

量程自适应高精度桥丝电阻测试仪的设计

潘晓琦¹, 彭宇²

(1. 北京航天新立科技有限公司, 北京 100039;

2. 哈尔滨诺信工大测控技术有限公司 烟台分公司, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了实现武器系统综合测试过程中火工品桥丝电阻测量和绝缘情况检查的高精度测量、量程自适应和自动化测试等目的, 通过对火工品桥丝电阻测试仪测量应用场景、总体架构和硬件软件设计需求进行了研究, 量程自适应高精度桥丝电阻测试仪采用多选一开关矩阵实现不同测量通道切换的技术和在恒压源和恒流源接入测量电路前进行自动检测的安全性保障技术, 实现了一种兼容 2 线制与 4 线制电阻测量的量程自适应的创新, 经过实验测试桥丝电阻测试仪可实现小电阻测量误差绝对值小于 0.5%, 大电阻测量误差绝对值小于 1%, 可实现对火工品桥丝电阻测量的量程自适应和自动化测试, 经实际应用量程自适应高精度桥丝电阻测试仪满足火工品桥丝电阻测量和绝缘情况检查的测试需求。

关键词: 桥丝电阻; 2 线制电阻测量; 4 线制电阻测量; 高精度; 量程自适应; 自动测试

Design of Self-adaption High-precision Bridge Wire Resistance Tester

PAN Xiaoqi¹, PENG Yu²

(1. Beijing Aerospace Xinli Technology Co., Ltd., Beijing 100039, China;

2. Yantai Branch of Harbin Nosean Test and Control Technology Co., Ltd., Yantai 264001, China)

Abstract: In order to realize the high-precision measurement, adaptive range and automatic testing of explosive bridge wire resistance measurement and insulation inspection during the comprehensive testing of weapon systems, this paper studies the application scenario, overall architecture, hardware design and software design in explosive bridge wire resistance measurement. By adopting the technology of switching different measurement channels with multiple-choice switch matrix and the automatic detection and safety guarantee technology before connecting the constant voltage source and constant current source to the measurement circuit, the range adaptive high precision bridge resistance tester can realize the measurement innovation of adaptive range with 2-wire and 4-wire resistances. Experimental results show the absolute value of measurement error for small resistances is less than 0.5%, with an absolute value of less than 1% for large resistances. At the same time, it can realize the adaptive range and automatic testing of the explosive bridge wire resistance measurement. By practical application, it can meet the requirements of bridge wire resistance measurement and insulation inspection.

Keywords: bridge wire resistance; 2-wire resistance measurement; 4-wire resistance measurement; high precision; adaptive range; automatic testing

0 引言

桥丝电阻阻值测量作为确保火工起爆的控制手段是武器系统综合测试的重要环节, 是关系到武器系统任务成败的关键^[1-2]。桥丝电阻阻值测量主要包括桥丝电阻的通路阻值测量和桥丝电阻与相关接点的绝缘情况检查, 桥丝电阻绝缘性能不满足条件, 也会使发火元件不能正常发火^[3]。桥丝电阻的通路阻值一般比较小, 单桥路桥丝电阻阻值一般在 0.9~1.2 Ω , 常态时绝缘电阻 ≥ 20 M Ω , 潮湿时绝缘电阻 ≥ 5 M Ω ^[4]。因此, 既要求桥丝电阻测试仪的测量范围宽又要求其测量精度高。此外, 出于测试安全性和可靠性的考虑测量电流和测量电压均有严格要求, 测量过程需通

过长距离电缆接到专用测试间内进行^[5-6]。

传统测量方法采用开关切换的方式接入专用测试仪表进行电阻测量, 普遍存在通用性差、测量精度差、自动化程度低和电阻测量量程需要手动设置等问题, 容易出现人为差错, 甚至可能危及人身安全^[7-12]。

针对桥丝电阻测试仪的设计和应用现状, 本文提出一种具备分布式远程测试能力的量程自适应的桥丝电阻自动化测试解决方案, 在充分保证测试过程安全性的前提下大大提高了测量精度^[13]。

1 桥丝电阻测试仪总体架构及原理

为实现高精度的桥丝电阻测试, 具备桥丝电阻测量量

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-04-28。

作者简介: 潘晓琦(1981-), 女, 高级工程师。

通讯作者: 彭宇(1984-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 潘晓琦, 彭宇. 量程自适应高精度桥丝电阻测试仪的设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 328-335.

程自适应和远程自动化测量等能力, 本文通过采用 4 线制电阻测量方法从而提高小电阻测试精度, 避免导线自身电阻对测试结果的影响; 通过设计以太网通信功能实现桥丝电阻测试仪测量过程的远程控制, 并通过单片机软件进行被测电阻阻值范围的匹配实现量程自适应。

桥丝电阻测试仪总体架构如图 1 所示, 包括主控板、供电电池组和继电器阵列三部分功能模块, 具体功能如下:

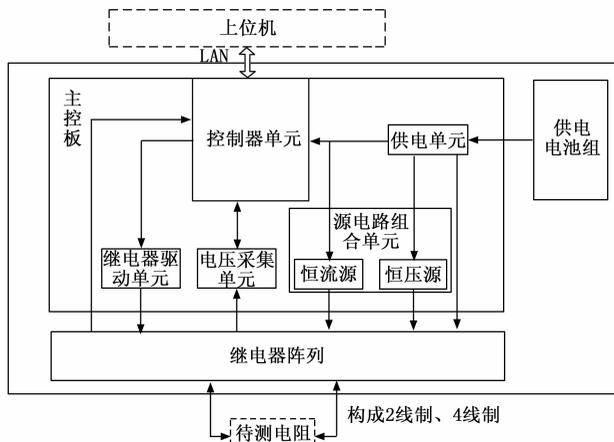


图 1 桥丝电阻测试仪总体架构图

1) 主控板包括控制器单元、供电单元、源电路组合单元 (即恒压源和恒流源)、电压采集单元和继电器驱动单元五部分, 实现内部供电转换、测量源输出、继电器通断控制、电阻测量控制和通信协议解析功能;

2) 供电电池组: 供电电池组为整个设备进行供电。

3) 继电器阵列: 被测电阻的接入与切换控制。

桥丝电阻测试仪开机时, 设备首先进行自检, 检测寄存器读写正常、检测默认配置信息、检测电流源输出和检测电压源输出; 然后进入电阻测试过程中, 上位机首先通过远端 LAN 接口发送通讯协议, 主控板上的控制器单元解析协议后通过继电器驱动信号控制继电器阵列切换到相应通道; 最后将恒压源或恒流源接入继电器阵列, 开始测试被测电阻。控制器单元控制电压采集单元进行采样, 并将数据上传给上位机, 完成测试。

桥丝电阻测试仪进行的电阻测量分为大电阻测量 (500 ~ 30 MΩ) 与小电阻测量 (0 ~ 500 Ω), 大电阻测量主要采用 2 线制测量电路, 小电阻测量主要采用 4 线制测量电路, 两块继电器板卡实现小电阻 4 线制测量和大电阻 2 线制测量, 2 线制和 4 线制的测量原理如下。

1) 基于 2 线制的大电阻测量原理:

采用精密电压源与精密参考电阻分压方式进行电阻测量, 即将被测大电阻与精密电压源和精密参考电阻构成一个串联电路, 测量电路如图 2 所示, 精密电压源电压为 U_0 , 精密电阻阻值为 R_s , 被测大电阻为 R_x , 通过采集电路测量被测大电阻两端电压为 U_x , 即可计算出被测大电阻阻值 $R_x = (U_x \times R_s) / (U_0 - U_x)$ 。

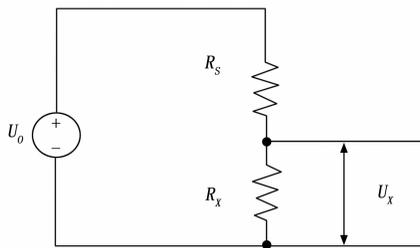


图 2 2 线制大电阻测量电路原理框图

2) 基于 4 线制的小电阻测量原理:

对于小电阻的测量, 电缆电阻与被测小电阻阻值非常接近, 如采取 2 线制大电阻测量方式, 则电缆电阻会对电阻测量结果产生极大的影响。为了最大程度的消除接触和电缆电阻引入的测量误差, 实现高精度测量, 小电阻测量采取 4 线制测量方式, 同时还可以有效消除系统的静态干扰和温漂的影响^[14-16]。4 线制小电阻测量原理如图 3 所示, 精密电流源 I_0 流入被测小电阻 R_x , 通过采集电路测量被测小电阻两端电压 U_x , 采集电路输入阻抗可达 1 MΩ, 因此电流 I_1 可忽略不计, 即可计算出被测小电阻阻值 $R_x = U_x / I_0$ 。

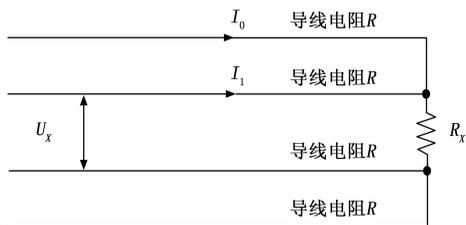


图 3 4 线制小电阻测量电路原理框图

2 桥丝电阻测试仪硬件设计

桥丝电阻测试仪主要由主控板、继电器阵列和供电电池组组成。

2.1 主控板硬件设计

主控板上共有 5 个单元, 分别是控制器单元、供电单元、源电路组合单元 (即恒压源发生电路和恒流源发生电路)、电压采集单元和继电器驱动单元, 其原理如图 4 所示。

2.1.1 控制器单元硬件设计

控制器单元硬件采用单片机 + FPGA 架构, 单片机选用 ST 公司生产的 STM32 系列大容量单片机 STM32F407IGT6, FPGA 选用深圳国微的 SMQV300。两者之间通过 UART 协议进行数据交互, 共同实现继电器控制、A/D 采样控制和以太网通信控制。控制器单元由单片机 STM32F407IGT6 系统、FPGA 系统和以太网接口组成。单片机 STM32F407-IGT6 用于完成与上位机通讯数据传输, 电压采集单元的控制与数据读取。控制器单元共需要控制 64 个继电器并回读, 由于 STM32F407IGT6 可使用 IO 数量不足, 采用 FPGA 芯片 SMQV300 实现继电器驱动单元的控制以及继电器

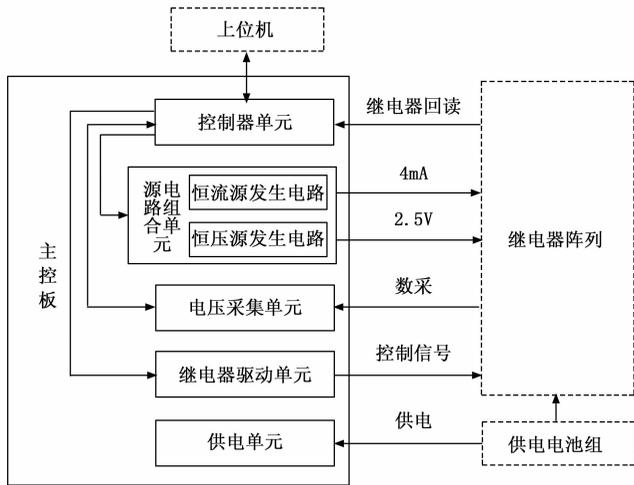


图 4 主控板组成

开关状态的回读。

STM32F407IGT6 芯片集成了 3 路 A/D 采集接口，设计通过此 3 路采集接口对桥丝电阻测试仪内部的恒流源输出电流信号、恒压源输出电压信号和电池供电电压信号进行采样。

1) 恒流源输出电流信号采样：通过 $I-V$ 转换电路，在采样回路中串接精密电阻，将被测电阻两端电压调理输出在处于 $1\sim 1.5\text{ V}$ 范围内进行采样；

2) 恒压源输出电压信号采样：输出 2.5 V ，分压至 $1\sim 1.5\text{ V}$ 范围内进行采样；

3) 电池供电电压采集：输出 9 V ，分压至 $1.5\sim 2\text{ V}$ 范围内进行采样。

FPGA 芯片具备 166 个用户可配置 I/O 引脚，内部集成 30 万逻辑门单元，工作频率可达 100 MHz ，支持 4 个低摆幅全局时钟网络。

以太网接口电路使用 STM32F407IGT6 集成的 MAC 核，接口配置 DP83848 型 PHY 芯片和以太网隔离变压器，实现 $10/100\text{ Mbps}$ 自适应以太网接口。

2.1.2 供电单元硬件设计

供电单元将供电电池组输入的直流电压转换成设备工作所需的 5 V 、 3.3 V 、 2.5 V 和 1.8 V 电压。

供电单元硬件采用 LTM4644IY 四路输出电源芯片做为核心转换电路，将输入的供电电池组 9 V 供电转换成板上需要的 5 V 、 3.3 V 、 2.5 V 和 1.8 V 。LTM4644IY 是一款每路可提供 4 A 电流的四通道 DC/DC 降压型稳压器，输入电压范围 $4\sim 14\text{ V}$ ，输出电压范围 $0.5\sim 5.5\text{ V}$ ，芯片转换效率最高可达 92% 。

2.1.3 恒流源发生电路硬件设计

恒流源发生电路由控制器单元通过继电器控制其输出，将恒流源输出接入继电器板。恒流源发生电路选用 LT3092，其内部工作原理如图 5 所示。恒流源输出计算公式 $I_o = 10\ \mu\text{A} \times R_{\text{SET}}/R_{\text{OUT}}$ 。

出于系统安全性考虑，要求桥丝电阻测试仪测量电流

不大于 10 mA ^[17]，根据恒流源芯片输出电流计算公式对 R_{SET} 和 R_{OUT} 电阻不同状态下恒流源输出情况分析如下：

- 1) 当电阻 R_{SET} 出现短路故障时，恒流源输出电流变大；
- 2) 当电阻 R_{SET} 出现断路故障时，恒流源输出电流变小；
- 3) 当电阻 R_{OUT} 出现断路故障时，恒流源输出电流变小；
- 4) 当电阻 R_{OUT} 出现短路故障时，恒流源输出电流变大。

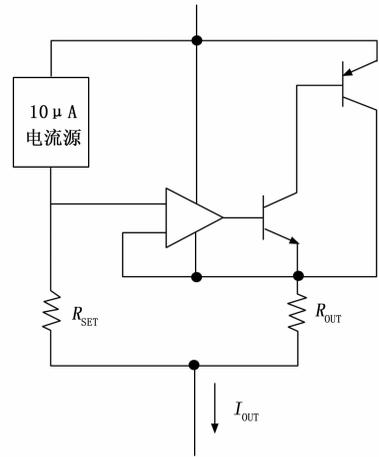


图 5 LT3092 芯片内部工作原理图

综上所述，设计采取如下安全性设计手段避免恒流源输出大于 10 mA ：

1) R_{SET} 设计为 2 个 $80\text{ k}\Omega$ 电阻并联，当其中一个电阻出现断路故障失效时， R_{SET} 由 $40\text{ k}\Omega$ 变为 $80\text{ k}\Omega$ ，此时恒流源输出由 4 mA 变为 8 mA ，仍然满足输出电流不能大于 10 mA 。

2) R_{OUT} 设计为 2 个 $50\ \Omega$ 电阻串联，当其中一个电阻出现短路故障失效时， R_{OUT} 由 $100\ \Omega$ 变为 $50\ \Omega$ ，此时恒流源输出由 4 mA 变为 8 mA ，仍然满足输出电流不能大于 10 mA 。

此外，设计一个恒流源输出检测电路。在执行小电阻测量流程之前先将继电器切入到恒流源输出检测电路，对电路上的采样点电压进行采样监测，将监测到的电压送到主控板的单片机 STM32F407IGT6 上，经过处理后送到上位机的软件界面进行显示，当电压出现异常时设备能够报警并驱动继电器断开不将故障的电流源接入被测的桥丝电阻。

2.1.4 恒压源发生电路硬件设计

恒压源发生电路采用线性电压基准源 JS3025，输出为 2.5 V ，该芯片具备良好的输出特性和噪声抑制功能，输入电压范围在 2.7 V 到 12.6 V 范围内，本系统恒压源输出电路采用供电单元提供的 5 V 供电，芯片具有稳定的线性度，通过外部电路器件匹配，能够实现高精度的电压输出。

出于系统安全性考虑,设计一个恒压源输出检测电路。在进行被测大电阻测量之前先控制继电器触点将恒压源输出接入该检测电路中,对恒压源输出的电压进行采样监测,将监测到的电压送到主控板的单片机 STM32F407IGT6 上,经过处理后送到上位机的软件界面进行显示,当监测到的恒压源输出电压出现异常时设备能够报警并驱动继电器断开不将故障的电压源接入被测的桥丝电阻。

2.1.5 电压采集单元硬件设计

电压采集单元主要实现对输入的电压量进行调理和模/数转换,将转换后的数字量传递给控制器单元。电压采集单元由前端调理单元和高精度 A/D 转换单元组成。

前端调理单元选用 JOP8552 型运算放大器,设计为跟随电路,实现对输入/输出阻抗的调理,该运放采用单 5 V 供电大大简化电路设计,运放的信噪比可达 140 dB,增益漂移可达 0.5 ppm/°C,因此具备极高的噪声抑制能力。

高精度 A/D 转换单元的核心为 ADS1259 型 ADC 芯片,该芯片为单 5 V 供电的 24 位高动态范围 $\Delta-\Sigma$ 型数据采集器,主控器通过 SPI 接口控制该 ADC 芯片实现模/数转换。影响 A/D 转换精度的因素主要包括 ADC 芯片内部噪声和外部地干扰。本设计选用的 ADS1259 型 ADC 芯片其内部偏移噪声低于 40 μ V,零位误差不大于 0.3 μ V,同时设计相应的滤波电路对噪声进行一定程度的抑制,有效保障高精度电压采集要求。ADS1259 型 ADC 芯片内部集成滤波器,对外部的共模干扰抑制能力可达 120 dB。同时,在电路设计上将电压量输入设置参考地为模拟地,内部电气信号参考地设置为数字地,数字地和模拟地在 ADC 芯片处通过磁珠单点接地,可以有效降低外部噪声干扰。

2.1.6 继电器驱动单元硬件设计

继电器驱动单元由主控器给出的控制信号直接接入达林顿阵列实现对继电器的驱动控制,继电器的驱动器件选用高性能达林顿阵列 FX2003。FX2003 内部自带反向二极管,在 FX2003 的 COM 端接入电源,可抑制继电器线圈在通断电过程中产生的反向电动势。

2.2 继电器阵列硬件设计

继电器阵列主要实现继电器的矩阵切换,由两块继电器板卡(继电器板卡和继电器扩展板卡)组成。继电器板卡放置 2 个继电器完成 1 路的大电阻测试,继电器扩展板卡放置 1 个继电器完成 1 路的小电阻测试。小电阻测试,固定电阻测试点接入,每一个测试回路由一个 6 刀继电器完成控制。大电阻测试,测试点为任选 2 点接入,每一个测试回路由 2 个 4 刀继电器完成控制。为了确保电阻测试的可靠性,测试前需对继电器触点状态进行回读自检。

2.3 供电电池组硬件设计

从安全性上考虑,根据实际要求,设备输出最大电流不能超过 10 mA,桥丝电阻测试仪的供电方式采用干电池组供电。

干电池组供电方式为并联 9 节标准 9 V 干电池实现。 $-30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围内,电池恒流放电至 5.5 V 的

话,供电电流 100 mA 时,容量约为 200 mAh。通过采用 9 节干电池并联的形式,能够保证设备连续工作不小于 2 小时。同时,设置开关控制供电电池组与供电单元之间的通断,在桥丝电阻测试仪不进行测试时关断开关,使供电电池组与供电单元处于断开状态,增加电池的待机时间。在开关断开情况下 9 V 干电池处于自放电状态,干电池处于自放电状态下需不小于 1 年时间完全释放完电池电量,考虑桥丝电阻测试仪在电池输出电压 5.5 V 以下便不能正常工作,因此确定干电池组的自放电待机时间为半年。此外,将电池输出电压 5.5 V 作为桥丝电阻测试仪工作的下限(即电池输出电压小于等于 5.5 V 时表示其电池电量为 0),通过对电池输出电压的实时监测,对电池电量状态设置指示灯进行显示(设置 4 个指示灯显示电量 100%、75%、50%和 25%),便于用户在电池电量低时及时进行更换。

出于系统安全性考虑,本系统对电池输出端电压进行采样监测。供电电池组电压经过精密电阻分压网络后进入处理器 ADC 采样端,处理器将电压值再传送到上位机上。为防止供电电池组电压串入电阻检测电路中,桥丝电阻测试仪不直接使用供电电池组的输出电压而是通过主控板的供电单元将其转换为桥丝电阻测试仪工作的内部供电。

2.4 硬件可靠性设计

1) 硬件热设计:

选用低功耗的器件,减少发热器件的数目,降低功耗;加大印制板的覆铜率,提高散热效率;各板卡上器件采用降额设计,减少发热,并选择传导、辐射散热方式,根据设备中各个器件的热耗情况,将热耗大的器件防止与 PCB 边缘,建立良好的散热通道,避免元器件热量积蓄影响其工作。

2) 硬件容差热设计:

允许元器件参数在其工作温度范围内存在一定范围的变化,避免元器件参数漂移导致设备电气性能下降;进行瞬态过应力保护设计,采用滤波网络,钳位保护电路,稳压二极管保护电路。

3) 硬件电磁兼容性设计:

采用铝合金设计机壳,机壳厚度为 5 mm,铝合金板卡整体铣成,并安装上盖板,设备外壳的连接处均采用支口搭接,同时缝隙均采用导电密封条填充,具有良好的密封性,选用导电性能好的 J599 型圆形电连接器,其外壳与机壳搭接良好,电缆全部采用屏蔽双绞线,确保其在全频段提供良好的电场屏蔽;在 PCB 板叠层的布局中,电源平面与其对应的地平面相邻,高速、时钟等关键信号设计有相邻的地平面,电源平面相对地平面向里内缩至少 20 H(H 为相邻电源层与地平面之间的介质厚度);为减小时钟电路的辐射发射,在晶体的下方铺铜,并通过很多过孔与地平面相连,保证与地平面有良好的电气连接,提供低的阻抗;设备内部各种电源均采取滤波措施,在电源和地之间加适当的滤波电容,可以提高因关断造成大的电流变化时电路

的抗噪声能力。

3 桥丝电阻测试仪软件设计

3.1 软件设计思路

桥丝电阻测试仪软件能够根据用户配置的测试流程信息，按顺序进行电阻测量。能够自动切换至合适的量程进行测试，并对测量值进行判读，上报测试结果和结论。桥丝电阻测试仪单片机软件与上位机软件之间以太网通讯协议选用 UDP，充分满足其实时性和传输速率要求的应用场景需求^[18]。

桥丝电阻测试仪软件具有如下功能：

1) 使用 UDP 单播协议，通过网络接口，接收上位机发送的配置用户自动流程指令、开始自检指令、获取自检结果指令、获取自检结论指令、开始测试指令、获取测试结果指令、获取测试结论指令；

2) 通过 SPI 接口，控制 ADS1259 芯片，进行电阻的 AD 采集，配置 AD 内置数字滤波；

3) 可以自动根据被测电阻值，切换至合适量程进行测量，使用该量程校准信息，校准被测电阻值，获取准确的被测电阻值。

4) 通过 UART 接口，控制 FPGA 进行继电器切换。

5) 将用户自动流程存储到单片机内置的 FLASH 内，每次上电使用最新用户自动流程。

6) 通过单片机内置 ADC 控制器，采集电流源、电压源和电池电压，并上报测试值和测试结论。

3.2 单片机软件设计

单片机软件使用 STM32F407IGT6 作为处理器，该芯片内核为 ARM Cortex-M3，运行主频 168 MHz，内置 192 kbyte SRAM、1 Mbyte FLASH、10 M/100 Mbps 自适应以太网接口、SPI 接口和 UART 接口等。

单片机软件使用 KEIL4.74 集成开发环境，支持软件编写、编译、在线仿真和软件加注等功能^[19]。

STM32F407IGT6 处理器通过 SPI 接口控制 ADS1259 采集电阻测量数据，通过 UART 接口控制 FPGA 进行测量通道继电器切换，通过单片机芯片内置 A/D 监测电压源、电流源和电池，通过网络接口接收上位机发送的指令，单片机软件连接框图，如图 6 所示。STM32F407IGT6 处理器内部移植一个轻量级 UDP 协议栈实现网络传输功能^[20]。

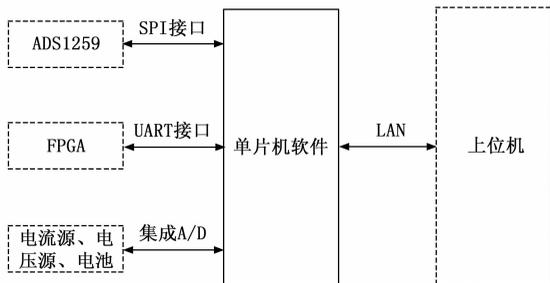


图 6 单片机软件连接框图

单片机软件能够根据用户配置的测试流程信息，按顺序进行电阻测试。能够自动切换至合适的量程进行测试，并对测量值进行判读，上报测试结果和结论，测试流程如图 7 所示，单片机软件具有如下功能：

1) 使用 UDP 单播协议，通过网络接口，接收上位机发送的配置用户自动流程指令、开始自检指令、获取自检结果指令、获取自检结论指令、开始测试指令、获取测试结果指令、获取测试结论指令。

2) 通过 SPI 接口，控制 ADS1259 芯片，进行电阻的 AD 采集，配置 AD 内置数字滤波每 100 ms 输出一次 AD 采集值，每次输出采集值由 100 ms 内的 1 440 次采集值进行滤波获取。

3) 可以自动根据被测电阻值，切换至合适量程进行测量。首先，使用大量程档位测量被测电阻；然后，根据被测电阻值大小，控制量程继电器切换至合适量程继续进行测量；最后，使用该量程校准信息，校准被测电阻值，获取准确的被测电阻值。自动测试电阻流程图，如图 7 所示。

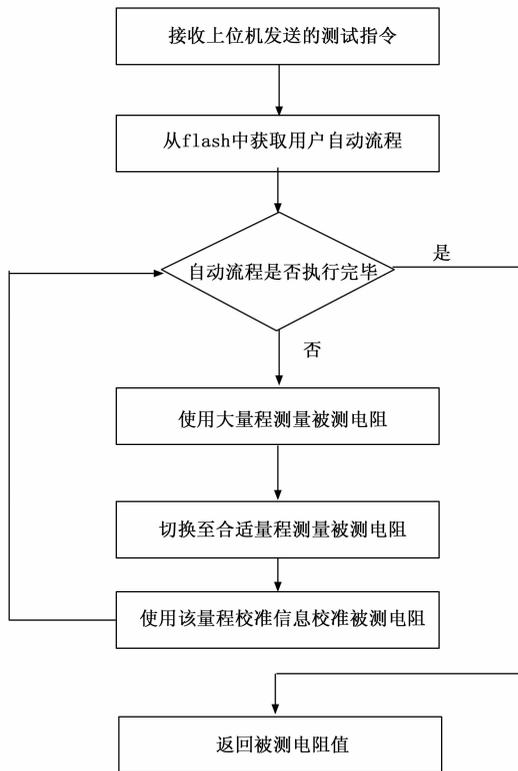


图 7 单片机软件测试流程

4) 通过 UART 接口，控制 FPGA 进行继电器切换。

5) 将用户自动流程存储到 ARM 内置的 FLASH 内，每次上电使用最新用户自动流程。

6) 通过 ARM 内置 AD，采集电流源、电压源和电池电压，并上报测试值和测试结论。

3.3 FPGA 软件设计

FPGA 软件使用 ISE10.1 集成开发环境，支持软件编

写、编译、在线仿真和软件加注功能。

FPGA 软件通过 UART 接口和单片机 STM32F407IGT6 进行交互, 单片机通过 UART 接口控制 FPGA 进行测量通道继电器切换, 通道切换完毕后 FPGA 将继电器回读状态反馈给单片机, FPGA 软件信号互联框图如图 8 所示。

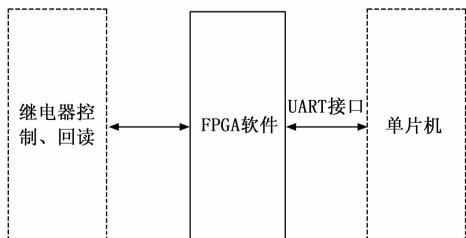


图 8 FPGA 软件信号互联框图

FPGA 软件能够根据单片机传递的信息, 按顺序进行通道继电器吸合或者关闭。能够将继电器回读状态反馈给单片机, 测试流程如图 9 所示。

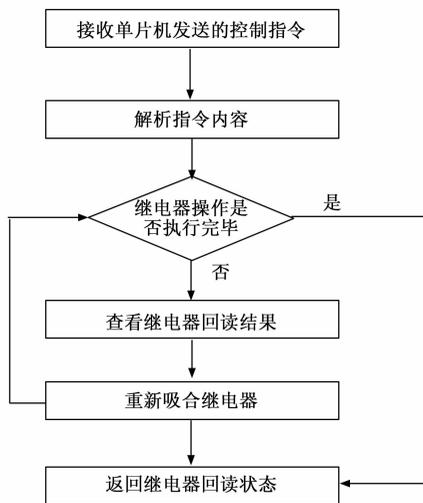


图 9 FPGA 测试流程

FPGA 软件具有如下功能:

- 1) 通过 UART 接口接收单片机指令, 控制通道继电器切换;
- 2) 将切换的继电器回读状态反馈给单片机。

3.4 上位机软件设计

Labwindows/CVI 和 LabVIEW 都是 NI 推出, 并且专门为测试、测量控制领域所打造的一款软件。其软件开发难度小, 图形化编程相对直观; 此外 LabVIEW 是 NI 主推的虚拟仪器软件开发平台, 更新速度及完善程度相对于 Labwindows/CVI 较高。LabVIEW 提供的工具包与 CVI 相比程度更加丰富, 而且可以自动实现多线程处理, 因此上位机软件选择 LabVIEW 作为软件开发平台。此外在多核技术下快速的发展的今天, 天生的并行编程模式, 将成为选择 Labview 进行软件开发的又一大优势。LabVIEW 软件开发平台基于 VISA 虚拟仪器软件架构 API, 集成了多种通用

标准指令集, 包括数据通讯、信息显示、分析以及存储等^[21]。

LabVIEW 广泛应用自动化测试测量和遥测遥控等领域, 其具备大量丰富的图形控件, 可以大大简化程序的开发工作, 工程师可以快速基于 PC 机的多种标准程控接口完成上位机软件的开发。综上所述, 桥丝电阻测试仪选用 LabVIEW 作为上位机软件开发环境。

通过对需求的整理, 桥丝电阻测试软件与桥丝电阻测试校准软件均采用模块化设计思想, 软件采用三层设计结构。桥丝电阻测试校准软件在桥丝电阻测试软件的基础上, 扩展了丰富了程控仪器的功能, 各层次划分如图 10 所示。

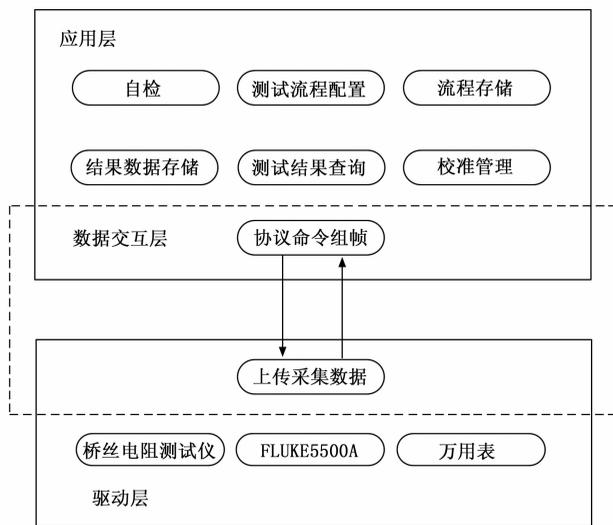


图 10 桥丝电阻测试校准软件层次结构图

1) 应用层: 应用层是提供给用户的人机交互界面。一方面在设计过程中充分利用人机工程增强用户体验; 另一方面充分结合 NI 一直所倡导的软件界面布局结构以及软件架构进行设计。充分考虑软件界面的友好性、实用性和易操作的特点。给予用户直观的设计感。该层作为整个软件结构的顶层是人机交互的入口, 同时也作为软件框架实现对各个功能模块间的调用。

2) 数据交互层: 该层介于应用层和驱动层之间, 是应用层与驱动层连接的媒介。该层主要完成控制命令的组帧下传和上传采集数据。该层设计的主要目的是将底层程序封装与顶层程序框架适配。

3) 驱动层: 驱动层程序将 UDP 套接字和仪表驱动函数进行封装与硬件设备直接交互。该层是桥丝电阻测试仪软件的基础, 同时也是保证软件正常工作的重要组成部分。驱动层针对桥丝电阻测试仪通讯协议的特点, 定制专门的通讯函数库。函数库依据应答协议开发, 便于后续开发调用。

桥丝电阻测试仪软件涵盖了桥丝电阻测试协议中的全部测试功能; 分别为桥丝电阻测试、自检测试、校准测试、

校准值管理和流程配置, 图 11 为软件主程序流程框图, 点击软件界面按键进入相应功能程序分支。

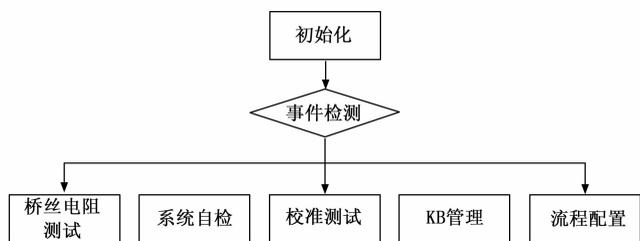


图 11 主程序流程框图

测试列表列举了测试节点、结果数据和阈值范围等信息。用户选择测试序列, 然后点击开始测试按钮, 使桥丝电阻测试仪执行测试。测试结束后, 用户可点击结果保存按钮, 保存当前测试数据或通过数据报表输出导出 Excel 文件。

当用户在主界面选择校准测试后, 程序切换到校准测试界面, 设备校准采用 FLUKE5500A 标准仪器模拟待测电阻。软件下方按键依次为通讯端口选择、5 500 A 打开、电阻选择列表、线阻输入框、测试开始、停止、结果保存、校准者管理和退出测试。在开始校准测试前, 首先选择 5 500 A 通讯端口, 然后点击 5 500 A 打开; 建立与 5 500 A 之间的通讯连接。选择电阻测试类型并输入线阻值, 点击测试开始按钮即可开始自动校准测试。

桥丝电阻测试仪软件不仅支持数据库的查询, 并且还具备了数据导出, 报表生成以及打印报表的功能。在测试结束后, 用户可通过点击 KB 管理按钮, 进入校准值管理界面, 查看新生成的校准值, 对仪器进行校准。

4 实验结果与分析

在电阻测量过程中, 测量值会含有系统误差和随机误差, 主要包括恒流源发生电路输出误差、恒压源发生电路输出误差、继电器导通电阻误差、运放的零位漂移误差和 A/D 转换电路误差。本设计硬件上选用噪声低、温漂低、噪声抑制能力高的核心元器件和通过合理的量程切换设计降低测量误差的影响, 同时通过单片机进行多次测量取平均值和分段设置校准参数的方式来降低随机误差。利用 FLUKE5500A 设置 $[0, 20 \Omega]$ 间隔 0.1Ω 输出、 $[20, 50 \Omega]$ 间隔 1Ω 输出、 $[50, 500 \Omega]$ 间隔 10Ω 输出、 $[600, 1000 \Omega]$ 间隔 100Ω 输出、 $[1 \text{ k}\Omega, 10 \text{ k}\Omega]$ 间隔 $1 \text{ k}\Omega$ 输出、 $[10 \text{ k}\Omega, 100 \text{ k}\Omega]$ 间隔 $10 \text{ k}\Omega$ 输出、 $[100 \text{ k}\Omega, 3 \text{ M}\Omega]$ 间隔 $100 \text{ k}\Omega$ 输出、 $[3 \text{ M}\Omega, 30 \text{ M}\Omega]$ 间隔 $1 \text{ M}\Omega$ 输出和 $[30 \text{ M}\Omega, 100 \text{ M}\Omega]$ 间隔 $10 \text{ M}\Omega$ 输出, 然后根据桥丝电阻测试仪测量得到的电阻值与输出基准电阻按照设定的 9 个分段区间采用最小二乘法的方式获取 9 个分段区间的校准参数, 将校准数据存入主控板单片机内部的 FLASH。

采用 1Ω 、 10Ω 、 100Ω 、 $1 \text{ k}\Omega$ 、 $10 \text{ k}\Omega$ 、 $100 \text{ k}\Omega$ 、

$1 \text{ M}\Omega$ 、 $10 \text{ M}\Omega$ 和 $30 \text{ M}\Omega$ 精密电阻进行测量精度验证, 每个电阻测量是 10 次, 取误差最大一次的测量值, 记录测量结果如表 1 所示, 小电阻测量误差绝对值小于 0.5% , 大电阻测量误差绝对值小于 1% , 具备较高测量精度。

表 1 测试验证数据表

序号	标准电阻值	测量电阻值	测量误差绝对值/%
1	1Ω	0.996Ω	0.4
2	10Ω	9.96Ω	0.4
3	100Ω	99.68Ω	0.32
4	$1 \text{ k}\Omega$	$1.004 \text{ k}\Omega$	0.4
5	$10 \text{ k}\Omega$	$10.06 \text{ k}\Omega$	0.6
6	$100 \text{ k}\Omega$	$100.6 \text{ k}\Omega$	0.6
7	$1 \text{ M}\Omega$	$1.006 2 \text{ M}\Omega$	0.62
8	$10 \text{ M}\Omega$	$10.064 \text{ M}\Omega$	0.64
9	$30 \text{ M}\Omega$	$30.204 \text{ M}\Omega$	0.68

5 结束语

本文设计的桥丝电阻测试仪, 通过使用四线制测量小电阻和使用二线制测量大电阻, 完成了设备的硬件和软件设计, 通过采取合理的校准方法提高设备的测量精度, 通过选取典型电阻值进行测量验证, 证明设计具备较高测量精度, 可以实现测试量程的自动切换, 完成对桥丝电阻阻值的自动化测量, 满足火工品桥丝电阻测量误差绝对值小于 0.5% 和绝缘电阻测量误差绝对值小于 1% 的要求。

参考文献:

- [1] 陈恒智, 程天然, 周 垚, 等. 航天器火工品阻值测试覆盖性探讨 [J]. 导航与控制, 2021, 20 (2): 87-94.
- [2] 张 蕊, 赵成森, 林 娜, 等. 国内外标准中火工品设计与检验要求 [J]. 航天标准化, 2021, 186 (4): 21-26.
- [3] 罗 婧, 吴 健, 贺 阳, 等. 火工品绝缘电阻装配过程中的影响因素研究 [J]. 新技术新工艺, 2018 (3): 73-76.
- [4] 雷峰成, 程 鹏, 邵云峰. 可配置高精度火工装置测试仪的设计与实现 [J]. 现代防御技术, 2017, 45 (3): 167-171.
- [5] 魏光辉, 国海广, 孙永卫. 电火工品静电安全性评价方法研究 [J]. 火工品, 2005 (2): 21-24.
- [6] 封青梅, 赵 团, 李锦荣. 电火工系统抗辐射模拟试验标准分析研究 [J]. 国防技术基础, 2006 (8): 3-7, 12.
- [7] 陈 乐, 黄少波. 电火工品电阻精密测试方法研究 [J]. 航空兵器, 2013 (2): 46-49.
- [8] 尹 波, 张奇峰, 李卫军, 等. 火工品电阻测量仪器的发展趋势 [J]. 兵工自动化, 2009, 28 (4): 88-90.
- [9] 尹 波, 刘明南, 陈伟波, 等. 火工品用智能低电阻测量仪的设计 [J]. 火工品, 2011 (1): 17-19.
- [10] 杨志群. 导弹火工品通用防爆测试仪的设计与应用 [J]. 兵工自动化, 2014, 33 (6): 80-82.
- [11] 李双明, 戴邵武, 史贤俊, 等. 基于 ARM 和 Windows CE 的火工品自动测试仪设计与实现 [J]. 船电技术, 2011, 31 (5): 40-44.

- [12] 尚国庆, 陈机林, 侯远龙, 等. 一种高精度电缆绝缘电阻测量电路 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (5): 120-123.
- [13] 刘洪政, 石 瑞, 胡 洲, 等. 一种分布式火工品等效器的设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2022, 41 (6): 117-123.
- [14] 段亚博, 韩 旭, 关 莹, 等. 一种软硬件结合确保火工品测试安全的方法 [J]. 兵工自动化, 2023, 42 (6): 27-29.
- [15] GERT RIETVELD, JAN H. N. van der Beek. Automated high-ohmic resistance bridge with voltage and current null detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (6): 1760-1765.
- [16] 张莉莉, 吴永红, 张月魁, 等. 火工品电参数测试技术研究 [J]. 宇航计测技术, 2018, 38 (6): 87-90.
- [17] 黄少波, 沈 欣, 李秋菊. 空空导弹发动机点火系统安全性设计 [J]. 航空兵器, 2008 (1): 26-30.
- [18] JESSICA A. WISNIEWSKI, JULIAN I. Rood. The tcp conjugation system of clostridium perfringens [J]. Plasmid, 2017, 91 (1): 28-36.
- [19] 吕向锋, 高洪林, 马 亮, 等. 基于 LabVIEW 串口通信的研究 [J]. 国外电子测量技术, 2009, 28 (12): 27-30.
- [20] TSUYOSHI NAKAJIMA, YUZO BESSHO, HIROSHI YAMANAKA, et al. Automatic testing of embedded software based on state-transition requirement specifications [J]. Electronics and Communications in Japan, 2003, 86 (9): 64-75.
- [21] OLARU ADRIAN, OLARU SERBAN. Virtual LabVIEW TM instrumentation for simulation and optimisation of the robot dynamic behavior [J]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2017, 6 (3): 170-177.
- [9] DATASHVILI L, BAIER H. Precision deployable shell-membrane antenna reflector for space applications [C] // Proc. of the 59th International Astronautical Congress, 2008.
- [10] ARENBERG J, GILMAN L, ABBRUZZE N, et al. The JWST backplane stability test article a critical technology demonstration [C] // Proc. of SPIE, 2006: 181-192.
- [11] 蒋山平, 黄 海, 张鹏嵩, 等. 真空低温太阳辐照环境下的天线热变形测量技术 [J]. 航天器环境工程, 2022, 39 (3): 268-273.
- [12] 许 杰, 蒋山平, 杨林华, 等. 卫星结构件常压热变形的数字摄影测量 [J]. 光学精密工程, 2012, 20 (12): 2668-2673.
- [13] 王 波, 王朋朋, 姚永田, 等. 一种伞状天线反射器型面热变形测量及分析模型在轨预示 [J]. 航天器环境工程, 2020, 37 (3): 269-274.
- [14] 王 帅, 阴玉梅, 杨晓霞, 等. 直流电机力促动器的控制系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28 (1): 48-55.
- [15] 李威钢, 燕必希, 董明利, 等. PTC 摄影测量控制系统设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2016, 39 (6): 111-116.
- [16] 李振伟, 刘泽元, 刘 畅, 等. 基于 MEMS 的航天器表面新型测温传感器设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (6): 281-284.
- [17] 李国玉, 石 波, 吴 玮, 等. 室内定轨移动摄影测量控制系统设计与实现 [J]. 测绘科学, 2011, 36 (3): 197-206.
- [18] 张鹏嵩, 蒋山平, 杨林华, 等. 某数字摄影测量系统精度量化评估方法 [J]. 航天器环境工程, 2015, 32 (6): 648-651.
- [19] 张博伦. 摄影测量系统的精度确定方法 [P]. 中国: 201610321818.2, 2019-02-19.
- [20] 万小平, 于新战. 某上星因面反射器热变形测试分析与模型修正 [J]. 航天器环境工程, 2016, 33 (6): 672-675.

(上接第 327 页)

5 结束语

本文针对大型航天器结构热稳定性试验需求, 基于光学摄影变形测量技术, 创新性提出了多摄站组网并行测量系统架构, 设计了测量场快速构建机电装置, 开发了系统装置自动化控制装置及软件, 研制了真空低温环境下瞬态热变形测试系统, 对系统测量精度分析及验证试验方法开展了研究, 验证试验表明系统在真空低温环境条件下运行稳定, 满足 90 s 典型测量周期的瞬态变形测量需求, 测量精度优于 $28 \mu\text{m}/4 \text{ m}$, 为航天器结构热稳定性设计的验证提供了重要的数据依据。此外, 该系统还可应用于其他复杂环境条件下大型结构的多模式瞬态变形测量试验。

参考文献:

- [1] 申 旭, 马开锋, 黄桂平, 等. 卫星天线高低温热变形测量技术综述 [J]. 航天器环境工程, 2022, 39 (3): 306-315.
- [2] 苑 云. 大型结构变形的组网摄像测量方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [3] 薛 武, 张永生, 戴晨光, 等. 无人直升机摄影测量系统的设计与验证 [J]. 测绘通报, 2017, (4): 58-63.
- [4] 柏宏武, 王 勇, 黄桂平, 等. 一种卫星天线真空热变形测量方法 [J]. 空间电子技术, 2016, 13 (3): 20-25.
- [5] 王伟峰. 数字近景工业摄影测量系统校准方法研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [6] BEHARA R, SRIRANGA T S, VARGHESE C S, et al. Thermo elastic deformation measurements on spacecraft components using non contact target-less image based technique [C] // 8th International Symposium on NDT in Aerospace, 2016.
- [7] SILVESTRE O. A fully integrated alignment process [C] // ESTEC. 1st ESA Space Systems Design, Verification & AIT Workshop, 2002.
- [8] ROLO L F, PAQUAY M H, DADDATO R J, et al. Terahertz antenna technology and verification: herschel and planck: a re-