

· 电路与控制 ·

A/D 转换技术的应用与发展

李袖榕, 李卓轩

(北京交通大学光波所, 北京 100044)

摘要:首先分别介绍了当前六大模数转换技术的工作原理、电路结构、性能特点及应用领域, 通过从转换速率、转换精度、分辨率、功耗、价格、面积等指标进行分析, 将物理结构的设计与实际性能结合比较, 总结出各自适合的应用领域. 然后, 根据对现有模数转换技术特点的分析及实际应用中模数转换器性能的要求, 对当前 A/D 转换技术向着高性能、低功耗、结构简单方向发展的趋势进行了预测.

关键词:A/D 转换技术应用; A/D 转换技术发展趋势

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2010)03-0045-05

Application and Development of A/D Converters

LI Xiu-rong, LI Zhuo-xuan

(Institute of Lightwave technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract:Six current types of A/D converters were introduced, including working principle, circuit structure, performance characteristics and application field. Through analyzing the conversion rate, conversion accuracy, resolution, power consumption, price, size and other indicators, comparing the physical structure design with the actual performance, their appropriate applications were finally summed up. Then, based on the technical characteristics of the existing A/D converters and performance requirements in practical application of the A/D converters, the technology trends of higher performance, lower power and simpler structure on A/D converters are predicted.

Key words:application of A/D converter; development trends of A/D converters

A/D 转换是指将模拟输入信号转换成 N 位二进制数字输出信号的过程. 现代数字通信技术迅猛发展, 半导体工艺日益精密, 数字化浪潮推进了 A/D 转换器不断革新, A/D 转换技术在变得越来越复杂的同时, 也正朝着高速度、高精度和低功耗的方向迈进. 数字信号处理技术长期以来一直被广泛应用于卫星、测控系统、图像和音频等领域, 其对高速高精度的 CMOS 工艺的模数转换器的需求日益迫切. 通过对各种 A/D 转换电路的工作原理、电路结构和性能特点等进行了对比分析, 总结了各种电路的应用领域和 A/D 技术的发展趋势.

1 主要 A/D 转换技术

A/D 转换技术是现实各种模拟信号通向数字世界的桥梁, 为了满足不同的需求, 各家芯片公司开发了不同的 A/D 转换技术, 主要有以下几种:

1.1 积分型 A/D

积分型 A/D 转换技术包括单积分和双积分 2 种转换方式.

转换原理: 单积分 A/D 转换首先将需要转换的

收稿日期: 2010-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(60771008); 北京市自然科学基金(4082024)

作者简介: 李袖榕(1991-), 女, 山西人, 学士, 主要研究方向为电子科学与技术.

电信号变成一段时间间隔,然后对时间间隔进行计数,间接地把模拟量转换成数字量.双积分型转换器结构如图 1 所示^[1],通过 2 次积分把输入的模拟电压转换为与平均值成正比关系的时间间隔,同时利用计数器计数,从而实现 A/D 转换.

特点及应用:积分型 A/D 具有功耗低、成本低、分辨率高(可达 22 位)的优点,因为其输入端采用了积分器,对高频噪声和固定的低频干扰(如 50 Hz 或 60 Hz)的抑制能力很强,所以主要应用在嘈杂的工业环境中.但由于其转换速度太慢,转换精度随转换速率的增加而降低,转换速率在 2 位时为 100~300 SPS,对应的转换精度为 12 位,因此主要应用于低速高精度的转换领域.

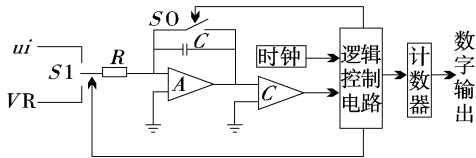


图 1 积分型 A/D 转换器结构

1.2 逐次逼近型 ADC

逐次逼近型 A/D 转换器是由比较器、D/A 转换器、比较寄存器 SAR、时钟发生器以及逻辑控制电路组成,其结构如图 2 所示^[1].

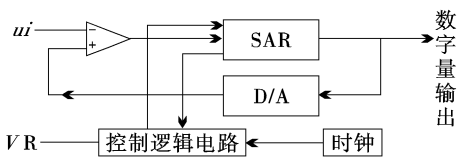


图 2 逐次逼近型 A/D 转换器结构

转换原理:逐次逼近型将模拟信号与不同的参考电压进行多次比较,使转换后的数字量在数值上逐次逼近输入模拟量的对应值,一个时钟周期内只完成一位转换.

应用:逐渐逼近型原理简单,便于实现;功耗低;由于其转换速度较高,可以达到 1 MSPS,不存在延迟问题,所以应用于中速率的场合;此外它在低于 12 位分辨率的情况下,电路实现上较其他转换方式成本低,所以实际中广泛使用.但是,这种 AD 转换方式的分辨率和采样速率相互矛盾,分辨率高时采样速率较低,因此要提高分辨率,采样速率就会受到限

制;此外这种转换方式需要 D/A 转换电路,而高精度的 D/A 转换电路需要较高的电阻或电容匹配网络,所以在高精度 D/A 转换领域的应用受到很大限制.

1.3 并行 ADC

并行 A/D 转换器也称为 Flash ADC,是目前速度最快的一种结构.并行转换是一种直接的 A/D 转换方式,主要由电阻分压网络、比较器、编码器等组成.一个 N 位的并行 ADC 包含 $2^N - 1$ 个比较器和 $2^N - 1$ 个参考电压值.结构如图 3 所示^[1].

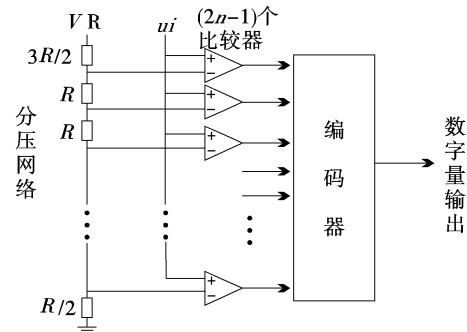


图 3 并行比较型 A/D 转换器结构

转换原理:每个比较器对输入信号采样并把输入信号与参考电压相比较,然后每一个比较器产生一位输出,表明输入信号与参考电压的大小关系.当输入信号高于比较器反向输入端电压时,比较器会输出高电平 1,反之输出低电平 0.该码编码后即可得到对应的数字量.

应用:该转换的主要优点是并行,所以速率特别快,目前 4 位转换精度的转换速率可达 10 GSPS 以上.但是由于管芯尺寸比较大,与一般的流水线结构相比,输入电容和功率损耗分别要高出 6 倍和 2 倍,功耗大、成本高;而且分辨率提高时,元件数目按照几何级数猛增,位数越多,电路越复杂,越难集成,还会产生静态误差、闪烁码温度计气泡等不利现象,因此只适用于速度要求特别高的领域,如视频 A/D 转换器等.

1.4 流水线 ADC(子区式)

流水线型转换方式是 Flash ADC 改进的一种转换方式,如 MAX1200.它在一定程度上具有并行转换高速的特点,又具有逐次逼近型结构简单的特点,很好地解决了制造困难的问题,是更为高效和强大

的转换方式.一般流水线结构如图 4 和图 5 所示^[1].

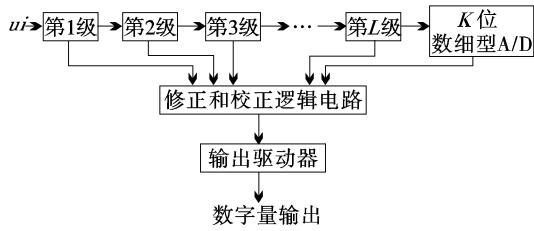


图 4 流水线型 A/D 转换器结构

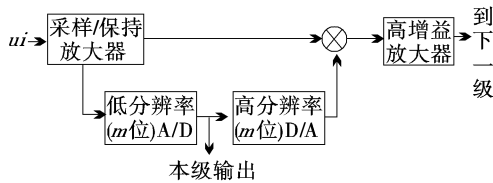


图 5 流水线型 A/D 转换器每级内部结构图

转换原理:流水线型 ADC 电路由许多级组成,每一级是由低分辨的 A/D 转换电路和高分辨率的 D/A 转换电路、采样保持器及增益为 2^n 的放大电路组成.每一级转换后的数字量都存入位于下方的锁存器中,待转换结束后经数字错误校正和锁存后送往数据总线输出.

应用:流水线 A/D 由于对信号进行分级串行处理,所以它在具有较高转换精度的同时,能保持较高的转换速率,一般转换精度在 12~16 bits,转换速率在 1~100 Msps,转换时间一般小于 100 ns;而且这种转换方式与其他转换方式相比价格更低,所需设计时间更少,难度更小,功耗低;优化的错误校正环节;克服了并行 ADC 的缺点,很少有比较器进入亚稳态,从根本上消除闪烁码温度计气泡,减少转换器的误差;因此流水线在很大程度上实现了转换速度、转换精度和分辨率的折衷,综合了并行转换和逐次逼近转换的优点,在这 3 个指标要求相当的场合得到广泛应用.但是流水线也存在一些问题,如时钟频率不能太大;易于受时钟占空比的影响;存在数据等待时间等问题,对速率有一定影响;对印制电路板的布线比较敏感,易于受电路布局的影响,因此它在一些同步性要求较高及工艺要求较高的场合使用时受到了很大的限制.

1.5 折叠插值 ADC

折叠插值转换方式通过预处理电路,同时得到高位和低位数据,克服了流水线型分步转换所带来的速度下降,同时元件的数目大大减少,其结构图如图 6 所示^[3].一个 8 位的折叠型转换方式的信号处

理示意如图 7 所示^[4].

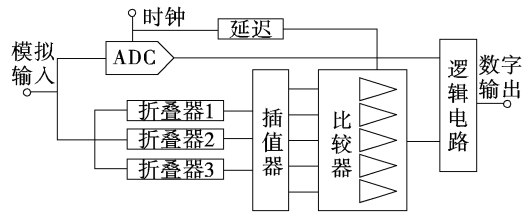


图 6 折叠结构框图

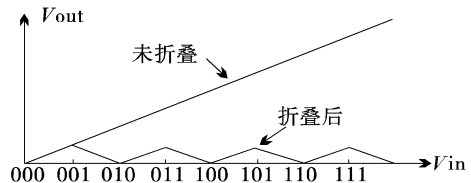


图 7 折叠插值方式

转换原理:折叠插值型转换方式把输入较大的信号映射到较小的区域内,并将其转换成数字信号,这个数据为数字量的低位数据.再找出输入信号被映射的区间,该区间也以数字量表示,这个数据为数字量的高位数据.高位和低位数据经过处理,得到最后的数字信号.

应用:折叠插值方式中由于数据 2 次量化同时进行,类似并行转换,所以转换速度很快,一般在 250 ksps~50 Msps 之间;而且电路规模及功耗比较小,成本比较低;因此它在高速场合得到广泛应用.但是折叠处理限制了输入信号带宽,由于其对晶体管跨导和匹配有较高要求,使得它不利于 CMOS 实现;折叠插值方式信号频率过高时,有“气泡”现象产生,需要额外处理电路;转换精度较低,一般只用于 8 位以下的转换器中,超过 8 位时,如要保持较少的比较器数目,折叠插值变得十分麻烦,所以这些缺点大大限制了折叠插值方式的 CMOS 实现和转换精度的提高,在对功耗和转换精度需求较高的场合较少使用.

1.6 过采样 $\Sigma-\Delta$ ADC

过采样 $\Sigma-\Delta$ ADC 由 $\Sigma-\Delta$ ADC 调制器和数字滤波器构成(如图 8 所示^[2]),调制器是核心部分,其结构近似于积分型 A/D 转换器,由积分器、比较器、1 位 D/A 转换器等组成,主要提供增量编码即 $\Sigma-\Delta$ ADC 码;数字抽样滤波器完成对 $\Sigma-\Delta$ ADC 码的抽样滤波.

转换原理: $\Sigma-\Delta$ ADC 调制器以极高的频率对输入模拟信号进行采样,并对 2 个采样的差值以极

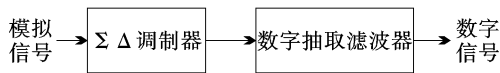


图 8 过采样 $\Sigma-\Delta$ ADC 方式

低的分辨率(1 位)进行量化,得到用低位数码表示的数字信号即 $\Sigma-\Delta$ ADC 码,这种 $\Sigma-\Delta$ ADC 码接着送到数字滤波器进行滤波,经过滤波处理后,采样率被大大降低,可得到高分辨率的数字信号。

应用:硬件方面,该转换方式采用了极低位量化器,巧妙避免了高位转换器和高精度电阻网络的制造困难;由于 $\Sigma-\Delta$ ADC 码码位低,使得采样与量化编码可以同时完成,不再需要采样保持电路,系统的结构大为简化;与 DSP 技术兼容,便于实现系统集成;大部分是数字电路,对电路匹配要求较低,易于 CMOS 实现;在技术指标方面,该转换方式的转换精度很高,可达到 24 位以上;转换速率高、分辨率高;而且价格低廉,所以过采样方式在目前 A/D 转换方式中性价比较高,在很多对精度、分辨率、速度要求比较高的集成电路中得到广泛应用。过采样的缺点在于转换器采样率较低,不适合处理高频信号;在转换速率相同的条件下,比积分型和逐次逼近型功耗高;当高速转换时,还需要高阶调制器,高速 $\Sigma-\Delta$ ADC 的价格较高;所以它一般应用于低频中速的场合。

2 发展趋势

综合国内外现有 A/D 转换技术资料可看出, A/D 转换电路的主要发展趋势是向分辨率越来越高、转换速率越来越高、精度越来越高、功耗越来越低、电压越来越低、趋于单片化和 CMOS 化、结构越来越简单的方向发展。

2.1 性能高——高分辨率、高速率、高精度

如今速度最快的并行转换方式 ADC 的采样速度可达 10 GSPS,而 2 级流水型 ADC 的产品转换速度也达到了 12 位/4 MSPS。在速率得到极大提高的同时,分辨率也有了很大改善,通过采用过采样 $\Sigma-\Delta$ ADC 模数转换技术、流水线型转换技术以及折叠插值型转换技术,极大地提高了转换器的分辨率。现在过采样的 $\Sigma-\Delta$ ADC 转换方式及精度已经达到了 28 位以上,这主要是由于采用新型电路结构方案,如 $\Sigma-\Delta$ 调制技术,在同样的工艺条件下,使单

片 ADC 达到更高的分辨率。此外,还有很多方式可以同时实现分辨率、速率、精度的提高,比如将 2 个或多个较低分辨率的闪电型 ADC 组合起来,形成流水线 ADC,这种类型的转换器既具有高的分辨率,又有很高的转换速率;通过采用激光修正技术、自校正技术和统计匹配技术,使数据转换电路的分辨率和精度得到进一步的提高。从目前来看,新的技术不断涌现,综合优化型的 A/D 转换技术将实现分辨率、速度、精度的同步改善。

2.2 功耗低——低功耗、低电压

当前 CMOS 工艺的发展为电压和功耗的降低提供了可能性,通过在电路设计中采用 CMOS、BiCMOS 工艺,低工作电压(3 V/5 V)及电源休眠工作方式等措施,可以大大降低转换技术中的功耗损耗,实现毫瓦级低功耗甚至超低功耗,同时还可保证转换器电路获得高分辨率、高精度和高转换速率,很好地解决现有的精度、速度和功耗之间的矛盾,同时,集成简化的芯片能实现面积和容积的最小化,适应现代社会便携化的需求,生产出性能最好、使用更方便的仪器。

2.3 结构简单——单片化、CMOS 化

在器件结构方面,当前半导体工艺水平不断提高,LSI、VLSI 工艺逐渐成熟,以前采用模块、混合电路生产的高性能转换电路逐渐被单片产品所代替,芯片的集成度大大提高,有效地降低了芯片的成本和功耗,减小了芯片体积,方便使用和携带,同时提高了性能可靠性。使用越来越成熟的 VLSI 技术及 $\Sigma-\Delta$ 调制技术,能够使数字信号处理器及其他标准数字器件与高分辨率 ADC、DAC 集成于同一块芯片上,构成更高级的混合信号处理器,既增强了芯片功能,使其实现多种转换和处理,同时也在很大程度上简化了外围电路,更加方便使用和加工。最近,人们开始尝试尽可能地将转换器和部分混合信号功能从昂贵、复杂的专业型工艺转入主流的 CMOS 型工艺,采用同一种工艺技术来制作模拟和数字电路,设计集成度更高的电路。从目前来看,更多新颖的数据转换电路不断出现,其功能将越来越强,性能愈加优良,从而使系统设计工程师的工作变得更加简单,使用者操作和携带也更加方便。

通过采用单片机和 CMOS 技术,首先很大程度地减少了制作难度较大、特性匹配要求较高的部件

数量,如高速比较器、宽带运放、精密电阻等,使得制作加工过程变得简单方便;此外极大地减少了模拟部件,尽可能多地采用成熟的数字电路模块(如 $\Sigma-\Delta$ ADC结构),使得CMOS化更加容易,从而尽可能地提升器件性能。

3 结 论

不同技术相互渗透,扬长避短,开发出适合各种应用场合,能满足不同需求的A/D转换器,将是模拟/数字转换技术的未来发展趋势;高性能、低功耗、结构简单的新型A/D转换器将是今后数据转换器发展的重点。

参考文献

- [1] 史艳琼.常见的几种A/D转换技术的分析[J].淮南师范学院学报,2005,3(7):33-35.
- [2] 房慧龙.A-D转换技术及其发展[J].中国西部科技,2007:81-83.
- [3] 黄伟,严利人,周卫.高性能及新颖性A/D转换器技术综述[J].微电子学,2008,38(6):805-810.
- [4] 陈树毅,马琪.A/D转换技术及其发展趋势[J].杭州电子科技大学学报,2006,26(6):57-61.
- [5] 阎石.数字电子技术基础[M].4版.北京:高等教育出版社,1998.

(上接第34页)

(16芯)中,其中,每一芯串联3个断面的传感器(包括9支应变计、3支温度计);通过传输光缆将光栅的波长信息传给光纤光栅解调仪,光纤光栅解调仪将采集到的光信号转变为电信号传输给GSM外置解调仪通过无线网络发送给数据中心,通过监测软件进行数据处理,对现场的管道受力情况进行实时在线监测。

4 结 论

选择钛合金作为传感器封装基底材料并采用这种类似杠铃的结构设计,能够使应变有效地传递到传感器,获得较好的应变响应灵敏度.在这种封装设计下,光纤光栅应变传感器的反射波长和应变具有很好的相关性.因此,这种光纤光栅应变传感器的封装设计在实际中具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 傅海威.光纤布喇格光栅应力增敏理论研究[J].激光

- [6] 程闪峰,张洁.低功耗33MHz采样频率10比特流水线结构的模数转换器[J].复旦大学学报(自然科学版),2001,40(3):335-341.
- [7] 毕查德.拉扎维.模拟CMOS集成电路设计[M].西安:西安交通大学出版社,2003:330-359.
- [8] 陈震初.发展我国数据转换电路的几点建议[J].微电子学,1998,28(4):233-235.
- [9] 高天光.模数转换器应用技术[M].北京:科学出版社,2001.
- [10] 李素芬,李刚,孙景发.模数转换技术及其发展[J].电子技术应用,2002,28(4):72-75.
- [11] Lewis S H. 10b 20MS/s analog-to-digital converter[J]. IEEE Solid-Stage Circuits,2005,7(12):351-358.
- [12] Conroy C S G, Cline DW, Gray Paul R. An 8-bit 85MS/s parallel pipeline A/D converter in 1-mm CMOS[J]. IEEE Solid-Stage Circuits, 1993, 28(4): 447-454.
- [13] Behzad Razavi, Wooley Bruce A. A 12-b 5-Msample/s Two-Step CMOS A/D Converter[J]. IEEE Solid-Stage Circuits,1992,27(12):1667-1678.
- [14] Nuzzo P, De Bernardinis F. Efficient Calibration through Statistical Behavioral Modeling of a High-Speed Low-Power ADC [J]. Microelectronics and Electronics,2006, 50(16):297-300.

技术,2005,29(2).

- [2] SPIRIN V V, SHLYAGIN M G, MIRIDONOV S V, et al. Fiber Bragg grating for petroleum hydrocarbon leak detection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 32: 497-503.
- [3] MAASKANTR, ALAVIE T, MEASURES RM, et al. Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring [J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(1): 21-33.
- [4] ECKEW, LATKA L, WILLSCH R, et al. Optical fiber Bragg grating strain sensor network for X-38 spacecraft health monitoring [J]. Proc SPIE, 2000, 4185: 888-891.
- [5] 李宏男,任亮.结构健康监测光纤光栅传感技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:59-145.
- [6] 饶云江.光纤光栅传感原理及应用[M].北京:科学出版社,2006:161-164.
- [7] 吴家龙.弹性力学[M].上海:同济大学出版社,1993:175-184.