

# A/D 转换器的原理分析与比较

Analysis and Comparison of the Principle of A/D Converters

王瑞玲

Wang Ruiling

(江西财经大学现代教育技术中心, 江西 南昌 330013)

(Modern Educational Technological Center, Jiangxi University of Finance and Economics, Jiangxi Nanchang 330013)

**摘要:** A/D 转换器是数字化测量和显示仪表的重要组成部分, 其转换速度、精度和分辨率, 直接影响着测量结果和显示的质量指标。本文针对常用的多斜式、多周期式、循环余数式、脉宽转换式、双斜式等几类 A/D 转换器, 从原理和结构上进行了具体地分析, 以便于在 A/D 转换电路设计中 ADC 的选择和采用元器件组装 A/D 转换器时, 选用合适的 A/D 转换方式。

**关键词:** A/D 转换器; 转换精度; 转换速度; 分辨率; 基准电压

中图分类号: TP335+.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-4792-(2009)11-0201-04

**Abstract:** A/D converter is an important part of the digital measurement and display instrument. And its conversion speed, accuracy and resolution have a direct impact on the quality of measurement results and display indicator. This paper concretely analyzes the principle and structure of several commonly used A/D converters such as multi-ramp, multi-cycle type, loop residue type, pulse-width conversion type and double-inclined type in order to appropriately choose an A/D conversion mode for assembling A/D converter with components in the ADC converter circuit design.

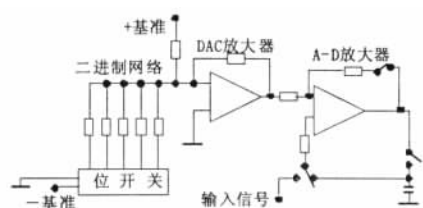
**Keywords:** A/D Converter; Conversion Accuracy; Conversion Speed; Resolution; Benchmark Voltage

## 0 引言

A/D 转换器是数字化测量和显示仪表的重要组成部分。A/D 转换器的转换速度、精度和分辨率, 直接影响着测量结果和显示的质量指标。常用的 A/D 转换器有多斜式、多周期式、循环余数式、脉宽转换式、双斜式等几类。下面就常用的 A/D 转换器的转换原理和特点进行分析与比较, 以利于在 A/D 转换电路设计中 ADC 的使用和采用元件组装 A/D 转换器时, 能够选用合适的 A/D 转换方式。

### 1 循环余数式转换

循环余数式 A/D 转换技术一般采用类似于图一所示的线路设计, 是一种常见的逐次逼近方法的多周期转换。它利用把可变的参考电压与未知信号进行比较的方法, 将输入信号与精密数模转换器(DAC)的输出相比较, 此 DAC 由 DAC 放大器和二进制阶梯电阻网络组成, 通过模数放大器的输出信号, 来判断何时数模转换器 DAC 的输出大于输入电压。转换过程被分解成几个周期, 所以一个 6 位(bit) DAC 能通过连续的逐次逼近, 有效地产生比它本身大得多的转换位数。



图一 循环余数式转换原理

在第一个比较周期中, 输入电压与 DAC 的输出相比较, DAC 位开关的每一位都依次被试验, 依据比较器输出极性决定每一位的舍取。并将一组二进制转换结果值贮存起来, 而输入电压和 DAC 输出之间的余差电压则被放大且保存在一个电容中。在下一个比较和余数存贮周期中, DAC 输出与被放大的余数相比较, 产生下一组二进制值和一个更小的余数电压。最后, 所有各个位组经综合处理产生一个 A-D 采样值。每次采样前, 插入一个零状态, 在此状态中 A-D 输入端的任何失调值都可以被存贮在一个电容中, 这些失调值在以后可被抵消。

循环余数式 A/D 转换的主要特点是它的速度可以达到

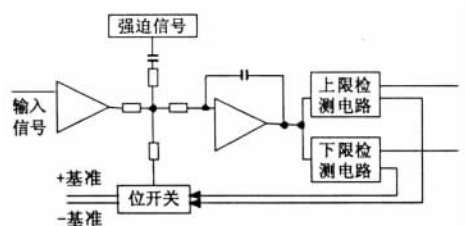
逐次逼近法的速度。完成一次  $61/2d$  的转换一般只要  $2ms$ ，高分辨率的读数速率可达到每秒 500 次。然而，由于这种技术本身对电源的噪音没有抑制能力，在高灵敏度测量的场合中，这是一个十分不利的因素，即使采取了对多个采样值作平均的措施，以抑制电源频率的影响，但由于采样速率的限制，仍无法消除较高次谐波的影响。

在一般的计量实验室中，虽然不要求特别高的读数速率，然而，这种技术仍然存在着转换非线性的问题。由于二进制权电阻的不匹配，也由于数值的读取是被分解成多个比较周期，其中某些比较包含放大过程，所以存在不连续性。由于微分线性不可能达到后面所述的单周期积分技术所能达到的水平，这种技术不是比较测量的理想技术，而比较测量在计量实验室却是经常使用的。

## 2 脉宽式转换

这种转换之所以称之为脉宽式转换，是因为模拟输入被一个 ADC 转换成宽度与其大小成正比的数字脉冲序列。用这些脉冲选通在加/减计数器中形成累加值的高速时钟。

当输入电压为零时，强迫方波电压连续地向加积分器的输入端、积分器输出方波向上和向下通过两个比较器的门坎电平，如图二所示。如果输入信号保持为零，积分器输出斜波对称于比较器的参考电平，并且比较器产生的正负信号具有相同的占空比。如果输入信号不为零，斜波就向上或向下移动，相应的比较器信号的占空比随之不同。当用这些信号把时钟脉冲选通到一个加/减计数器，就获得了加脉冲和减脉冲的测量值。



图二 脉宽式转换原理

脉宽式转换设计方案利用一个反馈回路把正和负的参考电压回送到 A/D 的输入端，强迫积分器处于零平衡。当积分器的输出超过任何一个比较电平时，一个极性相应的参考电压就被施加到反馈通路，当积分输出低于此比较电平，则该参考电压就被切断。在零输入时，反馈是不带直流成份的方波，所以积分器输出为零。当一个信号施加到 A/D 上，则一

个适量的参考电平就被施加到 A/D 去抵消此信号并重新使积分器处于零平衡。在重新平衡的过程中，积累的计数值就给出了输入信号的大小。可以看出，对于所有的输入信号值，积分器总是动态地处于零平衡。另外，任何漂移的电压都被自动校正，因为漂移会在斜波中引起偏移。

世界上第一台  $81/2d$  的 DMM 中就使用了这种 A/D 技术。这种技术具有非常好的线性，且能非常灵活地选择积分时间，以获得良好的电源频率抑制效果。此外，信号总是被接在 A/D 的输入端，这点对于一些特殊的应用是很重要的。但这种技术的最大的缺点是在高分辨时的速度较慢，一般来说，一个  $81/2d$  的读数可能要花 50 秒的时间。

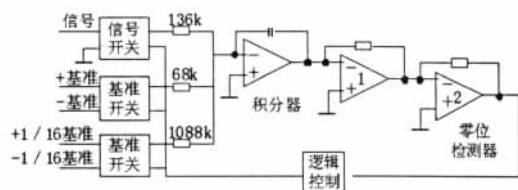
## 3 多斜式积分器

从理论上讲，双斜式 A/D 转换的精度取决于参考电压精度和对时钟周期的计数能力。双斜积分线路要求时钟、积分器的电阻和电容在转换周期内保持稳定，因为这些元件的长期变化和精度无关，可以根据给定的分辨率和速度要求选择积分时间。值得注意的是，采用积分时间等于电源周期的整数倍，可以获得极好的对电源频率（及其所有谐波）抑制的性能。

使用这种设计在高精度积分器中所遇到的问题是比较器的速度和灵敏度，目前，即使最好的 A/D 大约是每微秒一个字的水平。这将意味着对于一个满量程的  $71/2d$  的读数大约需要 20 秒时间，这个时间太长了。另外，积分电容的漏电流导致非线性和读数速率的误差，因为在积分周期贮存吸收网络中的电荷在参考时间内不被复原，所以就不被计数，这种介质吸收现象使真正的电荷平衡在一个短的测量时间内不能实现。当信号接近零时，比较器可能检到一个噪音脉冲而选择错误极性的参考电压，结果引起积分器输出错误，直至计数器溢出，形成一个大于满刻度的读数，这种现象即使在输入信号真正为零时也会产生。

Datron 公司研制了一种多斜、多周期的积分器，如图三所示，用以克服上述各种问题，这种转换器使用两种不同的参考周期  $Ref$  和  $Ref/16$ ，以克服比较器速度慢的问题，其原理是：首先，快速计数直到接近于零时，转换到一个较低的参考电压值 ( $Ref/16$ )，以一个比较慢的计数速率向零接近。

这种办法以比较低的转换率通过零点，从而允许比较器的带宽较低，由此达到低噪音的效果。在何处积分器转换到  $Ref/16$  不是重要问题，只要转换同步于时钟，则系统计数正



图三 多斜、多周期积分器原理

确。在 Ref 周期内,系统以 16 为单位计数,而在 Ref/16 周期内,系统以 1 为单位计数。

因为 Ref/16 周期与 Ref 周期相比较是非常小的,这种方法有效地加速转换 16 倍。Ref/16 周期约占满刻度的千分之一,所以,为了使线性优于满刻度的 0.2ppm,就要求 Ref/16 的精度要优于万分之二,这点用电阻是很容易实现的。

这种设计的特点为:

(1)使用一个偏置斜率以克服在零区的问题。在积分周期的末尾,加入一个非常小的已知信号(正向反馈),其办法是接入一个“错误”的参考电压,用以保证正确的参考电压被接入时积分器能正确地运行并回到零,因为偏置信号的幅度、时间都是已知的,所以此偏置信号的影响是可以计算的。

(2)多周期意味着可使用比较小的积分电容,结果降低了介质吸收效应和改善了线性。

(3)在多周期转换中,信号和参考输入是同时施加,而不是分别施加的,结果提高了转换的速度。

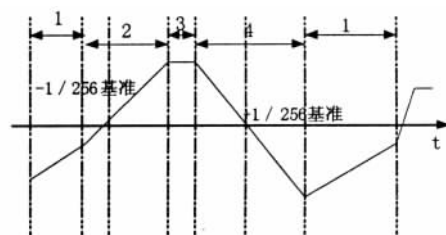
(4)由于每一次转换,正负参考电压使用的次数相等,因而保证参考电压的转换误差是恒定的,并且可以在一个积分周期消除。

(5)一个动态的零系统取代了较通用的取样保持型的零线路,后者在过载时可能会处于饱和状态,从而降低过载恢复的速度。这种动态系统也克服了动态漂移。

当 A/D 不转换输入信号时就进入复位。这种复位技术使缓慢漂移的积分器的输出保持在零附近,其方法是施加小量的  $-Ref/250$ ,然后施加  $+Ref/250$ ,使积分器输出为零。因此,这个复位周期很短(50 sec),而且在每个测量周期至少有一个复位周期,这样就可以避免中断校零过程。

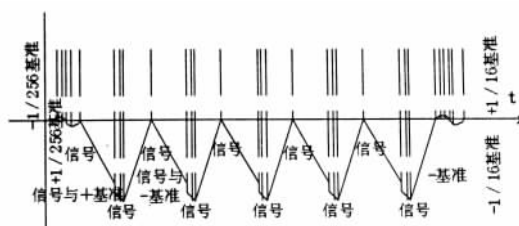
$-Ref/256$  和  $+Ref/256$  的施加方法如图四所示,其结果使积分器输出的每个斜波都通过零点,并利用  $+Ref/256$  的最后一个零位过程的时间为预先确定的常数个时钟周期。复位周期然后被重复,以维持积分器的输出在零附近。可以看到,即使积分器在复位与复位周期之间可能有漂移,但在每个复位周期的结束时,积分器输出是精确地处于相同的位置上。根据读数速率和分辨率的要求,这种 A/D 能够构成单

周期或者多周期转换。多周期提供了极大的灵活性以选择各种有用的积分周期。使用比较小的积分电容,利用斜波多次上升和下降获得比较长的积分周期,有效地避免了积分器的饱和。



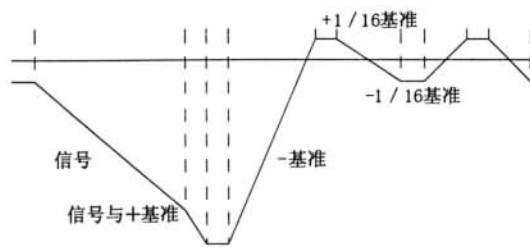
图四 1/256 基准施加原理

这种多周期设计的基本特点是除了最后一个周期外,所有周期内的被测信号是连续不断地施加的,而各种参考电压与被测信号同时加入,如图五所示。换言之,这种工作方式有效地减少了读数的时间。



图五 多斜、多周期积分器转换波形图

单周期的转换图解清楚地说明这种转换技术的基本特点。当接到一个读数转换命令,最后一个复位周期在 50 微秒延迟时间内结束,信号就被加到输入端,如图六所示。积分器输出斜波上升,经过一段固定的时间以后,信号仍然施加着的时候,一个正向偏置被反馈到参考输入端,接着在一个固定延迟时间里,零信号同时加入到参考输入端和被测信号输入端,其目的是为了保证系统不会同时把两个参考电压切换进积累器,在此周期中,向参考输入端加入  $-Ref$ 。最后积分器输出经过零点,这代表了一个“粗”的转换周期的结束。积分器自身又构成了最后阶段的更精确或者说更精细的转换结构。



图六 多斜、多周期积分器单周期转换波形

为了避免切换的瞬态误差,首先把零加入到信号和参考的输入端,跟着把 $+V_{\text{Ref}}/16$ 加到参考输入端,施加的时间为固定值。使用这样的参考电压极性是为了保证不管被测信号极性如何,总是使用 $+V_{\text{Ref}}/256$ 参考电压产生最后一个斜坡,克服比较器响应期间的任何的不对称。经过又一个“死”时间后, $+V_{\text{Ref}}/16$ 被加向参考输入。这是转换的最后一部分,并且它和动态自动稳零周期的结束阶段是一样的。换句话说讲,积分器的输出精确地回到了它开始的地方后结束。

负极性信号的转换次序与上述正极性信号转换次序略有不同,但是,对于每次转换,每一种参考电压都被平衡,而任何很小的比较器的延迟时间误差和由于最后一个斜坡引起的电荷注入效应都被动态稳零自动消除。

#### 参考文献

[1] Gilbert, R. A (美). 数字器件的原理和应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.

[2] 杨志忠. 数字电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.

[3] 徐群岭. 一线式 A/D 转换器 DS2450 的原理与应用[J]. 电子工程师, 2002, 4(1): 43-49.

[4] 张研, 乔双, 胡硕. 高速 AD 转换器 AD9260 与 AT89C52 单片机的接口[J]. 信息技术, 2002, (6): 2-5.

[5] 谭杰·霍夫纳. 高速 AD 转换器动态参数[J]. 电测与仪表, 2001, 38(3): 31-48.

[6] 成立, 张荣标, 李彦旭. 几种用于 SDR 系统的高速高精度 ADC 电路[J]. 半导体技术, 2001, 26(10): 68-70.

[7] 吴兴斌. 高速 A/D 转换器的研究进展及发展趋势[J]. 微电子学, 2009, (3): 420-423.

[8] 毕文辉, 严楠, 崔德邦, 张滢. 数据采集系统中 A/D 转换器的正确[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(4): 20-22.

#### 作者简介

王瑞玲(1964—), 女, 1982 年 7 月参加工作, 毕业于电子计算机及应用专业, 现为江西财经大学现代教育技术中心高级工程师。