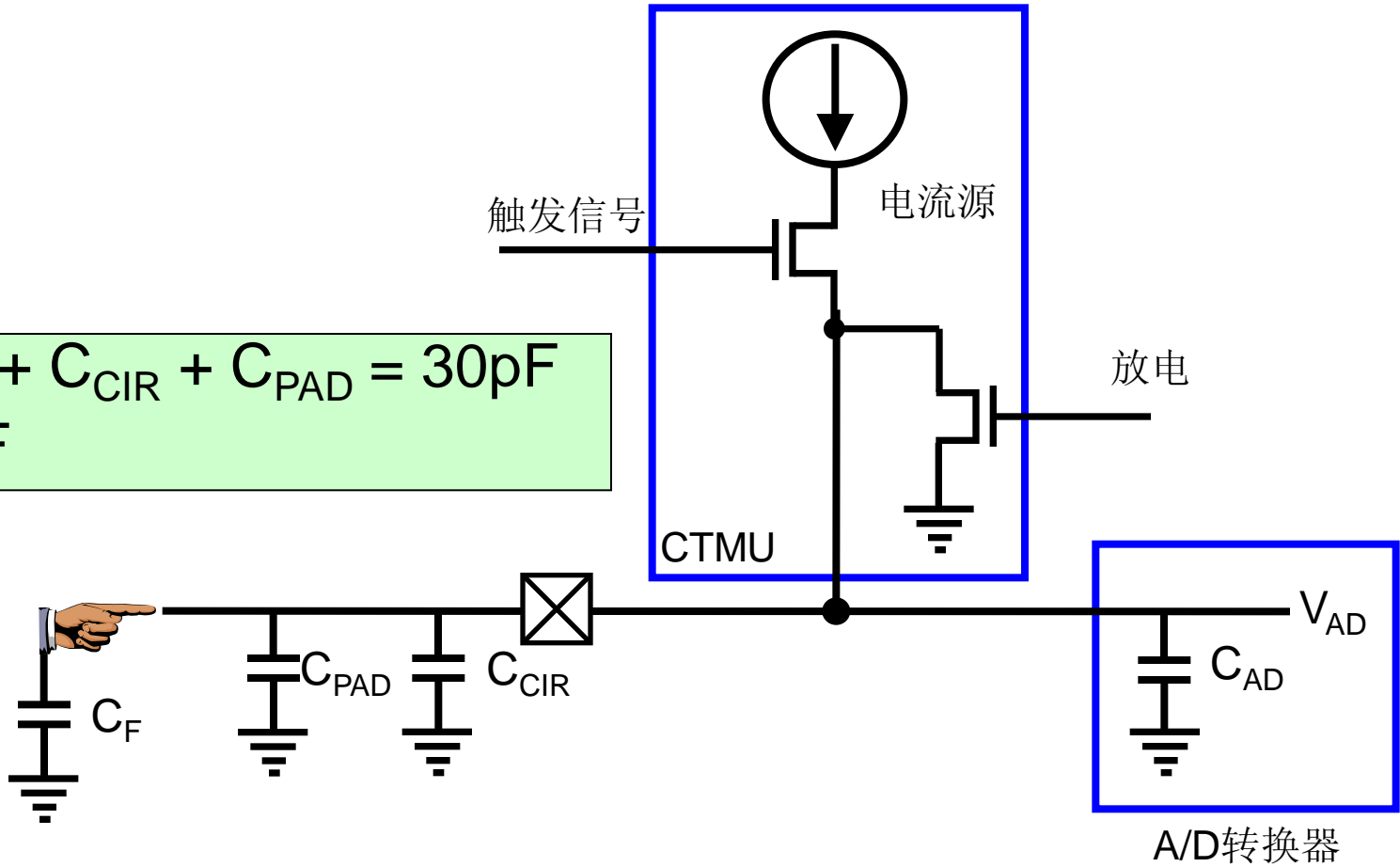
工作原理：手指接触时会产生并联电容



CTMU触摸电路元件

$$C = C_{AD} + C_{CIR} + C_{PAD} = 30\text{pF}$$

$$C_F = 7\text{pF}$$



电容测量的基本公式

回顾EE101基本公式:

- 电容中的瞬时电流

$$i = C * (dV/dt)$$

- 由于*i*和*C*是常量, 所以

$$I = C * V/t \quad \longrightarrow \quad I * t = C * V$$

- 积分之后

$$C = (I * T) / V$$

- 因此, **C增大**时, **V**必定降低

相对电容测量

- 基于前面的幻灯片...

$$C = (I * T) / V \quad \longrightarrow \quad V = (I * T) / C$$

- 对于电容触摸应用，感兴趣的只是**C**的相对变化而不是绝对值
- 由于**I**和**T**是常量，所以只需检查**V**的变化即可——非常简单！
- 不需要关心**I**和**T**的实际值

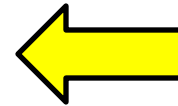
CTMU如何工作



使用CTMU进行电容测量

典型应用

- 相对测量
 - 电容触摸
 - 电容式麦克风
- 绝对测量
 - LCR测量仪
 - 湿度测量



绝对电容测量

- 基于前面的幻灯片...

$$C = (I * T) / V \quad \longrightarrow \quad V = (I * T) / C$$

- 对于需要测量绝对电容的应用（例如湿度传感器和电容计等），可使用同一公式
- 这种情况下，**T**是已知的
- 必须校准**I**

电容测量CTMU校准

校准

- **$C = (I * T) / V$**
 - $C = C_{\text{measure}} + C_{\text{ADC}} + C_{\text{PAD}} + C_{\text{PIN}} + C_{\text{STRAY}}$
 - 为了进行校准，使 $C_{\text{measure}} = 0$
 - $C_{\text{system}} = C_{\text{ADC}} + C_{\text{PAD}} + C_{\text{PIN}} + C_{\text{STRAY}}$

电容测量CTMU校准

● 方法1

- 使用软件产生两个精确时间
 - 将CTED1置1，将CTED2置1 (**T1**)
 - 将CTED1置1，执行Nop，执行Nop，将CTED2置1 (**T2**)
- 使用这两个时间来计算 C_{system} 和 **I** 的值

电容测量CTMU校准

● 方法2

- 在电路板上添加高精度电阻
 - 使用电阻和ADC测量电流
 - 测量 C_{system}

电容测量——CTMU

分辨率

● 假设:

- 10位A/D
- $T = 500 \text{ nS}$ (已知)
- $V = 1\text{V}$ (测量得到)
- $I = 55 \text{ uA}$ (已知)
- $C = (55 \text{ uA} * 500 \text{ nS}) / 1\text{V} = 27.5 \text{ pF}$
- 如果电压分辨率为 $3.00/1024$ (或 2.93 mV)
 - 那么, 1位A/D为
 - $C = (55 \text{ ua} * 500 \text{ ns}) / 1.00293 = 27.42 \text{ pf}$
 - $\Delta C = (27.5 - 27.4) \text{ pF} = 0.08 \text{ pF}$

CTMU如何工作





MICROCHIP 2010

MASTERS Conference

使用CTMU 进行温度测量

温度测量——CTMU

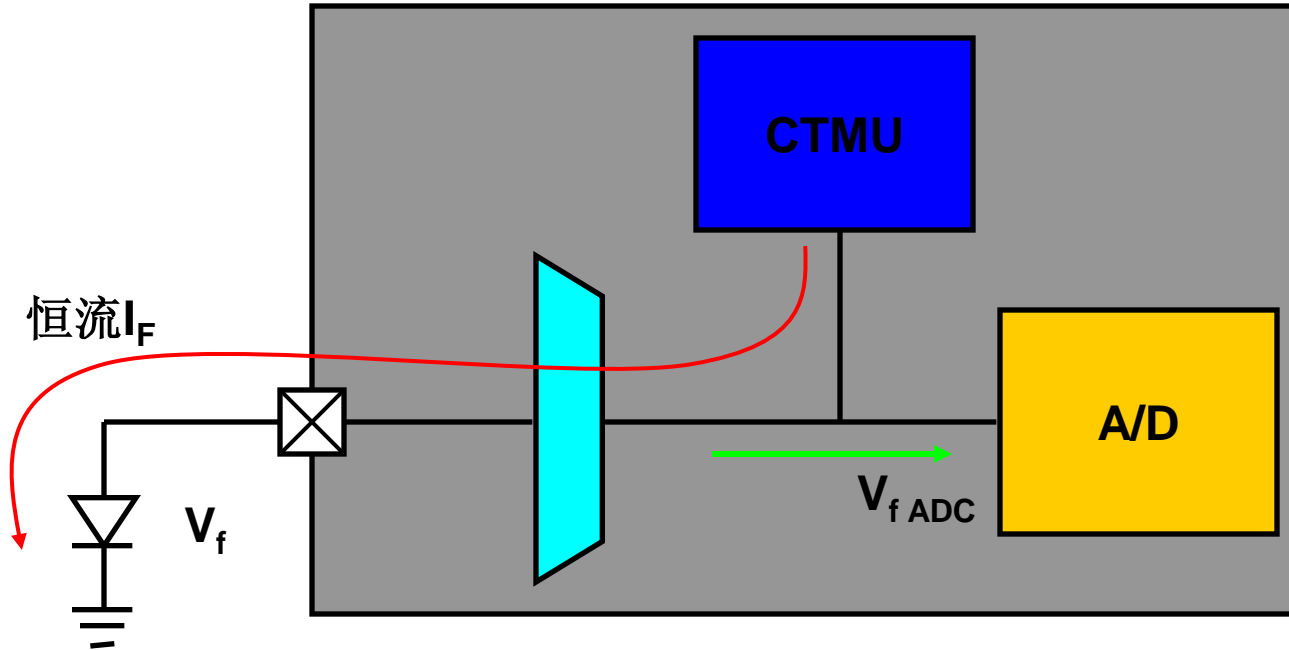
典型应用

- 家庭温度调节控制
- 电子设备温度监控
- 低成本医疗温度计

温度测量

- 二极管的正向电压会随温度而变化
- 可以使用**CTMU**测量温度
 - 不同电压和温度下的恒流源
 - 二极管
 - A/D转换器

使用CTMU和二极管测量温度



基本二极管公式
正向电流 $I_F = I_S(e^{qV_f/nkT} - 1)$
 I_F 为常量, 那么
 $\ln(I_F/I_S + 1)nk$ 为常量

$$T \propto V_f$$

温度测量——CTMU

基本二极管公式

- $I = I_0(e^{(qV/kT)} - 1)$

公式1

- $I/I_0 + 1 = e^{(qV/kT)}$

公式2

- $\ln(I/I_0 + 1) = qV/kT$

公式3

- $\ln(I/I_0 + 1) = B$

公式4

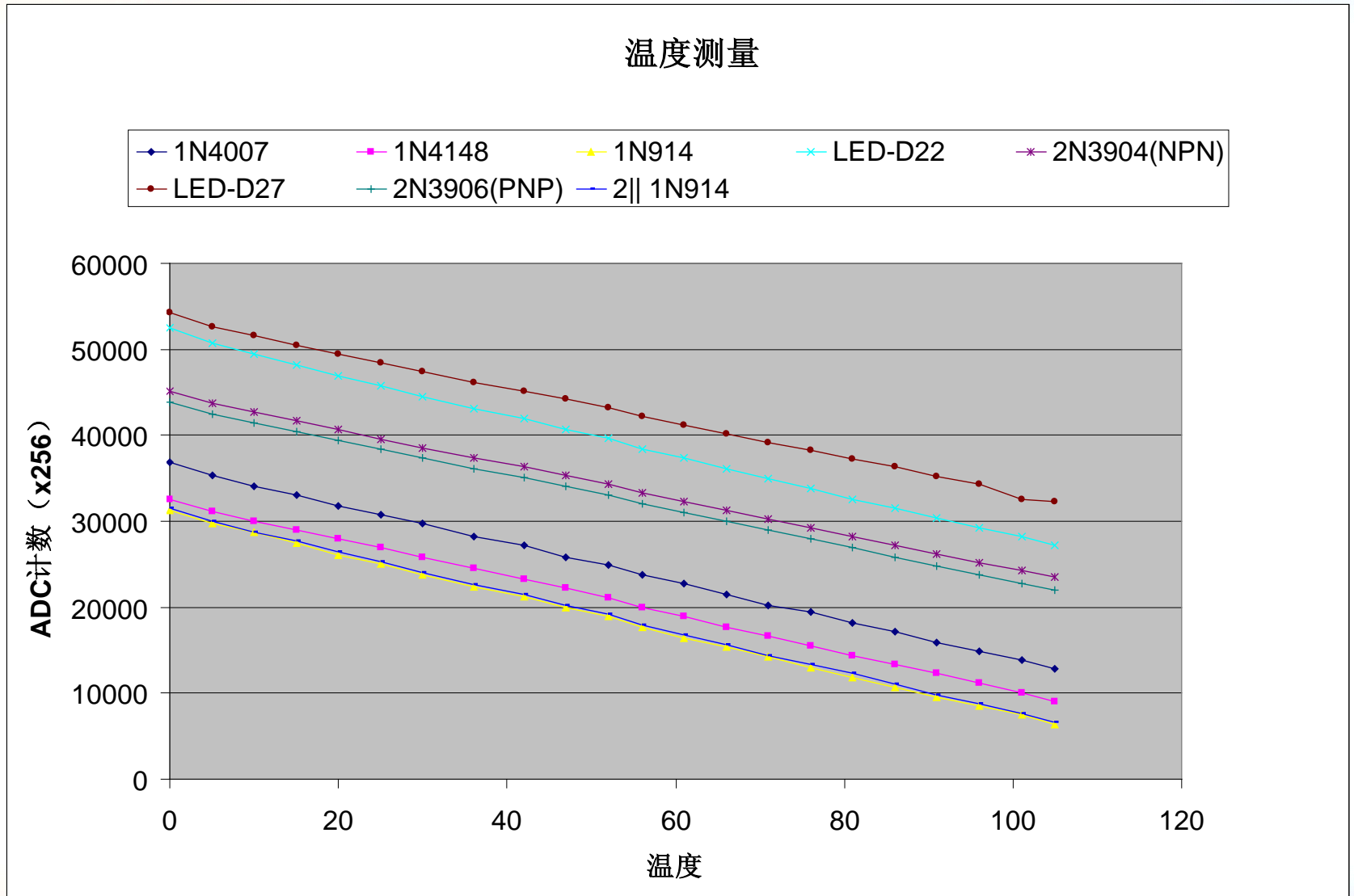
- $T = qV/kB$

公式5

- 所以温度T与二极管两端电压V成正比

- 后面的图中显示了该关系

温度测量——CTMU



温度测量——CTMU

校准

- 从图中可以确定T和V之间存在线性关系
- 在两个温度下测量电压
 - 对于精度较低的应用，单点失调校准可能已经足够
- 计算增益和失调

温度测量——CTMU



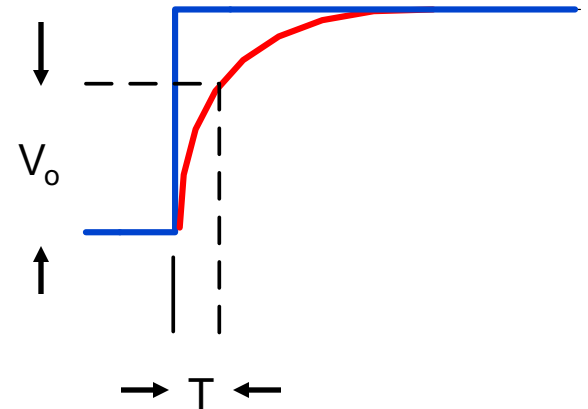
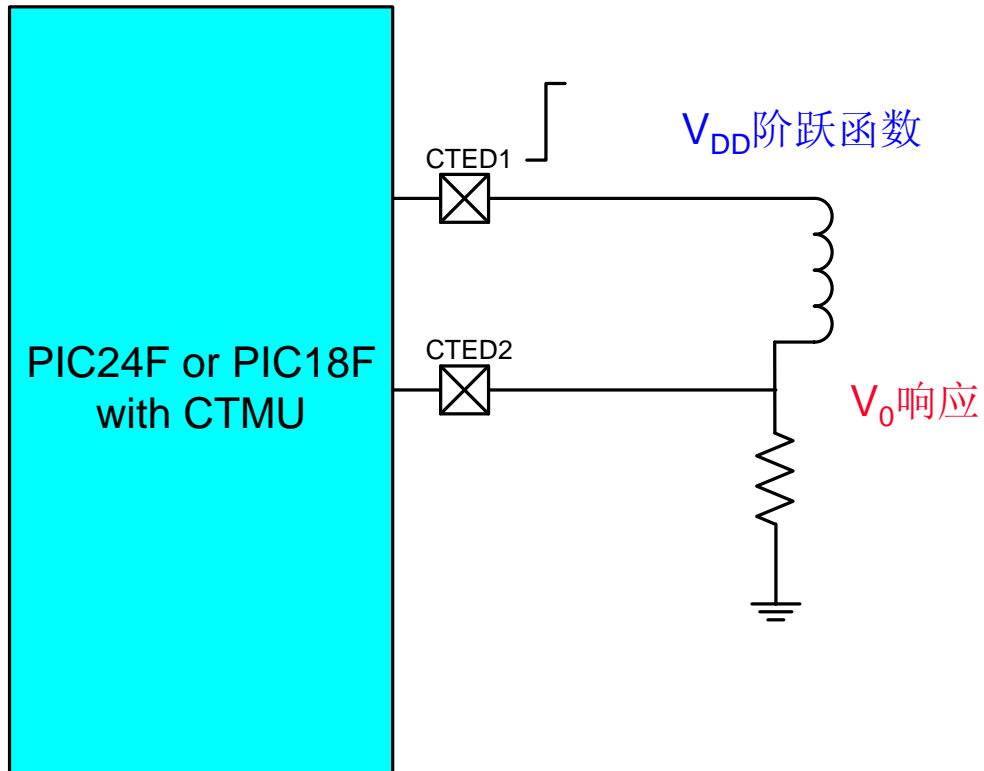


MICROCHIP 2010

MASTERS Conference

使用CTMU 进行电感测量

电感测量——CTMU



电感测量——CTMU

电感公式

- $I = V_{DD}/R(1 - e^{(-TR/L)})$ 公式1
- $V_0 = V_{DD} (1 - e^{(-TR/L)})$; 其中, $V_0 = IR$ 公式2
- $1 - V_0/V_{DD} = e^{(-TR/L)}$ 公式3
- $-TR/L = B$ Where $B = \ln(1 - V_0/V_{DD})$ 公式4
- $L = -TR/B$ 公式5
- 请注意T和L之间的线性关系

分辨率计算

假设:

- $R = 1K$
- $V_0 = 1V$
- $V_{DD} = 3V$
- $T = 500 \text{ nS}$
- $L = (-1000/-.405) * 500 \text{ nS} = 1.233 \text{ mH}$
- 时间差量为 0.8 ns
- $L = (-1000/-.405) * 500.8 \text{ nS} = 1.235 \text{ mH}$
- 分辨率为 2 uH

电感测量——CTMU





MICROCHIP 2010

MASTERS Conference

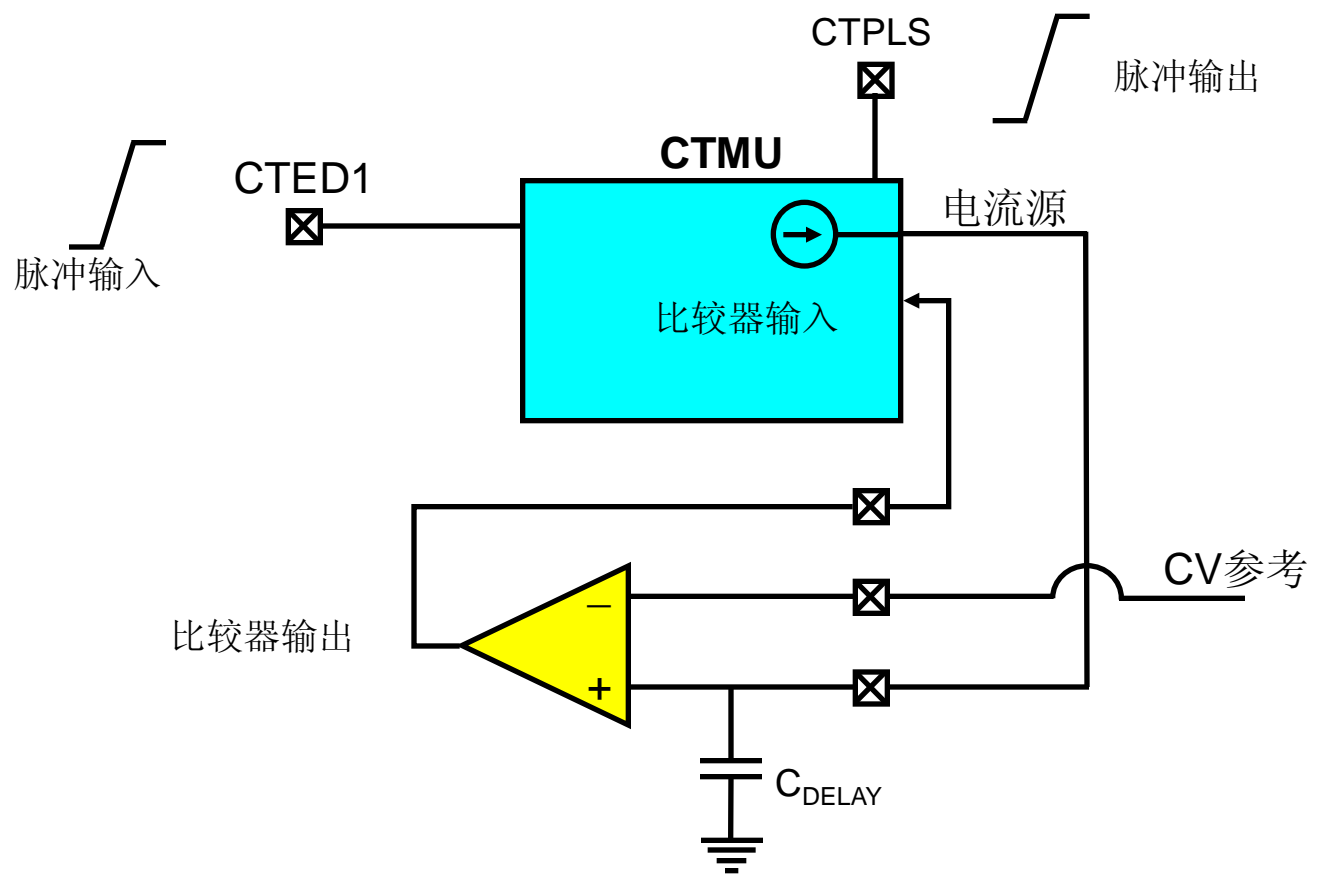
使用CTMU 产生PWM/脉冲延时

PWM/脉冲延时——CTMU

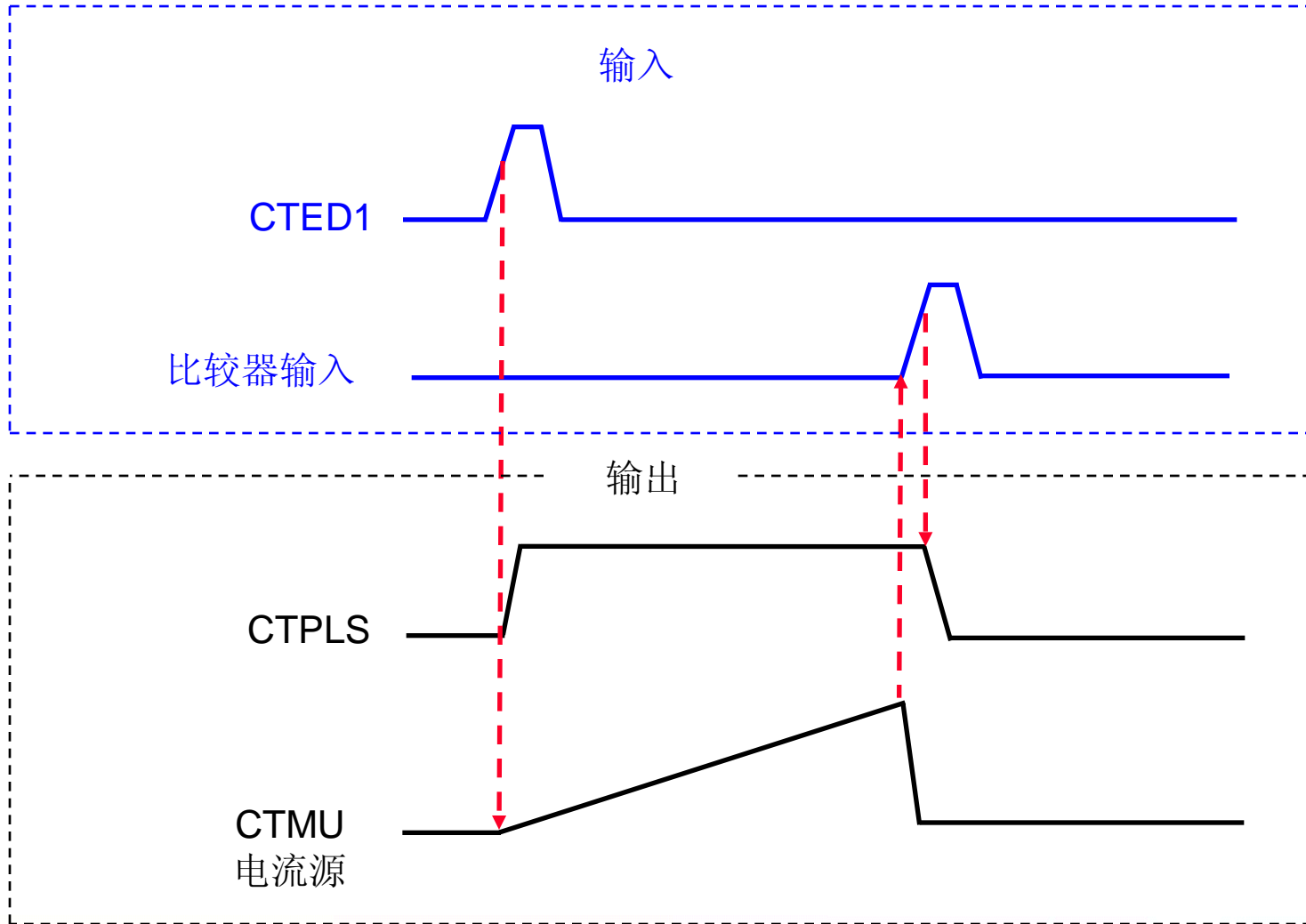
典型应用

- 雷达/声纳系统的消隐脉冲
- 高频PWM
- 测试设备的高精度边沿延时

PWM/脉冲延时——CTMU 硬件设置



PWM/脉冲延时——CTMU



脉冲测量——CTMU



CTMU总结

- CTMU代表“充电时间测量单元”
- 它是一种灵活的模拟模块，与其他片上模拟模块配合使用时，可以精确地测量：
 - 时间
 - 电容
 - 电容相对变化
 - 产生异步输出脉冲
- 恒流源
- 通过外部或内部触发源触发
- 许多PIC24F和PIC18F系列单片机中都有提供

CTMU使用总结

- 时间测量

- 使用CTED1与CTED2可启动和停止CTMU电流源
- ADC读取的电压代表时间

- 电容测量

- 使用处理器指令周期时间作为固定量
- ADC读取的电压代表电容

- 温度测量

- 硬件只需要单个二极管
- 使用基本二极管公式；温度与电压成正比

- PWM/脉冲延时

- 使用内部比较器/内部参考电压
- 延时由与比较器输入连接的 C_{DELAY} 设置

1432 CTMU总结

- 今天介绍了：
 - CTMU模块，以及如何将它用于：
 - 精确时间测量
 - 电容测量
 - 讨论了其他CTMU应用
 - 温度
 - 湿度
 - 电感
 - 脉冲延时

其他相关的MASTERS课程

- **C11H01 CTH——Microchip mTouch™电容触摸传感解决方案**

CTMU资源

- *Capacitive Sensors*, 作者: Larry K. Baxter
ISBN 0-7803-5351-X
- **AN1101**, 电容触摸传感简介
 - 网上研讨会
- **AN1102**, 电容触摸传感器布线和物理设计指南
 - 网上研讨会
- **DS39724**, CTMU参考手册

商标

Microchip的名称和徽标组合、Microchip徽标、dsPIC、KeeLoq、KeeLoq徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PIC³²徽标、rfPIC和UNI/O均为Microchip Technology Incorporated在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Hampshire、HI-TECH C、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL和The Embedded Control Solutions Company均为Microchip Technology Incorporated在美国的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、HI-TIDE、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、Omniscient Code Generation、PICC、PICC-18、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、REAL ICE、rfLAB、Select Mode、Total Endurance、TSHARC、UniWinDriver、WiperLock和ZENA均为Microchip Technology Incorporated在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP是Microchip Technology Incorporated在美国的服务标记。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2010, Microchip Technology Incorporated, 版权所有。