



以太网双绞线测试仪设计

吴俊鹏, 谢富珍*, 朱晓峰

(新余学院机电工程学院, 江西 新余 338004)

摘要: 在无线自组网的灾害救援蛇形机器人系统中, 为建立覆盖广阔且信号稳定的指挥通信链路, 常需在救援基地与前沿观察点之间快速布设以太网双绞线, 以构建高速网络骨干。这些临时网络的通信质量, 直接关乎机器人回传探测数据的完整性与实时性。为此, 本文研制了一款便携式以太网测试仪。该设备以STM32F407为核心控制器, 通过继电器切换测量通路, 可精准、快速地检测双绞线的连接关系、电阻、长度等关键参数, 从而为救援现场通信网络的快速部署、状态诊断与故障排查提供核心技术支持, 有效保障了前方机器人集群与后方指挥中心之间的数据传输可靠性。

关键字: 以太网测试仪; STM32F407; 连接关系

收稿日期: 2026年2月27日

中图分类号: TP274

通讯作者: *谢富珍, 新余学院机电工程学院

Design of Ethernet Twisted-Pair Tester

WU JunPeng, Xie Fuzhen, Zhu Xiaofeng

(School of mechanical and electrical engineering, Xinyu University, Xinyu 338000, China)

Abstract: In the disaster rescue snake-like robot system of wireless ad hoc networks, to establish a command communication link with broad coverage and stable signal, it is often necessary to quickly deploy Ethernet twisted-pair cables between the rescue base and the frontline observation points to construct a high-speed network backbone. The communication quality of these temporary networks directly affects the integrity and real-time transmission of the robot's detection data. Therefore, this paper develops a portable Ethernet tester. The device uses the STM32F407 as the core controller and switches measurement paths through relays, allowing for accurate and rapid detection of key parameters such as twisted-pair cable connectivity, resistance, and length. This provides core technical support for the rapid deployment, status diagnosis, and troubleshooting of the communication network at the rescue site, effectively ensuring the reliability of data transmission between the frontline robot cluster and the rear command center.

Key words: Ethernet tester; STM32F407; Connection relationship

0 引言

在重大灾害现场, 快速建立可靠的通信链路是救援工作的生命线。蛇形机器人等移动探测设备因其卓越的越障能力, 被广泛应用于深入危险区域执行侦测任务^[1]。这些设备产生的海量探测数据(如高清视频、环境参数)需要稳定、高速的网络回传至后方指挥中心, 以支撑关键决策。为此, 救援现场常需在基地与前沿观察点之间快速布设有线骨干网络。其中, 以太网双绞线以其部署便捷、

成本低廉和抗干扰能力强的特点, 成为构建临时高速通信链路的理想选择^[2]。

然而, 灾害现场环境复杂恶劣, 双绞线在铺设与使用中极易遭受物理损伤, 导致接线错误、线路断裂或性能下降^[3]。这些线路故障会直接引发网络延迟增高、数据包丢失甚至通信中断, 严重危及机器人集群回传数据的完整性与实时性。目前, 救援人员主要依赖通用网络测试仪或万用表进行排查。前者虽功能专业但成本高昂、不便携;

* 基金项目: 江西省教育厅科技项目“灾害救援蛇形机器人系统设计与研究(GJJ212327)”。



后者则操作繁琐、效率低下，且无法精准测量线路电阻、长度等关键状态参数，难以满足救援工作对速度和准确性的双重需求^[4-6]。

针对上述问题，本研究研制了一款基于STM32F407微控制器的便携式以太网测试仪。该设备通过继电器阵列自动选通测量通道，集成了线路连接关系判断、环路电阻测量以及基于时域反射原理的电缆长度估算等功能，能够实现对双绞线关键参数的一键式快速、精准检测。本仪器的开发旨在为灾害救援现场通信网络的快速部署与状态诊断提供核心技术支撑，有效保障机器人集群与指挥中心之间数据传输链路的可靠性，从而提升整体救援效率。

1 测量原理

1.1 网线类型测量原理 (UTP/SFTP)

非屏蔽双绞线 (UTP) 和屏蔽双绞线 (SFTP) 的主要结构差异在于后者在四对双绞线外部包裹有一层连续的金属屏蔽层^[7]。本设计正是利用这一结构性差异来识别线缆类型。

其核心在于线缆的芯线与屏蔽层之间构成一个等效电容。具体实现方法如下：测试时，通过继电器的特定组合，将双绞线一端的8根芯线在电气上并联连接，共同作为一个电极，另一端的屏蔽层作为另一个电极。如此，在芯线组和屏蔽层之间就形成了一个分布电容 C_{cable} 。对于 SFTP 线缆而言，由于其屏蔽层完整且与芯线之间有绝缘层隔离，这个分布电容的值是显著且可测量的。而对于 UTP 线缆，由于没有连续的屏蔽层，这个等效电容极小，近乎为零。

为便于测量，采用 RC 充放电时间常数法来测量等效电容值。微控制器 (STM32F407) 的一个 GPIO 引脚通过一个已知阻值的精密电阻 R_{ref} 对该等效电容充电。微控制器内部的高精度定时器被用来精确测量 GPIO 引脚电压从低电平上升到逻辑阈值电压所需的时间，即充电时间 T_{charge} 。根据 RC 电路的一阶响应特性，有如下关系：

$$\tau = R_{ref} * C_{cable} \quad (1)$$

$$T_{charge} = k_1 * \tau \quad (2)$$

k_1 为充电时间 T_{charge} 与时间常数 τ 之间的比例系数。因此，通过测量得到的 T_{charge} ，可以计算出 C_{cable} 的值。

最后，系统将计算出的 C_{cable} 值与一个预设的阈值 $C_{threshold}$ 进行比较。如果 C_{cable} 大于 $C_{threshold}$ ，则判定线缆为 SFTP 类型；反之，则判定为 UTP 类型。这种方法的关键技术点在于确保测试接口与线缆屏蔽层之间具有良好且稳定的电气接触，以避免接触电阻对电容测量造成影响。

1.2 线对连接关系检测

线对连接关系的检测是测试仪的基础功能，需要快速、准确地判断出线缆两端的连接对应关系，并能诊断出开路、短路、错对、反接等多种故障^[8]。本设计采用了一种基于继电器矩阵与同步采样 ADC 的自动化数字扫描法，该方法高效且可靠。该系统将测试仪的两个端口 (Port A 和 Port B) 构建为一个 8x8 的可控通路矩阵。每个端口对应网线的 8 个引脚 (1 至 8)，通过继电器控制每个引脚与内部测量电路的连接状态。检测流程如下：

(1) 初始化：所有继电器处于断开状态，确保初始环境干净。

(2) 激励施加：微控制器控制 Port A 侧的继电器，依次向其中一条芯线注入一个高电平的直流激励信号。此时，Port A 的其他引脚保持高阻或接地状态。

(3) 同步采样：在 Port A 施加激励的同时，微控制器通过 SPI 或 I2C 总线命令高精度多通道同步采样 ADC 芯片，对 Port B 端的全部 8 个引脚进行同步电压采样。所谓“同步采样”，是指 ADC 的所有通道在同一时刻捕获电压值，这完全避免了使用多路复用器顺序采样可能带来的时序误判问题。

(4) 状态记录：读取 ADC 的采样结果。在 Port B 端，只有与 Port A 当前激励引脚正确连接的那根芯线会检测到高电平，其他引脚应为低电平。系统记录下这个“一对多”的电压状态图。

(5) 遍历扫描：重复步骤 2 至 4，遍历 Port A 端的全部 8 个引脚。

(6) 关系构建与诊断：完成所有扫描后，系统获得一个完整的 8x8 连接关系矩阵。通过分析这个矩阵，可以轻松构建出线缆两端的连接映射表。然后将此映射表与标准的 T568A 或 T568B 线序进行比对，即可自动诊断出各种情况：

①正确连接：连接关系符合标准线序。



②开路：Port A 某引脚有激励，但 Port B 所有引脚均无响应。

③短路：Port A 某引脚有激励，但 Port B 有多个引脚出现高电平响应。

④错对：连接关系存在，但不符合同一对双绞线的颜色编码规则。

⑤反接：一个线对内的两根线序在两端颠倒。

这种方法的优势在于速度快、判断准确，且能一次性检测出所有故障类型。

1.3 网线长度检测

精确测量网线长度对于估算线缆损耗、判断布设距离至关重要。直接测量物理长度不现实，因此电子测量法被广泛采用。本设计采用了一种基于双绞线单位长度电容恒定特性的测量方法，该方法本质上是时域反射法（TDR）的一种低成本、易实现的变种。

双绞线的线对可以等效为一个分布参数电路，有

$$C_{total} = C_{per_unit} * L \quad (3)$$

整条线缆的线间总电容 C_{total} 与线缆长度 L 成正比， C_{per_unit} 是单位长度的电容，对于特定规格的线缆 C_{per_unit} 是一个相对稳定的值。

本设计通过将待测线对等效为一个电容，并将其接入一个由 NE555 定时器芯片构成的无稳态多谐振荡电路中来间接测量该电容。在该电路中，NE555 的输出方波频率 f 由两个外部定时电阻（ R_A , R_B ）和线缆等效电容 C_{total} 共同决定。有如下关系：

$$f = 1.44 / ((R_A + 2 * R_B) * C_{total}) \quad (4)$$

由上式可知，在 R_A 和 R_B 固定不变的情况下，振荡电路的输出频率 f 与线缆的等效电容 C_{total} 成反比，而 C_{total} 又与线缆长度 L 成正比，因此，输出频率 f 与线缆长度 L 成反比关系。

微控制器（STM32F407）内部的高级定时器具有输入捕获功能，可以精确测量 NE555 输出波形的频率或周期。系统通过测量得到频率值 f 后，并不能直接得到长度 L ，因为公式中的系数（与 R_A , R_B 及 C_{per_unit} 有关）是未知的。因此，需要进行校准。

校准过程采用经典的两点校准法：使用两段已知精确长度的同规格标准线缆进行测量，分别得

到对应的频率值 f_1 和 f_2 。这样就在（长度 L ，频率 f ）坐标系中确定了两个点。可以拟合出一条 L 关于 $1/f$ 的直线，从而得到“频率 - 长度”的换算公式。此后，测量任何未知线缆时，只需测得其频率 $f_{unknown}$ ，即可通过该校准公式计算出其估算长度 $L_{estimated}$ 。

此方法的优点是电路简单、成本低、测量速度快。但其精度受到若干因素的限制。首先，它高度依赖于校准的准确性，而且不同厂家、不同批次的网线，其单位长度电容 C_{per_unit} 可能存在细微差异，这会引入系统误差。此外，线缆的弯曲、缠绕也会对分布电容产生微小影响。最后，测量结果本身也能间接反映线缆绝缘状态的均匀性，如果线缆某处绝缘受损导致局部电容变化，可能会反映在频率稳定性或测量值上。

1.4 网线电阻检测

直流环路电阻是评估双绞线导体质量、连接点工艺（如水晶头压接）是否良好、以及是否存在氧化或损伤的关键指标。电阻过大会导致信号衰减加剧。测量单根导线的微小电阻（通常每米零点几欧姆）需要消除测试引线和接触电阻的影响。本设计采用了四线制开尔文测量法，这是测量小电阻的经典且高精度的方法。四线制测量的核心思想是将电流激励和电压测量分离，使用独立的两对导线。具体实现如下：

（1）恒流激励：系统通过一个高精度的压控恒流源（VCCS）电路，向被测线对注入一个稳定且已知的恒定电流 $I_{constant}$ 。这一对线用于输送电流。

（2）电压检测：同时，使用另一对独立的测试导线（通过继电器切换选择），直接连接到被测线对在测试夹具上的两个精确的接触点（即开尔文连接点），测量这两个点之间的电压降 V_{sense} 。这对电压检测线连接到高输入阻抗的差分 ADC 前端。

（3）计算电阻：由于电压测量回路（ADC 的差分输入端）的输入阻抗极高（通常大于 $10M\Omega$ ），流过电压检测线的电流几乎为零，因此电压检测线本身的电阻以及其与测试点的接触电阻上的压降可以忽略不计。这样，ADC 测量到的电压 V_{sense} 就是恒定电流 $I_{constant}$ 流过被测线对导体本身（包



含两根线)所产生的精确电压降。根据欧姆定律,环路电阻

$$R_{loop} = V_{sense} / I_{constant} \quad (5)$$

这种方法有效地消除了测试夹具接触电阻和引线电阻对测量结果的影响,能够精确测量出线对本身的直流电阻。该电阻值包含了双线电阻之和以及水晶头压接点的微小接触电阻。如果测得的电阻值显著大于根据线规和长度估算的理论值,则提示可能存在导体不纯、线径不足、压接不良或连接点氧化等故障。

1.5 线对间短路检测

线对间短路是严重的故障,会导致通信完全中断。其检测原理相对直接:若同一差分对内的两根导线之间发生短路,则它们的电气电位将趋于相等。检测时,系统通过继电器配置,向待测线对中的一条导线注入一个特定的测试电压信号。同时,通过高阻抗输入通道,监测本应绝缘独立的另一条导线上的电压响应。如果两线之间存在低阻抗短路,则在被监测的导线上会检测到与注

入信号幅度非常接近的电压。系统通过比较注入信号与被监测信号之间的电压差,并设定一个合理的阈值电压 $V_{threshold}$ 。如果电压差小于 $V_{threshold}$,则判定为短路;反之,则为正常绝缘。更先进的实现还可以通过分析注入信号与监测信号的波形相似度,不仅判断是否完全短路,还能对因绝缘老化、受潮但尚未完全导通的高阻状态进行预警,这对于预防性维护具有重要意义。

2 系统整体设计

根据以上测量原理,设计出以太网双绞线测试仪。该测试仪以 STM32F407 作为控制器,通过继电器切换不同测量模式。Port A 和 Port B 端口对接以太网双绞线两端,根据各引脚电平组合,判断出线对连接关系、线对间短路,以及网线类型。通过引脚间 ADC 采样分析,可测量计算出线缆长度和线电阻值。图 1 为系统整体,系统上电初始化后,对 Port A 和 Port B 端口进行数据采集,再将采集的数据通过微控制器处理,最终将处理完的数据在屏幕上显示。

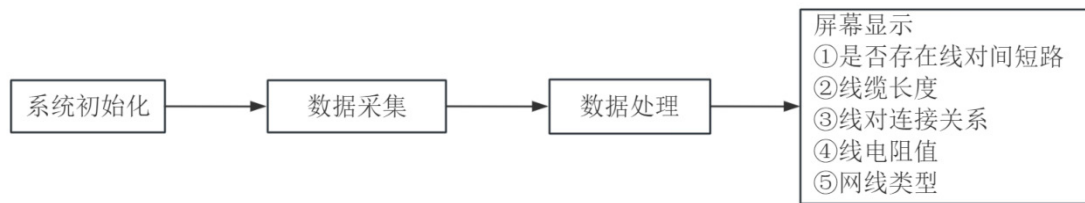


图 1 系统整体设计框图

3 实验测试数据

在数据测量之前,线缆长度由标准刻度尺测量得出,线对关系提前设定,实际直流电阻值通过使

用六位半数字万用表测量得出。如表 1 所示,为以太网双绞线相关数据测量结果对照,可见实际数据与测量数据之间误差较小,线对关系测量无误。

表 1 以太网双绞线数据测量结果对照表

实际线缆长度(m)	测量线缆长度(m)	线缆长度测量误差	线对间短路判断	类型判断	线对连接关系判断	实际直流电阻值(Ω)	测量直流电阻值(Ω)	直流电阻值测量误差	测量时间(s)
1	0.993	0.70%	正确	正确	正确	0.413	0.408	1.12%	1.9
1.5	1.495	0.33%	正确	正确	正确	0.45	0.446	0.93%	2.4
2	1.98	0.10%	正确	正确	正确	0.605	0.599	0.95%	2.3
3	2.972	0.93%	正确	正确	正确	0.758	0.751	0.92%	3.1
8	7.935	0.81%	正确	正确	正确	1.824	1.802	1.21%	3.8

4 结论

本设计基于 STM32F407 控制器,通过继电器切换实现多模式检测,整合了矩阵扫描法、电容测量法、恒流源测量法等多种技术,成功实现了

对以太网双绞线线对连接关系、长度、电阻、类型及线对间短路等关键参数的检测。

实验测试数据显示,该测试仪在不同长度线缆的检测中,长度测量误差最大为 0.93%,直流电



阻测量误差最大为 1.21%，线对连接关系、类型及短路判断均准确无误，且测量时间控制在 0.9 ~ 3.8 秒的合理范围内。

综上所述，以太网双绞线测试仪操作简便、功能集成，能够满足网络搭建、维护及故障排查中对线缆参数检测的实际需求，有效解决了传统检测工具操作复杂、功能单一、精度不足等问题，具有较高的实用价值。

参考文献：

- [1] 卢振利, 康发. 具有推进关节的蛇形机器人搭建与运动控制研究 [J]. 高技术通讯, 2025, 35 (08): 882-890.
- [2] 张浩森, 国晨, 孙凯邁, 等. 双绞线的模式转换特性对车载以太网 EMI 影响分析 [J]. 中国汽车, 2021, (10): 47-52.
- [3] 霍继超, 孙欣. 气象业务网络故障问题判断与排除 [J]. 内江科技, 2021, 42 (11): 22+139.
- [4] 蒲俊萍. TTE 测试仪系统软件设计 [D]. 西安电

子科技大学, 2024.

[5] 姚超, 夏崇飞, 李文杰. 基于 FPGA 的以太网测试系统的设计与实现 [J]. 数字技术与应用, 2024, 42 (01): 193-195.

[6] 兰唯, 韩延喆, 扈啸. 基于 FPGA 的千兆以太网端口通信设计 [J]. 电子科技, 2024, 37 (01): 48-54.

[7] 包立兴. 基于 SFTP 面向敏感文档的安全高效溯源系统 [D]. 河北大学, 2024.

[8] 胡木森. 基于网络流的高性能 PCB 自动布线算法研究与设计 [D]. 电子科技大学, 2024.

作者简介：吴俊鹏（2004-），男，汉族，江西上饶人，新余学院机电工程学院电子信息工程专业在读本科生，主要研究方向为嵌入式开发；谢富珍（1980-），女，汉族，江西萍乡人，硕士，新余学院机电工程学院副教授，主要研究方向为自动控制系统应用开发；朱晓峰（1982-），女，汉族，江苏徐州人，硕士，新余学院机电工程学院讲师，硕士研究生，主要研究方向为仪器仪表工程。