

基于机器学习的VP宽频带倾斜仪故障智能诊断

庞聪^{1,2}, 马武刚^{1,2}, 李查玮^{1,2}

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 地震预警湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对现有 VP 型倾斜仪故障诊断主要依靠人工经验和诊断流程较为复杂的问题, 提出一种以互补集合经验模态分解 (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD) 多尺度近似熵和二进制蝙蝠算法 (BBA), 优化自组织特征映射 (SOM) 神经网络参数的 VP 型倾斜仪故障诊断新方法。首先, 将归一化后的仪器故障信号进行 CEEMD 分解, 对 6 阶本征模态函数 (IMF) 求取多尺度近似熵值; 然后以训练集的认识率为适应度函数, 应用 BBA 优化 SOM 神经网络的竞争层维数和网络训练次数, 得到 BBA-SOM 诊断模型; 最后实施倾斜仪故障诊断。实验表明: 该方法的诊断效果优于部分传统学习器, 对实现 VP 型倾斜仪故障的自动诊断有重要现实意义。

关键词: 故障诊断; 倾斜仪; 自组织特征映射; 二进制蝙蝠算法; 总体平均经验模态分解; 多尺度近似熵

Determination of Troubles for VP Vertical Pendulum Incliner Using Machine Learning

Pang Cong^{1,2}, Ma Wugang^{1,2}, Li Chawei^{1,2}

(1. Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China; 2. Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Wuhan 430071, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing VP tiltmeter fault diagnosis mainly relies on manual experience and the diagnosis process is complicated, a new method is proposed to optimize the self-organizing feature mapping (SOM) neural network parameters with complementary ensemble empirical mode decomposition (CEEMD) multi-scale approximate entropy and binary bat algorithm (BBA). SOM neural network parameters of VP-type tiltmeter fault diagnosis new method. Firstly, the normalized instrument fault signal is decomposed by CEEMD, and the multi-scale approximate entropy value is obtained for the 6th order eigenmode function (IMF); then the recognition rate of the training set is used as the fitness function, and

BBA is applied to optimize the number of competing layer dimensions and the number of network training of the SOM neural network to obtain the BBA-SOM diagnosis model; finally, the tiltmeter fault diagnosis is implemented. The experiment shows that the diagnosis effect of this method is better than some traditional learners, and it is of great practical significance to realize the automatic diagnosis of VP-type inclinometer fault.

Keywords: Fault diagnosis; Inclinometer; Self-organizing feature mapping; Binary bat algorithm; Complete ensemble empirical mode decomposition; Multiscale approximate entropy

1 引言

VP 型倾斜仪^[1-3]是一种在 VS 型倾斜仪基础上改进的新型固体潮形变观测仪器,主要由数据采集模块、电源装置、信号处理模块、垂直摆机构等部分构成;它利用了摆的铅垂原理,当由于外界振动发生倾斜变化时,摆平衡位置发生变化,摆和支架之间的相对位置发生变化,电容式位移传感器的动片和定片之间的间距也相应的发生变化,然后通过高精度的电容式微位移传感器将这种变化转换成微弱电信号。自 2012 年入网应用以来,并已成功应用于武汉大学测绘学院、北京长城计量测试技术研究所、中国地震背景噪声探测任务、中国地震局地震监测系统运维任务“形变高频观测对比”等多家单位和运维项目中,顺利观测到天然地震动事件下的地形变固体潮现象,在全国固体潮与地形变监测行业领域中占有一席之地。

VP 型倾斜仪在地震监测领域主要布设在各个地方台站的山洞中,例如海南五指山形变台、天津蓟县地震台小辛庄山洞、安徽霍山佛子岭地震台、宜昌地震台山洞以及西藏狮泉河地震台等观测区域(如图 1),在这些阴暗潮湿、岩体特征明显的监测点,倾斜仪的数据记录容易受到人工地振动、雷电、温度、气压等因素的影响,往往导致观测者错过记录目标事件的最佳时间,甚至严重影响基于前兆观测的地震预警准确性。针对这些问题,现有的手段主要是人工判断 VP 型倾斜仪故障的类型,进而实施具体的故障排除措施,包括数采故障、供电故障、垂直摆故障、标定电路板故障、天气干扰、仪器检修等多种差异较大的类型;但是上述方法过于依赖人工经验,部分台站人员甚至需要依赖以往的 VS 型倾斜仪故障分析来推测 VP 倾斜仪的故障原因,这给形变数据的正常记录或地震前兆精准观测带来了极大挑战,亟需一种较智能的、诊断效果较好、无需依赖人工经验的自动化手段来解决这个问题。

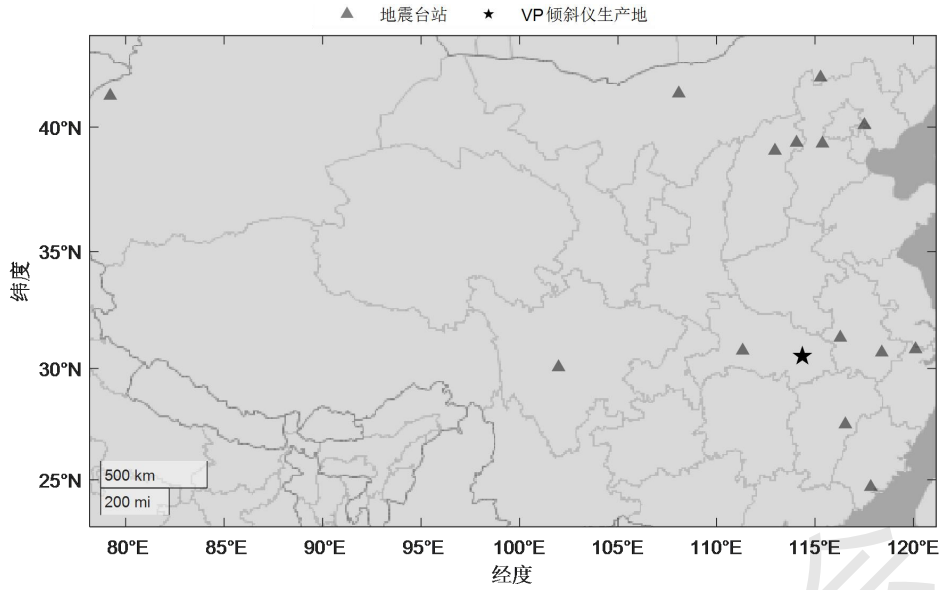


图1 全国VP倾斜仪故障空间分布（部分）

本文基于总体平均经验模态分解（Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD）得到原始信号的多阶本征模态函数（IMF）以及多尺度近似熵，然后采用二进制蝙蝠算法（Binary Bat Algorithm, BBA）优化自组织特征映射（SOM）神经网络的关键参数，得到最佳竞争层维数和最佳网络训练次数，最后应用优化后的 BBA-SOM 网络模型对倾斜仪故障特征数据进行诊断与分析。

2 VP 倾斜仪故障信号分析

以河北保定易县地震台山洞中布设的 VP 型垂直摆倾斜仪为研究对象，易县地震台位于河北省保定市太行山与华北平原的交界地带与紫荆关断裂带附近，仪器布设山洞进深达 200 m，该区域岩石成分多为闪长岩、石灰岩与页岩等，整个台站的水准观测 NS 向基线长度为 264 m，EW 向基线长度为 487 m，可有效观测到附近地震的形变前兆异常。

倾斜仪故障类型主要包括电源故障、数采故障以及洞内环境干扰等三大类，故障数据量分别为 96 条、149 条、206 条，共计 451 条：（1）电源故障主要是由 UPS 电源供电不足或电源线焊接点接触不良等原因造成，在观测波形上体现为小段数据缺失现象和较严重的波形跃迁（如图 2(a)）；（2）数采故障主要体现为记录呈现严重的连续缺失现象，在数据文件中以大量的空缺值或 Null 存在，俗称缺测，常常发生在强雷暴天气情况下，可以通过更换数采装置来解决（如图 2(b)）；（3）洞内环境干扰成因多样，包括有气压增大、空气潮湿、温度变高等因素，可致使观测曲线出现连续不规则的上升或下降现象（如图 2(c)）。

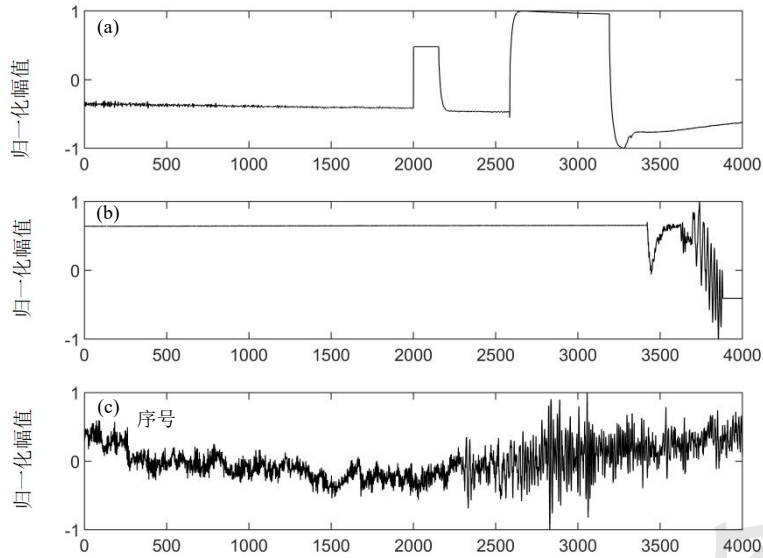


图2 典型VP倾斜仪故障信号

3 BBA-SOM 故障诊断模型

3.1 关键技术

二进制蝙蝠算法 (Binary Bat Algorithm, BBA) 是由 Seyedali 等在 2013 年提出的一种模仿蝙蝠回声定位习性和二进制编码的仿生优化算法,它是标准蝙蝠算法 (Bat Algorithm, BA) 的一种改进形式,通过引进二进制编码原理,将蝙蝠的位置更新结果限定为 0 或 1,并由蝙蝠个体速度和随机数的大小相对关系来确定蝙蝠位置的具体值,以改善 BA 算法易陷入局部最优的困局。

SOM 神经网络是一种无监督型聚类方法,其分类效果受网络参数影响较大,尤其是竞争层维数和训练次数等参数,且每次的聚类结果并不保持一致。在实际应用中,需要比对测试集中各个样本和训练集 SOM 聚类结果 (属性标签值) 的匹配程度来进行数据类型识别,若 SOM 聚类标签值相同且真实故障类型标号相同,则可以判定二者同属一个故障类型,即目标识别成功,否则识别失败。

总体平均经验模态分解 (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD) 是一种基于总体平均经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 和经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 而改进的新型信号分解技术。与 EEMD 的区别是,CEEMD 通过引入一对性质相反白噪声来进行经验模态分解,而不是在原始信号中加入随机的白噪声,可在一定程度上压制引入白噪声带来的重构误差。

3.2 BBA-SOM 模型设计

基于 CEEMD 多尺度近似熵和 BBA-SOM 神经网络模型的 VP 型垂直摆倾斜仪故障诊断流程

如图 3 所示，首先利用 CEEMD 处理故障数据，计算多个 IMF 的多尺度近似熵，按固定比例划分为训练集和测试集，然后使用二进制蝙蝠算法在训练集基础上优化 SOM 神经网络的竞争层维数和网络训练次数，满足迭代停止条件后，将得到的最优参数值与标准 SOM 模型重组构成 BBA-SOM 辨识模型，结合测试集进行 VP 倾斜仪故障智能辨识。

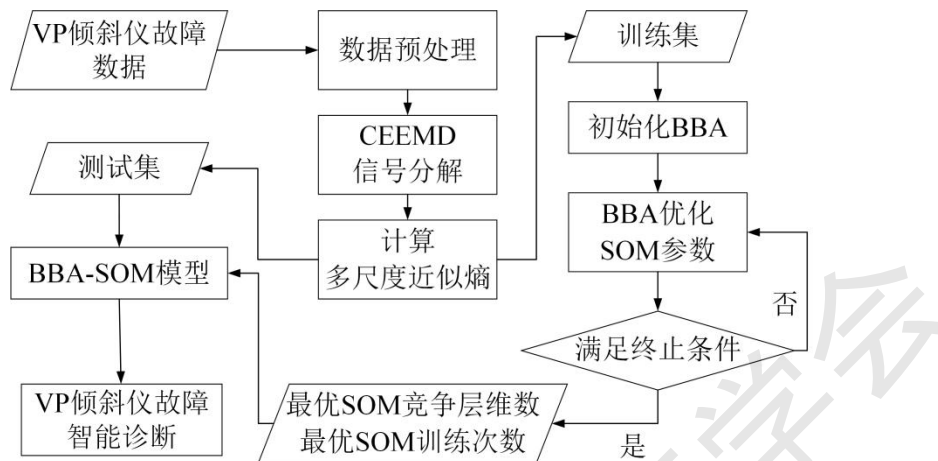


图3 VP型倾斜仪故障智能辨识流程

4 实验与分析

为应用 BBA 优化后的 SOM 神经网络模型对 VP 型倾斜仪故障特征数据进行智能诊断，实验方式为进行 100 次随机抽取下的循环诊断，训练集和测试集的数量分别为 360 和 91，比例约等于 4:1，试验结果如图 4 和图 5 所示。从中可看出，BBA-SOM 模型的整体准确率均值为 99.264 0%，对电源故障、数采故障以及环境异常等故障类型的识别率均值分别为 100%、99.880 0%、98.577 8%，诊断效果较好，模型较稳健，未出现较大的识别误差，尤其是对电源故障类型的诊断更为准确。

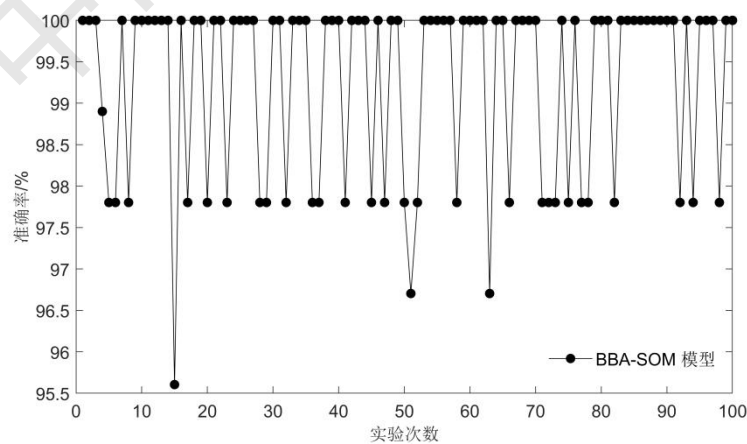


图4 100次随机抽样的BBA-SOM模型诊断整体结果

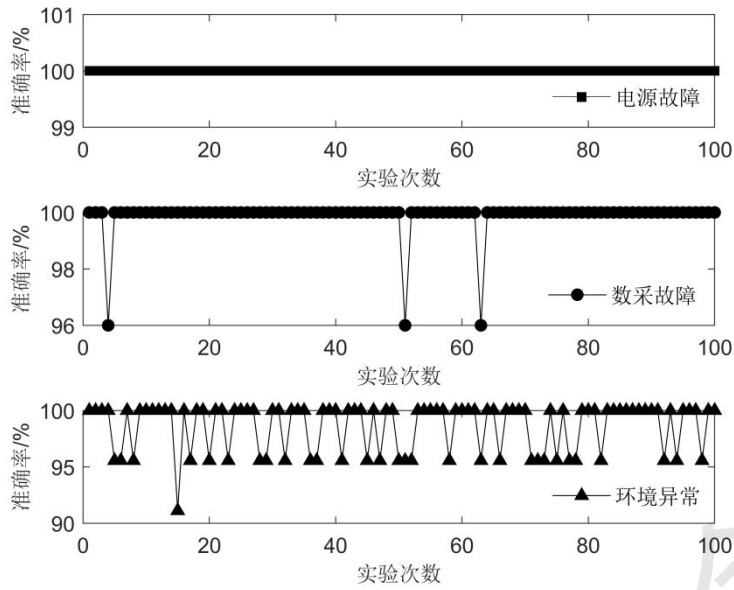


图5 100次随机抽样的BBA-SOM模型各故障类型诊断结果

为了验证 BBA-SOM 诊断模型在同类方法中的的优越性和可靠程度,应用多个机器学习模型(如朴素贝叶斯、线性判别分析(LDA)、伪线性判别分析(PLDA)、AdaBoost 集成学习、SOM 神经网络等)进行故障辨识效果对比,模型性能评价指标采用准确率(Accuracy/%),循环进行 100 次随机抽样的诊断实验,训练集和测试集的数量比例仍然约等于 4:1,部分诊断模型的对比结果如表 1 和图 6 所示。

表1 常见模型的诊断准确率均值结果对比

辨识模型	Mean(Accuracy)/%			
	总体	电源故障	数采故障	环境异常
朴素贝叶斯	80.582 4	37.521 6	89.666 5	94.536 5
LDA	81.868 1	41.081 5	89.248 3	94.810 3
PLDA	82.186 8	42.406 7	89.613 1	94.996 2
AdaBoost	73.670 3	0.250 0	89.843 4	97.023 2
SOM	98.033 0	100	96.297 7	98.468 8
BBA-SOM	99.264 0	100	99.880 0	98.577 8

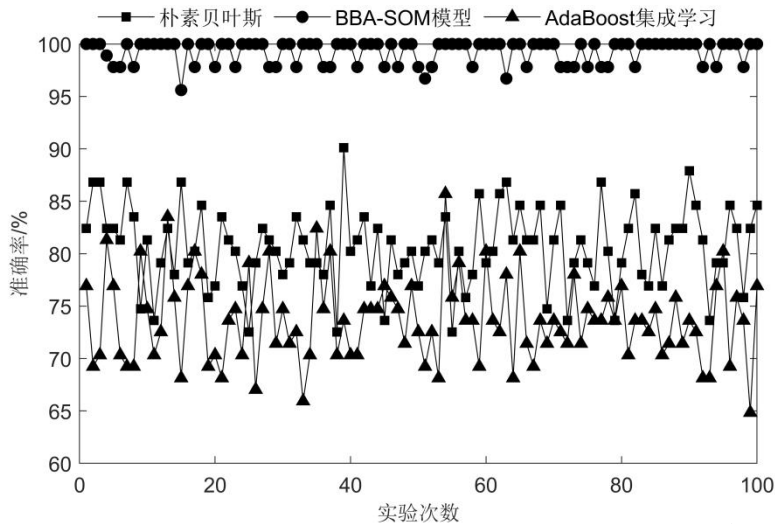


图6 3种常见模型的诊断准确率对比

经过 BBA 算法优化的 SOM 神经网络模型在 Accuracy 指标上有了一定提升,提高了 1.231 0 个百分点, 远高于朴素贝叶斯、LDA、AdaBoost 等经典的机器学习模型。传统学习器对电源故障特征数据的识别较为困难, AdaBoost 集成学习的诊断率只有 0.250 0%, 该问题的主要原因可能为: (1) 大多数样本被错误诊断为数采故障数据, 这是因为二者的故障特征有部分相似点, 均存在部分连续的零点 (Null) 分布; (2) 二者的故障波形与环境异常波形相比, 未呈现相对平稳的递增或递减趋势; (3) 同时, 对故障数据提取的多尺度近似熵结果也证明二者熵值曲线的峰值分布特征较为相似, 均产生了大量的振荡现象; (4) 常规机器学习模型擅长处理二分类问题或线性问题, 面对多分类问题时, 也是将多分类对象转换为二分类问题处理, 而实际诊断的模型需要准确判断不同属性数据间的“距离”或差异程度, 充分利用各维特征判据的贡献度, 才能保证每一个故障类型都能准确诊断。

5 结论

提出一种基于 CEEMD 多尺度近似熵和 BBA-SOM 神经网络的 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪故障诊断新方法, 并应用河北易县地震台仪器的实际观测数据验证了该方法。分析结果表明: CEEMD 多尺度近似熵判据对倾斜仪故障信号特征的区分效果较好; 结合多种机器学习模型的故障诊断效果对比, BBA-SOM 神经网络无监督模型的自动诊断效果显著; 该方法在一定程度上填补了 VP 型倾斜仪故障自动/智能诊断领域的空白, 有效避免了以往人工检测仪器而导致故障排除率较高的弊端, 也极大地简化了倾斜仪故障诊断的流程, 具有提高地震前兆观测仪器运维管理自动化、智能化水平的积极意义。

参考文献:

- [1] 马武刚, 吴艳霞, 胡国庆. VP 宽频带潮汐倾斜仪的研制[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3):873—877.
- [2] 马武刚, 张肖. VP 宽频带倾斜仪现场自动校准装置设计[J]. 地震工程学报, 2016, 38(4): 1-5.
- [3] 马武刚, 卢海燕, 胡国庆, 等. VP 型垂直摆倾斜仪校准装置的设计[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(4):152-155.

中国仪器仪表表学会