

一种基于商用标准单元库的极低电压电路设计方法

袁 甲, 张苏敏, 商新超, 陈黎明, 黑 勇

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 为满足无线传感节点对极低功耗的要求, 提出了一种基于商用标准单元库的极低电压电路设计方法. 采用一种量化评价稳定性的标准, 对 SMIC 130 nm RVT 标准单元库进行评价, 得到其能够接受的最低工作电压是 0.5 V. 面向新的电压范围, 重新进行库的特征化, 并进行 FIR 滤波器设计. 后仿真结果显示, FIR 电路能够在 1.2~0.5 V 电压范围内正常工作. 随电源电压的降低, 功耗降低了 7 倍, 进一步增强了低电压技术对电路功耗的优化作用.

关键词: 极低功耗; 最低工作电压; 标准单元库; 低电压技术

中图分类号: TN492

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)12-0006-04

An Ultra-Low Voltage Design Technique Based on Foundry Standard Cell Library

YUAN Jia, ZHANG Su-min, SHANG Xin-chao, CHEN Li-ming, HEI Yong

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on a foundry standard cell library, an ultra-low voltage design technique is proposed for meeting the ultra-low power requirements of wireless sensor nodes. The criterion is applied to evaluate the stability of the SMIC 130 nm RVT library, and it turns out that the library can work functionally when the supply voltage is higher than 0.5 V. Through re-characterizing the library at the low voltage, we design a low voltage FIR circuit. The post-layout simulation shows that the FIR can work well through the voltage range of 1.2 V to 0.5 V, and the power consumption can decrease 7X when the voltage drops from 1.2 V to 0.5 V.

Key words: ultra-low power; lowest supply voltage; standard cell library; low voltage

1 引言

随着物联网、医疗电子、RFID 等应用领域的兴起, 大量的无线传感节点被广泛应用. 这类节点的典型特点是需求数量大、系统体积小、性能要求、功耗要求极低^[1]. 系统整机功耗指标一般在微瓦量级, 要求单节锂电池供电能够持续工作数年^[2]. 这种苛刻的功耗约束, 使得传统的低功耗技术已经无法满足系统要求, 必须进一步探索更加有效的低功耗设计手段.

因为芯片功耗与电源电压的平方成正比, 降低电源电压能够有效降低系统功耗, 所以低电压设计技术成为一直以来低功耗技术的研究主线^[3], 由此衍生出一系列卓有成效的低功耗技术, 如多电压域

技术(MV)、动态电压调整技术(DVS)、动态电压频率调整技术(DVFS)等^[4]. 为保证电路性能, Foundry 厂对商用标准单元库的电压调节范围一般限制在 $(2/3 V_{DD}, V_{DD})$ ^[5], 这对低电压设计技术的作用产生了一定的局限性. 为了进一步降低芯片功耗, 突破这种电压范围的限制, 进一步探索标准单元库可以接受的最低工作电压或许是一种可行的办法.

本文首先分析了降低电源电压对标准单元在性能、稳定性方面的影响; 通过对标准单元稳定性的分析, 提出了一套标准单元库可接受的最低工作电压的评价方法, 并采用该评价方法, 对 SMIC 130 nm RVT 的标准单元库进行最低工作电压分析; 随后, 面向新的电压范围, 对标准单元库重新进行特征化;

收稿日期: 2014-03-20; 修回日期: 2014-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61306039); 中科院先导科技专项(XDA06020401)

最后,基于新的库文件,进行 FIR 滤波器设计,验证这种基于商用标准单元库的极低电压电路设计方法的有效性.

2 降低电源电压对库单元的影响

为了探索电源电压可调整的最大范围,找到标准单元库可接受的最低工作电压,我们首先要了解电源电压对库单元的性能及稳定性的影响.

图 1 中给出了库单元 INVX1 的电路延时随电源电压的关系曲线.很明显,随着电源电压的降低,库单元的延时在逐渐增大.在电源电压较高的阶段,延时增加较缓;随着电压的进一步降低,延时增加越来越快;在电源电压进入近/亚阈值电压范围后,库单元的延时呈指数关系增加.

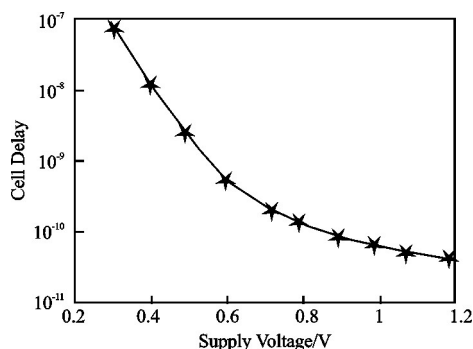


图 1 电路性能随电源电压的变化趋势图

此外,电源电压的降低,将直接影响库单元的稳定性.图 2 中给出了标准单元 NOR2XL 的 A_hl_B_hl 工作模式在 1.20 V、0.60 V、0.28 V、0.25 V 不同电源电压下的工作情况,用深色线代表输入信号 A、B 的变化,浅色线代表输出信号 Y.从图中可以看出,随着电源电压的降低,库单元的工作情况呈现出以下特点:(1)在电源电压降低的初始阶段,库单元依旧能够保持功能的正确性,如图 2(a)、(b)所示;(2)电源电压的进一步降低,会导致库单元的输出电平偏离理想输出电平,出现功能误差,如图 2(c)所示;(3)随着电源电压的深入降低,库单元的输出将偏离理想电平越来越大,甚至开始出现中间电平,此时则认为功能错误,如图 2(d)所示.

由上述分析可知,随着电源电压的降低,库单元的性能会逐渐恶化,稳定性也会逐渐变差.性能恶化,决定了不同的电压范围适用于不同的应用领域;而稳定性的恶化,则决定了标准单元能够接受的最低工作电压.因此,为探求标准单元库能够接受的最低工作电压,就必须从库单元的稳定性入手,寻求对

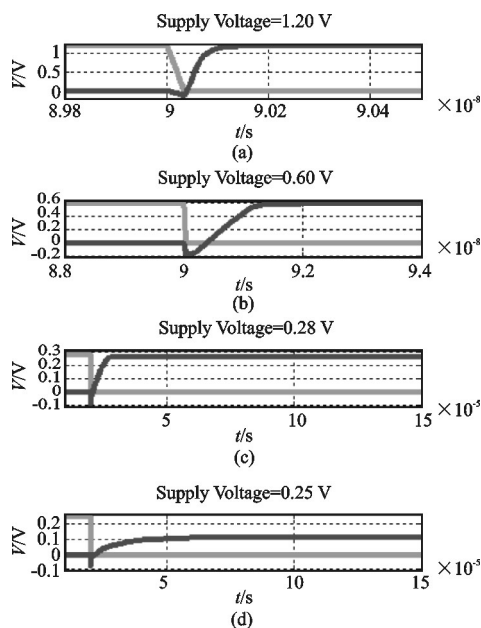


图 2 电路稳定性随电源电压的变化趋势图

库单元的稳定性进行量化评价的方法.

3 标准单元库可接受的最低工作电压的评价方法

标准单元库可接受的最低工作电压,必须能够保证库中所有单元都能够功能正常.然而,不同的库单元,其电路结构不同、晶体管尺寸不同,因此能够接受的最低工作电压也有所不同.所以,在对库单元进行稳定性评价时,需要统一制定量化标准,并对标准单元逐一进行评价.

3.1 量化评价标准

本文以单个库单元的稳定性评价为切入点,提出了以下具体的量化评价标准:

①功能正确性的评价标准:在输入误差 20% 的情况下,输出误差不得超过 10%;

②功能稳定性的评价标准:考虑工艺偏差、温度变化、电压抖动的情况下,对库单元的不同工作模式进行 Monte Carlo 分析,仿真次数 10 000 次,其中 99.87% (3 σ 标准) 以上的仿真结果满足功能正确性的评价标准.

标准①针对库单元的单个仿真结果,从两方面保证了库单元功能的正常:一是输出误差不超过 10%,这要求在单元输入受到噪声影响时,输出电平虽然有所偏离,但偏离不大,依然能够保证功能正常;二是 10% 的输出误差小于 20% 的输入误差,表明单元对噪声有削弱的作用,即噪声引起的电平偏离,在经过多级单元的传递时会被逐级衰减.由此,

从逻辑功能上保证了库单元的正确性。

标准②则针对工艺偏差对库单元稳定性的影响,引入 Monte Carlo 分析方法,同时引入工业界的 3σ 标准作为评价标准,给出了量化评价库单元稳定性的方法。

3.2 库单元的评价流程

以上两个评价标准不仅给出了量化评价单元稳定性的思路,也给出了具体的操作方法,如图 3 所示。

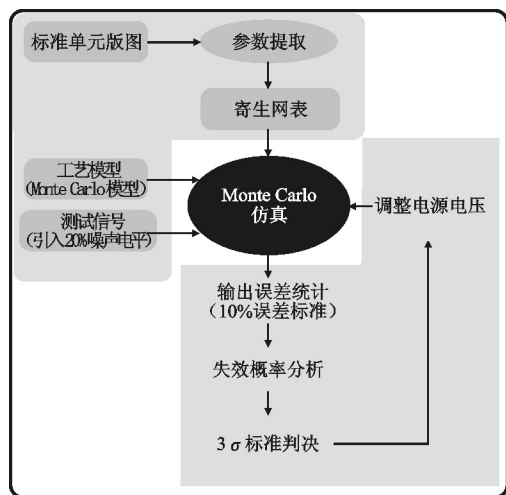


图 3 量化评价库单元稳定性的流程图

采用该评价流程,对 SMIC 130 nm RVT 标准单元库的库单元 NOR2XL,在 0.4 V 工作电压下,进行稳定性的量化评价,可以分为以下三步。

(1) 仿真数据准备阶段。

需要准备的数据,主要包括三部分:带有寄生信息的网表;反映工艺偏差的 Monte Carlo 模型;带有 20% 噪声的输入测试信号。其中,寄生网表可以通过 Calibre 对库单元的版图进行提参得到;工艺偏差的 Monte Carlo 模型,工艺厂商一般都会提供;输入测试信号,为模拟 20% 的噪声影响,均以 20% V_{DD} 为低电平,80% V_{DD} 为高电平产生,如图 4 所示。

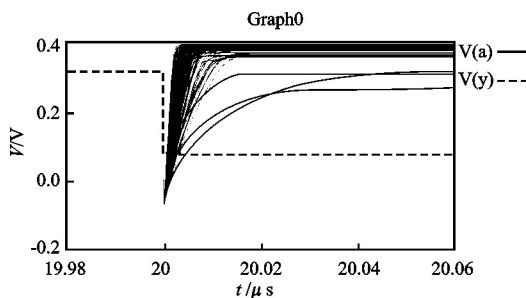


图 4 Monte Carlo 仿真时的输入/输出信号图

(2) Monte Carlo 仿真阶段。

在不同温度下,对库单元的不同工作模式进行

Monte Carlo 仿真,迭代次数 10 000 次。对每次仿真,测量并保存其稳定时的输出电平。图 4 中给出了在 0.4 V 工作电压下,对 NOR2XL 的 A_hl_B_hl 工作模式进行 Monte Carlo 仿真时的输出波形。由图中可以看出,在 10 000 次的迭代过程中,输出信号的电平呈现出一定的分布,大部分能够达到理想高电平;但也有部分输出偏离理想电平,存在一定误差;还有少数输出偏离较大,甚至出现了功能错误,稳定在中间电平。

(3) 仿真结果分析阶段。

在这个阶段,对 Monte Carlo 分析下的输出电平与理想电平进行误差统计,如图 5 所示。然后对输出误差进行分析,统计不同程度的误差出现的概率,如图 6 所示。进而,按照量化评价标准,误差在 10% 以内的被认为功能正确。统计 Monte Carlo 仿真结果中功能正常的概率,最后以 99.87% 的标准判定库单元的稳定性。从图 6 可以得出,功能正确的概率是 94.72%,不满足 3σ 标准。表明在 0.4 V 工作电压下,NOR2XL 的 A_hl_B_hl 工作模式,不能正常工作。为保证库单元的稳定性,需要适当提升电源电压,重新进行评价,直到失效概率分析能够满足 3σ 标准为止。

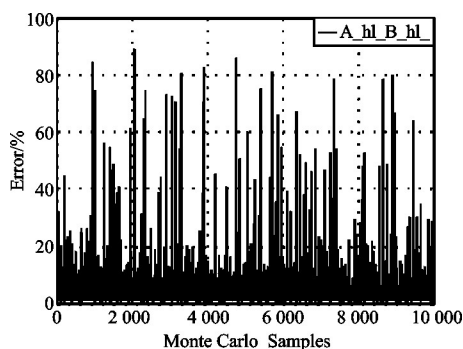


图 5 Monte Carlo 仿真结果的误差统计图

按照上述的评价方法,对 NOR2XL 的所有工作模式进行分析,就可以得到库单元 NOR2XL 可以接受的最低工作电压。

3.3 标准单元库的最低工作电压

采用该评价流程,对 SMIC130 nm RVT 标准单元库的其他单元分别进行稳定性评价,可以得到所有库单元的最低工作电压,如图 7 所示。能够看出,标准单元库中的不同单元,可接受的最低工作电压各不相同。为保证标准单元库的稳定性,就必须保证标准单元库中的每一个单元都能够正常工作。因此,标准单元库所能接受的最低工作电压,就是汇总每个库单元的最低工作电压,然后取其最大值。

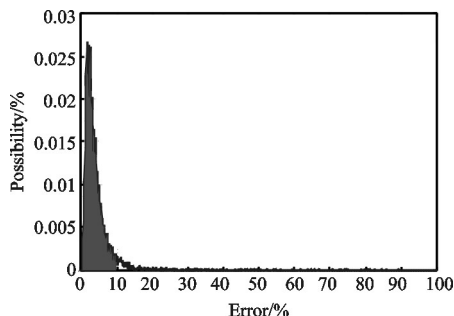


图6 输出电平与理想电平误差的概率分布图

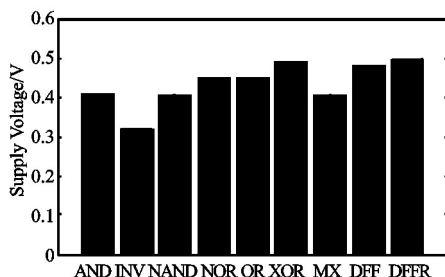


图7 SMIC130 nm RVT 标准单元库的最低工作电压

经过以上分析可知,SMIC 130 nm RVT 标准单元库可接受的最低工作电压是 0.5 V. 这样,如果不考虑系统性能,而仅从稳定性角度考虑,则采用该单元库进行系统设计的电压调节范围可以进一步扩大为 0.5~1.2 V.

4 低电压设计及后仿真验证

面向新的电压范围,为支持低压数字设计流程,对标准单元库在低压条件下,重新进行了特征化. SMIC 130 nm 工艺的库文件采用 NLDM 模型,以查找表的方式给出库单元的延时功耗等信息^[6]. 本文通过对不同规模的查找表进行相对误差统计分析,将查找表规模扩大为 20×20 .

本文以低电压的 SMIC 130 nm RVT 标准单元库为基础,进行了低电压 FIR 电路设计,数据位宽为 8 bit,滤波器系数为 8 bit,滤波器阶数为 3 阶. 设计时,面向的电压范围是 0.5~1.2 V,为保证时序的正确性,在进行物理设计时,需要同时保证 0.5 V 及 1.2 V 下的各个工艺角都能满足建立时间和保持时间的要求.

FIR 电路设计版图如图 8 所示. 对版图进行提参,产生寄生网表,用 Hspice 进行后仿,结果如图 9 所示. 仿真结果表明该 FIR 滤波器能够在 0.5 V 下正常工作. 电路的功耗随电压变化的趋势,如图 10 所示,表明随电源电压从 1.2 V 变换到 0.5 V 时,电

路功耗从 22.7 μ W 降低到 3.2 μ W,降低了 7 倍.

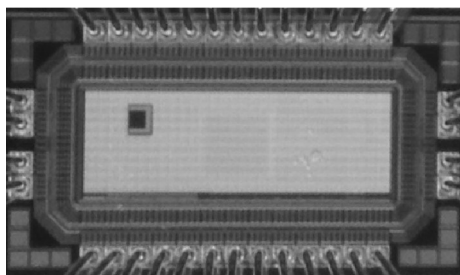


图8 低电压 FIR 滤波电路的版图

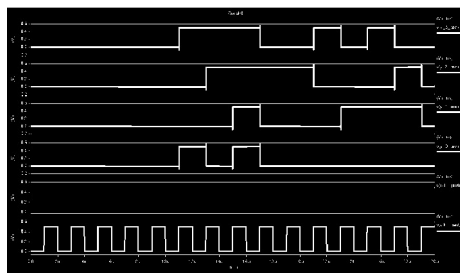


图9 低电压 FIR 滤波器的后仿真图

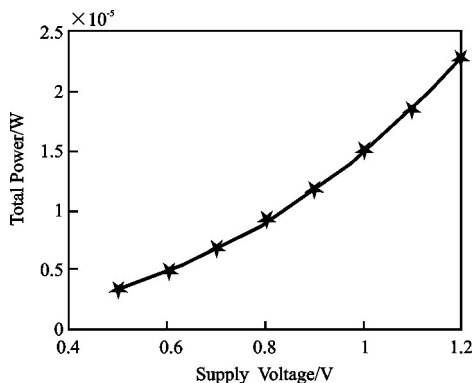


图10 FIR 滤波器的功耗随电压趋势图

5 结束语

文中基于商用标准单元库 SMIC 130 nm RVT,给出了一种极低电压电路的设计方法. 采用一种量化评价库单元稳定性的方法,对 SMIC 130 nm RVT 标准单元库进行评价,得到其能够接受的最低工作电压是 0.5 V. 面向 0.5~1.2 V 的电压范围,重新进行了库的特征化,并基于新的库文件,进行了时序电路 FIR 滤波器的设计. 后仿结果显示, FIR 滤波器能够在 1.2~0.5 V 的电压范围内稳定工作,实现了基于商用标准单元库的超宽范围电压设计. 随着电压从 1.2 V 降低到 0.5 V,功耗下降了 7 倍,大大提高了低电压技术对功耗的优化.

(下转第 15 页)

果表明,该路由可以满足端到端带宽要求,同时降低时延、丢包率以及时延抖动,为数据传输提供了实时性和可靠性保证。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Wang X. A survey on wireless mesh networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(9): 23-30.
- [2] Sun Y, Liu X, Zhang B. An available transmission time routing metric for wireless ad-hoc sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2011, ID(815987):79-85.
- [3] Jakllari G, Eidenbenz S, Hengartner N, et al. Link positions matter: A noncommutative routing metric for wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(1): 61-72.
- [4] Hou R, Lui K S, Baker F, et al. Hop-by-hop routing in wireless mesh networks with bandwidth guarantees[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(2): 264-277.
- [5] Wang Z, Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal

on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228-1234.

- [6] Jain K, Padhye J, Padmanabhan V N, et al. Impact of interference on multi-hop wireless network performance[J]. Wireless networks, 2005, 11(4): 471-487.
- [7] Yang Y, Kravets R. Contention-aware admission control for ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(4): 363-377.
- [8] Li H, Cheng Y, Zhou C, et al. Minimizing end-to-end delay: a novel routing metric for multi-radio wireless mesh networks[C]// INFOCOM 2009, IEEE. Brazil IEEE, 2009: 46-54.

作者简介:

沙海进 男,(1989-),硕士研究生.研究方向为无线 Mesh 网络路由. E-mail:shahaijin@126.com.

白光伟 男,(1961-),博士,教授,博士生导师.研究方向为移动互联网、无线传感器网络、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价,多媒体网络服务质量等.

沈航 男,(1984-),博士研究生.研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线多媒体通信协议等.

张芃 女,(1965-),副教授.研究方向为无线网络.

(上接第9页)

参考文献:

- [1] Wang A, Calhoun B H, Chandrakasan A P. Sub-threshold design for ultra low-power systems[M]. Berlin:Springer, 2006.
- [2] Dreslinski R G, Wiecekowsk M, Blaauw D, et al. Near-threshold computing: reclaiming moore's law through energy efficient integrated circuits[J]. IEEE, 2010,98(2):253-266.
- [3] Rabaey J. Low power design essentials[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [4] Keating M, Flynn D, Aitken R. Low power methodology manual for system-on-chip design[M]. Berlin:

Springer, 2007.

- [5] Pu Y, Gyvez J P, Corporaal H, et al. An ultra-low-energy multi-standard JPEG coprocessor in 65nm CMOS with Sub/Near threshold supply voltage[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2010,45(3):668-680.
- [6] Synopsys. Siliconsmart User's Guide, Version 2010. 04[EB/OL]. [2014-04-15]. <https://solvnet.synopsys.com>.

作者简介:

袁甲 男,(1985-),博士研究生.研究方向为数字信号处理器的极低功耗技术. E-mail:yuanjia@ime.ac.cn.