

用于智能锁的超低功耗系统的设计与应用^{*}

王炼红[†], 陈颖

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为解决现今指纹锁的高性能和低功耗之间的矛盾,提出了一种基于双核架构的嵌入式系统,采用TI公司AM437x高性能处理器移植识别算法;具有超低功耗的AVR单片机MEGA8微控制器作为主控芯片,以控制非接触启动、红外灯、电机驱动等外围设备,保证系统具有较低的待机功耗.通过设置主控芯片的超低功耗睡眠模式,使得系统大部分时间处于低功耗状态,利用非接触式启动模块控制高耗能识别模块仅在需要的时候上电启动,从而大大降低系统的功耗.综合测试表明,系统休眠时MCU静态工作电流低至 $1.51\ \mu\text{A}$,唤醒时电流优化至 $3.3\ \text{mA}$,8节干电池使用寿命为638 d.相比现有设计方法,兼具更低的功耗和更高的性能.

关键词:超低功耗;静态电流;电源管理;智能锁

中图分类号:TP368.2

文献标志码:A

Design and Application of Ultra Low Power System for Intelligent Lock

WANG Lianhong[†], CHEN Ying

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper presented an embedded system based on dual-core architecture to solve the contradiction between high performance and low power consumption of today fingerprint lock. TI's AM437x high-performance processor was used to transplant identification algorithm, with AVR microcontroller MEGA8 microcontroller of ultra-low power as a master chip to control non-contact start, infrared light, motor drive and other peripherals to ensure that the system has a lower standby power consumption. By setting the ultra-low power sleep mode of the master chip, the system is in a low power state for most of the time, and the non-contact start-up module controls the high power consumption identification module to power up only when it is needed, thus greatly reducing the power consumption. Comprehensive test shows that the static operating current is as low as $1.51\ \mu\text{A}$ when the system is in sleep mode, while the wake-up current is optimized to $3.3\ \text{mA}$. The maximum system life of six dry cells is 638 days. Compared with the existing design methods, the system has both lower power consumption and higher performance.

* 收稿日期:2017-08-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674113), National Natural Science Foundation of China(51674113); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(1053214004), Fundamental Research Funds for the Central Universities(1053214004); 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ4026), Natural Science Foundation of Hunan Province(14JJ4026); 湖南省研究生创新项目(CX2017B112), Graduate Innovation Project of Hunan Province(CX2017B112)

作者简介:王炼红(1971—),女,湖南长沙人,湖南大学副教授

[†] 通讯联系人, E-mail: wlh-01@163.com

Key words: ultra-low power consumption; static current; power management; intelligent lock

近年来,随着生物识别技术和电脑科技的迅速发展,指纹识别技术已广泛地进入大众的视野.随着指纹技术和半导体技术的发展,指纹锁已被广泛应用到军事、保密机构等^[1-3].

目前指纹识别系统主要采用具有高速数据运算能力的 DSP 或者基于 ARM 核的处理器芯片或者高性能现场可编程门阵列 FPGA 来完成算法处理和识别. Wu 等人^[4]应用基于 ARM 内核的 STM32F103ZE 微处理器完成指纹处理以及外设模块的控制,待机功耗为 $0.21 \mu\text{A}$,但识别速度不高. Mondol 等人^[5]使用高性能 FPGA 芯片集成优化后的算法,获得了更高的识别率,但功耗比较高.杨伟钧^[6]采用 TI 公司的 TMS320C5509A 作为处理器,实现指纹算法的移植,系统能稳定运行一个月,但功耗相比文献^[4]中方法要高.以上这些设计方法都只着重于低功耗或高性能单方面的改善,高性能芯片的应用不可避免地会限制系统的整体功耗,从而影响系统在采用电池供电的便携式设备中的应用.

本文基于现有指纹锁的研究方法和发展趋势,为解决指纹锁高性能和低功耗之间的矛盾,设计了一种双控智能电子锁嵌入式系统架构,将识别功能和外设控制功能独立开,主要从系统架构、MCU 电源管理、非接触式启动、嵌入式软件设计以及 MCU 低功耗优化等多方面进行描述.最后测试证明,系统在保证高性能的同时降低了功耗,提高了整个产品的使用寿命.

1 系统架构

本文算法处理芯片选型德州仪器 TI 公司推出的基于 ARM Cortex-A9 内核的 AM437x 高性能处理器,其增强了 3D 图形加速功能,可实现丰富的图形用户界面^[7];外设主控芯片选用 Atmel 公司的 AVR RISC 结构的低功耗 8 位 CMOS 微控制器 ATmega8^[8].内置 5 种睡眠模式,轻松应对各种系统低功耗要求.

系统结构框架如图 1 所示.系统组成包括算法处理模块和外设控制模块.微控制器模块 ATmega8 是整个控制系统的核心,主要用于实现低功耗控制、

数据处理与存储、电源管理、串口通信等功能.算法处理模块则以 AM437x 为中心,实现识别算法的移植,完成后续的图片采集、预处理、特征提取、识别匹配等生物识别的全部功能,并将识别成功信号传递给 MCU.

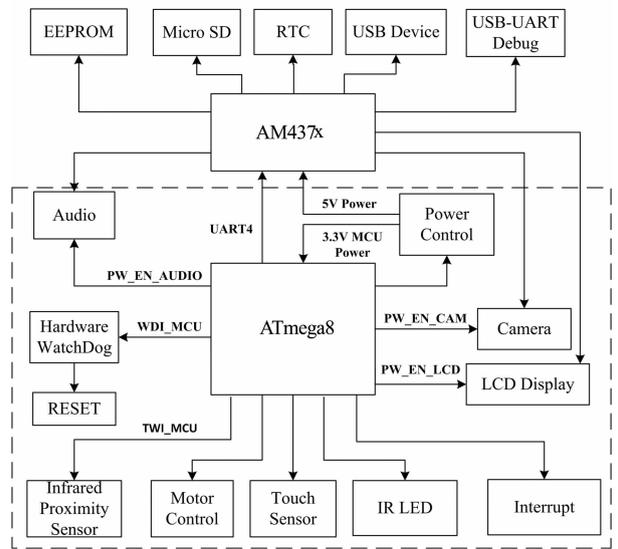


图 1 系统结构框架图

Fig. 1 System structure diagram

2 低功耗设计

2.1 电源管理设计

本系统采用独立降压方式^[9],针对不同的电压需求,设计了合理的电源拓扑结构,结合开关电源,有效地降低系统功耗.图 2 主路电源经过转换分别得到 3.3 V、5.0 V、3.15 V 和 1.6 V 的电源以供给不同模块.

MCU 可通过其使能端无效方式来中断 EEPROM、模拟比较器、ADC、看门狗定时器等工作,以此在最大程度上减少整个系统的功耗.

2.2 低功耗软件设计

智能锁大部分时间都处于关闭状态,睡眠期间的功耗占整体能量消耗的比例很大,因此降低待机功耗延长电池寿命是关键问题.为了最大限度地降低功耗,关键在于:心跳间隔 ΔT 无限延长,心跳时间 Δt 无限缩短,睡眠电流 I_s 无限降低.

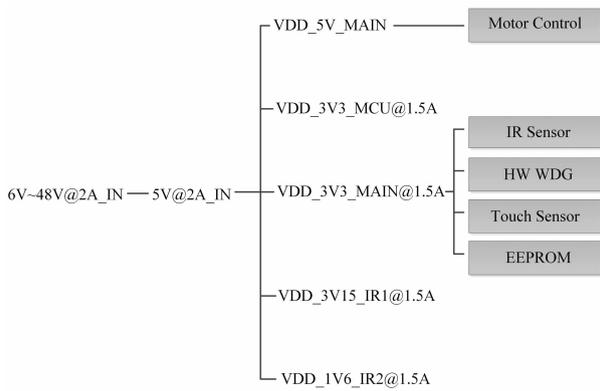


图 2 电源树
Fig. 2 Power tree

图 3 为 MCU 和 MAX44000 工作电流曲线图。图 3 中, I_{w1} 、 I_{w2} 分别为 MCU 和非接触式启动模块的唤醒电流; I_{s1} 、 I_{s2} 为两者的睡眠电流; ΔT 为系统睡眠周期; Δt_1 为 MAX44000 唤醒时间。若非接触式启动模块一直处于待机状态, 功耗将会很大, 优化后, 非接触式启动只在 MCU 唤醒后开启短暂的一段时间, 既能激活电路也能大大降低系统的功耗。关键参数设置如下:

1) MAX44000 唤醒时间 Δt_1 。MAX44000 接近检测的数据读取时间间隔可以设置为 1.56~100 ms。经测试, 在有效检测范围内, 手势动作在 2 ms 内就可以被检测到, 因此让 MAX44000 在 MCU 唤醒时开启 2 ms 即可, 其他时间让其处于关闭状态, 即 MAX44000 的唤醒时间 Δt_1 设置为 2 ms。

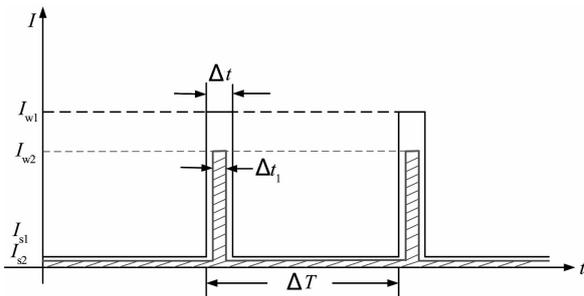


图 3 MCU 和 MAX44000 工作电流曲线图
Fig. 3 Measured working current of MCU and MAX44000

2) MCU 唤醒时间 Δt 。MCU 唤醒时间包括: 启动时间 6 个时钟周期; 启动后 MCU 暂停 4 个时钟周期; 无外部中断后的 2 个外部时钟周期和 Δt_1 。因此, 实际唤醒时间为 $63.5 \mu s + \Delta t_1$ 。

3) MCU 睡眠时间 ΔT 。本系统选择省电睡眠模式, TIMER2 比较中断的方式唤醒 MCU, 配置内部

时钟为 4 MHz、外部晶体振荡器选择 32.768 kHz 的有源晶振。根据计算公式(1)来设置睡眠时间, 在比较中断例程中以进行相应的操作。

$$\Delta T = \frac{1\ 024\ OCR_2}{32\ 768} \quad (1)$$

式中: ΔT 时间越长越好, 但是系统在 1.6 s 之内必须进行喂狗操作, 因此本系统配置睡眠时间为 1 s。

2.3 启动电路设计

本文选用 MAXIM 公司的 MAX44000 芯片^[10], 宽动态范围环境光传感器和红外接近检测传感器集为一体。处理后的数据储存在输出寄存器, 可通过 I2C 接口读取, 可编程中断减轻器件数据轮询的工作负荷, 节省微控制器资源并减少系统软件开销, 最终降低系统功耗。图 4 为 MAX44000 电路图。

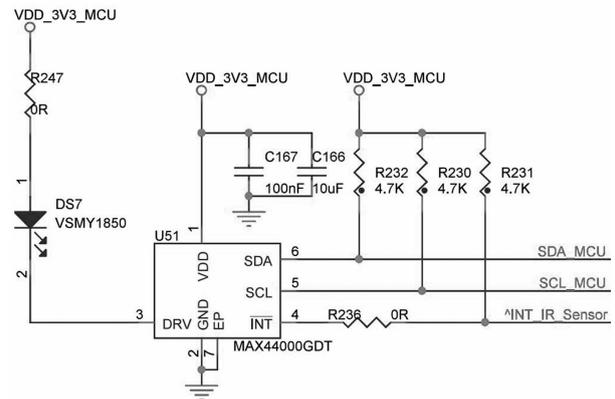


图 4 MAX44000 电路图
Fig. 4 Circuit diagram of MAX44000

非接触唤醒的具体实施并非只是简单地检测高于门限的信号, 关键应该考虑触发唤醒条件的信号电平, 需要在系统响应灵敏度与误报概率之间进行权衡^[11]。门限过低, 会增大误报的概率; 反之, 过高的检测门限能够把误报概率降至几乎为零, 但却只能检测到非常接近的目标。

图 5 为驱动电流在 0~110 mA 时检测距离和动态工作电流的变化曲线, 根据设置驱动电流值来设置合适的门限以保证设备的低功耗。综合系统灵敏度和误报率, 本系统选择最低门限为 8.5 cm, 即设置驱动电流为 30 mA, 此时 MAX44000 静态电流为 1.22 mA。

2.4 软件设计流程图

单片机软件流程如图 6 所示。ATmega8 单片机在开始时将进行一系列的初始化, 之后关闭非接触式模块进入省电模式, 节省电量。定时器在比较中断

后将会跳出省电模式,判断是否有外部中断,若有则开始串口接收数据,当数据接受完之后,单片机进行相应的操作,完成工作后单片机会重新进入到睡眠模式。

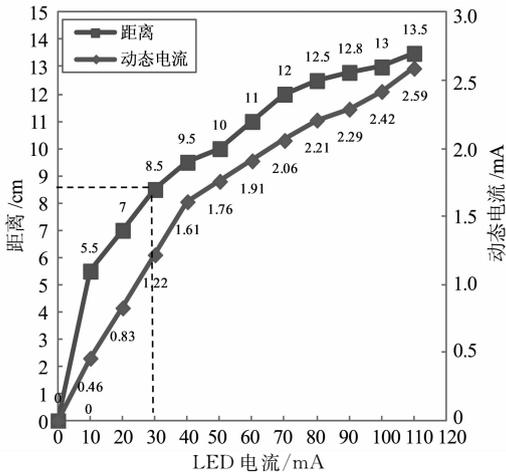


图5 MAX44000 检测距离和工作电流随驱动电流变化图
Fig. 5 Measured detection distance and working current of MAX44000 changing with the driving current

动态功耗是由电路中的电容引起的^[13],设 C_L 为 CMOS 电路的负载电容, V_{DD} 为信号电压, f 代表时钟频率, α 为电路活动因子,那么动态功耗公式为:

$$P_{Dynamic} = \alpha C_L V_{DD}^2 f \quad (3)$$

静态漏电是在二极管反向加电时,晶体管内出现的漏电现象^[14].假设漏电流为 I_{leak} , V_{DD} 为信号电压,则静态功耗为:

$$P_{Static} = V_{DD} I_{leak} \quad (4)$$

静态功耗大部分指睡眠模式下消耗的功耗,单片机需要大部分时间处在睡眠模式下,使应用程序可以关闭单片机里未使用的模块,从而节省电能。

假设本系统在 24 h 内,有 t 小时在等待和工作中(唤醒),有 $(24-t)$ 小时就在睡眠中.唤醒模式下:等待串口信息传输完毕,并执行单片机进行相应操作.睡眠模式下:定时唤醒 MCU,判断是否有外部中断.如果产品使用寿命用 T 来表示,那么有公式如下:

$$T = (C\eta) / [(I_{wait} + I_{work})t + I_{sleep}(24 - t)] \quad (5)$$

式中: C 为电池的容量; η 为电池的效率系数; I_{work} 为运行时即唤醒状态下的平均电流; I_{wait} 为待机状态下的平均电流; I_{sleep} 为睡眠状态下的平均电流; t 为唤醒时间乘以一天内的唤醒次数,则休眠时间为 $(24-t)$,时间是根据实际产品情况预估确定的.由公式(5)可知,若想延长产品的使用寿命,则需要降低平均工作电流。

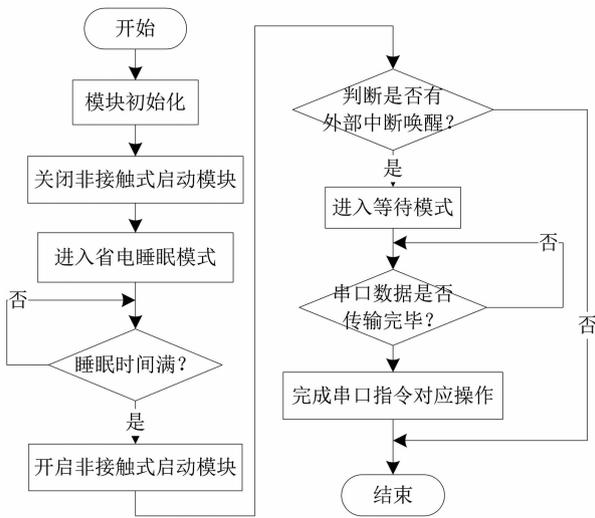


图6 软件流程图
Fig. 6 Flow chart

3 总功耗分析

CMOS 的功耗包括以下内容:静态漏电功耗,内部短路功耗和动态功耗^[12].内部短路功耗可以忽略不计,主要考虑静态漏电功耗 P_{Static} 和动态功耗 $P_{Dynamic}$,因此总功耗 P 可由公式(2)表示。

$$P = P_{Dynamic} + P_{Static} \quad (2)$$

4 实验结果

功耗测试在样机上进行.本文测试的睡眠、唤醒时间间隔太短,精度为 0.1 ms,电流表的时间精度不够描述如此精细的间隔.于是本文提出综合利用电流表和示波器的测试方法,利用示波器的时间精度高读出睡眠、唤醒时间间隔,利用电流表的精准测量测出准确的电流值.最终得到直观、准确的测试结果。

4.1 示波器测试结果

本文使用的示波器为泰克 MDO3012 示波器,其提供内置的频谱分析仪、任意函数发生器、逻辑分析仪、协议分析仪、数字电压表和频率计数器^[15]。

图7中FB37是MCU供电电路上串联的一颗

磁珠,将其替换成电阻,再将示波器探头并联至其两侧,即可得到如图 8 所示的完整信号输出,以此得出精确的时间间隔。

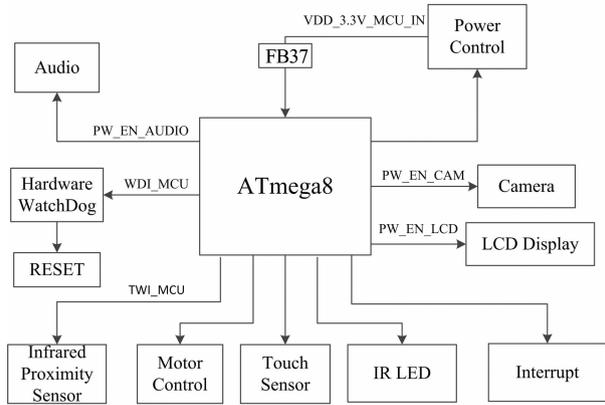


图 7 测试连接示意图
Fig. 7 Connection diagram for test

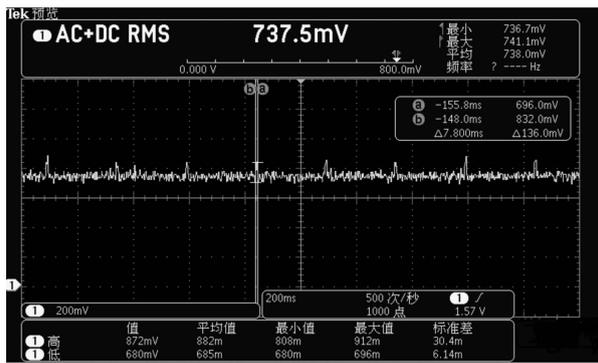


图 8 示波器测试图
Fig. 8 Test diagram of oscilloscope

从表 1 可知,睡眠时间的理论值与实际值相近,唤醒时间的理论值与实际值相差较大。由 2.2 节 2) 得知,若不加 MAX44000 的 2 ms 唤醒时间,MCU 系统唤醒时间 Δt 应为 0.064 ms,但图 8 示波器显示系统实际唤醒时间为 7.8 ms,因此其中有部分时间消耗在 MAX44000 启动上。所以 MCU 实际唤醒时间应为 $\Delta t=2\text{ ms}+7.8\text{ ms}=9.8\text{ ms}$ 。

表 1 示波器测试理论值和实际值对比
Tab. 1 Comparison of theoretical and actual values of oscilloscope test

测量值	睡眠时间/ms	唤醒时间/ms
理论值	250.0	0.064
实际值	249.4	7.800

4.2 万用表测试结果

电池:南孚 AA1.5V 无汞碱性电池;型号:LR6;数量:8(4 节串联形成一组,两组并联)。万用表为泰克仪器的 DMM4040 数字双显数字多用表。采集软件:泰克版 SignalExpressTM。

将图 7 中 FB37 磁珠去掉,再将万用表调至电流档串联进主电路中,此时万用表测出的即为需要测试的 MCU 静态电流。

本文根据系统要求进行优化:更省电的睡眠模式;减小滤波电容值;睡眠模式将 I2C 引脚设置为输出,避免上拉电阻引起的电流泄露;将每个 MCU I/O 口的引脚设置为没有拉电流也没有灌电流泄露的状态等等。

图 9 为优化前后的唤醒电流曲线对比图。测量唤醒电流时,睡眠时间设为 8 ms,远远小于唤醒时间 1 s。图 10 为优化前后的 MCU 睡眠电流曲线对比图,测量睡眠电流时,睡眠时间设为 1 s,远远大于唤醒时间 7.8 ms。

表 2 为 MCU 静态工作电流优化前后对比结果;表 3、表 4 和表 5 分别为静态功耗、动态功耗和系统总功耗统计表。

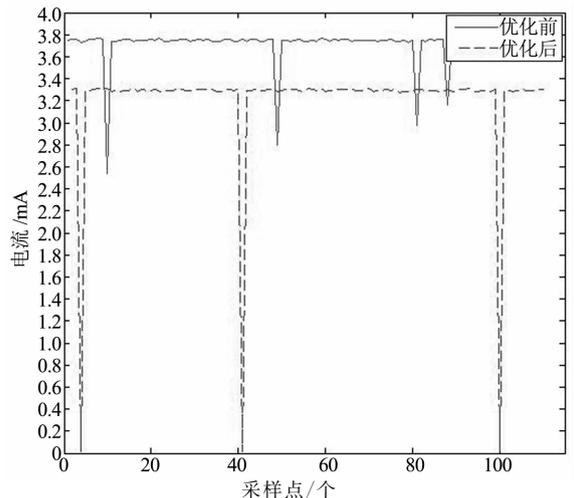


图 9 唤醒电流优化前后曲线图
Fig. 9 Measured wake-up current before and after

由公式(6)计算得出本系统单位时间内消耗的平均静态功耗为 $119.71\ \mu\text{W}$ 。

$$Q = \frac{U_1 I_1 T_1 + U_2 I_2 T_2 + \dots}{T_{\text{总}}} \quad (6)$$

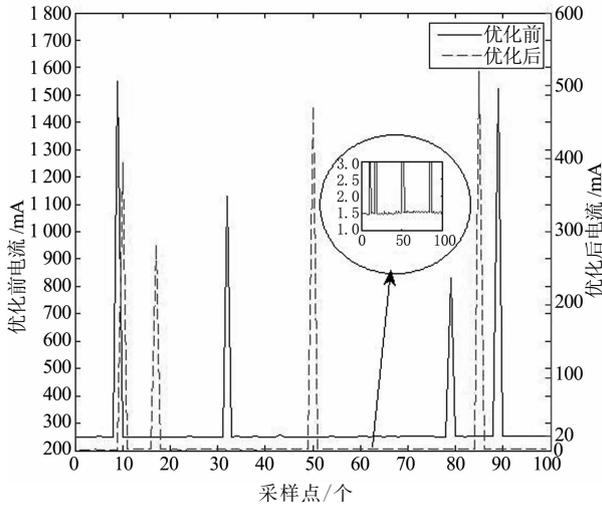


图 10 睡眠电流优化前后曲线图

Fig. 10 Measured sleep current before and after

表 2 MCU 静态工作电流优化前后对比结果

Tab. 2 Comparison results of static current optimization

方案	静态工作电流/ μA	
	优化前	优化后
唤醒模式	3 750	3 300
睡眠模式	250	1.51

表 3 静态功耗统计表

Tab. 3 Statistics table of static power consumption

方案	情形	电流/ μA	电压/V	唤醒时间/ms	唤醒次数/(次 $\cdot\text{s}^{-1}$)
唤醒模式	MCU	3 300	3.3	9.8	1
	MAX44000	1 220	3.3	2.0	1
睡眠模式	MCU	1.51	3.3	990.2	—
	MAX44000	0	3.3	998.0	—

表 4 动态功耗统计表

Tab. 4 Statistics table of dynamic power consumption

方案	电流/mA	电压/V	效率系数/%
AM437x	250	5.0	80
LCD	110	3.3	80
电机动作	30	3.3	—

表 5 系统总功耗

Tab. 5 System power consumption

功耗	项目	功耗/mW	时间/s	实际能量/(mW $\cdot\text{s}$)
动态	AM437x+LCD	2 016.25	36	72 585
	电机	100.00	6	600
静态	MCU+Max44000	0.12	86 364	10 364

在软件设计过程中,休眠采用省电模式. 1 s 内醒来的次数为 1 次,每次 9.8 ms. 每天开锁操作进行 6 次,单次开锁时间 6 s,因此,一天唤醒时间为 36 s,电机操作时间 1 s,其余时间处于睡眠状态.

本文所用电池为 8 节南孚电池,假设 8 节电池的功耗为 5 000 mAH,电池电压为 3.7 V,电池效率系数为 80%,则可以换算得到电池总容量为 53 280 000 mW $\cdot\text{s}$. 将表 5 中实际能量相加即得到本文每天消耗的总功耗,如表 6 所示为 83 549 mW $\cdot\text{s}$,根据公式(5)计算得出本系统工作时间可达 638 d. 在电压、时间等参数一致,电流参数不同的条件下,由文献[9]中结果计算得出的系统工作时间为 128 d,本文比文献[9]多出了近 5 倍.

表 6 系统总功耗对比结果

Tab. 6 Comparison results of system power

具体项目	动态功耗/mW		静态功耗	实际能量
	ARM+LCD	电机	/mW	/(mW $\cdot\text{s}$)
本文	2 016.25	100	0.12	83 549
文献[9]	330	1 089	4.62	417 316

5 结 论

本系统软件设计采用电源管理和心跳设计的方式,提出非触摸唤醒的方式实现人机交互,使得用户拥有更方便的操作,结合电流表与示波器的方式测试工作电流使得功耗检测更加直观、准确.

从实验结果可以看出,双控制核心的系统架构极大降低了系统在待机状态下的电流消耗,同时在识别处理中,减少了 AM437x 对外设的控制,而将控制功能转移到功耗更低的 ATmega8 中,使得工作电流消耗进一步降低,从而延长了电池供电识别系统的使用时间.

本系统扩展性强,能应用于各种实时性要求较低的环境,如智能锁识别系统、便携设备、室外智能省电设备等. 在满足系统实时性的同时又较之其他系统功耗要低很多,为普通家庭的安全防护控制提供了有效途径,同时为智能终端产品超低功耗研究与设计提供了参考价值.

参考文献

[1] 李列文,桂卫华,胡小龙. 一种基于 FPGA 的低功耗、容错状态机设计方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2010,37(6):77

- 82.
- LI L W, GUI W H, HU X L. A FPGA-based design method of low power fault-tolerance finite state machine[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2010, 37(6): 77—82. (In Chinese)
- [2] 姜小波, 叶德盛. 一种新型低功耗异步比较器的设计方法[J]. 电子学报, 2012, 40(8): 1650—1654.
- JIANG X B, YE D S. A new design methodology of low power asynchronous comparator[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(8): 1650—1654. (In Chinese)
- [3] 朱广. 低功耗物联网网关设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 31—36.
- ZHU G. Design and implementation of low-power iot gateway [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(6): 31—36. (In Chinese)
- [4] WU X C, GAO S B, HUANG F. Design of low-power micro fingerprint lock based on STM32F103ZE [C]//International Conference on Electric Information and Control Engineering. Yichang: IEEE, 2011: 1299—1301.
- [5] MONDOL R K, KHAN M I, HYE A K M, *et al.* Hardware architecture design of face recognition system based on FPGA [C]//International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems. Tamil Nadu, India: IEEE, 2015: 1—5.
- [6] 杨伟钧. 一种高性能指纹锁硬件平台的设计[J]. 电子设计工程, 2010, 18(4): 131—133.
- YANG W J. Design of hardware platform for high-performance fingerprint locks[J]. Electronic Design Engineering, 2010, 18(4): 131—133. (In Chinese)
- [7] 杨志兴. 基于 ARM 与 WinCE 的微波变频器嵌入式系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(S1): 194—198.
- YANG Z X. The embedded system design of microwave converter based on ARM and WinCE[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(S1): 194—198. (In Chinese)
- [8] TAN C L, LEI H D. The design of the combustible gas detector based on NAP-100AC [C]//Proceeding of the 35th Chinese Control Conference. Chengdu, China: IEEE, 2016: 5942—5945.
- [9] 杨争辉. 基于 AS602 的智能指纹锁系统设计与实现[J]. 电子器件, 2016, 39(2): 495—500.
- YANG Z H. The design and implementation of a fingerprint lock based on AS602[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39(2): 495—500. (In Chinese)
- [10] 刘志英. 嵌入式设备电源管理系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5): 105—109.
- LIU Z Y. Power management system design of embedded devices[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(5): 105—109. (In Chinese)
- [11] 许海洋, 庄毅, 顾晶晶. 一种面向嵌入式软件体系结构的形式化建模方法[J]. 电子学报, 2014, 42(8): 1515—1521.
- XU H Y, ZHUANG Y, GU J J. A formal modeling method for embedded software architecture[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(8): 1515—1521. (In Chinese)
- [12] 张金刚, 林喜荣, 戴晓清, 等. 指纹识别系统的一种低功耗实现方法与应用[J]. 电视技术, 2011, 35(17): 118—121, 128.
- ZHANG J G, LIN X R, DAI X Q, *et al.* Application and realization method of power consumption reduction in fingerprint identification system[J]. Video Engineering, 2011, 35(17): 118—121, 128. (In Chinese)
- [13] SAMANTA N, KUNDU O, CHAUDHURI C R. A simple low power electronic readout for rapid bacteria detection with impedance biosensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(12): 4716—4724.
- [14] YAN W, WAN Z, HAN P, *et al.* Towards ultra low-power MCU implementation through physical design based on improved multibit SRPG [C]//IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems. IEEE, 2015: 1740—1745.
- [15] LUEDERS M, EVERSMANN B, GERBER J, *et al.* Architectural and circuit design techniques for power management of ultra-low-power MCU systems[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2014, 22(11): 2287—2296.