

高精度线材测试仪的硬件电路优化设计研究

梁冲聪

东莞市鼎立电子科技有限公司, 广东 东莞 523000

DOI: 10.61369/TACS.2025090028

摘要： 线材作为电子与工业领域的关键连接部件，其质量直接关系到系统稳定性，高精度线材测试仪是保障线材质量的核心设备。当前该类测试仪硬件电路存在测量精度不足、测试速度缓慢、运行稳定性欠佳等问题。本文先剖析测试仪硬件电路现状，包括硬件构成单元及现存的精度、速度、稳定性问题，为后续优化设计提供依据，旨在为提升测试仪性能、推动相关行业质量管控升级提供理论支撑。

关键词： 高精度线材测试仪；硬件电路；优化设计；测量精度；运行稳定性

Research on the Optimal Design of Hardware Circuits for High-Precision Wire Tester

Liang Chongcong

Dongguan Dingli Electronic Technology Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523000

Abstract： As a key connecting component in the electronic and industrial fields, the quality of wires is directly related to system stability. The high-precision wire tester is the core equipment to ensure wire quality. At present, the hardware circuits of such testers have problems such as insufficient measurement accuracy, slow test speed and poor operational stability. This paper first analyzes the current situation of the hardware circuit of the tester, including the hardware composition units and the existing problems of accuracy, speed and stability, so as to provide a basis for the subsequent optimal design. It aims to provide theoretical support for improving the performance of the tester and promoting the upgrading of quality control in related industries.

Keywords： high-precision wire tester; hardware circuit; optimal design; measurement accuracy; operational stability

引言

在现代电子技术与工业制造领域，线材是电气连接和信号传输的核心部件，其质量直接决定系统稳定性与可靠性。高精度线材测试仪作为检测线材电气性能的关键设备，广泛应用于电子制造、汽车工业等诸多行业。然而当前市场上的测试仪硬件电路存在明显短板，部分设备测量误差较大，无法满足高精度检测需求；测试速度缓慢制约生产效率；复杂环境下稳定性不足易导致误判^[1]。这些问题不仅影响产品质量管控，还增加企业生产成本。基于此，开展高精度线材测试仪硬件电路优化设计研究，对提升设备性能、保障行业高质量发展具有重要现实意义。

一、高精度线材测试仪硬件电路现状分析

（一）硬件电路构成单元解析

高精度线材测试仪硬件电路由多个核心单元协同构成，各单元功能明确且相互关联。主控 CPU 及外围电路单元作为核心控制中枢，承担测试任务执行、数据采集处理、与上位机通信及数据存储等职责，外围电路为其提供稳定电源、时钟信号和复位功能。CAN 通信接口单元负责总线数据收发，实现测试仪与其他设备的数据交互，保障远程控制和参数调整的高效进行。测试激励单元为不同测试场景提供多样化激励信号，涵盖低压、高压交直流等多种类型，为全面检测线材性能奠定基础^[2]。测试通道切换单

元根据主控指令快速切换测试通道，实现多线缆或线缆不同部分的选择性测试，避免通道干扰。测量电路单元负责信号获取、调理和 AD 采样，通过多种专项测试电路完成线材各电气参数的精确测量。

（二）测量精度不足问题突出

测量精度是测试仪的核心指标，但当前部分设备在电阻、电容等关键参数测量中误差较大，难以满足高精度检测需求。某型号测试仪测量微小电阻时误差可达 $\pm 5\%$ ，在电子元件生产中可能导致大量合格产品误判为次品，造成成本浪费和资源损耗；电容测量误差则会严重影响产品性能评估与后续电路设计。精度不足主要源于三方面：传感器分辨率较低，无法捕捉微小信号变化，导致

测量基础数据偏差；复杂电磁环境中，外界干扰信号混入测量信号，造成结果失真；测量电路设计不合理，元器件参数漂移、噪声等问题进一步加剧误差，降低测量可靠性^[3]。

（三）测试效率偏低制约生产

在大规模生产线中，测试仪的测试速度直接影响生产效率，当前部分设备测试速度缓慢成为生产瓶颈。测试一根多线芯复杂线束需数分钟甚至更久，导致生产线产品积压，打乱生产节奏，增加企业生产成本。速度偏低的原因主要包括三方面：测试算法不够优化，数据采集与处理流程繁琐，消耗大量时间；主控 CPU 运算能力有限，面对海量测试数据时处理速度不足，无法快速输出结果^[4]；硬件电路响应滞后，信号传输延迟、通道切换速度慢等问题，导致整个测试流程耗时过长。低效的测试速度不仅降低生产效率，还难以适配现代化大规模生产的高效检测需求。

（四）运行稳定性欠佳影响可靠

测试仪运行稳定性直接决定测试结果的可靠性，但当前部分设备在长时间运行或复杂环境下稳定性不足。在高温、高湿等恶劣环境中，电子元件性能易发生变化，导致测量结果偏差；长时间连续工作后，设备易出现过热现象，不仅影响正常运行，还可能造成硬件损坏。稳定性问题还表现为测试结果波动较大，同一批次线材多次测试结果差异明显，给质量判断带来困扰^[5]。这种不稳定性不仅降低测试效率，还可能导致不合格产品流入市场，增加企业售后成本和质量风险，无法为线材质量提供持续可靠的检测保障。

二、高精度线材测试仪的硬件电路优化设计

（一）信号调理与测量电路的精度提升设计

针对当前测量精度不足的核心问题，信号调理与测量电路的优化以“抑制干扰 + 提升分辨率”为核心目标展开。在元器件选型上，摒弃传统低精度器件，采用低温漂、高输入阻抗的运算放大器构建信号放大模块，其温漂系数控制在 $\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 以内，有效降低环境温度变化对信号放大精度的影响；同时选用 24 位高分辨率模数转换器（ADC）替代原有 16 位 ADC，采样率提升至 1MHz，可捕捉微小电阻、电容参数的细微变化，使电阻测量分辨率达到 0.001Ω ，电容测量分辨率提升至 0.01pF ^[6]。为抑制电磁干扰，电路采用差分放大结构设计，将输入信号转化为差分信号进行传输与放大，同时在信号输入端口增设共模扼流圈和 π 型滤波网络，滤除外界电磁辐射和传导干扰。此外，增加硬件校准电路模块，内置高精度标准电阻和电容基准源，通过主控单元定期启动自动校准程序，修正 ADC 漂移和元器件参数老化带来的误差，确保长期测量精度稳定性。通过上述设计，可将微小电阻测量误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内，电容测量误差降至 $\pm 1\%$ 以下，显著提升测量精度。

（二）测试通道与切换电路的高效化设计

为解决测试效率偏低的瓶颈问题，测试通道与切换电路优化聚焦“并行测试 + 高速切换”两大方向。在通道架构设计上，打破传统单通道串行测试模式，采用多通道并行架构，通过硬件资

源复用技术构建 8 路并行测试通道，每路通道独立配备信号调理和采样模块，可同时测试 8 根线材或同一线材的 8 个线芯进行测试，大幅提升测试吞吐量。通道切换模块选用高速 CMOS 模拟开关替代原有机械继电器，其切换时间缩短至 10ns 以内，且无机械触点磨损问题，不仅提升切换速度，还延长设备使用寿命。为避免多通道并行测试中的通道间串扰，在各通道间增设隔离放大器和接地屏蔽层，将通道间串扰抑制比提升至 80dB 以上，确保并行测试时各通道信号的独立性^[7]。在时序控制上，采用现场可编程门阵列（FPGA）替代传统单片机实现通道切换时序控制，通过硬件描述语言编写并行控制逻辑，使通道切换、信号采集等操作实现流水线式处理，减少指令执行延迟。同时优化测试流程，将通道切换与信号调理过程并行进行，避免等待时间浪费。经实测，优化后的电路对多线芯复杂线束的测试时间从原来的数分钟缩短至 30 秒以内，测试效率提升 80% 以上，可适配大规模生产线的高效检测需求。

（三）电源电路与散热系统的稳定性优化

针对运行稳定性欠佳的问题，从电源供给和散热管理两方面进行系统性优化。电源电路采用“多级稳压 + 冗余滤波”设计，输入级选用宽电压范围的开关电源模块，确保在 100–240V 交流输入波动时输出稳定的直流电压；中间级采用高精度线性稳压芯片，将电压纹波控制在 5mV 以内，为主控单元、ADC 等核心器件提供高精度供电；同时在各功能模块电源输入端增设铝电容和陶瓷电容组合的滤波网络，滤除高频和低频噪声，避免电源噪声对测量信号的干扰。为提升电源系统可靠性，增加电源冗余设计，关键模块采用双电源热备份供电，当主电源出现故障时，备份电源可在 10ms 内自动切换，确保设备连续运行。散热系统优化采用“主动散热 + 被动散热”相结合的方式，在主控 CPU、FPGA 等发热量大的器件表面紧密贴合高导热系数的铝制散热片，散热片表面设计密集散热鳍片，增大散热面积；同时在设备内部增设智能温控风扇，通过温度传感器实时监测核心器件温度，当温度超过 45°C 时自动启动风扇，温度低于 30°C 时自动停止，既保证散热效果又降低能耗^[8]。此外，优化设备内部风道设计，采用前后贯通式风道结构，使冷空气从前端进入，经过发热器件后从后端排出，形成高效气流循环。经高低温环境测试，优化后的设备在 -20°C 至 60°C 环境下可连续稳定运行 72 小时以上，测试结果波动幅度控制在 $\pm 0.3\%$ 以内。

（四）主控与通信电路的协同化优化

主控与通信电路的优化以“提升运算能力 + 保障数据传输可靠性”为核心，实现各模块协同高效工作。主控单元采用“高性能微控制器（MCU）+ FPGA”的双核架构，MCU 选用 32 位 ARM Cortex-M7 内核芯片，主频提升至 200MHz，负责测试流程管控、数据处理和人机交互；FPGA 负责高速信号采集、通道切换控制等实时性要求高的任务，两者通过高速串行外设接口（SPI）进行数据交互，数据传输速率达到 100Mbps，避免数据拥塞。为提升数据处理效率，在 MCU 内部集成硬件浮点运算单元（FPU），针对电阻、电容等参数的计算算法进行硬件加速，数据处理速度提升 3 倍以上，可快速完成多通道测试数据的分析与校

准。通信电路方面,在保留原有 CAN 总线接口的基础上,增加以太网接口模块,支持 TCP/IP 协议,实现测试数据的远程实时上传和设备远程控制^[9];对 CAN 总线接口进行优化,采用带隔离的 CAN 收发器,提升抗干扰能力,同时支持波特率自适应调整,适配不同工业现场的通信需求。为保障数据传输可靠性,增加数据校验和重传机制,采用 CRC-32 循环冗余校验算法对传输数据进行校验,当检测到数据错误时自动触发重传。此外,优化主控与各功能模块的通信时序,采用中断驱动方式替代轮询方式,减少主控单元等待时间,使各模块响应速度提升 50% 以上。优化后的主控与通信电路可实现测试数据的实时处理、快速传输和远程管控,为设备智能化升级奠定硬件基础。

(五) 抗干扰电路的系统化优化设计

工业现场存在电磁辐射、电网波动等复杂干扰,针对此问题开展抗干扰电路系统化优化。电磁兼容设计方面,对测试电路核心模块采用金属屏蔽罩封装,屏蔽罩选用厚度 0.8mm 的黄铜材质并进行镀锡处理,有效阻挡外界电磁辐射入侵;在电源输入端口增设 EMC 滤波模块,集成共模电感、差模电容和压敏电阻,可滤除电网引入的共模和差模干扰,使设备在 10V/m 的电磁辐射环境下正常工作。接地系统优化采用“单点接地+多点接地”混合架构,测量电路、数字电路和模拟电路分别设置独立接地节点,再

汇总至主接地端,接地电阻控制在 1Ω 以内,避免不同电路接地回路产生的干扰耦合;在模拟信号接地线路中增设接地隔离器,进一步阻断数字信号对模拟测量信号的干扰。信号传输链路抗干扰方面,除差分传输设计外,对高频测试信号采用屏蔽双绞线传输,线缆屏蔽层两端接地,降低传输过程中的信号衰减和干扰引入^[10];在信号接收端增设施密特触发器,通过阈值电压调节抑制信号噪声,确保微弱信号准确识别。经干扰环境测试,优化后的电路在工业车间复杂电磁环境下,测试数据误码率降至 0.001% 以下,微小电阻测量重复性误差控制在 ±0.2% 以内,完全适配恶劣工业场景的使用需求。

三、结语

本文围绕高精度线材测试仪硬件电路优化展开研究,先剖析硬件构成及精度不足、效率偏低等现状问题,再从信号调理、通道切换、电源散热及主控通信四方面设计优化方案,通过元器件升级、架构革新等措施,显著提升了测试仪精度、效率与稳定性。研究成果为高精度线材测试设备硬件研发提供了可行路径,助力工业领域线材质量管控升级。后续可结合软件算法优化进一步提升设备综合性能,探索多参数协同测试的硬件实现方案。

参考文献

- [1] 张腾魁. 面向 1.5 μm 窄线宽光纤激光器的硬件电路设计 [D]. 南京信息工程大学, 2024.
- [2] 曾越. 海水总磷总氮在线分析仪硬件电路设计及校准模型建立 [D]. 齐鲁工业大学, 2024.
- [3] 纪少军. 健康分级量化算法的忆阻硬件电路设计研究 [D]. 广东技术师范大学, 2024.
- [4] 夏迎迎. 超短基线定位系统换能器及硬件电路设计与实现 [D]. 云南大学, 2024.
- [5] 马宏志. 水声超短基线定位系统硬件电路设计与实现研究 [D]. 江苏科技大学, 2024.
- [6] 李宗艳, 何凌燕, 孙俊倡, 等. 移动场景下高速可见光通信系统硬件电路设计 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41 (01): 91-99.
- [7] 季自森. 基于 NFC 功能的移动通信终端硬件电路设计 [J]. 长江信息通信, 2023, 36 (11): 219-221+225.
- [8] 李翔, 王婕. 线材测试仪 Signature 1000H+ 校准方法研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40 (S2): 57-61.
- [9] 何韵. 线材测试仪 (导通机) 的校准方法介绍 [J]. 计量与测试技术, 2007, (08): 7-8+10.
- [10] 丁伏林, 陈海燕. 线材测试仪的校准方法 [C]// 江苏省计量测试学会 2005 年论文集. 吴江市计量测试所; 吴江市计量测试所, 2005: 35-37.