

基于 FPGA 新型压电化学传感器的设计与实现

Designing and Implementing the New Type of Piezoelectric Chemical Sensors Based on FPGA

王 峰 赵又新

(兰州工业高等专科学校电气工程系,甘肃 兰州 730050)

摘 要: 针对研究单位面积上质量变化的传感器要求具有可靠性好、体积小、重量轻、功耗低、速度快和精度高等特点,采用 FPGA 和单片机技术对压电化学传感器信号进行提取和处理,并在传感器上开发上位机实时监控功能,给出了系统的软硬件设计。仿真实验结果证明,该传感器满足设计要求。

关键词: FPGA 压电化学传感器 频率测量 温度控制 可靠性

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A

Abstract: For researching the quality change per unit area, it is requested that the sensors shall be compact, low power consumption, light in weight, and offering good reliability, fast speed measurement and high accuracy. By adopting the technologies of FPGA and MCU, the signals of piezoelectric chemical sensors are collected and processed, and the host computer real-time monitoring function is developed to the sensor. The design of hardware and software for the system is presented. The simulation result verifies that the sensor meets the design requirements.

Keywords: FPGA Piezoelectric chemical sensor Frequency measurement Temperature control Reliability

0 引言

在航天器敏感表面污染量测量、石油品质监测、金属大气腐蚀实验、真空镀膜监测和医学检验等许多领域,都需要研究单位面积上质量变化的情况。质量型压电化学传感器即石英晶体微量天平 PQCM (piezoelectricity quartz crystal microbalance) 是一种主要的质量感测设备,其灵敏度极高,达到 $0.001 \text{ mg}^{[1]}$ 。本文利用 FPGA 和单片机技术,实现了把石英晶体天平的频率变化转变成质量变化的通用电路设计。在温度一定的情况下,由该电路构成的传感器具有灵敏度高、测量精确、体积小、重量轻、功耗低和可靠性高等优点。

1 设计原理

1.1 PQCM 工作原理

石英晶体的振荡频率决定了测量精度的高低。图 1 所示为 15 MHz 压电石英晶体结构,其质量灵敏度为 $1.10 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{Hz}^{-1})^{-1}$ 。晶体两面镀上金属材料作为电极,通过谐振电路驱动,在两电极之间形成一个与时间相关的电场,从而使晶体以一定的频率振荡。

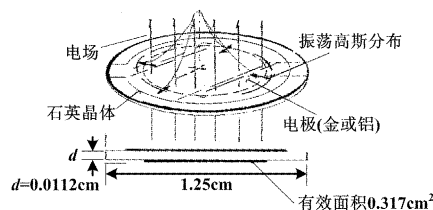


图 1 15 MHz 压电石英晶体结构

Fig. 1 Structure of the 1.5 MHz PQCM

石英晶体的振荡频率由晶体本身以及电极外表附着物质的总质量决定,即:

$$\Delta f = -2.26 \times 10^6 f_0^2 \Delta M / A \quad (1)$$

式中: Δf 为频率变化量; f_0 为晶体的基本谐振频率; ΔM 为沉积在电极上的物质质量变化量; A 为工作电极的面积。该式即为通常所称的索氏 Sauerbrey 公式^[2]。

1.2 频率测量原理

常用的频率测量方法有测频法和测周期法两种。

测频法就是在确定的闸门时间 T 内,记录被测信号的变化周期数(或脉冲个数) N_x ,则被测信号的频率为 $f = N_x / T$ 。

测周期法需要有标准信号的频率 f_b ,同时,在待测信号的一个周期 T 内,记录标准频率的周期数 N_s ,则被测信号的频率为 $f = f_b / N_s$ 。

这两种方法的计数值会产生 $\pm 1 \text{ Hz}$ 的误差,并且测试精度与计数器中记录的数值 N_x 或 N_s 有关。对于测

修改稿收到日期:2010-03-31。

第一作者王峰,男,1966年生,1988年毕业于武汉理工大学自动化系,获硕士学位,副教授;主要从事自动控制和电力系统自动化方面的教学与科研工作。

量范围比较大的频率信号,通常采用两种方法相结合的方式来实现测频;而低频通常采用测周期法实现,高频则采用测频法实现^[3]。石英晶体微量天平中有两个需要测量的传感器频率信号,一个是由测量晶体产生的频率信号,另一个是由参考晶体产生的频率信号。两者的频率信号都在 15 MHz 上下变化,被测量信号属高频信号。系统频率测量原理框图如图 2 所示。

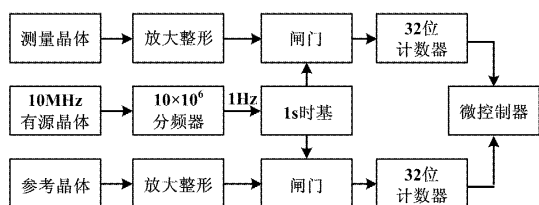


图 2 频率测量原理图

Fig. 2 Principle of frequency measurement

在压电石英晶体微量天平系统中,根据设计要求,测量信号的频率的绝对测量精度要达到 ± 1 Hz。从图 2 所示的测量原理框图可知,分频器产生 1 s 时基闸门控制信号,控制测量晶体和参考晶体的脉冲信号通过闸门进入 32 位计数器,32 位计数器在 1 s 内计数的脉冲数即为被测频率。按照这种测量方法,理论上可以计算出最大测量绝对误差为 ± 1 Hz。这 ± 1 Hz 误差是在 1 s 闸门开启和关闭前后造成的多计或少计一个被测测量脉冲而产生的。如果提高计数器的闸门开启时间就会减少这种测量误差,从适用的角度看,这种误差不会对传感器的质量检测造成影响;反之,如果减小 1 s 的闸门控制时间,则会加大这种绝对误差。由于系统采用可编程的计数逻辑电路,因此,可以根据实验结果,在兼顾传感器的响应快速性和准确性上折中处理。

2 结构设计方案

2.1 系统硬件设计

由于测量频率信号在 15 MHz 左右,采用 51 系列单片机分辨不出如此高的信号;而若采用硬件数字电路实现,则需要较多的数字芯片,不能满足系统小体积、低功耗的设计要求。因此,系统选用 FPGA 实现。

整个测频系统分为信号同步输入、控制部件、分频器、计数部件、放大整形和标准频率信号等模块^[4],除放大整形和标准频率信号模块外,其他模块都可集成在 FPGA 芯片中,从而大大缩小了系统体积。

系统首先采用 VHDL 硬件描述语言对各功能模块进行逻辑描述;然后通过 EDA 开发平台,对设计文件自动逻辑编译、逻辑化简、综合优化、逻辑布局布线和逻辑仿真;最后对 FPGA 芯片进行编程,实现系统设计要求。

系统整体硬件电路设计框图如图 3 所示。

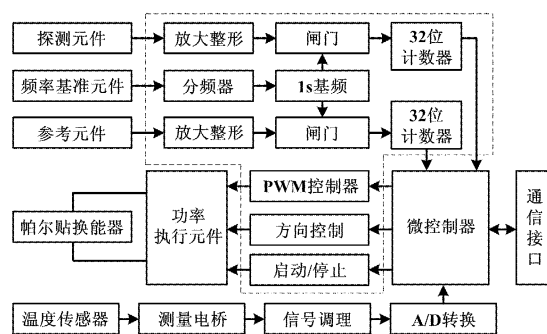


图 3 整体硬件电路设计原理图

Fig. 3 Principle schematic of hardware design

2.1.1 微控制器系统

设计选用的微控制器型号为 P89V51RD2,是由 Philips 公司生产的一款 80C51 单片机,包含 64 kB Flash 和 1 024 B 的数据 RAM;操作频率为 0 ~ 40 MHz;具有高速和低功耗的特点,且性价比高。系统采用 80C51 单片机作为控制核心,以实现温度控制、数据处理和通信的功能。具体电路设计如图 4 示。

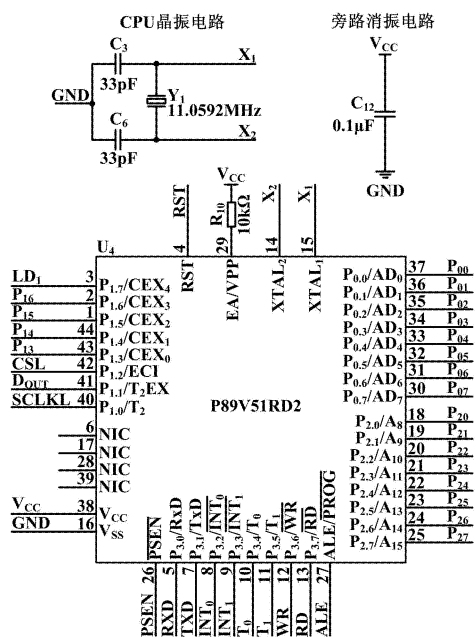


图 4 单片机电路设计图

Fig. 4 Circuit design of single chip computer

2.1.2 振荡及信号调理电路

根据石英晶体的工作原理,其核心部件是夹在一对电极中的 AT 切割石英晶体。电极与振荡器连接,将交流电压与电极接通后,石英晶体会因为压电效应而振荡^[5]。因此,为使石英晶体可靠地工作,必须设计一个合适的振荡电路。自激振荡和信号调理电路原理如图 5 所示。

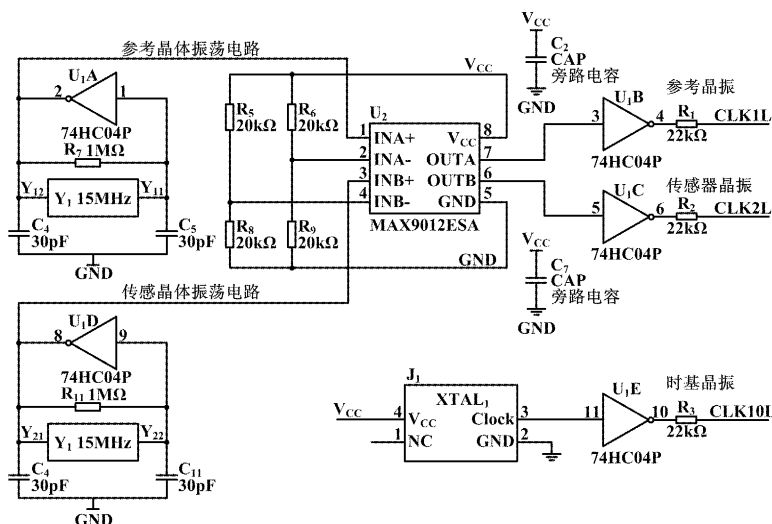


图 5 自激振荡和信号调理电路原理图

Fig. 5 Self-oscillation and signal conditioning circuit

2.1.3 频率测量电路

测频电路实现的功能是测量传感器的频率信号，并与参考晶体产生的频率信号进行比较，形成差频信号。FPGA 具体完成的功能说明如下。

① CLK1L、CLK2L 管脚分别接参考石英晶体频率信号和测量石英晶体频率信号，CLK10L 管脚接基准频率信号；

② FPGA 将测得的两个频率数据分别存储在 4 个 8 位的寄存器中，并每隔一周进行一次刷新；

③ P₀₀ ~ P₀₇、P₂₀ ~ P₂₇ 在微控制器作用下分别输出参考晶体和测量晶体的频率的计数值。

2.1.4 温度测量和控制电路

温控电路在本设计中的地位非常重要，它是保证测量精度的关键因素。由于 AT 切割晶体的优点是在室温下几乎没有频率漂移，因此，要保证温度恒定不变。如果改变温度，则频率值会发生改变。温控电路使测量晶体和参考晶体都在相同的温度（恒温控制）下工作，具有相同的频率变化特性。

① 温度测量电路

温度测量电路由铂电阻（PT100）、可调电阻（RZ₁）、双路恒流源（REF200）、单电源低功耗输出仪表放大器（AD627AN）和 A/D 转换器（MAX187AEPA）组成。它相当于改进的惠斯通平衡电桥，把铂电阻作为电桥的一个桥臂，当待测目标温度变化时，铂电阻阻值发生变化，在电路中表现为铂电阻两端的电压变化，从而改变电桥的平衡状态。放大器将电桥的不平衡量（电压信号）经放大后上传到 A/D 数据采集转换芯片，转换结果作为温控程序的控制基准送入 FPGA 进行储存。单片机对温度数据进行读取，并将与设定值比较

后的数据经过 PID 运算，控制由 FPGA 产生的 PWM 波的占空比输出。可变电阻 W₁ 可以对放大倍数进行调整，达到提高精度的目的。

温度测量电路如图 6 所示。

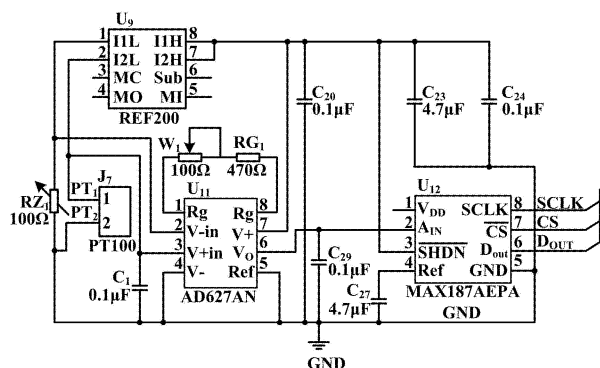


图 6 铂电阻测温电路原理设计图

Fig. 6 Principle of RTD temperature measuring circuit

② 功率驱动电路

单片机将 PID 运算的结果通过 FPGA 转化为不同占空比的 PWM 脉冲信号输出，信号经过驱动电路作用于执行机构。帕尔帖热换能器的功率驱动采用“H”型（全桥式）电路结构，由 MOSFET 场效应管（IRF9530）和光电隔离器件（TLP521-1）组成，控制输出采用 PWM 方式实现。

功率驱动电路可以在单电源供电的条件下完成对负载的双向电流驱动以及帕尔帖半导体制冷和制热操作，从而实现目标的温度控制^[6]。电路如图 7 所示。图 7 中，开关 S₁ 用于调试，以防止短路；开关 S₂、S₃ 均用于内、外部电源选择。

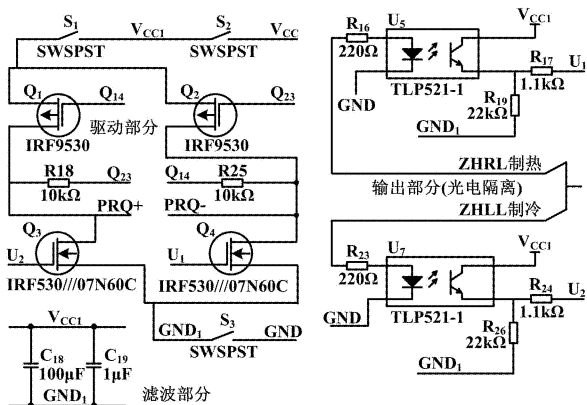


图 7 功率驱动电路原理设计图

Fig. 7 Principle of power drive circuit

2.2 系统软件设计

在系统软件设计中,为充分利用 FPGA 的功能,将频率的测量和温度的测量任务以及 PWM 信号的产生都设计在了 FPGA 中。下位机(80C51单片机)的功能比较简单,其主要完成如下任务。

① 读取存储在 FPGA 中的参考晶体和测量晶体频率,并进行差频计算,换算成质量数据后传送到上位机进行显示;

② 读取存储在 FPGA 中的测量探头的温度测量值,并与温度设定值比较后进行 PID 计算,以控制 PWM 信号的占空比,达到温控的目的;

③ 读取存储在 FPGA 中的代表温度测量值的电压数据,并将其转换为温度数据送到上位机进行显示;

④ 与上位机进行通信。

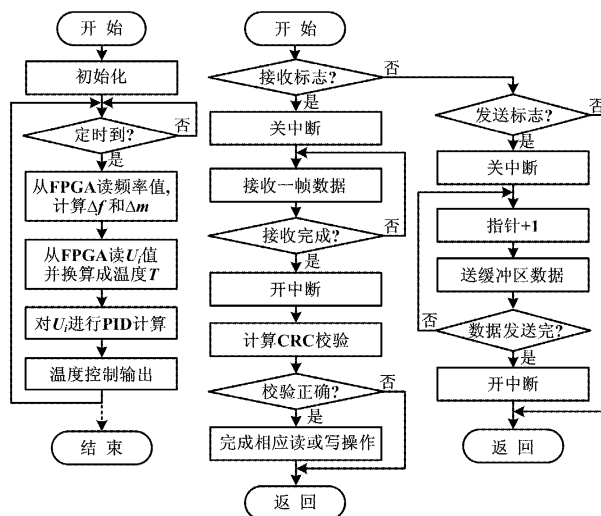
在本系统中,采用了定时器中断和串行口中断。定时器中断实现 CPU 与 FPGA 之间读取数据的功能;串行口中断实现 CPU 与上位机的通信功能。

3 测试结果

各逻辑模块运用自顶向下的设计理念,采用硬件描述语言 VHDL 来描述其功能。将系统按功能和层次划分,首先定义顶层功能模块,并对顶层功能模块内部的连接关系和对外的接口关系进行描述,而定义好的顶层功能模块的逻辑功能和具体实现形式则由下一层模块来描述。

模块整体设计分为两步:①利用 Quartus II 5.0 图形块输入方式设计顶层模块;②在顶层模块,为每个图形块生成硬件描述语言,并在生成的 Verilog HDL 设计文件中对底层功能模块的功能进行描述设计,然后通过 EDA 开发平台,自动完成设计文件的逻辑编译、逻辑化简、综合优化、逻辑布局布线和逻辑仿真,最后对

FPGA 芯片进行编程,实现系统的设计要求。图 8 所示为测频主系统程序流程图。



(a) 下位机主程序流程 (b) 通信中断程序流程

图 8 测频主系统程序流程图

Fig. 8 Flowchart of frequency measuring system

计算机通过 RS-232 与微控制器的 UART 接口进行串口通信^[7],PC 数据采集软件采用 VB6.0 设计。VB6.0 可实现对传感器频率和温度的采集、质量显示以及测量温度设定等功能。

4 结束语

本文介绍的压电化学传感器结构是基于现场可编程门阵列 FPGA 技术设计的一种新型结构,与原有设备相比,系统还具备实时数据采集处理及与上位机通信的能力,适用于研究测量单位面积上质量变化的情况。此外,电路设计通用性强,对类似研究有较高的参考价值。经初步测试表明,该传感器达到了设计的基本要求。

参考文献

[1] 中大忠,康琪. 新型压电化学传感器的理论与应用研究[J]. 抚顺石油学院学报,1996,16(3):13-15.
 [2] Simpson J P, Witteborn F C. Effect of the shuttle contaminant environment on a sensitive infrared telescope[J]. Applied Optics,1977, 16(8):2051-2073.
 [3] 袁广超,田旭东,陈恩,等. 基于 CPLD 的振弦式传感器的频率测量技术[J]. 自动化仪表,2009,30(11):63-66.
 [4] 吴繁红. 基于 MCU 和 FPGA/CPLD 结构的测频装置[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2003,20(4):84-86.
 [5] 杨丰林,张钊锋,李宝骐. 一种高性能的 CMOS 晶体振荡电路的设计[J]. 中国集成电路,2004(1):52-55.
 [6] 杨小玲. 基于半导体致冷的高精度温度控制系统[J]. 仪表技术与传感器,2007(3):52-53.
 [7] 耿新伟,邵伟,裴红星. 基于 VB 的计算机与单片机间的串行通信[J]. 焦作大学学报,2004,18(4):31-32.