

# 基于时域反射法的电力电缆网络故障诊断方法研究

董海迪<sup>1</sup>, 张瑞<sup>1</sup>, 王浙娜<sup>2</sup>, 金凯<sup>1</sup>, 高迎彬<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学 兵器工程学院, 武汉 430030;

2. 中国人民解放军 92578 部队, 北京 100071;

3. 中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050050)

**摘要:** 针对维护大规模老化电力电缆网络这一关键挑战, 通过详细描述电力电缆中的信号传输物理模型, 提取反射信号和透射信号中的故障特征, 研究基于时域反射法的电力电缆网络故障诊断方法, 实现电缆网络故障的快速辨识与定位; 以最小单元 Y 型电缆网络为研究对象并建立其物理模型, 利用分布式检测时测点之间的反射信号及透射信号所反映出的信号传播路径和阻抗不匹配信息, 开展多源信息融合的电缆网络故障诊断方法研究; 在 Matlab/Simulink 软件环境中搭建 Y 型电缆网络的故障仿真模型, 通过设计不同主干、分支线路故障的仿真实验, 验证了方法的有效性和适用范围, 测量得到的故障距离相对误差限定在 1% 内。

**关键词:** 电力电缆; 电缆网络; 故障诊断; 时域反射法; 透射信号

## Research on Fault Diagnosis Method of Power Cable Network Based on Time Domain Reflectometry

DONG Haidi<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, WANG Xina<sup>2</sup>, JIN Kai<sup>1</sup>, GAO Yingbin<sup>3</sup>

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430030, China;

2. Unit 92578 of the PLA, Beijing 100071, China;

3. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050050, China)

**Abstract:** Aiming at the key challenge of maintaining large-scale aging power cable networks, the physical model of signal transmission in power cables was described in detail to extract the fault characteristics of reflected signal and transmitted signal. The fault diagnosis method of power cable network based on time domain reflection method was studied to realize the rapid identification and location of cable network faults. Taking the minimum unit Y-type cable network as the research object, and establishing its physical model, the signal propagation path and impedance mismatch information were reflected by the reflected signal and transmitted signal between the measuring points in the distributed detection, which studied the cable fault diagnosis method based on the multi-source information fusion. The fault simulation model of Y-type cable network was built in Matlab/Simulink software environment. The experimental results show the method verifies the effectiveness and application range of in the different trunk and branch lines. The relative error of the measured fault distance is within 1%.

**Keyword:** power cables; cable network; fault diagnosis; time domain reflectometry; transmission signal

## 0 引言

电缆作为传输电能、控制信号和数据信息的重要媒介, 广泛应用于汽车、航空航天、交通运输、核电站、基础设施等领域。由于内部应力和外界环境的综合作用, 电缆在使用过程中不可避免地产生性能退化或劣化, 如磨损、疲劳、腐蚀、老化、蠕变等, 并最终可能演化为故障<sup>[1]</sup>。电缆的监测、诊断和维护是一项艰巨任务, 很多时候需要完全拆除设备外壳, 耗费大量时间、金钱、人员和资源, 并

存在较大安全风险。

电缆的故障诊断方法有目检法、X 射线、超声波、红外热成像、阻抗法(电桥法)、高压脉冲法和反射法等, 其中反射法具有方法实现简单, 测量准确度高而被广泛采用<sup>[2]</sup>。电缆故障诊断反射方法按照激励信号和激励一响应输出信号的处理方法差异, 主要包括: 时域反射法<sup>[3]</sup>、混沌时域反射法<sup>[4]</sup>、扩频时域反射法<sup>[5]</sup>、频域反射法<sup>[6]</sup>、时频域反射法<sup>[7]</sup>等。时域反射法、频域反射法和时频域反射法由于存在测试激励信号与在电缆中实时传输的信号存在严

收稿日期: 2023-04-02; 修回日期: 2023-05-19。

基金项目: 国家自然科学基金(62101579, 62106242)。

作者简介: 董海迪(1988-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 董海迪, 张瑞, 王浙娜, 等. 基于时域反射法的电力电缆网络故障诊断方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3):

30-36.

重干扰等问题, 仅适用于电缆故障的离线测量<sup>[8-10]</sup>。

基于网络拓扑结构的先验信息, 和通过反射法测量得到的故障特征信息, 运用智能推理算法得到电缆网络故障的故障类型和距离信息<sup>[11-16]</sup>。经典的智能推理算法有: 遗传算法、神经网络、模糊推理、回溯算法、支持向量机、粒子群算法等, 具体步骤为<sup>[17-18]</sup>: 1) 分析电缆网络的拓扑结构; 2) 通过反射法测量得到电缆网络的故障特征信息; 3) 建立电缆网络的故障诊断正演模型, 运用时域有限差分元等方法模拟仿真故障响应; 4) 应用智能推理算法完成故障网络信息的定位。但这些智能推理算法通常存在运算时间长, 且只能实现离线故障诊断。第二类是基于分布式检测技术的电缆网络故障诊断方法<sup>[19-21]</sup>, 方法原理为: 在电缆网络的多端口施加激励, 同时采集多个网络端口的输出响应, 将各个端口出的故障信息结果进行融合处理, 从而确定出电缆网络的故障发生点位。基于分布式检测技术的故障诊断方法能够将故障定位到电缆网络的具体分支上, 与单端口检测方法相比具有更高的检测准确性和测量精度, 但该方法主要基于离线信息, 同时还存在测试端口设置多, 传感器数量过大等缺陷。

本文以最小单元 Y 型电缆网络为研究对象并建立其物理模型, 利用分布式检测时测点之间的反射信号及透射信号所反映的信号传播路径和阻抗不匹配信息, 开展多源信息融合的电缆网络故障诊断方法研究。论文结构安排如下: 第 1 节分析时域反射法的电缆故障诊断原理; 第 2 节分析 Y 型电缆网络的物理模型; 第 3 节搭建电缆网络的故障诊断仿真模型; 第 4 节设计故障诊断仿真实验, 验证方法的有效性和适用范围; 最后是论文的总结。

### 1 时域反射法的电缆故障诊断原理

基于时域反射法的电缆故障诊断方法的基本原理如图 1 所示, 具体为: 通过发送一个低压高频信号至待测电缆中, 当检测信号传输至由故障引起的阻抗不匹配点时, 会产生反射信号, 在发送端采集电缆终端反射而来的信号, 通过测量入射信号与反射信号的时间延时实现故障定位和测距。

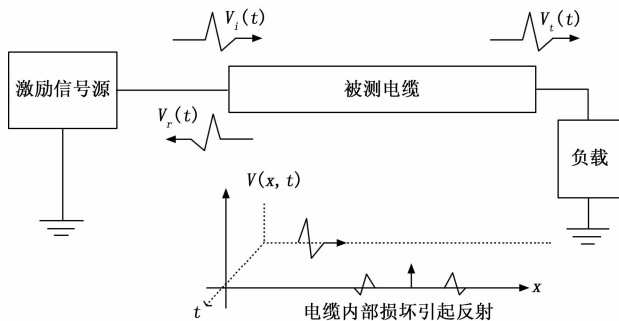


图 1 时域反射法的方法原理

对于传输线而言, 若其几何长度  $L$  大于输入电磁波的最小波长, 则为长线, 反之则为短线。当传输高频信号时, 传输线将在“下行”状态下运行。如果信号输入“架空线”, 它将形成分布参数效应, 即处于稳定运行场景下, 传

输线电压与电流会随线长度、时间发生改变。再者, 传输线间电阻  $R_0$ 、电感  $L_0$ 、电容  $C_0$  与电导  $G_0$  相互间无法分割, 并沿线路随机分布。相关模型图如图 2 所示。

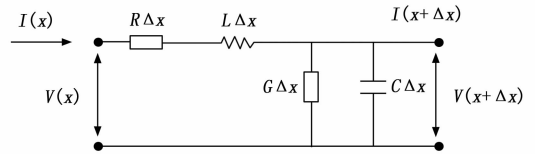


图 2 传输线分布参数模型

单位长度传输线上的  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$ 、 $G_0$ , 一般统称作分布参数。当采用高频输入信号检测电缆时, 电缆等效为均匀传输线。基于分布参数模型, 可以将一条均匀的传输线划分为若干部分, 每个  $\Delta x$  作为一个集总参数电路, 则整个电缆可以看作是许多个微小的集总电路参数线元素  $\Delta x$  的级联。

采用 Kirchhoff 电压法与电流法 (KVL、KCL) 描述电缆的集总参数模型, 得到:

$$\begin{cases} u - (u + \partial \frac{\partial u}{\partial x} dx) = R_0 dx i + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} \\ i - (i + \partial \frac{\partial i}{\partial x} dx) = G_0 dx (u + \frac{\partial u}{\partial x} dx) + C_0 dx \frac{\partial}{\partial x} (u + \frac{\partial u}{\partial x} dx) \end{cases} \quad (1)$$

通过合理简化, 可得到均匀传输线的电压和电流相关时域电报方程:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial t} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

解电报方程能够计算出传输线上任何点的电压与电流值。

如果高频信号在电缆中传输时遭遇到故障造成的阻抗不匹配点时, 将产生反射信号和透射信号。传输线某一点的反射系数定义为反射信号电压与该点的入射电压之比:

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (3)$$

式中,  $Z_L$  表示电缆阻抗不匹配时的阻抗;  $Z_c$  表示传输线特征阻抗, 定义为行波电压、电流之比, 其大小为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (4)$$

透射系数定义为入射电压与电流比值, 则得到:

$$\gamma_L = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_c} \quad (5)$$

结合式 (3) 和式 (5), 透射系数和反射系数满足:

$$\gamma_L = 1 + \rho_L \quad (6)$$

考虑高频低损耗传输线满足  $R_0 \ll \omega L_0, G_0 \ll \omega C_0$ , 式 (4) 可以简化为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (7)$$

传播常数是定义传输线上入射和反射波对于相位变化的参数, 计算公式为:

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \quad (8)$$

则衰减常数和相移常数满足:

$$\alpha = \frac{R_0}{2Z_0}, \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} \quad (9)$$

电磁波的传播速度与频率和相移常数相关, 则在高频时存在以下关系:

$$Z_C = Z_L \quad (10)$$

$$d = \frac{1}{2}vt \quad (11)$$

根据反射系数与透射系数之间的关系得到<sup>[17]</sup>:

(1) 如果电缆线路中未发生故障, 则终端阻抗满足  $Z_C = Z_L$ , 此时电缆反射系数为 0, 信号在均匀电缆中正向传播, 未发生发射现象;

(2) 如果电缆内部发生短路故障, 则终端阻抗(发生短路故障位置的阻抗)近似为 0, 此时电缆反射系数近似为 -1, 表示入射信号全部发生了反射, 且入射信号与反射信号的幅值极性翻转;

(3) 如果电缆内部发生了开路故障, 则终端阻抗(发生开路故障位置的阻抗)会远大于均匀电缆的特征阻抗, 此时电缆反射系数为 1, 即表示入射信号全部发生了反射, 且入射信号与反射信号的幅值极性相同;

(4) 如果电缆内部发生了低阻故障, 则在在阻抗不匹配点处(故障位置)的电缆阻抗会小于均匀电缆的特征阻抗, 则电缆反射系数小于零, 透射系数小于 1。

## 2 Y 型电缆网络反射信号的物理模型

当电缆网络中注入高频信号作为入射信号时, 可以采用 RLGC 分布参数模型来描述均匀传输电缆网络的分段参数, 论文以最小网络单元 Y 型电缆网络为研究对象, 拓扑结构如图 3 所示。

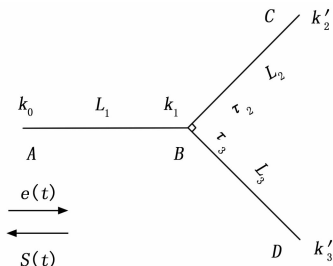


图 3 Y 型电缆拓扑结构

本文研究的对象是每个分支的特性阻抗都为  $Z_c$  的相同构造的网络。通过 TDR 方法检测 Y 型电缆网故障期间, 假定支路 2 和支路 3 的反射系数分别为  $k'_2$  和  $k'_3$ , 且反射系数模拟支路 2 和支路 3 上的故障。等效反射系数  $k_2$  和  $k_3$  满足以下公式:

$$k_{2,3} = e^{-2\gamma_{L_{2,3}}} k'_{2,3} \quad (12)$$

式中,  $L_2$  和  $L_3$  分别表示为支路 2 和支路 3 的距离。

根据文献 [22] 得到  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  之间满足:

$$k_1 = \frac{-1 + k_2 + k_3 + 3k_2k_3}{3 + k_2 + k_3 - k_2k_3} \quad (13)$$

根据式 (12) 可推算出关于电缆网等效反射系数  $k_0$ , 满足以下公式:

$$k_0 = e^{-2\gamma L_1} k_1 \quad (14)$$

式中, 支路 1 的长度为  $L_1$  发送反射信号的端口为  $k_0$ 。则可以通过反傅里叶变换得出时域反射法的脉冲响应  $h(k)$ 。

由于式 (13) 的  $k_1$  的形式复杂, 将  $k_1$  使用多项式除法得出更接近于电缆中信号传播的物理模型。化简的公式如下:

$$k_1 = -\frac{1}{3} + \frac{4}{9}(k_2 + k_3) - \frac{4}{27}(k_2^2 + k_3^2) + \frac{16}{27}k_2k_3 + \frac{16}{81}k_2^2k_3^2 - \frac{4}{81}(k_2^3 + k_3^3) - \frac{8}{81}(k_2k_3^2 + k_3k_2^2) + \dots \quad (15)$$

结合式 (14) 及式 (15) 可知  $h(k)$  的表达式可化为:

$$h(k) = \frac{1}{2\pi} \left[ -\frac{1}{3} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\gamma L_1 + j\omega k} d\omega + \frac{4}{9} \int_{-\infty}^{+\infty} (k_2 + k_3) e^{-2\gamma L_1 + j\omega k} d\omega + \dots \right] \quad (16)$$

联立式 (12)、(13) 及 (14), 可将式 (15) 整理为 (16), 从公式可分析出信号的检测端口所获取的脉冲信号, 可作为通过不同路径的入射脉冲信号, 并受到电缆衰减及时间延迟的作用下传递到检测端口。

$$h(k) = \frac{1}{3} e^{-\alpha L_1} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega(k-2L_1/v)} d\omega \right] + \frac{4}{9} k'_2 e^{-2\alpha(L_1+L_2)} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega(k-2(L_1+L_2)/v)} d\omega \right] + \frac{4}{9} k'_3 e^{-2\alpha(L_1+L_3)} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega(k-2(L_1+L_3)/v)} d\omega \right] + \dots \quad (17)$$

表 1 不同路径的反射信号相关参数

路径编号 i	信号传输路径	反射波信号幅值大小	延迟时间
1	A-B-A	$-1/3e^{-2\alpha L_1}$	$2L_1/v$
2	A-B-C-B-A	$\frac{4}{9}k'_2 e^{-2\alpha(L_1+L_2)}$	$2(L_1+L_2)/v$
3	A-B-D-B-A	$\frac{4}{9}k'_3 e^{-2\alpha(L_1+L_3)}$	$2(L_1+L_3)/v$
4	A-B-C-B-C-B-A	$\frac{4}{27}k'_2{}^2 e^{-2\alpha(L_1+2L_2)}$	$2(L_1+2L_2)/v$
...	...	...	...

## 3 电缆网络的故障仿真模型建立

为了验证结合透射信号信息的时域反射法用于 Y 型电缆网络故障诊断定位的可行性, 在 Matlab/Simulink 中搭建基于时域反射法测量原理的电缆网络故障仿真模型<sup>[3,9]</sup>, 具体如图 4 所示。通过两个阶跃信号产生模块 Step 和 Step1 合成低压脉冲信号作为激励信号源, 向电缆网络发送检测信号, 经过受控电压源 Controlled Voltage Source 将数字信号转化为模拟信号, 并将模拟信号作为激励信号, 生成脉冲激励输入待测电缆网络中, 仿真设置主干电缆开路、短路,

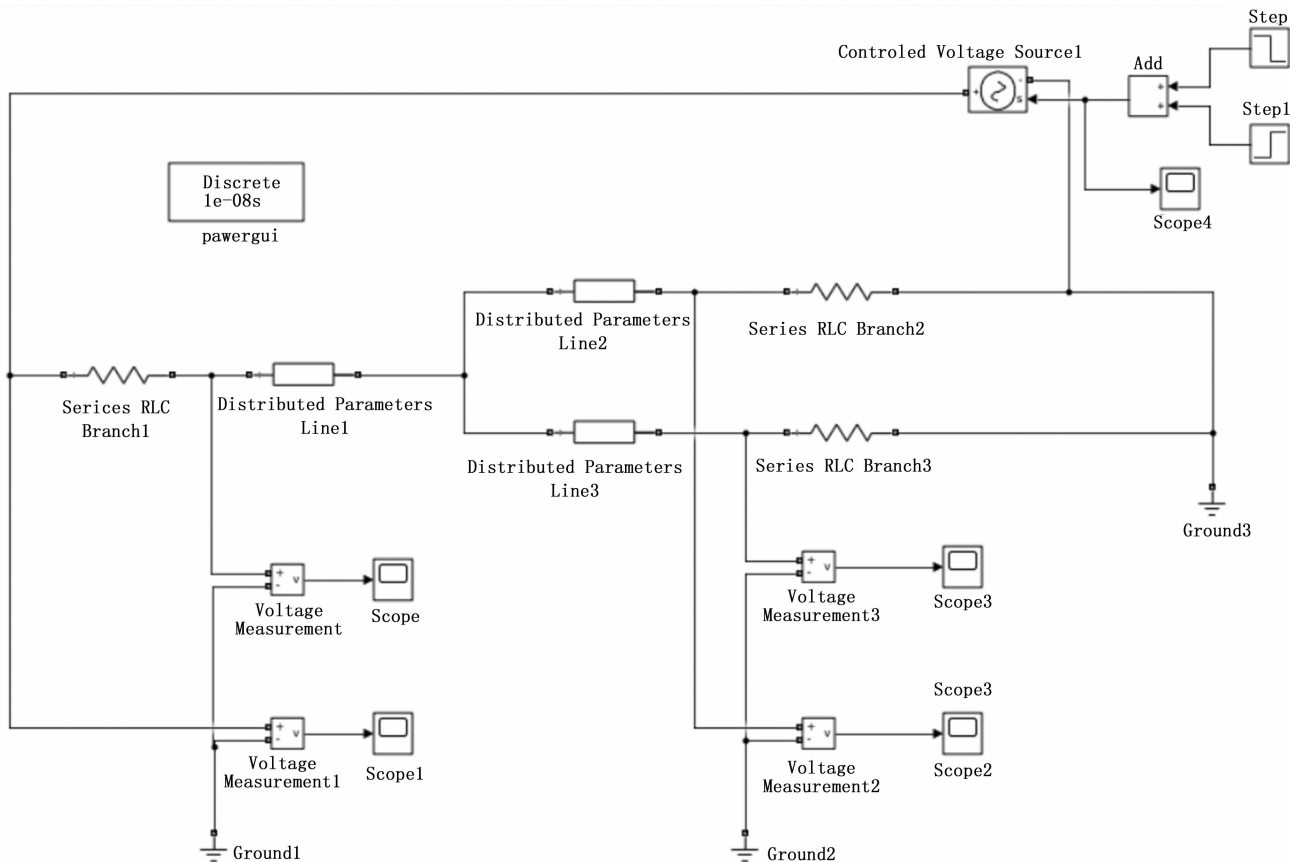


图4 基于时域反射法的电缆网络故障仿真模型图

分支电缆开路、短路等故障类型和不同故障发生部位。电缆故障位置的设置方法为：将单根均匀电缆设置为两段 (Distributed Parameters Line1 与 Distributed Parameters Line2)，在保持电缆总长度不变的限定条件下，通过改变 Distributed Parameters Line1 的长度设定故障位置；通过在 Distributed Parameters Line1 与 Distributed Parameters Line2 之间设置短路故障、开路故障、低阻故障和高阻故障来模拟实际情况的故障类型。

示波器模块 Scope 的作用为观测入射脉冲信号及反射信号；示波器模块 Scope1 的作用是观测通过可控电压源模块 Controlled Voltage Source1 转化后的数字信号；示波器模块 Scope2 和 Scope3 的作用是观测典型故障类型仿真模式下两个分支的透射信号波形。通过示波器模块 Scope 观察反射信号波形及信号传播延迟时间，用示波器模块 Scope2 观察分支一的透射信号反映的路径信息，用示波器模块 Scope3 观察分支二的透射信号反映的路径信息。用测量得到的反射信号幅值及传播延迟时间初步判断出故障类型和发生位置，综合两条电缆支路测量得到的透射信号所反映的路径信息，最终确定故障发生的准确位置。

#### 4 电缆网络的故障仿真实验

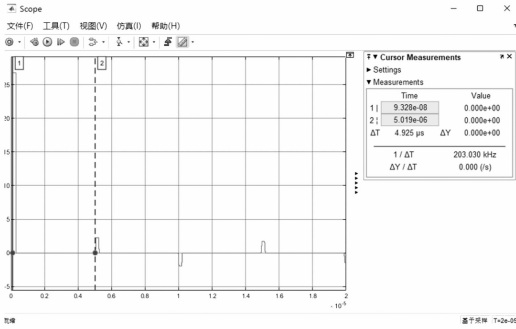
##### 4.1 主干电路开路故障

在仿真模型 4 的基础上，搭建主干电缆网络发生开路故障的仿真模型。将主干电缆细分为两段电缆模块 Distrib-

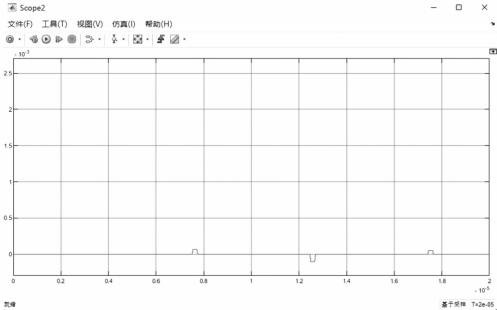
uted Parameters Line1 和电缆模块 Distributed Parameters Line4，则 Y 型电缆网络被细分为电缆模块 Distributed Parameters Line1、电缆模块 Distributed Parameters Line2、电缆模块 Distributed Parameters Lin3 和电缆模块 Distributed Parameters Lin4 四个部段。将电缆模块 Distributed Parameters Line1、电缆模块 Distributed Parameters Line2、电缆模块 Distributed Parameters Lin3 和电缆模块 Distributed Parameters Lin4 的电缆长度分别标记为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 。设置电缆网络中主干电缆的总长度为 1 km，即满足  $L_1 + L_4 = 1 \text{ km}$ ，在距离激励信号端口  $L_1$  处设置开路故障，通过改变故障点距离  $L_1$  实现不同故障长度的仿真实验，最后运用 TDR 法实现 Y 型电缆网络主干电缆开路故障的距离测量。仿真参数设置如下：用阻抗远远大于特征阻抗的电阻来代替电缆的开路情况，仿真实验时将 Series RLC Branch4 (表示终端负载) 的阻值设置为  $1\ 000\ \Omega$ ，仿真了 4 个不同距离的开路故障，开路故障分别发生在距离源端 200 m、400 m、600 m、800 m 处。示波器采集到的入射端口和两个分支端口的信号如图 5 所示。

根据示波器 Scope 的观测结果能够判断出电缆发生的故障类型为开路故障，测量得到信号传播的延迟时间为  $4.925\ \mu\text{s}$ ，直接代入式 (11) 进行计算，得到故障终端和电缆始端之间的距离为  $d=199.463\ \text{m}$ ，具体计算如下：

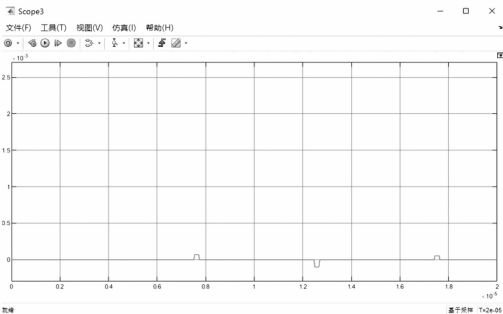
$$L = \frac{\Delta t * v}{2} =$$



(a) 入射端口



(b) 分支一输出口



(c) 分支二输出口

图 5 故障点在电缆网络端口 200 m 处反射和透射信号

$$0.5 \times 0.81 \times 10^8 \text{ m/s} \times 4.925 \mu\text{s} = 199.463 \text{ m}$$

根据图 5 (b) 与图 5 (c) 不难发现,透射信号由于长距离传输衰减严重,且衰减程度相同可判断出电缆网络故障位置位于主干电缆上,即可完成 Y 型电缆网络的主干开路故障类型判断。基于相同的计算步骤,完成其他 3 种不同故障位置的仿真测量,得到实验结果如表 2 所示。

表 2 主干开路故障的实验数据

实际故障距离/m	反射延迟时间/ $\mu\text{s}$	测试故障距离/m	相对误差/%
200	4.925	199.463	0.269
400	9.872	399.816	0.046
600	14.810	599.805	0.033
800	19.784	801.252	0.157

由表 2 仿真实验数据可知, Y 型电缆网络中主干电缆发生开路故障的测试距离与仿真设定的实际距离的相对误差不高于 0.3%,从而验证了基于时域反射法的电缆网络故障诊断方法在主干电缆发生开路故障时的可行性,且故障定

位具有较高的测量精度。

### 4.2 主干电路低阻故障

在仿真模型 4 的基础上,搭建主干电缆网络发生低阻(短路)故障的仿真模型。将主干电缆细分为两段电缆模块 Distributed Parameters Line1 和电缆模块 Distributed Parameters Line4,在电缆模块 Distributed Parameters Line1 与电缆模块 Distributed Parameters Line4 之间增加一条支路,并将电阻模块 Series RLC Branch4 串联接入支路后与地线短接,即模拟主干电缆发生低阻(短路)故障。则 Y 型电缆网络被细分为电缆模块 Distributed Parameters Line1、电缆模块 Distributed Parameters Line2、电缆模块 Distributed Parameters Lin3 和电缆模块 Distributed Parameters Lin4 四个部段。将电缆模块 Distributed Parameters Line1、电缆模块 Distributed Parameters Lin2、电缆模块 Distributed Parameters Lin3 和电缆模块 Distributed Parameters Lin4 的电缆长度分别标记为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 。设置电缆网络中主干电缆的总长度为 1 km,即满足  $L_1 + L_4 = 1 \text{ km}$ ,在距离激励信号端口  $L_1$  处设置低阻(短路)故障,通过改变故障点距离  $L_1$  实现不同故障长度的仿真实验,最后运用 TDR 法实现 Y 型电缆网络主干电缆低阻(短路)故障的距离测量。

仿真参数设置如下:通过并联阻抗远远小于特征阻抗的电阻来代替电缆的短路情况,仿真实验时将 Series RLC Branch4 (表示终端负载)的阻值设置为  $0.001 \Omega$ ,仿真了 4 个不同距离的低阻故障,低阻故障分别发生在距离源端 200 m、400 m、600 m、800 m 处。

根据示波器 Scope 的观测结果能够判断出电缆发生的故障类型为低阻故障,测量得到信号传播的延迟时间为  $4.933 \mu\text{s}$ ,直接代入式(11)进行计算,得到故障终端和电缆始端之间的距离为  $d = 199.787 \text{ m}$ ,具体计算如下:

$$L = \frac{\Delta t \times v}{2} =$$

$$0.5 \times 0.81 \times 10^8 \text{ m/s} \times 4.933 \mu\text{s} = 199.787 \text{ m}$$

根据示波器 Scope2 和 Scope3 分别采集得到的电缆分支一、分支二输出端口的透射信号波形图,不难发现,透射信号由于主干电缆低阻故障以及信号长距离传播衰减严重,几乎接收不到信号,故可以判定电缆网络发生了低阻故障。而两条支路的透射信号衰减程度相同则可以判断出电缆网络故障位置位于主干网络上,即可完成 Y 型电缆网络的主干低阻故障类型判断。基于相同的计算步骤,完成其他 3 种不同故障位置的仿真测量,得到实验结果如表 3 所示。

表 3 主干低阻故障的实验数据

实际故障距离/m	反射延迟时间/ $\mu\text{s}$	测试故障距离/m	相对误差/%
200	4.933	199.787	0.107
400	9.872	399.816	0.046
600	14.845	601.223	0.204
800	19.749	799.835	0.021

由表3仿真实验数据可知, Y型电缆网络中主干电缆发生低阻故障的测试距离与仿真设定的实际距离的相对误差不高于0.3%, 从而验证了基于时域反射法的电缆网络故障诊断方法在主干电缆发生低阻故障时的可行性, 且故障定位具有较高的测量精度。

#### 4.3 分支电路开路故障

在仿真模型4的基础上, 搭建分支电缆网络发生开路故障的仿真模型。将分支电缆细分为两段电缆模块 Distributed Parameters Line2 和电缆模块 Distributed Parameters Line4, 则Y型电缆网络被细分为电缆模块 Distributed Parameters Line1、电缆模块 Distributed Parameters Line2、电缆模块 Distributed Parameters Lin3 和电缆模块 Distributed Parameters Lin4 四个部段。将电缆模块 Distributed Parameters Line1、电缆模块 Distributed Parameters Line2、电缆模块 Distributed Parameters Lin3 和电缆模块 Distributed Parameters Lin4 的电缆长度分别标记为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 。

设置电缆网络主干到分支一的总长度为  $L_1 + L_2 + L_4 = 1$  km, 为了方便计算固定  $L_1$  的长度为 200 m, 在距离激励信号端口  $L_1 + L_2$  处设置分支开路故障, 通过改变故障点距离  $L_1 + L_2$  实现不同故障长度的仿真实验, 最后运用 TDR 法实现 Y 型电缆网络分支电缆开路故障的距离测量。仿真参数设置如下: 用阻抗远远大于特征阻抗的电阻来代替电缆的开路情况, 仿真实验时将 Series RLC Branch4 (表示终端负载) 的阻值设置为 1 000  $\Omega$ , 仿真了 4 个不同距离的开路故障, 开路故障分别发生在距离源端 300 m、500 m、700 m、900 m 处。

根据示波器 Scope 的观测结果可知, 反射信号出现开路故障点说明 Y 型电缆网络存在开路故障, 可以根据开路故障点的反射延迟时间初步判断开路故障位置, 但由于信号传播多路径的影响无法判断故障所在位置。测量得到信号传播的延迟时间为  $L_1 = 7.350 \mu\text{s}$ , 直接代入式 (11) 进行计算, 得到故障终端和电缆始端之间的距离为  $d = 297.675$  m, 具体计算如下:

$$L = \frac{\Delta t * v}{2} =$$

$$0.5 \times 0.81 \times 10^8 \text{ m/s} \times 7.350 \mu\text{s} = 297.675 \text{ m}$$

根据示波器 Scope2 和 Scope3 分别采集得到的电缆分支一、分支二输出端口的透射信号波形图, 不难发现, 分支一的透射信号衰减程度较弱, 说明故障位于分支一上, 即可完成 Y 型电缆网络的分支故障类型判断和距离测量。基于相同的计算步骤, 完成其他 3 种不同故障位置的仿真测量, 得到实验结果如表 4 所示。

由表 4 仿真实验数据可知, Y 型电缆网络中分支电缆发生开路故障的测试距离与仿真设定的实际距离的相对误差不高于 0.8%, 从而验证了基于时域反射法的电缆网络故障诊断方法在分支电缆发生开路故障时的可行性, 且故障

定位具有较高的测量精度。

表 4 分支开路故障的实验数据

实际故障距离/m	反射延迟时间/ $\mu\text{s}$	测试故障距离/m	相对误差/%
300	7.350	297.675	0.775
500	12.359	500.540	0.108
700	17.297	700.529	0.076
900	22.262	901.611	0.179

#### 4.4 分支电路低阻故障

在仿真模型 4 的基础上, 搭建分支电缆网络发生低阻 (短路) 故障的仿真模型。将分支电缆细分为两段电缆模块 Distributed Parameters Line2 和电缆模块 Distributed Parameters Line4, 在电缆模块 Distributed Parameters Line2 与电缆模块 Distributed Parameters Line4 之间增加一条支路, 并将电阻模块 Series RLC Branch4 串联接入支路后与地线短接, 即模拟分支电缆发生低阻 (短路) 故障。则 Y 型电缆网络被细分为电缆模块 Distributed Parameters Line1、电缆模块 Distributed Parameters Line2、电缆模块 Distributed Parameters Lin3 和电缆模块 Distributed Parameters Lin4 四个部段。将电缆模块 Distributed Parameters Line1、电缆模块 Distributed Parameters Line2、电缆模块 Distributed Parameters Lin3 和电缆模块 Distributed Parameters Lin4 的电缆长度分别标记为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 。

设置电缆网络主干到分支一的总长度为  $L_1 + L_2 + L_4 = 1$  km, 为了方便计算固定  $L_1$  的长度为 200 m, 在距离激励信号端口  $L_1 + L_2$  处设置分支低阻 (短路) 故障, 通过改变故障点距离  $L_1 + L_2$  实现不同故障长度的仿真实验, 最后运用 TDR 法实现 Y 型电缆网络分支电缆低阻 (短路) 故障的距离测量。仿真参数设置如下: 通过并联阻抗远远小于特征阻抗的电阻来代替电缆的短路情况, 仿真实验时将 Series RLC Branch4 (表示终端负载) 的阻值设置为 0.001  $\Omega$ , 仿真了 4 个不同距离的低阻故障, 低阻故障分别发生在距离源端 300 m、500 m、700 m、900 m 处。

根据示波器 Scope 的观测结果能够判断出电缆发生的故障类型为低阻故障, 测量得到信号传播的延迟时间为  $7.42 \mu\text{s}$ , 直接代入式 (11) 进行计算, 得到故障终端和电缆始端之间的距离为  $d = 300.51$  m, 具体计算如下:

$$L = \frac{\Delta t * v}{2} =$$

$$0.5 \times 0.81 \times 10^8 \text{ m/s} \times 7.42 \mu\text{s} = 300.51 \text{ m}$$

根据示波器 Scope2 和 Scope3 分别采集得到的电缆分支一、分支二输出端口的透射信号波形图, 不难发现, 分支一的透射信号没有, 分支二有较强的透射信号, 说明低阻故障位于分支一上, 即可完成 Y 型电缆网络的分支故障类型判断和距离测量。基于相同的计算步骤, 完成其他 3 种不同故障位置的仿真测量, 得到实验结果如表 5 所示。

表 5 分支低阻故障的实验数据

实际故障 距离/m	反射延迟 时间/ $\mu\text{s}$	测试故障 距离/m	相对误差/%
300	7.420	300.510	0.170
500	12.359	500.540	0.108
700	17.332	701.946	0.278
900	22.258	901.449	0.161

由表 5 仿真实验数据可知, Y 型电缆网络中分支电缆发生低阻故障的测试距离与仿真设定的实际距离的相对误差不高于 0.3%, 从而验证了基于时域反射法的电缆网络故障诊断方法在分支电缆发生低阻故障时的可行性, 且故障定位具有较高的测量精度。

## 5 结束语

本文提出了一种基于时域反射法的电缆网络故障诊断方法, 充分利用分布式检测时测点之间的反射信号及透射信号所反映的信号传播路径信息和阻抗不匹配信息, 实现电缆网络的分支定位和故障辨识, 最后通过设计不同主干和分支网络的故障诊断仿真实验, 验证该方法适用于电缆网络的开路和低阻故障, 具有较高的诊断精度。

### 参考文献:

- [1] NASA Ames Research Center Moffett Field CA 94035. Aging aircraft wiring fault detection survey prepared for the aviation safety program aircraft aging & durability project as part of the wiring fault detection challenge problem [R]. USA, 2007.
- [2] FURSE C, CHUNG Y C, LO C, et al. A critical comparison of reflectometry methods for location of wiring faults [J]. Smart Structures and Systems, 2006, 2 (1): 25-46.
- [3] 王瑶瑶, 姚周飞, 谢伟, 等. 基于时频域反射法的高温超导电缆故障定位研究 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-7 [2021-03-08]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201969>.
- [4] 毛健美, 王莉, 胡苏阳, 等. 混沌扩频多根电缆故障在线同步诊断研究 [J]. 电子学报, 2018, 46 (7): 1625-1632.
- [5] VELAYUDHAN V, BZIKHA I, REINEIX A. Experimental detection of soft faults on cables using chaos time-domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 61 (4): 1191-1197.
- [6] SHIN Y J, POWERS E J, CHOE T S, et al. Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54 (6): 2493-2500.
- [7] CHANG S J, PARK J B. Wire mismatch detection using a convolutional neural network and fault localization based on time-frequency-domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66 (3): 2102-2110.
- [8] CHANG S J, PARK J B. Wire Mismatch Detection Using a

- Convolutional Neural Network and Fault Localization Based on Time-Frequency-Domain Reflectometry [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66 (3): 2102-2110.
- [9] 吴春华, 胡雅, 李智华, 等. 基于 SSTDR 的光伏系统直流母线电弧故障在线检测与定位 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (8): 2725-2735.
- [10] 尹振东, 王莉, 陈洪圳, 等. 增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (23): 7760-7773.
- [11] KAFAL M, BENOIT J, COZZA A, et al. A statistical study of dort method for locating soft faults in complex wire networks [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 54 (3): 1-4.
- [12] SMAIL M K, BOUCHEKARE H, PICHON L, et al. Non-destructive diagnosis of wiring networks using time domain reflectometry and an improved black hole algorithm [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 32 (3): 286-300.
- [13] LAIB A, MELIT M, NEKHOUL B, et al. Localisation of faults in wiring networks using time domain reflectometry and adaptive neuro-fuzzy inference system [J]. Electronics Letters, 2017, 53 (9): 600-602.
- [14] SMAIL M K, BOUBEZOUL A, BOUCHEKARA H R E H, et al. Wiring networks diagnosis using time-domain reflectometry and support vector machines [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 14 (2): 220-224.
- [15] BOUDJEFDJOUF H, MEHASNI R, ORLANDI A, et al. Diagnosis of multiple wiring faults using time-domain reflectometry and teaching-learning-based optimization [J]. Electromagnetics, 2015, 35 (1): 10-24.
- [16] LEE C K, SHIN Y J. Detection and Assessment of I&C Cable Faults Using Time-Frequency R-CNN-Based Reflectometry [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68 (2): 1581-1590.
- [17] CHANG S J, PARK J B. Wire Mismatch Detection Using a Convolutional Neural Network and Fault Localization Based on Time-Frequency-Domain Reflectometry [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66 (3): 2102-2110.
- [18] 王慧. 具有分支拓扑的电缆网络故障定位方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [19] CHANG S J, Park J B. Wire mismatch detection using a convolutional neural network and fault localization based on time-frequency-domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66 (3): 2102-2110.
- [20] 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.
- [21] 贾世军. 传输线网络多点故障定位方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [22] AUZANNEAU F, OLIVAS M, RAVOT N. A simple and accurate model for wire diagnosis using reflectometry [J]. Piers Proceedings, 2007.