

光电跟踪设备的线缆测试技术研究

刘红^{1,2,3} 周国忠^{1,2,3}(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: 针对光电跟踪设备已有在线故障监测存在的盲点,对线缆信号传输故障检测方法进行了研究。利用线缆在故障位置阻抗不匹配原理,设计一种抗干扰性强和具有良好相关性的测试信号,通过信号发生器注入测试信号,利用数据采集卡采集反射信号,并消除因信号叠加产生的交叉项后,最后通过测试信号和采集的信号的相关性分析来确定线缆故障位置和故障类型,得到设备的故障单元。通过实验并与扩展频谱时域反射法进行性能对比,验证该方法的检测性能、稳定性及工程实用性。

关键词: 光电跟踪设备;线缆;阻抗;测试信号

中图分类号: TP277;TH865 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research on cable testing technology of photoelectric tracking equipment

Liu Hong^{1,2,3} Zhou Guozhong^{1,2,3}(1. Key Laboratory of Optical Engineering, 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: Aiming at the blind spot of on-line fault monitoring of photoelectric tracking equipment, the cable signal transmission fault detection method is studied. The cable detection is based on the principle of impedance mismatch at the fault location, and on the basis of the reflection method, a design with strong anti-interference and no communication influence and good correlation with the test signal, using the signal generator and the data acquisition system to inject the signal and collect the reflected signal, and eliminating the cross term caused by the signal superposition of the collected signal, and finally determining the cable fault location and fault type by the correlation analysis of test signal and the collected signal, and obtaining the fault unit of the equipment. Verifying the detection performance, stability and engineering practicability of this method by comparing performance with the spread spectrum time domain reflectance method.

Keywords: photoelectric tracking equipment; cable; impedance; test signal

0 引言

随着光电探测及人工智能技术的发展,光电跟踪设备的应用领域越来越广,光电跟踪设备在线检测要求覆盖的范围越来越广,对光电跟踪设备的测试性要求越来越高。但是传统的光电跟踪设备在线检测对设备的线缆检测很少涉及,而先进设备中的线缆种类和数量越来越多。传统方法对光电跟踪设备线缆的故障检测方式是拆卸设备,线缆通过检测仪器、从线缆的两端进行检测,该方法检测速度低,还容易出现人为误差,设备在拆卸途中还可能产生二次故障。

线缆的故障测试比较复杂,国内外研究者对线缆的故障测试提出了多种方法,主要分为传统的线缆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主要有电桥法^[1]、音频感应法^[1]和行波法^[2],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,传统方法适用于简单的系统;基于反射法的故障检测方法是往故障线缆的一端注入一个测试信号,测试信号在故障位置处由于阻抗不匹配会发生反射,常见的基于反射法的方法包括时域反射法(time domain reflection, TDR)和频域反射法(frequency domain reflection, FDR),TDR是向线缆发送高速脉冲信号^[3-9],利用脉冲信号在线

缆中遇到阻抗不连续时会发生反射的特征,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,容易受噪声干扰^[9];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,但是对噪声比较敏感^[9],且无法识别出故障类型。由于TDR和FDR方法在进行线缆故障检测的局限性^[10],有人提出时频分析法(time-frequency domain reflection, TFDR)^[11-14],即从被测线缆一端发射高斯包络调频信号,利用Wigner^[15]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,但是对通信有影响且计算量大,并且利用Wigner时频分布处理高斯包络调频信号时会产生交叉项,干扰检测结果^[16-18];扩展频谱时域反射法(SSTDR)^[19-22]基于通信扩频技术提升了抗噪能力,但是需要通过对比时参数的估计来寻找相关输出最大值,且当超过一个周期会出现多个自相关峰值,容易和故障相关峰值混淆,产生误判。

本文开展针对光电跟踪设备的线缆进行测试的研究,设计一种对噪声干扰小、对通信无影响、自相关性强的信号,利用信号发生器注入待测线缆并设置发射周期,由于故障线缆存在阻抗不匹配,会对测试信号产生反射,再利用数据采集卡采集反射信号^[23],结合LabVIEW^[24]对采集信号进行交叉项消除后,最后对测试信号和采集信号进行相关性分析来确定线缆故障位置和故障类型,并通过实验验证该方法的检测性能和稳定性及工程实用性。

1 线缆测试理论分析

光电跟踪设备的线缆常见的故障是断路故障和短路故障,本文设计的测试系统在基于规范化设计的情况下,用数据采集卡和信号发生器,结合LabVIEW对采集信号进行伪维格纳维拉(pseudo Wigner-Ville distribution, PWVD)处理,消除采集信号因信号叠加产生的交叉项后,再与延时了 δ 的测试信号做互相关,当互相关有尖锐波峰,得到最大

值时, δ 等于测试信号在线缆中的运行时间 t ,通过如下公式得到线缆的故障点离测试端的距离 L 。

$$L = \frac{v \times t}{2} \quad (1)$$

其中, v 为测试信号在线缆的运行速度;线缆故障位置的反射系数 ρ_L :

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

其中, Z_0 表示线缆的特征阻抗, Z_L 表示线缆的负载阻抗。当发生断路故障: Z_L 趋于 ∞ 大, $\rho_L > 0$,反射信号和测试信号极性相同;当发生短路故障: $Z_L \approx 0$, $\rho_L < 0$,反射信号和测试信号极性相反。

1.1 测试信号的设计

对于反射测距技术,良好的伪随机性及尖锐的自相关函数特性显示出了伪随机信号在故障诊断领域的主导优势,其中M序列具有白噪声均值为0的特性,对通信没有影响,因此初步选择M序列作为测试信号。M序列是最长线性移位寄存器序列的简称,是一种伪随机序列,其特征多项式为:

$$F(s) = 1 \oplus \sum_{i=1}^p x_i s^i \quad (3)$$

其中, x_i 表示M序列的元素, s^i 表示元素 x_i 处于序列的第 i 位。M序列归一化后的自相关系数为:

$$\rho_M(\tau) = \frac{1}{N_P} \sum_{k=0}^{N_P-1} M(k)M(k+\tau) \quad (4)$$

其中, N_P 表示M序列周期,周期 $N_P = 2^n - 1$ 。

如图1所示为63位M序列和其自相关图,由图可看出,63位M序列自相关图具有明显的第2波峰。为了减小线缆测试中的误差,将63位M序列与正弦信号进行如图2所示的调制,得到如图3所示的测试信号及其自相关图,与图1相比,可以看出调制后的测试信号具有更好的自相关波峰,且第2波峰不明显。

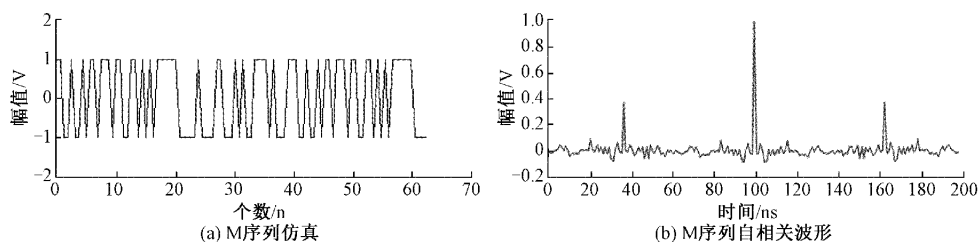


图1 M序列及其自相关波形

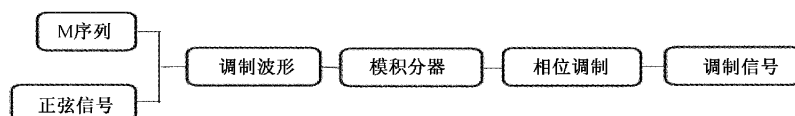


图2 调制流程

在实际的测试系统环境中,存在各种噪声的影响,如图4所示,若测试信号中存在高斯白噪声信号,那么测试

信号会出现严重失真现象,但是其自相关仍具有明显尖锐的峰值,高斯白噪声对M序列调制生成测试信号的自相关

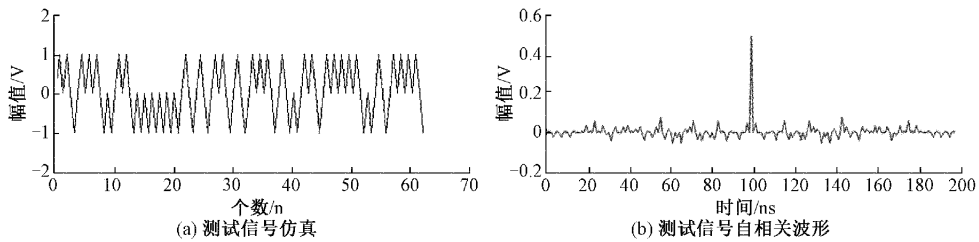


图 3 测试信号及其自相关波形

性影响很小,实验加入其他类型的噪声,测试信号仍具有明显的尖锐波峰,即 M 序列经正弦信号调制生成测试信号

具有很强的抗干扰性,这证明了利用该测试信号进行线缆故障检测在理论上的可行性。

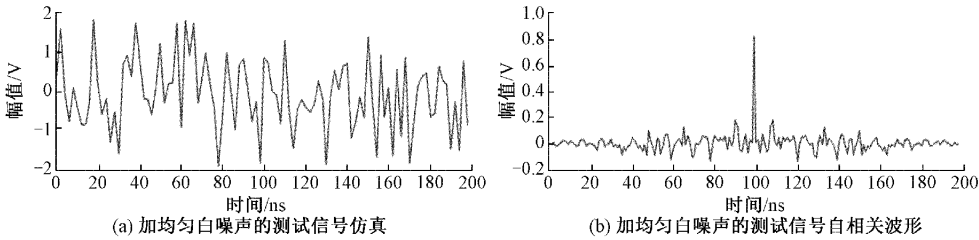


图 4 加均匀白噪声的测试信号及其自相关波形

1.2 故障定位分析

1) 消除交叉

测试信号在故障线缆中因阻抗不匹配而发生反射,信号采集卡采集反射信号,如图 5 所示。

其中信号采集卡采集到的信号包括反射信号和测试信号,在对采集到的的信号进行分析时,会产生叠加,而维格纳维拉(Wigner-Ville distribution, WVD)不满足叠加定理,会产生交叉项干扰,跨项干扰会降低时频表示的可读性,如图 6 所示。

第 1 个正弦波中心时间为 0.007 5 s,第 2 个正弦波中心时间为 0.018 s,中间存在交叉项。为了消除交叉项干扰,研究人员提出 PWVD,其表达式如下:

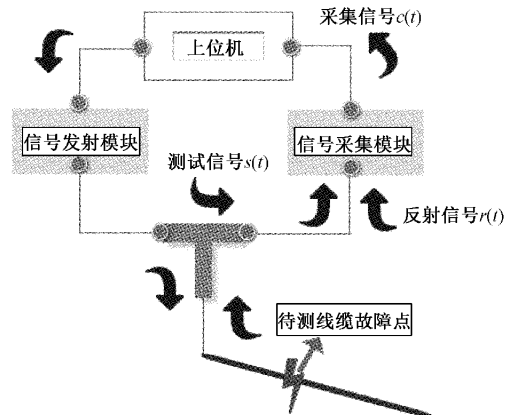
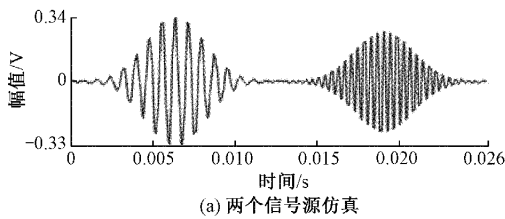
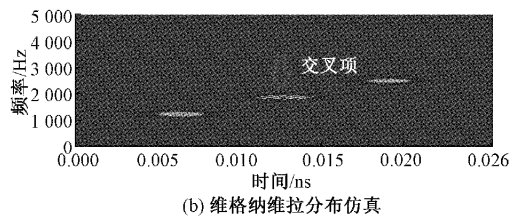


图 5 测试系统原理



(a) 两个信号源仿真



(b) 维格纳维拉分布仿真

图 6 基于维格纳维分布(WVD)的仿真分析

$$PWVD(t, \omega) = \int h(\tau) \cdot s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (5)$$

其中, $h(\tau)$ 表示高斯窗,从图 7 可得,针对所给的两个信号,PWVD 能够很好地消除交叉项。

2) 线缆故障定位

采集信号 $c(t)$ 中包括测试信号 $s(t)$ 和反射信号 $r(t)$ 。

$$r(t) = \sum_k a_k s(t - \tau_k) + n(t) \quad (6)$$

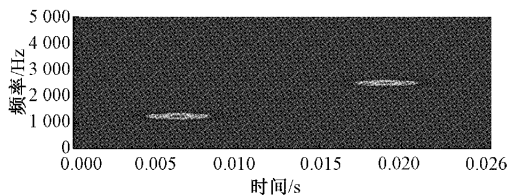


图 7 基于伪维格纳维拉分布(PWVD)仿真分析

式中: $n(t)$ 代表线缆中的噪声, a_k 表示信号在线缆中的衰减幅度,则采集信号 $c(t)$ 和测试信号 $s(t)$ 的互相关函数

推导如下:

$$R_{sc}(\tau) = \int_0^{T_s} c(t)s(t-t_i)dt = \int_0^{T_s} (r(t) + s(t)) \cdot s(t-t_i)dt = \int_0^{T_s} r(t) \cdot s(t-t_i)dt + \int_0^{T_s} s(t) \cdot s(t-t_i)dt = \int_0^{T_s} \left\{ \sum_k a_k \cdot s(t-\tau_k) \right\} \cdot s(t-t_i)dt + \int_0^{T_s} n(t) \cdot s(t-t_i)dt + \int_0^{T_s} s(t) \cdot s(t-t_i)dt \quad (7)$$

由于噪声 $n(t)$ 与测试信号 $s(t)$ 不相关,其积分为 0,即反射信号与噪声混合,二者不同步,互相关值接近 0。此时采集信号和测试信号 $s(t)$ 的互相关函数为:

$$R_{sc}(\tau) = \int_0^{T_s} c(t)s(t-t_i)dt = \int_0^{T_s} (r(t) + s(t)) \cdot s(t-t_i)dt = \int_0^{T_s} r(t) \cdot s(t-t_i)dt + \int_0^{T_s} s(t) \cdot s(t-t_i)dt = \int_0^{T_s} \left\{ \sum_k a_k \cdot s(t-\tau_k) \right\} \cdot s(t-t_i)dt + \int_0^{T_s} s(t) \cdot s(t-t_i)dt \quad (8)$$

令:

$$R_{ss} = \int_0^{T_s} \left\{ \sum_k a_k \cdot s(t-\tau_k) \right\} \cdot s(t-t_i)dt \quad (9)$$

表示反射信号与延时的测试信号的互相关。

$$OR_{ss} = \int_0^{T_s} s(t) \cdot s(t-t_i)dt \quad (10)$$

表示测试信号与延时的测试信号的互相关。

由式(8)可知,当一直向待测线缆发送测试信号时,会产生多个 R_{ss} 峰值和多个 OR_{ss} 峰值,为了避免误判,使 R_{ss} 峰值和 OR_{ss} 峰值各只出现 1 个。因此为了避免误判,设定信号发射模块向待测线缆发射一次测试信号。此时采集信号:

$$c(t) = a_k s(t) + s(t) \quad (11)$$

即只有 1 个周期的测试信号和 1 个周期的反射信号。

则式(11)中, R_{ss} 表示反射信号 $a_k s(t)$ 与 $s(t+\tau)$ 的相关函数, OR_{ss} 表示测试信号 $s(t)$ 与 $s(t+\tau)$ 的相关函数,根据两个相关函数峰值之间的时间差,得出测试信号在线缆中的运行时间 t ,根据式(1)可得出线缆故障位置。

2 实验验证

为验证该方法,搭建实验平台如图 8 所示,本实验以同轴电缆进行验证,上位机安装有 LabVIEW 软件,信号发生器型号选择为 Tektronix AFG3021C,通过 LabVIEW 控制,发送测试信号到待测线缆,待测线缆选择同轴电缆,数据采集卡选择 NI USB6211。

2.1 线缆测试验证

通过程序将测试信号发送给信号发生器,测试信号经信号发生器发送给待测线缆,由于线缆在故障处存在阻抗不匹配,有故障的线缆会对测试信号产生反射,再通过信号采集卡采集反射信号之后,对采集的信号做处理,处理后的信号与测试信号互相关,当互相关出现第 2 个峰值时



图 8 实验平台示意图

间,即为测试信号的延时时间、测试信号在线缆中的传播时间 τ 。

由图 9 所示,第 1 个峰值点为测试信号与反射信号中的测试信号部分的相关峰值,第 2 个峰值点为测试信号经过延时 τ 与反射信号中的故障反射信号部分的相关性峰值,其中 τ 等于测试信号在线缆中的传播时间,从图中能够看出,第 2 个峰值为正,则线缆故障为断路故障。

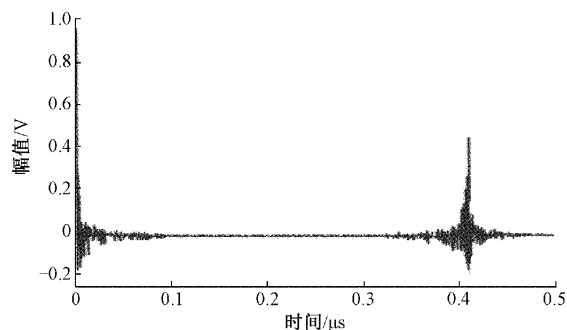


图 9 断路故障波形

如图 10 所示,第 1 个峰值点为测试信号与反射信号中的测试信号部分的相关峰值,第 2 个峰值点为测试信号经过延时 τ 与反射信号中的故障反射信号部分的相关性峰值,其中 τ 等于测试信号在线缆中的传播时间,从图中能够看出,第 2 个峰值为负,为短路故障。

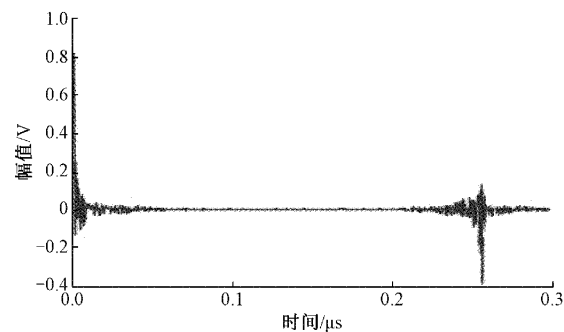


图 10 短路故障波形

2.2 线缆测试性能对比分析

本文对线缆的故障检测是在 LabVIEW 平台上进行验证,首先设计测试信号,然后消除采集信号因为叠加产生交叉项,最后通过测试信号与采集信号的最大相关性峰值来确定故障类型和故障距离,为了验证该方法的性能,本小节在相同实验条件下对比该方法与 SSTDR 在 20 和 40 m 断路故障与 25 和 50 m 短路故障的检测结果,如表 1~4 所示,为保证数据的有效性,每种故障类型测试的前两次数据抛出,每次测试 10 次有效数据,通过平均检测误差来确定误差的大小,通过方差来确定整体的检测水平的稳定性。

表 1 20 m 线缆断路故障检测结果

测试次数	本方法测试故障位置/m	检测误差/%	SSTDR 故障位置/m	检测误差/%
1	20.8	4.0	20.8	4.0
2	19.7	1.5	19.4	3.0
3	20.5	2.5	20.2	1.0
4	20.4	2.0	20.4	2.0
5	19.6	2.0	20.5	2.5
6	20.8	4.0	20.1	0.5
7	20.2	1.0	20.4	2.0
8	19.6	2.0	20.8	4.0
9	20.7	3.5	20.5	2.5
10	20.3	1.5	19.4	3.0
平均	20.26	2.40	20.39	2.45
方差	0.204		0.244	

由表 1 可知,在 20 m 断路故障处,本文提出方法的检测结果与 SSTDR 相比,本方法的平均检测误差为 2.40%,SSTDR 的平均检测误差为 2.45%,本方法的平均检测误差比 SSTDR 的平均检测误差低;本方法的测试故障位置方差 0.204,SSTDR 的故障位置方差 0.244,本方法的测试故障位置方差比 SSTDR 的测试故障位置方差低,存在一定优势。

表 2 40 m 线缆断路故障检测结果

测试次数	本方法测试故障位置/m	检测误差/%	SSTDR 故障位置/m	检测误差/%
1	41.2	3.00	41.6	4.00
2	39.2	2.00	41.2	3.00
3	41.0	2.50	40.4	1.00
4	41.4	3.50	40.8	2.00
5	39.6	1.00	40.6	1.50
6	40.8	2.00	39.3	1.75
7	40.6	1.50	40.8	2.00
8	39.2	2.00	38.8	3.00
9	40.9	2.25	41.0	2.50
10	40.6	1.50	39.2	2.00
平均	40.45	2.125	40.37	2.275
方差	0.60		0.77	

由表 2 可知,在 40 m 断路故障处,本文提出方法的检测结果与 SSTDR 相比,本方法的平均检测误差为 2.125%,SSTDR 的平均检测误差为 2.275%,本方法的平均检测误差比 SSTDR 的平均检测误差低;本方法的测试故障位置方差 0.60,SSTDR 的故障位置方差 0.77,本方法的测试故障位置方差比 SSTDR 的测试故障位置方差低,存在比较明显的优势。

表 3 25 m 线缆短路故障检测结果

测试次数	本方法测试故障位置/m	检测误差/%	SSTDR 故障位置/m	检测误差/%
1	25.60	2.4	24.60	1.6
2	25.45	1.8	25.65	2.6
3	24.50	2.0	25.80	3.2
4	25.40	1.6	25.50	2.0
5	25.80	3.2	24.20	3.2
6	25.20	1.6	24.40	2.4
7	24.20	3.2	25.40	1.6
8	24.80	1.6	25.70	2.8
9	25.50	2.0	25.30	1.2
10	25.70	2.8	25.55	2.2
平均	25.31	2.22	25.21	2.52
方差	0.268		0.307	

由表 3 可知,在 25 m 短路故障处,本文提出方法的检测结果与 SSTDR 相比,本方法的平均检测误差为 2.22%,SSTDR 的平均检测误差 2.52%,本方法的平均检测误差比 SSTDR 的平均检测误差低;本方法的测试故障位置方差 0.268,SSTDR 的故障位置方差 0.307,本方法的测试故障位置方差比 SSTDR 的测试故障位置方差低,存在一定检测优势。

表 4 50 m 线缆短路故障检测结果

测试次数	本方法测试故障位置/m	检测误差/%	SSTDR 故障位置/m	检测误差/%
1	50.6	1.2	51.2	2.5
2	51.0	2.0	51.3	2.6
3	51.5	3.0	48.7	2.6
4	51.2	2.4	51.0	2.0
5	48.8	2.4	51.5	3.0
6	50.8	1.6	49.4	1.2
7	51.2	2.4	50.4	0.8
8	49.2	1.6	51.1	2.2
9	48.8	2.4	51.5	3.0
10	50.5	1.0	48.8	2.4
平均	50.36	2.00	50.44	2.23
方差	0.96		1.12	

由表4可知,在50 m短路故障处,本文提出方法的检测结果与SSTD R相比,本方法的平均检测误差为2.00%,SSTD R的平均检测误差2.23%,本方法的平均检测误差比SSTD R的平均检测误差低,本方法的测试故障位置方差0.96,SSTD R的故障位置方差1.12,本方法的测试故障位置方差比SSTD R的测试故障位置方差低,存在明显的检测优势。

2.3 结果分析

通过表1~4分析可得,在20和40 m断路故障检测与25和50 m短路故障检测中,本方法测得的平均检测误差和方差均小于SSTD R的平均检测误差和方差,说明本方法在线缆故障检测中具有更好的检测性能和稳定性,则本文的线缆故障检测技术研究能够实现线缆的故障检测且具有良好的效果。

3 结论

本文针对光电跟踪设备在线监测系统存在的盲点,对光电跟踪测试线缆测试技术进行研究。在线缆测试中,为了提高测试精度,减小测试过程中的噪声干扰,选择M序列与正弦信号经过调制波形、模积分器、相位调制得到调制信号为线缆的测试信号;由于T型BNC端子的原因,数据采集卡对待测线缆进行数据采集的过程中,采集的信号为测试信号与反射信号的混合,为了避免信号处理中,采集信号发生叠加,利用PWVD能够消除采集信号中的交叉项干扰,最后通过控制信号发生器发送测试信号的次数,避免相关分析计算中产生多个相关性峰值。采集信号与测试信号进行互相关计算,互相关峰值为正,则发生断路故障;互相关峰值为负,则发生短路故障,根据峰值的时间间隔来计算故障的位置。本文提出的方法具有一定的通用性,在不同设备上进行测试时,只需要对通道进行配置即可,通过确定线缆的状态,结合专家知识,利用故障树的方法,可以确定故障模块中具体的故障单元,对后续的维修具有极大地便利,也避免了在未知具体故障单元的情况下,在拆卸过程中形成的二次故障。在今后的研究中,还需要进一步验证该测试系统对多轴线缆的有效性。

参考文献

- [1] 华菊金. 电缆故障无损检测系统设计[D]. 山西:中北大学,2006.
- [2] 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.
- [3] PAULTER N G. Long-term repeatability of a TDR-based printed wiring board dielectric constant measurement system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1998, 47 (6): 1469-1473.
- [4] 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 & Measurement, 2001, 50(5):1381-1388.
- [5] PARKEY C, HUGHES C, LOCKEN N. Analyzing artifacts in the time domain waveform to locate wire faults [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2012, 15(4):16-21.
- [6] 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.
- [7] SHI Q H, KANOUN O. A new algorithm for wire fault location using time-domain reflectometry [J]. IEEE Sensor Journal, 2014, 14(4):1171-1178.
- [8] ZHANG J M, ZHANG Y B, GUAN Y G. 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.
- [9] KWON G Y, LEE C K, LEE G S, et al. Offline fault localization technique on HVDC submarine cable via time-frequency domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32 (3): 1626-1635.
- [10] 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.
- [11] FURSE C, CHUNG Y C, 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.
- [12] 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.
- [13] 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 & Measurement, 2005, 54(6):2493-2500.
- [14] BANG S S, SHIN Y J. Classification of faults in multicore cable via time-frequency domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(5):4163-4171.
- [15] 孙昱,谷立臣. 负载振动与气隙偏心下电机电流调制机理分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (2): 322-327.
- [16] CHANG S J. Advanced signal sensing method with adaptive threshold curve based on time frequency

- domain reflectometry compensating the signal attenuation[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2020, 1: 22-27.
- [17] LEE Y H, BANG S S, KWON G Y, et al. Analysis of wave propagation of HTS cables for compensation of thermal loss on connectors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 4801105.
- [18] WANG Y, WU X, LI W Z, et al. Analysis of micro-Doppler signatures of vibration targets using EMD and SPWVD[J]. Neurocomputing, 2016, 171: 48-56.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 毛健美, 王莉, 高闯, 等. 感性非接触式电缆故障在线诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1579-1588.
- [22] FURSE C, JAYAKUMAR N K T, BENOIT E, et al. Spread spectrum time domain reflectometry for complex impedances: Application to PV arrays[C]. 2018 IEEE AUTOTESTCON, National Harbor, MD, USA, 2018: 1-4.
- [23] 王世阳, 毕祥军, 王平. 基于 LabVIEW 多通道应变采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(8): 83-87.
- [24] 祁雨, 邢兰昌, 刘昌岭, 等. 基于虚拟仪器技术的阻抗分析仪设计与开发[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 19-24.

作者简介

刘红, 硕士研究生, 主要研究方向为光电跟踪设备的故障检测技术。

E-mail: 152810057972163.com

周国忠(通信作者), 硕士, 研究员, 主要研究方向为光电对抗领域跟瞄设备系统总体技术、侧重设备适应性技术。

E-mail: zgz_ioe@sina.cn