

基于植入式眼压检测应用的低功耗 SAR ADC 设计

马志峰¹, 李熙泽¹, 张 锋², 陈铖颖³

(1 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100038; 2 中国科学院 微电子研究所, 北京, 100029; 3 厦门理工学院 微电子学院, 福建 厦门 361024)

摘 要: 为了确保植入式眼压传感器在体内长期保持稳定的工作状态, 同时能较为精准地反映人体眼压变化, 设计了一种应用于青光眼治疗的植入式眼压检测传感器的 10 bit, 20 kS/s 低功耗逐次逼近型数字模拟转换器 (SAR ADC). 该电路内置的 DAC 使用全电容阵列设计, 利用对称电容阵列结构提高缩放电容的匹配精度; 比较器采用三级预放大器加一级动态锁存器结构, 并引入了失调校准功能. 电路采用 SMIC 0.18 μm 1P6M 工艺进行设计, 后仿真结果表明, 在 20 kS/s 的采样速率下, 有效位数可达 9.4 bit, 平均功耗仅为 44.7 μW .

关键词: 植入式; 眼压检测; 低功耗; SAR ADC

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)11-0135-05

A Successive Approximation ADC Design for Implantable Intraocular Pressure Detection Application

MA Zhi-feng¹, LI Xi-ze¹, ZHANG Feng², CHEN Cheng-ying³

(1 College of Information and Electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100038, China;

2 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3 College of Microelectronics, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: In order to ensure the long-term stable working state and detection resolution of implantable intraocular pressure sensor, a 10 bit, 20 KS/s low power successive approximation analog to digital converter (SAR ADC) for implantable intraocular pressure detection sensor application is proposed in this paper. The DAC adopts a full capacitance array design. The symmetrical capacitor array structure improves the matching accuracy of the scaling capacitor; Comparator with three-stage pre-amplifier and dynamic latch structure ensures the offset calibration function. The circuit is implemented with SMIC 0.18 μm CMOS technology and the post-simulation results show that the effective number of bits (ENOB) can reach 9.4 bit at 20 KS/s sampling rate, and the average power consumption is only 44.7 μW .

Key words: implantable; intraocular pressure detection; low-power; SAR ADC

1 引言

近年来,随着集成电路技术在医疗电子领域的发展,智能植入式医疗电子系统作为生物医疗电子领域的前沿技术,预期在未来具有广阔的发展空间^[1].

模数转换器(ADC)是植入式眼压检测传感器

中的一个核心模块. 反映人体眼压变化特征的电化学模拟信号经过低噪声放大器放大之后,需要通过数模转换器转换成数字信号,以便后续电路处理.

本文针对植入式眼压检测传感器设计了一款低功耗 10 位 SAR ADC. 为了降低功耗,二进制权重的电容数组模转换器阵列(DAC)采用没有静态功耗的电容阵列结构. 为了消除动态比较器的失调电

压,本文比较器模块采用了由三级预放大器级联和动态锁存器结构,同时加入了失调校准.后仿真结果表明,在 1.8 V 电源电压,20 kHz 采样时钟频率和

45.82 Hz 正弦波输入下,无杂散动态范围(SFDR)为 78.1 dB,功耗仅为 44.7 μ W.

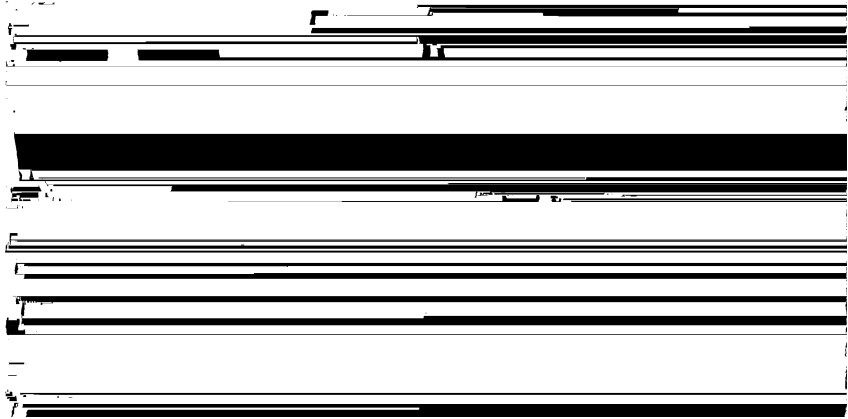


图 1 植入式眼压检测传感器读出电路

2 植入式眼压检测传感器

植入式眼压检测传感器主要包括 MEMS 压敏电阻压力传感器、专用集成电路(ASIC),天线和配有大气压力传感器的外部读取设备^[2-4]. MEMS 传感器将压力转换为电阻值,然后传输到 ASIC 进行信号处理,最后通过射频发射模块发送到体外.体外的射频接收装置接收到信号后,就可以实时显示所检测到的眼压.为了确保植入式眼压传感器在体内长期保持稳定的工作状态,需要射频能量供给持续且稳定,另一方面需要对体内植入部分的电路系统进行低功耗设计.图 1 为植入式眼压检测传感器读出电路.此读出电路主要包括仪表放大器,可编程电流源、斩波和相关双采样模块、低噪声放大器和 SAR ADC.仪表放大器连接压敏电阻的输出端,由于低噪声放大器需要较大的放大倍数放大压敏电阻输出的小信号,放大器输入端需具有极低的失调电压与噪声,同时由于压敏电阻和放大器会引入较大的失调电压,读出电路需要可编程电流源来补偿失调电压,同时选择被测输入信号.第一个可编程电流源用于补偿外部探测到的大气压,第二个可编程电流源用于补偿输入信号的失调电压.斩波和相关双采样模块可以去除仪表放大器输出端的失调电压和 1/f 噪声.由于压敏电阻具有温度漂移的缺点,此读出电路需要温度传感器去除温度漂移问题.电信号经过低噪声放大器的再次放大后,由 SAR ADC 把模拟信号转为数字信号进行后续处理.

3 低功耗 SAR ADC 设计

SAR ADC 的结构图如图 2 所示.它主要由二进制权重的电容数模转换器阵列(DAC)、比较器、逐次逼近寄存器和控制逻辑组成.其工作原理是采用电容衰减基准电压的方式实现二进制搜索逼近算法^[5],从而使 DAC 的输出逐次逼近输入的模拟信号.由于 DAC 电容阵列有效地避免了静态功耗,但是切换时仍会产生动态功耗,SAR ADC 的功耗主要包括三个部分:DAC 电容充放电的动态功耗、比较器,以及逻辑控制在时钟沿翻转时的动态功耗^[6].

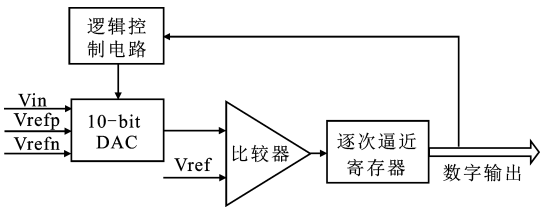


图 2 SAR ADC 的结构图

本文所设计的低功耗 SAR ADC 应用于植入式眼压检测传感器中,在低电源电压,低功耗的条件下,实现中等精度.下面将主要从 DAC 及开关网络、比较器电路以及逻辑控制电路等几个方面进行详细分析.

3.1 DAC 电容阵列

电荷再分配型 DAC 电容阵列是目前多种 DAC 结构中应用较多的一种类型,其内部无源器件网络是一种呈二进制比例增长的电容阵列,它根据二进制数字输入将电容阵列中存储的电荷重新分配,产

制的比较器结果的存储. D0~D9 位 ADC 的输出信号相继控制 DAC 各位开关的导通与关断.

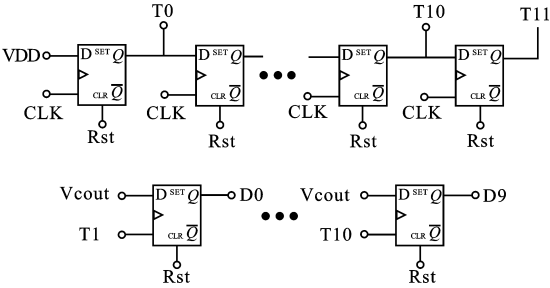


图 5 逐次逼近寄存器结构图

4 DAC 版图设计

在 SAR ADC 的后端设计中,DAC 部分的版图设计尤为重要. 工艺偏差会对电容引入系统失配,但是当匹配电容的面积一周长比相等时,则几乎没有影响. 所以,本设计将 DAC 电容阵列部分电容绘制成正方形,且版图布局采用中心对称原则^[10]. 同时版图中走线的寄生电容也会对匹配电容造成影响,导致电容阵列中原本匹配电容并不严格遵循二进制比例,进而对系统线性度影响较大. 所以此次设计会利用底层金属走线,尽量减少寄生电容,并且根据匹配电容的比例尽量调整走线的长度和距离,使匹配电容的寄生电容也成比率匹配.

本设计的 DAC 电容阵列分为高六位和低四位,外加一个桥电容. 图 6 以高位电容阵列的版图布局为例,分别给他们进行编号,以 1、2、4、8、16、32 分别代表自低权位至高权位的 6 个电容个数. 该电容版图布局示意图中的标注 Dummy 的部分则是虚拟电容,其作用是使电容周边刻蚀环境相同,增加匹配性. 这种版图布局虽然牺牲了一些面积,但是有效的提高了匹配精度.

5 后仿真与验证

本文采用 SMIC 0.18 μm IP6M 工艺进行设计,其核心版图面积为 $492\ \mu\text{m}\times 541\ \mu\text{m}$.

采用 Hspice 对 SAR ADC 的性能参数进行了后仿真验证,在 1.8 V 电源电压,20 kHz 采样时钟频率和 45.82 Hz 正弦波输入信号频率下,对 SAR ADC 瞬态输出波形进行 2 048 个点采样后的频谱图. 后仿真结果显示 SFDR 为 78.1 dB,有效位数为 9.4 bit,功耗仅为 44.7 μW . 由此可以看出本文设计的 SAR ADC 在低电压下其精度、功耗获得了较好的折衷. 其他性能指标列于表 1.

32	32	32	32	32	32	32	32
32	16	16	Dummy	16	Dummy	16	32
32	16	8	Dummy	8	Dummy	8	32
32	Dummy	Dummy	4	2	4	Dummy	Dummy
32	16	8	1	Dummy	1	8	32
32	Dummy	Dummy	4	2	4	Dummy	Dummy
32	16	8	Dummy	8	Dummy	8	32
32	16	16	Dummy	16	Dummy	16	32
32	32	32	32	32	32	32	32

图 6 高位电容阵列版图布局

表 1 SAR ADC 后仿真结果

参数	后仿真结果	参数	后仿真结果
INL/LSB	0.8	THD/dB	76.3
DNL/LSB	0.2	ENOB/位	9.4
SNR/dB	58.5	平均功耗/ μW	44.7

6 结束语

植入式眼压检测传感器作为生物医疗电子领域的前沿技术,在未来具有广阔的发展空间. 本文针对该应用,在综合考虑了 ADC 的功耗、精度、转换速率与设计复杂度等因素的基础上,采用 SMIC 0.18 μm 1P6M 工艺,设计了一种满足应用需求的 10 bit,20 kS/s 低功耗 SAR ADC. 该电路内置的 DAC 使用全电容阵列设计,以满足低功耗需求,并利用对称电容阵列结构提高缩放电容的匹配精度;比较器采用三级预放大器加一级动态锁存器结构,并引入了失调校准功能. 后仿真结果显示,在 20 kHz 采样时钟频率和 45.82 Hz 正弦波输入信号频率下,SFDR 为 78.1 dB,有效位数达到 9.4 bit,功耗仅为 44.7 μW ,积分非线性(INL)为 0.8 LSB,微分非线性(DNL)为 0.2 LSB.

参考文献:

[1] Chang You-Kuang, Wang Chao-Shiun, Wang Chorong-Kuang. 8-bit 500-KS/s low power SAR ADC for bio-medical application[J]. IEEE Solid-State Circuits, 2007: 228-231.

[2] Chitnis G, Maleki T, Samuels B, et al. A mini-mally invasive implantable wireless pressure sensor for con-

- tinuous IOP monitoring [J]. IEEE Trans. Biomed. Eng., 2013, 60(1):250-256.
- [3] Donida A, Di Dato G, Cunzolo P, et al. 21. 7A0. 036mbar circadian and cardiac intraocular pressure sensor for smart implantable lens[J]. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf, 2015(22/26):392-394.
- [4] Boujamaa E M, Alandry B, Hacinef B. Low power interface circuit for resistive sensors with digital offset compensation[C]//IEEE Int. Symp. Circuits and Systems, IEEE, 2010:3092-3095.
- [5] 孙彤. 低功耗逐次逼近模数转换器的研究与设计[D]. 北京:清华大学, 2007.
- [6] Pang Wen-Yi, Wang Chao-Shiun, Chang You-Kuang, et al. A 10-bit 500-KS/s Low Power SAR ADC with splitting comparator for bio-medical applications[C]//IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, IEEE, 2009:149-152.
- [7] Allen P E, Holberg D R. CMOS. 模拟集成电路设计[M]. 冯军, 李智群, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [8] 林武平, 郭良权, 于宗光, 等. 新型高速低功耗动态比较器[J]. 半导体技术, 2008, 33(12): 1119-1122.
- [9] 侯斌, 莫亭亭. 用于 16 bit SAR ADC 的高精度比较器的设计[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(7):15-18.
- [10] Alan Hastings. 模拟电路版图的艺术(2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

作者简介:

马志峰 男, (1973-), 博士, 讲师. 研究方向为视频图像处理、小波变换、模式识别.

李熙泽(通讯作者) 女, (1992-), 硕士研究生, 讲师. 研究方向为模拟集成电路. E-mail: 771410107@qq. com.

张 锋 男, (1977-), 博士, 研究员. 研究方向为高速低功耗存储器的设计、高速低功耗接口电路的设计.

陈铖颖 男, (1982-), 博士, 副研究员. 研究方向为高性能模拟/射频/混合信号 CMOS 集成电路设计, 低功耗、高精度、低噪声传感器接口及信号处理电路设计, 高可靠加固标准单元库设计.

(上接第 134 页)

- [2] 章志明, 李萍, 熊小勇. 一种有效的无线传感器网络虚假数据过滤方案[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(24):78-85.
- [3] 顾李华. 退墒曲线在墒情数据过滤及预报方面的应用[J]. 水文, 2016, 36(1):80-83.
- [4] 刘华富, 刘志雄, 黎梨苗. 适用于虚假数据过滤的最优传感器覆盖研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(10): 3147-3150.
- [5] 冯锋, 吴杰. 基于 Bloom filter 的 RFID 中间件数据过滤算法研究[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(5): 1441-1444.
- [6] 刘华富, 刘志雄, 黎梨苗. 适用于虚假数据过滤的最优传感器覆盖研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(10): 3147-3150.

作者简介:

彭兆军 男, (1980-), 硕士, 讲师. 研究方向为网络安全及管理. E-mail: pengzhaojunjob@aliyun. com.