

一种超低功耗高精度温度传感器芯片设计

赵宇佳, 姜汉钧, 张 羊, 王志华

(清华大学, 北京 100084)

摘 要: 设计了一种基于 UMC 0.18 μm CMOS 工艺的超低功耗、高精度的温度传感器芯片。该温度传感器芯片以温度相关振荡器感应温度变化, 通过温度相关振荡器与温度无关振荡器频率的比较, 将温度信号转化为数字信号输出。温度相关振荡器采用了新型环形振荡器结构, 有效降低了功耗, 并提高了温度测量的精度。该温度传感器核心电路面积只有 0.08 mm^2 , 仿真结果表明, 在 1.8 V 电压下, 传感器芯片消耗电流只有 0.2 μA , 经过校准后精度为 0.1 $^\circ$ 。

关键词: 温度传感器芯片; 超低功耗

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0040-04

A Novel Ultra-low Power Temperature Sensor IC with High Precision

ZHAO Yu-jia, JIANG Han-jun, ZHANG Yang, WANG Zhi-hua

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A novel ultra low power high precision temperature sensor IC is presented. The temperature sensor consists of a temperature dependent oscillator, and the output of the oscillator is compared to a temperature independent frequency signal to generate the digital output. A novel ring oscillator has been used for the temperature dependent oscillator, to reduce the power consumption and to improve the measurement accuracy. The temperature sensor IC is realized in the standard 0.18 μm CMOS process, and the circuit die area is only 0.08 mm^2 . Simulation results show that the temperature measurement accuracy is 0.1 degree after calibration. The current consumption of the sensor IC is only 0.2 μA .

Key words: temperature sensor; low power consumption

1 引言

体温作为反映人体健康状况的重要指标, 在新型穿戴式医疗应用中是一个被重点关注的健康参数^[1]。传统水银体温计不具备在穿戴式电子设备中应用的可能性。电子体温计采用电池供电, 需要更换电池, 严重影响用户体验, 而且使用电池也会带来环保问题。将无源 RFID 标签与温度传感器结合起来, 可以实现无源、快速、高精度的体温测量, 有着较好的应用场景^[2]。实现这样的应用系统, 需要超低功耗、高精度、高集成度的温度传感器。

图 1 所示为一种无源体温检测系统的架构。系统包含两部分, 一是与人体接触的温度传感器节点, 二是基于 RFID 读卡器或具有近场通信功能的智能手机的个人网关。传感器节点由无源 RFID 芯片和温度传感器芯片组成。无源 RFID 芯片为传感器芯片提供电源(读卡器/手机为 RFID 芯片无线供能), 并将温度传感数据无线传递给读卡器/手机。

本文设计了一种基于 0.18 μm CMOS 工艺的高精度、超低功耗的温度传感器芯片, 可用于上述系统中的传感器节点。该芯片具有精度高、响应速度快的特点, 可以用于无源 RFID 芯片结合。

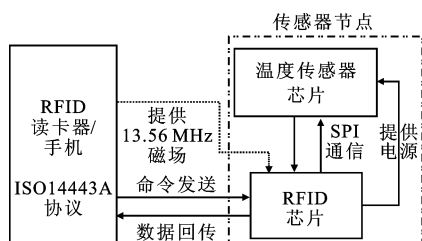


图1 无源体温检测系统架构

2 温度传感器原理及结构设计

文献[3]中给出了一种典型的低功耗温度传感器,功耗只有 $0.9 \mu\text{W}$,但是它的精度只有 $\pm 1^\circ$,远远不满足体温检测的需求。

2.1 温度传感器芯片结构设计

图2为本文所采用的温度传感器芯片的结构框图[3],包含以下几个部分:提供参考电流的带隙基准源电路、连续脉冲发生器、温度相关振荡器、计数器和数字控制模块。其中,连续脉冲发生器产生与温度无关的脉冲信号作为计数器的复位时钟,温度相关振荡器产生频率正比于绝对温度的时钟信号作为计数器的计数时钟。每当脉冲发生器产生一个高电平,计数器复位清零;当脉冲发生器产生低电平,计数器持续计数,直至再产生一个复位信号,计数器计数值达到最大,将此计数值输出,作为温度数据。复位时钟的频率与温度无关,计数时钟的频率正比于绝对温度,所以计数器输出数值正比于绝对温度。

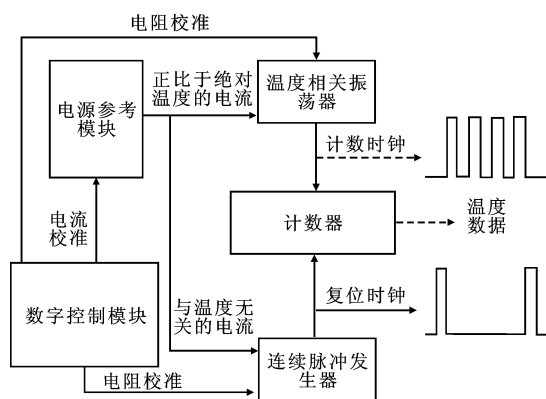


图2 温度传感器结构框图

数字控制模块为温度传感器提供使能控制,SPI接口为该传感器与RFID芯片的通信提供接口。芯片输出受工艺影响,本设计在数字控制模块中增加校准寄存器,可通过校准来解决工艺偏差带来的温度测量准确度问题。

2.2 温度相关振荡器设计

图3为温度相关振荡器原理框图。采用了环形振荡器的变形结构[4],可以有效地解决传统温度相关振荡器由于开关状态频繁改变造成的脉冲电流非常大,使整体功耗增大的问题。电路的使能端EN由数字模块控制产生,每当复位信号结束,数字控制模块产生一个使能信号,控制温度相关振荡器开始震荡,产生正比于绝对温度的时钟信号。

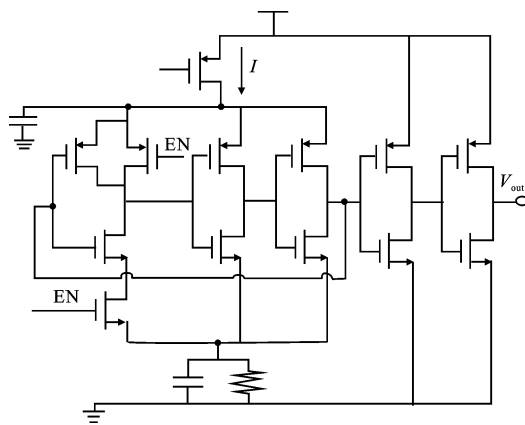


图3 温度相关振荡器电路图

环形振荡器每一级的延迟时间为 t_d ,则温度相关振荡器频率为

$$f = \frac{1}{N_s t_d},$$

每一级的延迟时间为

$$t_d = \frac{C_L (V_H - V_L)}{I},$$

则振荡器频率为

$$f = \frac{N_s I}{C_L (V_H - V_L)}.$$

式中, N_s 为振荡器级数。

在本设计中,电流 $I = kT$ 正比于绝对温度,由带隙基准源电路产生; C_L 是每一级的负载电容,由MOS管的尺寸决定; N_s 是振荡器的级数; V_H 和 V_L 是输出电压变化范围。设 $K_T = \frac{N_s \cdot k}{C_L (V_H - V_L)}$,则设计完成后, K_T 不随温度变化,温度相关振荡器的频率, $f = K_T \cdot T$ 正比于绝对温度。

图4所示为温度相关振荡器频率随温度变化曲线,可以看出温度相关振荡器频率与温度成正比关系。其中温度相关振荡器频率为 3 MHz ,可以达到斜率 K_T 为 $100 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 。

2.3 校准模块设计

连续脉冲发生器(如图5所示)采用文献[3]中的结构。理论上连续脉冲发生器频率恒定不变,但实

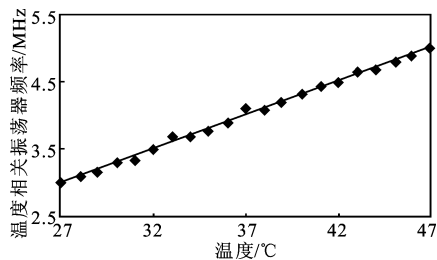


图4 温度相关振荡器频率-温度曲线

际仿真结果如图5中的校准前曲线所示. 连续脉冲发生器频率随温度变化波动非常大, 严重影响温度传感器的测量精度.

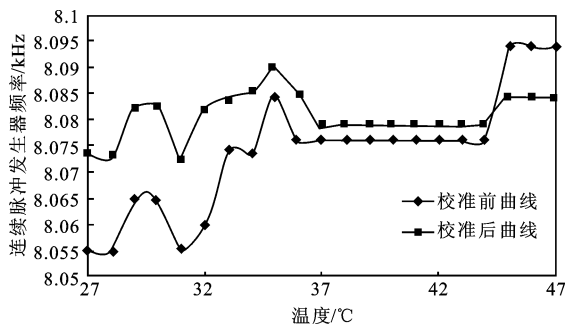


图5 连续脉冲发生器校准结果

连续脉冲发生器的频率与电阻阻值大小有关, 所以对电阻校准非常必要. 由于电阻的变化, 电流值也会受到影响, 所以对电流的校准也是必须的, 图6显示了校准电路的结构. 校准电路由三部分组成, 数字控制部分、电阻校准部分和带隙基准电流源校准部分.

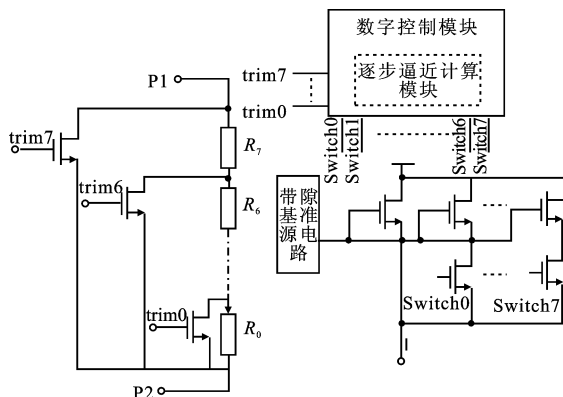


图6 校准模块设计

如图6所示, 电阻校准采用逐步逼近8位校准法, $R_7 = 2 \cdot R_6 = \dots = 2^7 \cdot R_0$, 当 trim7 打开, 其他开关闭合时, 只有 R_7 接入电路中, 若补偿不足, 再打开 trim6, 接入 $R_6 = R_7$ 进行补偿...用这种方法, 可以逐次逼近, 提高补偿效率与效果. 由于电阻的改

变, 电流也要相应的进行补偿. 例如在连续脉冲发生器中电阻两端电压要维持恒定不变, $V_n = I \cdot R$, R 受到工艺影响改变, 则 I 也需要相应的改变. 在图中, 采用开关控制8条支路的电流镜电流是否给电阻供电, 可以有效的控制补偿电流的大小, 配合电阻补偿, 有效的提高精度.

校准过程如图7所示, 当电路初始工作时, 先测量两个温度下计数器输出的数值 (T_1, D_1) (T_2, D_2) , 由于输出数字与温度成线性关系, 所以两个温度即可很好的拟合出输出数据-温度曲线. 每次上电数字部分都先从 RFID 芯片的 EEPROM 中读取理论数值, 通过理论拟合值与实际输出值比较, 计算出需要补偿的电阻和电流大小, 控制开关通断得到相应的电阻和电流值, 就可以有效读取准确的温度数据.

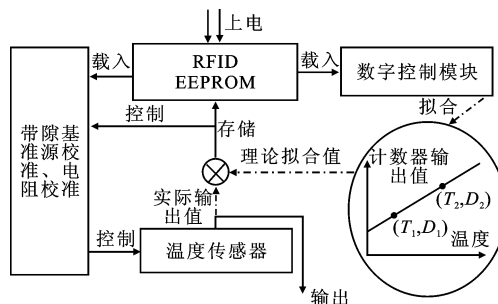


图7 校准过程流程图

图5所示为连续脉冲发生器校准前后的结果. 如图所示, 在 $27 \sim 47^\circ\text{C}$ 范围内, 校准后连续脉冲发生器频率波动在 100 Hz , 几乎保持恒定. 本设计中 f_c 为 10 kHz , 温度传感器芯片每秒有效数据为 $10\,000$ 个.

2.4 温度传感器精度讨论

温度传感器的精度与连续脉冲发生器一个周期内, 可识别的温度相关振荡器频率随之变化的最小温度有关. 假设连续脉冲发生器频率为 f_c , 不随温度变化; 温度相关振荡器频率为 f_T , 正比于绝对温度 T , 如图8所示, 设斜率为 K_T , 则 $f_T = K_T \cdot T + C$.

设计数值为 Q , 则

$$Q = \frac{f_T}{f_c},$$

测量精度:

$$T_t = \frac{f_c}{K_T}.$$

根据公式, 温度相关振荡器可以达到的精度为 $\pm T_t^\circ\text{C}$. 提高温度相关振荡器随温度变化的斜率 K_T

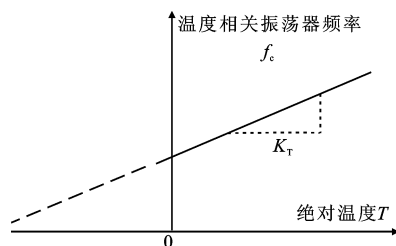


图8 频率-温度曲线

和减小连续脉冲发生器的频率 f_c 都可以提高精度。

如果连续脉冲发生器频率随温度变化的斜率 K_c 也考虑进来的话,测量精度为 $T_t = \frac{f_c}{K_T - K_c}$ 。

只要温度相关振荡器频率随温度变化为线性关系,上述精度公式就是正确的。2.3节中所述的校准模块也可以提高此线性度。

在本设计中, f_c 为 9.8 kHz, K_T 为 100 kHz/°C。由于受到脉冲发生器高电平宽度、脉冲发生器频率随温度变化等影响,实际仿真精度为 0.1°C。

3 仿真结果与版图设计

图9所示为温度传感器在 27~47°C 下的后仿结果。在测量范围内,温度输出曲线几乎成线性关系。图10所示为温度传感器的版图设计。核心芯片面积大小只有 0.08 mm²。

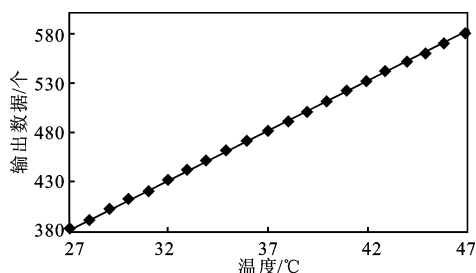


图9 频率-温度曲线

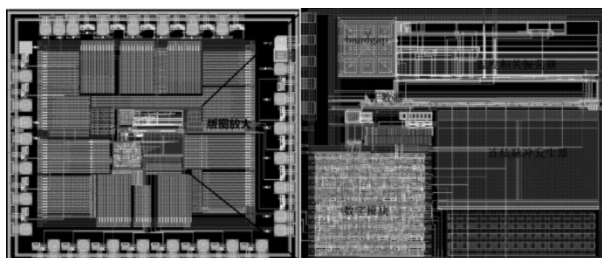


图10 温度传感器版图

下面将本文温度传感器芯片与典型温度传感器芯片进行性能对比,如表1所示。

表1 与典型电路性能对比

参考文献	测量范围/°C	精度/°C	功耗/ μ A	面积/mm ²
文献[3]	27~47	1	0.05	0.02
文献[5]	10~80	0.23	0.5	1
本设计	27~47	0.1	0.2	0.08

在对比表中可以看出,本设计在 27~47 °C 的温度范围内,功耗低、精度高、面积小,为 RFID 供电的体温检测系统提供了有效的解决方案。

4 结束语

该温度传感器采用数字控制自动校准设计,在 27~47 °C 温度范围内,精度为 0.1 °C,功耗只有 0.2 μ A,面积只有 0.08 mm²,在精度、功耗、面积三者间找到有效的折中方法。超低功耗设计使得该芯片可用于无源体温采集,小面积和高精度有效的提升温度采集节点的性能(体积、测量精度)。

参考文献:

- [1] 汪朝红, 吴凯, 吴效明. 穿戴式生理检测技术的研究及应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11 (22): 4384-4386.
- [2] Milici S, Amendola S, Bianco A, et al. Epidermal RFID passive sensor for body temperature measurements[C]// RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), 2014 IEEE. Finland, Tampere, IEEE, 2014: 140-144.
- [3] Shenghua Z, Nanjian W. A novel ultra low power temperature sensor for UHF RFID tag chip[C]// Solid-State Circuits Conference, ASSCC'07. Taiwan, Taipei, IEEE Asian, IEEE, 2007: 464-467.
- [4] Sundaresan K, Allen P E, Ayazi F. Process and temperature compensation in a 7-MHz CMOS clock oscillator[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2006, 41 (2): 433-442.
- [5] Kim S, Cho J H, Kim H S, et al. An EPC Gen 2 compatible passive/semi-active UHF RFID transponder with embedded FeRAM and temperature sensor [C]// Solid-State Circuits Conference, ASSCC'07. Taiwan, Taipei, IEEE Asian. IEEE, 2007: 135-138.

作者简介:

赵宇佳 女, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计. E-mail: zhao_yujia@126.com.