

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105742

一种振弦差阻复用型读数仪的设计与实现*

毛索颖^{1,2,3} 周芳芳^{1,2,3} 曹浩¹(1.长江水利委员会长江科学院 武汉 430010; 2.水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心 武汉 430010;
3.国家大坝安全工程技术研究中心 武汉 430010)

摘要: 针对大坝安全监测的读数仪表测量类型单一的问题,研究设计了一种新型安全监测读数仪,可高效地实现对振弦和差阻这两类传感器信号的复用测量。采用了STM32F407VET6作为微处理器,通过设计振弦信号测量、差阻信号测量、通道复用、蓝牙通信、电源控制、人机交互等单元模块,实现传感器信号测量、模式切换、测值展示等功能。测量实验数据和结果表明,所设计的读数仪可实现对振弦和差阻传感器的复用测量,其绝对误差参数均满足现行标准要求。

关键词: 大坝安全监测;振弦式传感器;差阻式传感器;STM32;AD7606;ADS1248
中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design and implementation of multiplex readout instrument for vibrating wire sensor and differential resistance sensor

Mao Suoying^{1,2,3} Zhou Fangfang^{1,2,3} Cao Hao¹

(1.Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of MWR, Wuhan 430010, China; 3. Research Center on National Dam Safety Engineering Technology, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to solve the problem of single measurement type of reading instrument for dam safety monitoring, a new type of reading instrument for safety monitoring is designed, which can efficiently realize the multiplexing measurement of the two kinds of sensor signals, vibrating wire and differential resistance. It uses STM32F407VET6 as microprocessor, through vibrating wire signal acquisition, differential resistance signal acquisition, channel multiplexing, Bluetooth communication, power control, human-computer interaction and other unit modules, to realize sensor signal measurement, mode switching, measured value displaying and so on. The experimental data and results show that the designed readout can realize the multiplexing measurement of vibration wire sensor and differential resistance sensor, and its absolute error parameters meet the current standard requirements.

Keywords: dam safety monitoring; vibrating wire sensor; differential resistance sensor; STM32; AD7606; ADS1248

0 引言

大坝安全监测仪器是感知大坝安全运行状态的“耳目”,对大坝工程中所埋设的安全监测仪器进行数据测量、数据传输、数据处理和监测资料分析,可以掌握大坝工程的运行状态,保障水利工程安全^[1]。安全监测仪器种类繁多,根据测量原理的不同,可分为振弦式、差动电阻式(差阻式)、光纤光栅式、电容式等,其中,振弦式和差阻式传感器应用最为广泛^[2-3]。

现今,许多大坝工程同时埋设振弦式和差阻式传感器,

由于市面上这两类传感器的测读仪表未集成,观测人员需要携带振弦式读数仪和差阻式读数仪这两种仪表,以完成日以千计的安全监测传感器观测工作。因此,复用性好、兼容性强、易于便携的读数仪表为安全监测工作提供了便利,可有效提高安全监测工程的观测效率,节省人力和经济成本。

通道复用技术虽在大坝安全监测自动化设备中广泛运用^[4],如文献^[4]对一种具有通道切换和复用设计的传感器自动采集装置进行设计和实现。然而不同于自动化设备的是,读数仪表对实时测读、继电器寿命、尺寸约束、采集精

收稿日期:2021-01-26

* 基金项目:长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2019394/GC)、国家重点研发计划项目(2016YFC0401602)资助

度、功耗等方面有较高需求,因此通道复用电路、测量电路在读数仪表中需要优化设计。

基于这种目的,本文研究并设计了一种便携式振弦差阻复用读数仪。

1 硬件总体结构

便携式振弦差阻复用读数仪(后文简称为读数仪)的硬件部分总体结构主要由主控模块、振弦测量模块、差阻测量模块、通道复用模块、电源管理模块、蓝牙通信模块、显示与按键模块组成。如图 1 所示为读数仪的硬件系统拓扑结构。

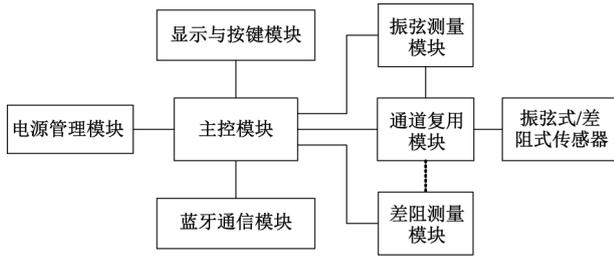


图 1 硬件系统拓扑结构

根据所接入传感器的类型,读数仪的主控模块控制通道复用模块,导通到对应的振弦测量模块或差阻测量模块,从而实现单一通道对所接入的振弦和差阻传感器的复用测量;电源管理模块为设备提供稳定的直流电源,并在主控模块的控制下实现锂电池充放电管理功能;显示与按键模块在主控模块的控制下,通过按键识别输入信息,通过液晶屏幕显示输出信息,实现良好的人机交互功能;蓝牙通信模块通过主控模块片上串口资源及串口转蓝牙模块,可将数据无线地传输给智能终端设备。

2 主要模块设计

2.1 主控模块

主控模块是读数仪硬件结构的核心,选用 STM32F407VET6 芯片作为微处理器。它的主要资源有片内 ADC、FLASH、高速 USART、高速 SPI、PWM 高速定时器、USB 高速 OTG 等,这些丰富的片上资源简化了读数仪的电路和固件程序设计^[5]。

STM32F407VET6 的基本外围电路由时钟电路、复位电路、存储电路和 SWD 程序下载电路组成。读数仪的主控模块与读数仪的功能模块构成主从关系,表 1 所示为主控模块重要的内部资源和对对应关系分配结果。

2.2 通道复用模块

通道复用模块实现单通道下对振弦传感器和差阻传感器的复用式采集。图 2 所示为振弦传感器和差阻传感器的电学结构等效简图,振弦传感器一般具有“红黑绿白”4 根测量线缆,其中“红黑”对应振弦端,“绿白”对应热敏电阻端;五线制差阻传感器一般具有“蓝黑红绿白”5 根测量线缆^[6-7]。

表 1 主控模块的重要内部资源分配结果

序号	主控模块资源	功能
1	PWM 定时器	PWM 扫频激振信号的输出
2	USART1 接口	串口转蓝牙通信
3	SPI1 接口	ADS1248 通信
4	SPI2 接口	液晶显示屏通信
5	USB 高速 OTG	USB2.0 通信
5	SPI3 接口	AD7606 通信
6	SPI4 接口	FLASH 通信

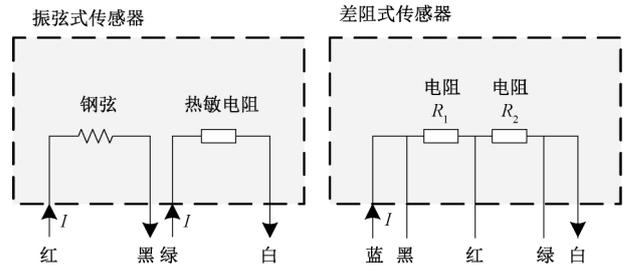


图 2 振弦和差阻传感器的电学结构简图

为实现复用测量,读数仪设置通用的 5 根测量线缆,分别为“红黑绿白蓝”,在电路设计中采用了 2 个 5 V 双刀双掷电子继电器芯片 G6K-2F-Y-DC5,构成不冗余的两对输入信号切换电路,实现两种测量模式切换和复用。

图 3 为通道复用模块电路。当接入振弦式传感器时,将 ch1 和 ch2 信号置为高电平,两个继电器的“2”和“7”引脚导通,设备的“红黑”和“绿白”线缆分别接入到频率测量单元和温度测量单元中,构成测量频率和温度的两个独立回路,实现振弦测量模式;当接入差阻式传感器时,将 ch1 和 ch2 信号置为低电平,两个继电器的“4”和“5”引脚导通,给“蓝”线缆+5 V 电平输入,由于“白”线接地,差阻传感器形成电流回路,设备的“黑”、“红”、“绿”线缆分别接入 A/D 转换器的采样端,进行电压值采样,实现差阻测量模式。

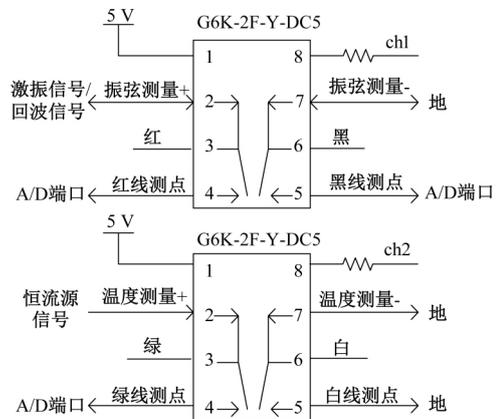


图 3 通道复用模块电路

该电路在单次的同步切换指令下,可实现振弦采集模块和差阻采集模块分别对振弦传感器与差阻传感器的连接导通,振弦和差阻测量电路间有效隔离;同时,在切换到振弦测量或差阻测量的固定模式后,继电器无需再频繁切换,即可实现对应模式下对“频率”和“温度”或“电阻和”和“电阻比”物理量的双测量,有效提高了继电器的寿命。

2.3 振弦测量模块

振弦测量模块主要由频率测量单元和温度测量单元组成^[8],实现对振弦式传感器的信号激励、信号调理和信号采集,实现对内置热敏电阻阻值的测量。

1) 频率测量单元

振弦测量模块的频率测量单元由激振和拾振两部分组成,它们采用时分复用的方式实现对振弦传感器内部钢弦的振动激励和频率测量。

图 4 为振弦传感器频率测量单元的拓扑结构。主控模块 PWM 定时器产生占空比为 50% 的扫频方波信号,经 MOS 管组成的功率放大电路放大为 5 V 峰值信号,经信号隔离电路后,作用于钢弦,实现激振过程;钢弦受到激励而振动,产生与本振频率相近的毫伏级正弦波回波信号,该信号通过两级四阶的放大滤波电路放大数千倍后至伏级信号,经 A/D 转换器和 SPI 通信接口进入主控模块,最后通过高精度测频算法,计算出回波信号的频率值。

振弦式传感器的本振频率范围一般介于 400~6 000 Hz 之间,不同类型的传感器,其本振频率处于不同的频段。为了达到良好的激振效果,传统的振弦激励方案是高压激

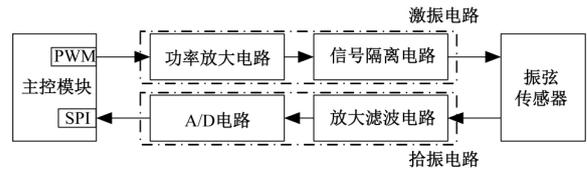


图 4 振弦传感器频率测量单元的拓扑结构

振或采用分频段扫频激振方式(即根据传感器类型和频段范围,对于不同类型的传感器,采取不同频段的激振频率)^[9-10]。为了尽可能匹配多种类型的传感器,提高设备的兼容性和易用性,文章的激振电路利用 STM32F407 内部的 PWM 定时器资源,设置扫频步长为 20 Hz,对振弦式传感器进行采用全频段扫频激振。

在噪声信号较强的环境中,毫伏级微弱的振弦回波信号容易淹没其中,此时传统的基于内部计数器进行测周期而实现的直接测频法或等精度测频法^[11],均为时域分析法,抗干扰能力较差^[12],容易造成测值错误或测值误差。为了提高频率测量的准确性和抗干扰能力,采用了一种基于 AD7606 的离散傅里叶变换(DFT)的频谱测频方法。

图 5 为 AD7606 的接口电路。采用 AD7606 作为测频系统的 ADC 是从采样速度、精度和功耗 3 个角度的综合需求考虑的,该款 8 通道 16 位同步采样 ADC 的采样速率可达到 200 kSPS。AMP1 和 AMP2 分别为二级四阶放大滤波电路的第一级和第二级输出信号,分别将放大 1 000 倍和 5 000 倍,接入到 AD7606 的 V1 和 V2 通道中,可根据采集信号的幅值强弱选择对应通道进行 A/D 采样。

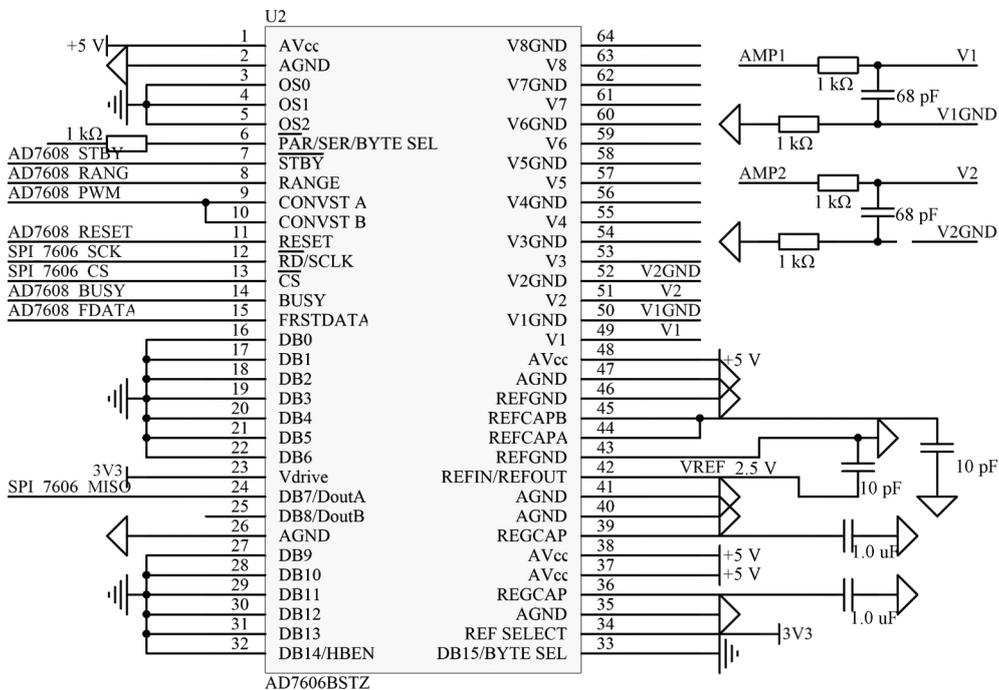


图 5 AD7606 的接口电路

为了准确识别频率 F 最大为 6 000 Hz 的正弦波信号,设置 STM32 内部 TIM1 计数器为定时器模式,定时频率

为 20 480 Hz,并在定时周期的每次上升沿开启中断,触发 AD7606 的一次 A/D 转换,从而实现以采样频率 F_s 为

20 480 Hz 对正弦波进行采样,由于采样频率 $F_s \geq 2 F$,满足奈奎斯特采样定理的要求。当采样点数 $N = 4\ 096$ 次时,结束采样,得到一组反映时域回波波形的离散电压值,通过串行 SPI 通信方式传输给主控模块的微处理器。随后对这组离散电压值进行 DFT 变换^[13],通过 Rife 频率估计算法,提取频域波形谱峰最大点对应的信号频率,即为受激信号的频率值,完成拾振过程。图 6 为基于 Rife 的频率估计算法的 DFT 变换测频流程。

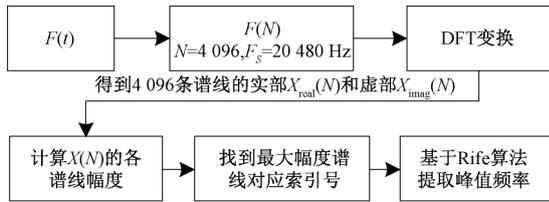


图 6 DFT 变换测频流程

Rife 频率估计算法是典型的正弦频率估计算法^[14],其正弦频率可通过式(1)进行计算:

$$\hat{f} = \begin{cases} \frac{F_s}{N} \left[k + \frac{|X(k+1)|}{|X(k)| + |X(k+1)|} \right], & |X(k+1)| \geq |X(k-1)| \\ \frac{F_s}{N} \left[k - \frac{|X(k-1)|}{|X(k)| + |X(k-1)|} \right], & |X(k+1)| < |X(k-1)| \end{cases} \quad (1)$$

首先对 $F(N)$ 进行 N 点的 FFT 运算,得到关于 4 096 条谱线的实部 $X_{\text{real}}(N)$ 和虚部 $X_{\text{imag}}(N)$ 的数组,并且在 F_s 的频域范围内搜索最大谱峰的索引号 k ,求解出最大谱峰值 $|X(k)|$ 和两个相邻次大谱线值 $|X(k-1)|$ 、 $|X(k+1)|$,比较两个相邻次大谱线值的大小,依据式(1)计算正弦频率估计值。

2) 温度测量单元

振弦采集模块的温度测量单元是基于 ADS1248 芯片实现的。ADS1248 是一款 8 通道(4 通道差分)的 24 位低功耗高精度的专业级温度测量 ADC 芯片,它同时内置了低漂移的内部参考电压和可编程电流源,可实现专业化温度测量方案^[15],可减少器件数量并简化电路设计。

振弦传感器内置的温度电阻为 NTC 热敏电阻,是负温度系数热敏电阻,即温度越高时,电阻值越低。振弦传感器工作在温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其对应的内部 NTC 电阻的阻值范围在 29.13 k Ω ~525 Ω 之间,具有较宽的阻值区间。

图 7 所示为以 ADS1248 为核心设计的温度测量单元和差阻测量模块的电路图。将 ADS1248 设置在内置恒流源模式下,增益倍数 PGA 置为 1,采用 $U_{\text{REF}} = 2\ 048\text{ V}$ 的内部基准电压。采用 IEXC2 为恒流源输出引脚,恒定电流流经热敏电阻后,串接一个 220 Ω 的保护电阻并接地,热敏电阻接入 ADS1248 的差分采样端 AIN3 和 AIN4。主控芯片通过 SPI 串行通信方式,采样上述模式下的热敏电阻的端间电压 U_{NTC} ,根据式(2)计算出热敏电阻的阻值,根据热敏电阻与温度的对应关系表即可准确换算出温度值。

$$R = U_{\text{NTC}} / I_R \quad (2)$$

其中,内置恒流源 I_R 可通过 ADS1248 内部寄存器设置为 50,100,250,500,750,1 000,1 500 μA 。在上限电阻 29.13 k Ω 的约束下,保证 U_{NTC} 不超过 U_{REF} 的量程范围,恒流源可输出的最大电流理论值为:

$$I_{\text{MAX}} = U_{\text{REF}} / (29.13 \times 10^3) \approx 70\ \mu\text{A} \quad (3)$$

即恒流源只能取 50 μA 。但是在此模式下,测量下限电阻 525 Ω 的两端电压仅为:

$$U_{\text{NTC}} = 50 \times 10^{-6} \times 525 = 0.026\text{ V} \quad (4)$$

为了尽可能利用 ADC 器件的分辨力范围,提高采集精度,使 U_{NTC} 小于但尽可能接近 U_{REF} 的值,设计中采取热敏电阻分段恒流源设置的采集方案。设置 3 000 Ω 为分段采集的临界点,当热敏阻值低于 3 000 Ω 时,可编程恒流源输出电流设定为 500 μA ,高于 3 000 Ω 时,可编程恒流源输出电流设定为 50 μA 。

2.4 差阻测量模块

差阻测量模块实现对差阻式传感器的测量。差阻式传感器的测量包括电阻和 $R_1 + R_2$ 及电阻比 R_1 / R_2 的测量。为提高芯片使用效率,将 ADS1248 芯片未采用的 AIN0、AIN1、AIN2 这 3 个差分采样端及 REF0 和 REF0 两个参考输入端实现读数仪的差阻值的测量。

差阻测量功能的电阻量程要求是 0~120 Ω 。由于内置恒流源最大输出电流仅为 1 500 μA ,若 ADS1248 参照温度测量单元的测量方式,同样工作在恒流源模式下,测量的电阻两端在电压 0~0.18 V,偏离基准电压 2.048 V 过多,无法达到高精度测量的要求。

因此在差阻测量模块中,ADS1248 未选择工作于恒流源模式,而是直接供给蓝色测线直流 5 V 电压,白线端串联 1 个已知阻值 5×10^{-6} 低温漂精密电阻 R_{ref} 后接地,构成电流回路。两组差分通道 AIN0 和 AIN1, AIN1 和 AIN2 分别采样 R_1 、 R_2 的两端电压,实现 R_1 / R_2 的测量;外部基准电压输入端 REF0 和 REF0 采样 R_{ref} 的两端电压,差分通道 AIN0 和 AIN2 采样 R_1 和 R_2 串联后两端电压,实现 $R_1 + R_2$ 的测量。ADS1248 通过二进制补码格式输出 24 位数据,最小有效位(LSB)的权值为 $(V_{\text{REF}} / \text{PGA}) / (2^{23} - 1)$,正满量程输入产生的输出码为 7FFFFFFh,负满量程输入产生的输出码为 800 000 h。在增益倍数 PGA=1 情况下,电阻和 $R_1 + R_2$ 和电阻比 R_1 / R_2 的计算公式为:

$$R_1 / R_2 = V_{R_1} / V_{R_2} \quad (5)$$

$$R_1 + R_2 = V_{R_1 + R_2} \times R_{\text{ref}} / (2^{23} - 1) \quad (6)$$

式中: V_{R_1} 、 V_{R_2} 、 $V_{R_1 + R_2}$ 别为 ADC 的模数转换直接输出码。因此,该测量方法无需通过设定的确切基准电压值,计算出各采样点的实际电压值,实现 $R_1 + R_2$ 和 R_1 / R_2 的测量;而是通过把精密电阻的两端电压作为 ADC 转换的基准电压,在保证该电阻的低温漂性能的前提下,使电路具有良好的测量精度和较强的抗干扰性^[16],可避免测量电路

因供电电源或基准电压的不稳定造成的测值不稳定。

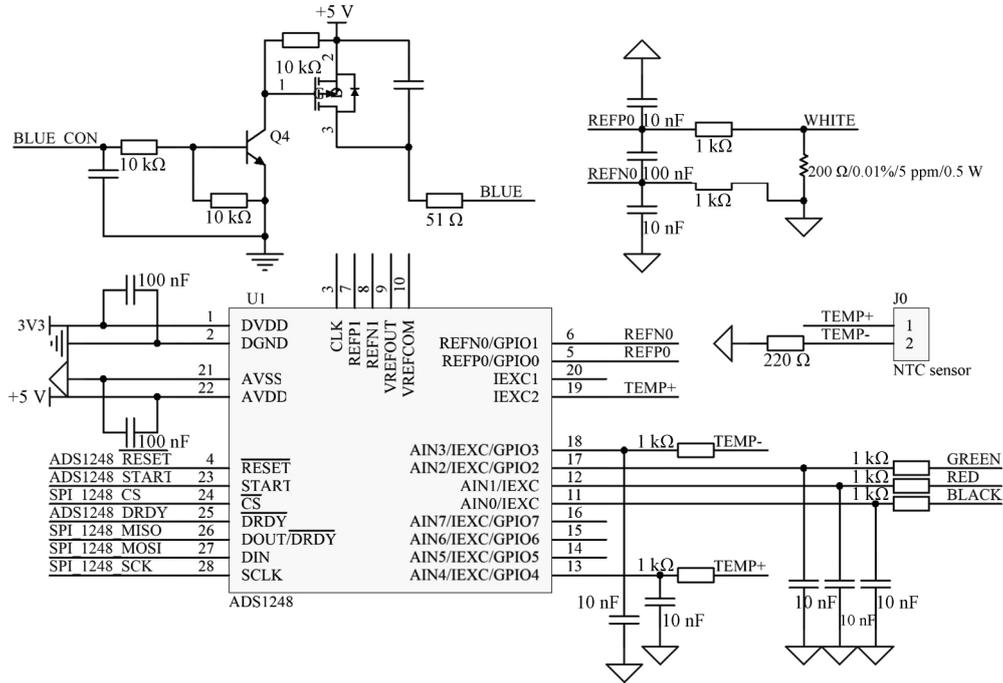


图 7 温度测量和差阻测量电路

3 固件程序设计

固件程序基于 IAR Embedded WorkBench 7.0 平台开发,流程如图 8 所示,首先进入 BOOTLOADER 引导程序,检测是否有程序更新,如无直接跳转至主程序,对系统各芯片和模块功能进行初始化,对屏幕进行初始化并清屏,并设

置为初始振弦测量模式,并进入 while 大循环,循环检测是否有按键关机和模式切换的按键触发,如果有关机指令,程序随即结束。若无关机指令,则读数仪对进行传感器进行循环测量,且把测量结果显示在 OLED 屏幕上。同时,在模式切换指令下,读数仪可随时切换到对应振弦或差阻模式进行新的循环测量,OLED 屏幕显示对应模式的测值。

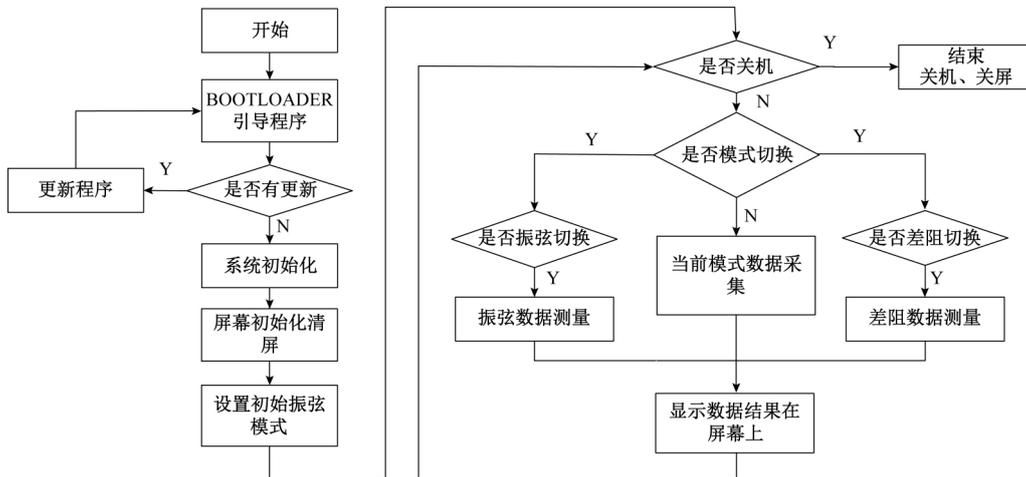


图 8 固件程序流程

4 测试与实验

《GB/T 3412.1-2009 大坝监测仪器 检测仪 第 1 部分: 振弦式仪器检测仪》和《DL/T 1742-2017 差动电阻式仪器测量仪表》对振弦式读数仪和差阻式读数仪的性能指标提

出了具体的规范和要求^[17-18]。依据上述技术标准,对设计的读数仪在实验室条件下进行关于准确度指标的功能测试和检验。其中,GB/T 3412.1-2009 标准规定振弦读数仪的频率测值准确度 ≤ 0.5 Hz,温度测值准确度 ≤ 0.5 °C, DL/T 1742-2017 标准规定差阻式读数仪的电阻和测值准确

度 $\leq 0.02 \Omega$,电阻比准确度 ≤ 0.0001 。

试验工作环境室温 25℃,空气湿度 55%RH,采用的标准测试仪器设备主要包括频率范围 0~30 MHz 的波形发生器 1 台,阻值范围 0.01 Ω ~100 k Ω 的 0.01 级直流电阻箱 2 台,上述标准仪表均检定或校准合格。

将读数仪设置为振弦测量模式,将“红黑”测线接入波形发生器,将读数仪的“绿白”测线接入电阻箱。将波形发生器输出设置为正弦波,输出电压幅值设置为 10 mV,占空比为 50%,调节输出频率为 400~6 000 Hz 之间,记录读数仪屏幕的频率测值。按照热敏电阻与温度值的对应关系,调节电阻箱至-20℃~70℃所对应的电阻值,记录读数仪屏幕的温度测值。计算实测值与标准值之间的绝对误差。温度振弦测量功能测试结果如表 2 和 3 所示。

表 2 振弦测量功能测试数据-频率

频率标准值/Hz	频率实测值/Hz	绝对误差/Hz
400.00	400.01	0.01
1 000.00	999.99	0.01
2 000.00	2 000.04	0.04
3 000.00	2 999.96	0.04
4 000.00	4 000.03	0.03
5 000.00	4 999.97	0.03
6 000.00	5 999.93	0.07

表 3 振弦测量功能测试数据-温度

温度标准值/ ℃	温度电阻 标准值/ Ω	温度实测值/ ℃	绝对误差/ ℃
-20.0	29 130.0	-19.9	0.1
0	9 796.0	0	0
20.0	3 748.0	20.0	0
40.0	1 598.0	40.0	0
60.0	746.3	60.0	0
70.0	525.4	69.9	0.1

将读数仪设置为差阻测量模式,将 2 台电阻箱串联,模拟为差阻传感器,将读数仪的“蓝黑”和“绿白”测线分别连接电阻箱串联后的两端,“红”测线接在电阻箱串联间的接线端,调节两只电阻箱的阻值,记录读数仪屏幕的“电阻和”和“电阻比”测值。差阻测量功能测试结果如表 4 和 5 所示。

表 4 差阻测量功能测试数据-电阻比

R_1/Ω	R_2/Ω	理论电阻比	实测电阻比	绝对误差
20.05	25.00	0.802 0	0.801 9	0.000 1
21.25	25.00	0.850 0	0.849 9	0.000 1
27.00	30.00	0.900 0	0.900 0	0
28.50	30.00	0.950 0	0.950 0	0
40.00	40.00	1.000 0	1.000 0	0
42.00	40.00	1.050 0	1.050 0	0
55.00	50.00	1.100 0	1.100 0	0
57.50	50.00	1.150 0	1.150 0	0
59.90	50.00	1.198 0	1.198 0	0

表 5 差阻测量功能测试数据-电阻和

R_1/Ω	R_2/Ω	理论 电阻和/ Ω	实测 电阻和/ Ω	绝对误差
10.00	10.00	20.00	20.00	0
20.00	20.00	40.00	40.00	0
30.00	30.00	60.00	60.00	0
40.00	40.00	80.00	80.00	0
50.00	50.00	100.00	100.00	0
60.00	60.00	120.00	120.01	0.01

以上测试和试验结果表明,设计的读数仪稳定性好,可实现振弦和差阻传感器的复用测量,且其准确度性能可达到国家和行业的相关标准要求。

5 结 论

本文设计了一种基于 STM32F407 微处理器的单通道便携式振弦差阻复用读数仪,详细研究并设计了基于 G6K-2F-Y-DC5 的通道复用模块,基于 AD7606 和 ADS1248 的振弦采集、差阻采集模块等功能模块,对设计的读数仪样机在实验室环境下进行了相关性能测试,测试结果表明,读数仪的性能达到相关行业标准的要求。

该振弦差阻复用读数仪作为一种新型的大坝安全监测读数仪表,将振弦采集和差阻采集功能集成于一体,可有效提高水利水电工程安全监测观测作业的效率,提升水利水电工程安全监测的技术和管理水平,具有良好的市场应用前景。

参考文献

- [1] 王德厚.大坝安全与监测[J].水利水电技术,2009,40(8):126-132.
- [2] 顾恺炎.我国大坝安全监测技术的发展与展望[C].中国水利学会第三届青年科技论坛论文集,成都:中国水利学会第三届青年科技论坛,2007:500-505.
- [3] 吕刚.大坝安全监测技术及自动化监测仪器、系统的发展[J].大坝观测与土工测试,2001,25(3):1-4.
- [4] 周芳芳,毛索颖,黄跃文.基于双微处理器的传感器自动采集装置设计与实现[J].长江科学院院报,2019,36(6):157-160.
- [5] 张沛涛,郭颖,齐航,等.基于 STM32F407 的物流搬运车设计[J].国外电子测量技术,2019,38(4):144-148.
- [6] 张国栋,王宏,陈明,等.差阻式和振弦式渗压计探讨[J].大坝与安全,2009(3):31-37.
- [7] 周扬,刘顶明.大坝安全监测仪器应用问题探讨[J].水电自动化与大坝监测,2009,33(2):41-44.
- [8] 杜立婵,王文静,韦冬雪.基于 NB-IoT 的桥梁健康远程监测系统设计与实现[J].电子测量技术,2020,43(20):155-159.
- [9] 贺虎,王万顺,田冬成,等.振弦式传感器激振策略优

- 化[J].传感技术学报,2010,23(1):74-77.
- [10] 吕国芳,李东明,刘希涛.振弦式传感器扫频激振技术[J].自动化与仪表,2006(3):79-81.
- [11] 潘妍,王茜.基于振弦式传感器的测频系统设计[J].仪表技术与传感器,2008(11):99-101.
- [12] 贺虎.振弦式传感器的频谱测量法[J].中国水能及电气化,2018(7):48-51.
- [13] 卜朝晖,常仙云,陈文星,等.基于可触发环形振荡器的高精度时间间隔测量[J].仪器仪表学报,2019,40(5):10-18.
- [14] 刘福东,陈智远.基于 Rife 算法的频率估计及其 FPGA 实现[J].工业控制计算机,2014,27(4):89-92.
- [15] 王安敏,孟海彦,李锋,等.基于 ADS1248 的铂电阻高精度测温装置[J].仪表技术与传感器,2017(9):52-54,58.
- [16] 蓝土庆,赖慧波.一种用于电阻式传感器的线性灵敏有源半桥电路及其补偿[J].电子测量与仪器学报,2019,33(5):134-141.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.大坝监测仪器 检测仪 第1部分:振弦式仪器检测仪:GB/T 3412.1-2009[S].北京:中国标准出版社,2009:10.
- [18] 国家能源局.差动电阻式仪器测量仪表:DL/T 1742-2017[S].北京:中国电力出版社,2018:3.

作者简介

毛索颖,硕士研究生,从事大坝安全监测及技术研发工作。

E-mail:maosuoying@126.com