

一种针对低功耗 MCU 关断模式的功耗优化方法

杨紫薇^{1,2}, 朱致玖^{1,2}, 袁 甲^{1,2}, 乔树山^{1,2}

(1 中国科学院大学, 北京 100049; 2 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 本文提出了一种更加有效的待机模式功耗优化方案, 一方面进行更加精细的电源控制, 尽可能多的切断待机模式的漏电来源; 另一方面从电路级优化关断模式下的核心模块-电源控制模块, 采用组合逻辑以简化电路, 进一步降低功耗. 后仿真结果显示, 关断模式下的电源控制模块的静态漏电流仅为 18.87 pA, 关断模式总静态电流为 20.8 nA, 并具有较短的状态转换时间.

关键词: 低功耗; MCU; 关断模式

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)06-0026-05

Design and Optimization of the Off Mode of Low-Power MCU

YANG Zi-wei^{1,2}, ZHU Zhi-jiu^{1,2}, YUAN Jia^{1,2}, QIAO Shu-shan^{1,2}

(1 University o Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, we optimize the supply control in off-mode and meanwhile, simplify the circuit of the supply control unit, which is the core module under off-mode, by using combinational logic circuit to reduce power dissipation. The post-layout simulation shows that the leakage current of supply control unit under off-mode is only 18.87 pA, and a relatively short mode switching time is also achieved.

Key words: low-power; MCU; off-mode

1 引言

微控制器(Micro Control Unit, MCU), 作为控制核心被广泛应用在智能仪表、汽车电子、自动化控制、便携式设备等领域的电子产品中. 近年来, 随着物联网技术的迅猛发展, MCU 在物联网中也得到了广泛的应用. MCU 需实现低功耗以延长电子产品的使用寿命, 增加电池的供电时间, 延长电池的使用寿命, 从而提高产品的竞争力. 因此 MCU 的低功耗设计成为了当前的研究热点^[1].

本文设计的 32 位 MCU 以 Cortex-M0 作为嵌入式 CPU 核, 采用 AMBA2.0 总线, 集成存储管理单元、时钟管理单元、电源管理单元和外围设备, 并采用 SMIC 0.13 μm 工艺实现. 该 MCU 平台的框

架结构如图 1 所示. 低功耗设计方面, MCU 在系统级采用功耗管理技术, 结合时钟门控、电源门控及动态时钟管理技术, 根据 MCU 的工作状态调节系统工作模式, 在正常运行模式下保证性能要求, 而在低功耗模式下尽可能降低系统功耗.

本设计中的 MCU 有五种工作模式: 正常运行模式, 低功耗运行模式, 空闲模式, 睡眠模式, 关断模式. 五种工作模式在状态控制单元和电源控制单元两个模块的控制下进行转换, 其中状态控制单元负责非关断模式间的转换, 而当电源控制单元将系统电源关断, MCU 进入关断模式.

状态切换需要监控整个系统的状态^[2]. 当系统在一定时间内处于空闲状态, 则电源管理单元将系统电源关断, 使之进入关断状态, 以最大程度降低功

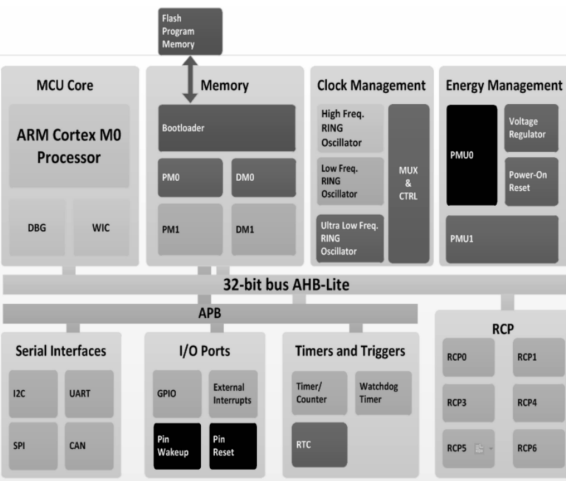


图 1 微控制器平台整体架构

耗. 在关断模式下的漏电功耗也直接影响了电池的供电时间和使用寿命. 此时仅有电源控制单元及少数模拟 I/O PAD 仍正常工作, 而其余模块电源均关断, 芯片功耗极低. 表 1 列举了几种商用低功耗 MCU 在关断模式下的功耗^[3-6], 可以看出在关断模式下, 漏电流一般要达到 10 nA 级或更低.

表 1 商用低功耗 MCU 关断模式功耗

公司	型号	内核	关断模式功耗
Atmel	SAM-L	Cortex-M0+	200 nA
Silicon Labs	EFM32HG	Cortex-M0+	20 nA
ST	STM32L4	Cortex-M4	30 nA
TI	MSP430FR	MSP430	13 nA

近几年, 一些用于数据采集的传感节点开始采用太阳能、风能、机械能等可收集能源进行供电^[7], 这对功耗提出了更严苛的要求. 例如使用太阳能供电, 为保证正常运行和能量采集, 关断模式漏电流要达到 50 nA 以下.

对关断模式的功耗进行优化可以从两方面着手: 一是优化电源控制, 减少漏电流的来源; 二是优化电源控制模块电路, 降低模块运行功耗.

2 关断模式的电源控制优化

关断模式为所有工作模式中功耗最低的模式. 在 nA 级静态电流的设计要求下, 任何微小的漏电流来源都会对功耗表现产生较大影响. 因此在关断核心模块的同时也要尽可能地切断静态漏电流的产生来源. 比如, I/O PAD 在无输入信号的状态下仍

有漏电流产生; 另外, 在 1.2 V 内核电源被门控的情况下, 内部 LDO 模块仍然有静态电流产生. 在极低功耗的关断模式, 这些静态电流在很大程度上影响着 MCU 的低功耗表现.

在本设计中, 电源控制模块控制着整个芯片的供电. 当 MCU 正常工作时, 外部电源 (3.3 V) 通过 PAD 给内部 LDO 和电源控制模块直接供电, 而电源控制模块通过控制信号使 LDO 模块正常工作, 产生 1.2 V 电源电压供给内部核心模块, 使其正常运行. 此外, 数字 I/O PAD 的 1.2 V 电源电压同样来自于内部 LDO 模块的输出, 而 3.3 V 电源电压来自于外部电源. 因此此时数字 PAD 全部处于开启状态.

而当内核发出关断信号后, 电源控制模块产生的控制信号将内部 LDO 产生的 1.2 V 电源电压关断, 从而同时关断了内部核心模块和数字 PAD, MCU 进入关断模式. 于此同时, 电源控制模块的控制信号也关断了外部 3.3 V 电源电压与内部 LDO 模块和数字 PAD 间的通路, 以消除 PAD 和 LDO 模块的漏电流, 进一步减小关断状态下的系统漏电流, 优化功耗. 以上所描述的关断模式系统框图如图 2 所示.

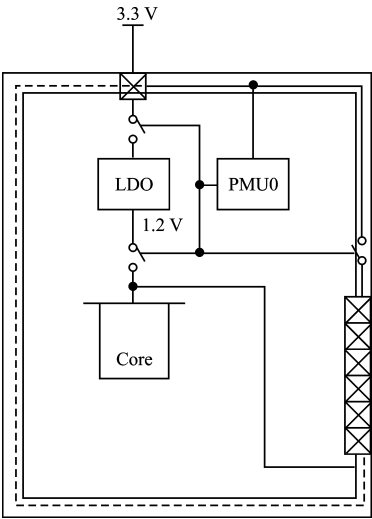


图 2 关断模式示意框图

3 电源控制模块的设计

本设计中的电源控制模块作用是将闲置的 MCU 的电源关断, 使之进入关断模式, 或将关断模式下的 MCU 通过外部引脚唤醒. 电源控制模块工作在芯片外部提供的 3.3 V 电源电压下, 在关断模

式下,电源控制模块是唯一工作的模块.因此电源控制模块的设计和优化是关断模式低功耗的关键.

在本设计中,电源控制模块实现的功能如下:在非关断模式下,CPU 通过总线向 HWDATA 写 1,从而将电源控制模块的输出信号 HRDARA 置 0,并以此作为控制信号将内部核心模块、LDO 模块、数字 PAD 的电源断开;在关断模式下,当引脚信号 PINWAKEUP 产生一低脉冲时,电源控制模块输出 HRDATA 置 1,并作为控制信号将内部核心模块、LDO 模块、数字 PAD 的电源打开,系统被唤醒,并工作在正常运行模式下.此外,内核产生的 RESETN 信号可以在 MCU 刚启动时将电源控制模块置 1,电源控制模块同时支持外部引脚信号 PINPOWERDOWN 对系统进行关断;其余的情况下,电源控制模块状态保持不变.其状态转换如图 3 所示.在实现功能的情况下,如何简化电路结构,降低电路功耗是设计中的重点问题^[8-9].

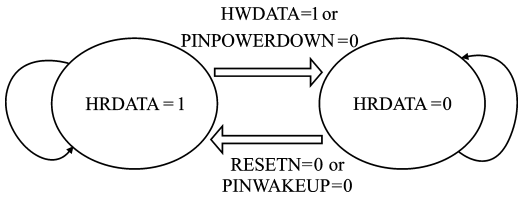


图 3 电源控制模块状态转换图

3.1 时序电路与组合逻辑电路的选择

由于来自内核的控制信号为时钟同步信号,使用时序逻辑电路实现电源控制模块可以增强电路抗干扰能力,但与此同时增加了电路的复杂度.

相比较时序逻辑电路实现,使用组合逻辑电路实现可以很大程度上简化电路结构,在减少电路静态漏电流的同时也缩小了模块芯片面积.此外,采用去时钟的组合逻辑电路实现电源控制模块免去了与内核等模块进行时序分析验证的流程,也避免了时序电路中时序收敛问题对电路功能实现的影响;时序电路中,往往为了时序收敛需要在信号通路上插入 buffer,而采用组合逻辑电路同样规避了这个问题,从而进一步简化了电路,降低了功耗.

3.2 电平转换电路设计

由于电源控制模块直接工作在外部 3.3 V 电源电压下,模块内全部采用 3.3 V MOS 管设计(P33/N33).而来自于内核的信号 RESETN 和 HWDATA 为 1.2 V 信号,因此需要电平转换电路对逻辑电平进

行转换.由于在关断模式下,内核的 1.2 V 电源被关断,此时 RSSETN 与 HWDATA 两个信号处于不定态.不定态不但可能影响电源控制模块的正常功能,同时可能造成 CMOS 电路的贯通,造成大电流.

为了隔离不定态对电源控制模块的影响,在关断模式下需将电平转换电路的输入输出挂在一固定电平.优化之后的电平转换电路如图 4 所示,当使能信号 EN 为 1 时,电平转换电路将 1.2 V 输入信号转换为 3.3 V 输出信号;而在 EN 为 0 时,将输入信号固定在低电平,输出信号固定在高电平.改变 M23 的位置,可将转换输出固定在低电平.其中 VDD 为 3.3 V 电源电压,VDDI 为 1.2 V 电源电压.

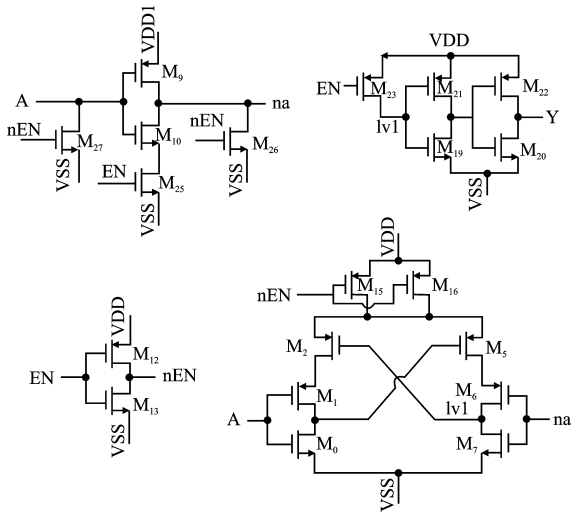


图 4 电平转换电路图

3.3 电源控制模块电路结构

分析图 2 的转换关系,我们发现电源控制模块的功能可以利用两个三输入与非门组成的 RS 锁存器实现,其门级电路如图 5 所示.其中 Q 经过反相作为 HRDATA 输出,而 QN 则作为使能信号控制电平转换电路(ELS)模块.

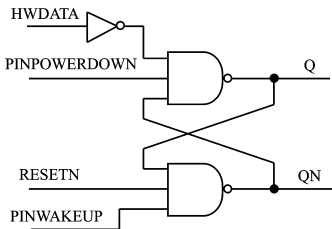


图 5 RS 锁存器门级电路图

因此,电源控制模块的结构框图如图 6 所示.

其中 ELS_L 模块在非使能状态下将 HWDATA 信号固定在低电平,而 ELS 模块将 RESETN

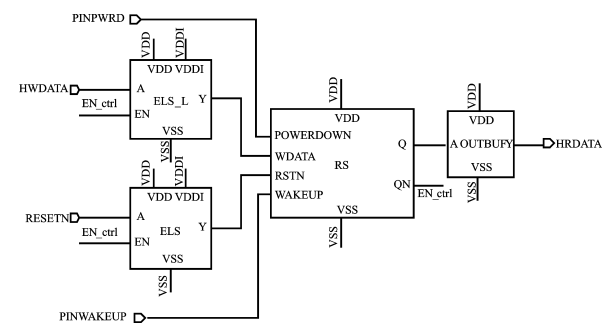


图 6 电源控制模块结构框图

信号固定在高电平,从而避免了 RS 锁存器进入不确定状态.而输出缓冲器 OUTBUF 为三个反相器组成的反相 Buffer.由于 HRDATA 作为控制信号需要同时控制 LDO、PAD 等模块的电源通断,负载电容较大.为缩短模式间的转换时间,在 OUTBUF 中需使用大尺寸反相器.这里我们采用尺寸为 $3.6\text{ }\mu\text{m}/350\text{ nm}$ 的 P 管和 $1.5\text{ }\mu\text{m}/350\text{ nm}$ 的 N 管组成的反相器.

3.4 电源控制模块版图设计

电源控制模块全部采用 P33/N33 管设计. P 管与 N 管采用相同沟道长度,使版图整齐紧凑. 电源控制模块版图尺寸为 $18\text{ }\mu\text{m}\times 19\text{ }\mu\text{m}$. 如图 7 所示.

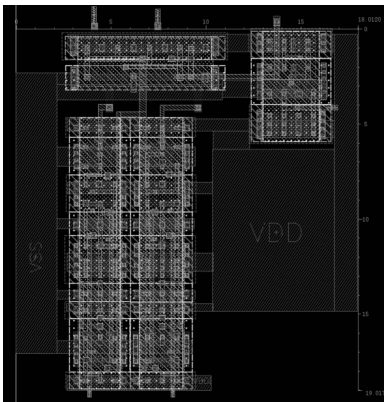


图 7 电源控制模块版图

4 电源控制模块仿真

版图设计后,使用 Calibre 对版图提取参数网表,然后使用 spectre 对电路进行后仿真. 为模拟关断模式下信号 HWDATA 和 RESETN 的不定态对电路的影响,我们在仿真时在激励源与模块输入间插入一个带使能端的缓冲器,并将电源控制模块输出信号 HRDATA 作为缓冲器的使能信号 nEN. 当

HRDATA 为 1 时,缓冲器正常输出,而 HRDATA 为 0 时,缓冲器断电,输出处于不定态. 使能缓冲器的 MOS 管级电路如图 8 所示.

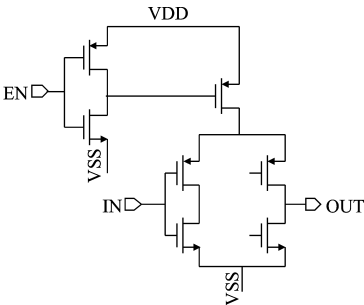


图 8 仿真用使能缓冲器电路图

除此之外,我们在电源控制模块输出端 HRDATA 连接一个 200 fF 的负载电容,以模拟电源控制模块在 MCU 系统中的大负载影响. 加激励后,电源控制模块的动态仿真结果如图 9 所示. 从图中可以看出本设计在实现逻辑功能的同时,也具有较短的转换时间. 在输入信号上升下降时间 $t_{\text{rise}}=t_{\text{fall}}=1\text{ ns}$ 的情况下,从 HWDATA 写入 1 到电源控制模块输出 0(进入关断模式)的延迟为 2.23 ns ;从 PINWAKEUP 输入低脉冲到电源控制模块输出 1(系统唤醒)的延迟为 1.33 ns ;从 PINPOWERDOWN 输入低脉冲到电源控制模块输出 0 的延迟为 1.13 ns . 电源控制模块的动态功耗主要决定于信号的反转频率,而非关断模式下模块的静态功耗为 129.25 pW ,非关断模式下电源控制模块也保持着极低的功耗.

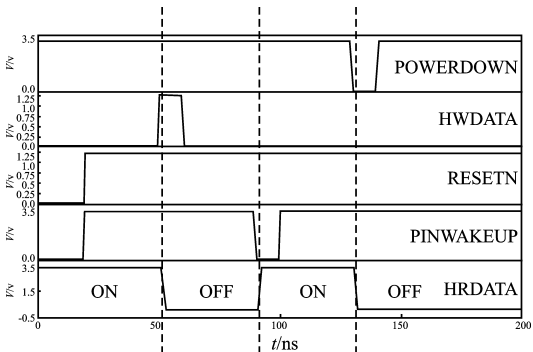


图 9 电源控制模块动态仿真结果

作为关断模式的核心模块,电源控制模块在关断模式下的静态功耗很大程度上决定着 MCU 在关断模式下的功耗表现. 电源控制模块在关断模式下的静态功耗表现如图 10 所示. 由图中可看出,电源控制模块在系统复位完成后由 HWDATA 置 1 进

入关断模式,此后保持在关断模式下工作. 在关断后约 1.5 μ s 时测得模块静态功耗为 62.29 pW,相当于模块静态电流为 18.87 pA,实现了关断模式下的极低功耗. 另仿真测得关断模式下 MCU 总功耗电流为 20.8 nA,符合无线传感节点设计要求.

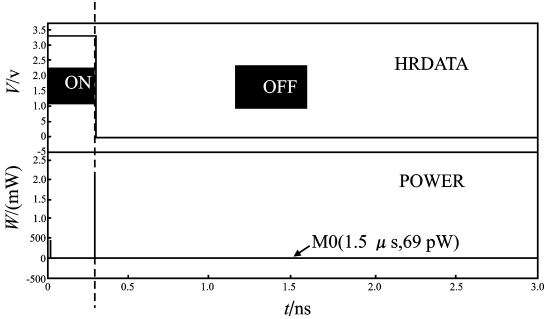


图 10 关断模式下静态功耗仿真

5 结束语

在低功耗 MCU 设计中,关断模式下的漏电功耗很大程度上影响着系统和电池的工作寿命. 一方面本文对关断模式下的电源控制进行了优化,减少漏电流来源. 另一方面,电源控制模块采用简单的组合逻辑电路实现,并优化了电平转换单元电路. 通过对电路进行版图后仿真,验证了模块的功能实现并达到低功耗要求.

参考文献:

[1] 周亮. 无线传感器网络低功耗节点控制器芯片设计与实现[D]. 四川:电子科技大学,2007.
[2] 熊涛. 低功耗 MCU 的设计与验证[D]. 北京:中国科

学院大学,2016.
[3] Atmel. Setting a new low power standard for ARM Cortex-M0 + based microcontrollers [EB/OL]. [2016-10-18]. <http://www.atmel.com/products/microcontrol/arm/sam-1.aspx>.
[4] Silicon Labs. EFM32TM32-bit Micro- controllers (MCUs) [EB/OL]. [2016-10-17]. <http://www.silabs.com/products/mcu/32-bit/Pages/32-bit-microtrollers.aspx>.
[5] STMicroelectronics, STM32L486xx Datasheet, — Production Data, Jul. 1, 2016. Nov. 20, 2016. http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/2a/2a/2e/48/c7/33/46/15/DM00108833.pdf/files/DM00108833.pdf/jcr:content/translations/en_DM00108833.pdf
[6] 梁福平,陈文亮,施涌潮,等. 新型 MSP430 X32X 混合信号微处理器 [J]. 仪表技术与传感器, 2001,37(6): 35-37.
[7] 张家宁. 基于太阳能的无线传感网节点设计与能量优化[D]. 辽宁:大连理工大学,2015.
[8] 蒋文栋. 数字集成电路低功耗优化设计研究[D]. 北京:北京交通大学, 2008.
[9] Michael Keating, David Flynn. Low power methodology manual for system- on-chip design [M]. Berlin: Springer, 2007: 34-35.

作者简介:

杨紫薇 女,(1991-),硕士研究生. 研究方向为低功耗 MCU 关键技术.
乔树山(通讯作者) 男,(1981-),博士,副研究员. 研究方向为数字集成电路设计、数字电视、绿色无线通信、电力线载波通信. E-mail:qiaoshushan@ime.ac.cn.