

混沌扩频多根电缆故障在线同步诊断研究

毛健美,王 莉,胡苏阳,高 闯
(南京航空航天大学自动化学院,江苏南京 211100)

摘 要: 针对实际飞机电源系统电缆布线复杂,数量多的问题,本文基于现有的单根电缆故障检测成本高、效率低、检测难度大的研究现状,利用混沌序列对初值敏感(初值不同信号干扰小)、序列数量巨大的特点,提出将混沌序列用于飞机多根电缆故障在线同步诊断的方法.解决了扩展频谱时域反射法(Spread Spectrum Time Domain Reflectometry, SSTDR)中采用相同 m 序列进行同步诊断时相互干扰、易误判问题, m 序列数量限制导致的检测数量问题.研究发现其尖锐的自相关特性能够较好应用于单根电缆故障诊断,故障特征明显;其良好的互相关特性能够同时进行多根电缆的故障诊断,抗干扰性好;结合混沌序列数量多的优势,其能够推广应用于复杂电缆故障的在线诊断.实验结果表明混沌扩频电缆故障诊断方法可有效实现多根电缆故障的同步诊断,定位误差在 20cm 以内,检测率达 90% 以上.

关键词: 混沌; 序列数量; 多根电缆; SSTDR; 自相关; 互相关

中图分类号: TM93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)07-1625-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.012

Research on Synchronous Online Diagnosis of Multiple Cable Faults Based on Chaotic Spread Spectrum Sequence

MAO Jian-mei, WANG Li, HU Su-yang, GAO Chuang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: In this paper, for the problem that the cables in aircraft power system are complex, numerous and hard to detect, the method based on chaotic spread spectrum sequence for synchronous online diagnosis of complex cable system is proposed. The proposed method can solve the limitation of the cables' number that can be diagnosed synchronously in spread spectrum time domain reflectometry (SSTDR). The model of chaotic spread spectrum sequence is established, and the research shows that its pointed autocorrelation characteristic can be applied in single cable fault diagnosis, and its good cross-correlation characteristic can be applied in multiple cable faults diagnosis. With the large number of chaotic sequence, the proposed method can be extended to online diagnosis of multiple cable faults. The experimental results show that the method of chaotic sequence can effectively realize the synchronous diagnosis of multiple cable faults, with the location error within 20cm and the detection rate above 90%.

Key words: chaotic; number of sequence; multiple cables; SSTDR (spread spectrum time domain reflectometry); autocorrelation; cross-correlation

1 引言

复杂大系统如飞机、航天器、核及可再生能源系统发展飞速,系统可靠性要求也越来越高,其中电缆故障危害性较大,因此电缆故障的检测定位引起国内外学者的广泛关注与研究^[1-3].

迄今为止,电缆故障诊断方法多种多样,包括三用表测试法^[2,4]、双端测试法^[5,6]、反射法^[7-14]等.其中三

用表测试法只能离线检测,应用范围较小;双端测量法定位精度高,但是需要对线缆的双端同步检测,需明确线缆的始端和终端,对于布线隐蔽的线缆检测较为困难.而反射法根据入射信号的不同,分为时域反射法^[7](Time Domain Reflectometry, TDR)、频域反射法^[8](Frequency Domain Reflectometry, FDR)、序列时域反射法^[9,10](Sequence Time Domain Reflectometry, STDR)、扩展频谱时域反射法^[9-11]等几种形式.综合对比检测定

位效果, SSTDR 以其定位精度高, 抗干扰性强, 可实现在线诊断, 适用范围广泛等优点成为研究重点^[12-14].

在实际飞机系统中, 为了使飞机电力系统更加安全经济的运行, 存在大量的二次配电系统, 该系统电网结构复杂, 相互干扰严重, 检测难度较大. 采用单根电缆故障检测方法虽然能避免相互干扰问题, 但是检测耗时, 而且需多个检测装置, 检测成本高, 系统体积重量也会大大增加. 为此, 国内外学者开始致力于多根电缆及电缆网络检测定位方法研究. 国内学者研究发现, 采用相同 m 序列进行故障诊断时, 由于线缆相互之间信号干扰, 存在易误判问题, 因此在合理安装阻波器的基础上, 采用分时循环检测的方法实现诊断^[15], 该方法减少了检测装置成本问题, 检测时间也有所降低, 但是并没有实现多根电缆的同步诊断, 检测效率相对较低. 多根电缆同步诊断中, 若采用相同的 PN 序列, 线与线之间由于信号相关性而影响诊断, 因而需要互相关性小的不同 PN 序列实现多根电缆的同步诊断.

混沌信号对初值敏感, 初值不同的混沌信号具有正交性, 相互之间无干扰^[16,17]. 基于混沌信号种种优点, 国内外学者致力于混沌扩频电缆故障诊断研究. 文献[16]针对混沌信号用于单根电缆故障在线诊断缺乏有效地实验验证. 太原理工大学研究学者将分布式传感器与混沌时域反射方法结合, 实现了电缆网络故障诊断^[18], 但是其基于混沌时域反射法, 检测信号抗干扰性相对于 SSTDR 是否良好有待研究. 国内学者开展了混沌信号用于通信电缆故障在线检测的研究^[19], 根据其实验波形可得对于 MHz 的通信信号, 其抗干扰能力并不佳, 诊断波形相关纹波较大.

本文主要研究内容如下: (1) 以多根电缆同步诊断为例, 分析采用相同序列在线诊断时存在的问题; (2) 基于 SSTDR 原理, 研究分析复杂电缆故障在线诊断中扩频信号需具备的相关特性; (3) 建立混沌序列产生模型, 研究分析其自相关特性、互相关特性及序列数量, 并与 m 序列对比, 研究其用于单根电缆故障诊断的可行性; (4) 综合上述特性分析结果, 优选最佳扩频码, 研究采用初值不同的混沌扩频信号, 解决多根电缆同步诊断信号干扰问题, 实验验证多根电缆故障同步在线诊断可行性.

2 多根电缆故障同步在线诊断问题分析

2.1 SSTDR 电缆故障诊断原理

如图 1 所示为 SSTDR 故障检测定位原理框图.

将 PN 码与正弦信号进行 1:1 扩频调制后的 BPSK (Binary Phase Shift Keying, 二进制移相键控) 信号作为入射信号注入待测电缆, 当待测电缆发生故障时, 入射信号在电缆的故障点处由于阻抗不匹配会发生反射,

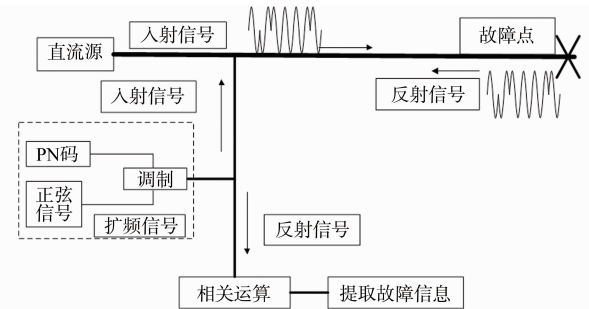


图1 SSTDR检测定位原理框图

将入射信号和采集的反射信号进行相关运算:

$$r(t) = \int_0^T s(t) \times s(t - \tau) dt \quad (1)$$

式(1)中 $s(t)$ 为入射信号, $s(t - \tau)$ 为反射信号, τ 表示入射信号和反射信号之间的延时, $r(t)$ 为相关运算结果, T 为入射信号的周期. 根据相关运算结果可以提取故障信息, 包括故障类型和故障距离, 如图 2 所示. 与传输线理论一致, 当发生开路故障时, 反射信号幅值为正; 短路故障时, 反射信号幅值为负; 而自相关波头与反射波头之间的距离为故障距离.

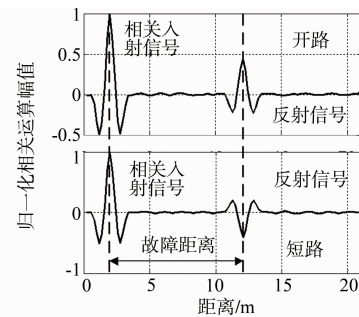


图2 SSTDR相关运算该故障波形示意

假设诊断装置采样频率为 f_n , v_s 为检测信号在电缆中的传播速度, 则故障定位精度 d_c 为:

$$d_c = \frac{1}{2} \times v_s \times \frac{1}{f_n} \quad (2)$$

本文 SSTDR 检测系统采样频率为 500MHz, 采用基于硬件语言的 FPGA 高速数据采集板卡, 进行电缆故障在线诊断实验, 达到单次故障检测时间在 1ms 以内的效果, 实时性较好. 经计算分析得特定型号的飞机电缆 (AF250) 其信号的传播速度为 2×10^8 m/s, 则故障定位误差理论计算得在 20cm 范围内.

2.2 多根电缆故障同步在线诊断问题分析

如引言所述, 基于 m 序列优良的自相关特性与互相关特性, 首先分析采用相同序列进行多根电缆故障同步诊断的问题. 以对飞机四根电缆同步检测为例, 建立诊断系统模型, 向待测电缆中通入 100V 直流电, 如图 3 所示为其故障诊断的结构示意图, 分别在四根导体电缆的不同长度下设置开路故障, 采用 SSTDR 检测装

置进行诊断,如图 4 所示为实验诊断波形。

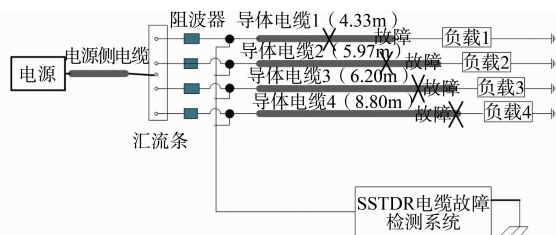


图3 多根电缆故障诊断结构示意图

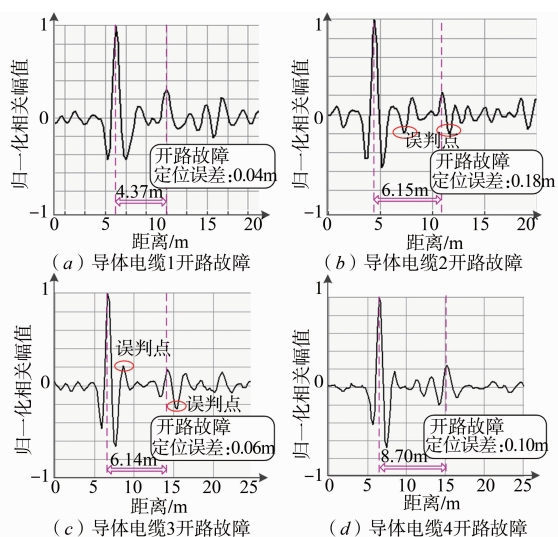


图4 100V直流电压下多根电缆故障采用相同m序列在线诊断实验结果

由图 4 可得采用相同 m 序列扩频后对电缆进行故障诊断,由于信号之间有一定的相关性,在电缆进行故障诊断时,归一化相关运算波形毛刺较大,且旁瓣幅值大,一次反射波头幅值被削弱,诊断波形存在较多误判点,易误判。

基于检测信号在待测电缆中的相互影响难以采用理论方法进行分析表述,下面对两根电缆无故障注入相同 m 序列与不同 m 序列相关特性结果进行仿真对比,结果如图 5 所示。

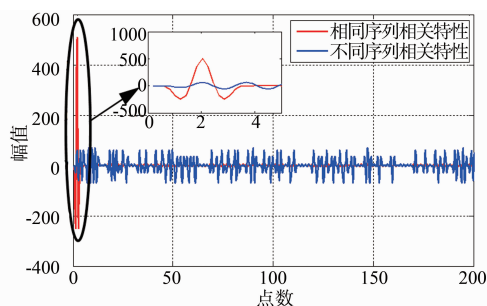


图5 m序列相关特性对比

由图 5 可得,对于相同的 m 序列做相关运算时,相关波形中存在尖锐的自相关峰值;而不同 m 序列做互相关运算时,不存在相关峰值,且自相关峰值远远高于

互相关最大值。结果表明当采用相同的序列对线缆同步诊断,由于线缆之间信号相互干扰,产生相关峰值,与故障点相关峰值叠加,相互影响,最终导致整个相关波形纹波大,反射波头点多,误判点多。而采用序列不同的信号进行同步诊断时,由于信号相互之间干扰小,无相关峰值点的存在,将不会对诊断造成影响。但是 m 序列受其本身特性影响,不同序列产生方式不同,且序列复杂,将其应用于多根电缆故障同步诊断硬件成本高,难以推广应用。因此需要研究一种相互干扰小、序列数量多、产生容易的伪随机序列,实现飞机多根电缆故障的同步在线诊断。

3 多根电缆故障同步诊断方法研究

3.1 多根电缆故障诊断扩频信号相关特性要求

用于多根电缆故障在线诊断的扩频调制的扩频码,需要具有以下特性。

(1) 尖锐的自相关特性

扩频码自相关特性越好,其相关运算曲线越清晰明了地反应故障信息。如图 6 所示,自相关特性中与主峰值最接近的主瓣宽度决定了系统的诊断盲区,而其旁瓣越宽,诊断盲区越大;同时旁瓣幅值大小则直接影响着对主峰值的提取,旁瓣幅值越大,对主峰值提取的干扰越大,从相关运算曲线中提取故障信息难度也越大。

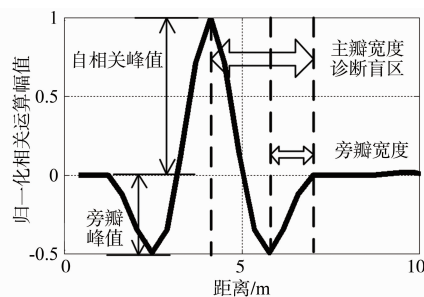


图6 故障诊断相关参量定义图示

(2) 互相关函数应接近于 0

当需要对多根电缆同步诊断时,不同信号之间的差异程度越大,相互之间越不易发生干扰,信息的传输效果就越好,多根电缆相互之间影响越小。为减小电缆之间的串扰影响,扩频码互相关幅值越接近于 0,对电缆相互之间的干扰就越小。

(3) 满足要求的序列数量

如引言所述,为实现对飞机多根电缆的同步诊断,需要数量较多的扩频码序列,使得可同时诊断的电缆数量较多,效率高成本低,从而拓宽 SSTDRC 在飞机等复杂电缆系统故障诊断中的应用。

3.2 混沌序列理论

混沌序列是以状态方程表述的离散时间系统,包

括三种: Logistic-Map 序列、Chebyshev-Map 序列、Tent-Map 序列.

(1) Logistic-Map 序列

Logistic 序列映射式定义为:

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n), \quad 0 < x_n < 1 \quad (3)$$

理论表明,当 $3.5699 \leq r \leq 4$ 时,系统处于混沌状态,序列呈现非周期性且不收敛;当初值 x_n 不同,迭代轨迹均不相关.一般选定 $r = 4$,此时的 Logistic 映射式为:

$$x_{n+1} = 4x_n(1 - x_n) = -4(x_n - 0.5)^2 + 1 \quad (4)$$

其均值为:

$$\bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n = 0.5 \quad (5)$$

(2) Chebyshev-Map 序列

K 阶 Chebyshev 映射定义为:

$$x_{n+1} = \cos(K \arccos x_n), \quad -1 \leq x_n \leq 1 \quad (6)$$

当 K 为 2 的整数次幂时系统处于混沌状态,序列均值为 0.取 $K = 4$,此时 Chebyshev 映射式为:

$$x_{k+1} = \cos(4 \arccos(x_k)) \quad (7)$$

(3) Tent-Map 序列

Tent 映射定义为

$$x_{n+1} = \begin{cases} x_n/a, & 0 < x_n < a \\ (1 - x_n)/(1 - a), & a \leq x_n \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $0 < a < 1$,序列的均值为 0.5.

由上述定义式产生的混沌序列是 0 ~ 1 的实数序列,要将混沌序列用于扩频,还需要对其进行二值量化,二值量化的公式定义为:

$$G_c(x) = \begin{cases} 0, & x < c \\ 1, & x \geq c \end{cases} \quad (9)$$

其中, c 取各混沌映射的均值,其对混沌序列的量化并不会破坏其随机性能.

3.3 混沌序列与 m 序列特性对比分析研究

首先对混沌序列的自相关和互相关特性进行研究,根据三种混沌序列的表达式及 m 序列的产生方式,在 Matlab 中建立模型,并对其进行扩频码的性能分析.

(1) 扩频码自相关特性的研究

图 7 为 127 位的 m 序列以及初值为 0.901 的 Logistic 序列、Chebyshev 序列、Tent 序列的自相关特性.从图中可知,四种序列中,m 序列自相关特性最为理想,除了尖锐的自相关波头,其余点相关运算幅值等于 0,而混沌序列其余点相关运算幅值有一定大小但接近于 0,且这些值相比于相关运算峰值很小,可以忽略不计,表明混沌序列也拥有尖锐的自相关特性.三种混沌序列中,Tent 序列的自相关特性曲线最靠近峰值的主旁瓣幅值最大,如图中红色字体标注,Tent 序列主旁瓣最低点距离 -100 的标尺距离最小,自相关特性相对不如其他三

种序列.

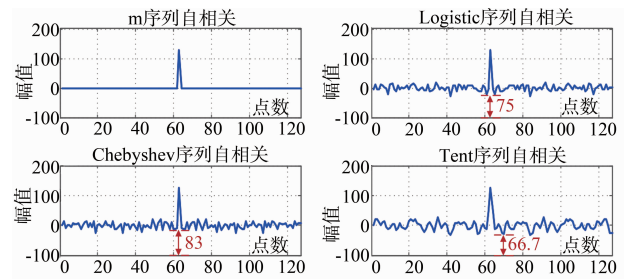


图7 m序列及3种混沌序列自相关特性曲线

从图 8 中可以明显看出 m 序列的自相关旁瓣与峰值比值最小,自相关特性最理想;Logistic 序列和 Chebyshev 序列也拥有优良的自相关特性,且随着位数的增加,自相关特性逼近 m 序列;Tent 序列主旁瓣幅值较大,这对后面的电缆故障在线诊断存在不利影响.

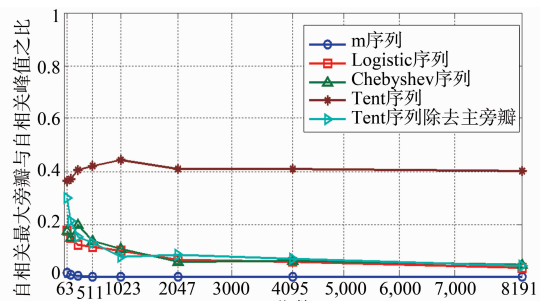


图8 不同位数的m序列和混沌序列自相关最大旁瓣与自相关峰值之比

(2) 扩频码互相关特性的研究

图 9 为采用初值为 0.901 和 0.990 的混沌序列及不同本原多项式的 m 序列互相关特性曲线.从图中可知,四种序列的互相关特性在幅值上接近.其中,m 序列的互相关幅值最小.同样,为了对其互相关性能在数值上做具体的比较,分别仿真求取 63、127、511、1023、2047、4095、8191 位 m 序列和混沌序列的互相关特性,绘制出互相关最大值与自相关峰值的比值曲线,如图 10 所示.

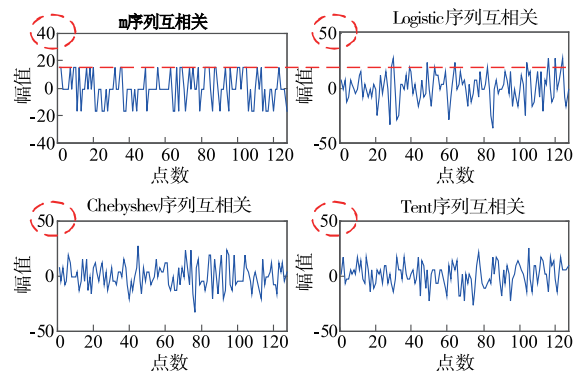


图9 m序列和三种混沌序列的互相关特性曲线

由图 10 可知,m 序列和混沌序列的互相关幅值相对

于自相关峰值都很小,四种序列都具有优良的互相关特性.随着序列位数的增加,混沌序列互相关最大值与自相关峰值之比越来越小,并与 m 序列越来越接近,这表示序列之间的相关干扰对其自相关特性的影响越来越小.

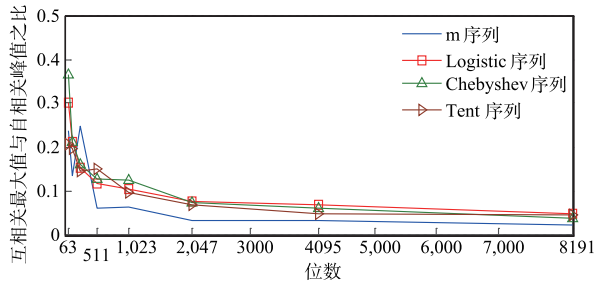


图10 不同位数的m序列和混沌序列互相关最大值与自相关峰值之比

(3) 扩频码序列数量的研究

如表 1 所示为不同阶数的 m 序列个数统计.由表 1 可得随着 m 序列阶数的增加,m 序列的本原多项式、个数也随之增加,但同时由于 m 序列位数的与之增长,相关运算的数据量大大增加,根据循环相关原理,对于位数为 n 的扩频码,其相关运算所需完成的乘加次数为 $2n^2$,算法的复杂度大大增加.考虑到软硬件的实现能力,m 序列阶数不能无限制增加,实际应用较为困难.

表 1 不同阶数的 m 序列个数

m 序列阶数	m 序列位数	本原多项式	m 序列个数
5	31	[2,5],[2,3,4,5],...	6
6	63	[1,6],[1,2,5,6],...	6
7	127	[1,7],[1,2,3,7],...	16
8	255	[2,3,4,8],[3,5,6,8],...	18
9	511	[4,9],[3,4,6,9],...	48

相比较 m 序列,混沌序列以 Logistic 序列为例,只要改变式(6)中的初值 x_1 的大小,就可以产生不同扩频码的 Logistic 序列,互相关性较小,相互之间无干扰,可以实现不同电缆的故障诊断.且混沌序列的初值是 0~1 之间的实数,初值数无限,可以产生的混沌扩频码为无穷多个.

将 m 序列与混沌序列这 3 个方面的性能进行对比,结果如表 2 所示.

表 2 m 序列与混沌序列性能对比表

性能	序列			
	m	Logistic	Chebyshev	Tent
自相关	最好	较好	较好	稍差
互相关	最好	较好	较好	稍差
序列数	少	多	多	多

综合上述 3 个方面的对比,混沌序列中 Logistic 序列和 Chebyshev 序列虽然没有 m 序列的自相关性和互

相关性好,但是它本身具备了尖锐的自相关性能和优良的互相关性能,再加上混沌序列在数量方面的优势,是扩频码的优选对象.如果混沌扩频码能够较好地地进行电缆故障诊断,那么给混沌序列用于复杂电缆系统故障的在线诊断提供了可能^[19].

4 混沌扩频电缆故障在线诊断仿真及实验研究

4.1 混沌扩频单根电缆故障在线诊断研究

在对比分析得出混沌系列良好的相关特性基础上,首先验证混沌扩频信号用于电缆故障诊断的可行性,在 Matlab 中搭建了基于混沌扩频的电缆故障在线诊断系统模型.设置电源为 100V 直流,进行混沌扩频电缆故障在线诊断仿真分析,在待测电缆 10m 处设置开路故障,四种序列在线诊断曲线如图 11 所示.

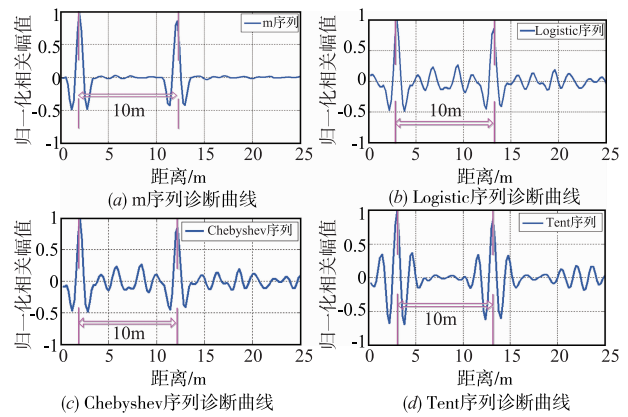


图 11 100V 直流电压下四种扩频码在线诊断曲线

四种扩频码在线诊断曲线中,m 序列诊断曲线毛刺最小,相关峰值最明显.混沌序列的诊断曲线中虽有一定的毛刺,但是相关峰值也十分清楚,能够清晰地反映出故障信息,混沌序列中 Tent 序列相比于其他序列,其故障诊断曲线旁瓣幅值较大,易误判.

在仿真验证可行的基础上,实验验证混沌扩频信号用于电缆故障诊断的可行性,如图 12 所示为实验验证平台.

采用型号名为 AF250 的电缆作为待测电缆,向电缆中通入 100V 直流电,分别采用 m 序列和三种混沌序列进行故障在线诊断,同样以开路故障为例,在电缆 5.2m 处设置故障,诊断结果如图 13 所示.

由图 13 可得,采用 m 序列、Logistic 序列、Chebyshev 序列进行调制后的扩频信号作为入射信号进行电缆故障在线诊断,均能够得出有效的故障诊断结果,故障类型判定正确,定位误差在理论误差 20cm 范围内,与仿真结果吻合,验证了混沌扩频信号用于单根电缆故障诊断的可行性,而 Tent 序列用于故障定位误差超出了



图12 电缆故障在线诊断实验平台

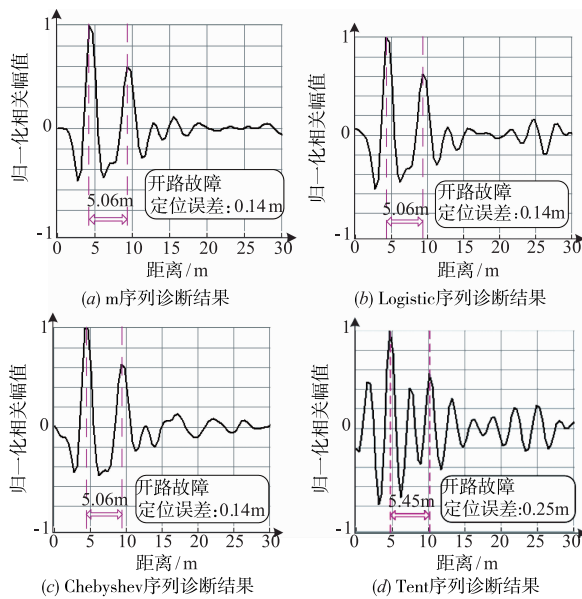


图13 100V直流电压下混沌扩频电缆开路故障在线诊断实验结果

理论误差范围,因此不建议被选用.

4.2 混沌扩频多根电缆故障在线诊断研究

在验证混沌扩频用于电缆故障诊断单根可行的基础上,进行混沌扩频多根电缆故障在线诊断仿真和实验研究,首先利用 Matlab 对多根电缆开路、短路故障诊断进行仿真.

如图 14 所示为四根电缆分别在不同的长度下发生开路、短路故障的仿真诊断结果.

由仿真结果可得采用初值不同的 Logistic 序列作为扩频码对四根电缆同时进行诊断,能够较为准确地对故障点进行定位及对故障类型进行判定,定位误差在理论误差范围内.

同样以四根同步诊断为例,进行混沌序列用于多根电缆故障在线诊断实验研究.根据前面的研究结论,优选 Logistic 序列,分别向四根电缆中注入初值分别为 0.901、0.501、0.990、0.550 的 Logistic 序列与正弦波调

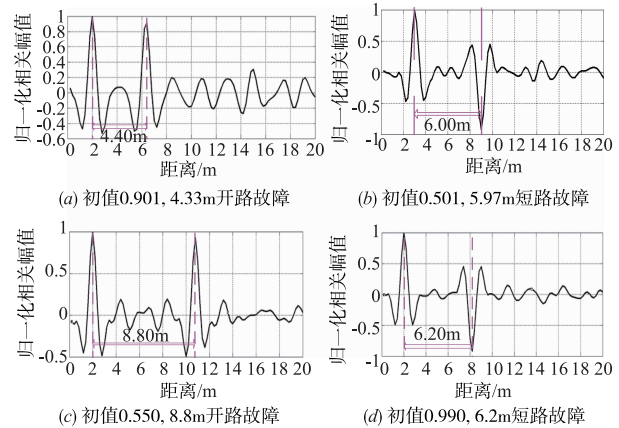


图14 100V直流电压下多根电缆故障在线诊断仿真结果

制后的 BPSK 信号作为入射信号,对同样的四根电缆进行检测,并进行一定的实验结果统计.

如图 15 所示为四根电缆在不同长度下发生开路、短路故障的实验诊断结果.

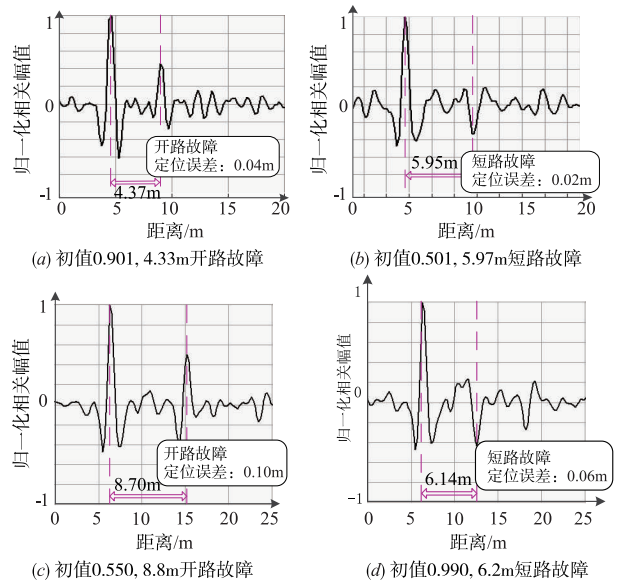


图15 100V直流电压下多根电缆故障在线诊断实验结果

表 3 是对上述实验的统计结果.

表3 多根电缆故障在线检测结果统计表

类型	故障设定		实验检测结果			理论误差	正确率
	距离 /m	测试次数	类型检测结果	最大误差/m	正确次数		
开路	4.33	100	正确	0.10	94	≤0.2m	94%
	8.8	100	正确	0.16	90		90%
短路	5.97	100	正确	0.10	93		93%
	6.2	100	正确	0.10	93		93%

由实验结果可得采用初值不同的 Logistic 序列作为扩频码对四根电缆同时进行诊断,能够较为准确地对

故障点进行定位及对故障类型进行判定,定位误差在理论误差范围内,检测率高达 90% 以上,故障点反射波头幅值较高,无误判点,相互干扰小,验证了混沌扩频信号用于多根电缆故障在线诊断的可行性.

5 总结

根据飞机电缆数目多,布线交错复杂的特点,提出了将混沌序列用于多根电缆故障同步在线诊断的方法,有效提高其检测效率,降低检测成本,通过建立不同混沌序列的产生模型,研究分析其自相关特性、互相关特性及序列数量等得以下结论.

(1)混沌序列有尖锐的自相关特性,在电缆故障在线诊断中能够较好地实现单根电缆故障诊断,故障信息明显.

(2)混沌序列具有优良的互相关特性,在对多根电缆进行同步诊断时,采用初值不同的混沌信号相互干扰小,抗干扰性好,故障特征明显,无误判.

(3)混沌序列有对初值敏感的特点,序列个数无穷多,在对节点数多,布线复杂的多根电缆进行故障诊断时,不会因为序列个数、算法复杂度增加等原因而受到限制.

(4)在 3 种混沌序列中,Logistic 序列及 Chebyshev 序列在自相关特性和互相关特性上要优于 Tent 序列,因此在对混沌序列用于复杂电缆故障诊断时可以对混沌序列进行优选.

采用混沌序列可以实现多根电缆的故障诊断,结合混沌序列数量多的优势,其为推广应用于复杂电缆故障在线诊断提供了理论指导意义.

参考文献

- [1] FURSE C, HAUPT R. Down to the wire [aircraft wiring] [J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(2): 34-39. DOI: 10.1109/6.898797.
- [2] 谈勇. 飞机线路故障问题及其对策 [J]. 航空维修与工程, 2006, (2): 62-63.
TAN Yong. Problems and countermeasures of the line fault about plane [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2006, (2): 62-63. (in Chinese)
- [3] 江建慧, 施鸿宝. 具有故障定位能力的健壮故障安全系统 [J]. 电子学报, 2000, 28(8): 35-42.
JIANG Jian-hui, SHI Hong-bao. Robust fail-safe systems with fault location capability [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(8): 35-42. (in Chinese)
- [4] 陈卫, 王莉. 航空电缆故障在线检测与定位技术研究 [J]. 飞机设计, 2010, 30(2): 62-67.
CHEN Wei, WANG Li. Low voltage network cable fault detection and location on-line technology research [J]. Aircraft Design, 2010, 30(2): 62-67. (in Chinese)
- [5] 索南加乐, 许文宣, 何世恩. 基于双端电气量的串补输电线路故障测距算法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 157-164.
SUONAN Jiale, XU Wenxuan, HE Shien, et al. A fault location algorithm for series compensated transmission lines based on two-end information [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 157-164. (in Chinese)
- [6] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4086-4093.
LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4086-4093. (in Chinese)
- [7] PAULTER N G. Long-term repeatability of a TDR-based printed wiring board dielectric constant measurement system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(6): 1469-1473.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] SMITH P S. Spread Spectrum Time Domain Reflectometry [D]. Utah State University, 2003.
- [11] 洪博, 王莉, 毛健美, 尹晶, 舒德华. 一种航天器一次母线故障在线检测定位方法 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 118-125.
HONG Bo, WANG Li, MAO Jianmei, YIN Jing, SHU Dehua. An online detection and location method for spacecraft bus fault [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 118-125. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] CHEN Wei, WANG Li. The study of spread spectrum time domain reflectometry for cable fault detection and location on-line [A]. Proceedings of International Conference on Electric Information and Control Engineering [C]. USA: IEEE, 2011. 6308-6311.
- [14] CHEN Wei, WANG Li. Analysis of the technology of cable fault detection and location on-line [A]. Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications [C]. USA: IEEE, 2011. 1-9.
- [15] 毛健美, 王莉, 杨善水. 飞机电源系统多导体电缆故障在线诊断方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1962

- 1970.

MAO Jianmei, WANG Li, YANG Shanshui. Research on online diagnosis of multi-conductor cables' faults about aircraft power system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 1962 - 1970. (in Chinese)

[16] 申海霞. 基于混沌序列的 SSTDR 检测方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

[17] 肖东亮, 焦秉立, 林春蕾, 陆建华. 混沌理论在现代信道编码技术中的应用 [J]. 电子学报, 2007, 35(10): 1961 - 1967.

XIAO Dong-liang, JIAO Bing-li, LIN Chun-lei, LU Jian-hua. Application study on chaotic theory for modern channel coding [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1961 - 1967. (in Chinese)

[18] WANG Bingjie, XU Hang, WANG Yuncai, WU Guanghui, LIU Li. Distributed sensor diagnosis for wire fault of complex topology wired networks based on chaos-TDR [A]. Proceedings of 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) [C]. Shanghai, 2016. 2152 - 2152.

[19] 张琪, 郑君里. 异步码分多址通信中混沌扩频序列的选择 [J]. 电子学报, 2001, 29(7): 865 - 867.

ZHANG Qi, ZHENG Jun-li. Choice of chaotic spreading sequences for asynchronous DS-CDMA communication [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7): 865 - 867. (in Chinese)

作者简介



毛健美 女. 1991 年 10 月出生, 江苏南通人. 2014 年和 2017 年于南京航空航天大学获得工学学士和工学硕士学位. 主要研究方向为健康管理与故障预测.

E-mail: maojianmei@nuaa.edu.cn



王莉 (通讯作者) 女. 1969 年 4 月出生, 河南南阳人. 教授、博士生导师. 1990 年于河南科技大学获得学士学位, 1993 年于河南科技大学获得硕士学位, 2007 年于南京航空航天大学获得博士学位. 现为南京航空航天大学教授, 主要研究方向为固态功率控制器健康管理与故障预测及高频变换器.

E-mail: liwang@nuaa.edu.cn