

VP 宽频带倾斜仪故障诊断技术综述

庞聪^{1,2,3}, 马武刚^{1,2,3}

(1.中国地震局 地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2.中国地震局 地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3.湖北省地震局, 湖北 武汉 430071)

摘要: VP 型宽频带垂直摆倾斜仪是从事固体潮地形变研究的重要观测仪器, 在地震前兆观测和同震效应研究中有着重要应用价值。目前的 VP 倾斜仪故障研究文献中主要集中在两个方面研讨: ①倾斜仪故障的人工排查与维修手段; ②倾斜仪异常信号的波形特性分析。重点讨论 VP 倾斜仪的故障特点与异常原因, 介绍以往人工检修仪器的技术流程, 以及引入神经网络、群智能算法等新兴计算机技术, 给出智能诊断 VP 倾斜仪故障的思路和手段, 从而为我国大地形变稳定性观测和仪器升级改造提供有价值的参考。

关键词: 故障诊断;VP 型倾斜仪;人工排查;异常分析;神经网络

A Review of Troubles Determination Techniques for VP Broadband Inclinometer

Pang Cong^{1,2,3}, Ma Wugang^{1,2,3}

(1.Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China; 2.Key Laboratory of Earthquake Geodesy, CEA, Wuhan 430071, China; 3. Hubei Earthquake Administration, Wuhan 430071, China)

Abstract: The VP-type broadband vertical pendulum tiltmeter is an important observation instrument for solid tidal terrain variation research, and has important application value in earthquake precursor observation and isoseismic effect research. The current VP tiltmeter fault research literature mainly focuses on two aspects: (i) manual troubleshooting and maintenance means of tiltmeter faults; (ii) waveform characteristics analysis of tiltmeter abnormal signals. Focus on the discussion of the characteristics of the VP tiltmeter fault and the cause of the anomaly, the introduction of the previous manual maintenance of the technical process of the instrument, as well as the introduction of neural networks, swarm intelligence algorithms and other emerging computer technology, to give intelligent diagnosis of the VP tiltmeter fault ideas and means, so as to provide valuable reference for China's geodetic stability observation and instrument upgrade.

Keywords: troubles determination; VP-type tilt meter; manual troubleshooting; abnormality analysis; neural network

1 引言

VP 型倾斜仪^[1-3]依靠其宽频带、差动电容测微、基线短等优点,近些年在大地形变观测仪器行业领域和固体潮野外观测中占据重要地位,已先后在全国 100 余个地震监测台站及武汉大学测绘学院、中国地震局地震研究所、长城计量研究所等科研机构应用。由于其为新研制科研仪器,在系统稳定性、数据记录抗干扰、机械结构防护等方面存在一定设计欠缺,已布设使用的 VP 倾斜仪(如图 1)陆续出现一定频次的数据采集器、垂直摆、电源等电子机械部件损坏^[4-6],以及易受到恶劣天气的干扰影响,在雷暴天气、大风、暴雪等情况下数据记录会发生严重畸变或突跳^[7-9]。由于该仪器的部署与地震监测系统密切相关,如若出现大范围或高频次的仪器故障和异常信号记录,将会导致地震数据污染甚至地震事件漏报,急需一种有效的 VP 倾斜仪故障诊断方法或流程,帮助仪器使用者及维护人员及时地快速发现仪器故障及其诱因,针对性地排除设备隐患。

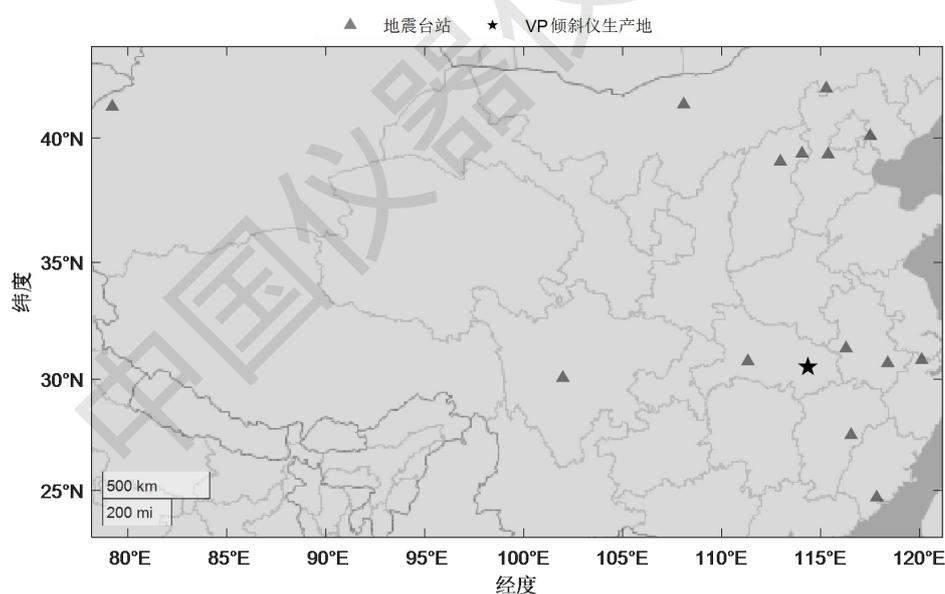


图1 全国部分VP倾斜仪故障空间分布

Fig.1 National spatial distribution of VP inclinometer failures (partial)

传统的设备故障诊断主要依赖人工检修,需要维修人员具有较丰富的历史经验和精准的判断力,没有形成较可靠的故障判断准则和自动化流程。现下新兴的设备故障诊断技术^[13-15]是机械工程和仪器仪表工程领域中的一门新兴综合性应用技术,除了直接为机械设备传统维

修、检测手段带来革新外，还将获得仪器主要故障和次要故障的发生频次、故障源、损坏状况等重要数据，给仪器的研发人员奠定了基本改进方向和侧重目标，从某个角度来说也提高了仪器系统的智能化与自动化管理水平，具有明显的科学研究价值。本文首先讨论了 VP 倾斜仪故障类型和传统诊断方法，并结合当下流行的人工智能技术提出一种 VP 倾斜仪故障诊断新方法。

2 传统 VP 倾斜仪故障诊断方法

人工诊断是当下 VP 倾斜仪及其类似观测仪器故障排除和异常分析的主要手段，存在故障类型划分不清晰、人工干预过多、故障记录无法有效收集等问题。李晓东等^[10]认为 VP 型宽频带倾斜仪常见故障的原因主要可以归纳为 5 大类，例如信号调理电路故障、外界干扰故障、仪器调零故障、标定故障以及设备供电故障等；并梳理出一套 VP 型宽频带倾斜仪常见的故障诊断流程（图 2），一般是通过观察信号输出状态，执行不同电压供电操作来判断下一步人工诊断的步骤。田思留等^[11]针对 VP 倾斜仪的常见外部环境干扰作了较详实的波形特性分析，根据日常观测工作日志、气象资料、对比台站其他形变仪器等方法确认了该仪器在降雨、降雪、强日照、人工干扰等外部环境条件下，仪器测值发生较明显的漂移过快、平稳上升等现象，该部分工作较依赖辅助环境观测手段和当地气象部门发布的数据，无法及时地确定当下仪器输出值异常的发生原因。赵希磊^[12]在 VP 倾斜仪日常检测经验基础上，总结了一套排查测量系统故障、调零系统故障和标定系统故障等 3 种类型的故障诊断方法流程，但是这 3 种故障的诊断流程相互之间独立，未与倾斜仪输出波形的特性产生较大的关联，无法有效地推广使用。

通过文献调查，将上述有关 VP 倾斜仪故障诊断的研究文献汇总得到以下结果（如表 1）。

表 1 VP 倾斜仪常见异常信号及其特性

Tab.1 Flow of determination of Troubles for VP Vertical Pendulum Inclinometer

信号来源	类型	异常特征	影响方式	故障排除手段
数采故障		连续出现大量空缺值	数采短路	人工更换
供电故障		仪器无法正常工作	UPS 电源损坏	人工更换
通讯故障	内部故障	数据传输失败	光纤终端盒	人工更换
标定故障		多次标定不合格	标定电路损坏	人工更换
摆系故障		曲线出现大量毛刺	摆体故障	人工更换
雷电干扰		数据大幅突跳及台阶	高压弧光放电	安装避雷设施
气压干扰		固体潮小幅畸变	岩体孔压变化	仪器调零
降雨干扰	天气影响	趋势性连变或突变性转折	岩石不均匀变形	仪器调零
台风干扰		短时抖动加粗和高频成分叠加	高频震颤波	仪器调零
降雪干扰		数据漂移过快	岩石变形及潮湿	仪器调零
强日照		特定时间段曲线变粗、毛刺多	干扰	仪器调零
仪器检修	人为影响	固体潮曲线畸变及阶跃	误操作等	减少操作频次
工程爆破		曲线变粗或呈毛刺变化	地震动干扰	人工核查
天然地震	地球物理	显著波动和阶跃变化	同震效应	与地震仪校对

3 新型 VP 倾斜仪故障诊断方法

传统倾斜仪故障辨识基本是通过人工经验判断仪器异常信号的故障原因，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，这对倾斜仪维护人员的技术水平要求较高，同时存在主观判断错误的风险，不利于地球基本物理场研究和地震前兆观测的有效数据收集与高效率统计管理。随着人工智能技术在故障诊断领域的快速发展，诸多模式识别模型已成功应用于较复杂设备的电机轴承故障诊断、工业过程故障分析或天气干扰异常识别，诊断精度与结果可信度较高。利用机器学习算法或神经网络模型进行故障识别是当下机电设备异常状态辨识与故障智能诊断研究的重要方向，可有效增强仪器监测运维中的自动化程度，提高故障诊断精度，目前已成功应用至机械零部件故障诊断^[13]（如齿轮、轴承）、电子元器件^[14]（如传感器、变压器、电缆）和系统故障诊断^[15]（如航空发电机、制冷机）中。

神经网络^[16]的网络层维数、网络学习速率、步长、领域距离、随机阈值、训练函数等网络参数会对网络学习效果会有一定影响，不恰当的网络参数值将直接影响网络训练效率以及降低网络预测的精度。为了改进现有的机器学习或神经网络模型，一般思路是应用最优化方法进行部分超参数寻优，避免过学习或欠学习的发生。但是，传统群体仿生算法往往寻优效果不佳，例如遗传算法虽然全局搜索能力较强，迭代速度较快，局部探索方面却存在明显

的缺陷，粒子群算法易陷入局部最优，模拟退火算法迭代速度较慢，对初值和部分超参数敏感。近些年逐渐被提出的新型群体智能优化算法^[17-20]（如图 2 所示）在一定程度上对传统方法进行了改进，但是缺乏必要的对比分析实验来验证其在故障智能诊断中的有效性，如灰狼算法（gray wolf optimization, GWO）、鲸鱼优化算法（whale optimization algorithm, WOA）、蝗虫优化算法（grasshopper optimization algorithm, GOA）、麻雀优化算法（sparrow search algorithm, SSA）、蚁狮优化算法（ant lion algorithm, ALO）、蜻蜓算法（dragonfly algorithm, DA）等，特别需要系统地、完备地阐述新方法与传统故障诊断相结合后的非线性求解、大规模运算以及多元寻优效果。

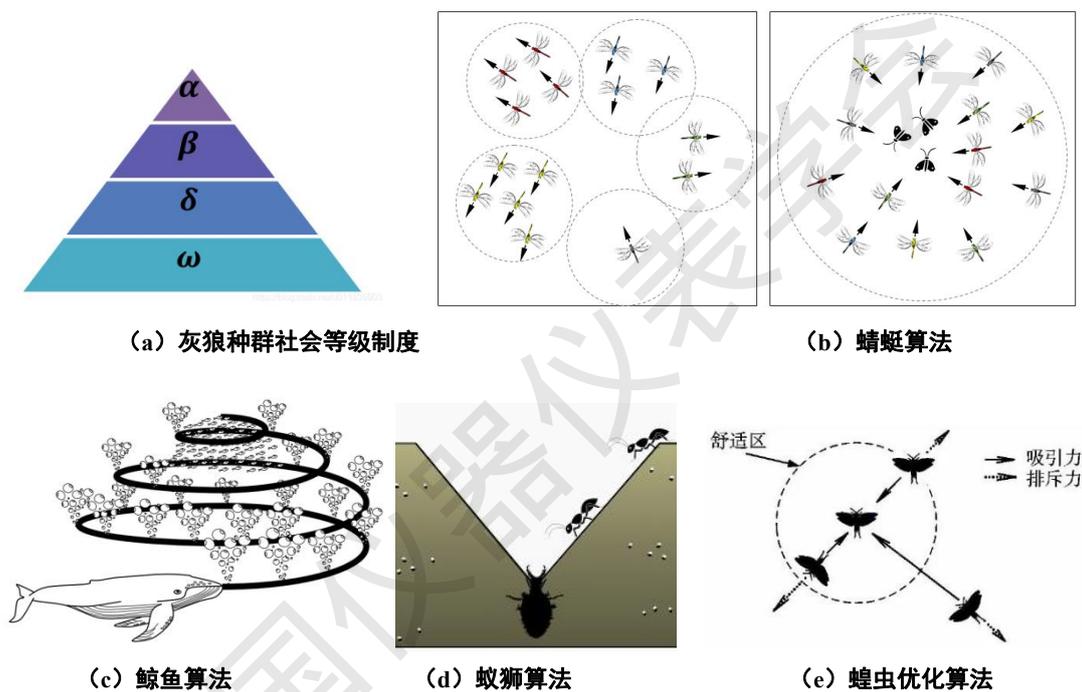


图 2 新型群体智能优化算法

Fig.2 Novel population intelligence optimization algorithm

如图 3，基于仪器输出信号波形特征，将 VP 倾斜仪故障诊断和人工智能技术融合在一起的自动诊断思路可以归纳为：对故障数据进行类型标定与归一化，利用新型信号分解技术处理故障数据得到仪器故障的多尺度熵判据数据集，并按比例划分训练集和测试集，选定合适的新型群体智能算法对传统神经网络模型进行优化改进，将得到的新学习模型应用至 VP 倾斜仪故障数据的测试集中，结合不同的评价性指标检验模型的诊断效果和可行性，最终实现倾斜仪故障类型自动化预测的目标。

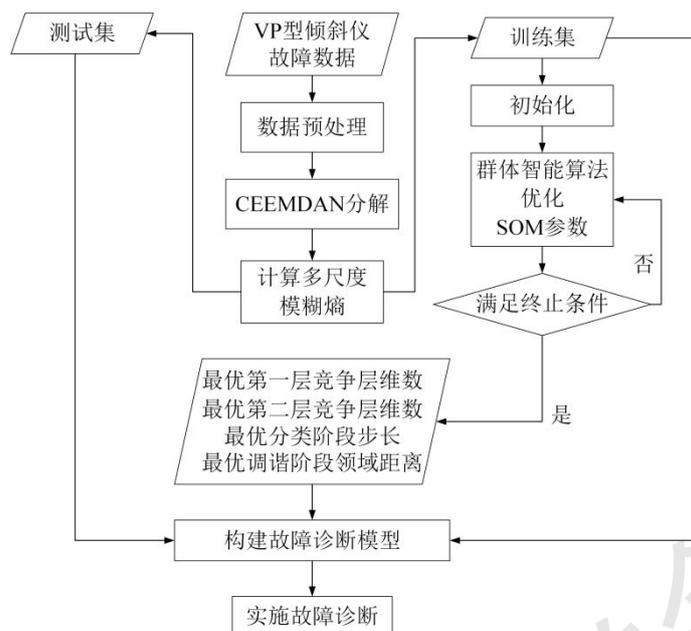


图3 基于人工智能技术的VP倾斜仪故障自动诊断思路

Fig.3 The idea of automatic diagnosis of VP tilt meter fault based on artificial intelligence technology

4 结论

鉴于 VP 型宽频带倾斜仪存在的故障问题, 本文分析了其在全国地震台网和科学研究中的重要价值和主要故障类型, 介绍了以往依靠人工检修仪器的主要技术, 以及提出一种引入神经网络和群智能算法等新兴计算机技术, 给定智能化的自动诊断 VP 倾斜仪故障的思路和建设性策略, 可为我国大地形变稳定性观测和 VP 倾斜仪升级改造提供有价值的参考。

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.
- [4] 赵黎明, 胡雪琪, 李颖楠, 朱冰清, 王建国, 李恩建. 天津蓟县地震台 VP 宽频带倾斜仪故障诊断与排除[J]. 高原地震, 2019, 31 (04) :52-56.
- [5] 格桑尼玛. 狮泉河地震台 VP 垂直摆倾斜仪故障解决方法[J]. 西藏科技, 2018 (11) :6-8.
- [6] 姜海, 徐诚, 李恩建, 李颖楠. 天津蓟县小辛庄山洞 VP 型宽频带倾斜仪故障分析与修复[J].

- 内陆地震,2019,33(03):283-288.
- [7] 马援,刘甜甜,贾浩东. 宝昌地震台 VP 型垂直摆倾斜仪常见干扰[J].地震地磁观测与研究,2018,39(04):183-188.
- [8] 贾昕晔,贾彦杰,白少奇,闫纪文. 宝昌地震台 VP 型宽频带垂直摆倾斜仪干扰因素分析[J].地震地磁观测与研究,2018,39(05):131-135.
- [9] 李惠玲,高云峰,程冬焱,胡玉良,宋美萍,依光叫,穆慧敏,王鹏伟. VP 宽频带垂直摆倾斜仪观测干扰识别[J].地震地磁观测与研究,2018,39(02):100-107.
- [10] 李晓东,韩静,高守全,徐衍刚,马武刚. VP 型宽频带倾斜仪常见故障诊断及维修[J].内陆地震,2018,32(01):70-75.
- [11] 田思留,刘仕锦,袁媛,袁梅,刘涛,赵兰. 康定地震台 VP 型垂直摆倾斜仪常见干扰分析[J].四川地震,2019(04):26-31.
- [12] 赵希磊. VP 宽频带倾斜仪检修技术研究[J].内陆地震,2022,36(01):92-96.
- [13] 唐贵基,徐振丽,庞彬,白洁. 基于 SSWPT 边际谱特征信息提取的齿轮故障诊断[J].振动与冲击,2022,41(14):50-57.
- [14] 张坤. 传感器故障诊断方法研究及其在机械振动监测的应用[D].东南大学,2021.
- [15] 杨占刚,徐海义,成博源,石旭东. 基于 FWA-DBN 的航空发电机偏心故障诊断[J].系统工程与电子技术,2022,44(05):1757-1764.
- [16] 庞聪,江勇,吴涛,廖成旺,马武刚. 神经网络参数对地震类型识别的影响[J].科学技术与工程,2022,22(18):7765-7772.
- [17] Prakash Chandra Sahu,Ramesh Chandra Prusty,Sidhartha Panda. A gray wolf optimized FPD plus $(1 + PI)$ multistage controller for AGC of multisource non-linear power system[J]. Military operations research,2019,16(1):1-13.
- [18] Qiang Zhang, Lijie Liu. Whale Optimization Algorithm Based on Lamarckian Learning for Global Optimization Problems[J]. IEEE Access,2019,(7):36642-36666.
- [19] Purna Saxena, Ashwin Kothari. Ant Lion Optimization algorithm to control side lobe level and null depths in linear antenna arrays[J].International Journal of Electronics and Communications,2016,70(9):1339-1349.
- [20] LV Zhaoming, PENG Rong. Improving the Efficiency of Multi-Objective Grasshopper Optimization Algorithm to Enhance Ontology Alignment[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences,2022,27(3):240-254.