

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.03.010

基于 V_{aq} 的高能效电容拆分结构 DAC 开关算法

王浩^{1,2}, 陈知新^{1,2}, 谢文明^{1,2}, 陈天玮¹
(1.福建工程学院 信息科学与工程学院,福建 福州 350118;
2.福建工程学院 微电子技术研究中心,福建 福州 350118)

摘要: 提出了一种应用于逐次逼近型模数转换器 (successive approximation register analog-to-digital converters, SAR ADC) 的小面积高能效电容拆分结构 DAC 开关算法。在最后两个位转换周期中引入了第三参考电压 $V_{aq}(V_{REF}/4)$, 降低了开关能耗和电容面积。为了进一步降低开关能耗,除了第一、第二和倒数第二个位转换周期外,整个转换过程都采用了单边双电平开关算法。与单调结构开关算法相比,该开关算法能耗减少了 98.45%, 电容面积减少了 75%。同时进行线性度分析,微分非线性 (differential nonlinearity, DNL) 和积分非线性 (integral nonlinearity, INL) 分别为 0.324LSB 和 0.243LSB, 验证了电容失配对 ADC 的精度影响很小。因此,文章所提出的 DAC 开关算法在能耗、电容面积和 ADC 精度之间具有很好的折衷性。
关键词: 电容;有效面积;开关算法;高精度;基于 V_{aq} ; 拆分电容技术
中图分类号: TN43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2020)03-0255-05

V_{aq} -based capacitor-splitting DAC switching algorithms with high energy-efficiency for SAR ADCs

WANG Hao^{1,2}, CHEN Zhixin^{1,2}, XIE Wenming^{1,2}, CHEN Tianwei¹
(1.School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, 350118, China;
2.Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: An area-efficient high-efficiency capacitor-splitting switching algorithm for successive approximation register (SAR) analog-to-digital converters (ADCs) was proposed. The third voltage reference $V_{aq}(V_{REF}/4)$ was introduced during the last two bit cycles, leading to low power consumption and capacitor area. To further reduce the switching energy, the one-side double-level switching method was utilized during the entire bit cycles except the first, second and the last but one. Compared with the monotonic one, the proposed capacitor switching method achieves 98.45% energy saving and 75% capacitor area reduction, respectively. Meanwhile, the linearity analysis was performed, and DNL and INL were 0.324LSB and 0.243LSB, respectively, which verifies the minimum effect of capacitor mismatch on SAR ADC accuracy. Thus, the proposed switching scheme is a good trade-off among the energy-efficiency, capacitor area and accuracy of the ADC.
Keywords: capacifor; area-efficient; switching algorithm; high accuracy; V_{aq} -based; capacitor-splitting

SAR ADC 因其极低的功耗而广泛应用于生物医学设备中。电容 DAC 通常占据 SAR ADC 大部分的面积,并在电容阵列的充放电过程中消耗相当大的能量。因此,最近人们提出了一些有关节能和节约面积的开关算法^[1-9]。与传统结构的开关算法相比,单调结构开关算法^[1]的平均开关

能量和单位电容总数量分别减少了 81% 和 50%。通过引入第三参考电压 $V_{CM}(V_{REF}/2)$ ，基于 V_{CM} 的开关算法^[2]所需的开关能量减少了 87.5%，其电容面积与单调结构开关算法的相同。新的三电平结构开关算法^[3]、Rahimi 开关算法^[4]、Xie 开关算法^[5]和混合型开关算法^[6]都节约了 75% 的电容面积。文献[3]~[6]的开关算法降低了 93% 以上的开关能量。为了进一步减少开关能量和电容数量，引入了浮置电容结构开关算法^[7-8]和基于 $V_{aq}(V_{REF}/4)$ 的开关算法^[9]，其电容面积和开关能量分别下降了 87% 和 96% 以上。然而浮置电容结构开关算法需要更多的开关数量，这会影响 ADC 的精度和速度。

本文提出一种新的电容拆分结构 DAC 的开

关算法来降低功耗和电容面积。该开关算法通过结合单边双电平开关算法、单调开关算法和引入 V_{aq} ，使得电容面积减半。

1 基于 V_{aq} 的电容拆分技术的开关算法

电容拆分结构开关算法^[5,6,10]功耗低、线性度高。图 1 显示了由 MSB 部分和 LSB 部分组成的具有拆分电容结构的 10 位 SAR ADC。 V_{aq} 只在最后两个位转换周期中使用。为了获得高精度的参考电压，会在芯片内部设计一个带隙基准电压 V_{REF} 。一旦 V_{REF} 设计出来， $V_{CM}(V_{REF}/2)$ 和 $V_{aq}(V_{REF}/4)$ 很容易设计出来，只是增加了几个晶体管，其面积完全可以忽略。

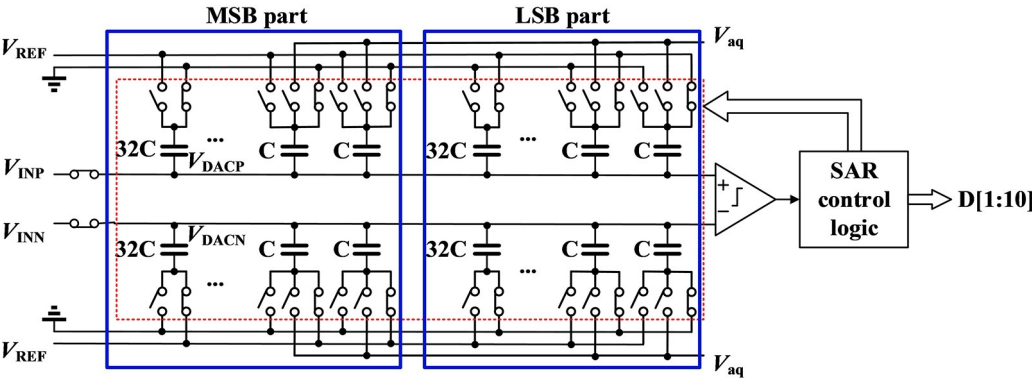


图 1 本文提出的 10 位 SAR ADC 开关算法

Fig.1 10-bit SAR ADC with the proposed switching algorithm

图 2 为本文提出的开关算法的 5 位结构。采样阶段，上极板对输入信号进行采样，MSB 部分和 LSB 部分两侧的下极板分别复位接到地和 V_{REF} 。然后关闭采样开关。由于是上极板采样，MSB(D_1)不需要任何开关切换。然后，将低电压侧的 LSB 部分的所有电容下极板从 V_{REF} 切换到地。如果 $D_1 = '1'$ ，位于 V_{DACP} 端的 LSB 电容发生切换；否则，位于 V_{DACN} 端的 LSB 电容发生切换。通过第二次比较，得到了 D_2 ，实现零开关能耗。

从第三个位转换周期(最后两个周期除外)开始，电容切换是基于在同一侧降低或增加相同电压的原理，这样更节能^[10]。开关电容基于 D_1 和前一位 D_{i-1} ，如表 1 所示。如果 $D_1 = '1'$ ， V_{DACN}

端的电容在 V_{REF} 和地之间进行切换；如果 $D_1 = '0'$ ， V_{DACP} 端的电容在 V_{REF} 和地之间进行切换。类似于[10,11]的开关算法，本文在这些位转换周期里也采用了单边双电平切换算法。然后进入到倒数第二个位转换周期，电容切换由 D_1 和前一个位 D_{N-2} 决定。如果 $D_1 \odot D_{N-2} = '1'$ ，则切换发生在两侧；否则，只有一侧发生切换。详细的切换情况见表 2。

在最后一个位转换周期中，采用了单边双电平切换算法，其中一侧的 Dummy 电容被切换(从 V_{aq} 到地，或从地切换到 V_{aq})，如图 3 所示。当 $D_1 = '1'$ 时，切换发生在 V_{DACP} 端；否则，切换发生在 V_{DACN} 端。

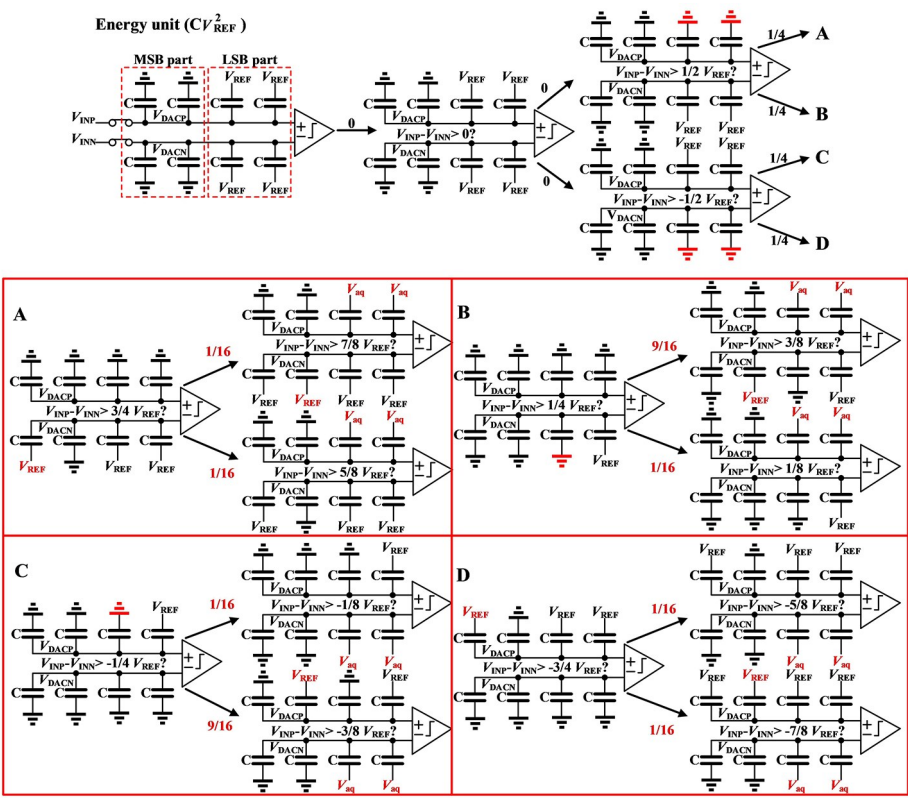


图 2 本文提出的 5 位开关算法示例

Fig.2 Example of the proposed 5-bit switching scheme

表 1 第三个位转换周期到最后两个位转换周期的电容切换

Tab.1 Capacitor switching from the third bit cycle to the last two ones

已知条件	电容切换情况
$D_1 = '1' \& \& D_{i-1} = '1'$	V_{DACN} 端的 MSB 电容从地切换到 V_{REF}
$D_1 = '1' \& \& D_{i-1} = '0'$	V_{DACN} 端的 LSB 电容从 V_{REF} 切换到地
$D_1 = '0' \& \& D_{i-1} = '1'$	V_{DACP} 端的 LSB 电容从 V_{REF} 切换到地
$D_1 = '0' \& \& D_{i-1} = '0'$	V_{DACP} 端的 MSB 电容从地切换到 V_{REF}

表 2 倒数第二个位转换周期的电容切换

Tab.2 The switching during the last but one bit cycle

已知条件	电容切换情况
$D_1 = '1' \& \&$ $D_1 \odot D_{N-2} = '1'$	V_{DACP} 端的 LSB 电容和 LSB 中的 Dummy 电容从地切换到 V_{aq} ; V_{DACN} 端的 MSB 中的 Dummy 电容从地切换到 V_{REF}
$D_1 = '1' \& \&$ $D_1 \odot D_{N-2} = '0'$	V_{DACP} 端的 LSB 电容和 LSB 中的 Dummy 电容从地切换到 V_{aq}
$D_1 = '0' \& \&$ $D_1 \odot D_{N-2} = '1'$	V_{DACP} 端的 MSB 中的 Dummy 电容从地切换到 V_{REF} ; V_{DACN} 端的 LSB 电容和 LSB 中的 Dummy 电容从地切换到 V_{aq}
$D_1 = '0' \& \&$ $D_1 \odot D_{N-2} = '0'$	V_{DACN} 端的 LSB 电容和 LSB 中的 Dummy 电容从地切换到 V_{aq}

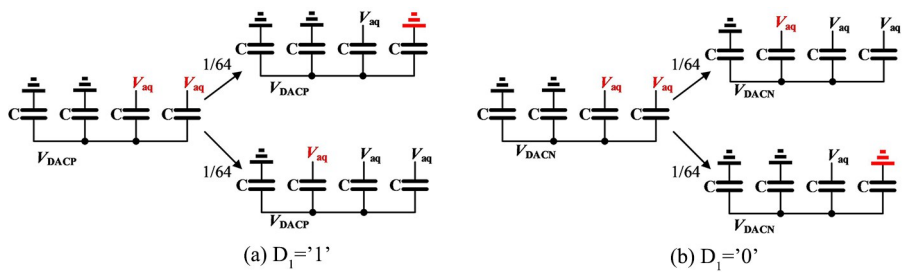


图 3 最后一个位转换周期

Fig.3 Switching cycle of the last bit

2 开关能耗分析

为了验证本文所提出的电容拆分技术开关算法具有高效性,在 MATLAB 上对 10 位差分 SAR ADC 进行了行为仿真。图 4 表示本文所提出算法和文献[4、5、12]这几种开关算法功耗随数字输出码的变化情况。本文提出的开关算法只消耗 $21.11\text{ }CV_{\text{REF}}^2$ 开关能量,比单调结构开关算法减少了 98.45%。显然在整个数字输出码中,本文提出的开关算法的功耗总是优于文献[4、5、12]的开关算法。在表 3 中,选择单调结构开关算法^[1]作为参考。Rahimi 和 Yavari 的开关算法^[4]、Xie 的开关算法^[5]、Sanyal 和 Sun 的开关算法^[12]分别消耗 85.08、42.17 和 $63.5CV_{\text{REF}}^2$ 的开关能量。因此,本文所提出的开关算法的能效最高。

本文所提出的开关算法在 10 位分辨率的 SAR ADC 中总电容数为 256 C,是单调结构开关算法 1 024 C 电容总数的 1/4,是文献[4、5、12]电容数量的 1/2。这是因为在最后两个位转换周期中引入了 V_{aq} 。电容拆分技术比单调结构开关算法^[1]需要更多的开关,但与减小的电容面积相比,开关面积可以忽略。

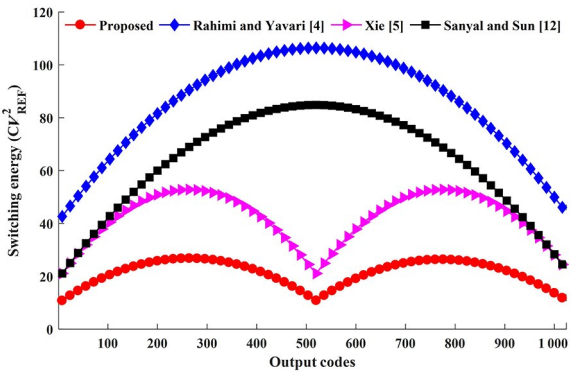


图 4 不同结构开关算法功耗分析图

Fig.4 Energy consumption analysis of switching algorithms with different structures

只有最后两个位转换周期受 V_{aq} 精度影响, V_{aq} 精度对 SAR ADC 的信噪比影响不大,对开关能耗影响也不大^[5,12]。引入 V_{aq} 后,SAR ADC 的转换时间也不会受到影响,因为:①任何时刻每个电容只能连接 1 个参考电压而非多个参考电压;② V_{aq} 只在最后两个位转换周期中参与切换,并且只与 4 对电容(LSB 电容 C 和 Dummy 电容 C)连接,电容值很小,对应的时间常数很小,转换时间很短,对 SAR ADC 的转换时间不起主导作用。

表 3 不同开关算法的 10 位 SAR ADC 的性能比较

Tab.3 Comparison of different switching algorithms for 10-bit SAR ADC

开关算法	平均开关能量(CV_{REF}^2)	节约能量/ %	节约电容面积/ %	是否受第三参考电压的影响
文献 [1]	255.50	参考	参考	否
文献 [4]	85.08	66.70	50	很小,只有 LSB 受影响
文献 [5]	42.17	83.50	50	很小,只有 LSB 受影响
文献[12]	63.50	75.15	50	很小,只有 LSB 受影响
本文提出的结构	21.11	98.45	75	很小,只有最后两个 LSB 受影响

3 线性分析

电容制造过程不可避免地产生电容失配问题,可通过增大单位电容值来减小,这将增加总开关能量且必须满足 KT/C 噪声。为了证实电容失配导致的影响,必须分析其线性度。假设单位电容服从高斯分布, $N(C_u, \sigma_u)$ 。本文提出的开关算法对 10 位 DAC 进行了 500 次蒙特卡罗行为仿真。其差分非线性 DNL 和积分非线性 INL 的标准差分别为 0.324、0.243 LSB,如图 5 所示。

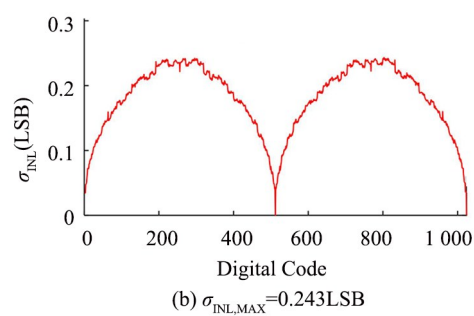
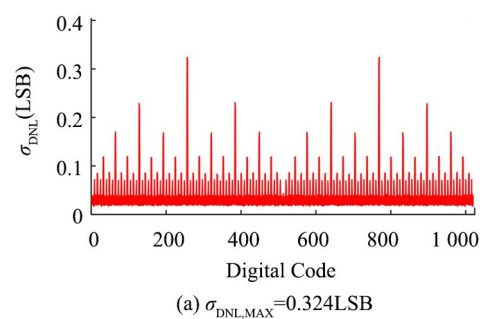


图 5 标准差随数字输出码变化情况
Fig.5 The standard deviation of DNL and INL versus output

4 结论

针对 SAR ADC 提出了一种基于 V_{aq} 的电容拆分技术的开关算法。与其它开关算法相比,该开关算法功耗低、面积小、精度高。常用于低功耗和小面积 SAR ADC。

参考文献:

- [1] LIU C, CHANG S, HUANG G, et al. A 10-bit 50-MS/s SAR ADC with a monotonic capacitor switching procedure[J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2010, 45(4): 731-740.
- [2] ZHU Y, CHAN C, CHIO U, et al. A 10-bit 100-MS/s reference-free SAR ADC in 90 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2010, 45(6): 1111-1121.
- [3] YUAN C, LAM Y. Low-energy and area-efficient tri-level switching scheme for SAR ADC[J]. Electronics Letters, 2012, 48(9): 482-483.
- [4] RAHIMI E, YAVARI M. Energy-efficient high-accuracy switching method for SAR ADCs[J]. Electronics Letters, 2014, 50(7): 499-501.
- [5] XIE L, SU J, LIU J, et al. Energy-efficient capacitor-splitting DAC scheme with high accuracy for SAR ADCs[J]. Electronics Letters, 2015, 51(6): 460-462.
- [6] WANG H, ZHONG L, ZHANG G. Low-power capacitor-splitting DAC with mixed switching schemes for SAR ADCs[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2018, 27(10): 18501611-18501617.
- [7] WANG H, ZHU Z, DING R. Energy-efficient and area-efficient tri-level floating capacitor switching scheme for SAR ADC[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2015, 85(2): 373-377.
- [8] ZHANG Y, LI Y, ZHU Z. A charge-sharing switching scheme for SAR ADCs in biomedical applications[J]. Microelectronics Journal, 2018, 75: 128-136.
- [9] ZHAO J, MEI N, ZHANG Z, et al. V_{aq} -based tri-level switching scheme for SAR ADC[J]. Electronics Letters, 2018, 54(2): 66-68.
- [10] SARAFI S, AAIN A, ABBASZADEH J. High-linear, energy-efficient and area-efficient switching algorithm for high-speed SAR ADCs[J]. Microelectronics Journal, 2014, 45(3): 288-296.
- [11] WANG H, LIU C, XIE W, et al. Tri-level capacitor-splitting switching scheme with high energy-efficiency for SAR ADCs[J]. IEICE Electronics Express, 2016, 13(20): 201606451-201606455.
- [12] SANYAL A, SUN N. An energy-efficient low frequency-dependence switching technique for SAR ADCs[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2014, 61(5): 294-298.