

# 基于 PQCM 和 FPGA 的空间应用分子污染监测仪设计

王峰<sup>1</sup>, 王晓兰<sup>2</sup>, 赵又新<sup>1</sup>, 颜则东<sup>3</sup>

(1 兰州工业高等专科学校 电气系, 甘肃 兰州 730050; 2 兰州理工大学 电信学院, 甘肃 兰州 730050;  
3 中国航天科技集团公司五院兰州 510 所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 在航天器研制过程中如何精确地对分子污染进行检测和量化, 从而为有效采取适当的污染控制和预防措施提供帮助是一个很迫切的问题; 对现有同类产品进行研究后, 利用了 FPGA (现场可编程门阵列) 技术, 设计了一个带温度控制 15MHz 压电石英晶体微量天平 (PQCM), 形成了微量分子污染物监测仪的核心, 为了便于对多点进行监测, 通过 RS485 通信接口将它设计成了网络型; 特别是 FPGA 技术的使用, 满足了空间应用高集成度、高可靠性、小体积、重量轻、功耗低、速度快、精度高的苛刻要求。

**关键词:** FPGA; 分子污染; 频率测量; 温度控制

## Design of the Device Based on PQCM and FPGA for Monitoring and Measuring Molecular Contamination in Spacecraft

Wang Feng<sup>1</sup>, Wang Xiaolan<sup>2</sup>, Zhao Youxin<sup>1</sup>, Yan Zedong<sup>3</sup>

(1 Lanzhou Polytechnic College, Lanzhou 730050, China;

2 Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3 Lanzhou 510 Institute China Aerospace Science and Technology Corporation, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The device of the thermal controlled 15MHz quartz crystal microbalance based on FPGA (field programmable gate array) technology was developed for monitoring molecular pollution in this paper. In order to monitor more place, it was became Network by RS485 communication interface. The main purpose of the device is for spacecraft monitoring and measuring molecular contamination during the developing process, so it is to help in taking effectively pollution control and preventive measures. Main contents in the paper are to analysis the working principle of PQCM and design thinking of measuring circuit and the thermal controlled circuit. Especially, because of using FPGA, the design is better than similar equipment designed; it meets the stringent requirements in space, such as high level of integration, high reliability, small size, light weight, low power consumption, high speed, and high accuracy.

**Key words:** FPGA; PQCM; molecular contamination; frequency measurement; thermal control

### 0 引言

PQCM (压电石英晶体微量天平) 作为微量分子污染物的探测元件在许多领域中都得到广泛应用, 它的优点是在温度一定情况下, 灵敏度极高, 测量精度非常精确, 实时性好。FPGA (现场可编程门阵列) 是一种高密度的可重复编程门阵列, 与通用集成电路相比具有体积更小、重量更轻、功耗更低、可靠性高、保密性强、成本低等优点<sup>[1]</sup>。结合它们的各自长处, 为研制开发测量航天器敏感表面的污染量——分子污染监测仪提供了更好的办法。

随着航天科学技术的迅猛发展, 航天器的应用已经渗透到很多领域。由于航天器的造价高, 修复困难等原因, 因而对航天器的可靠性和使用寿命等方面提出越来越高的要求。监测航天器敏感表面的污染量, 采取适当的控制和预防措施变得越来越迫切。与兰州 510 所合作, 成功开发研制出适合空间应用的分子污染监测仪, 通过该监测仪获得的监测数据可以评估和确定航天器研制全过程以及在轨运行所采取的全部污染控制措施

的最终效果, 并为在轨飞行器周围环境的污染情况提供一种精确的测量方法。对提高像卫星等航天器的使用寿命具有非常重要的意义。

### 1 整体结构设计方案

#### 1.1 分子污染监测仪结构

该分子污染监测仪是由多个石英晶体微量天平 PQCM 组成, 通过 PQCM 提供的通信接口 (RS485), 可组成石英晶体天平测量网路, 测量数据由计算机通过通信网络采集。其网络构成如图 1 所示。

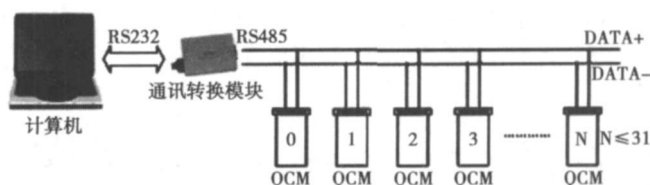


图 1 网络连接示意图

#### 1.2 石英晶体天平 (PQCM) 组成框图

石英晶体天平 (PQCM) 由测量传感头, 测量控制电路两部分组成。其中测量传感头由频率约 15MHz 的测量晶体和参考晶体、帕尔贴热换能器和温度传感器组成。测量控制电路由微处理器、频率测量电路单元、温度测量控制单元、电源模

收稿日期: 2008-05-10; 修回日期: 2008-06-18。

作者简介: 王峰 (1966), 男, 河南方城人, 高级工程师, 在职研究生, 主要从事自动控制和电力系统自动化方向的教学与研究工作。

王晓兰 (1964), 女, 甘肃天水人, 教授, 主要从事微型计算机控制、检测等方向的研究。

块、通信接口等部分组成。其组成框图如图 2 所示。

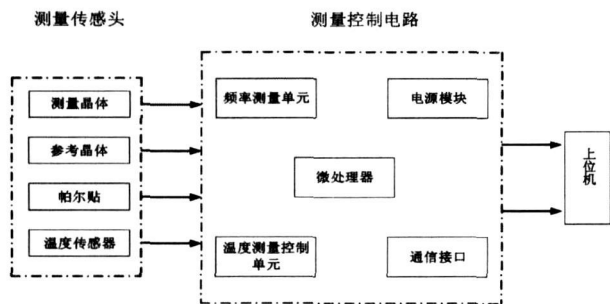


图 2 石英晶体天平 (QCM) 组成框图

## 2 PQCM 的工作原理

监测仪选用压电石英晶体作为微量分子污染物的探测元件，如图 3 所示，晶体两面镀上金属材料作为电极，由谐振电路驱动，在两电极之间形成一个与时间相关的电场，使晶体以一定的频率振荡，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的。当污染物质在电极上沉积（质量增加）时，所有沉积的物质都将随着晶体振荡产生移位<sup>[2]</sup>。

压电微天平的基本原理是通常所称的索氏（Sauerbrey）公式。

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

式中， $\Delta f$  为频率移动量； $f_0$  为晶体的基本谐振频率； $\Delta M$  为沉积在电极上的物质质量改变； $A$  为工作电极的面积。

因此，由于质量的增加使晶体运动的频率降低，通过晶体频率变化的监测来监测沉积物质量的变化。

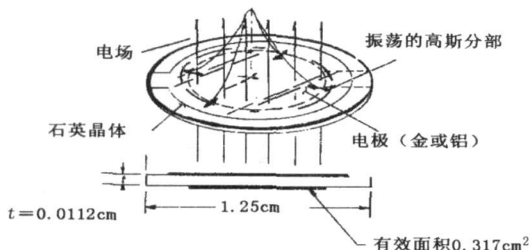


图 3 15MHz 压电石英晶体的电场及振荡频率

## 3 频率测量原理

常用的频率测量方法主要有测频法和测周期法两种。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 15MHz 上下变化，本设计采用测频法实现。本系统中采用的频率测量原理框图如图 4 所示。分频器产生的 1Hz 信号所得到的 1s 闸门控制信号控制测量晶体、参考晶体的脉冲通过闸门进入 32 位计数器。32 位计数器在 1s 时间范围内计数脉冲数即为被测频率。

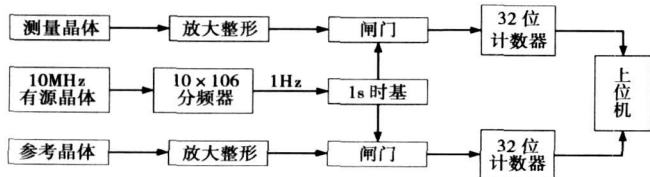


图 4 频率测量原理框图

## 4 测量传感头设计

石英晶体微量天平（PQCM）是通过污染物对石英晶体频率的改变这一机理进行污染物测量的。为了保证系统要能准确测量晶体频率的变化，消除环境因素对频率测量的影响，实现设计要求的精度标准（±1Hz），设计了如图 5 所示的测量传感头结构。

(1) 通过两个置于同一环境中的晶体，测量晶体（污染物传感器）和参考晶体（封闭不受污染物影响）的传感器来消除环境变化（温漂、时漂）引起的测量误差<sup>[3-4]</sup>。选择的测量晶体和参考晶体的物理特性基本一致，由于参考晶体和测量晶体在不考虑测量晶体污染物影响的情况下，具有相同的频率变化特性，在石英晶体微量天平中所需要的是测量晶体和参考晶体的差频信号，对于处于相同环境中，采用相同计数闸门时间所造成的误差在差分信号中可以消除。

(2) 通过对帕尔贴半导体制冷器<sup>[5]</sup>进行控制实现晶体在测量时温度的稳定性，消除由温度引起的晶体频率变化误差。石英晶体微量天平（PQCM）会随环境温度不同产生频率的变化，因此保持测量时测量器件恒温，可以提高测量精度。

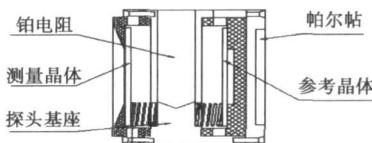


图 5 测量传感头结构

## 5 温度测量与控制

### 5.1 温度测量

温度传感器选用高精度铂电阻元件，将温控系统集成在探头内部，由测温精度优于 ±(0.10 + 0.002 |T|) °C 的铂电阻实时测量探头温度（ $T$  为摄氏温度）。铂电阻测温电路如图 6 所示，温度比较电路采用平衡电阻电桥，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，改变电桥状态。用差动比例放大器将电桥的不平衡量放大后上传到数据采集芯片，作为温控程序的控制基准。

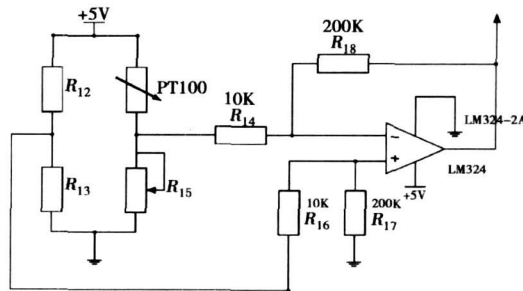


图 6 测温电路原理图

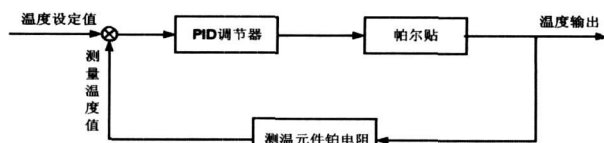


图 7 温度控制系统框图

### 5.2 温度控制系统

温控系统由温度传感器、电热元件及微控制器构成, 温度传感器选用高精度铂电阻元件, 电热元件采用帕尔帖半导体制冷器, 微控制器采用 AD 公司的新型数据采集芯片。通过植入在微控制器内的 PID 算法控制帕尔帖半导体制冷器的输出功率 (采用 PWM 方式实现), 形成闭环的温控系统。温度控制系统框图如图 7 所示。

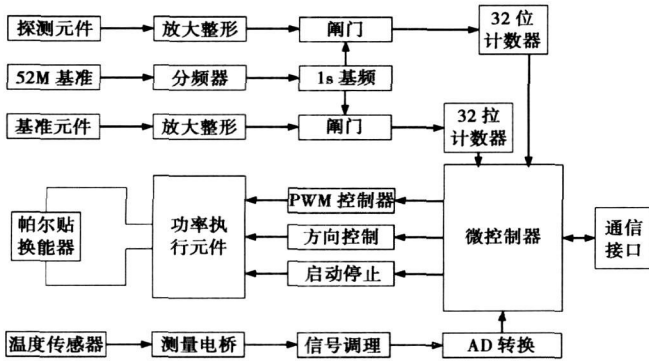


图 8 整体电路设计原理框图

### 6 整体电路设计

整体电路框图如图 8 所示。由于测量频率信号在 15MHz 左右, 如用 51 系列单片机是分辨不出如此高信号的, 如果用硬件数字电路实现, 所需要的数字芯片又会较多, 这就不能满足系统小体积、低功耗的设计要求。因此, 系统中选用 FPGA 实现。

FPGA 具有高集成度、高可靠性。整个测频系统分信号同步输入、控制部件、分频器和计数部件、放大整形和标准频率信号等模块。除放大整形和标准频率信号模块外, 其它模块都

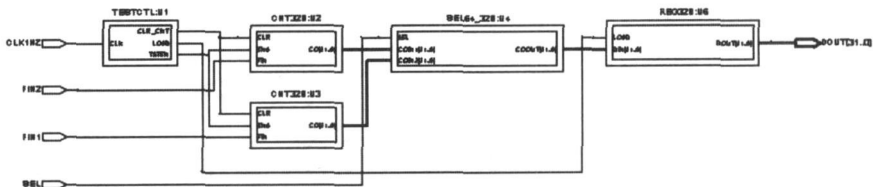


图 9 测频主系统框图

可集成于 FPGA 芯片中, 从而大大缩小其体积。使用 VHDL 硬件描述语言对其各功能模块进行逻辑描述。然后通过 EDA 开发平台<sup>[9]</sup>, 对设计文件自动地完成逻辑编译、逻辑化简、综合及优化、逻辑布局布线、逻辑仿真, 最后对 FPGA 芯片进行编程, 以实现系统的设计要求。图 9 所示为测频主系统框图 (EDA 综合实验图), 图 10、图 11 分别为实验仿真图。

### 7 数据采集与处理系统

计算机通过 RS485 网络与监测仪的微控制器通讯, 微控制器内核为 8051 单片机, 利用 8051 的 UART 实现串行通信接口, 另外也可以设计成无线通信传输。PC 数据采集软件采用 VB6.0 设计<sup>[7]</sup>, 该软件可实现对多路传感器频率、温度的采集, 污染量显示, 测量传感头温度的设定等功能。上位机控制界面设计如图 12 所示。

### 8 结论

本文介绍的分子污染监测仪是基于既有地面分子污染监测设备的基础上, 面向空间应用设计的。设计中采用了频率为 15MHz 的 PQCM 石英晶体微量天平 and FPGA 现场可编程门阵列技术, 既保证了设计要求的频率测量精度, 同时使整个设计系统几乎下载于同一芯片中, 从而大大缩小其体积, 满足了空间应用高集成度、高可靠性、小体积、重量轻、功耗低、速度快、精度高的苛刻要求, 与原有设备相比新型监测仪还具备了

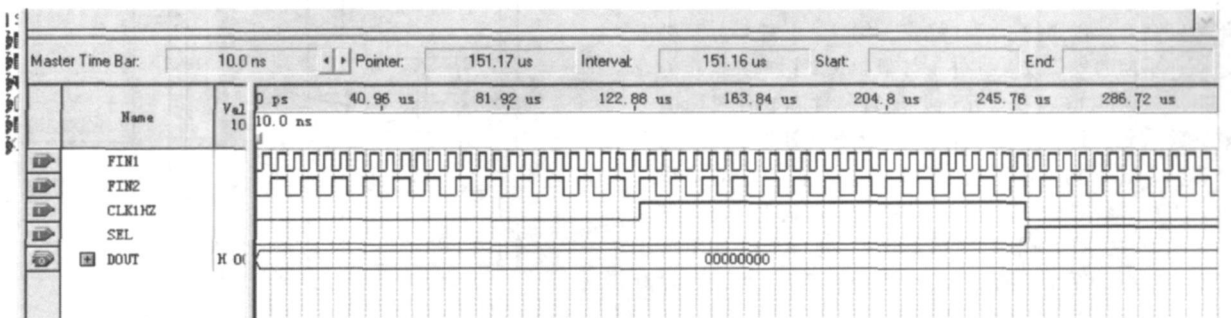


图 10 实验仿真图

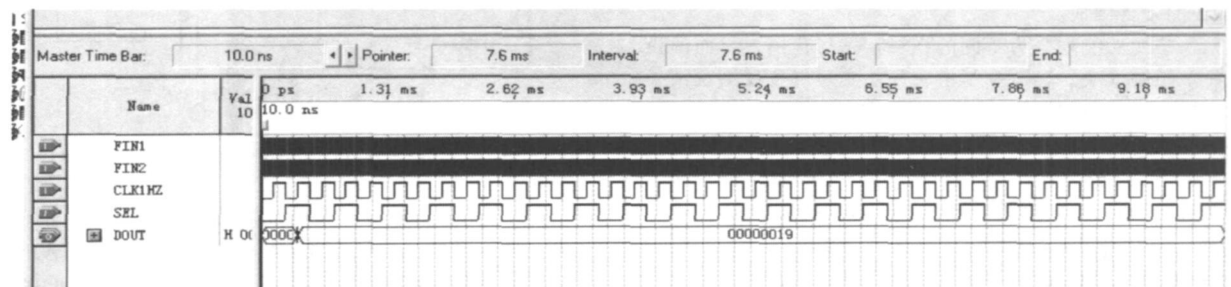


图 11 实验仿真图

(下转第 248 页)

一般调用 DestroyMainWindow 销毁主窗口，调用 PostQuitMessage 退出消息循环。对于窗口过程函数中未编写程序处理的消息，MiniGUI 设定传递给 DefaultMainWinProc 函数进行缺省处理。

对于用户界面中设计的各种功能，在编程时采用每一个独立的功能由一个单独的线程来实现，并采用“启用时创建”的方式。当功能启用时创建线程，一次功能运行完成之后线程即消亡。采用这种实现方式的主要优点在于加强系统模块之间的独立性，使程序更加灵活，同时也减少了系统资源的闲置和浪费。

### 3 编译与移植

首先搭建编译环境，安装交叉编译工具。安装完成后指定编译器为所要使用的交叉编译器。在搭建好交叉编译环境之后，分别对 MiniGUI 的库文件和船舶气象仪用户界面程序进行交叉编译，完成交叉编译后，将编译后 etc, include, lib 目录下的 MiniGUI 相关库文件复制到准备移植的文件系统中，将编译过的可执行代码也复制到文件系统中，并生成新的文件系统文件。然后在 Windows 下利用超级终端将文件系统下载到带 LCD 显示屏的目标板上。至此，船舶气象仪用户界面程序就可以运行在目标板上了。

### 4 结束语

随着嵌入式系统硬件性能的不不断提升，用户对应用程序界

面的友好性和功能的完备性提出更高的要求。本文介绍的基于 MiniGUI 的船舶气象仪用户界面设计，创新性的将图形用户界面支持系统引入船舶气象仪的设计中，它设计简单，占用系统资源少，用户界面友好，拥有广阔的市场前景，本设计已运用到船舶气象仪实验样机系统中，取得很好的效果。

#### 参考文献:

[ 1 ] 北京飞漫技术有限公司. MiniGUI 用户手册. V1. 6. x [ EB/OL ]. 2005. 03 12  
<http://www.minigui.com/download/cindex.shtml>

[ 2 ] 魏永明. MiniGUI 技术白皮书 [ EB/OL ]. <http://www.minigui.org/cdoc.html>, 2000 12.

[ 3 ] 魏永明. MiniGUI 体系结构之一体系结构概览 [ EB/OI ]. 2000 12  
<http://www.cn.ibm.com/developerWorks/linux/embed/minigui/minigui-4/index.html>, 2000 12.

[ 4 ] 贾明, 严世贤. Linux 下的 C 编程 [ M ]. 北京: 人民教育出版社. 2001.

[ 5 ] 任亚飞, 唐涛. 基于嵌入式 Linux 的列控系统车载人机界面的实现 [ J ]. 铁路计算机应用, 2005, 14 ( 12 ): 23-26.

[ 6 ] 刘炳锋, 李江红, 赵艾奇, 等. 基于 Tilcon 的某武器显控系统界面设计 [ J ]. 计算机测量与控制, 2008, 16 ( 8 ): 1153-1155.

(上接第 245 页)

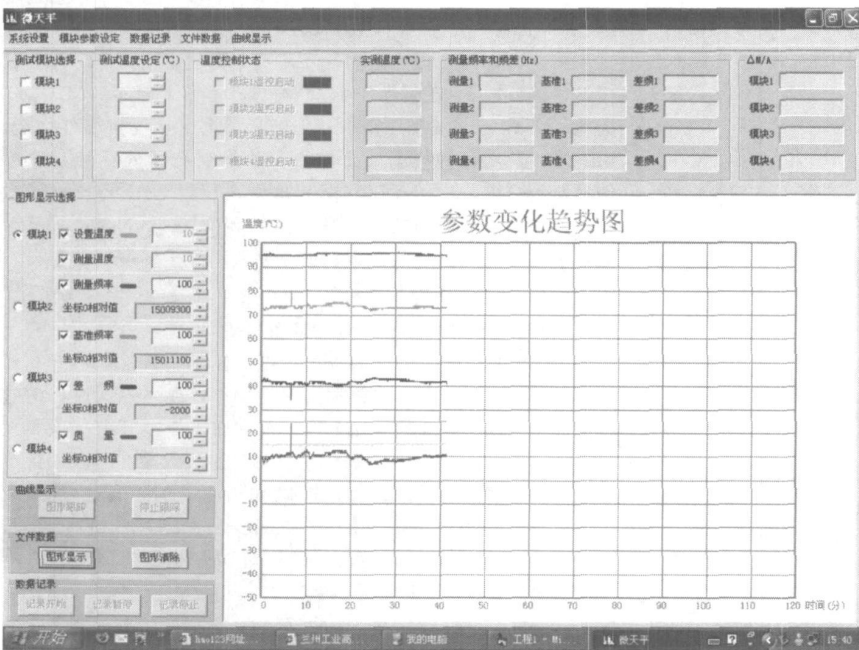


图 12 上位机控制界面设计

实时数据采集与处理的能力和多点同时监测的功能。经初步测试表明，该设备达到了设计基本要求。

#### 参考文献:

[ 1 ] 王诚, 吴继华, 范丽珍, 等. Altera FPGA \CPLD 设计 [ M ]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

[ 2 ] 赵声衡. 石英晶体振荡器 [ M ]. 长沙: 湖南大学出版社, 2005.

[ 3 ] 张剑锋, 张优云. 基于 QCM 传感器的液压油品质在线监测系统的开发 [ J ]. 电子技术应用, 2001, ( 03 ): 38-39.

[ 4 ] Wood B E, Hall D F, Uy O M. MSX satellite flight measurement of contamination deposition on a CQCM and on TQCM [ A ]. AIAA Space Technology Conference [ C ]. 2001-10.

[ 5 ] 陈章其, 吴冲若, 张根柱, 等. 一种新颖的石英晶体微量天平探头 [ J ]. 真空, 1993, ( 03 ): 11-15.

[ 6 ] 马淑华, 高原. 电子设计自动化 [ M ]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000.

[ 7 ] 微软公司授权培训中心. 中文 Visual Basic 6.0 教程 [ M ]. 北京: 宇航出版社, 2000.

[ 8 ] 黄松林, 冯斌, 邹斌, 等. 基于嵌入式系统下的 ( 01 ) 监测仪的研究与开发 [ J ]. 计算机测量与控制, 2003, 11 ( 7 ): 550-552.