

doi: 10.7690/bgzdh.2023.09.014

国产化便携式电阻测试仪

曾 熠¹, 朱玉玉¹, 江 蔚²

(1. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621000;

2. 陆军装备部驻重庆地区军事代表局驻重庆地区第四军事代表室, 重庆 400060)

摘要: 针对传统电阻测试仪存在的问题, 设计一款国产化小型加固电阻测试仪。通过上位机网络及串口控制完成电阻测量功能, 能测量 $10\text{ m}\Omega\sim 100\ \Omega$ 的电阻, 测量误差小于 1%, 可同时完成 32 路电阻检测及上电自检功能, 具有高精度、高效率、操作简便、便携性好以及自主可控程度高等优点。结果表明: 该设备能满足高低温、振动、冲击、湿热、电磁兼容的相关要求, 可广泛应用于现场及远程测量等场景。

关键词: 电阻测量; 小型化; 国产化; 加固设备

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A

Domestic Portable Resistance Tester

Zeng Yi¹, Zhu Yuyu¹, Jiang Wei²

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China;

2. No. 4 Military Representative Office in Chongqing District, Military Representative Bureau of Army Equipment Department in Chongqing District, Chongqing 400060, China)

Abstract: Aiming at the problems existing in the traditional resistance tester, a domestic small reinforced resistance tester is designed. The resistance measurement function is completed through the host computer network and serial port control, the resistance from $10\text{ m}\Omega$ to $100\ \Omega$ can be measured, the measurement error is less than 1%, and the 32-channel resistance detection and power-on self-test functions can be completed at the same time, so that the device has the advantages of high precision, high efficiency, simple operation, good portability, high autonomous controllability and the like. The results show that the equipment can meet the requirements of high and low temperature, vibration, shock, humidity and electromagnetic compatibility, and can be widely used in field and remote measurement scenarios.

Keywords: resistance measurement; miniaturization; localization; reinforced equipment

0 引言

对于电阻的检测, 目前行业内所采用的传统电阻测试仪还存在着测试效率低下、人机交互功能弱、便携程度低、抗恶劣环境弱等问题^[1], 多选用国外厂家电阻测试仪。国内厂家生产的电阻测试仪, 其国产化程度也不高。随着贸易战加剧以及国外对我国进行技术封锁, 电阻测试仪面临着技术“卡脖子”问题^[2-3]。高铁、电网、航空航天以及舰船等领域对电阻测试有着高精度、高效率、操作简便、便携性高、适应恶劣环境以及自主可控等要求^[4-5]。笔者设计一款集合上述功能的电阻测试仪, 经测试, 已达到技术要求。

1 总体方案设计

本文中整机采用模块化设计, 主要由金属壳体、主控板、继电器板及连接器组成。选用中电 58 所的 MCU 芯片 CS32F103 作为主控芯片, 通过 SPI 总线扩展出 1 路百兆以太网, 通过 UART 接口扩展

出 1 路 422 接口, 实现与上位机的通信功能, 百兆以太网及 422 串口为冗余设计, 可实现与不同上位机对接, 增加本电阻测试仪的应用范围。MCU 通过 UART 接口对 CPLD 芯片 SM2C256 进行控制, 并通过 CPLD 扩展出 GPIO 对继电器阵列进行控制, 实现多路电阻的测量功能。电阻测量采用开尔文四线法, 通过恒流源及 AD 采集电路对电阻进行测量^[6-8]。原理如图 1 所示。

2 功能设计

2.1 电阻测量功能设计

电阻检测电路由恒流源、电压采集电路、开关切换电路(继电器矩阵)组成, 其中 $10\text{ m}\Omega\sim 100\ \Omega$ 导通电阻测量采用恒流源测试, 经伏安法可以得出: 电阻 $R_L = \text{采集电压 } UL / I$ 。原理如图 2 所示。

2.1.1 恒流源设计

采用直流恒流源测量电阻阻值的方式可参考开尔文四线法, 即将恒定电流引至被测电阻, 再通过

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-15

作者简介: 曾 熠(1991—), 男, 四川人。

AD 采集被测电阻两端的电压差值，便可计算出被测电阻的阻值。这种方法实现简单，成本较低，当电阻发热量及热噪声不影响测量精度要求时，可选用直流恒流源进行测量。本文中导通电阻测量即采

用该方法。笔者设计的电流源中电压基准源采用中电 24 所 SW584 精密可编程输出电压基准源，具有输出电压精度高、噪声低、受温度影响较小的特点。跟随运放选用国内航天 771 所 LF2177。

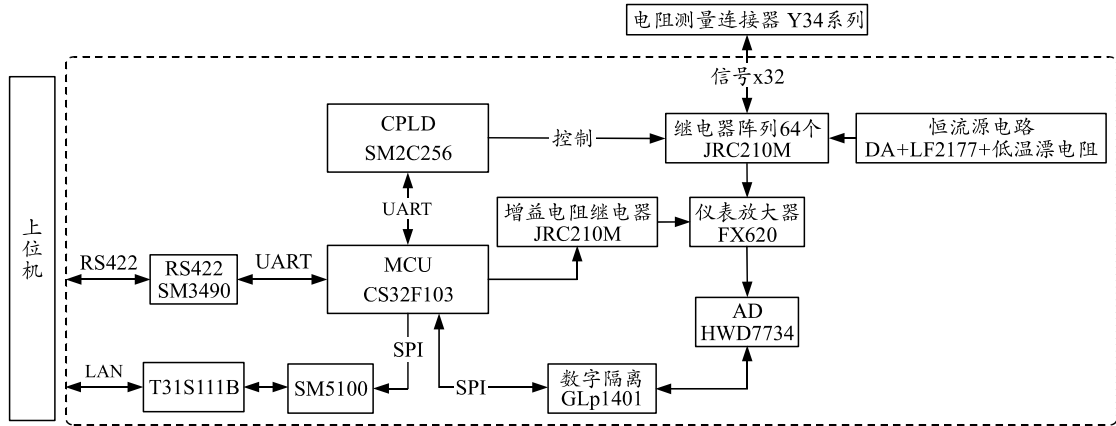


图 1 电阻测量仪原理

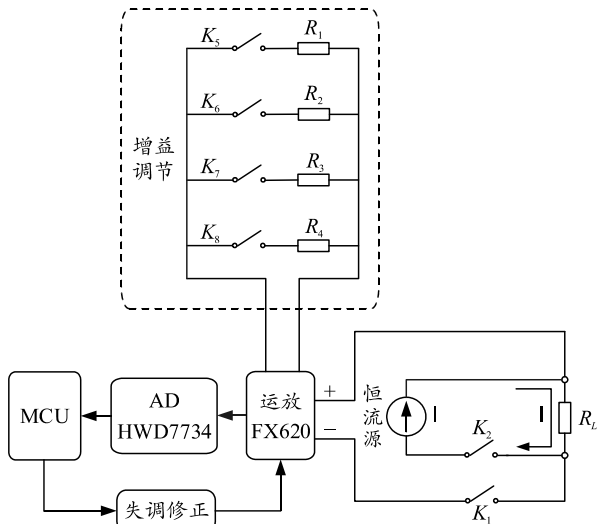


图 2 电阻测试原理

2.1.2 电压采集电路设计

增益调节电路采用仪表运算放大器，选用振华风光的高精度差分仪表放大器 FX620，能够完全替代 ADI 公司的 AD620。它具有高精度、低失调电压和偏移、低噪声等特点，其放大倍数为 1~10 000，可通过反馈电阻设置增益；ADC 选择 $\Sigma-\Delta$ 型 24 bit 国产高精度模数转换器 HWD7734，兼容 ADI 公司 AD7734/AD7732，可设置单极性或双极性输入，输入范围 0~10 V 和 ± 10 V。

本文中电阻测试设计 4 段量程，分别为 10~100 m Ω 、100 m Ω ~1 Ω 、1~10 Ω 、10~100 Ω ，通过继电器控制 FX620 的增益电阻，实现运放增益可调，从而实现 4 档测量。软件自动判断被测电阻大小，切换至对应档位进行测量，详细如表 1 所示。

表 1 电阻档位分配

量程	电流源/mA	运放增益	采集电压值/V
10~100 m Ω	10	5 000	0.5~5.0
100 m Ω ~1 Ω	10	500	0.5~5.0
1~10 Ω	10	50	0.5~5.0
10~100 Ω	10	5	0.5~5.0

为达到电阻测量范围 10 m Ω ~100 Ω 和 1%精度，每个量程折合为 ADC 电压采集的最小分辨电压为 ± 5 mV，即设计的电路噪声、误差、漂移等非线性因素均应该低于 ± 5 mV。

2.1.3 多路电阻测试设计

继电器选通阵列切换电路主要完成被测电阻之间的相互切换，实现测量通道选择的功能，共使用 68 个继电器 (4+32+32) 共 32 个输入点，可实现任意输入点间的导通电阻测试。原理如图 3 所示。

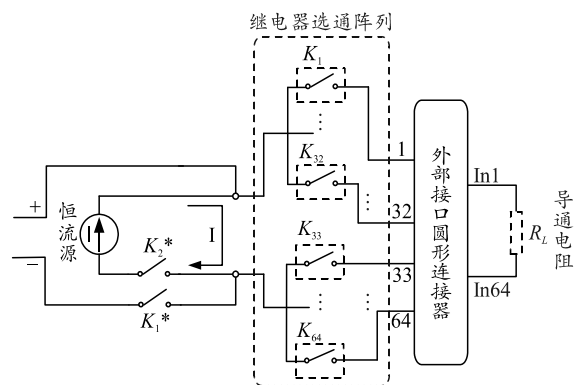


图 3 多路电阻测试

2.2 上位机通信功能设计

MCU 负责读取 AD 芯片的采集数据，并将数据通过 RS422 或者网络接口返回上位机。MCU 选择

中电 58 所的 CS32F103C8，具备 32 路 GPIO，2 路 SPI 与 2 路 UART。网络芯片选用国微 10/100M 的 SM5100，通过 SPI 与 MCU 通信。将 CS32F103 的一路 UART 信号通过国微的 SM3490 串口收发器转换为 RS422 信号，与上位机进行通信。

2.3 自检功能设计

在测试电阻的 AD 采集端增加 1 路自检通道，电阻测试端增加 1 个高精度低温漂的 $1\ \Omega$ 电阻。图 4 中 K_3 为设备自检切换开关，当点击设备面板“自检”时，自检切换开关 K_3 闭合，设备进行内部通道自检，计算 R_x 阻值大小，通过软件将 R_x 的阻值与预设值进行对比，若超过一定误差范围则判断设备自检失败，反之为自检成功。设备如果出现自检失败则需返厂进行维修或校准，如图 4 所示。

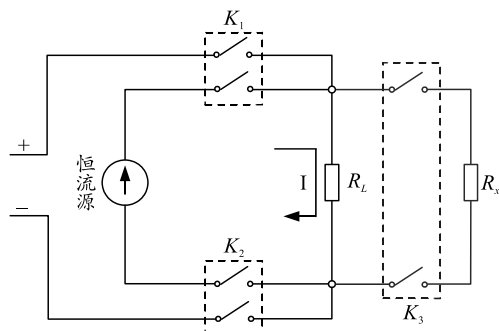


图 4 自检原理

3 软件设计

电阻测量仪软件主要是通过网络或 RS422 串口接收上位机的测试命令，控制继电器选通及 AD 数据采集，并将采集结果回传给上位机。涉及的软件主要有串口控制软件、SPI 接口软件（控制 AD 采集、网络通信），这 2 种软件都调用 CS32F103 的标准库操作。网络 SM5100 芯片集成了网络通信的 TCP/IP 协议，因此单片机软件不需要进行以太网的相关控制，只需通过 SPI 接口进行简单的端口编程。

4 结构设计

电阻测量仪结构上由壳体、盖子及内部 2 个功能电路板组成，设备顶部为开关、电源输入、通信接口以及电阻测量接口。壳体由镁铝合金铣制，具备轻量化及抗振动冲击的优点。内部控制电路采用低功耗单片，使用导热散热方式，整体结构简单。壳体四周及航插连接器处均设计有导电及防水密封胶条，具备良好的密封性及电磁兼容特性，能够较好地适应恶劣环境，可应用于车载、舰船及户外等场景，结构如图 5 所示。

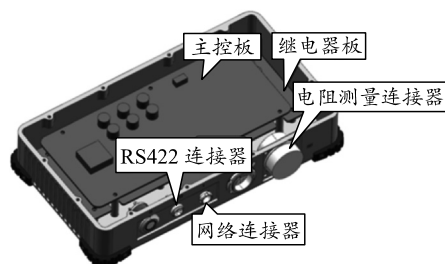


图 5 电阻测试仪结构

5 测试结果及优化

5.1 测试结果

采用校准标定后的高精度电阻箱对电阻测试仪进行测试检测。分别对 4 个档位进行检测，每档选取 20 个点进行测试，取该量程误差最大值作为该量程的测试精度，具体如表 2 所示。

表 2 电阻测试仪测量结果

序号	量程/m Ω	测试精度/%
1	10~100	0.89
2	100~1 000	0.85
3	1 000~10 000	0.91
4	10 000~100 000	0.82

由上表可知，笔者设计的电阻测试仪满足精度 1% 的要求。

5.2 结果优化

为进一步提升测量精度，笔者拟采用线性拟合的方式，对测量过程中存在的非线性误差进行一定程度的消除。线性拟合是曲线拟合的一种形式。

最小二乘法是最常用的线性拟合法，通过最小化误差的平方和来寻找数据的最佳函数匹配。最小二乘法的目的是找到因变量 y 与自变量 x 之间的函数关系 $y=f(x)$ 。对于笔者讨论的问题，可以将点的横坐标看作自变量，将纵坐标看作因变量。然后使用一般最小二乘法找到自变量和因变量之间的函数关系，由这个函数关系可以确定一条直线，这就是拟合出来的直线。最小二乘法的目标是使误差的平方和最小^[9-10]。

假设给出的若干点的坐标为： (x_1, y_1) ， (x_2, y_2) ， (x_n, y_n) 。定义纵坐标 y 的误差 ε_i 为真值与观测值之差，定义 y 的残差 $\hat{\varepsilon}_i$ 为估计值与观测值的差，公式如下：

$$\varepsilon_i = y_i - y_i^* \quad (1)$$

$$\hat{\varepsilon}_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2)$$

一般最小二乘法的目的是使拟合误差（残差和）最小，也就是 $\min \sum \hat{\varepsilon}_i$ ，所以目标函数的形式如下：

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \frac{1}{2} (\hat{y} - y)^T (\hat{y} - y) \quad (3)$$

式中： $\hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$ ； $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。

最小二乘法就是找到一组直线的参数，使得目标函数最小。

直线方程使用斜截式直线方程： $y=kx+c$ ，所以要求解的直线参数为斜率 k 和截距 c 。有：

$$\hat{y}_i = \hat{k}x + \hat{c} \quad (4)$$

写成矩阵形式为：

$$\hat{y}_i = X\theta \quad (5)$$

将其代入目标函数 J_1 得：

$$J_1 = (X\theta - y)^T (X\theta - y) / 2 \quad (6)$$

目标函数对 θ 求导，并令其等于零，得：

$$\frac{\partial}{\partial \theta} J_1 = X^T (X\theta - y) = 0 \quad (7)$$

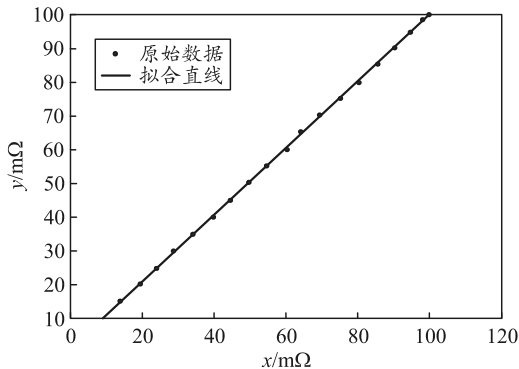
解得：

$$\theta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (8)$$

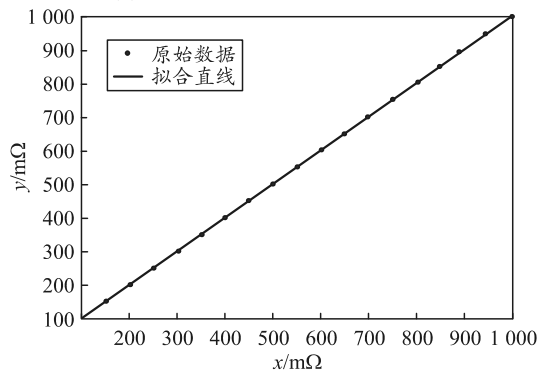
即：

$$[\hat{k} \ \hat{c}] = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (9)$$

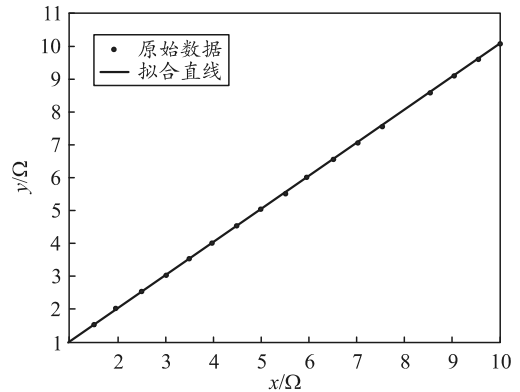
通过 Matlab 的 polyfit 函数，对电阻的测量值分 4 档进行线性拟合，每档选取量程中 20 个点进行拟合。线性拟合后将参数带入测量程序，进行测量，进一步提高测量精度。拟合结果如图 6 所示。



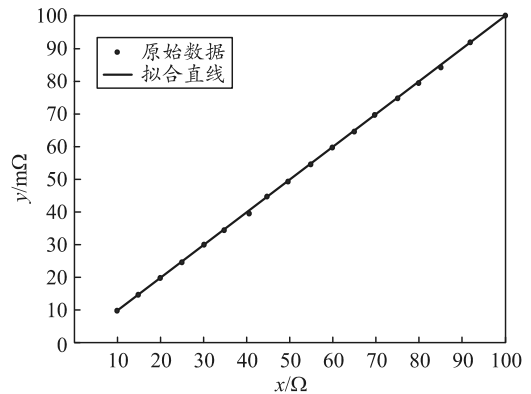
(a) 10~100 mΩ电阻线性拟合



(b) 100~1000 mΩ电阻线性拟合



(c) 1~10 Ω电阻线性拟合



(d) 10~100 Ω电阻线性拟合

图 6 4 档电阻测量结果线性拟合

通过拟合直线可得到该直线的 k 值及 c 值，具体参数如表 3 所示。

表 3 各量程线性拟合直线的 k 值及 c 值

序号	量程/mΩ	k 值	c 值
1	10~100	0.983 01	0.902 09
2	100~1 000	0.999 84	0.180 05
3	1 000~10 000	1.003 13	-0.014 71
4	10 000~100 000	1.004 05	-0.037 94

将其应用于电阻测量值修正中，得到拟合后的测量值如表 4 所示。

表 4 电阻测试仪测量结果

序号	量程/mΩ	测试精度/%
1	10~100	0.73
2	100~1 000	0.67
3	1 000~10 000	0.81
4	10 000~100 000	0.69

由上表可知，进行线性拟合后，全量程的最大误差为 0.81%，测试精度得到一定程度的提升，且满足电阻测量误差不大于 1% 的要求。

6 结束语

笔者完成了国产化小型便携加固电阻测试仪的研究与设计，该设备采用镁铝合金结构，实现了 32 路 10 mΩ~100 Ω 电阻测量功能，测试精度小于 1%，

并通过线性拟合的方式进一步提高了测试精度。该设备可通过以太网及 RS422 串口与上位机通信,实现电阻测量仪的远程操控,是一款高精度、高效率、操作简便、便携性高、适应恶劣环境以及自主可控程度高的电阻测量仪,可广泛应用于车载、舰船及户外等场景。

参考文献:

- [1] 刘强,李子森,张元军,等.一种电缆检测仪的设计[J].新技术新工艺,2019(9):78-80.
- [2] 葛威,林志文.新型便携式测试诊断设备设计[J].信息化研究,2017,43(5):62-67.
- [3] 张文艳,雷军刚,李云鹏,等.一种高稳定正弦载波产生电路的设计与研究[J].空间电子技术,2022,19(1):68-74.
- [4] 黄胜坡,张洪月,牛胜锁.一种新型动车组用手持式线

(上接第30页)

由以上试验结果可以看出,在未采用误差修正值 W 对车载雷达进行标定的情况下,车载雷达侦察 2~3 km 目标的误差值约为 11 mil(水平阵地)、14 mil(5°斜坡阵地);在采用误差修正值 W 对车载雷达进行标定的情况下,车载雷达侦察 2~3 km 目标的误差值约为 0.8 mil(水平阵地)、1.2 mil(5°斜坡阵地);采用笔者所述的误差修正方法,极大地提高了雷达侦察精度。

6 结论

笔者首先针对车载雷达侦察误差进行分析,确定了影响雷达精度的 2 个因素,设计了转角接口盒设备对雷达调平误差进行测量,提出一种简易方法实现雷达标定误差修正。笔者所使用的误差修正方法适用于所有车内带有定位定向设备的车载雷达系统,实现了车载雷达智能化自动标定。

参考文献:

- [1] 董云龙,何友,王国宏.一种新的雷达组网实时误差配

缆自动导通测试方法和装置[J].电工文摘,2017(6):26-28,31.

- [5] 马永利.小电阻测试仪校准系统建立及不确定度评定[J].计量与测试技术,2018,45(9):112-113.
 - [6] 张朵.基于四线测量法的便携式智能直流微电阻测试仪的研究与设计[D].苏州:苏州大学,2016.
 - [7] 王菲.新型便携式线缆导通检测仪[J].航天标准化,2019(1):41-43,46.
 - [8] 秦友伦.一种国产化多接口便携式测试设备[J].兵工自动化,2023,42(2):42-45.
 - [9] 梁旭铭.基于 LXI 的热电偶采集系统软件设计与实现[D].成都:电子科技大学,2022.
 - [10] 孙梦翔.粗大误差产生的原因及其危害[C]//中国计量协会冶金分会冶炼传感器专业委员会 2013 年年会及技术交流论文集.中国计量协会冶金分会冶炼传感器专业委员会,2013:142-143.
- *****
- 准算法[J].南京航空航天大学学报,2005,37(5):330-334.
 - [2] 张殿程,江晶,陆泳舟.两坐标与三坐标雷达配准方法及应用分析[J].空军雷达学院学报,2009,26(6):391-395.
 - [3] 秦晓珊,张峰,万华,等.雷达探测数据野值剔除方法[J].兵工自动化,2022,41(1):25-29.
 - [4] 杜国祥,刘洋,朱磊,等.某型装备搜索雷达天线伺服系统检测诊断系统[J].兵工自动化,2022,41(5):9-14.
 - [5] 李伟,朱卫纲,朱霸坤,等.基于转换脉冲神经网络的雷达辐射源识别方法[J].兵工自动化,2022,41(7):8-11.
 - [6] 冯仪,陈伯金.车载雷达机电式自动调平控制系统[J].华中科技大学学报,2004,17(6):90-103.
 - [7] 楼禹锡.雷达精度分析[M].北京:国防工业出版社,1979:102-106.
 - [8] 曹长虹.机动雷达标定方法的研究[J].电子机械工程,2006,22(6):61-63.
 - [9] 吴冰,秦昆.一种快速实用方位标校方法及轴角变换系统[J].现代雷达,2003,12(9):36-37,41.