

基于 FPGA 的高精度频率测量系统设计及应用

杨 奥¹, 向星岩¹, 王 刚², 陈 伟², 赵利强¹

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 汉威科技集团股份有限公司, 郑州 450001)

摘要: 针对石英晶体微天平 (QCM) 传感器应用于气体检测需要高精度频率测量, 设计了一种基于 FPGA 的高精度频率测量系统; 提出了一种基于锁相环的等精度频率测量方法, 降低了频率测量的理论相对误差; 设计了频率测量系统整体架构, 根据整体架构完成了基于 FPGA 的高精度频率测量系统硬件电路, 设计了一种包括频率测量、通讯、程序固化等模块的嵌入式软件, 实现了基于 FPGA 的高精度频率测量系统的集成, 并将其应用于基于 QCM 的二氧化碳气体浓度检测; 实验结果表明, 频率系统测量绝对误差不超过 0.35 Hz, 误差平均值为 0.268 Hz, 最大相对误差为 3.5×10^{-8} , 频率测量分辨率可以达到 0.1 Hz, 该系统测量误差较小, 稳定性较好, 在基于 QCM 的二氧化碳气体浓度检测中具有较好的应用前景。

关键词: FPGA; 频率测量系统; 等精度测量; 锁相环; 气体检测

Design and Application of High-Precision Frequency Measurement System Based on FPGA

YANG Ao¹, XIANG Xingyan¹, WANG Gang², CHEN Wei², ZHAO Liqiang¹

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Hanwei Electronics Group Corporation, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aimed at the need that quartz crystal microbalance (QCM) sensors are used to measure high-precision frequency in gas detection, a high-precision frequency measurement system based on field programmable gate array (FPGA) is designed. An equal-precision frequency measurement method based on phase-locked loop is proposed to reduce the theoretical relative error of frequency measurement, and design the overall architecture of the frequency measurement system. According to this architecture, the hardware circuit of the high-precision frequency measurement system based on FPGA is completed. The embedded software is also designed, which includes the modules of frequency measurement, communication, and firmware programming. The integration of the high-precision frequency measurement system based on FPGA is achieved, which is applied in the QCM-based carbon dioxide gas concentration detection. Experimental results show that the absolute error of the frequency system measurement does not exceed 0.35 Hz, with an average error of 0.268 Hz and a maximum relative error of 3.5×10^{-8} . The frequency measurement resolution can reach 0.1 Hz. The system has the advantages of low measurement error, good stability, and better application prospect in the QCM-based carbon dioxide concentration detection.

Keywords: FPGA; frequency measurement system; equal-precision measurement; phase-locked loop; gas detection

0 引言

信号频率的准确测量是获取信号特征信息的关键, 石英晶体微天平 QCM (Quartz Crystal Microbalance) 是一种将表面质量变化转换为谐振频率变化的传感器, 由于其具有纳克级的质量灵敏度, 被广泛应用于生物传感^[1]、气体检测^[2]等领域。但是在实际应用中 QCM 谐振频率变化远小于其工作频率, 增大了对其频率变化的检测难度, 因此设计一套高精度的频率测量系统对实现 QCM 传感信号的准确测量具有较大意义。

为确保频率测量的精度和准确性, 需要选择合适的测量方法。目前主要的频率测量方法有直接测量法^[3]、周期

测量法^[4]、等精度测量法^[5]。文献 [6] 设计了一种利用直接测量法的高精度频率计, 把频率信号以 1 kHz 为界限分为低频和高频信号, 对低频信号和低频信号分别采用周期测频法和频率测量法测频, 实现了增加测频带宽的目的, 验证了系统的可行性与可靠性。文献 [7] 对多周期同步测频法进行改进, 提出一种自适应测频法, 对于被测信号, 采用上升沿和下降沿一起计数; 对于标准频率信号, 通过判断计数时间是否超过门限时间且包含被测信号至少 1 个周期来停止计数。该方法包含更多的测量样本, 能避免产生无效的测量时间使测量更加高效, 增加了测频带宽。文献 [8] 基于等精度测量原理设计了一种频率稳定度测量系

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-05-06。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFB3200403)。

作者简介: 杨 奥(2001-), 硕士。

通讯作者: 赵利强(1982-), 博士, 副教授。

引用格式: 杨 奥, 向星岩, 王 刚, 等. 基于 FPGA 的高精度频率测量系统设计及应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 133-141.

统，能够实现标准频率在 10 ms、100 ms、1 s、10 s 等不同测量周期的频率稳定度测量，结果表明，采用该设计系统稳定性高、可拓展性强、精度高，并降低了设计的成本。文献 [9] 设计的基于 QCM 的电子鼻系统选择 Spartan 3E 作为开发平台，设计了基于频率测量法的多通道频率测量系统，该系统频率测量精度为 1 Hz。文献 [10] 在其设计的等精度频率测量电路中，采用频率为 50 MHz 的基准时钟信号，设定闸门时间 0.1 s，对谐振频率为 6 MHz 的 QCM 进行频率测量，理论计算得到测量相对误差小于 2×10^{-7} 。在实际测试中该测频电路测量结果与信号设定频率值的差值稳定在 40~50 Hz。

综上所述，相较于周期测量法和频率测量法，等精度测量方法仅与标准信号频率和闸门时间有关，理论上消除了闸门时间与待测信号间的偏差，采用该方法构建的频率测量系统具有更广的适用范围和更高的测量精度。同时随着现场可编程逻辑门阵列 (FPGA, field programmable gate array) 的飞速发展，其高度的灵活性，使得其在多个领域得到广泛的应用^[11-13]。通过 FPGA 可以将大量逻辑功能的电路进行集成，增强了频率测量模块的集成度，基于 FPGA 设计实现的频率测量系统，测量范围更大，精度更高^[14-15]。但在复杂的 FPGA 系统中，必须保证时钟信号的稳定，锁相环 (PLL, phase locked loop) 在 FPGA 内部能起到倍频和分频的作用，提高系统的时序稳定性，有利于提高频率测量系统的精度和可靠性。因此选择以 FPGA 作为信号采集、发送、显示和处理控制系统的核心，采用了基于锁相环的改进型等精度测量法，同时结合串口通讯设计了一套高精度频率测量系统，且进行了实验测试，并应用于 QCM 二氧化碳气体浓度检测。

1 基于锁相环的改进型等精度频率测量方法

1.1 频率测量原理

目前传统频率测量方法包括周期测量法和频率测量法，周期测量法的检测原理是以待测信号的一个周期为计数闸门时间^[16]，并在该闸门时间内对时钟源生成的标准信号进行计数，根据标准信号频率即可计算出待测信号一个周期的时间长度，进一步可以求得待测信号频率。例如待测信号频率在 10 MHz 附近，信号周期为 100 ns，而较为常见的 FPGA 板载晶振输出信号频率为 50 MHz，对应周期大概在 20 ns，测量相对误差 δ 计算公式如下：

$$f_x = \frac{N_x}{T} \quad (1)$$

将上述参数代入式 (1) 中可知以 50 MHz 晶振输出信号作为系统时钟为例，采用周期测频法时测量相对误差高达 20%，因此将周期测量法应用于实际时测量精度较低。

频率测量法的检测原理是以系统时钟生成的信号 T 作为检测的闸门时间，并在该时间内对待测信号 f_x 的上升沿进行计数，计数器测得待测信号在闸门时间内上升沿的数量为 N_x ，计算得到待测信号的频率 f_x 如下：

$$f_x = \frac{N_x}{T} \quad (2)$$

直接测频法原理图如图 1 所示，由于电路构造的原因，直接测频法在实际应用中，系统闸门信号 T 上升沿难以与待测信号 f_x 上升沿保持完全同步，实际闸门时间 T' 可以表示为：

$$T' = T - \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (3)$$

式中， Δt_1 为闸门信号上升沿与闸门信号内第一个待测信号上升沿之间的偏差， Δt_2 为闸门信号下降沿与闸门信号结束后第一个待测信号上升沿之间的偏差。因此，令系统闸门与实际闸门之间的偏差 Δt 为：

$$\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2 \leq T_x \quad (4)$$

将式 (3) 和 (4) 代入式 (2) 可得待测信号实际频率值 f'_x 为：

$$f'_x = \frac{N_x}{T'} = \frac{N_x}{T - \Delta t} \quad (5)$$

根据式 (3) 和式 (4) 测量值与实际值之间存在的理论相对误差可以表示为：

$$\delta = \frac{f'_x - f_x}{f'_x} \times 100\% \leq \frac{1}{T \times f_x} \times 100\% \quad (6)$$

可知直接测频法的理论精度与待测信号的频率、系统闸门时间相关，以 10 MHz 待测信号、1 s 闸门时间为例，直接测频法理论相对误差为 1×10^{-7} 。但该误差会随着待测信号频率的改变而变化，难以实现稳定的频率测量。

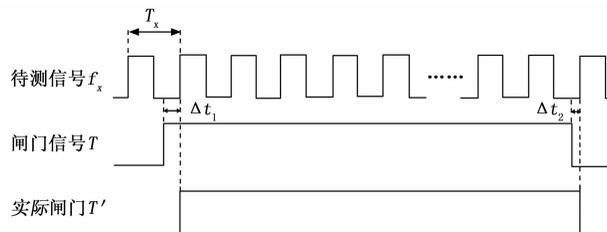


图 1 直接测频法原理图

因此直接测频法的理论精度与待测信号的频率、系统闸门时间相关，以 10 MHz 待测信号、1 s 闸门时间为例，直接测频法理论相对误差为 1×10^{-7} 。但该误差会随着待测信号频率的改变而变化，难以实现稳定性高的频率测量。

区别于传统的频率测量方法，等精度频率测量法的系统闸门时间并不是实际的计数闸门时间，实际的计数闸门时间是在闸门时间信号变为高电平后检测到待测信号的第一个上升沿时开始。因此从理论上来说，等精度频率测量法消除了闸门时间与待测信号间的偏差。但是等精度频率测量需要在闸门时间内分别对待测信号与标准信号进行测量，因此存在闸门时间与标准信号之间的偏差。等精度测频的原理图如图 2 所示。图 2 中预置软件闸门信号 T 由系统时钟模块生成，闸门信号经待测信号 f_x 同步化到待测信号时钟域下，从而得到实际计数闸门信号 T_c 。然后在实际计数闸门时间内，分别测量待测信号与标准信号的上升沿数量，得出关系如下：

$$\frac{N_s}{f_s} = \frac{N_x}{f_x} \quad (7)$$

式 (7) 中 f_s 为标准信号频率值, f_x 为待测信号频率值, N_s 和 N_x 分别为闸门时间内检测到的标准信号与待测信号的上升沿数量。因此, 根据式 (7) 可以推出待测信号测量频率为:

$$f_x = f_s \times \frac{N_x}{N_s} \quad (8)$$

待测信号测量值与实际值之间的相对误差可以表示为:

$$\delta = \frac{f_{xe} - f_x}{f_{xe}} \times 100\% \quad (9)$$

式 (9) 中 f_x 为待测信号的测量值, f_{xe} 为待测信号的实际值。根据图 2 可知, 计数闸门同步到了待测信号的时钟域后, 计数闸门信号与待测信号之间无偏差。但在计数闸门时间内对标准信号上升沿的计数值可能存在误差 ΔN_s , 该误差实际值不超过一个标准信号的时钟周期, 因此可以得到待测信号实际值为:

$$f_{xe} = f_s \times \frac{N_x}{N_s + \Delta N_s} \quad (10)$$

将式 (8) 和式 (10) 代入式 (9), 整理后得到:

$$\delta = \frac{|\Delta N_s|}{N_s} \leq \frac{1}{N_s} = \frac{1}{T \times f_s} \times 100\% \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出区别于直接测频法, 等精度频率测量方法的检测精度仅与标准信号频率和闸门时间有关。选用等精度频率测量模块使用经过时钟分频模块处理后的 50 MHz 时钟信号作为标准信号, 闸门时间设置为 1 s, 测量相对误差小于 2×10^{-8} , 且不会随待测信号的频率变化而改变。

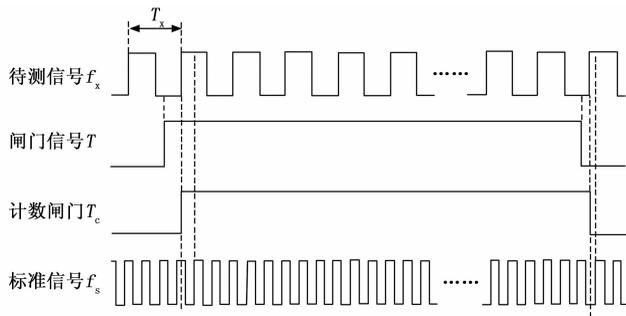


图 2 等精度频率测量法原理图

1.2 基于锁相环的改进型等精度测量原理

对于一套频率测量系统, 高精度、高稳定性的时钟源包括数字温度补偿晶振、恒温晶振等, 但这类晶振往往电路结构复杂、体积较大、功耗较高。因此提出一种基于锁相环的改进型等精度频率测量方法^[17-18], 选用 50 MHz 的无源晶振作为系统时钟源, 原理图如图 3 所示。

锁相环是一种反馈控制电路, 能将输入信号和输出信号的相位差转换成电压信号, 并利用低通滤波器滤波处理形成压控振荡器的控制电压, 从而控制输出信号的频率^[19]。锁相环通过反馈将输出信号的频率和相位反馈到鉴相器 (PD, phase detector), 从而保证输入输出信号的频率相同,

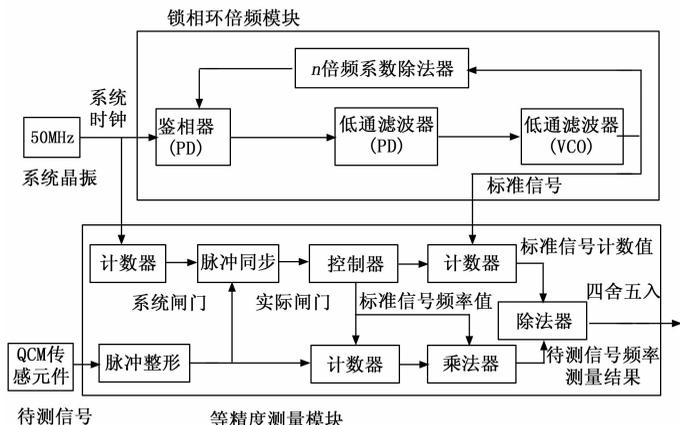


图 3 基于锁相环的改进型等精度频率测量方法原理图

即输入输出电压保持固定的相位差, 实现输入输出信号的相位锁定。

锁相环倍频器的核心部件包括鉴相器 (PD)、低通滤波器 (LPF)、压控振荡器 (VCO) 和分频器 (FD)。计算可得锁相环倍频器的信号传递函数 $H(s)$ 为:

$$H(s) = \frac{nI_{cp}K_{vco}}{s^2nC_L + I_{cp}K_{vco}} \quad (12)$$

式中, n 为倍频系数, I_{cp} 为鉴相器内模拟电荷泵产生的电流大小, K_{vco} 为压控振荡器的直流增益, C_L 为低通滤波器内滤波电容的容值。鉴相器能检测到输入输出信号的相位差并转换成电压信号输出, 该信号经低通滤波器滤波后能形成压控振荡器的控制电压, 从而控制输出信号的频率。该信号经过分频器进行 N 分频后, 再输入到鉴相器中与参考频率比较, 当锁相环倍频器进入锁定状态后, 会得到标准信号倍频后的时钟信号。

表 1 不同测频方法的理论相对误差

测量方法	直接测频法	等精度率测量方法	基于锁相环的改进型等精度频率测量方法	
			50	50
系统时钟频率/MHz	50	50	50	50
倍频系数	—	—	2	2
标准信号频率/MHz	50	50	100	100
闸门时间/s	1	1	1	2
测量理论相对误差/%	1×10^{-7}	2×10^{-8}	1×10^{-8}	5×10^{-9}

标准信号经锁相环倍频器处理后得到高频稳定的标准信号, 将待测信号及标准信号接入等精度频率测量模块。让闸门时间同步至待测信号时钟域下, 通过计数器对两个信号上升沿进行计数, 将计数结果传输至乘法器、除法器模块后即可计算出待测信号的频率。以 50 MHz 无源晶振为例, 经二倍频后得到 100 MHz 标准信号, 系统闸门时间设置为 1 s, 将参数代入式 (11) 可得系统相对误差小于 1×10^{-8} 。对于 10 MHz 待测信号, 直接测频法、等精度频率测量方法及基于锁相环的改进型等精度频率测量方法的理论相对误差分别如表 1 所示, 基于锁相环的改进型等精度

频率测量方法理论相对误差小于直接测频法和传统等精度频率测量方法，且通过延长闸门时间可以进一步降低频率测量误差。

2 频率测量系统整体设计

频率测量系统整体设计如图 4 所示，主要包括硬件电路设计及嵌入式软件设计两部分。

频率测量系统硬件电路主要包括主控芯片接口模块和主控芯片、数据通讯模块、JTAG 程序下载模块、屏幕接口模块及电源模块。待测信号输出至主控芯片接口，主控芯片内置软件测量待测信号频率后，将测量数据分别通过数据通讯模块及屏幕接口模块传输至系统监测上位机及 LCD 屏幕就地显示。系统电源模块主要提供电压转换及电源滤波的功能，嵌入式软件的下载及程序固化通过 JTAG 下载模块完成。

频率测量系统嵌入式软件主要分为 PL (FPGA) 和 PS (ARM) 两部分。设计基于锁相环的改进型等精度频率测量模块，提高频率检测精度及稳定性。为了实时显示测量数据，设计了屏幕显示模块。为了实现数据的记录与后续分析，设计基于 RS485 协议的数据通讯模块，接收数据传输指令后对待发送数据进行解析及编译，向系统监测软件发送实时测量值。同时考虑到检测系统需要具备上电自启动功能，因此在具备非易失性存储器的 PS 端实现 PL 端程序固化的功能。

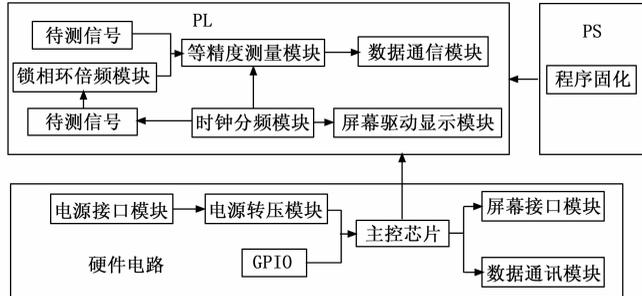


图 4 系统整体设计

3 系统硬件电路设计与实现

3.1 主控芯片接口模块

主控芯片采用 Xilinx 公司的 ZYNQ7000 系列的 XC7Z010，具体型号为 XC7Z010CLG 400-1。ZYNQ 分为 PS (Processing System) 和 PL (Programmable Logic) 两部分。主要使用的 PL 部分拥有 28 k 个逻辑单元、2.1 Mbits 的嵌入式存储资源、80 个 DSP 单元、2 个时钟管理单元 (CMT)、16 个全局时钟网络、5 个用户 I/O BANK 和最大 228 个用户 I/O。主控芯片接口模块选择两个 100pin 的公座，与核心板的母座相连接。

3.2 电源模块

考虑到频率测量系统整体电源架构，选用 220 V AC 转 5 V DC 电源适配器。并利用变压模块将 5 V 电压降到 3.3 V，通过 3.3 V 电压为需要的功能模块供电。因此设计

电源模块如图 5 所示，DC_IN 电源接口直接和适配器相连，用于外部直流电源输入。线性稳压器芯片 AMS1117-m3.3 将系统 +5 V 电压转变为 +3.3 V，系统 +5 V 和变压 +3.3 V 直接用于驱动功能模块。

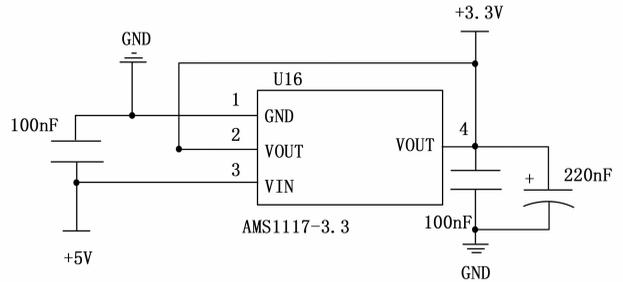


图 5 电源模块原理图设计

3.3 数据通讯模块

频率测量系统硬件电路部分数据通讯模块协议选择 RS485 串口通讯。RS485 数据通讯的电平不能直接连接到主控芯片的引脚上，需要通过电平转换芯片 (SP3485) 将 RS485 的差分电平信号转换成 3.3 V 的数字电平信号，电路设计如图 6 所示。SP3485 芯片两路接入信号分别为 RS485_RX 和 RS485_TX，RS485_RX 为 SP3485 芯片的接收侧，连接串口发送引脚；RS485_TX 为 SP3485 芯片的发送侧，连接串口接收引脚。

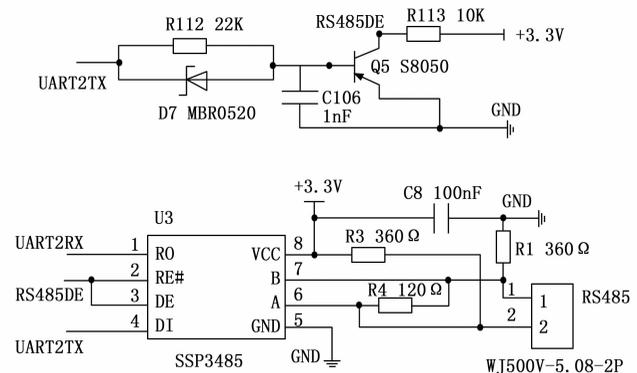


图 6 数据通讯模块原理图设计

3.4 屏幕接口模块

频率测量系统选择 TFT-LCD 屏幕作为检测系统屏显设备，连接液晶显示屏的接口 RGB LCD 采用了 RGB888 数据格式，接口电路设计如图 7 所示。该接口仅支持 RGB 接口的液晶，图 7 中 TMISO、IIC2SDA、TPEN、TCS、IIC2SCL 五个接口用于实现对液晶触摸屏的控制，连接到 ZYNQ PL 端的 IO 的触摸屏的 4 个信号为 CT_INT、CT_RST、IIC2_SCL、IIC2_SDA，上述 4 个端口同时也可以使用 PS 端的 EMIO 来连接到 PS 系统。

4 系统嵌入式软件设计与实现

4.1 PLL 锁相环模块

为了实现基于 FPGA 的改进型等精度频率测量，需针

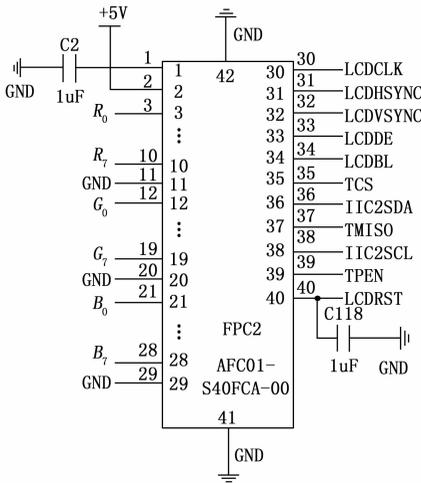


图 7 屏幕接口模块原理图设计

对 PLL 锁相环模块进行设计。板载 50 MHz 的普通晶振, 该晶振输出时钟信号稳定性较差, FPGA 共有两种时钟管理器可以对板载时钟信号进行处理, 包括多模式时钟管理器 (MMCM) 和锁相环 (PLL)。相较于多模式时钟管理器, 锁相环在高频信号处理中具有稳定性好、精度高的优点, 为了提高精度频率测量模块标准信号基频及稳定性, 选择采用锁相环对板载时钟输出信号进行倍频处理。

通过 Vivado 软件调用 PLL IP 核, 在软件内选择 IP Catalog 工具后, 选择 Clocking Wizard, 选择时钟管理器类型为 PLL, 设置输入信号 `clk_in` 为 50 MHz 系统时钟; 然后设置倍频后输出信号为 100 MHz, 完成后续设置后即可例化 PLL 锁相环模块。如图 8 所示, 为了保证嵌入式软件不会出现时序混乱的问题, 需要将 IP 核复位信号与系统时钟复位信号同步。同时由于 PLL 锁相环模块生成稳定时钟需要一定时间, 因此需要设置内置 `locked` 信号保证当信号未稳态时保证时钟信号不会输出。最后对 PLL 锁相环输出信号进行管脚约束, 并对 PLL 锁相环模块进行例化, 将输出时钟信号 `clk_out1` 输入至等精度频率测量模块作为标准信号。

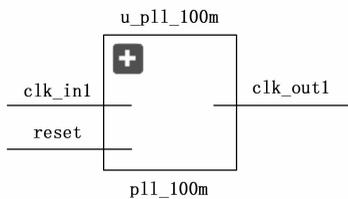


图 8 PLL 锁相环模块示意图

4.2 等精度频率测量模块

等精度频率测量模块工作流程图如图 9 所示。等精度频率测量的第一步是确定门控信号, 系统采用石英晶体谐振频率为 50 MHz, 所选标准信号 `clk_fs` 为板载晶振输出时钟信号经锁相环模块倍频后的 100 MHz 信号。预置软件门控信号由芯片定时模块产生, 但该信号可能与待测信号

和标准信号之间存在偏差引起测量误差。因此需要将预置软件门控信号经过 D 触发器同步至待测信号的时钟域下, 生成实际门控信号, 该门控信号的上升沿与门控时间内待测信号第一个周期的上升沿同步, 下降沿与门控时间内待测信号最后一个周期的下降沿同步。因为门控信号是基于待测信号产生的, 所以对于待测信号而言其与实际, 对基准时钟而言是异步信号, 故对门控信号进行两次非阻塞赋值得到基准频率下的实际门控信号。将门控时间长度设置为 20 M 个待测信号的周期长度, 同时为了防止生成门控信号时出现亚稳态或者异步时钟未同步到待测信号时钟域下的情况, 门控信号 `gate` 在开始前与结束后分别添加 10 个待测信号的时钟周期作为缓冲。门控信号同步后, 在实际门控信号时间内分别用 32 位高速计数器对待测信号及标准信号进行计数, 并在捕获到实际闸门信号下降沿后停止计数, 最后计算得到待测信号频率值。由于待测信号频率较高且与系统定时模块生成的系统时钟信号、锁相环模块生成的高频标准信号为异步信号, 可能会引起时序逻辑混乱, 系统模块触发时序信号均采用 `posedge` 方式及信号上升沿触发, 可以有效避免由于时序信号下降沿引起的信号抖动及噪声的问题, 同时提高模块运行的稳定性, 避免由于时序逻辑混乱引入的测量系统误差。

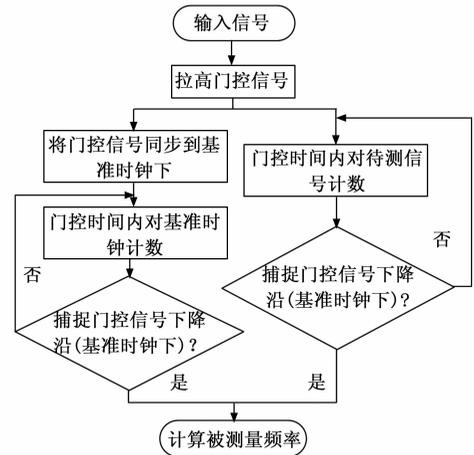


图 9 等精度频率测量模块流程

4.3 数据通讯模块

为了实现测量数据与系统监测软件的待测数据传输, 选择异步串行通信协议 RS485 作为数据通讯模块的传输协议。数据通讯模块主要包含 485 接收、485 循环以及 485 发送 3 个模块。如图 10 所示, 其中 485 接收模块从上位机接收到指令后需根据数据传输协议解析该指令, 判断其类型, 并向 485 循环模块发送指令。485 循环模块负责完成串口指令至数据的环回功能, 在收到指令后对带发送数据进行解析, 判断其长度, 并将待发送数据及数据长度等信息传输给 485 发送模块。485 发送模块需要根据待发送数据长度对待发送数据进行重新二进制编译为特定的串口通信数据格式。

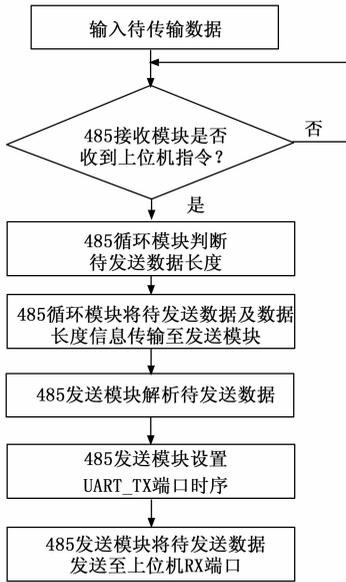


图 10 数据通讯模块流程图

4.4 屏幕显示模块

屏幕显示模块包括时钟分频、读取 ID、LCD 驱动、LCD 显示 4 个模块。如图 11 所示，首先系统上电后，读取 ID 模块获取通过排线连接的 LCD 屏幕 ID，并通过该 ID 识别到的信息分别选择时钟分频模块生成的系统时钟驱动各模块的运行时序，同时执行 LCD 驱动、LCD 显示模块的运行参数配置。然后屏幕显示模块判断待测数据测量是否完成，当等精度频率测量模块所测得的待测数据传输完成后，

LCD 显示模块将待测数据与所提取的字符字模相匹配完成待测数据至 LCD 屏幕驱动数据的转换。最后 LCD 驱动模块通过上述驱动数据执行屏幕显示的驱动功能，通过 FPC 排线驱动 LCD 屏幕实现待测数据的就地显示。

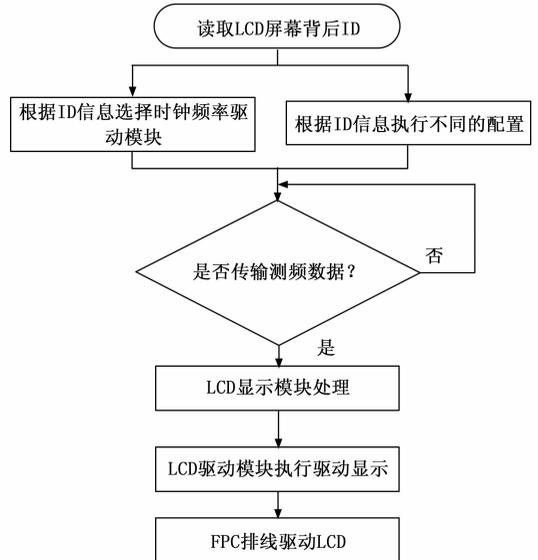


图 11 屏幕显示模块流程图

4.5 程序固化模块

主控芯片 PS 部分支持多种片外非易失性存储器 (Quad SPI Flash, NAND Flash, NOR Flash 或 SD 卡)，根据所使用到的外设添加处理器系统如图 12 所示，程序固化模块采

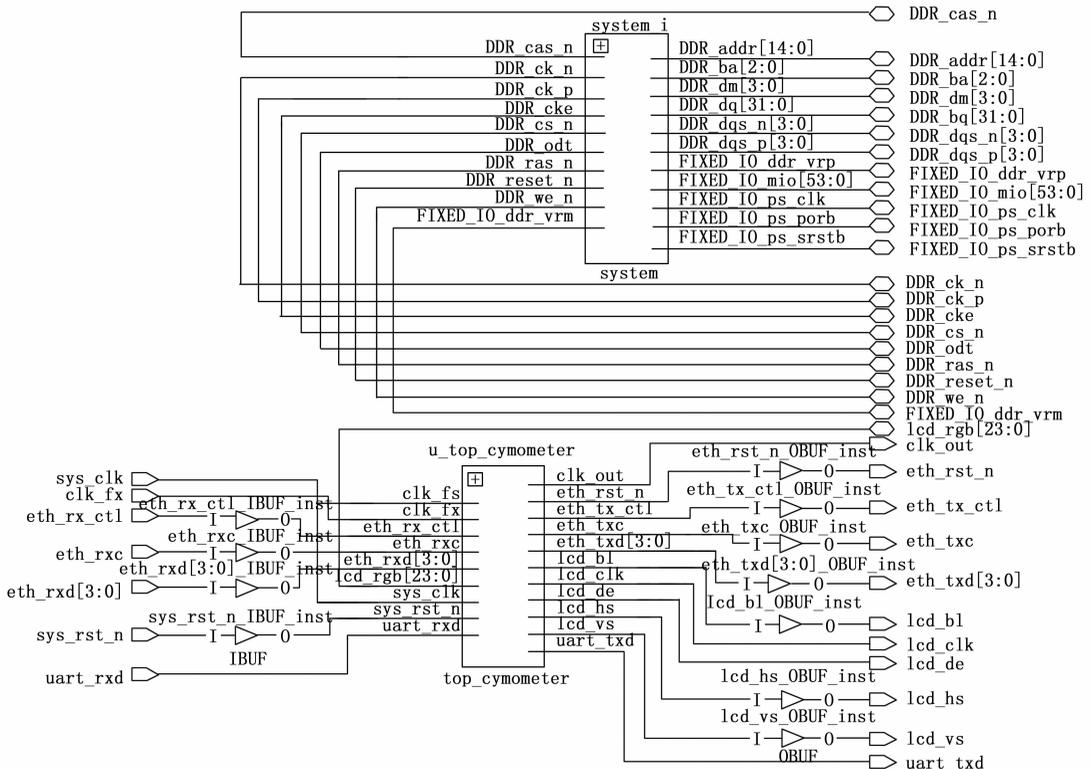


图 12 处理器系统示意图

用 QSPI 作为配置器件, 根据芯片引脚布局添加的处理器系统中 QSPI 选择对应的 MIO 引脚。ZYNQSoC 的启动由片上的 BootROM 执行, BootROM 是 ZYNQ 芯片上的一块非易失性存储器, 它包含了 ZYNQ 所支持的配置器件的驱动。BootROM 执行之前, 需要配置 First-mStage Boot Loader (FSBL), FSBL 可以配置 DDR 存储器和硬件设计过程中所定义的一些外设。这些器件需要在加载软件应用及配置 PL 之前就初始化完毕。

5 频率测量实验与分析

5.1 实验平台搭建

频率测量实验平台主要包括任意波形发生器 Tektronix AFG3102、高精度频率计 KEYSIGHT 53 220 A、基于 FPGA 的高精度频率测量系统及上位机。通过测量频率精度及分辨率验证实验来检验频率测量系统的性能。通过调整任意波形发生器的输出信号频率, 记录频率测量及偏差, 并将其作为参考标准值, 分别计算高精度频率计及高精度频率检测系统的测量值, 对比验证检测系统的频率测量性能。



图 13 实验平台搭建

5.2 频率测量系统精度测试

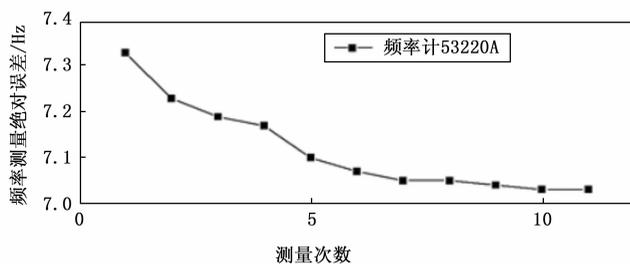
为验证系统频率绝对值测量精度, 设置任意波形发生器输出幅度 6 Vpp、幅度偏移 2 Vpp、初始频率为 10 MHz 的正弦信号, 分别输入至频率计 53 220 A 和系统的测量通道。设置频率计和系统的闸门时间均为 2 s, 开始测量后依据 QCM 传感器输出信号的频率范围改变任意波形发生器输出信号的频率变化范围, 任意波形发生器输出信号频率范围为 9 999 700~1 000 000 0 Hz, 等间隔进行多次测量并记录测量结果, 如表 2 所示。在该范围内, 频率计测量最大绝对误差为 7.33 Hz, 最大相对误差为 7.33×10^{-7} ; 系统测量最大绝对误差为 0.35 Hz, 最大相对误差为 3.5×10^{-8} 。

频率计 53 220 A 与测量系统对频率范围 9 999 700~1 000 000 0 Hz 内频率绝对值测量误差如图 14 所示, 由图可以看出频率计 53 220 A 的 11 次测量误差范围在 7.1~7.33 Hz, 而测量系统的 11 次测量误差范围在 0.2~0.35 Hz。对频率计 53 220 A 和测量系统 11 次测量误差计算平均值与标准差, 频率计测量误差的平均值为 7.117 Hz, 标准差为 0.094 Hz; 测量系统测量误差的平均值为 0.268 Hz, 标准

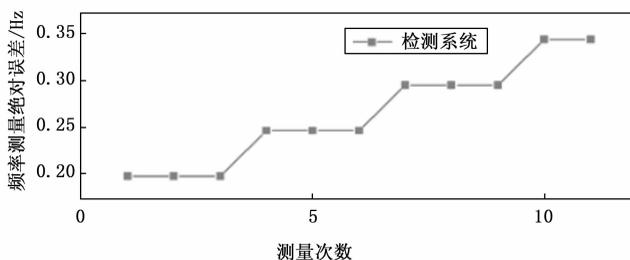
差为 0.053 Hz。

表 2 频率测量精度测试结果

标准频率值/Hz	频率计 53 220 A/Hz	检测系统/Hz
1 000 000 0.00	9 999 992.67	9 999 999.80
9 999 970.00	9 999 962.77	9 999 969.80
9 999 940.00	9 999 932.81	9 999 939.80
9 999 910.00	9 999 902.83	9 999 909.75
9 999 880.00	9 999 872.90	9 999 879.75
9 999 850.00	9 999 842.93	9 999 849.75
9 999 820.00	9 999 812.95	9 999 819.70
9 999 790.00	9 999 782.95	9 999 789.70
9 999 760.00	9 999 752.96	9 999 759.70
9 999 730.00	9 999 722.97	9 999 729.65
9 999 700.00	9 999 692.97	9 999 699.65



(a) 频率计 53220A 测量误差



(b) 检测系统测量误差

图 14 频率测量误差曲线

从两者的测量误差平均值可知, 测量系统的系统误差中由于时钟源生成的时钟信号引起的误差较小, 但是频率计 53 220 A 与测量系统测量误差的标准差接近, 说明测量系统测量随机误差较小, 测量稳定性较好。由测试结果可知, 高精度频率测量系统测量精度与频率计 53 220 A 相近, 系统频率测量精度可以满足设计指标。

5.3 频率测量系统分辨率测试

频率测量实验平台各设备参数设置参照不变, 设置闸门时间 2 s, 标准信号频率值为 100 MHz。分别对频率变化 0.1~100 Hz 的信号进行 10 次测量, 并计算测量平均值与标准差如表 3 所示, 在频率变化范围 0.1~100 Hz 范围内, 频率测量系统虽略差于频率计 53 220 A, 但这是由于检测方法所引入的理论误差影响。由初步测试结果可知在 QCM 信号频率变化范围内, 尤其是频率变化较大时, 测量系统的频率测量性能可以满足设计要求。

表 3 频率变化范围 0.1~100 Hz 测试结果

频率变化/Hz	频率计 53 220 A		检测系统	
	平均值/Hz	标准差/Hz	平均值/Hz	标准差/Hz
0.10	0.104	0.011	0.105	0.015
0.50	0.491	0.012	0.5	0.022
1.00	0.998	0.024	1.005	0.015
5.00	5.002	0.015	5.005	0.015
10.00	10.003	0.013	10.005	0.015
25.00	25.00	0.017	25.01	0.02
50.00	49.998	0.016	50.01	0.02
75.00	75.00	0.011	75.002	0.004
100.00	99.999	0.012	100.002	0.02

由上述测试结果可知，在频率变化较小的范围内，增加测试样本，对 0.1、0.5、1 Hz 频率变化的信号进行 100 次测量，测试结果如图 15 所示。

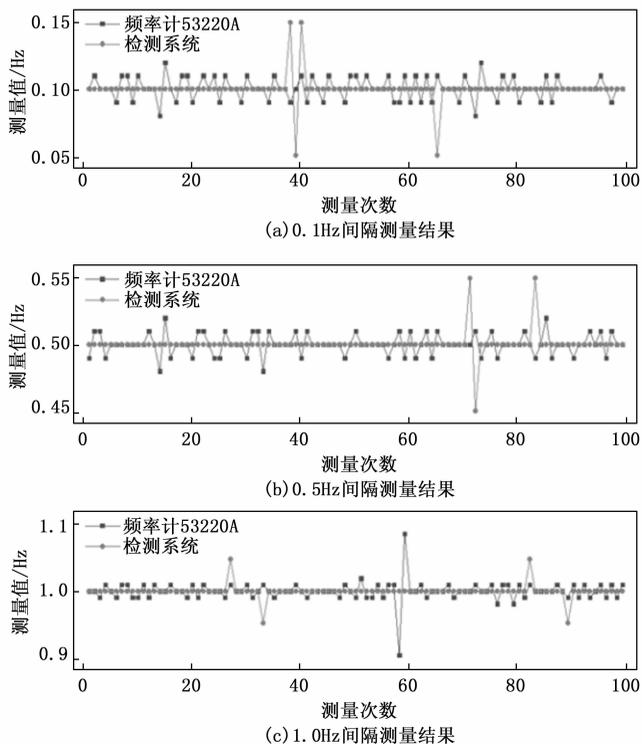


图 15 频率变化 0.1、0.5、1 Hz 测试结果

从图 15 (a) 与 (b) 中可以看出，在测量 0.1 Hz 和 0.5 Hz 的频率间隔时，相较于频率计 53 220 A，检测系统测量的绝对误差较大，但是测量误差出现次数较少。从图 15 (c) 中可以看出在测量 1 Hz 频率间隔时，相较于频率计 53 220 A，检测系统测量绝对误差与测量误差出现的次数均小于频率计。但是频率计 53 220 A 测量的最大绝对误差仅出现一次，而剩下的测量误差均小于检测系统。由于测量方法的不同，检测系统测量误差表现出了规律性，测量误差均出现在 ± 0.5 Hz，这是采用基于锁相环的改进型等精度频率测量方法所引入的理论误差。

由上述实验可知频率计 53 220 A 与高精度频率测量系统测量分辨率的性能相接近，对此进一步分别计算频率计和测量系统的平均值与标准差。

表 4 频率变化范围 0.1~1Hz 测试结果

频率变化/Hz	频率计 53 220 A		检测系统	
	平均值/Hz	标准差/Hz	平均值/Hz	标准差/Hz
0.10	0.100 6	0.008	0.1	0.010 05
0.50	0.500 3	0.007 6	0.500 5	0.008 7
1.00	1.000 3	0.015 8	1.000 2	0.010 06

如表 4 所示，根据计算结果可知，在频率变化较小时，检测系统频率测量分辨率接近频率计 53 220 A，甚至在部分情况下优于频率计。这种现象是因为检测系统测量理论误差为 0.05 Hz，因此理论分辨率不会优于 0.05 Hz。综上所述，虽然频率测量分辨能力略低于频率计，但检测系统频率测量分辨率可以达到 0.1 Hz，满足设计要求。

6 高精度频率测量系统在 QCM 二氧化碳气体检测中的应用

质量型传感器可用于各类气体检测，通过在传感器表面涂敷敏感材料，利用敏感材料对气体的吸附能力来实现气体检测^[20-21]。QCM 传感器表面吸附的质量变化会引起谐振频率变化，将环境中二氧化碳的含量转变成频率变化的大小，因此对频率进行高精度测量是准确检测环境中二氧化碳浓度的关键因素。

QCM 通常作为选频元件接入电路，通过驱动电路使其工作在基频来获取测量信息，但在实际应用中容易受到外部环境因素的干扰，所以需要设计一种最适合二氧化碳气体检测的 QCM 驱动电路，使其稳定工作在基频下，从而得到环境中二氧化碳的准确含量。选择了基于皮尔斯振荡器的改进型门式振荡电路作为振荡电路的设计方案，能够降低电路噪声给 QCM 检测系统带来的干扰。根据该方案搭建的二氧化碳测量系统实验平台如图 16 所示。为检验基于 FPGA 的高精度频率测量系统在实际气体检测中的性能，搭建了气体浓度检测检测实验平台，包括动态配气系统、反应气室、QCM 二氧化碳气体检测系统及数据处理上位机。

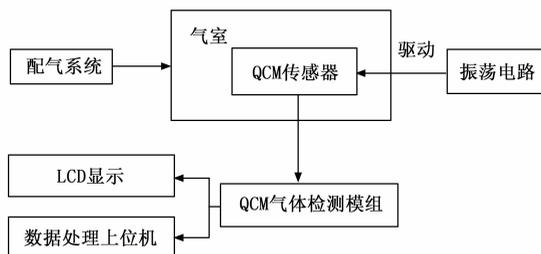


图 16 基于 QCM 的二氧化碳测量系统

实验首先通入氮气作为背景气体，直到系统采集频率值趋于稳定，然后通入浓度 4 000 ppm 的二氧化碳气体，持

续 90 s, 最后再次通入氮气 150 s 解除吸附。实际结果如图 17 所示, 通入二氧化碳后频率迅速降低直至稳定值, 再次通入氮气后频率在 10 s 内又迅速回升。高精度频率测量系统在二氧化碳检测中表现出快速稳定的反应能力, 具有较大的实际应用价值。

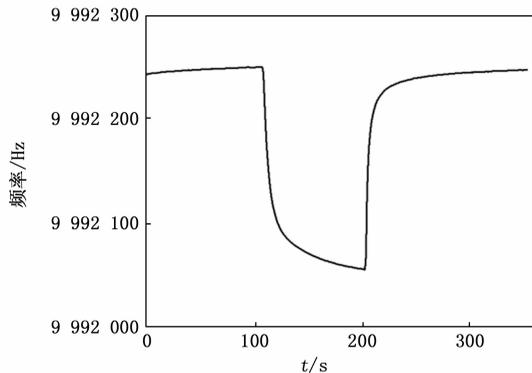


图 17 气体环境中的频率测量结果

为检验二氧化碳检测系统的实际测量精度, 分别在二氧化碳气体浓度为 2 000、3 000、4 000、5 000 ppm 浓度下进行检测实验。

表 5 可知, 在气体浓度 2 000~5 000 ppm 的范围内, 系统最大绝对误差小于 ± 20 ppm, 相对误差小于 0.8%。测试结果表明, 气体检测系统在二氧化碳气体浓度 2 000~5 000 ppm 范围内具有较高精度。

表 5 精度测试结果

标准气体浓度/ppm	测量值/ppm	测量误差绝对值/ppm
2 000	1 988.07	11.93
3 000	3 003.64	3.64
4 000	4 013.72	13.72
5 000	5 018.28	18.28

7 结束语

提出了一种基于锁相环的改进型等精度频率测量方法, 并应用于 QCM 二氧化碳气体检测, 结合所设计的集成方法给出了系统硬件电路及嵌入式软件, 完成了系统的设计、实现与集成。为验证所设计检测系统的综合性能, 搭建了频率检测实验平台, 对基于 FPGA 的高精度频率测量系统的各项性能指标进行了实验测试与分析, 测试结果表明, 所设计的系统频率测量精度高, 绝对误差不超过 0.35 Hz, 相对误差不超过 3.5×10^{-8} , 分辨率可以达到 0.1 Hz, 同时在二氧化碳气体实际检测中表现出快速稳定的反应能力, 能够对二氧化碳浓度实现准确测量。

参考文献:

[1] 潘齐超, 张 瞳, 张耀鹏, 等. 具有质量和电化学复合敏感效应的新型 QCM 生物传感器研究 [J]. 压电与声光, 2022, 44 (6): 860-864.

[2] 文 韬, 何伟韬, 聂齐毅, 等. 基于压电传感阵列的萜烯类挥发物鉴别 [J]. 传感技术学报, 2024, 36 (2): 323-328.

[3] 杨 臣, 付永杰. 频率稳定度的测试方法及软件设计 [J]. 仪器仪表用户, 2010, 17 (6): 74-76.

[4] ZHANG X Y, LI L, FU C N, et al. Enhanced frequency measurement via lissajous figure flipping periods: A high precision approach [J]. Traitement du Signal, 2023, 40 (3): 961-970.

[5] 徐德仁, 黄 明, 王 灿, 等. 宽带等精度数字测频系统设计 [J]. 电子科学技术, 2016, 3 (6): 685-688.

[6] 董 勃, 王 直, 于 航, 等. 基于 FPGA 的高精度频率计 [J]. 计算机与现代化, 2021, 6: 96-99.

[7] 缪凯祥, 石 磊, 王刚毅, 等. 基于 FPGA 的多通道自适应频率测量方法 [J]. 船舶工程, 2019, 41 (6): 86-90.

[8] 唐 静, 侯金磊, 张 宁, 等. 基于 FPGA 的频率稳定度测量系统设计 [J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39 (1): 73-78.

[9] MISBAN M, RIVAI M, KURNIAWAN F. Quartz crystal microbalance based electronic nose system implemented on field programmable gate array [J]. TELKOMNIKA, 2019, 17 (1): 370-376.

[10] 何朝梁, 冯 斌, 陶 翔, 等. 基于氧化石墨烯的 QCM 呼吸传感器及系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2020, 12: 1-5.

[11] 胡 远, 黄海滨, 陈东傲, 等. 基于 FPGA 的硅微陀螺数字测控和温补技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (2): 29-35.

[12] 刘 源, 张 磊, 徐叔喜, 等. 基于 FPGA 的等精度多通道数字频率计 [J]. 电子技术, 2020, 49 (2): 28-31.

[13] 王丽娜, 杨旭森, 许 冉, 等. 基于 FPGA 的宽带信号产生和频率测量电路 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (17): 107-111.

[14] 缪 凯, 祥石磊, 王刚毅, 等. 基于 FPGA 的多通道自适应频率测量方法 [J]. 船舶工程, 2019, 41 (6): 86-90.

[15] SYAHBANA M A, SANTJOJO D J H D, SAKTI S P. High-resolution multiple channel frequency counter using spartan-3E FPGA [C] //2016 International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology, Malang, Indonesia, 2016: 111-114.

[16] 李俊杰, 伍 俊, 荣亮亮, 等. 基于 GPS 授时的高精度光泵磁力计变频方法 [J]. 仪表技术与传感器, 2018, 11: 36-38.

[17] 陈寿法, 王中鹏. 等精度频率测量的同步门电路改进设计 [J]. 电测与仪表, 2015, 52 (18): 90-95.

[18] 谭本艳, 夏界宁. 基于改进型等精度测量的可视化频率仪 [J]. 计量与测试技术, 2023, 50 (3): 51-53

[19] 张 颖, 刘婵娣, 梁静远, 等. 锁相环技术的研究进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (4): 1-17.

[20] BOURENNANE A, TANOUGAST C, DIOU C, et al. Accurate Multi-Channel QCM Sensor Measurement Enabled by FPGA-Based Embedded System Using GPS [J]. Electronics, 2023, 12 (12): 2666.

[21] 郭小焯, 王 洋. 基于 stm32 的手持式气体检测仪 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 265-271.