

# 线缆故障检测方法

刘红<sup>1,2,3</sup>, 周国忠<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 光束控制重点实验室, 成都 610209; 2. 中国科学院 光电技术研究所, 成都 610209;  
3. 中国科学院大学, 北京 101400)

**摘要:** 为了满足设备线缆维修快速性和准确性的需求, 减少设备资源和人力的浪费, 分析了线缆的故障模式, 总结了目前常用的线缆故障检测方法, 主要分为传统的故障检测方法和基于反射法的故障检测方法, 其中传统的故障检测方法包括电桥法、音频感应法和行波法, 基于反射法的故障检测基本方法包括时域反射法和频域反射法, 详细描述了传统的故障检测方法、基于反射法的故障检测方法的原理和这些方法在线缆检测过程中存在的问题, 并总结了目前基于时域反射法和频域反射法与其他的信号处理方法结合的线缆故障检测, 方便了设备线缆维修时的方法的选择; 最后根据线缆故障检测方法的发展现状, 总结了目前线缆故障检测技术存在的问题, 为今后的研究提供了新的方向。

**关键词:** 故障检测; 线缆; 故障模式; 时域反射法; 频域反射法

## Research of Cable Fault Detection Methods

Liu Hong<sup>1,2,3</sup>, Zhou Guozhong<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

**Abstract:** Equipment cable maintenance has the need for speed, accuracy, reducing the waste of equipment resources and human resources, so, the failure modes of cables and the current commonly used cable fault detection methods summarize, the cable fault detection methods are mainly divided into traditional fault detection methods and fault detection method based on reflection method, where traditional fault detection methods include bridge method, audio induction method and traveling wave method, and basic methods of fault detection based on reflection include time domain reflection (TDR) method and frequency domain reflection (FDR) method. The principles and the problems of these methods are described, and summarizing the current cable fault detection based on the TDR and FDR combined with other signal processing methods, which facilitate the choice of the method of equipment cable maintenance. Finally, according to the development status of cable fault detection methods, the current problems of cable fault detection technology are summarized, which provides a new direction for future research.

**Keywords:** Fault detection; cable; failure mode; Time Domain Reflection; Frequency Domain Reflection

## 0 引言

设备的发展带动线缆的发展, 线缆作为实现系统信息传输、供电的重要介质, 是实现系统功能的重要保障, 随着设备线束的增加, 线缆故障的频率增高, 对设备的维修速度提出了越来越高的要求, 对线缆的故障定位准确性也提出了更高的要求。

## 1 线缆故障模式

线缆出现故障的原因包括外力损伤、磨损、腐蚀、过热、绝缘老化变质等<sup>[1]</sup>, 线缆故障等效如图 1 所示,  $R$  表示线缆的绝缘电阻, 由线缆介质的碳化程度决定,  $V$  表示线缆击穿电压值, 一般由放电通道的距离大小来决定,  $G$  为

线缆的击穿间隙,  $C$  表示等效电容, 通常取决于线缆故障受潮程度, 一般很小, 可以忽略不计<sup>[2]</sup>。

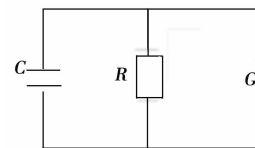


图 1 线缆故障等效电路图

按照故障线缆中绝缘电阻的大小对线缆故障进行分类, 可分为开路故障、低阻故障、高阻故障和闪络性故障<sup>[1]</sup>:

1) 开路故障: 线缆相间或相对地的绝缘电阻达到所要求的数值, 但是工作电压不能够传输到对端或者终端, 虽然有电压, 但是负载能力较差<sup>[3]</sup>。

2) 低阻故障: 线缆相间或相对地间绝缘受损, 其绝缘电阻小到可以利用低压脉冲法测量的一类故障属于低阻故障<sup>[3]</sup>。

3) 高阻故障: 线缆不同相或相对地绝缘损坏, 其绝缘电阻较大, 低压脉冲法无法测量的这类故障<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-07-08。

作者简介: 刘红(1992-), 女, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要从事故障检测与诊断方向的研究。

周国忠(1968-), 男, 成都人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事光电对抗领域跟瞄设备系统总体技术和侧重设备适应性技术方向的研究。

4) 闪络性故障: 线缆的绝缘电阻阻值高于高阻故障阻值, 在进行线缆的耐压测试实验时, 升高电压到一定值时, 导致线缆的绝缘层被击穿, 有时是连续击穿, 有时是隔数秒钟或数分钟后再击穿, 然后又恢复的一类故障。

综上, 线缆故障类型与其绝缘电阻的大小的关系如表 1 所示。

表 1 线缆故障类型

故障性质	绝缘电阻 $R$	间隙的击穿情况
开路	无穷大	直流或高压脉冲下击穿
低阻	小于 $10Z_0$	$R$ 不是太低时可用高压脉冲击穿
高阻	大于 $10Z_0$	高压脉冲击穿
闪络	无穷小	直流或高压脉冲击穿

注: 表中  $Z_0$  为线缆的特性阻抗值, 线缆的特性阻抗值一般在  $10 \sim 40 \Omega$  之间。

## 2 传统的故障检测方法

传统的故障检测方法主要有电桥法、音频感应法和行波法, 其中行波法包括低压脉冲法、脉冲电压法、脉冲电流法、二次脉冲法和三次脉冲法等<sup>[4]</sup>。

### 2.1 电桥法

电桥法主要应用于线缆低阻故障测距, 使用电桥对线缆进行故障测距时可选择单臂电桥、双臂电桥或自制电桥等<sup>[1,4]</sup>。如图 2 所示。

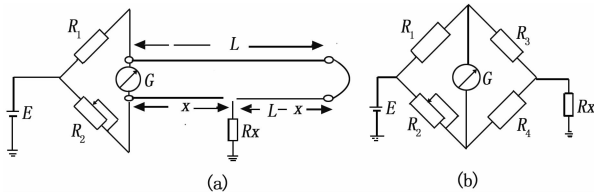


图 2 电桥法测距示意图

图 (2) 中, 图 (b) 为图 (a) 的等效电路图, 当电桥平衡时, 检流计  $G$  中无电流通过且满足等式:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (1)$$

其中:  $L$  为线缆长度 (m),  $l$  为故障点到测量点的距离 (m), 根据电桥平衡公式 (1) 得:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \frac{(L+L-l)}{l * r} \quad (2)$$

由式 (2) 可得:

$$X = \frac{2LR_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

电桥法原理简单, 但存在以下缺点:

- 1) 无法检测高阻故障和闪络性故障, 当发生上述两种故障时, 检流计  $G$  检测到的电流小到难以测量;
- 2) 须知道线缆的具体信息, 否则会导致结果误差过大;
- 3) 为了检测的准确性, 在对拼接电缆进行检测时, 须进行等值长度换算;
- 4) 电桥法不能对线缆进行三相短路和三相断路的故障

测距。

由于以上缺点, 目前电桥法已逐渐被其他测距方法所代替, 当不需要对设备整体进行拆卸的情况下, 确定设备线缆的故障位置时, 电桥法无法满足这样的测试需求。

### 2.2 音频感应法

向被测线缆发射的高压脉冲在遇到故障点时, 通过击穿故障点产生的声音来定位故障位置<sup>[4]</sup>。但是该方法对环境的要求比较高, 环境的噪声比较大时, 故障位置的定位误差会很大; 其次是在故障点周围容易产生与故障点振动相似的回音共振, 这也不利于对线缆故障进行定位。

### 2.3 行波法

向待测线缆施加一行波, 该行波在遇到线缆故障点时会反射回来, 行波法原理即通过行波在线缆中的传播时间和行波在线缆中的速度, 计算得到待测线缆的故障距离<sup>[4-7]</sup>。通过发射电压信号的行波法包括低压脉冲反射法、脉冲电压法、二次脉冲法和三次脉冲法等<sup>[4]</sup>; 通过发射电流信号的行波法为脉冲电流法。下面主要介绍这些方法的原理及其优缺点。

#### 2.3.1 低压脉冲反射法

低压脉冲反射法的原理是: 通过测量向故障电缆发射的入射脉冲电压信号和反射脉冲电压信号的时间差来进行测距<sup>[4-5,7-8]</sup>, 测距公式为:

$$l = \frac{v * \Delta t}{2} \quad (4)$$

其中:  $l$  为故障线缆的长度,  $\Delta t$  为上述时间差,  $v$  为电压脉冲在线缆中的传播速度可表示为:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{S}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (5)$$

式中,  $S$  为光的传播速度,  $S = 3 * 10^8 \frac{m}{s}$ ;  $\mu$  为线缆芯线周围介质的相对导磁系数;  $\epsilon$  为线缆芯线周围介质的相对介电系数。

低压脉冲反射法通过对脉冲反射波的分析还可以确定线缆接头与分接点的位置, 操作简单且准确性高, 不仅能检测线缆的低阻故障、断路故障, 还可测量线缆全长。但是若线缆故障点离电压入射端较近时, 可能会出现入射脉冲与反射脉冲叠加或者是因为时间差太小而无法测出的情况, 会造成很大的检测误差。

#### 2.3.2 脉冲电压法

脉冲电压法利用高压信号 (直流或脉冲) 击穿线缆故障点, 利用故障被短时击穿产生的瞬间脉冲信号在观察点与故障点之间往返一次的时间来进行测距, 主要用于高阻故障和闪络性故障进行测距<sup>[9]</sup>, 测距速度快, 测量过程易操作。但是脉冲电压法存在以下缺点:

- 1) 高压脉冲信号容易串入测试仪器, 危及设备和人身安全;
- 2) 为了产生电压信号, 串接一个阻抗, 但是降低了电容放电时加在故障线缆上的电压, 不利于辨别波形<sup>[4]</sup>;
- 3) 接线比较复杂。

图 3 中,  $R$  为限流电阻,  $R_1$ 、 $R_2$  为分压电阻,  $G$  为球形间隙,  $C$  为储能电容器, 电容量取  $4 \mu\text{F}$  左右, 在球形间隙  $G$  与故障线缆之间串接电感线圈  $L$ , 可以得到反射波形。

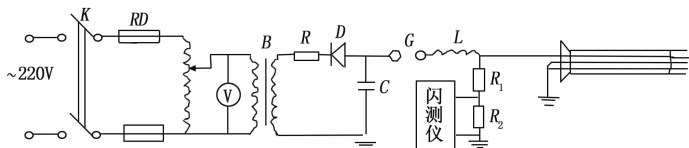


图 3 脉冲电压法接线图

### 2.3.3 脉冲电流法

脉冲电流法<sup>[6]</sup>是先击穿线缆故障点, 利用线性电流耦合器测量电流脉冲信号, 得到脉冲在测试端到故障点往返一次的时间差, 最后根据波速计算故障距离, 无需在电容与线缆间串连阻抗, 因此保证了仪器与测试人员的安全<sup>[4]</sup>。脉冲电流法和脉冲电压法已经成为高阻故障和闪络性故障测距的主要方法, 脉冲电流法分为直流高压闪络法(直闪法)和冲击高压闪络法(冲闪法), 直闪法适用于闪络性故障进行测距<sup>[7]</sup>, 其原理如图 4 所示。

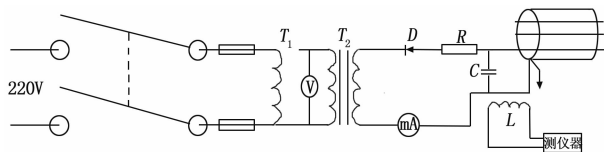


图 4 直闪法原理图

但是线缆故障点的电阻不够高的话, 会产生很大的泄露电流, 而高压试验设备分担了大部分的电流, 则注入到线缆中的脉冲电压幅值很小, 那么线缆故障点便不能形成闪络, 因此须采用冲闪法进行线缆故障测距。冲闪法原理如图 5 所示。

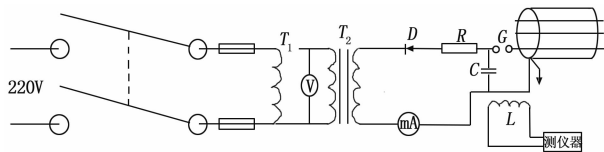


图 5 冲闪法原理图

冲闪法中由于球形间隙  $G$  的存在, 解决了直闪法存在的问题。冲闪法通过对电容  $C$  充电, 使电容  $C$  达到一定高的电压时, 击穿球形间隙  $G$ , 电容  $C$  放电, 形成冲闪。但是在实际的线缆故障情况中, 无法提前确定故障的类型, 因此脉冲电流法只能在提前知道故障类型的情况下使用, 使用范围很窄, 而且操作比较麻烦。

### 2.3.4 二次脉冲法

由于脉冲电压法和脉冲电流法的局限性, 无法满足实际设备对线缆检测的需求, 因此出现了二次脉冲法<sup>[7]</sup>。二次脉冲法利用低压脉冲在高阻故障点不能发生反射和高压脉冲能击穿故障点的特性进行测试, 向待测线缆发射一个低压脉冲, 低压脉冲在线缆终端发生反射, 接收装置接收并存储反射的测试线缆全长的波形, 然后向待测线缆发射

高压脉冲, 击穿故障点, 由于此时的故障点的阻值非常低, 接收装置接收向待测线缆发射的第二个低压脉冲在故障点反射回来的波形, 通过对测试线缆全长的波形和第二次反射回来的波形进行分析对比, 会有一个明显的差异点, 这个差异点与测试端的距离就是线缆故障距离<sup>[10]</sup>。

二次脉冲法步骤简单, 测距准确性高, 但是在进行操作时, 没有对原始信号做预处理, 会产生测距误差; 其次是低压脉冲在进行反射时, 对故障点的阻值大小要求要足够小且要维持一定的时间, 因此在实际操作中, 第二个低压脉冲的发射操作存在很大的难度。因此有人提出在发射第二个低压脉冲之前, 通过发射中压脉冲来稳定燃弧和延长燃弧时间, 如图 6 所示, 然后再发射低压脉冲, 得到整段线缆的反射波形, 最后根据波形相互叠加比较, 确定分离点, 得出线缆故障距离, 此方法成为三次脉冲法, 又称为“增强型弧反射法”<sup>[11]</sup>。

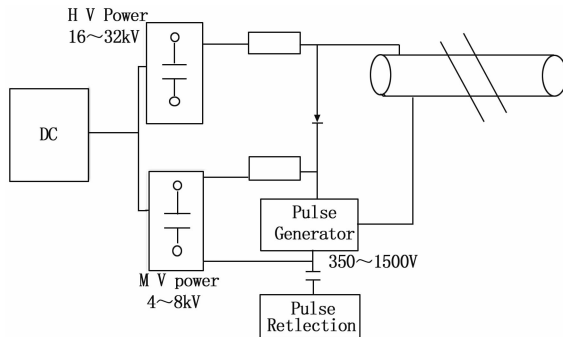


图 6 三次脉冲法系统示意图

## 3 基于反射法的线缆故障检测方法

由于传统方法对线缆故障检测的局限性, 为了满足线缆测试的需求, 基于反射法的线缆故障检测方法迅速发展, 其基本方法是时域反射法 (TDR, time domain reflection) 和频域反射法 (FDR, frequency domain reflection)。

### 3.1 时域反射法

TDR<sup>[12-17]</sup> 又称脉冲反射法, 向线缆发送脉冲信号, 利用脉冲信号在线缆中遇到阻抗不连续时会形成反射波的特征, 如图 7 所示, 由传输理论可知, 反射信号的反射系数:

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$

其中:  $Z_0$  表示线缆的特征阻抗,  $Z_L$  表示线缆故障点等效阻抗,  $\rho_L$  表示线缆故障位置的反射系数。

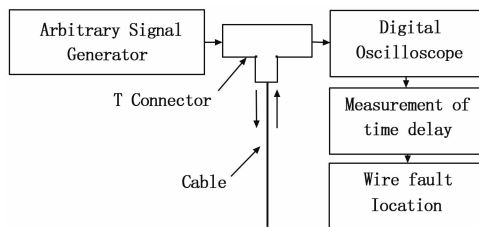


图 7 TDR 原理图

根据反射信号的反射系数和特征阻抗  $Z_0$  与线缆故障点等效阻抗  $Z_L$  的关系来估计故障类型:

- 1) 当线缆故障点等效阻抗  $Z_L$  趋于  $\infty$  大, 反射系数  $\rho_L = 1$  时, 反射波和入射波脉冲极性相同, 线缆为开路故障;
- 2) 当线缆故障点等效阻抗  $Z_L = 0$ , 反射系数  $\rho_L = -1$  时, 反射波和入射波脉冲极性相反, 线缆为短路故障;
- 3) 当线缆故障点等效阻抗  $Z_L < Z_0$ , 反射系数  $\rho_L < 0$  时, 反射波和入射波极性相反, 线缆为低阻故障;
- 4) 当线缆故障点等效阻抗  $Z_L \approx Z_0$ , 反射系数  $\rho_L \approx 0$  时, 无反射波, 线缆为高阻故障, TDR 无法检测高阻故障。

如果线缆很长, 由于线缆绝缘子的介电损耗和导体的导电性有限, 反射波将具有明显的衰减和色散。入射点和反射点之间的距离  $l$  通过公式计算:

$$l = \frac{v * t}{2} \quad (7)$$

其中:  $v$  是脉冲信号在线缆中的传播速度, 取决于入射信号的频率和导线特性,  $t$  是入射信号与反射信号之间的时间间隔。

可见, TDR 通过对故障点明显的阻抗的变化来确定故障类型和故障距离, 但是对于阻抗变化小的故障的确定, 存在一定难度, 若待测线缆比较长, 也对故障的检测有很大的影响, 对高阻故障和闪络故障的检测也存在很大难度, 由于检测信号对通讯有干扰, 因此 TDR 不能进行在线检测<sup>[15]</sup>, 其次, 反射波在线缆传输的过程中存在衰减损耗等, 若是遇到多段、有转接头的情况下, 会导致信号难以识别, 尤其是在故障点与入射点距离较远的情况时, 测试结果存在更大的误差。

### 3.2 频域反射法

FDR 是利用入射信号和反射信号之间的相移确定线缆的故障位置<sup>[18-19]</sup>, 如图 8 所示, 向待测线缆发射一段给定带宽的正弦波 (起始频率为  $f_1$ , 结束频率为  $f_2$ ), 该正弦波沿线缆传输, 在故障点处产生反射, 耦合器将线缆的反射信号与入射信号分开, 利用混频器将反射信号和入射信号进行相乘, 得到两个频率之和与差的信号, 利用低通滤波器去除高频分量, 通过快速傅里叶变换对得到的低频信号进行处理, 得到一个峰值, 则线缆故障点距离  $l$ :

$$l = \frac{1}{2} \left( \frac{Peak - 1}{N_{FFT} - 1} \right) \left( \frac{N_f - 1}{f_2 - f_1} \right) v \quad (8)$$

其中:  $l$  为线缆故障点离发射端的距离,  $Peak$  是进行 FFT 后得到的峰值点所对应的整数,  $N_{FFT}$  是进行 FFT 时一个周期内的采样点数,  $f_1$  为正弦波的起始频率,  $f_2$  为正弦波的终止频率,  $v$  为波速, 若正弦波的频率步长为  $\Delta f$ , 则  $N_f = \frac{(f_2 - f_1)}{\Delta f}$ , 该方法的测量最大故障距离  $L_{max} = \frac{v}{4 * \Delta f}$ , 测量精度为  $\Delta L = \frac{v}{2N_{FFT} * \Delta f}$ 。

FDR 无法测量故障线缆的负载阻抗, 且无法识别线缆故障类型。

在后续的研究中, 研究人员对 TDR 和 FDR 进行了优

化, 提出了时频反射法 (TFDR, time frequency domain reflection)<sup>[20-23]</sup>、扩展频谱时频反射法 (SSTDR, spread spectrum time domain reflection)<sup>[24-27]</sup> 和阻抗谱 (IS, impedance spectrum)<sup>[28]</sup> 等方法。

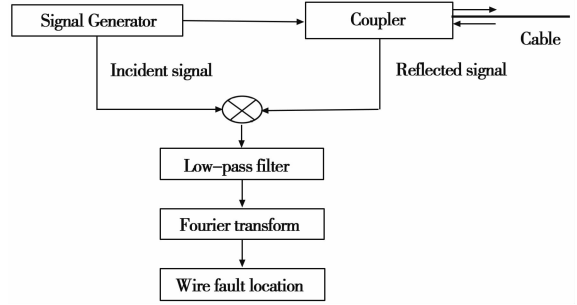


图 8 FDR 原理图

### 3.3 时频反射法

由于 TDR 和 FDR 方法在进行线缆故障检测的局限性, 有人利用时频分析方便处理高斯包络线性调频信号的优点, 提出了结合时频分析对线缆进行故障检测, 即从被测线缆一端发射高斯包络调频信号, 利用 Wigner 时频分布处理高斯包络调频信号, 利用交叉相关检测技术来处理故障线缆的反射信号, 最后得到故障点与入射点的距离, 确定故障类型<sup>[15]</sup>, 此为时频分析法 (TFDR)。

发射到线缆中的高斯包络调频信号为  $s(t)$ :

$$s(t) = \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} * e^{-\frac{\omega(t-t_s)^2}{2} + j\beta \frac{(t-t_s)^3}{3} + j\omega_s(t-t_s)} \quad (9)$$

调频信号  $s(t)$  由持续时间  $T_s$ , 中心时间  $t_s$ , 频率带宽  $B_s$  和中心频率  $\omega_s$  四个参数来决定, 在文献[22]中, 通过式 (10) ~ (13) 来描述了信号的这几个特征,  $s(t)$  中的参数为:

$$T_s^2 = \int (t - t_s)^2 |s(t)|^2 dt = \frac{1}{2\alpha} \quad (10)$$

$$\omega_s = \int \omega |s(\omega)|^2 d\omega = \omega_0 \quad (11)$$

$$B_s^2 = \int (\omega - \omega_s)^2 |s(\omega)|^2 d\omega = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2\alpha} \quad (12)$$

$$t_s = \int t |s(t)|^2 dt = t_0 \quad (13)$$

$s(t)$  的 Wigner 时频分布为:

$$W_s(t, \omega) = \left( \frac{1}{\pi} \right) * e^{-\alpha(t-t_0)^2 - (\omega - \beta(t-t_0) - \omega_0)^2 / \alpha} \quad (14)$$

为计算方便, 取  $t_0 = 0$ , 也不失一般性, 考虑线缆的传递函数, 反射信号  $r(t)$  的 Wigner 时频分布:

$$W_r(t, \omega) = \left( \frac{1}{\pi} \right) * e^{-\alpha(t-x/v)^2 - (\omega - \beta(t-x/v) - \omega_0)^2 / \alpha} * e^{-2A\omega} \quad (15)$$

式中,  $x$  为发射信号在传输线上经反射所经过的距离,  $v$  为信号在线缆中的传播速度,  $A$  为在中心频率  $\omega_s$  处的传输线的传输衰减系数。

对  $W_s(t, \omega)$  与  $W_r(t, \omega)$  作交叉相关运算, 可得到交叉相关分布系数  $C_r(t)$ :

$$C_{sr}(t) = \frac{2\pi}{E_r E_s} \iint W_r(t', \omega) W_s(t' - t, \omega) d\omega dt' \quad (16)$$

其中:

$$E_r = \iint W_r(t', \omega) d\omega dt' \quad (17)$$

$$E_s = \iint W_s(t, \omega) d\omega dt \quad (18)$$

得出:

$$C_{sr}(t) = e^{-((\alpha^2 + \beta^2)/2a)(Ax)^2} * e^{-((\alpha^2 + \beta^2)/2a)(t-x/v)^2} \quad (19)$$

由  $C_{sr}(t)$  的表达式可知,  $0 < C_{sr}(t) < 1$ ,  $C_{sr}(t)$  的最大值对应的时间  $t_{\max}$  就是信号在待测线缆中的传播时间, 则线缆故障距离  $l$  为:

$$l = \frac{v * t_{\max}}{2} \quad (20)$$

其中:  $v$  表示信号在线缆中的传播速度, 由于交叉相关分布系数的最大值与线缆故障点处的阻抗模正相关, 因此 TFDR 不仅可以测量故障距离, 还可以通过测量故障阻抗来判断故障类型。但是高斯包络调频信号对通信线缆通讯有影响, 因此不能在线检测。

### 3.4 扩展频谱时域反射法

基于高斯包络调频信号对通信线缆的通讯有影响, 因此在通信系统中, 为增强信号的抗干扰能力, 通常在被测对象的一端发送调制后的序列并在被侧对象的另一端利用解调恢复原发射信号。通信系统中, 通过将伪随机 (PN) 序列直接与基带脉冲直接相乘的方式来扩展原信号频谱。SSTDR 属于单端检测法, 将余弦信号与 PN 码进行调制得到调制信号, 将该调制信号作为入射信号发射给待测线缆, 可避免与线缆中存在的低频信号发生频谱混叠。SSTDR 是将入射信号  $f(t)$  注入到待测线缆中, 由于故障点处阻抗不匹配, 入射信号  $f(t)$  会发生反射, 由于 PN 序列具有良好的自相关特性, 将检测到的反射信号  $r(t)$  为:

$$r(t) = Af(t - t_i) \quad (21)$$

反射信号  $r(t)$  与延时了  $\lambda$  的入射信号  $f(t - \lambda)$  进行相关运算, 通过改变延时参数  $\lambda$ , 使得  $\lambda = t_i$ , 此时相关器输出最大 (峰值点), 即为故障点所对应的反射时间。

SSTDR 的入射信号具有白噪声均值为零的特性, 对通信线缆上的通讯信号没有影响, 故能在线检测<sup>[29]</sup>, 且该方法能够检测各种故障类型, 应用的范围比较广。

### 3.5 阻抗谱方法

线缆故障定位的典型方法是时域反射法和频域反射法, 在时域反射法中, 反射信号的衰减和色散影响导致故障定位的准确性, 并且反射脉冲在线缆中的传播时间的可评估性, 因此难以定位阻抗变化小的线缆故障; 频域反射法比时域反射法具有更好的定位准确性, 将功率信号作为入射信号, 并使用傅里叶变换来定位线缆故障, 但是很难识别线缆的故障类型。基于以上问题, 文献 [28] 提出了一种使用阻抗谱来检测和定位线缆故障的新技术, 其基本思想是: 通过输入阻抗获得故障线缆的负载阻抗, 以识别线缆的故障类型, 通过输入阻抗的快速傅里叶变换得到的一个

尖峰来定位导线故障, 其中输入阻抗是频率的周期函数, 该函数的周期与到故障的距离成线性关系。该方法可以定位硬性故障 (开路故障和短路故障) 和软性故障 (阻抗变化小的线缆故障), 使用伪频域来定位线缆故障, 线缆系统的输入阻抗视为衰减的余弦信号, 通过傅里叶变换, 将其从频域 (伪时域) 转换为伪频域, 从而得到:

$$\left\{ e^{-\alpha f} \cdot \cos(2\pi \cdot \frac{2l}{v} \cdot f) \right\} = \left\{ e^{-\alpha f} \cdot \cos(2\pi \cdot \frac{2l}{v} \cdot \tau) \right\} = \frac{j2\pi f' + \alpha}{(j2\pi f' + \alpha)^2 + (2\pi f'_0)^2} \quad (22)$$

伪频域在线缆故障的位置处给出一个峰值, 输入阻抗的伪频率  $f'_0$  与到线缆故障的距离成正比:

$$f'_0 = \frac{2l}{v} \rightarrow l = \frac{f'_0 \cdot v}{2} \quad (23)$$

其中:  $l$  为线缆的故障距离,  $v$  是入射信号在线缆中的传播速度。

线缆的故障长度为  $l$ 、负载阻抗为  $Z_L$  的线缆的输入阻抗  $Z_m(l, f)$  为:

$$Z_m(l, f) = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma \cdot l)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma \cdot l)} \quad (24)$$

其中:  $\gamma$  为传播系数, 在低频范围内,  $\tanh(\gamma \cdot l)$  大约等于 0,  $Z_0$  为特性阻抗, 因此在低频范围内, 线缆故障的负载阻抗与线缆系统的输入阻抗具有相同的值, 即:

$$Z_m(l, f) \cong Z_L \quad (25)$$

其中: 低频范围的选择取决于入射端到线缆故障点的距离, 距离越长, 低频范围越小。一般情况下, 如果线缆长度小于波长的十分之一, 则可以合理认为线缆是没有相位延迟的短传输线, 则:

$$l \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \rightarrow l \leq \frac{v}{10 \cdot f_{\max}} \quad (26)$$

其中:  $\lambda_{\min}$  是入射信号的最小波长,  $v$  是信号进入线缆的传播速度,  $f_{\max}$  是入射信号的最大频率, 由于入射端到线缆故障处的距离是测得的长度  $l$  的一半, 因此低频范围  $f_{ob}$  的上限小于最大频率  $f_{\max}$  的一半, 在文献 [27] 中定义为最大频率的四分之一, 因此可以降低线缆系统的谐振, 并且在定义的低频范围内, 线缆系统的测量输入阻抗恰好等于线缆故障的负载阻抗:

$$f_{ob} = \frac{v}{40 \cdot l} \quad (27)$$

开路线缆系统的输入阻抗为:

$$Z_{open} = \frac{Z_0}{\tanh(\gamma \cdot l)} \cong \frac{Z_0}{\gamma \cdot l} \quad (28)$$

其中:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j \cdot \omega \cdot L'}{G' + j \cdot \omega \cdot C'}} \quad (29)$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j \cdot \omega \cdot L') \cdot (G' + j \cdot \omega \cdot C')} \quad (30)$$

其中:  $R'$  为每单位长度的电阻 ( $\Omega/m$ ),  $C'$  每单位长度的电容 (F/m),  $L'$  为每单位长度的电感 (H/m),  $G'$  为每单位长度的电导 (S/m), 将式 (29) 和式 (30) 代入式 (28)

有:

$$Z_{open} = \frac{1}{(G' + j \cdot \omega \cdot C') \cdot l} = \frac{1}{G + j\omega C} \quad (31)$$

在低频范围内, 开路线缆的电导几乎为 0, 因此该参数不适合识别开路, 选择线缆系统的电容来检测开路并对描述为:

$$C = \frac{\text{imag} \left\{ \frac{1}{Z_{open}} \right\}}{\omega} = \frac{\text{imag} \{ Y_{open} \}}{\omega} \quad (32)$$

其中:  $Y_{open}$  是开路线缆系统的输入导纳。

如果线缆短路, 则线缆系统的输入阻抗:

$$Z_{short} = Z_0 \cdot \tanh(\gamma \cdot l) \cong Z_0 \cdot \gamma \cdot l \quad (33)$$

将式 (29) 和式 (30) 代入式 (33) 可得:

$$Z_{short} = (R' + j\omega L') \cdot l = R + j\omega L \quad (34)$$

通常, 在低频范围内, 短路的线缆系统的电阻大约为 0, 因此, 使用线缆系统的电感  $L$  来识别短路:

$$L = \frac{\text{imag} \{ Z_{short} \}}{\omega} \quad (35)$$

但是通过线缆的电感来识别短路有一定的局限性, 只能定位单个线缆故障, 而在实际系统中, 某些故障常与线缆的其他软性故障关联。

## 4 应用

由于线缆在设备中的广泛应用, 对线缆故障检测方法的研究也有很多。但是在设备中存在很多看不见的磨损(软故障), 采用上述提出的几种反射方法无法准确评估出软故障, 文献 [17] 提出了一种基于 TDR 来模拟故障线缆中波的传播, 通过小波方法来消除飞机有损屏蔽同轴线缆故障的噪声以及定位 TDR 波中的小反射波。但是由于波的上升时间的延长和波在传播中存在的衰减, 该方法几乎不可能检测到小故障, 并且小波变换在对故障信号进行分析处理的时候会对故障位置和故障性质产生误差。因此 A. LAIB 等人提出一种时域反射法、小波变换和神经网络相结合的改进方法<sup>[30]</sup>, 使用应用于传输线方程的时域有限差分方法获得传输线的响应, 然后利用离散小波变换分析获得的结果, 最后运用神经网络方法解决反问题, 以减少影响电网分支的故障定位误差。M. Hinders 等人提出一种基于时域反射法检测布线缺陷的信号处理技术<sup>[31]</sup>, 由于在细微的缺陷中, 后向散射的 TDR 脉冲太小, 无法通过基于幅度的峰值检测方法来识别, 他们使用小波变换将一维时间轨迹转换为二维二进制“缩略图”图像, 然后根据这些小波指纹中独特的 2D 时间刻度模式来识别缺陷, 并通过 RG58 同轴线缆来进行验证。S. J. Chang 等人提出一种结合时频域反射和深度学习的方法<sup>[32]</sup>, 验证线缆是否正确接线, 在该论文中, 提出了一个优化的信号设计算法, 使用时频互相关来获取在阻抗不连续处生成的反射信号, 并将其转换成 Wigner-Ville 分布图, 通过提出的算法, 将现有图像转换为新图像, 易于进行小组区分, 新图像用作卷积神经网络的输入, 并经过训练以学习每个组的

特征, 长度、补偿滤波器和要连接到每条线缆的端口信息都存储在滤波器中, 如果使用时频互相关得出的距离与存储的长度不同, 则认为导线有缺陷, 并且通过小波变换涉及的补偿滤波器可以恢复采集的信号, 并通过实验证明了该方法在检测导线不匹配和故障位置的有效性, 但是该方法只适合于能够获得各导线具体长度的设备, 但是在实际的系统中, 很多的设备上的线缆长度是未知的。

## 5 结束语

传统的线缆故障检测方法随着系统的复杂性, 其适用性越来越差, 通常在设备简单、检测要求比较低、检测环境噪声小的场合应用; 基于反射法的时域反射法和频域反射法是目前比较常用的方法, 并针对不同的需求, 将时域反射法和频域反射法进行优化并与其他信号处理方法或是深度学习的方法结合。在今后的线束检测领域, 对硬件软化的要求越来越高, 目前有不同的虚拟测试软件来代替依赖硬件的设备进行检测、控制等; 其次, 线缆存在软故障, 软故障产生的反射波很微弱, 测试信号很可能在反射回入射端的时候被噪声覆盖, 现有文献建立在实验条件比较严苛的情况下提出了线缆软故障测试方法, 但是完全达不到实际系统的运用。此外, 现有测试方法中存在测试盲区的现象, 减小甚至消除测试盲区, 这也是今后的研究方向。

## 参考文献:

- [1] 徐丙垠, 李胜祥, 陈宗军. 通信电缆线路障碍测试技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000.
- [2] 廖鹏飞. 基于虚拟仪器的电缆故障定位系统研究 [D]. 咸宁: 湖北科技大学, 2016.
- [3] 魏书宇, 龚仁喜, 刘 璐. 电力电缆故障检测的方法与分析 [J]. 计算机技术与自动化, 2005, 24 (3): 124-126.
- [4] 华菊金. 电缆故障无损检测系统设计 [D]. 太原: 中北大学, 2006.
- [5] 赵爱丽. 电力电缆脉冲电流故障测距法的改进 [D]. 山东: 山东大学, 2009.
- [6] Komoda M, Kawashima T, Arakane M, et al. Development of a current detection type cable fault locator [J]. IEEE Power Engineering Review, 1991, 11 (4): 56.
- [7] 马秉宇. 基于行波法的电缆故障测距研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
- [8] 朱群江, 刘延迪, 滕百川, 等. 线缆测试技术的发展综述 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (12): 5-9.
- [9] 白春涛. 电力电缆故障低压脉冲自动测距方法研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [10] 邢海瀛, 袁汉川, 邓 春, 等. 基于分布参数的电力电缆故障定位新型算法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (14): 16-20, 25.
- [11] 崔 笋. 基于 LabVIEW 的机电子系统仿真器研究与实现 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
- [12] Paulter N G. Long-term repeatability of a TDR-based prin-

- ted wiring board dielectric constant measurement system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47 (6): 1469 - 1473.
- [13] A Jani. Location of Small Frays Using TDR [D]. Logan: Utah State University, 2003.
- [14] Paulter N G. An assessment on the accuracy of time-domain reflectometry for measuring the characteristic impedance of transmission lines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50 (5): 1381 - 1388.
- [15] 徐勋建. 通信电缆故障检测系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [16] Shi Q, Kanoun O. A new algorithm for wire fault location using time-domain reflectometry [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14 (4): 1171 - 1178.
- [17] Zhang J, Zhang Y, Guan Y. Analysis of time-domain reflectometry combined with wavelet transform for fault detection in aircraft shielded cables [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (11): 4579 - 4586.
- [18] Griffiths L A, Parakh R, Furse C, et al. The invisible fray: a critical analysis of the use of reflectometry for fray location [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6 (3): 697 - 706.
- [19] Furse C, Chung Y, Dangol R, et al. Frequency-domain reflectometry for on-board testing of aging aircraft wiring [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45 (2): 306 - 315.
- [20] Chung Y C, Furse C, Pruitt J. Application of Phase Detection Frequency Domain Reflectometry for Locating Faults in an F-18 Flight Control Harness [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47 (2): 327 - 334.
- [21] Choe T S, Hong C Y, Song E, et al. Detection and estimation of a fault on coaxial cable via time-frequency domain reflectometry [C]. IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference, 2003.
- [22] Choe T S, Hong C Y, Park J B, et al. Implementation of a time-frequency domain reflectometry system with PXI platform for a coaxial cable [A]. Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. 2004.
- [23] 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.
- [24] Furse C, Smith P, Safavi M, et al. Feasibility of spread spectrum sensors for location of arcs on live wires [J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5 (6): 1445 - 1450.
- [25] Smith P, Furse C, Gunther J. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location [J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5 (6): 1469 - 1478.
- [26] Lo C, Furs C. Noise-domain reflectometry for locating wiring fault [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47 (1): 97 - 104.
- [27] Furse C, Smith P, Lo C. Spread spectrum sensors for critical fault location on live wire network [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2005, 12 (2/3): 257 - 267.
- [28] Shi Q H, Kanoun O. Wire fault diagnosis in the frequency domain by Impedance spectroscopy [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64 (8): 2179 - 2187.
- [29] 李晓辉. 基于 SSTDR 的飞机线缆故障定位方法研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
- [30] Laïb A, Melit M, Nekhoul B, et al. A new hybrid approach using time-domain reflectometry combined with wavelet and neural network for fault identification in wiring network [A]. Algiers: 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC - 2016), 2016.
- [31] Hinders M, Bingham J, Rudd K, et al. Wavelet thumbprint analysis of time domain reflectometry signals for wiring flaw detection [J]. Engineering Intelligent Systems, 2007, 15 (4): 225 - 239.
- [32] Chang S J, Par J B. Wire mismatch detection using a convolutional neural network and fault localization based on time-frequency-domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic, 2019, 66 (3): 2102 - 2110.

(上接第 40 页)

#### 参考文献:

- [1] 张舞杰, 李 迪, 叶 峰. 基于计算机视觉技术的微钻头面自动光学检测 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2006, 34 (11): 55 - 59.
- [2] 张舞杰, 杨义禄, 李 迪, 等. 自动影像测量系统关键算法研究 [J]. 光学精密工程, 2007, 15 (2): 294 - 301.
- [3] 张舞杰. 基于计算机视觉影像检测的关键技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2007.
- [4] 聂新桥. 基于机器视觉的微钻全尺寸测量系统研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [5] 王林林. 基于机器视觉的微钻头刃面质量检测系统设计 [D]. 贵州: 贵州大学, 2017.
- [6] 李仁杰. 机器视觉技术及其在机械制造自动化中的应用 [J]. 黑龙江科技信息, 2016 (12): 80.
- [7] 张 铮, 王艳平, 薛桂香, 等. 数字图像处理与机器视觉 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [8] 杨 斌, 周如江, 张明利, 等. 基于机器视觉的智能定位与检测技术研究 [J]. 机械工程师, 2013 (11): 57 - 59.
- [9] Steger C, Ulrich M. 机器视觉算法与应用 [M]. 杨少荣, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [10] 闫 蓓, 王 斌, 李 媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008 (3): 295 - 298.