

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416556

一种采用 TDR 的传输线阻抗测量和校准*

胡媛媛^{1,2} 张敏娟^{1,2} 卫晨博^{1,2} 崔一凡^{2,3} 高云峰³

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 中北大学前沿交叉科学研究院 太原 030051;
3. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051)

摘要: 时域反射技术作为一种能够直观反映传输线阻抗变化的技术,广泛应用于阻抗检测领域。但在对传输线进行特性阻抗测量的过程中存在校准不准确、阻抗测试精度低等问题。针对这些问题,本文设计了特性阻抗时域测量和校准系统。该系统采用最短区间估计算法测量传输线上的电压,实现了对传输线特性阻抗的测量。通过对四根具有不同长度和特性阻抗的同轴电缆进行测量,测量结果的误差控制在 $\pm 1\%$ 以内,符合阻抗测量的要求。实际结果表明,该系统能够精确地测量传输线的阻抗。此方法简化了操作流程、规避了手动选择所导致的主观偏差,为传输线阻抗检测技术的发展提供了一种新方法。

关键词: 时域反射技术;特性阻抗测量;最短区间估计法;校准

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

A method of transmission line impedance measurement and calibration using TDR

Hu Yuanyuan^{1,2} Zhang Minjuan^{1,2} Wei Chenbo^{1,2} Cui Yifan^{2,3} Gao Yunfeng³

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Research Institute Frontier Interdisciplinary Sciences, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Time domain reflection technology, as a technique that can intuitively reflect changes in transmission line impedance, is widely used in the field of impedance detection. However, there are problems such as inaccurate calibration and low impedance testing accuracy in the process of measuring the characteristic impedance of transmission lines. In response to these issues, this article designs a time-domain measurement and calibration system for characteristic impedance. The system uses the shortest interval estimation algorithm to measure the voltage on the transmission line, achieving the measurement of the characteristic impedance of the transmission line. By measuring four coaxial cables with different lengths and characteristic impedances, the measurement error is controlled within $\pm 1\%$, meets the requirements of impedance measurement. The actual results show that the system can accurately measure the impedance of transmission lines. This method simplifies the operation process, avoids subjective bias caused by manual selection, and provides a new method for the development of transmission line impedance detection technology.

Keywords: time domain reflectometry technology; characteristic impedance measurement; shortest interval estimation method; calibration

0 引言

随着现代通信中信号传输频率的不断提高,对传输线特性阻抗匹配度的要求也日益提高。目前,特性阻抗测量方法包括自动平衡电桥法^[1]、频率扫描法^[2]、时域反射法

(time domain reflectometry, TDR)^[3]等。自动平衡电桥法精度高,操作简便,但主要适用于低频段;频率扫描法能覆盖多个频率点,适用于复杂电路,但设备成本较高;TDR通过高性能示波器精准捕捉和分析传输线上的反射信号^[4],可以快速定位线路中的故障点或阻抗不匹配位置,能够精

收稿日期:2024-07-29

* 基金项目:山西省基础研究计划项目(202303021211163)资助

确定位阻抗变化点,凭借其优势,在长线结构和故障检测中表现尤为突出,是测量传输线特性阻抗的首选方法。

在对传输线进行阻抗测量之前,首先要对仪器进行校准。当前 TDR 校准技术虽然取得了一定进展,如在线校准法、阻抗传输校准法及波形存储参考校准法^[5-6],但仍存在诸多不足。美国安捷伦科技公司推出的 Agilent 54754A TDR 模块便采用了阻抗传输校准法^[7],但该模块在测量特性阻抗时,仅能显示传输线某一点的特性阻抗值,并不能全面分析。相比之下,英国宝拉公司的 CITS800、广东正业科技股份有限公司生产的 Asida ZK2130 以及电子科技大学研发的 MTS、SITS 等系列产品都采用了差分测量和多点校准的方法^[8],该方法融合了阻抗传输校准法以及和波形存储参考校准法,该方法虽能提高测量精度,但需要预先估计待测传输线的阻抗范围,手动选择相应的校准参数,才可进行后续的阻抗测量。北京工业大学所设计的 TDR 特性阻抗时域测量系统^[9],选择了波形存储参考校准法,这种方法虽能实现高精度测量,但需预先设定关键点的电压参数。整体而言,现有的测量和校准方法在设计上往往依赖于专业的技术知识和复杂的校准流程,这在很大程度上限制了测试效率。

针对上述不足,本文设计了一个采用 TDR 的传输线特性阻抗测量与校准系统,该系统采用最短区间估计算法来估算传输线上各个位置的电压。本系统还结合了阻抗传输校准法以及和波形存储参考校准法,利用空气棒校准参考件,并保存其校准参数;随后,调用校准参数并结合实际信号波形进行计算,实现对传输线特性阻抗的精确测量。

1 基本原理

1.1 TDR 阻抗测量基本原理

TDR 阻抗基本测量原理简述如下:脉冲发生器产生的脉冲信号,通过传输线和探头传输至待测传输线上,当信号遇到阻抗不匹配点(如故障、接头不良、负载变换、开路)时,部分或者全部信号反射回脉冲发生器,其余信号则继续沿传输线传播,宽带取样示波器在固定点捕获电压波形数据。利用这些数据,可以计算出特性阻抗值^[10]。TDR 阻抗测量技术的直观示意图如图 1 所示,展示了信号在传输线上传播过程中遇到阻抗不匹配点时的反射现象^[11]。

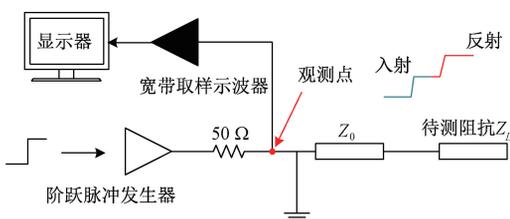


图 1 TDR 工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TDR working principle

由传输线的理论分析可知,反射系数 ρ 为:

$$\rho = \frac{V_{\text{反射}}}{V_{\text{入射}}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

其中, Z_L 为被测传输线的特性阻抗值, Z_0 为 TDR 仪器的内部阻抗, $V_{\text{入射}}$ 为脉冲信号入射波的电压幅度, $V_{\text{反射}}$ 为反射波的电压幅度。宽带取样示波器测得的幅值 $V_{\text{测}}$, 实际上是入射波和反射波电压叠加的结果:

$$V_{\text{测}} = V_{\text{入射}} + V_{\text{反射}} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可以推出被测线缆准确的特性阻抗 Z_L :

$$Z_L = \frac{V_{\text{测}}}{2V_{\text{入射}} - V_{\text{测}}} Z_0 \quad (3)$$

1.2 最短区间法估计测量原理

为了实现对传输线特性阻抗的测量,需对采集到的电压波形进行处理^[12]。目前,广泛采用的是 IPC-TM-650《测试方法手册》中所介绍的测试方法,即 IPC 规程法^[13],核心思路是识别并划定传输电压波形中的特定测量区间,基本原理如图 2 所示。

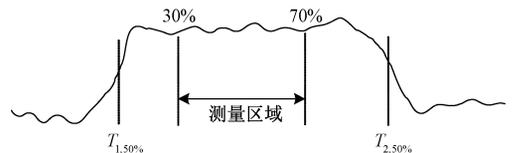


图 2 IPC 规程法测试原理图

Fig. 2 IPC protocol testing schematic diagram

在信号传输中,遇到阻抗不匹配时,电压波形会出现阶跃和负阶跃现象。为了准确测量传输电压值,选择阶跃和负阶跃达到 50% 幅度时的时刻 $T_{1,50\%}$ 和 $T_{2,50\%}$ 分别作为起始点和结束点,在这两个点之间的 30%~70% 区域进行测量,并对该区域内的波形电压值进行平均处理,以获得更准确的传输电压值。然而,这种方法仅适用于阻抗不匹配显著的情况。对于阻抗相近的情况,需要进行人工选择。为了提高电压测量的精度与效率,基于阶跃信号电平估计算法理论^[14]提出了利用最短区间算法计算电压的测量方法,其中三电平最短区间估计算法原理如下:

1) 读取波形数据 (x_i, y_i) ;

2) 将所有数据分配到 3 个集合当中,计算波形的电平。将电压数据的最小值 y_{\min} 和最大值 y_{\max} 分别作为低电平 \bar{y}_{low} 和高电平 \bar{y}_{high} 的初始值;将 y_{\min} 和 y_{\max} 的均值 y_{mid} 作为中间电平 \bar{y}_{mid} 的初始值,利用下式将数据分配到 3 个集合当中:

$$|y_i - \bar{y}_{\text{low}}| \leq |y_i - \bar{y}_{\text{mid}}| \leq |y_i - \bar{y}_{\text{high}}| \quad (4)$$

分配之后更新集合的均值,重复波形分配过程,直到 3 个平均电平值不再发生变化。低电平、中间电平、高电平的集合分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 , 集合数据点数分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 。

3) 确定最短区间。将 3 个集合的数据按照单调不减的方式排列,得到新的集合,即 $S_{1, \text{new}}$ 、 $S_{2, \text{new}}$ 、 $S_{3, \text{new}}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{1,new} = \{y_{(1)}^{(1)}, y_{(2)}^{(1)}, \dots, y_{(N_1)}^{(1)}\}, \\ \text{其中 } y_{(1)}^{(1)} \leq y_{(2)}^{(1)} \leq \dots \leq y_{(N_1)}^{(1)}, \\ S_{2,new} = \{y_{(1)}^{(2)}, y_{(2)}^{(2)}, \dots, y_{(N_2)}^{(2)}\}, \\ \text{其中 } y_{(1)}^{(2)} \leq y_{(2)}^{(2)} \leq \dots \leq y_{(N_2)}^{(2)}, \\ S_{3,new} = \{y_{(1)}^{(3)}, y_{(2)}^{(3)}, \dots, y_{(N_3)}^{(3)}\}, \\ \text{其中 } y_{(1)}^{(3)} \leq y_{(2)}^{(3)} \leq \dots \leq y_{(N_3)}^{(3)}. \end{array} \right. \quad (5)$$

最短区间宽度为集合长度的 1/2,其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{low} = \lfloor 1/2 \times N_1 \rfloor + 1 \\ N_{mid} = \lfloor 1/2 \times N_2 \rfloor + 1 \\ N_{high} = \lfloor 1/2 \times N_3 \rfloor + 1 \end{array} \right. \quad (6)$$

4)确定电平:分别在 $S_{1,new}$ 、 $S_{2,new}$ 、 $S_{3,new}$ 中利用遍历法找到长度为 N_{low} 、 N_{mid} 、 N_{high} 且元素数量最少的区间 S_{low} 、 S_{mid} 、 S_{high} :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{low} = \{y_{(m)}^{(1)}, y_{(m+1)}^{(1)}, \dots, y_{(N_{low}+m-1)}^{(1)}\} \\ S_{mid} = \{y_{(n)}^{(2)}, y_{(n+1)}^{(2)}, \dots, y_{(N_{mid}+n-1)}^{(2)}\} \\ S_{high} = \{y_{(g)}^{(3)}, y_{(g+1)}^{(3)}, \dots, y_{(N_{high}+g-1)}^{(3)}\} \end{array} \right. \quad (7)$$

其中, m 、 n 、 g 是通过遍历方法找到的最短区间起始点的索引。波形低电平 V_{low} 、中间电平 V_{mid} 和高电平 V_{high} 由每个集合的均值确定:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{low} = \frac{1}{N_{low}} \sum_{i=m}^{N_{low}+m-1} y_{(i)}^{(1)} \\ V_{mid} = \frac{1}{N_{mid}} \sum_{i=n}^{N_{mid}+n-1} y_{(i)}^{(2)} \\ V_{high} = \frac{1}{N_{high}} \sum_{i=g}^{N_{high}+g-1} y_{(i)}^{(3)} \end{array} \right. \quad (8)$$

当传输线阻抗不匹配时,行波在传输线上受阻会产生反射波,导致测试波形上反射波与原始的入射波相叠加。因此,可以通过对比设备未接被测传输线时产生的基准波形,与接入被测传输线后观测到的波形,分析出阻抗不匹配区域^[15],从而能够计算出被测传输线的特性阻抗值。三电平最短区间估计算法只适用于测量段内的阻抗是均匀的情况,对接入被测传输线之后的情况是不适用的。针对接入被测传输线后波形分析的问题,引用双电平最短区间估计算法作为解决方法。首先依据基准波形,将接入线缆后的波形划分为两个阶跃波形部分,分别对这两个阶跃波形进行计算,原理及其原理图如图 3 所示。

其中 Wave1 是基准波形, Wave2 是接入被测传输线时的电压波形。首先,以 Wave1 第 1 个阶跃波幅度达到 50% 的点 A 作为特征点^[16],将 Wave2 与 Wave1 进行对齐,以确定 Wave2 中对应的点 A'; 在 Wave1 中确定第 2 个阶跃波幅度达到 10% 和 90%^[17]的时间点 B 和 C,并找到 Wave2 中对应的 B' 和 C' 点;随后,根据 B' 和 C' 两个关键点,将 Wave2 分割为两个部分: Wave21 和 Wave22。其中,

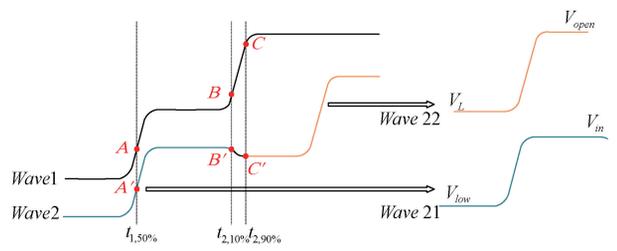


图 3 波形分段示意图

Fig. 3 Schematic diagram of waveform segmentation

Wave21 涵盖从开始至 B' 点的波形,而 Wave22 则包含从 C' 点至后续的波形。双电平最短区间估计算法和三电平最短区间估计算法原理相同。根据波形 Wave21,可以计算 TDR 信号的初始电压和 V_{low} 和入射波电压幅度 V_{in} ;根据波形 Wave22,可以计算被测传输线的电压值 V_L 和实际开路电压 V_{open} 。相较于传统的测量算法,最短区间估计算法能够自动地分配数据点到相应的集合中,进而估算各部分电压值,此过程避免了繁琐的手动选择和潜在的人为误差,提高了测量的效率。

1.3 TDR 仪器校准原理

在进行传输线测试前,准确掌握仪器内部特性阻抗抗值(即参考件的特性阻抗值)对电路分析至关重要。由于环境变化以及连接不同电缆和探针时引入的附加效应,校准参数可能会发生变化。因此,在测量传输线特性阻抗之前需要对仪器进行校准^[18-19]。

使用精度较高的空气棒作为被测传输线,运用阻抗传输校准法校准一个参考件,并将基准波形和校准参数储存起来。在对未知阻抗的传输线进行测试时,利用波形存储参考校准法将实际测量波形与预先保存的标准波形进行比较,通过计算得到待测传输线的特性阻抗值。

步骤 1)计算基准波形的关键参数:根据图 4 所示的原理图连接仪器、参考件和探头,并将探头保持开路状态。

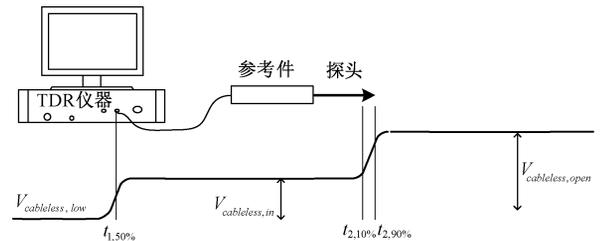


图 4 校准步骤 1) 原理图

Fig. 4 Calibration step 1) schematic diagram

计算初始电压 $V_{cableless,low}$ 、入射波的幅度电压 $V_{cableless,in}$ 和开路电压 $V_{cableless,open}$ 接着计算出第 1 个半阶跃点的电压 $V_{1,50\%}$ 和对应的时间点 $t_{1,50\%}$,以及第 2 个阶跃波形在达到稳定幅度的 10% 和 90% 的电压值和时间点,记为 $(t_{2,10\%}, V_{2,10\%})$ 和 $(t_{2,90\%}, V_{2,90\%})$,将这些参数都储存起来供后续分析使用。

步骤 2)使用空气棒校准标准件,如图 5 所示。

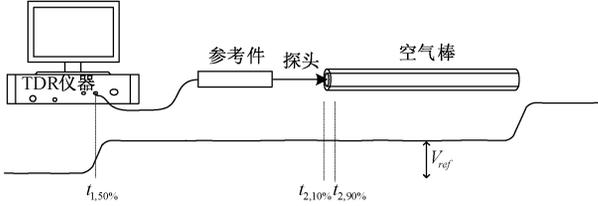


图 5 校准步骤 2)原理图

Fig. 5 Calibration step 2) schematic diagram

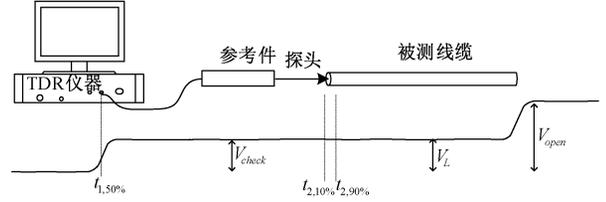


图 6 校准步骤 3)原理图

Fig. 6 Calibration step 3) schematic diagram

(1)对齐波形,更新数据;

(2)计算空气棒的参考电压 V_{ref} :将 $t_{2,90\%}$ 之后的波形数据保存为 *Air_Wave2*,利用最短区间估计法计算出空气棒的参考电压 V_{ref} ;

(3)计算参考件的特性阻抗 Z_{std} :根据式(9)计算参考件的特性阻抗 Z_{std} 并储存起来,其中 Z_{air} 为空气棒的标称值阻抗。

$$Z_{std} = Z_{air} \frac{2V_{cableless,in} - V_{ref}}{V_{ref}} \quad (9)$$

步骤 3)将空气棒换成被测传输线,进行测试。如图 6 所示。

调取步骤 1)和步骤 2)的波形及参数,将波形分为 *Cable_Wave1* 和 *Cable_Wave2* 两部分,利用最短区间估计法计算出入射电压 V_{check} 、被测线缆电压 V_L 和末端开路电压 V_{open} 。根据下面的公式计算校准系数 V_d 判断仪器是否需要校准:

$$V_d = \left| \frac{V_{check} - V_{cableless,in}}{V_{open} - V_{ref}} \right| \quad (10)$$

如果 $V_d > 0.002$,则 TDR 仪器需要重新校准。通过运算,可以得出被测件的反射系数 ρ 和实际阻抗值 Z_L :

$$\rho = \frac{V_{反射}}{V_{入射}} = \frac{V_L - V_{check}}{V_{check}} \quad (11)$$

$$Z_L = Z_{std} \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (12)$$

该方法不仅显著减少了校准的次数,降低了校准过程的复杂性和时间成本,而且还极大地简化了操作流程,使得测量和校准工作变得更加快捷和高效,从而显著提高了测试效率。

2 实验及结果分析

2.1 方法论证与分析

为了验证最短区间估计法的有效性与实用性,本文使用 MATLAB 对采集到电压数据进行处理,并将测量结果与手动选择测量区域的方法及 IPC 规程法进行分析比较。被测传输线选择了长度为 1 m 和 0.5 m、阻抗值为 25 Ω 和 50 Ω 的 4 根同轴线缆,测量结果如表 1 所示。

表 1 测量方法及其测量结果

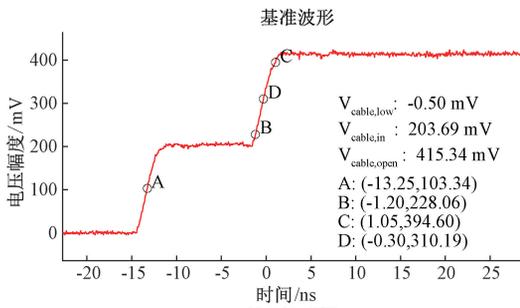
Table 1 Measurement methods and results

| 标称阻抗值 (真实值) | 最短区间估计法 | | | 手动选择区域测量法 | | | IPC 规程法 | | |
|-----------------------------------|---------|-------|--------|-----------|-------|--------|---------|-------|--------|
| | 测量结果 | 绝对误差 | 相对误差/% | 测量结果 | 绝对误差 | 相对误差/% | 测量结果 | 绝对误差 | 相对误差/% |
| 1 m, 50 Ω (201.39 mV) | 202.01 | 0.62 | 0.31 | 201.99 | 0.60 | 0.30 | 202.01 | 0.62 | 0.31 |
| 1 m, 25 Ω (133.78 mV) | 134.04 | 0.26 | 0.19 | 134.00 | 0.22 | 0.16 | 134.03 | 0.25 | 0.19 |
| 0.5 m, 50 Ω (201.39 mV) | 200.09 | -0.50 | -0.25 | 200.12 | -0.53 | -0.26 | 200.09 | -0.50 | -0.25 |
| 0.5 m, 25 Ω (133.78 mV) | 133.99 | 0.21 | 0.16 | 133.97 | 0.19 | 0.13 | 134.43 | 0.65 | 0.48 |

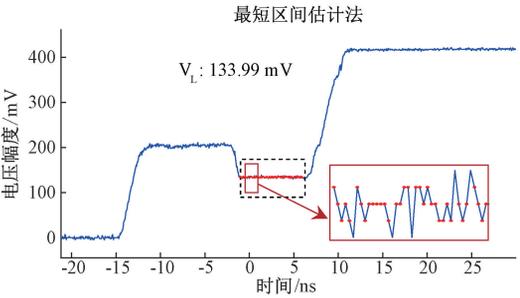
其中 0.5 m、25 Ω 的同轴电缆 MATLAB 仿真结果如图 7 所示,传输电压波形是电压幅值能够稳定在某个特定值的最大值范围。

从表 1 可以看出,使用最短区间估计法测得的电压幅值相对稳定;而手动选择区域的测量方法的电压幅值波动较大。当使用 IPC 规程法测量 0.5 m、25 Ω 的同轴电缆

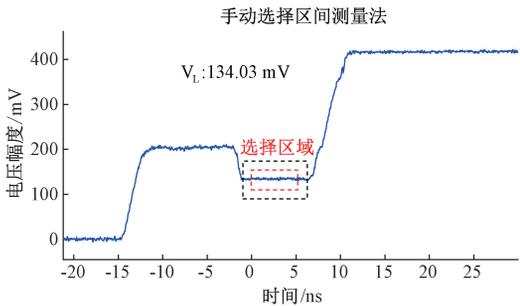
时,其效果不如其他方法,这是因为在计算两个阶跃中点之间 30%~70% 区域时,整体区域偏右,并且将一小段上升区域划分进去了,如图 7(d)。由此可以得出,本文提出的最短区间估计法相较于其他两种方法在稳定性和处理速度上表现较优。



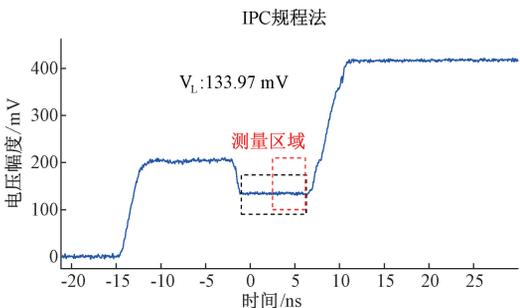
(a) 基准波形图
(a) Reference waveform diagram



(b) 最短区间法测量结果图
(b) Shortest interval method measurement result diagram



(c) 手动选择区间测量结果图
(c) Manual selection interval measurement result Figure



(d) IPC 规程法测量结果图
(d) IPC protocol measurement result diagram

图 7 基准波形及 0.5 m、25 Ω 的同轴电缆测试结果图
Fig. 7 Reference waveform and test results of 0.5 m, 25 Ω coaxial cable

2.2 特性阻抗测量和校准

本实验采用 Visual Studio 2019 开发环境在 .net 平台对本算法进行应用。如图 8 所示,对实验平台进行了搭建。

实验平台包括:一台 BERTWave-E410A 误码仪、一台



图 8 硬件测试平台

Fig. 8 Hardware testing platform

Rigol DG5252 信号发生器、一台自制取样示波器、B006 空气棒(标定值为 50.75 Ω,精度 ±1 Ω)、一台笔记本电脑和若干同轴电缆。在测试中使用误码仪产生 NRZ 数据流作为串行数据输入,其支持 112.5 Mbps~11.3 Gbps 速率串行数据输出;信号发生器产生 250 kHz、200 mV 的方波信号作为脉冲源。

根据仿真结果在示波器软件中加入了特性阻抗测量与校准系统,此系统可以实时处理采集的数据,自动调整校准参数并测量传输线上的电压幅值和阻抗。以下是特性阻抗测量与校准系统工作的流程:

- 1) 启动仪器,选择校准通道;
- 2) 连接电路,点击“测试”,保存基准波形,将开路参数写入数据库中;
- 3) 连接空气棒对参考件进行校准,以空气棒作为标准传输线,测量其传输电压,并根据式(9)计算出参考件的阻抗,写入数据库中。校准结果界面如图 9 所示。



图 9 校准结果界面

Fig. 9 Calibration results interface

根据以上方法,得到参考件的特性阻抗为 51.07 Ω,入射电压为 203.67 mV。

4) 对被测件的阻抗进行测量:被测件选用长度为 1 m 和 0.5 m、阻抗为 25 Ω 和 50 Ω 的 4 根同轴电缆,将其分别连接至探头上。利用特性阻抗测量系统,完成对被测件电压波形的显示和特性阻抗的测量。

3 种测量方法(最短区间法、手动选择测量区域的方法 及 IPC 规程法)及其阻抗测量结果如表 2 所示。

表 2 校准后线缆的特性阻抗结果

Table 2 Characteristic impedance results of calibrated cables

Ω

| 同轴线缆 标定阻抗值 | 最短区间估计法 | | | 手动选择区域测量法 | | | IPC 规程法 | | |
|--------------------|---------|-------|--------|-----------|-------|--------|---------|-------|--------|
| | 测量结果 | 绝对误差 | 相对误差/% | 测量结果 | 绝对误差 | 相对误差/% | 测量结果 | 绝对误差 | 相对误差/% |
| 1 m, 50 Ω | 50.23 | 0.23 | 0.46 | 50.23 | 0.23 | 0.46 | 50.24 | 0.24 | 0.49 |
| 1 m, 25 Ω | 24.95 | -0.05 | -0.20 | 24.96 | -0.04 | -0.16 | 24.95 | -0.05 | -0.20 |
| 0.5 m, 50 Ω | 49.76 | -0.24 | -0.48 | 49.75 | -0.25 | -0.50 | 49.76 | -0.24 | -0.48 |
| 0.5 m, 25 Ω | 25.05 | 0.05 | 0.20 | 25.07 | 0.07 | 0.28 | 25.26 | 0.26 | 1.04 |

由表 2 可以观察到,在测量 50 Ω 同轴线缆的特性阻抗时,3 种方法均展现出了稳定且一致的测量结果,这表明这些方法在测量与空气棒阻值相近的传输线时具有较高的可靠性和准确性。然而,当测量 25 Ω 同轴线缆时,特别是采用手动选择区域测量法和 IPC 规程法时,测量结果呈现出不稳定性。其中,IPC 规程法在测量长度为 0.5 m、阻抗为 25 Ω 的同轴线缆时,其特性阻抗的测量误差显著增大。

相比之下,本文所设计的特性阻抗测量与校准系统准确性较高,同轴线缆特性阻抗的测量结果的误差均在 $\pm 1\%$ 以内,满足阻抗测量要求。

3 结 论

本文设计并实现了一种基于 TDR 技术的传输线阻抗测量和校准系统,结合了阻抗传输校准法以及和波形存储参考校准法,该系统仅需一次空气棒测量即可设定校准参数,简化了校准流程,规避了手动选择所导致的主观误差。此外,本系统还引入了最短区间估计算法,该算法在确保测量精度的前提下,提升了测量效率。最后,对四根同轴线缆进行阻抗测试,实验结果表明,该系统测得的阻抗值绝对误差及相对误差均在允许的范围之内,具有较高的精确度。

参考文献

[1] 庞建龙, 刘琼芳, 杨雨梅. 直流分流器电阻测量结果的不确定度评定[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2024, 42(4): 89-96.
PANG J L, LIU Q F, YANG Y M. Uncertainty evaluation of resistance measurement results of DC shunt [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2024, 42(4): 89-96.

[2] 高本锋, 王义, 范辉, 等. 基于阻尼路径的新能源经 LCC-HVDC 送出系统次同步交互作用分析方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5572-5589.
GAO B F, WANG Y, FAN H, et al. A sub-synchronous interaction analysis method of renewable energy generations integrated with LCC-HVDC system based on damping path [J]. Transactions of China

Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5572-5589.

[3] 纪泽源, 许晓凡, 孙伟, 等. 融合多传感器的飞行器电缆网状态在线监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3): 77-85.
JI Z Y, XU X F, SUN W, et al. Multi-sensor monitoring system and health status classification for air-craft cable networks [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 77-85.

[4] 刘洪庆, 向前. 示波器最新技术进展与发展趋势[J]. 电子质量, 2021(8): 1-5.
LIU H Q, XIANG Q. Latest technology progresses and development trends of oscilloscope [J]. Electronic Quality, 2021(8): 1-5.

[5] 朱江森, 郑香蕊, 赵科佳, 等. 数字示波器宽带探头系统的校准研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 33-38.
ZHU J M, ZHENH X R, ZHAO K J, et al. Calibration of broadband probe system of digital oscilloscope [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 33-38.

[6] 魏明明, 刘小钢, 李蕾. 精密露点仪标准装置校准结果的验证研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(10): 84-90.
WEI M M, LIU X G, LI L. Verification study on calibration results of precision dew point meter standard device [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(10): 84-90.

[7] 高闯. 基于 TDR/SSTDR 电缆故障诊断方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
GAO CH. Research on cable fault diagnosis method based on TDR/SSTDR [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[8] 厉晓梅. TDR 差分测量方法与多点校准技术研究与软件实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
LI X M. Research and software implementation of TDR differential measurement method and multi point

- calibration technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [9] 朱江森, 李超明, 缪京元, 等. 基于 TDR 的特性阻抗时域测量系统的设计与实现[J]. 计量技术, 2016(5): 7-11.
- ZHU J M, LI CH M, MIAO J Y, et al. Design and implementation of time domain measurement system for characteristic impedance based on TDR [J]. Measurement Technology, 2016(5): 7-11.
- [10] YANG S K, LI T H, PANG X H, et al. A nondestructive high-resistance fault diagnosis method of XLPE medium voltage cables based on Chirp-TDR[J]. Measurement, 2024, 235:115021.
- [11] 吴志江. 飞机电缆间歇性故障检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 35-39.
- WU ZH J. Research on intermittent fault detection methods for aircraft cables [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(17): 35-39.
- [12] 张辉, 曾昕. 特性阻抗参数量值传递的研究[J]. 工业计量, 2022, 32(S1): 133-135.
- ZHANG H, ZENG X. Research on the value transfer of characteristic impedance parameters[J]. Industrial Metrology, 2022, 32(S1): 133-135.
- [13] 朱江森, 曲玲玲, 缪京元, 等. 基于 TDR 的特性阻抗测量的数据处理[J]. 电子测量技术, 2015, 38(12): 116-120.
- ZHU J M, QU L L, MIAO J Y, et al. Data processing of characteristic impedance measurement based on TDR [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(12): 116-120.
- [14] 龚鹏伟, 姜河, 谌贝, 等. 基于动态测量的皮秒级上升时间校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 215-222.
- GONG P W, JIANG H, CHEN B, et al. Picosecond level rise time calibration method based on dynamic measurement[J]. Journal of Instrumentation, 2018, 39(3): 215-222.
- [15] WANG Y, SHANG X B, RIDLER N, et al. Material measurements using VNA-based material characterization kits subject to thru-reflect-line calibration [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020, 10(5): 466-473.
- [16] 唐朋飞. 双通道差分 TDR 波形处理技术研究与实践[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- TANG P F. Research and implementation of dual channel differential TDR waveform processing technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [17] 陈加洋, 李东仓, 杨磊, 等. 一种高计数率单道脉冲幅度分析器[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(3): 290-294.
- CHEN J Y, LI D C, YANG L, et al. A high counting rate single channel pulse amplitude analyzer [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2015, 35(3): 290-294.
- [18] 朱江森, 李超明, 缪京元, 等. 基于 TDR 测量的微波反射去除算法的研究[J]. 计量技术, 2016(7): 3-5, 10.
- ZHU J M, LI CH M, MIAO J Y, et al. Research on microwave reflection removal algorithm based on TDR measurement[J]. Measurement Technology, 2016(7): 3-5, 10.
- [19] 肖虎. 矢量网络分析仪误差校准算法及系统软件的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- XIAO H. Design and implementation of error calibration algorithm and system software for vector network analyzer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

作者简介

胡媛媛, 硕士研究生, 主要研究方向为信号获取与处理技术, 仪器与测试技术。

E-mail: 2601948158@qq.com

张敏娟(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为光电信号获取与处理, 傅里叶变换光谱技术研究。

E-mail: zmj7745@163.com

卫晨博, 硕士研究生, 主要研究方向为信号处理和高速电路设计。

E-mail: 1278345042@qq.com

崔一凡, 硕士研究生, 主要研究方向为高速信号的获取与处理。

E-mail: 1403495296@qq.com

高云峰, 硕士研究生, 主要研究方向为系统设计与仿真。

E-mail: 1005468620@qq.com