

温宏愿.高灵敏度电子地震预警器故障检测方法研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1389-1395.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1389

WEN Hongyuan. A New Fault Detection Method for High-sensitivity Electronic Early-warning Device[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1389-1395. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1389

高灵敏度电子地震预警器故障检测方法研究

温宏愿^{1,2}

(1. 南京理工大学泰州科技学院, 江苏 泰州 225300; 2. 香港大学, 香港 999077)

摘要: 传统基于时间序列数据挖掘的故障检测方法, 缺少高灵敏度电子地震预警器灵敏度分析, 故障检测率低。提出新的高灵敏度电子地震预警器故障检测方法, 根据高灵敏度电子地震预警器的结构, 采用质量块、铰链和延长梁构建其力学模型, 得到电子预警器的灵敏度表达式, 根据该表达式建立多信号模型相关矩阵, 得到故障优先概率的故障源耗费, 采用基于故障模式故障概率的改进多信号模型检测方法(包括故障模式概率均分法和故障模式概率优先法), 计算得到电子地震预警器故障概率表达式, 实现电子地震预警器故障检测。实验结果表明, 所提方法对电子地震预警器 TE 过程中 G 和 I 两个指标的故障检测率分别为 0.989、0.905, 对 PL 过程的故障检测时刻为 180 s, 故障检测率为 0.412 8, 都高于传统基于时间序列数据挖掘的故障检测方法, 说明所提方法具有较高的故障检测性能。

关键词: 高灵敏度; 电子地震预警器; 故障检测; 多信号模型; 概率均分法; 概率优先法

中图分类号: TN862

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)06-1389-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1389

A New Fault Detection Method for High-sensitivity Electronic Early-warning Device

WEN Hongyuan^{1,2}

(1. Taizhou Institute of Sci. & Tech., NJUST, Taizhou 225300, Jiangsu, China;

2. The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The traditional fault detection method based on time-series data mining cannot perform sensitivity analyses of the high-sensitivity electronic earthquake early-warning device, and its fault detection rate is low. In this paper, we propose a new fault detection method for the high-sensitivity electronic earthquake warning device. Based on the device structure, we constructed a mechanical model using a mass block, hinge, and extended beam to obtain the sensitivity expression of the device. According to this expression, we established a multi-signal model correlation matrix, and obtained the fault source cost of the fault preemption probability. We adopted an improved multi-signal model detection method based on the fault probability of the fault mode in detecting faults of the electronic earthquake warning device. The experimental results show that the fault detection rates of the two indicators G and I in the

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: 江苏省“333 工程”科研资助项目(BRA2016177); 江苏高校境外研修计划资助(苏教办师[2018]3 号); 江苏省高校“青蓝工程”人才项目资助(苏教办师[2016]1 号); 泰州市科技支撑计划(社会发展)项目(TS201819)

第一作者简介: 温宏愿(1982—)男, 山东郓城人, 博士, 副教授, 研究方向: 电子系统设计。E-mail: wenhongyuan2000@163.com。

TE process of the electronic earthquake warning device are 0.989 and 0.905, respectively, the fault detection time of the PL process is 180 s, and the fault detection rate is 0.412 8. These values are all higher than those obtained by the traditional fault detection method based on time-series data mining, which shows that the proposed method has higher fault detection performance.

Keywords: high sensitivity; electronic earthquake early-warning device; fault detection; multi-signal model; probability sharing method; probability priority method

0 引言

地震预警技术是通过观测、分析地壳活动中产生的震动监测对生产活动的影响,及地下状态的地球物理技术高灵敏度电子地震预警器作为记录微弱地震波信号的主要设备^[1],其性能直接影响地震波数据收集质量。目前地震预警器主要运用地球物理探测中常用的地震检波器系统,主要为电磁感应式检波器^[2]。该检波器灵敏度高、抗电磁干扰差,经常发生故障。因此对高灵敏度电子地震预警器的故障检测具有重要意义。

故障检测与诊断技术不仅能够提高电子地震预警器的安全性和可靠性,同时可以有效降低设备的周期维护成本。当前地震研究领域有诸多设备故障检测方法,如文献[3]提出的一种新型光伏阵列在线故障检测方法研究,由于未建立多信号模型相关矩阵,无法计算故障概率;文献[4]提出的基于时间序列数据挖掘的故障检测方法,缺少灵敏度分析,故障检测率低。为克服以上传统故障检测方法的缺点,提出新的高灵敏度电子地震预警器故障检测方法,并通过实验验证所提方法的有效性,以提高电子地震预警器故障检测的效率和精度。

1 高灵敏度电子地震预警器故障检测方法研究

1.1 高灵敏度电子地震预警器结构

高灵敏度电子地震预警器的主要部件为质量块、铰链和延长梁,其结构如图 1 所示^[5]。由该图可以看出,质量块作为惯性敏感部件,利用金属铰链与预警器外壳相连。质量块具有延长梁结构,光纤一端固定在延长梁上,另一端固定在地震预警器外壳上。当地震预警器外壳受外界微震动信号震动时,质量块由于惯性力的作用,下铰链相对地震预警器外壳转动,进而通过延长梁拉动与之相连的 FBG,令其轴向发生变化,导致 FBG 中心波长发生变化,实现地震预警的作用^[6]。

1.2 灵敏度分析

高灵敏度电子地震预警器的力学模型如图 2 所示。

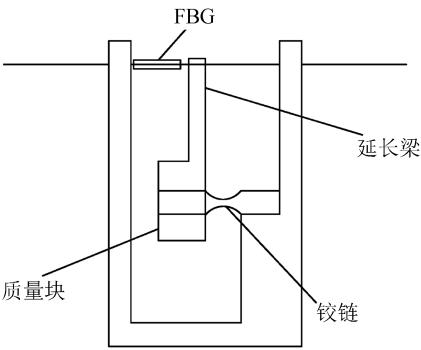


图 1 高灵敏度电子地震预警器结构图
Fig.1 Structure diagram of high-sensitivity electronic earthquake early-warning device

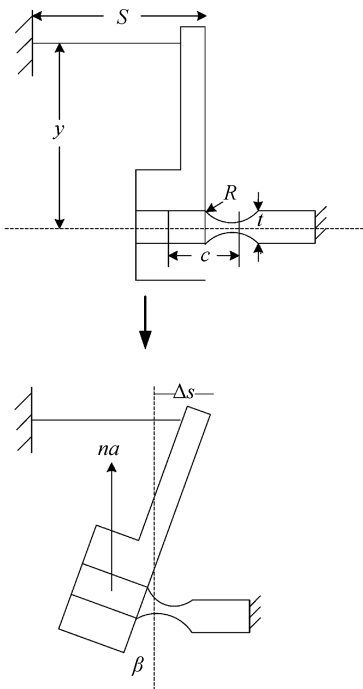


图 2 高灵敏度电子地震预警器的力学模型
Fig.2 Mechanical model of high-sensitivity electronic earthquake early-warning devices

当地震预警器敏感方向的微震动信号加速度为 a 时,地震预警器整体在惯性力作用下达到力矩平衡^[7],其表达式为:

$$nac - g\Delta sy - F\beta = 0 \tag{1}$$

式中: n 为质量块的质量; c 为质量块重心与铰链旋

转重心的距离; g 为光纤的弹性系数; Δs 为光纤的伸长量; F 为铰链的旋转刚度; β 为质量块波动的角度; y 为光纤的高度。

依据几何关系,有:

$$\Delta s = y\beta \quad (2)$$

依据杨氏模量定义,有:

$$g = \frac{B_f P_f}{s} \quad (3)$$

式中: B_f 为光纤的截面积; P_f 为光纤的杨氏模量。铰链的旋转刚度为:

$$F = \frac{P\delta R^2}{13} \left[\frac{2s^3(7s^2 + 5s + 2)}{(2s + 1)(5s + 1)^2} + \frac{12s^4(2s + 1)}{(4s + 1)5/2} \arctg \sqrt{4s + 1} \right] \quad (4)$$

式中: δ 为铰链宽度; $s = R/t$,如图2所示 R 为切割半径, t 为最小厚度。

高灵敏度电子地震预警器的加速度灵敏度定义为光栅中心波长改变量 $\Delta\eta$ 与加速度 a 之比,即:

$$Z = \frac{\Delta\eta}{a} \quad (5)$$

光栅中心波长的改变量 $\Delta\eta$ 与光纤轴向变量 σ_i 的关系可写为:

$$\Delta\eta = (1 - v_n)\eta_B\sigma_i \quad (6)$$

式中: v_n 为弹光系数; η_B 为光栅中心波长;光纤的应变为:

$$\sigma_i = \frac{\Delta s}{s} \quad (7)$$

由式(1)、(2)、(6)与(7)可求出 σ_i 并代入式(5),得到高灵敏度电子地震预警器加速度灵敏度的表达式为:

$$Z = \frac{(1 - v_n)\eta_B}{s} \frac{nc}{gy + \frac{F}{y}} \quad (8)$$

1.3 多信号模型在故障检测中的应用

多信号模型是一种分层建模思想^[8],可直观看到一种失效模式对其他模块影响的传播途径^[9]。测试性建模分析是对设备故障模式、影响和危害性的分析,即通过系统分析,确定系统各个部件有可能发生的故障模式以及每种故障模式的原因和影响^[10]。根据高灵敏度电子地震预警器灵敏度分析,设多信号模型的相关矩阵为:

$$C = [c_{ij}], (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (9)$$

$$z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$$

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$$

$$k = \{k(z_1), k(z_2), \dots, k(z_m)\}$$

式中: m 为故障源总数; n 为测试集合总数; z 为设备可能的故障源集合; U 为测试集合; k 为与故障源 z_m 相关的有限概率集合^[11]。对故障进行检测,就是依据多信号模型的结构找出最可能发生的故障候选集 $V \subseteq Z$,即求解下式:

$$\max_{V \subseteq Z} \text{Prob}(V | U_k, U_f) \quad (10)$$

式中: $\text{Prob}()$ 表示概率函数; U_k 与 U_f 分别表示故障源通过测试和未通过测试。

为便于描述,设一矢量 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_3\}$,若 $v_i = 1$,说明 $z_i \in V$;若 $v_i = 0$,说明 $z_i \notin V$ 。根据贝叶斯定理去除常数项 $\text{Prob}(U_k, U_f)$ 后,问题转换为求解下式的最大值:

$$\text{Prob}(U_k | V) \text{Prob}(U_f | V) \text{Prob}(V) \quad (11)$$

其中: $\text{Prob}(V) = \prod_{i=1}^m k(z_i) v_i [1 - k(z_i)] (1 - v_i)$ (12)

对式(12)取负自然数并去除目标函数中的常数项,问题可以转化为最优集覆盖问题^[12],即:

$$\min_{V \subseteq Z} \left(\sum_{z_i \in Z} r_i v_i \right) \quad (13)$$

该最优集覆盖问题的约束条件为: $E_v \geq d$, $v_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。其中, E 为由被检测故障源组成的结果矩阵, $d = [1, 1, \dots, 1]^U$, r_i 表示基于故障优先概率的故障源耗费,定义为:

$$r_i = -\ln \left[\frac{k(z_i)}{1 - k(z_i)} \right], i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

1.4 基于故障模式故障概率的改进多信号模型检测方法

1.4.1 故障模式概率均分法

故障模式概率均分法利用高灵敏度电子地震预警器等分信号关联所有故障模式的故障率,重新计算信号的可靠性数据^[13]。该方法计算简单,尽管不考虑原始信号的可靠性数据,但调整后的信号概率完全来自该信号关联的故障模式^[14]。该改进方法适用于概率计算出现误差而导致可信度极低或无法预测地震信号概率的情况。

$G_d(q_j, f_i)$ 为信号 q_j 的故障概率, $\zeta(f_i)$ 为故障模式 f_i 的故障概率,设 $G_d(q_j, f_i)$ 为 $\zeta(f_i)$ 在分配后得到的 q_j ($q_j \in DM(f_i)$)的概率,那么 $DM(f_i)$ 的元素个数为:

$$G_d(q_j, f_i) = \frac{1}{v_i} \zeta(f_i), n_i \quad (15)$$

而改进后信号 q_j 的故障概率为:

$$G'(q_j) = \sum_{f_i \in DM(q_j)} G_d(q_j, f_i) \quad (16)$$

1.4.2 故障模式概率优先法

故障模式概率优先法与故障模式概率均分法不同,它考虑原始信号的概率数据,同时将故障模式的故障概率放在优先位置^[15]。该方法优先考虑故障模式可靠性数据的同时也关注信号的可靠性。这种概率更新方法适用于地震信号的可靠性数据有一定可靠性,但低于故障模式可靠性数据的情况。故障模式概率优先法采用以下 4 个步骤实现高灵敏度电子地震预警器的故障检测:

(1) 对 $q_j (q_j \in D)$, 由 $\zeta(f_i) (f_i \in EN(q_j))$, 计算 f_i 对 q_j 的相关比例:

$$b(f_i, q_j) = \frac{\zeta(f_i)}{\sum_{f_i \in EN(q_j)} \zeta(f_i)} \tag{17}$$

(2) 依据 $b(f_i, q_j)$, 将 q_j 的故障概率 $I(q_j)$ 在 $EN(q_j)$ 内分配, 得到 f_i 对应 q_j 的分布故障概率:

$$I_b(f_i, q_j) = b(f_i, q_j) I_b(q_j) \tag{18}$$

(3) 将 f_i 相应的所有 $q_j \in EN(f_i)$ 的分布故障概率重新依据同样比例调整得到部分故障概率 $I'_b(q_j, f_i)$, 满足:

$$\sum_{q_j \in EN(f_i)} I'_b(q_j, f_i) = \zeta(f_i) \tag{19}$$

(4) 计算更新后的 $I'_b(q_j) (q_j \in D)$ 故障概率为:

$$I'(q_j) = \sum_{f_i \in EN(q_j)} I'_b(q_j, f_i) \tag{20}$$

2 实验分析

2.1 电子地震预警器 TE 过程故障检测效果分析

将本文故障检测方法应用于高敏感度电子地震预警器 TE 过程故障中进行故障检测, 并与基于时间序列数据挖掘的故障检测方法的检测结果进行比较, 验证本文方法的有效性。

TE 过程是由 EFVogel 提出的国际公认的仿真模型过程, 其目的是为过程控制和检测方法提供一个现实的工业过程。TE 过程包含 40 个测量变量和 11 个控制变量, 并人为设置了 20 种故障状况。实验以故障 10 为例, 故障 10 是由于高敏感度电子地震预警器延长梁发生结构变化造成的, 该故障能够引起质量块发生很大震荡, 使得电子地震预警器产生不真实信号。故障引入时间为第 162 个采样点处, 训练数据包括 450 组数据, 测试数据包括 940 组数据, 每组观测值包括 51 个过程变量。

为验证本文检测方法的有效性, 以基于时间序列数据挖掘的故障检测方法作为对比进行故障检测, 所得本文方法与对比方法的检测结果如图3所示(黑直

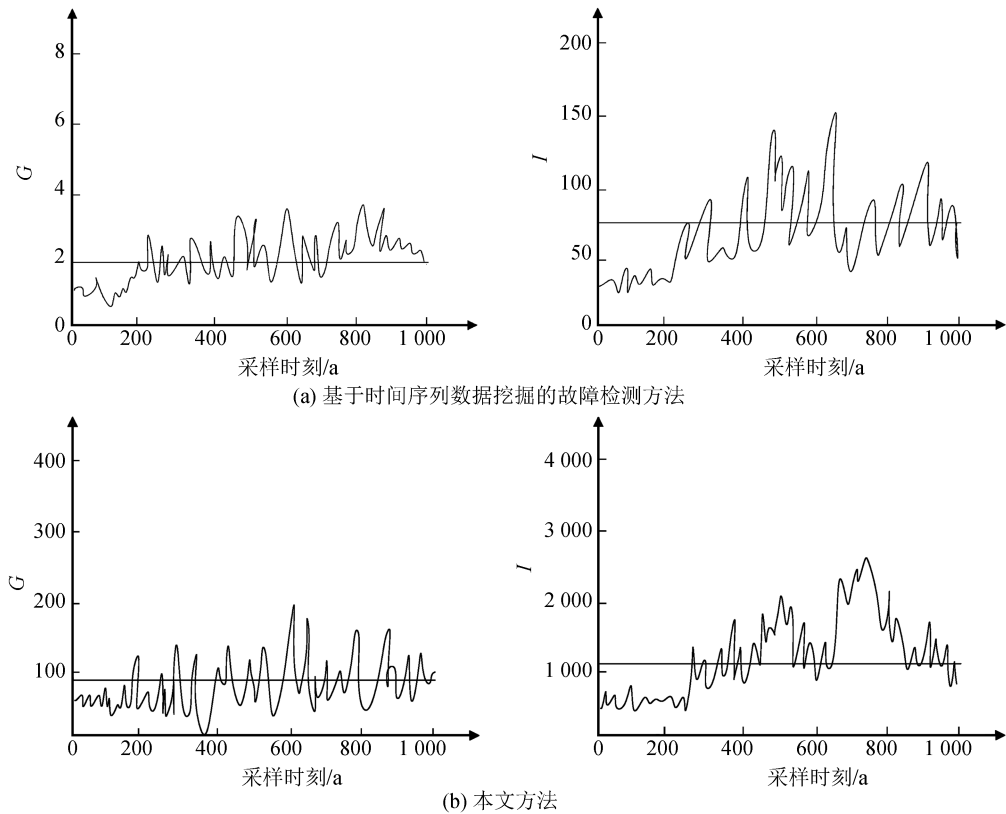


图 3 基于时间序列数据挖掘的故障检测方法与本文方法对故障 10 的故障检测结果

Fig.3 Fault detection results of fault 10 with the method based on time series data mining and the proposed method

线代表控制限)。定量的故障检测结果、检测率和计算复杂度如表 1 所列。

表 1 2 种故障检测方法对故障 10 的检测率和计算时间比较

项目	本文方法		基于时间序列数据挖掘的故障检测方法	
	<i>G</i>	<i>I</i>	<i>G</i>	<i>I</i>
检测率	0.989	0.905	0.553	0.621
离线建模时间/s	1.15		4.70	
在线建模时间/s	0.12		0.39	

从图 3(a)可以看出,基于时间序列数据挖掘的故障检测方法的 *G* 与 *I* 两个指标分别在 226 和 305 个采样时刻超出控制限,因此可以判断故障发生在 226 个采样点处。而从图 3(b)可以看出,本文检测方法的 *G* 与 *I* 两个指标分别在 198 s 和 267 s 个采样时刻超出控制限,由此可以判断故障出现在 198 s 时刻。因此本文方法对故障检测的敏感度更高。而从故障显示的持续性来看,除个别的漏检外,本文方法能够将故障持续显示到过程结束,故障的检测率明显高于基于时间序列数据挖掘的故障检测方法。

从表 1 中可以看出,本文方法的离线建模时间

为 1.15 s,远小于基于时间序列数据挖掘的故障检测方法的离线建模时间 4.7 s,原因是本文方法对原始数据空间进行距离相对变换后,特征空间规模增加,计算的复杂度降低,使得离线建模时间减少。同理,本文方法的在线建模时间 0.12 s,也小于基于时间序列数据挖掘的故障检测方法的在线建模时间 0.39 s。本文方法对电子地震预警器 TE 过程中 *G* 和 *I* 两个指标的故障检测率分别为 0.989、0.905,远高于对比方法的检测率 0.553、0.621。因此本文方法对电子地震预警器故障检测的有效性更高。

2.2 电子地震预警器 PL 过程故障检测效果分析

PL 过程是广泛应用于故障检测与诊断方法性能验证的一个工业仿真平台,仿真数据包含正常数据和 21 种故障数据,每种数据包含 950 个样本点,采样周期为 4 min,故障在 158 个样本点引入。

对比分析本文检测方法与基于时间序列数据挖掘的故障检测方法对电子地震预警器 PL 过程中的 *E* 和 *SPE* 两个指标的数据监控量,核函数采用高斯函数,主导独立元数目利用平均特征值法选取。

图 4 为两种方法对故障 18 中 *E* 和 *SPE* 两个指标的数据监控量,数据监控量用实线表示,控制限

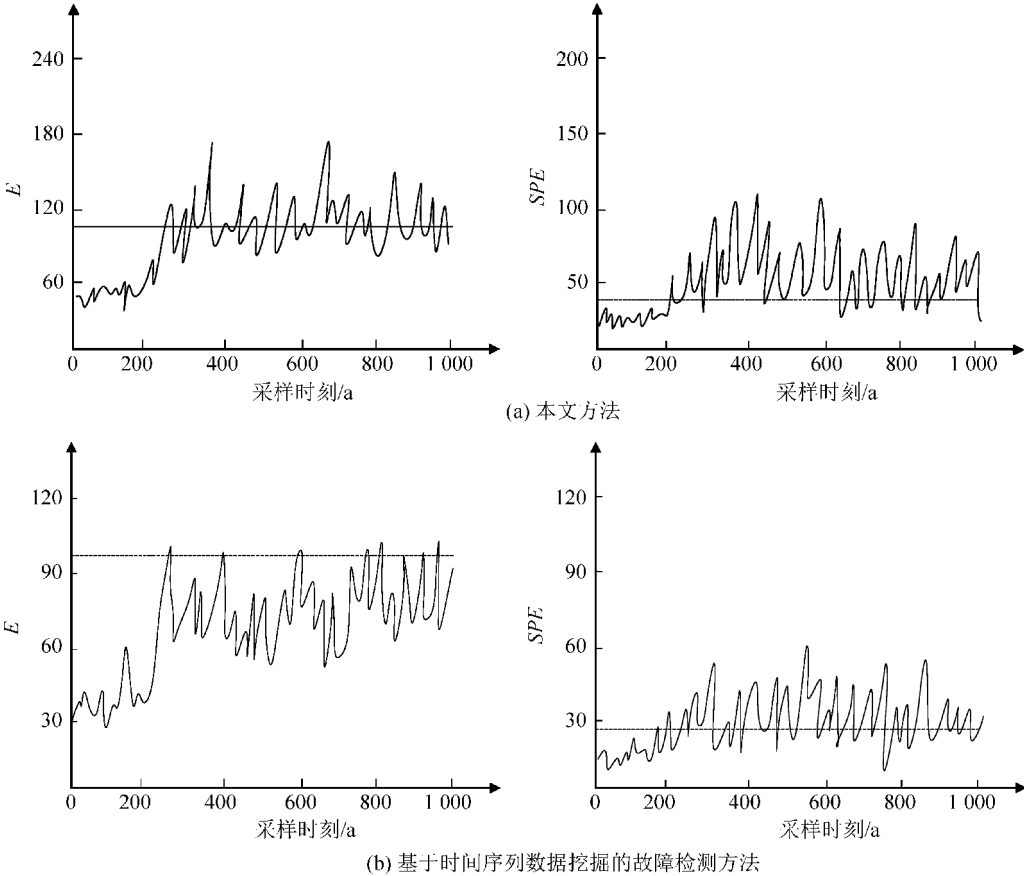


图 4 本文方法与基于时间序列数据挖掘的故障检测方法对故障 18 的监控结果

Fig.4 Monitoring results of fault 18 with the fault detection method based on time series data mining and the proposed method

用虚线表示。

由图 4 可以看出,本文方法对指标 E 的数据监控量最大值为 93 个,高于基于时间序列数据挖掘的故障检测方法的最大值 62 个。两种方法在 PL 过程扰动情况下的故障检测时刻和故障检测率分别列于表 2 和表 3。

表 2 故障检测时刻对比(单位:s)

Table 2 Comparison of fault detection time (Unit:s)				
故障	E		SPE	
	本文方法	基于时间序列数据挖掘的故障检测方法	本文方法	基于时间序列数据挖掘的故障检测方法
8	180	182	175	183
10	186	190	182	189
13	204	208	196	208
18	241	247	235	242
19	240	—	171	177
20	243	246	237	241
21	675	679	650	672

表 3 故障检测率对比

Table 3 Comparison of fault detection rate				
故障	E		SPE	
	本文方法	基于时间序列数据挖掘的故障检测方法	本文方法	基于时间序列数据挖掘的故障检测方法
8	0.976 3	0.973 5	0.968 0	0.976 1
10	0.726 5	0.672 4	0.813 6	0.763 5
13	0.945 1	0.943 7	0.957 7	0.947 2
18	0.896 4	0.891 1	0.905 1	0.903 3
19	0.412 8	0.070 5	0.870 3	0.773 4
20	0.478 9	0.415 2	0.668 8	0.575 2
21	0.363 7	0.361 5	0.442 9	0.343 6

由表 2 可以看出,对于所有故障本文方法的最早故障检测时刻都早于基于时间序列数据挖掘的故障检测方法,如故障 8 本文方法的检测时刻为 180 s,基于时间序列数据挖掘的故障检测方法的检测时刻为 182 s。由此可知,本文方法能够明显缩短故障检测时间和延迟时间。

由表 3 可以看出,本文方法的故障检测率均明显高于基于时间序列数据挖掘的故障检测方法,如故障 19 本文方法的故障检测率为 0.412 8,而基于时间序列数据挖掘的故障检测方法仅为 0.070 5。这正是因为本文方法在提取测量数据集非高斯信息的同时,考虑了投影前后数据集的局部临近结构,计算模型比较正确地描述了过程状态,从而及时发现故障,缩短故障检测时间和延迟时间,提高了故障检测率。

3 结论

本文提出一种新的高灵敏度电子地震预警器故障检测方法,其主要采用故障模式概率均分法和故障模式概率优先法,实现电子地震预警器故障的准确检测。实验结果表明,从故障显示的持续性来看,除个别的漏检外,本文方法能够将故障持续显示到过程结束,故障的检测率明显高于基于时间序列数据挖掘的故障检测方法;本文方法对电子地震预警器 TE 过程中 G 和 I 两个指标的故障检测率分别为 0.989、0.905;本文方法对于地震预警器 PL 过程的故障检测时刻为 180 s,早于传统基于时间序列数据挖掘的故障检测方法的时刻 182 s,并且本文方法的故障检测率为 0.412 8,高于基于时间序列数据挖掘的故障检测方法的检测率 0.070 5,说明本文方法提高了高灵敏度电子地震预警器的故障检测率。

参考文献(References)

[1] 江汶乡,于海英,周宝峰,等.地震预警系统模拟测试方法比较研究[J].震灾防御技术,2014,9(4):847-854.
JIANG Wenxiang, YU Haiying, ZHOU Baofeng, et al. Comparison of Simulation Testing Methods for Earthquake Early Warning System[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(4): 847-854.

[2] 刘希强,蔡寅,赵银刚,等.地震预警系统中进一步提高三台震中定位精度的方法研究[J].地震研究,2014,37(3):399-405.
LIU Xiqiang, CAI Yin, ZHAO Yingang, et al. Study on Method of Further Improving Epicenter Locating Precision Based on Pg Onsets of Three Stations in Earthquake Warning System [J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(3): 399-405.

[3] 王欢,徐小力.一种新型光伏阵列在线故障检测方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(12):2765-2772.
WANG Huan, XU Xiaoli. Research on an Online Fault Detection Method for Photovoltaic Array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2765-2772.

[4] 李海林,郭崇慧,杨丽彬.基于时间序列数据挖掘的故障检测方法[J].数据采集与处理,2016,31(4):782-790.
LI Hailin, GUO Chonghui, YANG Libin. Fault Detection Algorithm Based on Time Series Data Mining[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2016, 31(4): 782-790.

[5] 徐小力.机电系统状态监测及故障预警的信息化技术综述[J].电子测量与仪器学报,2016,30(3):325-332.
XU Xiaoli. Information Technology of Monitoring and Early Warning for Mechanical and Electrical System: Overview[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 325-332.

[6] 邱贺,刘明军,田晓峰.基于中红外痕量甲烷检测的地震预警仪[J].光谱学与光谱分析,2014,34(6):1524-1527.

- QIU He, LIU Mingjun, TIAN Xiaofeng. Pre-alarming Apparatus for Earthquake Based on Mid-infrared Trace Methane Detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1524-1527.
- [7] 王子珩, 赵伯明. 高速铁路地震预警 P 波与 S 波复合自动快速识别的理论方法与应用[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 121-127.
- WANG Zijun, ZHAO Boming. Theatrical Method and Application of Auto-rapid P and S Waves Recognition in Earthquake Early Warning for High Speed Railway[J]. China Railway Science, 2016, 37(4): 121-127.
- [8] 郭金玉, 陈海彬, 李元. 基于在线升级主样本建模的批次过程 kNN 故障检测方法[J]. 信息与控制, 2014, 43(4): 495-500.
- GUO Jinyu, CHEN Haibin, LI Yuan. kNN Fault Detection Method for Batch Process Based on Principal Sample Modeling Upgraded Online[J]. Information and Control, 2014, 43(4): 495-500.
- [9] 史华. 基于复杂网络的建筑物强震下抗毁性估计模型[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 1024-1028.
- SHI Hua. Invulnerability Estimation Model of Buildings with Complex Networks under Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1024-1028.
- [10] 王尧, 韦强强, 葛磊蛟, 等. 基于电弧电流高频分量的串联交流电弧故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 191-197.
- WANG Yao, WEI Qiangqiang, GE Leijiao, et al. Series AC Arc Fault Detection Based on High-frequency Components of Arc Current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 191-197.
- [11] 王博, 谷昌瑞, 吉晓筱, 等. 基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 120-127.
- WANG Bo, GU Changrui, JI Xiaoxiao, et al. Research on Improved Distributed Fault Location Method Based on Multi-point Fault's Traveling Wave Detection[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(5): 120-127.
- [12] 李志军, 梁乐乐, 韩存武, 等. 基于 PLS 的多采样率过程故障检测及其仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(10): 445-449.
- LI Zhijun, LIANG Lele, HAN Cunwu, et al. Multi-rate Process Fault Detection Based on Partial Least Squares[J]. Computer Simulation, 2016, 33(10): 445-449.
- [13] 陈晓宇, 郑建勇, 梅军. 电容器组早期故障在线智能预警方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 1-5.
- CHEN Xiaoyu, ZHENG Jianyong, MEI Jun. Early Failure Online Intelligent Warning Method for Capacitor Bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 1-5.
- [14] 张红才, 金星, 王士成, 等. 烈度仪记录与强震及测震记录的对比分析——以 2015 年河北昌黎 $M_L 4.5$ 地震为例[J]. 地震学报, 2017, 39(2): 273-285.
- ZHANG Hongcai, JIN Xing, WANG Shicheng, et al. Comparative Analyses of Records by Seismic Intensity Instrument with Strong Ground Motion Records and Seismograph Stations Records, Taking the $M_L 4.5$ Changli Earthquake of Hebei Province for an Example[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(2): 273-285.
- [15] 赵建刚, 邓明, 张启升, 等. UDP 协议在工程地震仪中的应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 434-438.
- ZHAO Jiangang, DENG Ming, ZHANG Qisheng, et al. Application of UDP Protocol in the Engineering Seismographs[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 434-438.