

一种高精度单斜率 AD 及其单片机实现

摘要：介绍了一种利用 MSP430 F1121 单片机构成的采用类似于 - 技术的高精度的单斜率 AD。分析了工作原理和参数计算。提供了分辨率，精度，线性度，稳定性等性能的测试结果，并讨论了它们的影响因素和应用。

关键词：MSP430 单片机 单斜率 AD

一 引言

AD 转换最常用的方法是逐次逼近法 (SAR)，转换时间固定且快速是其最大特点，但要明显提高分辨率有一定困难。积分型 AD 有较强的抗干扰能力，但转换时间较长。而过采样 - A/D 由于其高分辨率，高线性度及低成本的特点正得到越来越多的应用。TI 公司的 MSP430F1121 单片机内带有一个模拟比较器，因此，只须外接一只电阻和电容即可构成一个类似于 - 技术的高精度单斜率 AD。

二 测量电路及过程

MSP430 于 F1121 是 16 位 RISC 结构的 FLASH 型单片机。有 14 个双向 I/O 口并兼有中断功能。一个 16 位定时器，兼有计数和定时功能。一个模拟电压比较器。

测量电路如图 2-1 所示。

MSP430F1121 工作电压为 1.8-3.6V。I/O 口输出高电平时电压接近 V_{cc} ，低电平时接近 V_{ss} ，因此，一个 I/O 口可以看作一位 DAC，具有 PWM 功能。测量时 P2.4 引脚接被测电压。P2.0 口输出一串占空比为 50%，脉宽为 T_p 的脉冲。当电容充电到 $V_{out}=V_{in}$ 时，比较器输出将翻转，这一过程称为预充电。此后为维持 $V_{out}=V_{in}$ ，P2.0 继续输出脉冲。

程序开始对总的输出脉冲数 N 和输出为高的

脉冲数 n 进行计数。P2.0 口根据比较器的输出状态来决定是输出高还是低电平，如果比较器输出为低，表示 $V_{out}<V_{in}$ ，则 P2.0 口输出为高，反之，输出为低。当输出 N 个脉冲后停止计数，则此时高脉冲数 n 与被测电压 V_{in} 成正比。即以 V_{cc} (这里为 3.0V) 对应于 N (这里为 3000) 个脉冲，如果 n 为 1500，则 $V_{in}=1/2V_{cc}$ ，即 V_{in} 为 1.5V，相应地，每个高脉冲代表 1mV，这样可以用于比例式测量和绝对值测量。

三 原理分析

经预充电后， $V_{out}=V_{in}$ ，此后 P2.0 在电容 C 上反复充放电，虽然电容充放电是非线性的，但由于充放电幅度极小，只要满足 $RC \gg T_p$ ，则在一定精度内可以认为充放电过程是线性的。其波形如图 3-1。

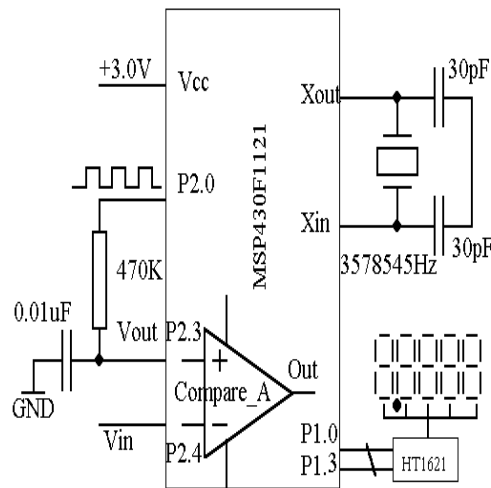


图 2-1 测量电路图

图中虚线表示总的脉冲，实线是输出为高的脉冲，如果把相邻的高电平和相邻的低电平看成为一个脉冲，分别为 TH1, TL1, TH2, TL2... 虽然 TH1=TH2=... 和 TL1=TL2=... 不一定成立，但从总体效果来看，可以认为它们是等宽的。那么，n 个高电平和 N-n 个低电平成了 m 个大脉冲。其中， $TH=n/m*Tp, TL=(N-n)*Tp/m$ 。

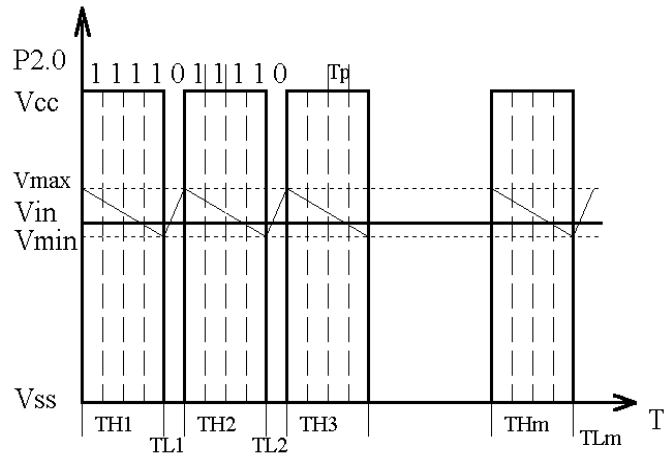


图 3-1 电容充放电过程示意图

充电时， $V_{max}=V_{cc}+[U_{min}-V_{cc}]*\exp(-TH/RC)$

放电时， $U_{min}=U_{max}*\exp(-TL/RC)$

由上两式得：

$$U_{max} (1-\exp(- (TH+TL) /RC)) =V_{cc} (1-\exp(-TH/RC))$$

在一定的误差范围内有 $U_{max}=V_{in}$ ，则：

$$V_{in} (1-\exp(- (TH+TL) /RC)) =V_{cc} (1-\exp(-TL/RC))$$

在 $(TH+TL) /T \ll 1$ 时，指数项用泰勒级数展开后，得：

$$V_{in} *N/m =V_{CC} *n/m$$

$$\text{即 } V_{in} =n *V_{CC} /N$$

五 参数计算

用 U_{max} 分别减去式 2 等式两边得：

$$DU=U_{max}-U_{min}=U_{max}(1-\exp(-TL/RC)) \ll V_{cc}(1-\exp(-TL/RC)) - V_{cc}(1-\exp(-TP/RC))$$

如果 $DU=+-1LSB$ ，在 $N=3000$ ，主频为 3.5MHZ 时， Tp 为 14 个 CPU 周期，约 3.9us，则 $RC=0.016$

取 $R=470K$ ，则 $C=0.035uF$

六 软件设计

测量子程序框图如图 6-1 所示。

P2.0 输出的脉冲宽度由程序中输出高或低电平的运行时间决定，因此应尽量缩短这段程序的执行时间，另外，P2.0 输出必须为对称的方波，如果程序中输出为高或为低的时间不一样，将会造成很大的误差。

程序中必须先设定一个总的采样时间 N，它也决定了分辨率，执行一次测量子程序只运行 N/2 的时间，因此，必须调用两次，把两次的高电平个数相加才为 n。这样做的目的是为了利用 MSP430F1121 单片机的模拟比较器特性，即在一次测量子程序调用后，内部交换同

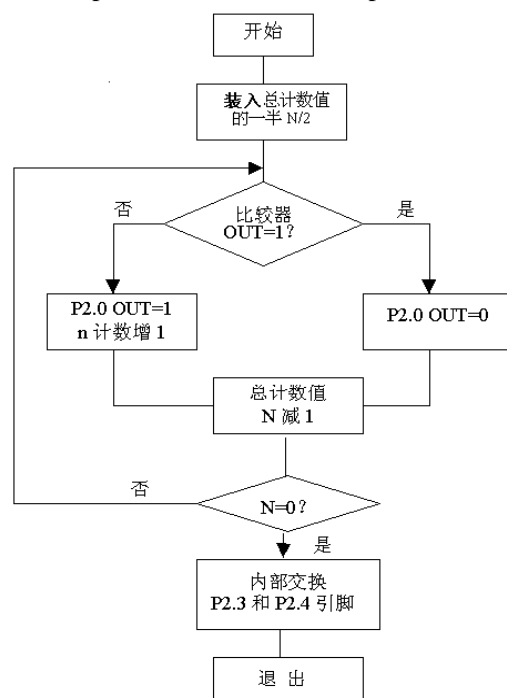


图 6-1 程序框图

向和反向输入端的端口，以抵消比较器的输入偏置电压引起的误差。

七 分辨率，精度，稳定性，线性度及影响因素

分辨率：由预设的总测量时间 N 来决定，如果 N 取 4096 (214BIT)，则分辨率为 14 位，如果 N 取 65535，则分辨率为 16 位。分辨率的大小将影响测量时间，从而影响采样频率。在主频为 3.578545Hz 时，一个 T_p (即 P20 口输出一个高或低电平) 的时间为 14 个 CPU 周期，约为 $1/3578545=3.9\mu s$ ，则 $N=4096$ 时一次测量的时间为 16ms，如果 $N=65535$ ，则一次测量的时间为 256ms，这还不包括预充电时间，不是连续测量，则应考虑预充电时间。

精度：是实际测量结果和真实值之间的最大误差。真实值用分辨率为 24 位的高精度测量仪测量的结果代替，实际测量结果为五次测量的平均。

稳定性：在 0-3V 之间均匀取 15 个测量点，每个点在 5 秒钟内测量 5 次 (液晶显示上读取 5 个测量值)，取它们的最大差值为该测量点时的波动值，以 15 个波动值中的最大值来衡量稳定性，图 8 是不同条件下测量的相对误差。

线性度：与基准曲线有关，选择的基准曲线不同所计算的线性度也不同，直观上我们的测量结果已有很高的线性度，因此我们采用端基法选择基准曲线，由于原理上的原因，端点附近的测量误差较大，因此我们选过 1.0V 和 2.0V 点的直线作为基准直线，图 10 是不同条件下测量的线性度。

影响因素有：

1 电源电压 VCC。

因为 P2.0 输出高电平为 VCC，程序中又以 VCC 作为参考电压，因此，VCC 越稳定，测量结果越准确。一般经 DC-DC 变换，稳压以后提供 VCC。VCC 对绝对值测量影响较大，对相对值测量影响较小。

2 晶振频率。

晶振频率将影响 CPU 时钟，CPU 运行越快，则 T_p 越小，RC 相对越大，则越能满足近似的条件，误差应越小。CPU 执行加快，则采样频率可以相应提高。

晶振的稳定性将影响 P2.0 输出的方波的对称性，其影响同程序中输出高或低电压的时间不相等时一样。

3 RC 参数的影响。

理论上，RC 越稳定，则测量结果越稳定，实际上 RC 的稳定性对测量结果的稳定性影响不大。图 7 可以看出当我们在其他条件不变时，电容值在 0.1UF 与 0.001UF 之间变化时，测量的线性度基本上没有影响。而且，电容越小，则测量结果的稳性越好，我们认为原因可能是电容越大，则漏电流越大，造成电压波动越大。测量结果对 RC 参数不敏感的特性也是 - 类技术的特点之一，具有很好的实际意义。

4 比较器的输入端失调电压。

比较器同向输入端和反向输入端均存在失调电压，由于测量过程中电容上的充放电波动幅度较小 (理论上控制在 $\pm 1LSB$)，与失调电压具有可比性，因此失调电压对测量精度的影响不可忽略。MSP430 由于内部可以进行输入端口的交换，经两次调用测量子程序后可以最大限度地抵消失调电压的影响。

5 噪声干扰

由于比较器的被测电压输入端 (VIN) 没有采样保持电路，因此，如果测量的是快变信号将会产生比较大的误差，同样，如果输入端引入了干扰，测量误差将增大。我们在用交流供电的高精度测量仪时，测量的相对精度变差。可以通过在输入端加滤波电容来减轻这种影响。

6 软件的影响

主要是采样子程序中 P2.0 输出高或低电平不对称，占空比不是 50%。图是输出高电平比输出低电平多 2 个 CPU 周期后的测量结果。原因可能是没有计算输出高或低电平的执行时间，如果两者不相等，可在时间短的一方加入空操作指令。另一个可能是在测量子程序运行时没有关闭其他中断，导致额外的充/放电时间。

八 应用

适合于测量缓慢变化的量，如温度，压力，光，电压等。结合 MSP430F1121 的超低功耗特点，比较适合于电池供电的便携式仪器。

可以进行比例式测量和绝对值测量。进行绝对值测量时参考电压为 VCC，只须在程序中预先指定对应于 VCC 的 N 值。

比例式测量中可以选择外部电压作为参考电压，也可以选择三种内部电压作为参考电压： $1/2V_{CC}$ ， $1/4V_{CC}$ 和一个二极管压降电压。

图 2-1 是一个最简单的测量系统，用 HT1621 作为液晶驱动器，P1.0-P1.3 四个 I/O 口控制 HT1621，后者可以驱动多达 10 位七段 LED。测量结果直接可以看到，实际上是一个具有 12 位以上分辨率的毫伏表。

MSP430F1121 内部有 4K FLASH 存储器，没有被程序占用部分可以作为数据存储用，因此，可以把测量结果放入 FLASH 存储器中，具有记忆和回放功能。

MSP430F1121 还有一个 16 位定时器，用它和一个 I/O 口构成一个 UART，用于发送测量结果，上传给 PC 机，可以构成一个低采样频率的简易存储示波器。

参考文献：

- 1 胡大可.MSP430 系列超低功耗 16 位单片机原理与应用.北京：北京航空航天大学出版社，2000.
- 2 MSP430 x1xx Family User`s Guide 2000