

山西地震 编辑委员会

主 编：欧阳承新

副 主 编：万 亮 李自红 宋美卿 张瑞芳（专职）

编辑委员：（按姓氏汉语拼音排序）

曹 筠	陈 石	董康义	冯希杰	高武平	韩晓明	胡玉良
黄金刚	季灵运	贾建喜	蒋海昆	蒋晓山	雷建设	雷启云
雷生学	李 斌	李 丽	李冬梅	李宏伟	梁 艳	刘瑞春
罗 勇	吕 芳	马朝晖	邵志刚	史双双	宋美卿	万永革
王跃杰	武艳强	解 滔	薛 艳	闫计明	晏 锐	杨 斌
杨 静	殷伟伟	曾金艳	张 合	张亮娥	张仰辉	张郁山
赵晓云	郑文俊	周克昌				

EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI
THE BOARD OF EDITORS

EDITOR IN CHIEF: OUYANG Chengxin

ASSOCIATE EDITORS IN CHIEF: WAN Liang LIZihong SONG Meiqing ZHANG Ruifang (specific duty)

BOARD MEMBERS: CAO Jun CHEN Shi DONG Kangyi FENG Xijie GAO Wuping HAN Xiaoming

HU Yuliang HUANG Jingang JI Lingyun JIA Jianxi JIANG Haikun

JIANG Xiaoshan LEI Jianshe LEI Qiyun LEI Shengxue LI Bin LI Li LI Dongmei

LI Hongwei LIANG Yan LIU Ruichun LUO Yong LV Fang MA Zhaohui

SHAO Zhigang SHI Shuangshuang SONG Meiqing WAN Yongge WANG YueJie

WU Yanqiang XIE Tao XUE Yan YAN Jiming YAN Rui YANG Bin YANG Jing

YIN Weiwei ZENG Jinyan ZHANG He ZHANG Liange ZHANG Yanghui

ZHANG Yushan ZHAO Xiaoyun ZHENG Wenjun ZHOU Kechang

山西地震

SHANXI DIZHEN

EARTHQUAKE RESEARCH

IN SHANXI

季刊 Quarterly

1973年2月创刊

Established in February, 1973

2024年第4期(总第200期)

No.4 (Serial No.200) 2024

商标注册号: 327496

Number of Trade Mark Registra-

tion: 327496

主管单位: 山西省地震局
主办单位: 山西省地震学会
编辑出版: 《山西地震》编辑部
主 编: 欧阳承新
编辑部地址: 山西省太原市晋祠路
二段69号

邮政编码: 030021

电 话: (0351) 5610534

印 刷: 山西省建筑科学研究院
印刷科技有限公司

地 址: 太原市山佑巷

发行范围: 公开

发行订购: 《山西地震》编辑部

网 址: <https://sxdz.cbpt.cnki.net/>

电子信箱: sxdzjyb@163.com

出版日期: 2024年12月

Administration: Shanxi Earthquake Agency

Sponsoring Organization: Seismological Society of Shanxi Province

Edited and Published: by the Editorial Office of ERS

Editor in Chief: OUYANG Chengxin

Address of The Editorial Office:
No. 69, Block 2 of Jinci Road, Taiyuan.

Postcode: 030021

Tel: (0351) 5610534

Printed: Shanxi Academy of Building Research
Printing Technology Co., Ltd.

Address: Shanyouxiang of Taiyuan

Distributed: Openly

Distributor and Order Department: Editorial
Office of ERS

<https://sxdz.cbpt.cnki.net/>

E-mail: sxdzjyb@163.com

Data of Publication: Dec.2024

SHANXI DIZHEN



ISSN 1000-6265

CN 14-1107/P

CODEN SDIZEY

山西地震®

EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI

山西地震

二〇二四年

第四期

总第二零零期

2024 / 4

ISSN 1000-6265



山西省地震学会

国际标准连续出版物号 ISSN 1000-6265

国内统一连续出版物号 CN 14-1107/P

年定价: 20.00元(不含邮费) 本期定价: 5.00元

全国优秀地震期刊 山西省连续十三年一级期刊
中国期刊网 中国学术期刊(光盘版) 万方数据库全文收录期刊
中文科技期刊数据库来源期刊 维普资讯网全文收录期刊
中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

山西地震

(季刊·1973年创刊)

2024年第4期

(总第200期)

目次

· 地震地质 ·

运城盆地相关块体运动学特征初步研究····· 郭春杉,李文巧,闫小兵(1)

· 地震活动性 ·

抛掷爆破当量与震级对应关系及波形特征研究····· 郭伟,刘芳,范玲玲(11)

· 观测分析 ·

腾冲站垂直摆倾斜仪观测质量及同震响应分析····· 番绍辉,张山元,熊家伟,周克鹏(16)

永安台地磁仪背景噪声影响因素分析····· 刘水莲,刘憬昀,龚薇,陈俊峰(21)

山西陵川台钻孔应变降雨干扰特征定量分析····· 魏凯艳,陈慧,李颖,李惠玲,陈永前(27)

· 工程抗震 ·

基于应县木塔的地震易损性分析及隔震性能研究····· 王雷雷,韩晓飞(33)

EEMD 模态分解算法在振动数据噪声抑制中的应用····· 李宏伟,曾金艳,任瑞国(40)

· 技术交流 ·

临汾地球物理站网故障分析及运维建议····· 张聪聪,张红秀(46)

基于 VB 语言的水位校测软件研发····· 王永杰,马磊,翟世恒,徐婉君,王兵,王莉(53)

责任编辑:张瑞芳; 校对:张正霞,梁永焯; 英文译校:李斌
期刊基本参数:CN 14-1107/P * 1973 * q * A4 * 56 * zh * P * ¥5.00 * 70 * 9 * 2024-12
本刊网址:https://sxdz.cbpt.cnki.net/
本刊电子信箱:sxdzjb@163.com

CONTENTS

• **Earthquake Geology** •

Preliminary Study on Kinematic Characteristics of Related Blocks in Yuncheng Basin
..... GUO Chunshan, LI Wenqiao, YAN Xiaobing(1)

• **Seismicity** •

Research on the Correspondence between Throwing Blasting Equivalent and Earthquake Magnitude, as well as
Waveform Characteristics—Taking the Heidaigou Open-pit Coal Mine as an Example
..... GUO Wei, LIU Fang, FAN Lingling(11)

• **Observation and Analysis** •

Analysis of Observation Quality and Co-seismic Response of Tengchong Vertical Pendulum Incliner
..... FAN Shaohui, ZHANG Shanyuan, XIONG Jiawei, ZHOU Kepeng(16)

Analysis of Influencing Factors on Background Noise of Yong'an Magnetometer
..... LIU Shuilian, LIU Suyun, GONG Wei, CHEN Junfeng(21)

Quantitative Analysis of Borehole Strain Rainfall Disturbance Characteristics at Lingchuan Station, Shanxi
..... WEI Kaiyan, CHEN Hui, LI Ying, LI Huiling, CHEN Yongqian(27)

• **Antiseismic Engineering** •

Seismic Vulnerability Analysis and Seismic Isolation Performance Research Based on Yingxian Wooden Tower
..... WANG Leilei, HAN Xiaofei(33)

Application of EEMD Modal Decomposition Algorithm in Noise Suppression of Vibration Data
..... LI Hongwei, ZENG Jinyan, REN Ruiguang(40)

• **Academic Exchange** •

Analysis and Suggestions for Faulty Operation and Maintenance of Linfen Geophysical Station Network
..... ZHANG Congcong, ZHANG Hongxiu(46)

Development of Water Level Calibration Software Based on VB Language
..... WANG Yongjie, MA Lei, ZHAI Shiheng, XU Wanjun, WANG Bing, WANG Li(53)

· 地震地质 ·

文章编号:1000-6265(2024)04-0001-10

运城盆地相关块体运动学特征初步研究

郭春杉^{1,2}, 李文巧², 闫小兵³

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;
3. 山西省地震局, 山西 太原 030021)

摘要: 运城盆地是典型的正断层和断陷盆地发育区, 受断层的控制发育有中条山块体、峨嵋台地块体和鸣条岗块体等北东向的主要隆升块体。通过对比分析盆地相关块体上大量钻孔(剖面)和古地磁等资料, 结合相关断层活动速率, 探讨研究区主要构造单元演化过程、运动方式, 得出中条山块体、峨嵋台地块体、鸣条岗块体均发生顺时针的掀斜变形, 其中峨嵋台地块体、鸣条岗块体抬升方式为由北东向南西方向抬升; 上新世晚期中条山南北两侧平均掀斜量超过 100 m, 掀斜角度不大; 控制块体边界断裂的活动量、活动速率与块体的隆起成正相关, 初步讨论建立运城盆地构造模式图像。

关键词: 运城盆地; 块体; 抬升方式; 构造模式

中图分类号: P315.2⁺4

文献标志码: A

0 引言

我国是一个地震频发的国家, 大陆内部活动盆地广泛发育, 一系列历史强震发生在陆内盆地中。地震中长期预测依赖于区域地震构造模型的建立和动态观测资料的分析, 通过评估构造活动和孕震过程的物理机制来判断地震风险, 需要地质学、地震学、形变测量等方面的结合。因此, 选定典型区域进行多学科综合研究是实现中长期预测的重要方向。汾渭断陷带位于鄂尔多斯块体东南缘, 是华北地区重要的地震构造单元。运城盆地是汾渭断陷带断陷最深的盆地之一, 形成于渐新世, 受控于中条山北麓断裂, 为东南深西北浅的半地堑式盆地^[1]。自从运城盆地形成以来, 盆地内部发育形成多条 NE—NNE 方向的断裂, 控制着运城盆地 NE 或近 NE 向构造隆起和盆地沉降(见图 1)。

运城盆地相关块体主要包括运城断陷盆地、中条山块体、峨嵋台地以及运城盆地中次级块体鸣条岗隆地, 前人研究较多围绕主要活动断裂的活动性, 对地貌面与块体运动相应关系的详细研究较少。本文通过对运城盆地相关块体的运动方式、相关断裂的滑动量及相关构造单元在时间空间上的联系进行对比研究, 分析得出盆地相关块体之间的相互差异运动关系。对运城盆地构造变形机制进行探讨分析, 建立运城盆地构

造模式图像。

1 区域概况

运城断陷盆地位于鄂尔多斯块体东南缘, 属于华北断块、华南断块与青藏断块的连接点, 是汾渭断陷带中断陷最深的盆地之一。该断陷盆地自新生代以来, 中条山北麓断裂和峨嵋台地南缘断裂间的地块开始沉降形成, 沉积了巨厚的新生代地层^[1]。盆地北侧为孤山—稷王山—紫金山背斜, 东、南侧为中条山背斜^[2]。从宏观角度看, 该盆地主要由南侧的中条山北麓断裂和北侧的峨嵋台地南缘断裂所塑造, 这两条断裂在不同程度上构成盆地边缘的构造框架, 对运城盆地的沉积构造起控制作用, 基本上决定了运城断陷盆地的边界以及内部次级构造单元的轮廓。运城盆地及其周边地区主要由 3 大构造地貌单元构成, 分别是位于区域东南侧的中条山块体(平均海拔 1 700 m)、中部的运城盆地(平均海拔 400 m)以及北侧的峨嵋台地(平均海拔 700 m)。此外, 在上述两条断裂活动的同时, 盆地内部出现了次级隆起现象, 地貌上表现为次级块体的鸣条岗次级块体^[3-4], 不同地貌单元之间的地形差异显著, 其边界通常也是不同构造单元的分界线, 即晚第四纪活动断裂的主要分布区域(见图 1)。

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2017IES010101、2018IEF0306), 国家自然科学基金(41502204), 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新项目(2022XAYJS07)。

第一作者简介: 郭春杉(1993—), 男, 河北昌黎人。硕士研究生, 工程师, 主要从事浅层地震勘探及其应用研究, E-mail: 773113445@qq.com。

通信作者: 李文巧(1978—), 男, 山东烟台人。博士研究生, 高级工程师, 主要从事活动构造与地震工程研究, E-mail: lwq3278@163.com。



图1 运城盆地地震构造图
Fig. 1 Seismic structure map of Yuncheng Basin

运城盆地的基底展现出掀斜特征,导致新生界沉积厚度从断陷幅度较大的一侧向断陷幅度较小的一侧逐渐减小,在地质剖面上呈现出楔形结构。根据钻孔及物探资料,运城盆地新生代地层自东北向西南逐渐加深,盆地北部边缘的地层厚度约 1 km,安邑—席张区域的地层厚度则超过 5 km(见图 2、图 3)。这一现象表明,运城盆地基底南北两侧的断层活动性存在差异,自新生代以来已产生显著的掀斜量。通过图 2 可以看出,运城断陷盆地的基底并非一个完整的块体,发育有多条断层,被分割为多个次级块体。这些次级块体之间的相对运动,有助于吸收南北两侧运动差异量。鸣条岗块体的形成,便是运城断陷盆地内次级块体相对隆升的结果。不仅盆地内部如此,与盆地相邻的块体山地亦呈现出一侧隆起幅度大、另一侧隆起幅度小的特征。例如,中条山隆起区因北侧断层活动性高于南侧,导致分水岭偏向西北,该侧地形陡峭,河谷深切;另一侧则逐渐过渡为低山丘陵或倾斜台地,向盆地延伸。受已有资料限制,目前这些结论均基于宏观认识,若要深入了解运城盆地相关块体的构造运动模式,还需进一步获取块体间差异运动的量化数据。

2 数据与方法

层状地貌面包括夷平面、剥蚀面和河流阶地,层状地貌面记录了地区地貌的演化历程,可以将控制变形

的活动构造累积的运动方式、运动特征、运动量等直接地反映出来^[5-8]。层状地貌面广泛存在,具有年代意义,一个层状地貌面就代表一个时代,是地貌学上的“地层”标志^[9]。这种特点可以对比较大范围内的构造活动强弱,拓展研究地区构造活动的时间尺度^[10-11]。深入研究这些层状地貌面的特征、成因和形成时代,是探讨地区隆升年代、幅度和过程的重要途径。

收集运城盆地相关块体(中条山块体区、断陷盆地、峨嵋台地以及盆地中次级块体)区钻孔资料及沉积剖面(见表 1),统计分析新生界地层沉积厚度与沉降速率(见表 2)。依据钻孔数据,通过对同时代地层错断量的分析,评估不同块体间相互运动的量值。数据揭示,于上新世晚期,峨嵋台地显著抬升,逐渐接近古湖水域,沉积了风成红黏土,其海拔高度与中条山西北麓的高台地相近。研究选取晚新世作为时间起点,直至今今,通过对比高台地底部砾石层与峨嵋台地上红黏土层之间的海拔高度差异,推算出晚新世以来,中条山隆起区域与峨嵋台地之间的相对运动差异。

在夏县高台地形成时期,运城古湖与三门峡古湖之间存在连通性。中条山南北两侧的砾岩堆积区可能与湖面高度相匹配且海拔高度一致。故通过对夏县高台地底层砾石的平均海拔与三门峡望原高台地底层砾石海拔的分析,估算出上新世晚期以来由于中条山两侧断层活动性的差异引发的掀斜运动量。

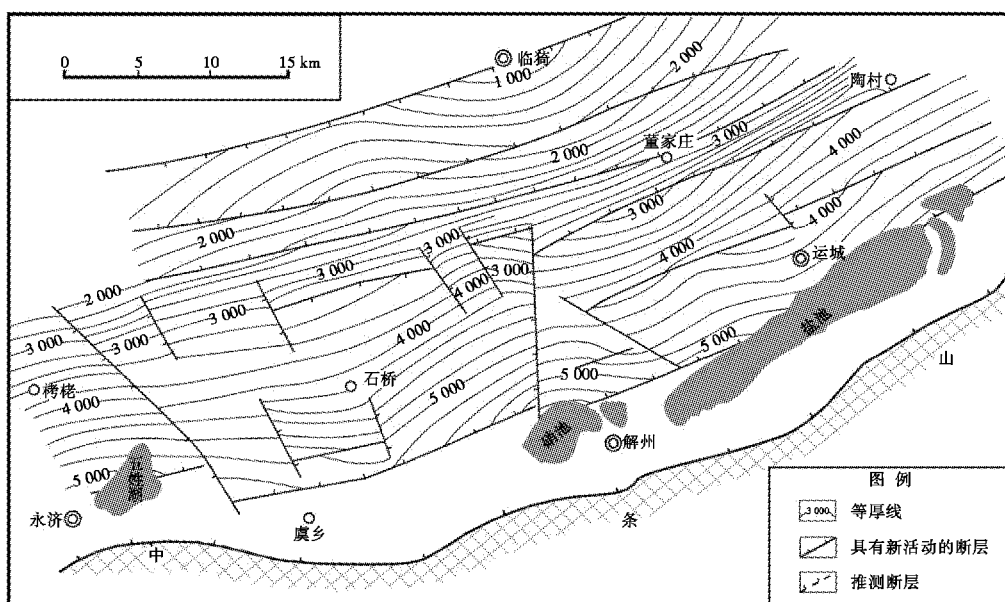


图 2 运城盆地新生界地层等厚线图(据山西省地质局)

Fig. 2 Isopach map of Cenozoic strata in Yuncheng Basin (according to Shanxi Geological Bureau)

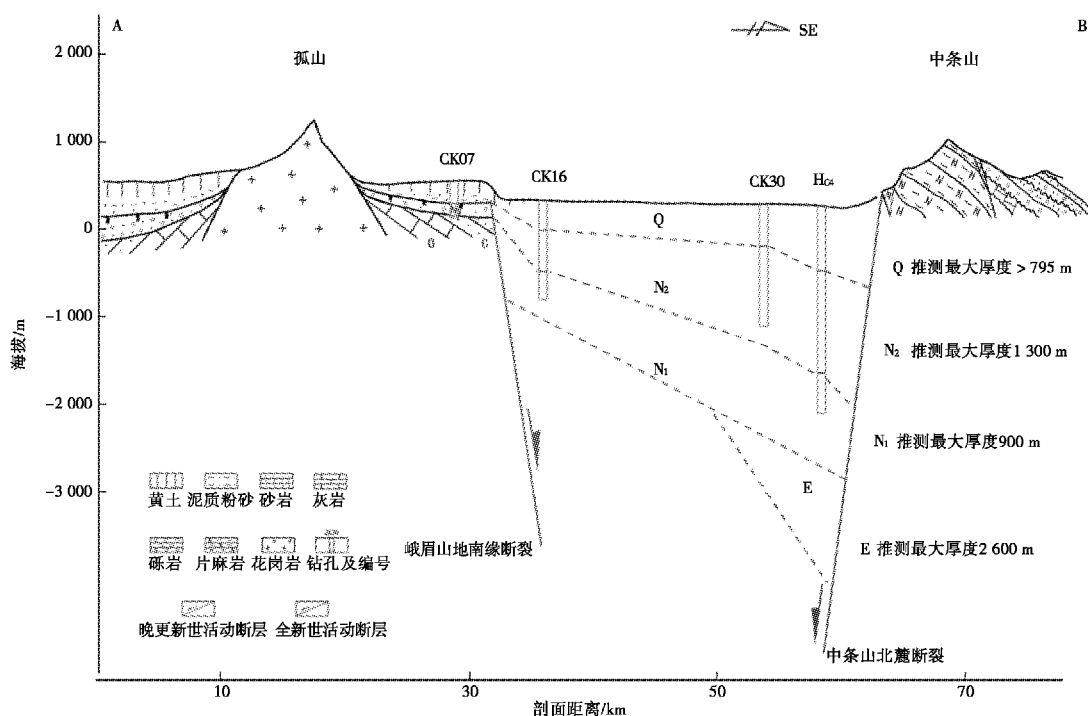


图 3 运城盆地新生代以来地层厚度剖面图

Fig. 3 Profile of strata thickness since Cenozoic in Yuncheng Basin

另外,峨嵋台地南缘断层晚更新世以来活动性弱或不活动,鸣条岗地垒为次级构造块体,主要表现为地裂缝活动。野外地质调查未发现地表断层剖面,只能借助已有的钻孔资料,进行地层对比,从更大时间尺度估算该断层的活动量,以及滑动速率。

3 结果分析

3.1 中条山隆起区 2.6 Ma B.P. 以来隆升量及掀斜量
根据表 1 数据绘制了运城盆地—夏县高台地—三门峡高台地地质剖面图及相关钻孔对比,如图 4 所示,

位置	孔深 (m)	埋深、厚度、岩性						
		古近纪 E	新近纪 N		第四纪			
			中新世 N ¹	上新世 N ²	早更新世	中更新世	晚更新世	全新世
				盐湖—永济一带, N2 顶板埋深 367~795 m, 厚度 17~860 m; 推测在安邑—席张一带最大厚度约 1 300 m。	底板埋深一般 365~640 m, 厚度一般为 230~350 m。	底板埋深 135~300 m, 厚度一般为 120~220 m, 安邑—席张一带最厚约 250 m。	底板埋深 30~65 m, 厚度一般为 20~40 m。	
陶村	161				厚度: 71 m	厚度: 80 m	厚度: 10 m	
王范村	161				厚度: 24 m		厚度: 121 m	厚度: 16 m
杜西庄东北	197				厚度: 66 m	厚度: 105 m	厚度: 26 m	
王范一带	590.76			顶板埋深 170 m, 新近系厚度超 320 m。				
				揭露 N2 顶板一般埋深 355~400 m, 由东北向西南逐渐变深, 西北侧浅, 东南侧较深, 综合分析最大厚度大于 700 m。	底板埋深一般为 355~400 m, 厚度 210~268 m。	亚砂土夹薄砂层, 湖滨相沉积, 上覆离石黄土, 底板埋深 92~142 m, 厚度 82~133 m。	厚度: 5~25 m	
白堂	1 313		厚度: >301 m	厚度: 608 m	厚度: 251 m		厚度: 127 m	厚度: 26 m
白堂	1 312.69		厚度: 306.75 m	厚度: 600 m				
三里路	200				厚度: 108 m	厚度: 59 m	厚度: 33 m	
董家庄	499			厚度: 93 m	厚度: 243 m	厚度: 81 m	厚度: 82 m	
绛县中阳乡尧宇村				底板埋深大于 557.26 m, 厚度大于 340.88 m。				
				焦山北侧绛县一带, N2 顶板埋深 300~500 m, 推测该区 N2 最大厚度约 600 m。	底板埋深 300~500 m, 揭露厚度 144~306 m。	底板埋深 143~228 m, 厚度 86~173 m。		
陶唐	315			厚度: 113 m(底部出露石炭基岩)	厚度: 63 m	厚度: 122 m	厚度: 15 m	
张村堡	290			厚度: 28 m	厚度: 177 m	厚度: 75 m	厚度: 10 m	
孙吉—南辛庄	273			厚度: 2 m	厚度: 156 m	厚度: 100 m	厚度: 15 m	
稷王山以东	305.09			顶板埋深 180 m, 新近系厚度超 120 m。				
				揭露 N2 底板埋深 210~455 m, 揭露厚度 8~214 m。	底板埋深 155~390 m, 厚度 59~262 m(稷王山东部较薄 50~200 m, 西部及台地南缘较厚 100~200 m, 孤山以西与大嶷山间最厚达 260 m)。	坡洪积相, 上覆离石黄土, 底板埋深 62~191 m, 厚度 56~186 m(稷王山东部较薄, 西部较厚)。	厚度: 5~25 m	

可知中条山隆起区南北两侧均有走向与山体走向近于平行的正断层发育, 为相对于两侧盆地强烈抬升的地垒构造。由于北侧断裂第四纪以来活动幅度明显大于南侧断层, 造成山地北侧地形较陡, 南侧地形较缓的差异地貌。

在正常情况下, 任何地貌沉积体一旦暴露于大气环境中, 由于风成黄土堆积过程的连续性, 其表面将迅

速被黄土沉积层所覆盖。与地貌沉积体直接接触的黄土古土壤层, 其年代与地貌沉积体脱离水体环境的时间相仿, 因此, 该层黄土古土壤层能够指示地貌沉积体的形成年代。由于黄土古土壤层的发育不存在时间上的错位问题, 因此黄土古土壤序列可以作为一个区域时间标尺来标定不同地段河湖地貌沉积体的形成时代^[12-13]。

夏县高台地夏县剖面(35°1'46.70"N、111°17'59.53"E、海拔1 010 m)的高分辨率古地磁研究^[14]结果显示,该地区由基岩、上覆晚新生代砾岩、风成红黏土和黄土组成。唐县面最终形成时间为3.1 Ma B. P.。中条山北麓断裂运动导致夷平终止。然后该夷平面被抬升为一个平台,接着是累积红黏土和黄土古土壤。夏县台地稳定的砾岩堆积结束于2.6 Ma B. P.左右,该套砾石层出露高度超过运城盆地300 m左右。盐湖钻孔剖面M/G界线位于地面以下400 m处^[15](见图4),2.6 Ma B. P.以来垂直速率为0.27 (mm/a)^[16]。

表2 运城盆地新生代地层沉积厚度与沉降速率表
Table 2 Sedimentary thickness and sedimentation rate of Cenozoic strata in Yuncheng Basin

地层时代	运城盆地		峨嵋台地		鸣条岗	
	沉积厚度 (m)	沉降速率 (m/Ma)	沉积厚度 (m)	沉降速率 (m/Ma)	沉积厚度 (m)	沉降速率 (m/Ma)
Q ₃	40	333	25	208	25	208
Q ₂	250	378	186	281	133	201
Q ₁	690	383	265	147	268	148
N ₂	1 300	464	214	76	>700	>250
N ₁	900	50	0	0	—	—
E	2 600	113	0	0	—	—

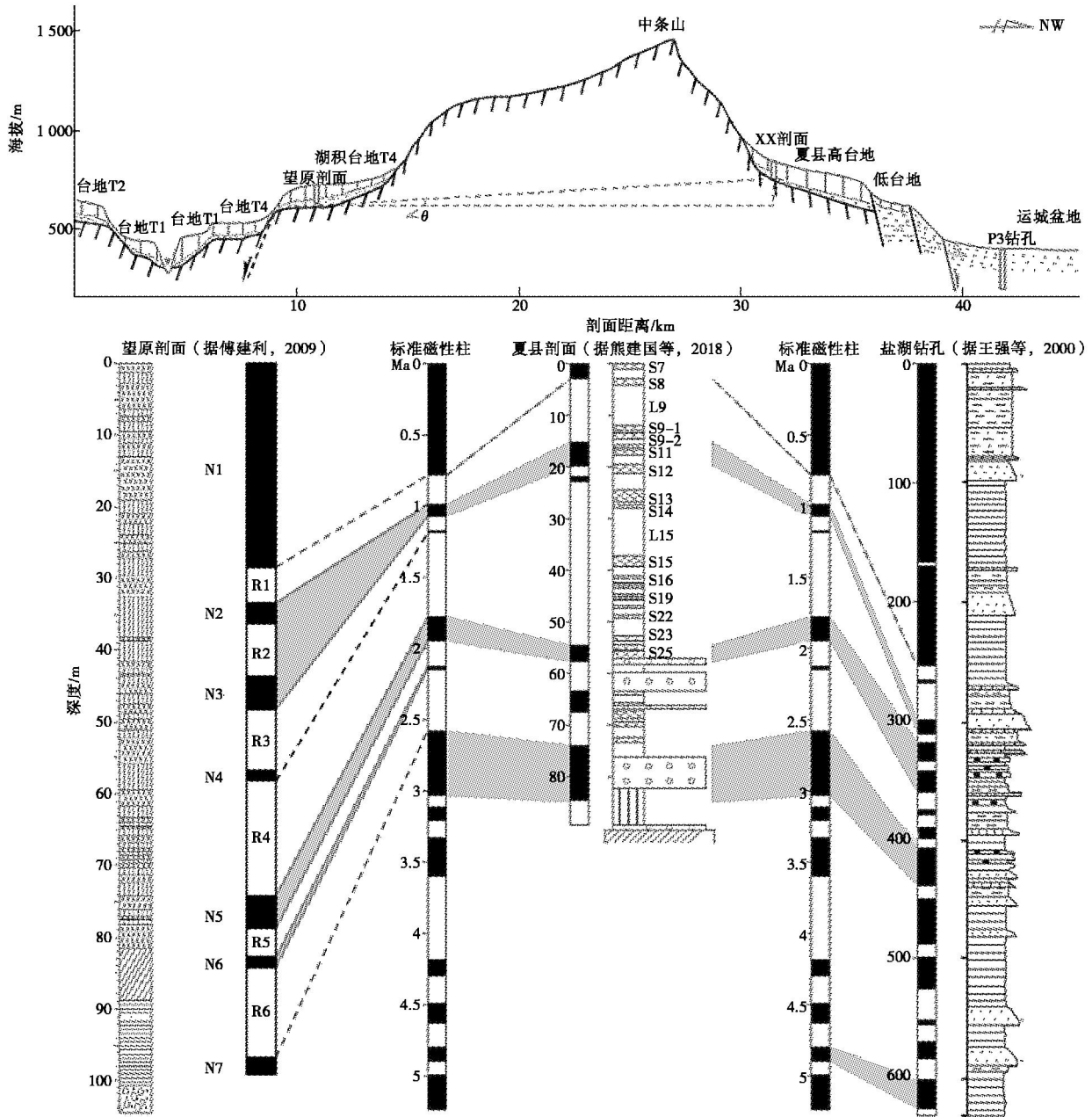


图4 运城盆地—夏县高台地—三门峡高台地地质剖面图及相关钻孔对比

Fig. 4 Geological profile of Yuncheng Basin-Xia County Plateau and Sanmenxia plateau and correlation of boreholes

中条山南麓最高一级湖积台地望原剖面(34°53′10.2″N、111°22′22.0″E、海拔736 m),剖面上部由风形成黄土古土壤,湖滨相沉积和湖湘沉积构成,底部砾石层不整合于石炭纪地层之上。古地磁研究表明,砾石层以上地层开始堆积于2.4 Ma B. P.,据此推断该台地上覆砾石层形成时代与夏县高台地上覆砾石层时代相近。据此推断上新世晚期以来,中条山块体两侧平均掀斜量超过100 m。两剖面点相距15 km左右,据此判断中条山整体上新世晚期以来掀斜角为0.067°。

3.2 峨嵋台地隆起区的隆升量及隆升方式

峨嵋台地南缘与运城盆地之间的地形界限清晰明

了,在野外地质调查中并未观测到断层剖面的存在。为获取该断层的活动性特征,必须依赖该区域的钻孔资料(见表1),通过对比分析来得出长时间尺度的活动速率。根据角杯钻孔L-16及白堂钻孔Lg06的数据,可以确认早更新世地层底界被断层错断约300 m;L-07及白堂钻孔Lg06的数据则显示,中更新世地层底界被错断约150 m(见图5)。据此,可以估算出自第四纪以来,该断层的最大隆升速率为0.12 (mm/a);自中更新世以来,其最大滑动速率则为0.19 (mm/a)。这些数据表明,峨嵋台地在中更新世期间的构造抬升作用有所增强。

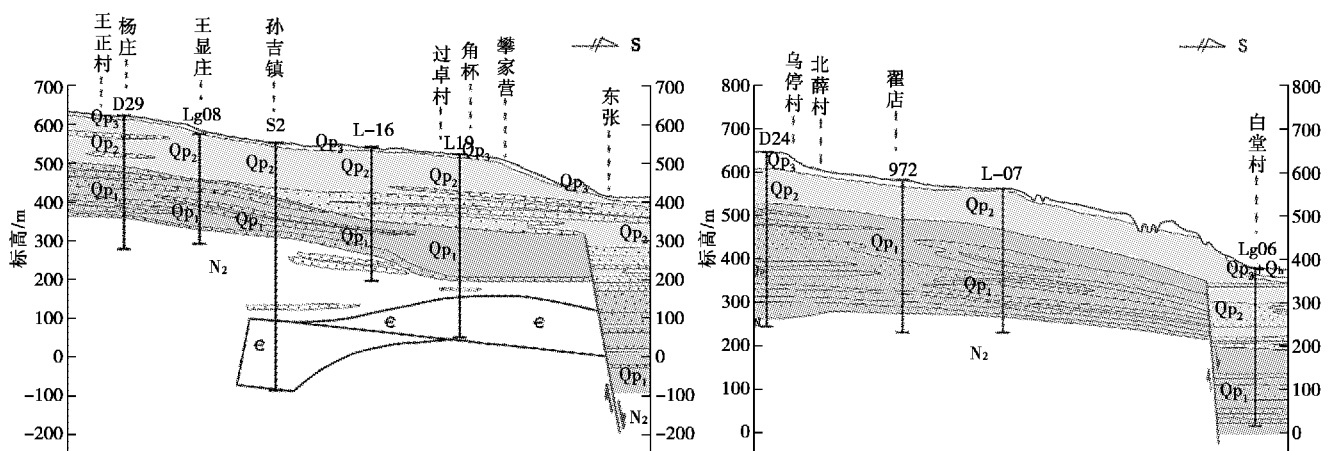


图5 峨嵋台地南缘地质剖面图(据山西省晋南地区1:20万综合地质水文测量工作报告)

Fig. 5 Geological profile of the southern margin of Emei Platform

此外,钻孔资料还揭示出上新统晚期峨嵋台地上沉积了一套红黏土层,与此同时,夏县高台地砾石层的上部也发现了相同的红黏土沉积,反映出当时峨嵋台地的海拔高度与夏县高台地相近(见图6)。钻孔资料进一步显示,上新统上部红黏土层的顶板埋深介于155~390 m,据此我们可以估算出该统地层的平均海拔高度约为500 m;夏县高台地的平均海拔则约为800 m。因此,我们可以推断出自上新统晚期以来,中条山块体的隆升量相较于峨嵋台地超过了300 m左右。

徐伟等^[17]通过1:5万活动断层地质填图,对峨嵋台地北缘断裂晚第四纪活动性进行详细研究。以谭家庄、南柳附近的2个阶区为界,将断裂分为西、中、东3段。谭家庄以西该断裂中更新世早期有过活动,之后未见明显活动迹象。谭家庄至南柳之间断裂晚更新世以来活动强烈,全新世仍有活动,最新活动发生在(2.00±1.29)ka B. P.,晚更新世晚期以来滑动速率 ≥ 0.36 (mm/a)。南柳至西彰坡段晚更新世以来活动明显,尚未发现全新世活动的直接证据,晚更新世以来断裂滑动速率 ≥ 0.1 (mm/a)。说明峨嵋台地北缘断裂主要活动表现为台地东部紫金山一带,向台地西部

活动性逐渐减弱,反映峨嵋台地的抬升方式是从北东向向南西西的掀斜。

3.3 鸣条岗次级隆起区的隆升量及隆升方式

鸣条岗高地位于运城断陷盆地内,北起中条山西北侧的焦山,向西南延伸,在王范、北相一带倾伏地下,呈长条状,长约40 km,宽约5 km,西北侧有高度近100 m的陡坎,东南侧地形上亦有明显的转折。在鸣条岗地北部的东吴村附近,有一层位稳定,出露广泛的含蚌砂层,可作为对比标志层。涑水河冲积平原钻孔资料表明此标志层在地面以下60 m处,两者高差在100 m以上;鸣条岗地的如意上晁孔、柳村孔与涑水河谷中的648孔、507孔的地层亦明显不连续,反映鸣条岗地相对涑水河平原发生抬升(见表1)。同样,钻孔揭示鸣条岗相对东南侧的青龙河平原亦发生抬升^[18]。在盆地中部鸣条岗一带,走向近NE向,亦与主体构造方向一致,新生界厚度由西南2000 m向东北变薄为1300 m,鸣条岗北侧涑水河谷地堑一带,厚度由西南向东北为2150~1400 m,南侧青龙河谷地堑一带,厚度由西南向东北为3500~1600 m^[19]。由此估算鸣条岗自中更新世开始隆升以来隆升量在100~

150 m 左右(见图 6)。中更新世以来的滑动速率超过 0.12 mm/a。通过地裂缝调查研究认为,鸣条岗南缘

断裂晚更新世晚期具有活动性。

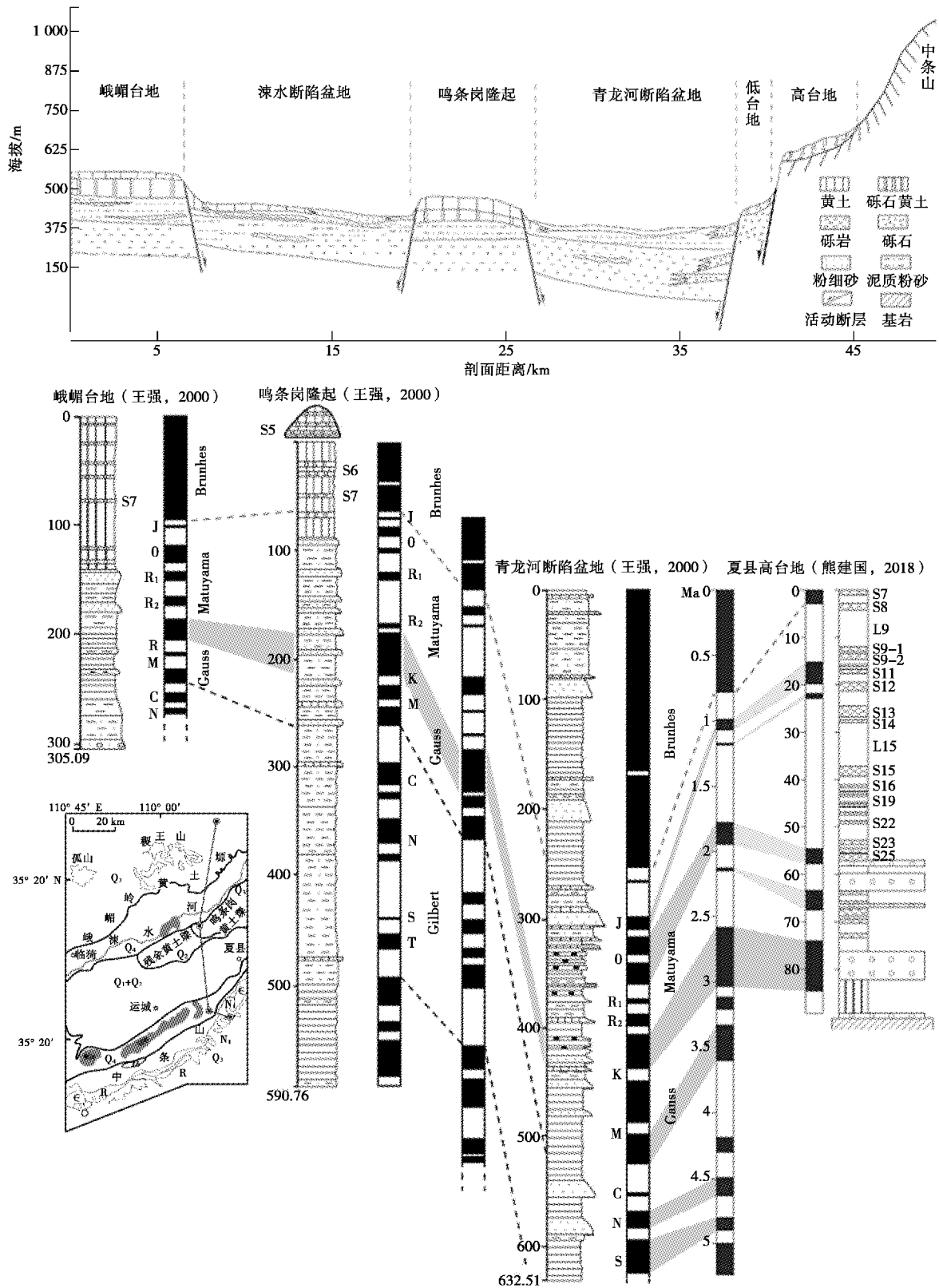


图 6 运城盆地主要构造单元剖面图及相关钻孔对比图

Fig. 6 Sectional view of the main structural units in Yuncheng Basin and correlation of boreholes

另外,鸣条岗地垒东北部地势较高,向西南倾伏于地下。钻孔资料揭示,东北部主要由早更新世河湖相地层及上覆的黄土构成;中部由中更新世晚期以来的河湖相地层及上覆黄土构成,早更新世地层埋深于地下 150 m(见图 6)。运城盆地古河道研究也证明鸣条岗隆升由东北逐渐向西南迁移^[20]。由此说明鸣条岗的抬升方式为由北东向南西方向抬升,抬升的范围越来越大。

4 结论与讨论

通过对中条山块体、峨嵋台地块体和鸣条岗块体的变形特征进行分析,揭示区域构造应力场对块体变形的显著影响。研究表明,上述块体均经历了顺时针方向的掀斜变形。其中,峨嵋台地块体和鸣条岗块体呈现出由北东向南西方向的逐渐抬升趋势。

(1) 在掀斜量与隆升量方面,中条山两侧的平均

掀斜量超过 100 m,两剖面点相距约 15 km,反映出中条山自上新世晚期以来的掀斜角度相对较小。自上新统晚期以来,中条山块体的隆升量超过峨嵋台地约 300 m,相对于盆地隆升量约 700 m。峨嵋台地自第四纪以来相对于盆地隆升量约 300 m,鸣条岗地垒自中更新世以来相对于盆地隆升量为 100~150 m。

(2) 控制块体变形的边界断层活动分析显示,中条山北缘断裂自 15.7 ± 2.5 ka B.P. 以来的垂直滑动速率为 $0.45 \sim 0.62$ (mm/a)。自 107.4 ± 18.6 ka B.P. 以来,平均垂直滑动速率约为 0.1 (mm/a),表明自晚更新世以来断裂活动性逐渐增强。峨嵋台地自第四纪以来的最大滑动速率为 0.12 (mm/a),自中更新世以来的最大滑动速率为 0.19 (mm/a),表明中更新世构造抬升作用有所加强^[22]。鸣条岗自中更新世开始隆升以来,隆升量约 100~150 m,且自中更新世以来的滑动速率超过 0.12 (mm/a)(见图 7)。

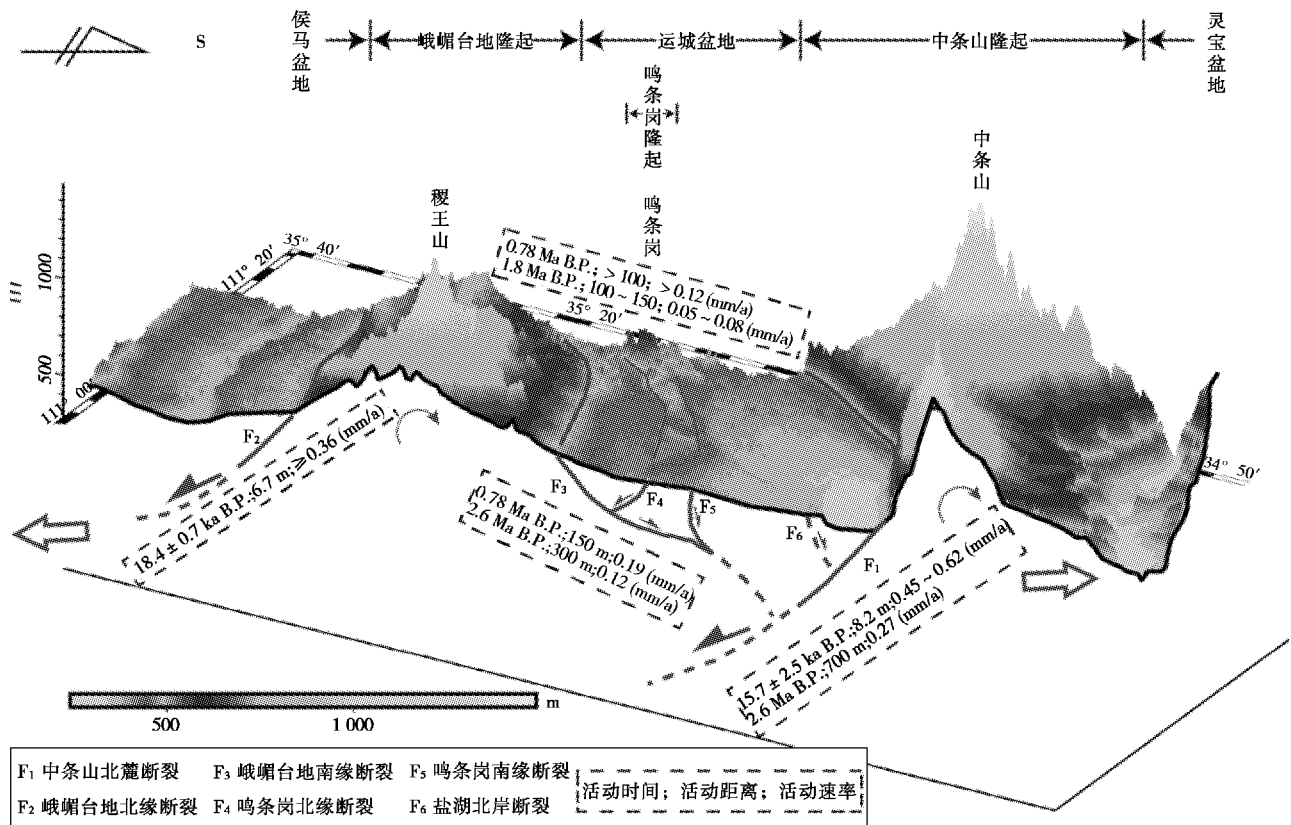


图 7 运城盆地构造模式简图^[21]

Fig. 7 Schematic diagram of Yuncheng Basin tectonic model

在研究方法与后续工作方面,通过钻孔层位对比确定断层的断错量并估算滑动速率存在一定的误差。因此,未来的研究需要进一步开展补充野外地质调查及年代学研究,以提高对块体变形特征和断层活动性的认识,从而更准确地评估区域构造应力场对块体变

形的影响。

参考文献:

[1] 国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组. 鄂尔多斯周边活动断裂系[M]. 北京:地震出版社,1988.

- [2] 王乃樑,杨景春,夏正楷,等. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [3] 闫方方. 基于层次分析法的运城盆地地裂缝灾害危险性评价研究[M]. 西安:长安大学,2011.
- [4] 孙振锋. 地裂缝发育程度与地震活动强度相关性研究——以汾渭盆地为例[M]. 西安:长安大学,2015.
- [5] 马保起,苏刚,侯治华,等. 利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率[J]. 地震地质, 2005,27(2):234-242.
- [6] 张世民,任俊杰,罗明辉,等. 忻定盆地周缘山地的层状地貌与第四纪阶段性隆升[J]. 地震地质, 2008(1):187-201.
- [7] 田勤俭,郝凯,王林,等. 汶川 8.0 级地震发震断层逆冲活动的地震地貌与古地震初步研究[J]. 第四纪研究, 2009,29(3):464-471.
- [8] 苏鹏,田勤俭,梁鹏,等. 基于青衣江变形河流阶地研究龙门山断裂带南段的构造活动性[J]. 地震地质, 2016, 38(3):523-545.
- [9] 崔之久,高金洲,刘耕年,等. 青藏高原夷平面与岩溶时代及其起始高度[J]. 科学通报, 1996, 41(15):1402-1406.
- [10] 梁朋,田勤俭,苏鹏,等. 利用 DEM 技术自动提取龙门山南段青衣江阶地地面的研究[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(2):240-252.
- [11] 王林. 盆地边界活动正断层多尺度构造地貌研究——以京西北蔚广盆地南缘断裂带为例[D]. 北京:中国地震局地质研究所,2012.
- [12] 胡小猛,杨景春. 临汾盆地中更新世中晚期以来的演化历史及成因分析[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2001,30(3):72-76.
- [13] 胡小猛,傅建利,李有利,等. 中更新世中晚期以来汾河流域阶段性发育及成因分析[J]. 地质力学学报, 2002,8(2):165-172.
- [14] Xiong J, Li Y, Zhong Y, et al. Paleomagnetic age of the Tangxian planation surface, northwestern Zhongtiao Shan of the Shanxi Graben System, North China[J]. Geomorphology, 2017, 283(APR. 15):17-31.
- [15] 王强,李彩光,田国强,等. 7.1Ma 以来运城盆地地表系统巨变及盐湖形成的构造背景[J]. 中国科学(D 辑), 2000,30(4):420-428.
- [16] Xiong J, Li Y, Zheng W N, et al. Climatically driven formation of the Tangxian planation surface in North China: An example from northwestern Zhongtiao Shan of the Shanxi Graben System[J]. Lithosphere, 2018, 10(4):530-544.
- [17] 徐伟,高战武,杨源源. 山西峨嵋台地北缘断裂晚第四纪活动性[J]. 地震地质, 2014,36(4):13.
- [18] 李有利,杨景春. 山西运城盐湖沉积环境及其演化[J]. 地理研究, 1994,13(1):70-75.
- [19] 韩颖. 山西六大盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京:地质出版社,2008.
- [20] 李有利,杨景春,苏宗正. 运城盆地新构造运动与古河道变迁[J]. 山西地震, 1994(1):3-6.
- [21] 郭春杉. 运城盆地主要断裂活动性及其相关块体变形特征研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所,2019.
- [22] 郭春杉,李文巧,田勤俭,等. 中条山北麓断裂解州段晚更新世滑动速率研究[J]. 地震, 2019,39(4):13-26.

Preliminary Study on Kinematic Characteristics of Related Blocks in Yuncheng Basin

GUO Chunshan^{1,2}, LI Wenqiao², YAN Xiaobing³

(1. China Coal Technology & Engineering Xi'an Research Institute (Group) Co. Ltd, Xi'an, Shanxi 710077, China; 2. Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China; 3. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030021, China)

Abstract: Yuncheng Basin is a typical development area of normal faults and fault basins. Under the control of faults, major uplift blocks such as Zhongtiaoshan block, Emeitai block and Mingtiaogang block are developed in northeast direction. Based on the comparative analysis of a large number of boreholes (profiles) and paleomagnetic data on the relevant blocks in the basin, combined with the relevant fault activity rate, the evolution process and movement mode of the main tectonic units in the study area are discussed. The following conclusions are obtained; Zhongtiaoshan block, Emei block and Mingtiaogang block all have clockwise tilting deformation; The Emeitai block and Mingtiaogang block are uplifted in the direction of NE to SW. In the late Pliocene, the average tilt of the north and south sides of Zhongtiao Mountain is more than 100 m, and the tilt Angle is not large. The activity amount and activity rate of boundary faults controlling the block are positively correlated with the uplift of the block. The structural model image of Yuncheng Basin is preliminarily discussed and established.

Key words: Yuncheng Basin; block; lifting mode; tectonic model

· 地震活动性 ·

文章编号:1000-6265(2024)04-0011-05

抛掷爆破当量与震级对应关系及波形特征研究

——以黑岱沟露天煤矿为例

郭伟,刘芳,范玲玲

(内蒙古自治区地震局,内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 为防范和化解矿震可能带来的重大风险,提高对矿震的预测和防范能力,开展震级和爆破当量对应关系的研究尤为必要。本文采用正交回归方法,基于2017—2022年内蒙古测震台网和邻省共计108个台站所记录的黑岱沟煤矿69次爆破事件,拟合得到震级和爆破当量的经验关系为 $M_L=0.706 \lg Y+0.688$,可通过控制爆破当量估算震级,避免潜在的人员伤亡和煤矿因停产整改造成的经济损失,实现抛掷爆破振动控制为矿山安全、持续生产提供技术支撑,服务社会安全生产。通过对比分析黑岱沟露天煤矿天然地震和爆破波形特征,总结出天然地震和爆破的判别依据,为更好地识别天然地震和爆破提供科学参考。

关键词: 震级;黑岱沟露天煤矿;抛掷爆破;当量

中图分类号: P315.32

文献标志码: A

0 引言

内蒙古自治区矿产资源丰富,鄂尔多斯块体是我国重要的采煤区,是能源资源开采的重点区域,其块体北缘的黑岱沟露天煤矿是我国重要的能源基地。同时,鄂尔多斯块体周边也是强震区域、地震高发区,对城市安全影响至关重要。通过对多种信号的采集和模型的建立,综合各种监测数据、手段方法进行地震超前预警、预测、监测,可对矿山、城市安全做出贡献,服务城市安全等。

国内外许多学者通过不同手段研究鄂尔多斯块体的地震活动性。鄂尔多斯块体周边在1500年间经历了10次7级或更高级别的地震,包括4次8级地震^[1]。近年来,鄂尔多斯地区的黑岱沟、红庆河、石拉乌素煤矿先后多次发生2级以上的矿震事件,表现出频次增加,间隔时间变短,单次能量强度增大的趋势。为进一步防范和化解矿震可能带来的重大风险,有必要开展震级和爆破当量的对应关系研究,提高矿震预测和防范能力。

震级在一定程度上可以反映爆破能量的大小,用震级估算抛掷爆破的当量是监测非天然地震的有效手段^[2]。由爆破事件的震级来推断爆破当量,所得震级当量关系是因地而异的^[3]。雷索恩使用组件相关的波

形互相关方法估算当量^[4]。对于一般爆破,能量较小,只能在近场记录到P波、S波,并用近场记录测定地方性震级 M_L 。新中国成立后,随着我国经济建设的发展,在矿山、水利、公路和铁路等建设中大量使用爆破技术。1971年5月10日,国内首次采用的“分层微差起爆”方法对狮子山进行爆破作业,爆破总药量10162.2 t,当时测定的 M_L 是4.5;2007年12月20日,“中国煤矿第一爆”在宁夏大峰矿成功实施,总药量5500 t,测定的 M_L 是4.1;2018年河南汝阳钼矿爆破,总装药量508 t, M_L 是3.2;1996年承德钢铁公司在黑山铁矿进行4次爆破,总装药量分别为11.6 t、8.8 t、16.16 t、2.324 t,对应的 M_L 分别是1.8、1.5、2.0、1.2;2002年河北迁安铁矿爆破,总装药量为1300 t, M_L 是3.6^[2]。

天然地震和非天然地震的相关研究主要是通过波形分析、频谱分析、时频域分析等,揭示地震波在不同时间段和频率范围内的能量分布和变化特征。天然地震波形通常具有复杂的相位结构,包含多个震相(如P波、S波等),且波形持续时间较长;非天然地震(如人工爆破、塌陷等)波形则相对简单,具有不同的波形特征,这些特征可用于区分天然地震和非天然地震。李子昊等^[5]研究了抚顺地区非天然地震的特征,发现抚顺地区非天然地震震级范围主要集中在 $M_L 2.0 \sim$

收稿日期:2024-01-19

基金项目:中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202401052)、内蒙古自治区地震局科技服务项目(ZNKJ-2020-5)。

第一作者简介:郭伟(1990—),女,内蒙古丰镇人。硕士研究生,工程师,主要从事微地震和诱发地震方面的研究,E-mail:guowei191@mails.ucas.ac.cn。

通信作者:刘芳(1963—),女,辽宁大连人。研究员,硕士生导师,主要从事矿震等方面的研究,E-mail:lfnm88@163.com。

3.0,波形具有周期大、衰减快、持续时间短的特征。靳玉贞等^[6]所研究的山西地震台网记录的爆破波形不仅具有以上特征,还具有振动幅值大、频率高的特征。

中国地震局、国家矿山安全监察局、内蒙古自治区地震局、能源局文件明确要求,对震级在2.0级以上的矿震事件的比照事故进行调查处理,同时责令煤矿停产整改,停产整改时间原则上不得少于1个月。本文采用黑岱沟煤矿的爆破数据拟合震级和爆破当量的经验关系,并通过对比分析黑岱沟露天煤矿天然地震和爆破波形时频特征,总结出天然地震和爆破的判别依据。根据拟合得到的经验关系式,可实现抛掷爆破震动控制,控制震级小于2级,避免潜在的人员伤亡和因停产整改造成的经济损失,更好地服务社会安全生产。

1 数据选取

本文选取2017—2022年内蒙古测震台网和邻省台站所记录的内蒙古准格尔旗黑岱沟露天煤矿的天然地震和抛掷爆破事件(见图1、表1、表2),对比分析天然地震和抛掷爆破的特征;并基于正交回归方法^[2],拟合抛掷爆破当量和震级之间的经验公式。

统计表明,2017—2022年在研究区共发生天然地震4次,抛掷爆破69次,天然地震震级范围为 $M_L 1.7 \sim 2.8$,抛掷爆破震级范围为 $M_L 2.5 \sim 3.1$ 。

2 原理和方法

2.1 抛掷爆破

抛掷爆破是一种具有抛掷作用的爆破方法(见图2)。主要是利用炸药爆炸以后剩余的能量,在爆生气体膨胀推力的作用下,将一些破碎的岩石抛掷出

去^[7-8],在内蒙古矿区及其他采矿、水利、水电等工程领域有着广泛的应用。抛掷爆破技术具有加快工程进度、降低剥离成本、提高生产效率等优点,但也存在爆破危害较大、对地质条件要求高、技术难度较大等缺点。

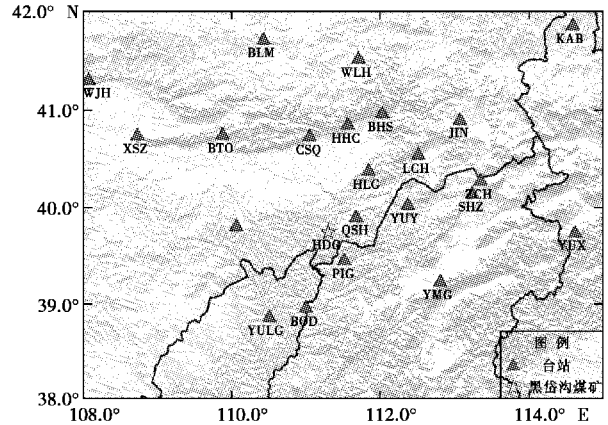


图1 黑岱沟露天煤矿区域构造及台站分布图
Fig. 1 Regional structure and station distribution of Heidaigou Open pit Coal Mine

表1 2017—2022年矿区天然地震统计表
Table 1 Statistical table of natural earthquakes in mining areas from 2017 to 2022

日期 年-月-日 T时:分:秒	纬度 (°)	经度 (°)	深度 (km)	M_L	参考地点
2022-12-25T11:27:09	39.79	111.34	10	1.7	内蒙古准格尔旗
2021-12-14T15:32:35	39.76	111.28	3	2.8	内蒙古准格尔旗
2021-12-06T15:48:43	39.76	111.27	1	3.0	内蒙古准格尔旗
2019-6-21T12:26:51	39.75	111.27	4	2.5	内蒙古准格尔旗

表2 2017—2022年矿区抛掷爆破统计表
Table 2 Statistical table of throwing blasting in mining area from 2017 to 2022

时间 年-月-日 T时:分:秒	纬度(°)	经度(°)	深度(km)	M_L	参考地点	爆破当量(t)
2022-11-30T15:53:14	39.755	111.288	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 480
2022-11-23T15:27:23	39.735	111.342	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 475
2022-10-08T15:36:57	39.756	111.224	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 275
2022-09-30T16:25:16	39.777	111.297	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 120
2022-09-04T17:55:05	39.751	111.281	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 608
2022-08-11T15:57:41	39.750	111.285	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 450
2022-07-06T15:53:17	39.734	111.295	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 256
2022-06-28T15:11:28	39.746	111.264	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 121
2022-05-27T15:38:02	39.762	111.276	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 339
2022-05-20T16:02:01	39.763	111.286	0	3.2	内蒙古准格尔旗	1 293
2022-04-15T15:32:26	39.752	111.277	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 105
2022-04-08T15:43:07	39.747	111.287	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 120
2022-03-02T15:37:58	39.757	111.276	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 339
2022-02-23T15:49:30	39.748	111.242	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 345
2022-01-20T15:16:56	39.759	111.287	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 105
2022-01-13T15:31:06	39.722	111.353	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 167

时间 年-月-日 T时:分:秒	纬度(°)	经度(°)	深度(km)	M_L	参考地点	爆破当量(t)
2021-11-09T16:00:51	39.761	111.270	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 105
2021-11-01T15:30:53	39.756	111.256	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 167
2021-09-24T16:09:55	39.765	111.287	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 200
2021-09-17T17:25:47	39.765	111.247	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 531
2021-08-11T15:56:34	39.739	111.248	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 285
2021-08-04T16:41:50	39.755	111.262	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 329
2021-07-05T16:41:10	39.733	111.231	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 256
2021-06-28T16:20:56	39.757	111.29	0	2.9	内蒙古准格尔旗	2 154
2021-05-17T15:28:07	39.746	111.273	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 228
2021-04-16T15:22:37	39.744	111.271	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 398
2021-04-09T15:20:56	39.729	111.300	0	3.2	内蒙古准格尔旗	1 816
2021-03-12T15:32:51	39.733	111.279	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 384
2021-03-05T15:43:48	39.744	111.264	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 383
2021-02-01T15:10:45	39.753	111.275	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 985
2021-01-25T15:24:22	39.752	111.264	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 476
2020-12-25T15:13:17	39.744	111.269	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 380
2020-12-19T15:32:16	39.742	111.259	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 472
2020-11-16T15:39:52	39.736	111.327	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 300
2020-11-09T17:15:19	39.725	111.27	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 748
2020-10-09T16:22:37	39.752	111.268	0	2.7	内蒙古准格尔旗	1 276
2020-09-30T16:02:22	39.752	111.254	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 322
2020-08-28T15:57:15	39.742	111.229	0	2.5	内蒙古准格尔旗	921
2020-08-20T16:02:16	39.742	111.264	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 560
2020-07-17T13:54:35	39.719	111.300	0	2.6	内蒙古准格尔旗	774
2020-07-09T15:42:06	39.747	111.285	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 138
2020-05-29T16:19:39	39.752	111.264	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 513
2020-04-19T15:28:50	39.718	111.300	0	2.5	内蒙古准格尔旗	1 053
2020-03-12T16:49:56	39.756	111.256	0	2.5	内蒙古准格尔旗	975
2020-02-28T17:52:06	39.746	111.270	0	2.6	内蒙古准格尔旗	1 447
2020-01-20T16:07:11	39.753	111.253	0	2.7	内蒙古准格尔旗	1 219
2020-01-07T17:01:25	39.746	111.245	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 065
2019-11-16T16:18:28	39.722	111.311	0	3.0	内蒙古准格尔旗	1 741
2018-11-28T16:21:34	39.725	111.234	0	3.1	内蒙古准格尔旗	1 915
2018-08-10T15:43:09	39.744	111.242	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 255
2018-07-30T16:37:07	39.748	111.249	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 135
2018-06-15T18:19:36	39.752	111.266	0	2.8	内蒙古准格尔旗	700
2018-04-25T16:44:27	39.756	111.238	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 287
2018-04-17T16:15:48	39.748	111.251	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 093
2018-03-08T16:25:49	39.752	111.249	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 290
2018-02-25T16:29:57	39.754	111.259	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 251
2018-01-20T16:49:57	39.755	111.286	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 250
2018-01-12T16:27:07	39.747	111.228	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 066
2017-12-11T16:12:50	39.758	111.266	0	2.5	内蒙古准格尔旗	1 122
2017-11-24T16:08:47	39.758	111.242	0	2.7	内蒙古准格尔旗	1 413
2017-10-19T16:58:34	39.761	111.242	0	2.7	内蒙古准格尔旗	1 066
2017-09-15T16:18:54	39.779	111.319	0	2.7	内蒙古准格尔旗	1 191
2017-09-06T16:05:01	39.754	111.229	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 155
2017-06-29T16:19:08	39.762	111.267	0	2.7	内蒙古准格尔旗	1 184
2017-06-22T15:18:14	39.764	111.255	0	2.7	内蒙古准格尔旗	1 124
2017-06-04T15:47:05	39.752	111.247	0	2.9	内蒙古准格尔旗	1 836
2017-05-26T16:33:48	39.732	111.263	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 418
2017-02-23T17:17:15	39.763	111.283	0	2.7	内蒙古准格尔旗	1 469
2017-02-14T9:33:15	39.757	111.237	0	2.8	内蒙古准格尔旗	1 431



图2 露天煤矿抛掷爆破剥离岩石
Fig.2 Rock stripping by throwing and blasting in open-pit mine

2.2 当量估算方法

当量是表示爆破能量的重要参数,目前常使用经验性公式估算当量。当量与爆炸事件所释放的能量直接相关,震级在一定程度上可以反映能量的大小,目前使用的当量估算公式主要是震级—当量关系公式。

拟合 $Y=AX+B$ 通常有线性回归方法(SR)^[9] 和正交回归方法(OR)^[10]。线性回归方法通常适用于一个变量的偏差始终大于另一个变量的情况,若2个变量A和B均有可能发生较大变化,通常采用正交回归方法^[11-12]。本文采用OR方法来拟合震级和当量的关系式。

3 结果与分析

3.1 抛掷爆破和天然地震波形特征

为更直观地区分抛掷爆破和天然地震,以内蒙古准格尔旗2022年12月25日 M_L 1.7天然地震和11月30日 M_L 2.8抛掷爆破为例,分析其时域波形特征(见图3)。

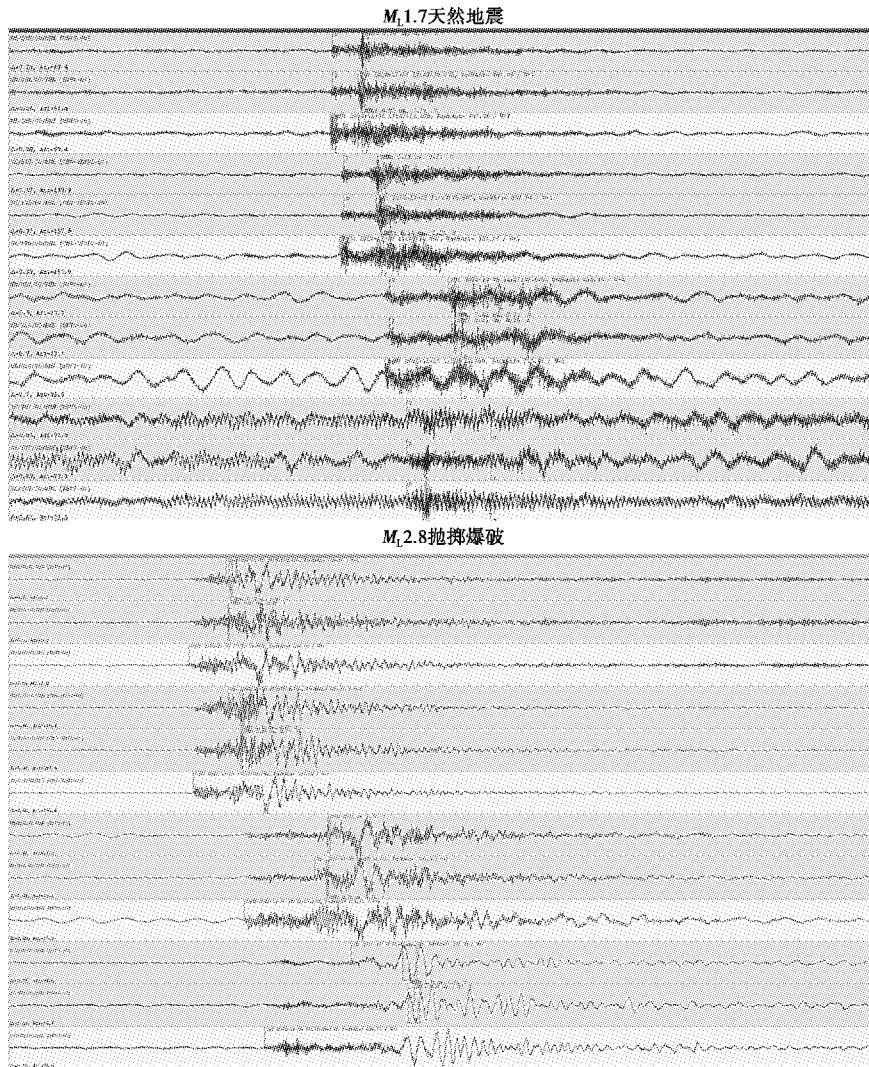


图3 内蒙古准格尔旗天然地震波形和抛掷爆破
Fig.3 Natural earthquakes and waveforms of throwing blasting in Jungar Banner

可以看出,不同方位的台站所记录到的天然地震的初动方向上下均有,抛掷爆破每个台站记录到的P波

初动方向均为垂直向上,且辐射振幅相同,并具有周期大、时间短、突变快等特点,这是由于爆破通常是点源

且为膨胀源激发而与天然地震震源机制不同所致。

3.2 抛掷爆破当量和震级关系

统计2017—2022年黑岱沟露天煤矿抛掷爆破炸药当量和内蒙古测震台网测定的震级结果如表2所示,样本数量共69个,采用正交回归方法,拟合二者之间的关系,拟合结果如图4所示。

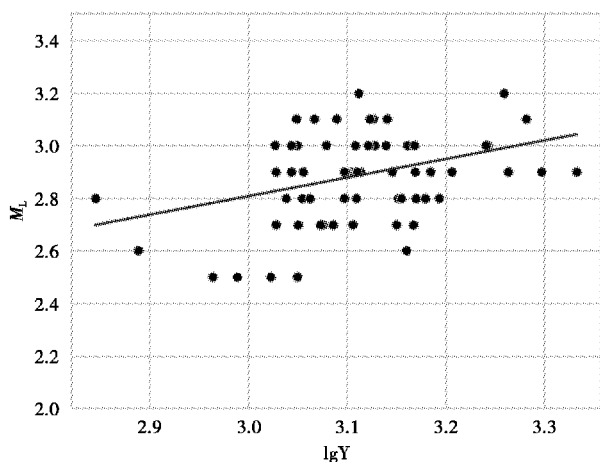


图4 抛掷爆破当量和震级拟合关系

Fig. 4 Fitting relationship between throwing blasting equivalent and earthquake magnitude

利用上述资料拟合得到地方性震级 M_L 和爆破当量 Y 的经验关系式为,

$$M_L = 0.706 3lgY + 0.688,$$

式中: Y 为爆破当量,单位为吨(t),均方根误差为0.02。

为验证结果的可靠性,选取2023年上半年黑岱沟露天煤矿的所有抛掷爆破(共9次)进行验证,结果如表3所示。

表3 2023年上半年黑岱沟露天煤矿抛掷爆破当量和震级及拟合震级对比分析

Table 3 Comparative analysis of blasting equivalent and magnitude and fitting magnitude of Heidaigou open-pit Coal Mine in the first half of 2023

爆破时间 年-月-日	当量(t)	震级(M_L)	拟合震级(M_L')	震级误差
2023-01-03	1 200	3.0	2.863	0.137
2023-01-10	1 281	3.1	2.883	0.217
2023-02-17	1 855	3.1	2.996	0.104
2023-02-27	1 490	3.0	2.929	0.071
2023-04-10	1 305	3.0	2.888	0.112
2023-05-10	1 800	3.2	2.987	0.213
2023-05-17	1 353	3.0	2.899	0.101
2023-06-20	1 300	3.1	2.887	0.113
2023-06-27	1 534	3.0	2.938	0.062

可见,根据本文得到的经验关系式拟合的震级 M_L' 和台网测定的震级 M_L 误差均小于0.22。在测震台网速报和编目规定中,震级误差小于0.3都是在允许范围内,因此本文拟合的经验关系式是可靠的。研究结果可在爆破之前能够估算可能的震级,避免因震级太大造成潜在的人员伤亡和被责令停产整改造成的经济损失。

4 结论与讨论

本文对比分析黑岱沟露天煤矿天然地震和爆破波形特征,并采用正交回归方法,获得震级和爆破当量的经验关系,并取得如下认识:

(1) 天然地震和爆破事件波形特征不同。天然地震波形持续时间较长,衰减较慢,爆破事件波形持续时间较短,衰减较快。

(2) 采用2017—2022年内蒙准格尔旗黑岱沟露天煤矿抛掷爆破数据拟合得到地方性震级 M_L 和爆破当量 Y 的经验关系式为 $M_L = 0.706 3lgY + 0.688$ 。选取2023年上半年抛掷爆破的实测震级和经验公式估算的震级进行检验,结果在误差允许范围内。

本文选取2023年上半年的爆破事件为检验样本,发现3.0~3.2级的事件震级较实测震级而言系统性偏低。分析发现,震级等于2.9时拟合结果有高有低;震级小于2.9时,拟合结果均偏高;震级大于2.9时,拟合结果均偏低,至于分界点为何为2.9级及该现象的物理解释有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 江娃利,肖振敏,谢新生.鄂尔多斯块体周边正倾滑活动断裂历史强震地表破裂分段[J].地震学报,2000(5):517-526+560.
- [2] 刘瑞丰,李赞,张玲,等.爆炸当量估算的初步研究[J].地震地磁观测与研究,2019,40(4):1-7.
- [3] 吴忠良,陈运泰,牟其铎.核爆炸地震学概要[M].北京:地震出版社,1994.
- [4] Lay T. Estimating explosion yield by analytical waveform comparison [J]. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1985(82): 1-30.
- [5] 李子昊,郭攀,王晓睿,等.辽宁抚顺地区非天然地震的特征与识别[J].防灾减灾学报,2023,39(4):56-61.
- [6] 靳玉贞,张瑞芳,何佳,等.山西地震台网记录的爆破特征及当量估算[J].山西地震,2022(4):6-8+24.
- [7] 郭昭华.煤炭工业露天煤矿无运输倒堆开采技术及应用研究[M].北京:煤炭工业出版社,2012.
- [8] 汪旭光,于亚伦.台阶爆破[M].北京:冶金工业出版社,2017.
- [9] Gutenberg B, Richter C F. b. Magnitude and energy of earthquakes[J]. Annali di Geofisica, 1956(91): 1-15.

(下转第20页)

· 观测分析 ·

文章编号:1000-6265(2024)04-0016-05

腾冲站垂直摆倾斜仪观测质量及同震响应分析

番绍辉,张山元,熊家伟,周克鹏

(云南省地震局,云南 昆明 650051)

摘要: 基于2021—2022年腾冲老洋河观测站VP垂直摆倾斜仪的观测资料,整理分析观测资料的数据质量及同震响应信息。以20次国内外 $M_s \geq 5.0$ 典型地震为例,对VP垂直摆倾斜仪连续率、完整率、相对噪声水平M1进行研究应用VenediKov调和分析方法,计算数据的M2波潮汐因子 γ 值均方差及同震响应特征、响应时间、最大响应幅度与震中距之间的关系,最大振幅和震级之间的关系。得出腾冲老洋河VP倾斜仪观测数据的准确度较高,可靠性较好;同震响应的延迟时间与震中距相关,最大振幅与震级成正比关系,与震中距成反比关系,表明同震响应持续时间与震级及震中距具有一定相关性。

关键词: 垂直摆倾斜仪;观测质量;同震响应

中图分类号: P315.63

文献标志码: A

0 引言

地壳形变是与地震的孕育和发生过程直接有关的现象,地震是孕育和发生在岩石圈内的一种地球动力学过程及事件。应力在某些特定部位积累,使岩层变形,当超过岩石的强度时突然发生破裂,产生位错,释放能量,激发出地震波^[1]。牛安福^[2-3]等通过研究形变同震响应的分布特征,给出面波响应延迟时间、响应幅度等与震中距及震级的关系。同震响应的研究是揭示地壳介质对应力一应变过程响应最直接、最有效和最重要的技术手段之一^[4],VP型宽频带垂直摆倾斜仪(以下简称VP垂直摆)观测方法是反映同震响应变化最直接的观测手段之一。

本文以2021至2022年云南省地震局腾冲老洋河观测站(以下简称腾冲站)VP垂直摆倾斜仪的观测资料为研究对象,整理分析观测资料的数据质量及同震响应信息,对腾冲VP垂直摆数据连续率、完整率、相对噪声水平M1、M2波潮汐因子 γ 值均方差及同震响应特征、响应时间与震中距的关系、最大同震响应幅度与震中距的关系、最大振动幅度和震级的关系等方面进行研究,分析腾冲站VP倾斜仪观测质量及同震响应特征。

1 台站及仪器简介

腾冲老洋河观测站位于清水乡老洋河村内,观测

站所处地理位置集地震、火山、地热活动为一体,距离腾冲热海大滚锅不到1 km,周围主要的断裂有腾冲断裂及龙川江断裂。VP垂直摆2020年10月安装在距离洞口大约70 m的硐室水泥墩子上。观测洞室开凿在第四系堆积层中,山洞周围地层岩性为第四系堆积物。山洞总进深90 m,覆盖层厚度15~20 m,洞内无漏水现象,温度20℃左右,年温差变化约1~2℃,日温差小于1℃,空气湿度及温差符合观测规范要求。

腾冲VP垂直摆倾斜仪采用摆的铅垂原理,当地面发生倾斜变化时,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的间距也相应地发生变化,通过传感器将倾斜转换成电信号^[5]。

2 数据质量分析

本文选用2021—2022年腾冲站VP垂直摆的观测资料,如图1所示,通过中国地震前兆台网处理系统软件计算数据的连续率、完整率、相对噪声水平M1,应用VenediKov调和分析方法计算数据的M2波潮汐因子 γ 值均方差,对这些特征参数进行研究,衡量垂直摆的灵敏度、稳定性等,进行垂直摆工作状况的评估,分析得出VP垂直摆观测资料质量。

完整率是检验仪器运行质量的根本条件,也是地壳形变学科组重点检查对象^[6]。通过中国地震前兆台网处理系统软件计算出腾冲站VP垂直摆2021年

1月1日—2022年12月31日的观测数据平均连续率和平均完整率均为99%以上。根据地倾斜观测资料质量的评定指标,得出腾冲站VP倾斜仪连续率、完整率达到规范要求。据图2可知,VP垂直摆在正常情况下,观测数据曲线光滑、日变周期较为明显,波形呈现“两峰两谷”的变化规律,固体潮清晰。

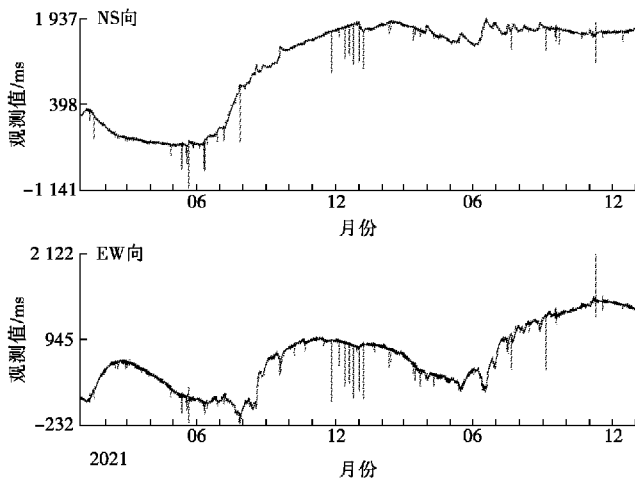


图1 腾冲站VP垂直摆2021—2022年观测曲线
Fig. 1 Observation curve of Tengchong VP vertical pendulum from 2021 to 2022

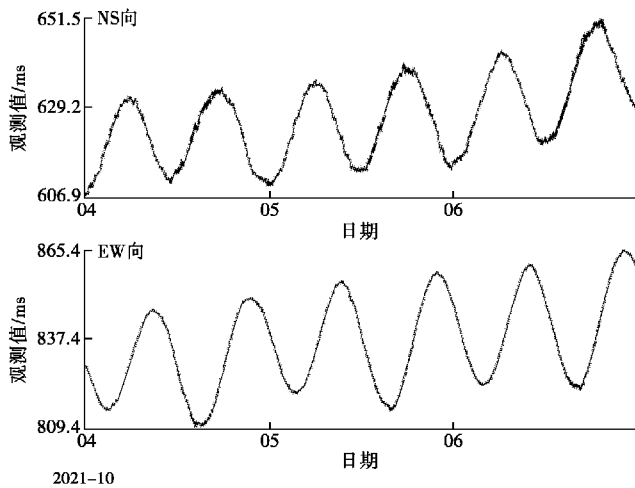


图2 腾冲站VP垂直摆正常动态曲线
Fig. 2 Normal dynamic curve of Tengchong VP vertical pendulum

采用腾冲站VP垂直摆2021—2022年观测数据的日均值计算出相对噪声水平M1(见表1)。VP垂直摆两个方向相对噪声水平2022年较2021年下降,说明VP垂直摆的稳定性在上升;南北分量的相对噪声水平均大于东西分量,说明南北分量的稳定性好于东西分量。总体来看,腾冲VP垂直摆两年的相对噪声

水平为0.001~0.002 ms,符合地倾斜观测资料质量的评定指标中优秀台站所要求的小于0.02 ms的指标。

表1 腾冲VP垂直摆相对噪声水平M1
Table 1 Relative noise level M1 of Tengchong VP vertical pendulum

台站	测项分量	2021年M1(ms)	2022年M1(ms)
老洋河观测站	NS分量	0.001 2	0.001 1
	EW分量	0.001 5	0.001 4

Venedikov调和与分析方法是基于最小二乘法的一种固体潮分析方法^[7],应用该调和与分析方法,按月对垂直摆的整点值进行调和与分析,计算出观测资料内在质量M2波潮汐因子 γ 值均方差值 M_γ 。由表2可见,VP垂直摆NS向M2波潮汐因子 γ 值均方差 $M_\gamma < 0.02$,EW向2021年M2波潮汐因子 γ 值均方差 $M_\gamma > 0.02$,2022年 $M_\gamma < 0.02$,分析认为2020年底仪器新安装架设,2021年仪器试运行期间多次调试东西向造成均方差 M_γ 值较大,2022年仪器稳定且人为干扰较少,均方差 M_γ 值减小,总体来看腾冲站VP垂直摆观测符合地倾斜观测资料质量的评定指标中 $M_\gamma < 0.02$ 的要求。

表2 腾冲站VP垂直摆M2波潮汐因子 γ 值均方差 M_γ
Table 2 Mean square error of tidal factor γ value of Tengchong VP vertical pendulum M2 wave M_γ

台站	测项分量	2021年 M_γ	2022年 M_γ
老洋河观测站	NS分量	0.009 71	0.011 67
	EW分量	0.065 6	0.013 77

3 同震响应及特征分析

通过对2021—2022年国内外 $M_s \geq 5.0$ 地震的收集整理,并梳理VP垂直摆观测曲线,统计出在此期间内共记录到20个最具代表性的典型地震,对其发生的时间、地点、震级进行整理,并对地震发生后VP垂直摆出现的同震变化时间、幅度、震中距进行分析。表3为这些典型震例的同震响应特征及具体的响应参数,主要从响应延迟时间、最大振幅和响应持续时间等方面进行同震响应特征分析。

3.1 响应时间与震中距的关系

由表3及图3可见,当震级一定时,震中距越大,腾冲VP垂直摆响应延迟时间也越大,并非严格的正比关系,可能与地震波在地下介质中的传播速度和仪器时钟存在钟差有关。当震中距为1060 km时,青海玛多7.4级地震响应延迟时间为4 min,明显小于震中距为1440 km青海门源6.9级地震响应延迟时间9 min。据中国地震前兆台网处理系统软件工作日志记载,腾冲站VP垂直摆仪器时钟钟差慢4 min,造成

地震响应时间较长,工作人员调整仪器钟差后,仪器记录到的同震响应时间恢复至正常范围。

表3 VP垂直摆同震响应参数

Table 3 VP vertical pendulum co-seismic response parameters

发震时间 年-月-日 T时:分	发震地点	震级 (M_s)	震中距(km)	响应延迟时间(min)	响应持续时间(min)	最大震幅(ms)	响应形态
2021-01-12T05:32	蒙古	6.8	2 924	7	70	197	波动
2021-02-13T22:07	日本	7.1	4 397	7	44	81	波动
2021-03-05T03:28	新西兰	8.1	10 834	14	138	45	波动
2021-04-28T10:21	印度	6.2	632	2	12	186	波动
2021-05-14T14:33	印尼苏门答腊岛	6.7	2 772	5	38	32	波动
2021-05-21T21:48	大理漾濞	6.4	156	1	20	767	阶跃
2021-05-22T02:04	青海玛多	7.4	1 060	4	60	799	波动
2021-06-10T19:46	双柏	5.1	350	1	4	464	波动
2021-06-12T18:00	盈江	5.0	52	1	5	566	阶跃
2021-07-29T06:48	缅甸	5.5	349	6	26	20	波动
2021-08-12T01:46	菲律宾	6.9	3 645	7	40	16	波动
2021-08-13T02:32	南桑威奇群岛	7.5	14 316	20	150	21	波动
2021-08-13T12:21	青海玛多	5.8	1 066	4	20	15	波动
2021-11-29T20:40	日本	6.4	4 350	8	45	5	波动
2022-01-08T01:45	青海门源	6.9	1 440	9	40	754	波动
2022-03-16T22:36	日本	7.4	4 320	8	31	207	波动
2022-06-10T01:28	四川马尔康市	6.0	867	3	28	33	波动
2022-07-27T08:43	菲律宾	7.1	2 447	6	60	38	波动
2022-10-25T22:58	菲律宾	6.5	2 442	6	52	18	波动
2022-11-10T13:01	西藏墨脱	5.6	545	2	26	506	波动

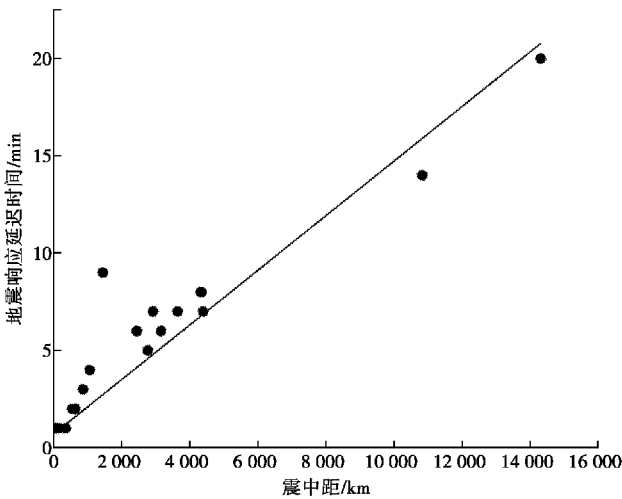


图3 VP垂直摆同震响应延迟时间与震中距定量关系
Fig.3 Quantitative relationship between co-seismic response delay time and epicentral distance of VP vertical pendulum

3.2 最大振幅与震中距及震级关系

VP垂直摆最大振幅与震级和震中距有关。由地震波传播理论可知,若震中距相近,震级越大的地震能量越大,所产生的同震最大振幅就越大^[1]。如表3及图4可见,2021年11月29日日本6.4级地震,VP垂

直摆最大振幅为5 ms;2021年2月13日日本7.1级地震,VP垂直摆最大振幅为81 ms;2022年3月16日日本7.4级地震,VP垂直摆最大振幅为207 ms。3次地震震中距相近,随着震级增加,VP垂直摆所记录到的同震最大振幅几乎成几何倍数增加。反之,若震级相近,震中距越大的地震,地震波传播中能量扩散并衰减较快,产生同震最大振幅也随之减小。2021年5月21日漾濞6.4级地震,震中距为156 km,VP垂直摆最大振幅为767 ms;2021年11月29日日本6.4级地震,震中距为4 350 km,VP垂直摆最大振幅为5 ms。两个地震的震级一样,而震中距差距较大,振幅也存在较大差距。由此得出,若震中距相近,VP垂直摆最大振幅和震级成正比关系;若震级相近,VP垂直摆最大振幅和震中距成反比关系。

3.3 响应持续时间与震级及震中距的关系

腾冲站VP垂直摆响应持续时间与震级及震中距的关系如图5所示,显示同震响应持续时间有一定的相关性。若震中距相近,随着震级的增加,VP垂直摆同震响应持续时间呈增加的趋势;若震级相近,震中距与响应持续时间成正比关系。VP垂直摆同震响应持续时间与震级和震中距均不是严格的正比关系,通过分析认为响应持续时间不只与震级和震中距有关,还和仪器阻尼、震源深度及地下岩石破裂程度有关。

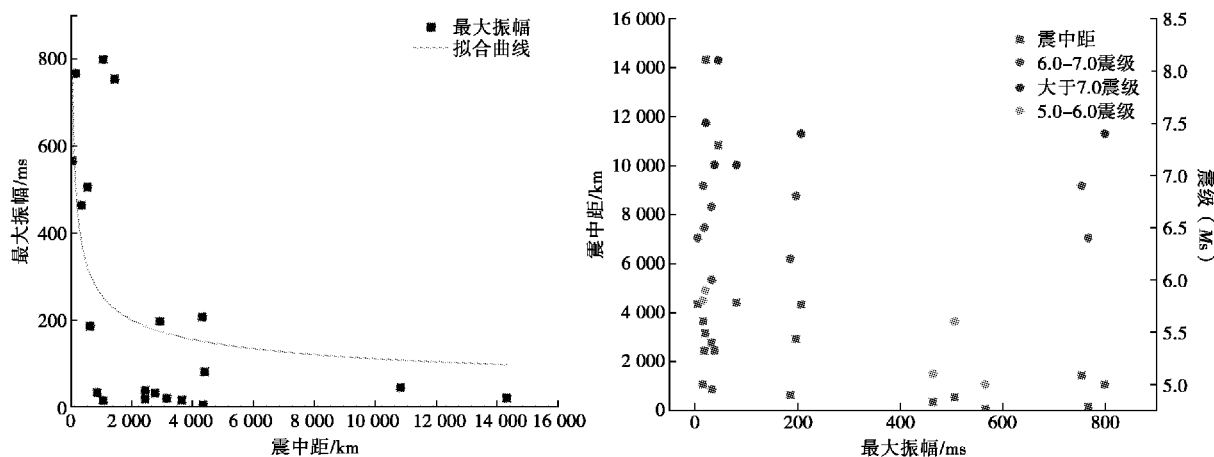


图 4 腾冲站 VP 垂直摆同震最大振幅与震级及震中距关系图

Fig. 4 Relationship between the maximum amplitude of VP vertical pendulum coseismic and the magnitude and epicentral distance of Tengchong

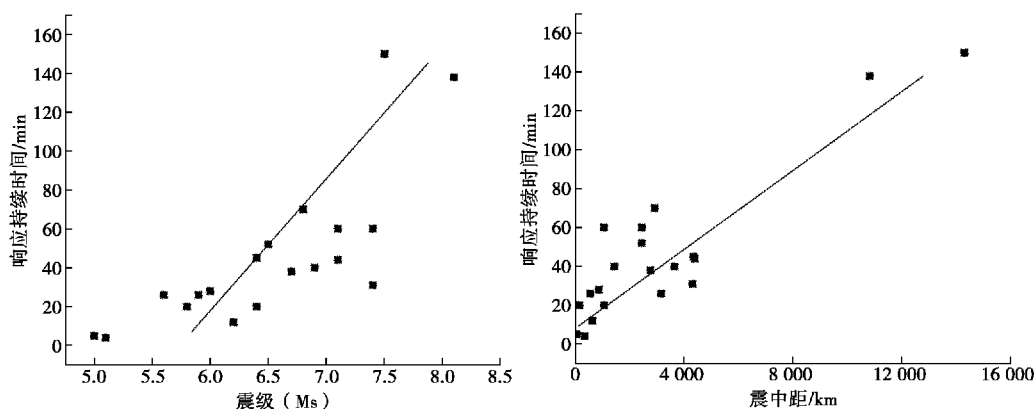


图 5 VP 垂直摆同震响应持续时间与震级及震中距关系图

Fig. 5 Relationship between the duration of VP vertical pendulum coseismic response and the magnitude and epicentral distance

4 结论与讨论

本文从连续率、完整率、M2 波潮汐因子 γ 值均方差、相对噪声水平 M1, 对腾冲 VP 倾斜仪进行检验分析, 总结出同震响应特征, 得出腾冲站 VP 垂直摆自 2021 年 1 月运行以来, 连续率、完整率、相对噪声水平 M1、M2 波潮汐因子 γ 值均方差等资料质量指标均符合形变规范要求, 观测资料连续、可靠、有较强的映震能力。

(1) VP 垂直摆观测数据平均连续率和平均完整率均在 99% 以上, 潮汐因子、噪声水平均满足观测规范要求, 数据的准确度较高、可靠性较好。

(2) VP 垂直摆观测固体潮清晰, 映震能力较强, 对中强地震有较好的同震响应。

(3) VP 垂直摆记录到的同震响应延迟时间与震

中距间呈正相关, 并非严格的线性增加, 与地震波在地下介质中的传播速度有关。

(4) 若震中距相近, VP 垂直摆最大振幅和震级成正比关系; 若震级相近, 垂直摆最大振幅和震中距成反比关系。

(5) VP 垂直摆响应持续时间的长短主要取决于震级、震中距的大小, 也与地震的震源深度、震源破裂过程、震源机制、破裂方向、仪器的阻尼等有关, 还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 姚菲菲, 梁永信, 张维东. 丹东台数字潮汐形变 DSQ 水管仪同震响应分析[J]. 防灾减灾学报, 2016, 32(2): 72-77.
- [2] 牛安福, 吉平, 高福旺, 等. 印尼强地震引起的同震形变波[J]. 地震, 2006(1): 131-137.

- [3] 牛安福,张晶,吉平. 强地震引起的同震形变响应[J]. 内陆地震,2005(1):1-7.
- [4] 丁雨,尹传兵. 安徽地区形变观测对日本 9.0 级地震的同震响应[J]. 科技创新与应用,2019(28):53-55.
- [5] 马武刚,胡国庆,谭业春,等. 新型宽频带垂直摆倾斜仪的设计及应用[J]. 测绘信息与工程,2010,35(5):28-30.
- [6] 国家地震局监测预报司. 地壳形变分析预报方法[M]. 北京:地震出版社,1998:81-88.
- [7] 刘序俨,李平,张雁滨. 垂直应变固体潮理论值计算及其调和分析[J]. 地壳形变与地震,1989(4):46-50.

Analysis of Observation Quality and Co-seismic Response of Tengchong Vertical Pendulum Inclinometer

FAN Shaohui, ZHANG ShanYuan, XIONG JiaWei, ZHOU Kepeng

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: Taking the observation data of VP vertical pendulum tiltmeter at Laoyanghe Observation Station in Tengchong during 2021—2022 as the research object, the data quality and coseismic response information of the observation data were sorted out and analyzed. 20 typical earthquakes with $M_s \geq 5.0$ at home and abroad were taken as examples. The continuous rate, integrity rate, relative noise level M1 of VP vertical pendulum tilter, the mean square error of M2 wave tidal factor γ value and coseismic response characteristics calculated by VenediKov harmonic analysis method, the relationship between response time and epicenter distance, the relationship between maximum response amplitude and epicenter distance, and the relationship between maximum amplitude and magnitude were studied. The results show that the Tengchong LaoYanghe VP inclinometer has high accuracy and good reliability. The delay time of coseismic response is related to the epicenter distance, the maximum amplitude is proportional to the magnitude and inversely proportional to the epicenter distance, and the duration of coseismic response is related to the magnitude and the epicenter distance.

Key words: vertical pendulum inclinometer; observation quality; coseismic response

(上接第 15 页)

- [10] Draper N R, Smith H. Applied Regression Analysis[M]. New York, John Wiley & Sons, 1998, 100-125.
- [11] Carroll R I, Ruppert D. The use and misuse of orthogonal regression in linear errors-in-variables models[J]. The American Statistician, 1996, 50(1):1-6.
- [12] Madansky A. The fitting of straight lines when both variables are subject to error[J]. J Amer Statist Assoc, 1959(54):173-205.

Research on the Correspondence between Throwing Blasting Equivalent and Earthquake Magnitude, as well as Waveform Characteristics ——Taking the Heidaigou Open-pit Coal Mine as an Example

GUO Wei, LIU Fang, FAN Lingling

(Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: To further prevent and resolve the significant risks potentially caused by mine-induced seismic events, it is necessary to conduct research on the corresponding relationship between earthquake magnitude and blasting equivalent, and continuously improve the ability to predict and prevent mining earthquakes. In this paper, the orthogonal regression method is adopted. Based on the 69 blasting events recorded by the Inner Mongolia seismic network and 108 stations in neighboring provinces during 2017—2022, the empirical relationship between seismic magnitude and blasting equivalent is calculated as $M_L = 0.706 3lgY + 0.688$, so that the magnitude can be estimated by controlling the blasting equivalent. his approach helps avoid potential casualties and economic losses from production halts for safety inspections, supporting controlled blast vibration for safe, continuous mining operations and promoting social safety in production. Additionally, by comparing the waveform characteristics of natural and blast-induced seismic events at the Heidaigou open-pit coal mine, distinguishing criteria for natural earthquakes and blasts were summarized, providing a scientific reference for better identification of natural and blast events.

Key words: earthquake magnitude estimation; Heidaigou open-pit coal mine; throwing blasting; blasting equivalent

永安台地磁仪背景噪声影响因素分析

刘水莲¹, 刘慷昀¹, 龚薇², 陈俊峰³

(1. 龙岩地震监测中心站, 福建 龙岩 364000; 2. 南平地地震监测中心站, 福建 南平 353000;
3. 泉州地震监测中心站, 福建 泉州 362000)

摘要: 通过对观测环境、技术系统、观测仪器、人为噪声等方面的排查, 分析影响永安台 FHD-2B 仪器无故死机和背景噪声的主要因素。结果表明, 永安台观测环境良好, 梯度符合要求, 地磁仪背景噪声过大及无故死机的主要原因为仪器运行时间过长、内部性能下降。通过工控机改造后, 故障率大幅度减少, 并在更新仪器后数据噪声也大幅改善, 有效提升了永安台地磁仪观测资料质量, 为台站观测维护提供经验借鉴。

关键词: 地磁观测; 背景噪声; 仪器改造

中图分类号: P318.6⁺2

文献标志码: A

0 引言

地震地磁学是研究震磁关系的一门地震学科, 地磁场观测是地震监测的重要组成部分。1998 年以来, 随着全国地磁台网的建设与发展, 地磁场观测资料不断丰富, 国家地磁学科组采用参考背景噪声这一指标对地磁观测仪器运行及产出质量进行监控, 以便客观合理地反映仪器工作状态、观测环境变化情况和产出质量等^[1-5]。

永安台 FHD-2B 仪在采集观测数据时, 存在的背景噪声大、频繁无故死机等现象, 直接影响仪器运行率和观测资料的质量。为此, 开展 FHD-2B 仪背景噪声干扰因素的排查工作, 通过改造并更新仪器, 改善观测资料质量。

1 台站及仪器简介

永安台隶属于龙岩地震监测中心站, 台址地处中生代红色断陷山间盆地, 外缘绕以中-古生代岩层的丘陵山地, 构造上位于政和海丰断裂带西侧(见图 1)。地磁观测点建于 2009 年, 位于永安市洪田镇黄龙村李厝甲, 距国道 205 线约 4 km, 海拔高程 470~490 m, 占地 9.2 亩, 周围地貌为农田和山地。

2 背景噪声情况

2.1 数据概况

永安台 FHD-2B 磁力仪于 2013 年 1 月正式入网, 由探头、线圈和主机三部分构成, 用于测量地磁场的 F、H(或 Z)、D 观测数据。观测运行至今, 积累了大

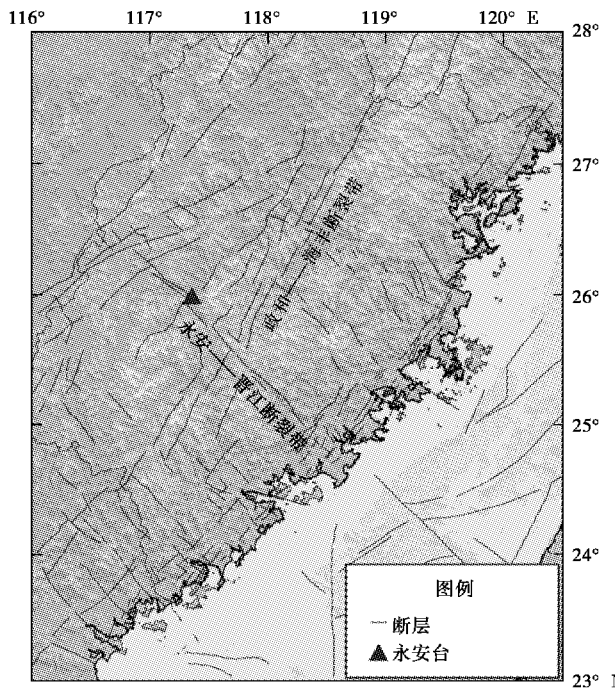


图 1 永安台地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of Yongan Station

量的数据包含正常的磁场变化和大量如环境、人为、仪器等干扰造成的噪声信号。由于地球主磁场具有稳定性、外源场具有区域均匀性, 对于同区域台距较小的台站, 一般采用预处理后的分钟值数据多台对比或差值法来消除外源场相同变化, 将内源场的差异凸显出来, 进行非同步的背景噪声干扰或异常信号鉴别。如图 2a、

收稿日期: 2024-02-06

基金项目: 福建省地震局青年基金(Q202307)。

第一作者简介: 刘水莲(1983—)女, 福建永安人。高级工程师, 主要从事台站地球物理观测工作, E-mail: 470175472@qq.com。

2a、2b所示,为永安台 FHD-2B 磁力仪 2021 年 9 月 5-10 日分钟值数据曲线。将其与福建省区域内泉州南安地磁台 FHDZ-M15、漳州台 FHD-2B 数据对比及一阶差分可见,本套仪器日常能记录到形态清晰的长短期磁场及扰动信号,变化趋势与省内泉州、漳州

台站基本同步,曲线中存在较多尖峰和小幅台阶等不稳定信号,一阶差分曲线中高频信号更加明显。采用差值法计算永安台与泉州南安地磁台的数据台差,并进行一阶差分,也显示两套仪器差值存在较多的超差信号(见图 3)。

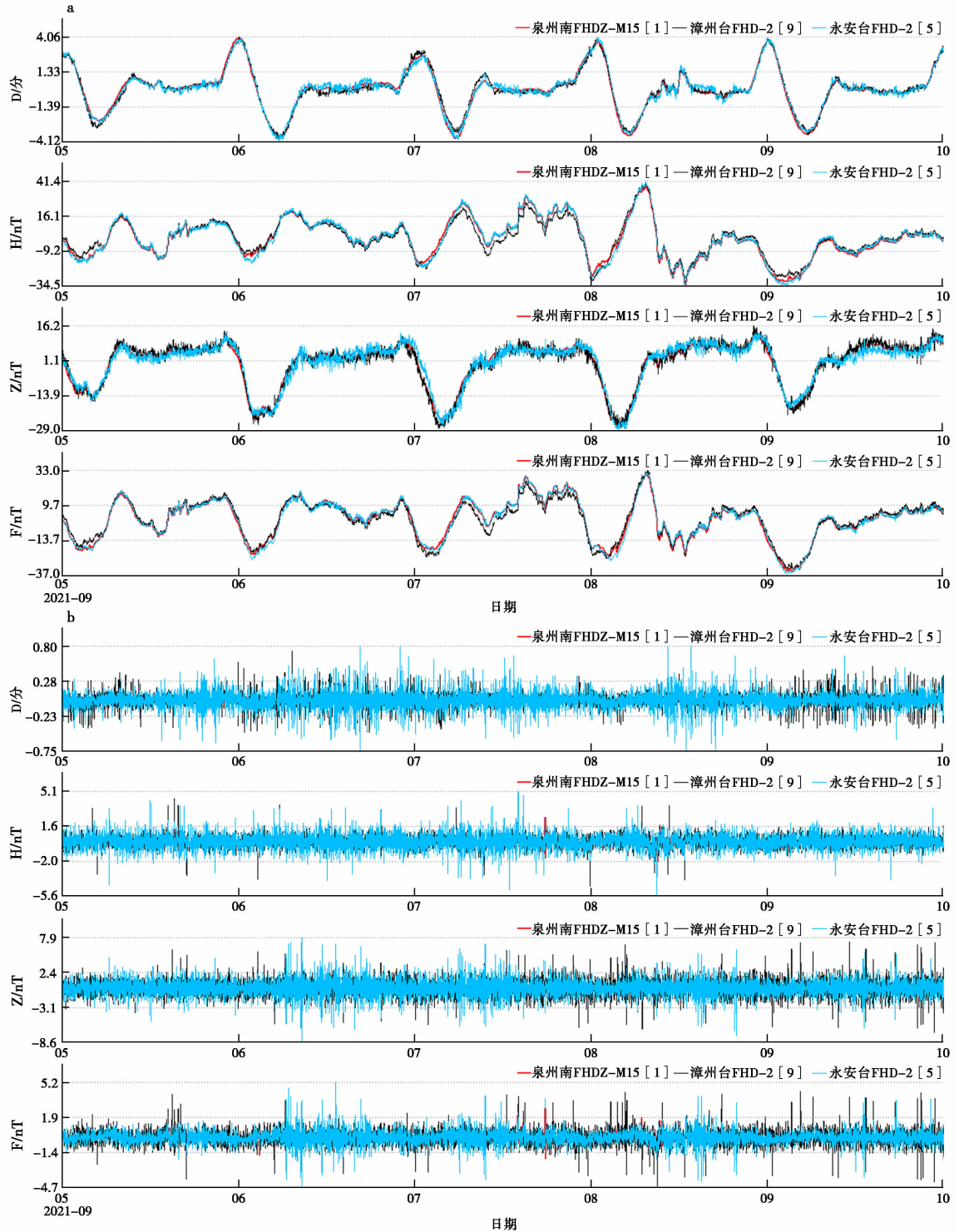


图 2 FHD-2B 地磁仪分钟值及多台对比曲线
Fig. 2 Minute value of FHD-2B magnetometer and comparison curve of multiple sets

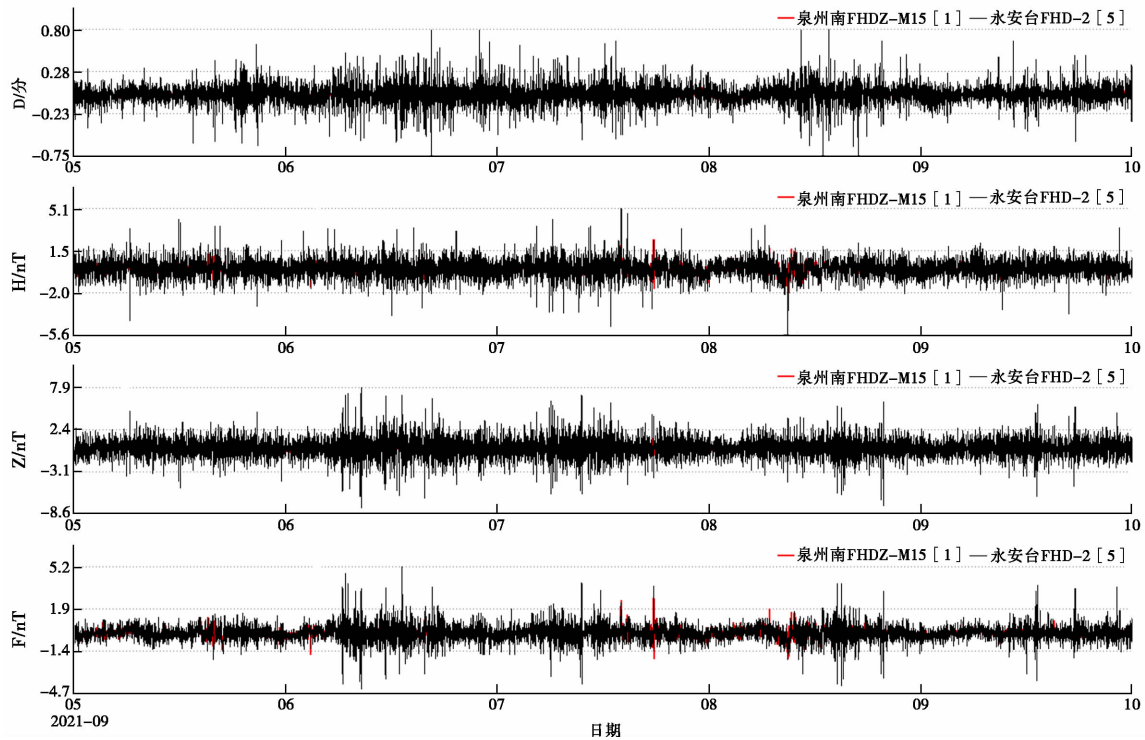


图 3 永安台与泉州南安地磁台差值一阶差分曲线

Fig. 3 First-order difference curve of the difference between Yong'an Station and Nanan Station in Quanzhou

2.2 背景噪声比对

国家地磁台网中心从全国地磁观测台网中选取东、西南、北、中五个方位中的 5 个台站作为数据源,挑选出特选时段(地磁活动的最平静日和最平静时段),计算某分量数据的一阶差分,以其大于 80% 的某个绝对值频度 2 倍值为背景噪声^[6]。

为准确分析噪声的变化,分别绘制 D、H、Z、F 四个分量 2013 年以来的月噪声曲线。如图 4 所示,永安台 FHD-2B 磁力仪在仪器运行之初,背景噪声年变化均不大,D、H 分量噪声规律不强,2019 年 7 月以前噪声值优于台网平均噪声,F、Z 分量噪声则持续大于 0.5 nT,与台网噪声平均值偏差较大。

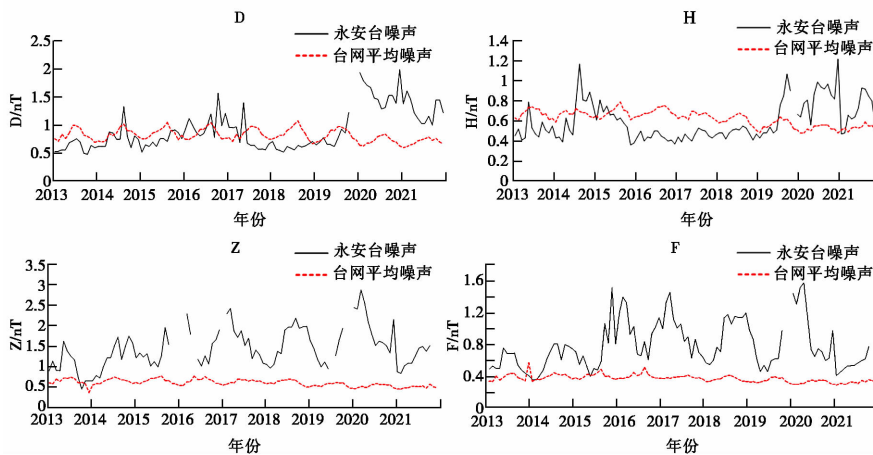


图 4 永安台地磁仪 2013—2021 年月噪声曲线图

Fig. 4 Monthly noise curve of Yong'an magnetometer from 2013 to 2021

对图 4 各分量的月噪声曲线进行分析发现,台网平均噪声呈现出明显的夏高冬低的季节性变化,永安

台 FHD-2B 磁力仪月噪声各分量变化特征为:2013 年运行之初,仪器正常,工作状态平稳,各分量年变规

与台网一致;2014年6月—2015年7月D、Z、F三个分量正常的情况下,H分量噪声年变化突然变大;2015年8月—2019年6月该分量噪声处于全时段最平稳的水平,同期D、Z、F分量背景噪声显著变大,且年变趋势与台网平均噪声反向;2019年7月后四个分量背景噪声再次呈现同步增大至全时段最高水平。

为分析研究同一套仪器各分量的数据噪声突然不一致或同步异常的原因,对数据进行跟踪回溯,发现仪器在2014年5月25日、6月23日均遭受雷击,导致H分量噪声变大,该现象持续至2015年7月2日至12日,此时仪器故障,进行返厂维修,更换主机中的电路元件晶振及RAM存储器后,H分量月噪声持续下降,达到仪器安装初期的低水平状态,此后持续平稳,另外三个分量月噪声水平则均有不同的升高。

FHD-2B地磁仪不仅以共振方式进行测量,且在测量大地电磁场时,采用自动选频,选频调谐参数越接近实际磁场值,精度就越高。仪器中某个分量选频不精确,造成参数偏差过大,就会导致共振回路采集的信号较弱,数据精度下降^[7-8]。因此,导致D、H、F值同期月噪声变大,可能是由于2014年雷击导致仪器内部晶体振荡器损坏,维修更换H分量,精度虽恢复,但探头电感量及信号线的分布电容等参数未得到修复。

3 干扰因素排查

在地磁观测数据的噪声中,除观测系统自身产生的内部噪声外,还包含环境噪声、人为噪声等,本文依据相关规范,主要从以下几个方面进行排查。

3.1 观测环境分析

永安台地磁测点的地形为山坡地,场地以弱磁性石英砂岩为基底,测点残坡积层厚0.7~2.5 m,基岩为浅灰黄色、浅灰白色厚层状中粒石英砂岩、石英细砂岩、石英砾岩,夹紫红色粉砂岩、细砂岩;岩层走向南北,倾向东,倾角10~25°。周边无显著的地铁轻轨类直流牵引干扰和永久性的静态磁扰,场地的地磁场总强度的水平梯度结果符合规范小于1(nT/m)的要求(见图5)。

采用GSM-19T质子旋进磁力仪对观测核心区开展梯度复测,结果显示,核心观测区域基本能达到 ≤ 1 (nT/m)的指标(见图6)。由于仪器房西侧围墙使用钢筋,导致1线2—4点场地磁场梯度超过50(nT/m),2线1—3点数据受到观测室内电子设备、光纤(含有钢制拉线)等影响,磁场梯度较大。由于该部分区域避开仪器探头安装的位置,并不会对地磁仪器工作产生影响。

3.2 供电、防雷及信号线干扰分析

永安台地磁测点内设有市电和12V直流电两路电源,生活用电采用普通市电供电,仪器用电采用市电和12V直流电源供电,保证市电停电的情况下仪器仍

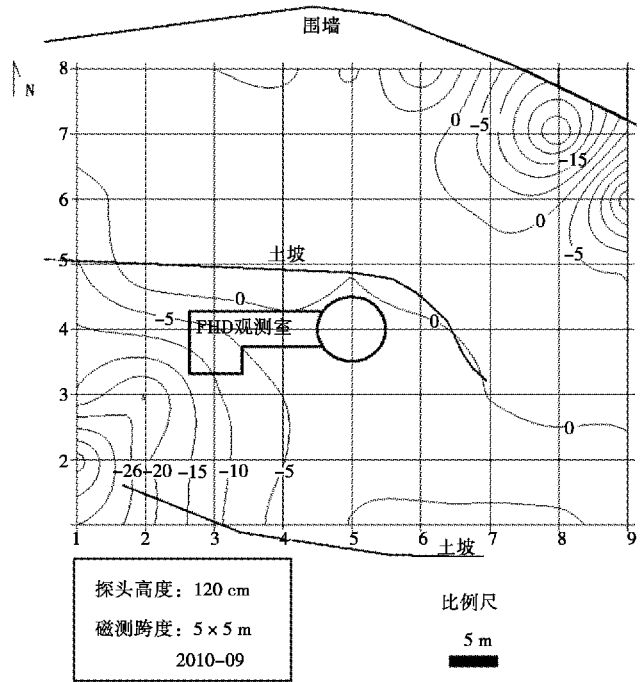


图5 测点场地磁场梯度分布
Fig. 5 Field gradient distribution of magnetic field

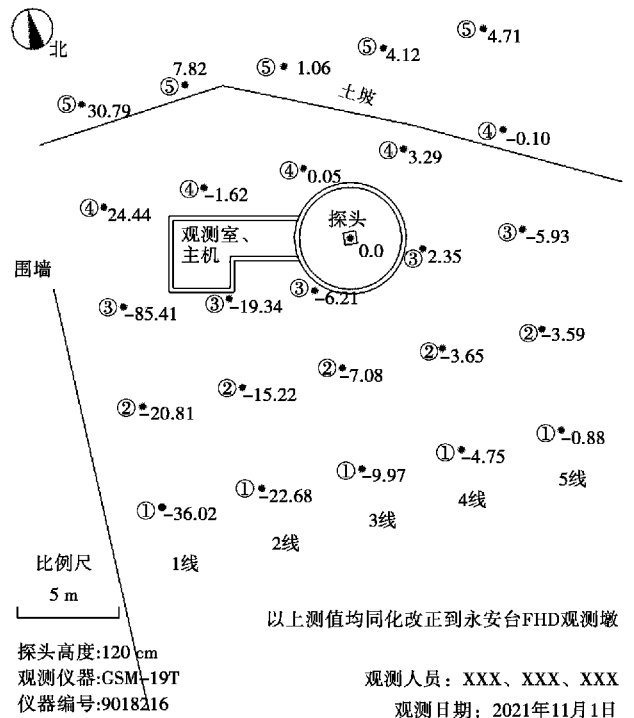


图6 2021年11月1日永安台地磁观测场
地总强度F梯度测值图
Fig. 6 The total intensity F gradient measurement map of
the geomagnetic observation site of Yong'an Observatory on
November 1, 2021

能不间断工作。地磁台内各建筑物避雷采用法拉第网方案,即将建筑物的结构钢(铜)筋网和地网连成一体,在综合楼外的空地,设有一个长12 m、宽8 m的避雷接地网,埋深0.4 m,采用50×5×250度镀锌角钢35根,将每根角钢打入地下近3米深,再用40×4°镀锌扁钢与角钢焊接成网。仪器房屋顶均设铜制避雷针,并与避雷接地网相连,经永安市避雷装置安全监测分所检测,各建筑接地电阻3.5 Ω(满足小于4 Ω的要求)。同时仪器通过行业网与永安台信息节点的交换机相连,光纤传输到龙岩台前兆服务器,再通过电信20 M MSTP接入福建地球物理台网。

观测室内供电线路若与信号线距离较近,容易产生交流电磁干扰,数据背景噪声受干扰而产生增大现象^[9]。经现场勘察,地磁观测室采用弱磁性的白水泥、石灰石子、石英砂、钢筋混凝土结构,所有应用于观测区内建筑的建材均经过严格的磁性检测,具有良好的弱磁质量;FHD-2B质子磁力仪的探头和线圈放在观测室的仪器墩上,主机放在距离仪器墩10 m的位置,信号线长度符合地磁观测规范,信号线与交流供电线路分布于主机两端,无交叉、并行,无交流供电线路引起的电磁干扰。

3.3 仪器性能分析

FHD-2B质子磁力仪主机由电源、单片机测控系统与网络通信工控机系统三部分构成^[8],主机内部的电子器件须在一定的使用年限和工作温度范围内使用,当年限、温度超出范围时,内部电子元器件的性能可能会下降,影响观测数据的背景噪声,甚至会导致调谐参数偏离,采集信号变弱,噪声变大。主机网络通信工控机系统就是一个PC104工控机,其通过开关电源将220 V交流电压转换成5 V直流电压进行工作,当输入电压低于5 V时,同样会造成观测数据噪声变大、观测曲线变粗,使工控机出现频繁启动的现象^[10]。

永安台FHD-2B仪于2010年10月安装,初期该仪器运行基本正常,未受到台风、气压等自然环境的干扰;随着仪器运行年限变长,夏季故障率较高,仪器主机运行不稳、死机故障频发,连续率、完整率降低,致使不可用数据逐年增加。针对夏季主机频繁死机、观测数据噪声偏大的现象,采取搭建遮阳网为磁房降温的方式予以改善。2019—2020年几乎全年持续运行不稳,故障天数达到352.79天,背景噪声过大导致观测数据中的不可用时长大幅度增加,近5年来仪器故障统计如表1所示。

表1 永安台FHD-2B地磁仪器故障统计

Table 1 Fault statistics of FHD-2B geomagnetic instrument of Yongan Station

年份	连续率(%)	完整率(%)	故障累计天数(天)	主要故障(现象和原因描述)	各分量噪声大不可用时长(天)
2017	99.45	94.63	26	夏季供电故障、主机死机	54(主要为Z分量)
2018	99.93	96.67	15.91	夏季电源不稳、主机死机	18(主要为Z分量)
2019	99.21	98.50	96.90	停电、电源不稳、主机运行不稳、主机死机	144
2020	99.24	98.14	256.89	主机死机	215(主要为Z、D分量)
2021	99.71	99.70	13.00	仪器运行不稳	54(主要为Z分量)

综上所述,永安台地磁仪故障是典型的网络通信工控机系统故障,该系统是一个PC104工控机,夏季温度较高时会出现频繁死机并自动重启的现象。2020年11月,在排查工控板端供电电压时,发现开关电源供电线路存在氧化、接触不良现象,通过万用表检测发现两端电压不一致,电源端输出电压正常,工控板端输入电压低于5 V,导致PC104工控机反复死机重启,数据无法采集。在采用直流智能电源供电,保证供电电压稳定后,主机反复死机问题得以解决。2021年故障累计天数直降为13天,因各分量噪声过大导致数据不可用的情况也大为改善,数据质量得以保证。

3.4 人为干扰因素分析

永安台地磁观测场地距离最近的村民住宅大于200 m,观测环境基本不受周边村民生产、生活的干扰。2020年8月,永安市洪田经黄龙至忠洛公路开工,2021年6月台站门口路段完工,距离仪器房约50 m,日常车流量较少,主要为村民私用小型车辆,从图7数据曲线上来看,与省内地磁台站同步变化,符合

正常背景变化规律。

4 仪器更新前后对比分析

经过前述分析,永安台地磁仪数据噪声过大的直接原因是仪器使用时间过长,性能下降,经过对工控机电源改造有所改善,仍建议更换观测仪器,加强对观测系统的维护和管理以便提高永安台的地磁监测效能。

2022年2月,永安台地磁仪改造列入福建省地球物理台网改造工程,在原测点安装一套OVERHAUSER磁力仪(仪器型号GSM-19FD、加拿大GEM公司生产的dIdD矢量磁力仪),该仪器故障率低,易于维护,且基线值稳定,对观测环境温度要求不高,噪声小。仪器更新后的数据曲线如图8所示,dIdD矢量磁力仪运行正常,未出现故障。除2023年10月18日因厂家调试探头导致畸变外,观测数据形态稳定,长短期磁场及扰动信号清晰。通过与台网、全省F值噪声对比,结果显示,2023—2024年9月永安台dIdD矢量磁力仪F值噪声持续小于0.5 nT,接近台网平均噪声,

处于全省较优水平(见图9)。

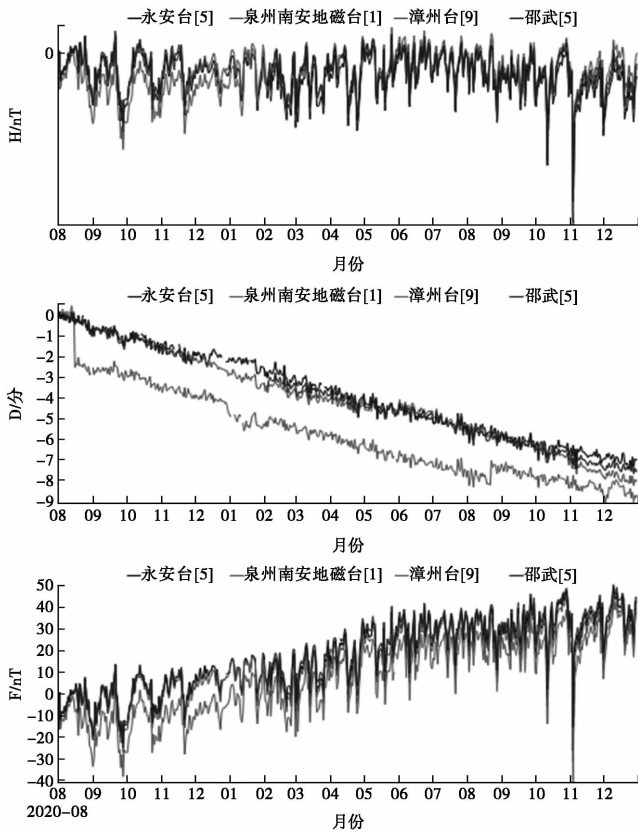


图7 施工期间各台FHD观测曲线对比图 (2020年8月—2021年12月)

Fig. 7 Comparison diagram of FHD observation curves of each unit during construction (August 2020-December 2021)

对比仪器更新前后的噪声曲线,dIdD矢量磁力仪F值背景噪声并未呈现明显的夏高冬低形态,可见FHD-2B磁力仪的背景噪声随季节的变化特征与大

地电磁场的关系不大,主要是观测仪器性能变差导致的。夏忠等曾指出受夏天温度升高的影响,磁力仪探头的电感量要比冬天大,仪器中的配谐电容也是如此^[11-12],因此除了采取磁房降温、工控机检修改造的方式外,还可以根据噪声变化,通过修正探头电感量,达到降低噪声的目的。

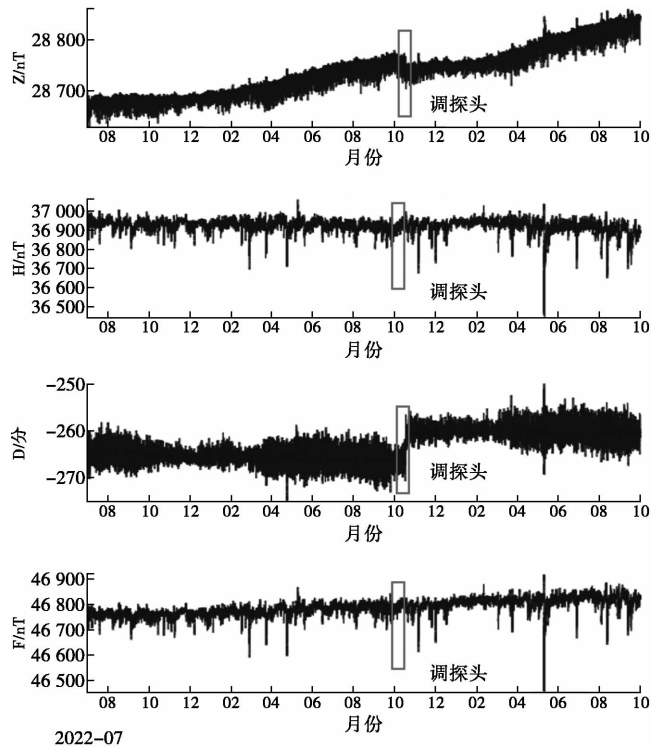


图8 改造后dIdD矢量磁力仪观测分钟值曲线图 (2022年7月—2024年10月)

Fig. 8 Observation minutes of dIdD vector magnetometer after modification (July 2022-October 2024)

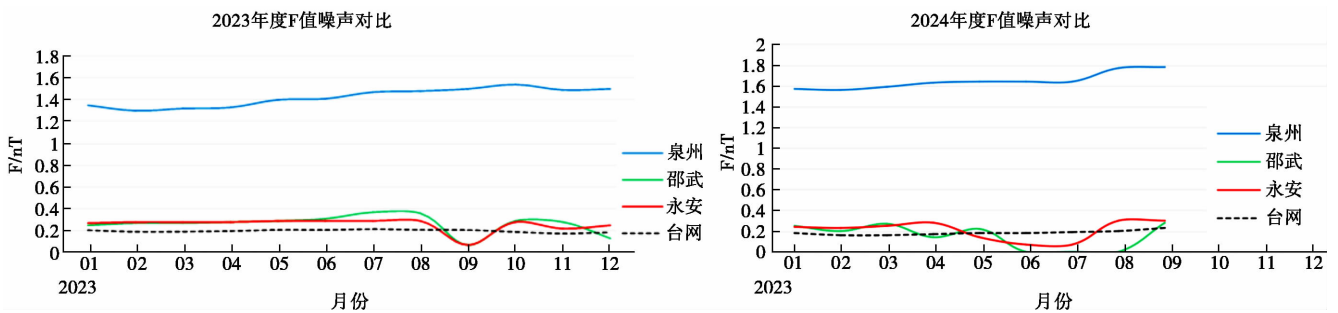


图9 2023—2024年福建省内地磁台站F值噪声对比图

Fig. 9 Comparison of F-number noise of geomagnetic stations in Fujian Province from 2023 to 2024

5 结论与讨论

通过对永安台FHD-2B仪观测数据的分析,可得出如下结论:

(1) 永安台FHD-2B磁力仪投入观测时间过长,除初期背景噪声相对达标外,后期各分量背景噪声呈现异常,经排查分析,初步认为与2014年、2015年

(下转第56页)

山西陵川台钻孔应变降雨干扰特征定量分析

魏凯艳^{1,3}, 陈慧^{1,3}, 李颖^{1,3}, 李惠玲^{2,3}, 陈永前^{1,3}

(1. 山西省地震局, 山西 太原 030021; 2. 山西省地震局运城地震监测中心站, 山西 夏县 044400; 3. 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 山西 太原 030025)

摘要: 以陵川台钻孔应变资料为基础, 基于数据跟踪分析平台, 系统分析资料并提取降雨事件, 采用形变观测值和形变变幅分别对降雨量做相关分析, 并挑选相关系数较高的结果建立回归模型, 定量分析降雨对观测数据产生的影响。结果表明, 形变变幅与降雨量之间的相关系数较高, 拟合程度最高是一元三次函数。当陵川台四分量降水量约 10 mm 以上时, 应变变量发生相应变化, 降雨的累积值约为 40 mm 时, 观测值趋于稳定不再受到影响。研究结果可为定量分析降雨干扰积累经验。

关键词: 降雨干扰; 异常识别; 钻孔应变; 定量分析

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

0 引言

降雨、气压、水位等自然环境的变化都会对四分量应变观测数据产生影响, 尤其是降雨干扰。由于区域地质构造条件的差异, 应变观测数据会随降雨量和降雨速率的不同呈现出不同的影响特征, 其影响机制较为复杂, 会极大影响地震前兆异常的识别与判定。

山西陵川台 YRY-4 钻孔应变仪自观测以来受降雨干扰明显。为有效识别震兆异常与非震兆异常, 提高四分量钻孔应变观测资料在震情短临跟踪工作中的作用, 基于自观测以来的应变数据, 探究应变变量与降雨量之间的定量关系, 以剔除降雨干扰。目前, 已有多位学者基于降雨对地震监测仪器的干扰进行分析研究。雷登学等人对肃南地震台形变观测资料进行初步研究, 分析降雨、大风、人员进出等干扰因素对曲线造成的异常影响^[1-2]。孙伶俐等人研究降雨对定点形变仪器的影响, 并分析降雨影响的深层次机理, 认为固体潮畸变是降雨渗透使基岩膨胀的结果^[3-5]。赵小贺等人认为降雨、大风和气压是导致曲线发生异常变化的主要因素^[6-8]。目前, 关于气象因素对定点形变的影响仍然以定性为主, 定量计算相对较少。

本研究拟从定量分析的角度, 对陵川台 YRY-4 钻孔应变仪的降雨干扰特征深入分析, 正确认识且分析干扰特征, 并对降雨干扰有效剔除, 提高分量应变异常识别可靠性, 对地球物理场进行定量识别与特征研究, 有助于进一步推动钻孔应变测项异常判定标准, 明

确地球物理异常预测意义。

1 台站及仪器概况

1.1 台站概况

陵川钻孔形变观测台站(以下简称陵川台)隶属于晋城市防震减灾中心, 位于晋城陵川县潞城镇。台站在村庄附近, 地理位置北纬 35.69°、东经 113.30°, 海拔 1180 m^[9], 场地位于陵川县潞城镇太行山东翼鄂尔多斯隆起区(见图 1)。台站附近出露地层为奥陶系灰岩, 历史上未发生过 5~6 级地震^[10]。台站周边 20 km 范围内存在的主要断裂带为岭北断裂及小庄上断裂。陵川分量应变台站台基为基岩, 0~45 m 内均为普通灰岩, 岩层相对完整, 35 m 以下存在纵向裂隙, 达不到 2 m 以上完整段的规范要求。

1.2 仪器资料概况

钻孔应变仪探头使用专用特种水泥砂浆安装固定到井孔底部裸孔段^[11], 同时完成探头定向、水位、气压辅助观测及地面电缆、数采、通讯及供电设备的安装工作。探头 1 路应变在地面按磁南北为 2°, 2 路应变方位 47°, 3 路应变方位 92°, 4 路应变方位 137°。陵川台采用太阳能系统供电, 4×100 ah 并联 12 V 电瓶浮充; 采用光纤数据传输方式, 采样率为分钟值, 另有秒、10 Hz、100 Hz 高频采样数据记录及 10 KHz 事件记录^[12-14]。陵川台 YRY-4 型分量应变仪观测数据固体潮清晰, 连续性较好, 曲线较为光滑。

收稿日期: 2024-05-21

基金项目: 山西省地震局科研项目(SBK-2408)、中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202401010)、震情跟踪定向工作任务(2024010216)。

第一作者简介: 魏凯艳(1997-), 女, 山西武乡人。硕士研究生, 助理工程师, 主要从事地壳形变与地震预测工作, E-mail: 1743700043@qq.com。

通信作者: 陈慧(1989-), 女, 湖北荆州人。硕士研究生, 工程师, 主要从事地壳形变与地震预测研究工作, E-mail: 313662158@qq.com。

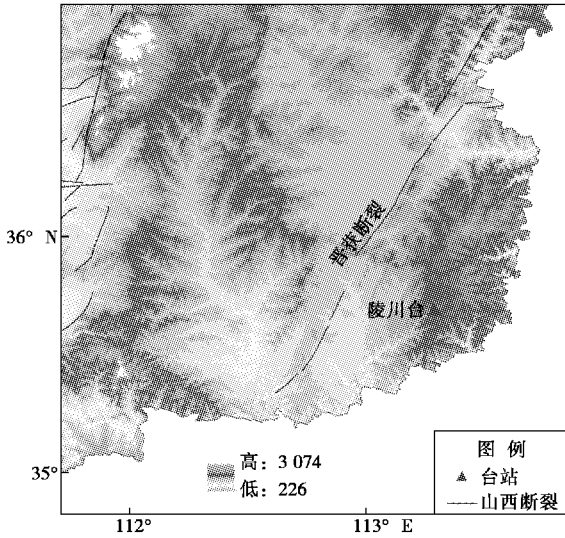


图1 陵川台地理位置

Fig. 1 Geographical location of Lingchuan station

1.3 分析方法

自洽分析:垂直关系的两个元件的观测值相加结果与面应变成一定比例,可利用 $\Delta S_{NS} + \Delta S_{EW} = \Delta S_{NE} + \Delta S_{NW}$ 对陵川台钻孔应变仪进行自检分析。如其相关系数接近于1,则表明 $\Delta S_{NS} + \Delta S_{EW}$ 与 $\Delta S_{NE} + \Delta S_{NW}$ 相关性好,说明观测数据较为真实可靠,符合实际观测情况^[15]。

实地相对标定:当自洽方程不十分符合时,可能是元件灵敏度受温度影响发生变化,因此要进行实地相对标定来矫正数据。

滤除分离潮汐信息和年变信息:对陵川台钻孔应变数据滤除年变信息和潮汐信息,采用小波分析方法实现。

相关分析:当 P 值 < 0.05 时,证明可通过显著性检验,即在 95% 置信度下相关性显著。当 P 值 < 0.01 时,证明可通过显著性检验,即在 99% 置信度下相关性显著。当相关系数 $r \geq 0.8$ 时,视为高度相关;当 $0.5 \leq r < 0.8$ 时,视为中度相关; $0.3 \leq r < 0.5$ 时,视为低度相关^[16-20]。

2 降雨干扰影响

基于“前兆台网(站)观测数据跟踪分析平台”,对陵川台钻孔应变观测资料进行系统分析,整理提取观测曲线受降雨干扰影响事件。

YRY 钻孔应变仪数据的自洽分析是检验观测数据可靠性的方法之一。基本原理是将观测数据导入自检分析软件中,若第一分量与第三分量之和等于第二分量与第四分量之和,则说明仪器工作正常。现导入 2022 年 6 月陵川台钻孔应变数据,结果显示 $S_1 + S_3 =$

$S_2 + S_4$,说明陵川台钻孔应变仪工作正常,数据可信度较高。再通过实地相对标定校正数据,对资料质量做进一步检验。在分析降雨影响之前还需去除年变信息和固体潮信息,尽可能滤除干扰。

YRY-4 钻孔应变仪受自然环境的影响较大,降雨和融雪最为常见。提取 2022 年和 2023 年的降雨事件可以发现,陵川台四分量钻孔应变数据发生趋势转折变化大多数发生在夏季和秋季,与降雨时间较为同步,基本说明数据变化受降雨影响,即数据的这种趋势变化为降雨干扰(见图 2)。

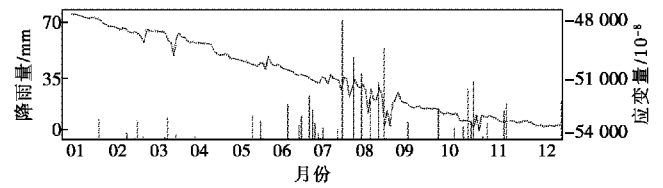


图2 降雨干扰

Fig. 2 Rainfall disruption

为进一步定量分析降雨量与 YRY-4 钻孔应变数据之间的关系,选取形变观测值和形变变幅分别与降雨量进行分析对比,并挑选相关系数较高的结果建立回归模型。

2.1 大气降水量与形变观测值的相关分析

为探究陵川四分量与降雨之间的关系,选取 2022 年和 2023 年四分量各测项数据及与降水量数据,计算得到陵川四个分量观测数据与降水量之间的相关系数(见表 1)。

表1 陵川台四分量观测值数据与降水量相关系数

Table 1 Correlation coefficient between the four components observed values and rainfall in Lingchuan

年份	NS 分量	EW 分量	NE 分量	NW 分量
2022 年	-0.377 **	-0.383 **	-0.391 **	-0.359 **
2023 年	-0.259	-0.145	-0.219	-0.328 *

可以得出,2022 年四个分量与降水量呈负线性相关,且 P 值小于 0.01,即均在 0.01 水平上显著相关,证明可通过显著性检验,即在 99% 置信度下相关性显著,相关系数分别为: -0.377、-0.383、-0.391、-0.359;2023 年四个分量与降水量呈负线性相关,NS、EW、NE 分量显著性较低未通过显著性检验,NW 分量在 0.05 水平上显著相关(见图 2)。

2.2 大气降水量与形变变幅的相关分析

对陵川台钻孔应变数据形态和降雨量做相关分析,选取 2022 年和 2023 年 4 至 9 月显著降雨事件共 82 次。经统计发现,降雨量超过 10 mm 时,陵川台钻孔应变四个分量的数据曲线形态发生明显变化,具体

表现为 NS 分量、EW 分量和 NE 分量为压性变化，NW 分量为张性变化(见表 2)。

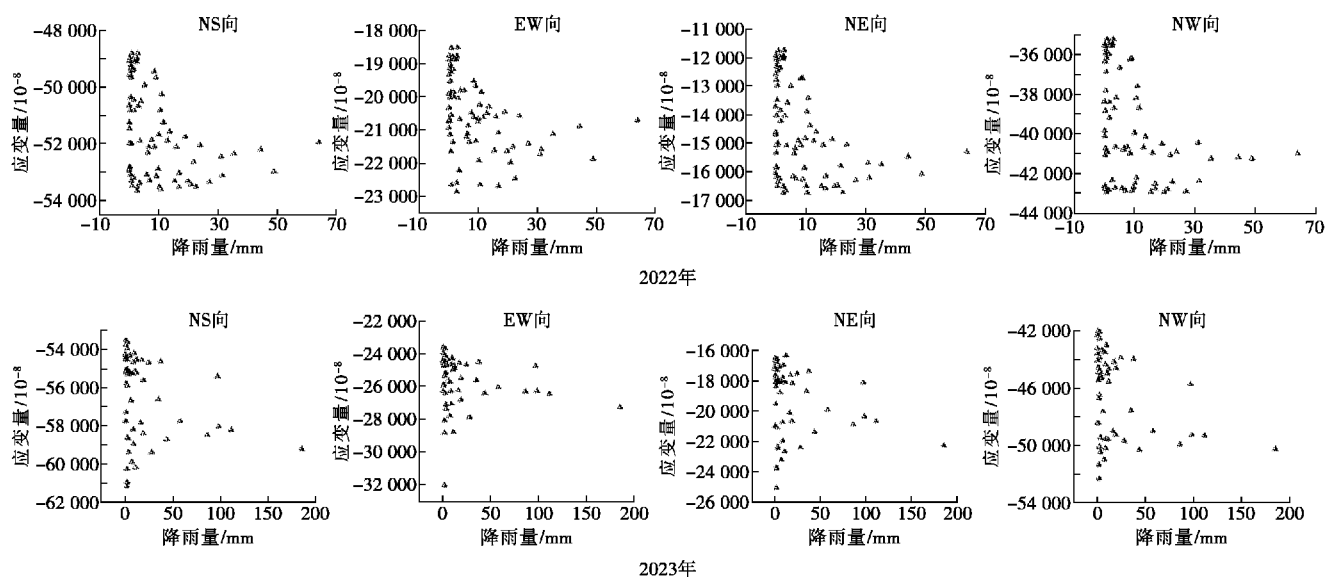


图 3 四个分量观测数据与降水量散点图

Fig. 3 Scatter diagram of observed data of four components and precipitation

表 2 大气降水对钻孔形变的典型干扰特征与量级(部分数据)

Table 2 Typical disturbance characteristics and magnitude of atmospheric precipitation on borehole deformation (partial data)

时间 年-月-日	降雨量 (mm)	NS 向 应变量	EW 向 应变量	NE 向 应变量	NW 向 应变量	延迟时间
2022-04-28	10.52	-1 098	-1 000	-525	361	1 h
2022-05-09	11.54	-756	-1 510	-725	590	1 h 20 min
2022-06-09	13.59	-1 039	-764	-248	433	1 h 30 min
2022-07-19	35.40	-1 067	-1 443	-830	508	1 h 10 min
2022-07-22	21.84	-1 285	-1 697	-1 086	984	1 h 40 min
2023-04-22	24.56	-980	-940	-261	200	1 h 20 min
2023-04-23	7.66	-541	-595	-533	348	1 h
2023-05-21	19.27	-921	-1 281	-549	303	1 h 10 min
2023-05-31	10.50	-603	-753	-475	304	1 h
2023-07-29	27.93	-906	-1 864	-535	765	1 h 30 min

基于 82 次降雨事件,计算四分量各测项形变变幅数据与降雨量数据的相关系数与散点图(见表 3、图 4)

表 3 陵川台四分量形变变幅与降水量相关系数

Table 3 Correlation coefficient between four component deformation amplitude and precipitation in Lingchuan

年份	NS 分量	EW 分量	NE 分量	NW 分量
2022 年	-0.662 **	-0.643 **	-0.692 **	-0.482 **
2023 年	-0.670 **	-0.651 **	-0.681 **	-0.792 **

2.3 建立回归拟合模型

对比形变观测值和形变变幅与降雨量的相关系数,结果显示形变变幅与降雨量之间的相关系数较高,

证明四分量各测项形变变幅数据与降雨量数据的相关性较好,具有一定的统计学意义,可建立两者的回归模型。将 82 次降雨的统计结果进行汇总,分别对降雨量与各测项变化幅度进行回归拟合。根据自变量和因变量建立线性函数、对数函数、幂函数、指数、乘幂等六种不同的模型。经对比,一元三次函数的拟合度最高,模型汇总和参数估计值如表 4 所示。

根据表 4 可以得到拟合系数 R^2 、F 值、Sig 及各参数估计值。 R^2 代表方程的拟合度,值越大代表两个变量的相关强度越强;F 值可反映回归方程的显著性,值越大代表方程的拟合意义越大;Sig 小于 0.05 说明具有统计学意义。经对比,拟合程度最高的为一元三次方程,各测项变化幅度与降雨量之间的拟合方程如表 5 所示,陵川四分量各测项变化幅度与降雨量之间的拟合精度(R^2)较高,且 2023 年的拟合精度高于 2022 年和两年的整体模型,拟合精度均在 0.6 以上。

2.4 大气降水对应变观测值的干扰特征分析

由大气降水与应变变化值的相关系数可知,两者相关系数均在 0.6 以上。但这种应变变化不单取决于当日降水量,还与邻近时间段的降水量有关。当降水量达到一定量级时,应变量发生相应的变化;当降水量累积达到一定量时,观测值可能趋于稳定不再受到影响。由于陵川台的观测时间较短,从两年的观测资料可以得到陵川四分量受降水影响的驱动降水量约为 10 mm,降雨的累积稳定值大约为 40 mm 以上时影响甚微。

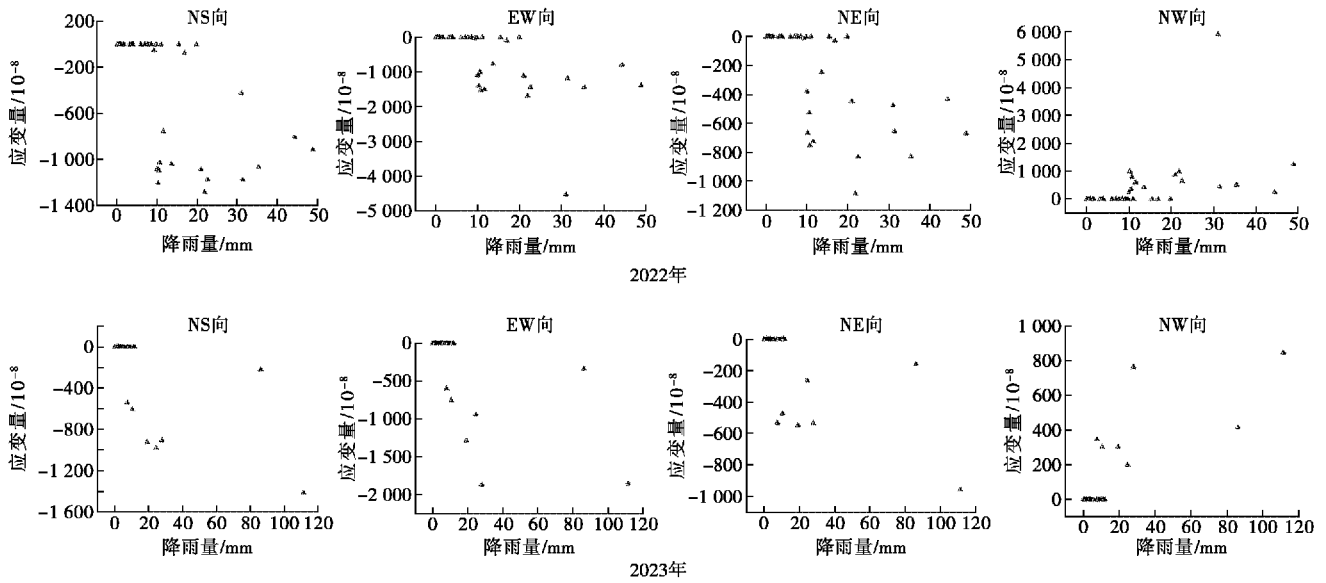


图 4 四个分量形变变幅数据与降水量散点图

Fig. 4 Scatter diagram of the four component deformation amplitude data and precipitation

表 4 模型汇总和参数估计值

Table 4 Model summary and parameter estimates

年份	测项	R2	F	Sig	常数	a1	a2	a3
2022	NS分量	0.509	15.519	0.000	51.110	-49.307	0.385	0.005
	EW分量	0.510	15.629	0.000	7.533	-3.077	-4.683	0.089
	NE分量	0.534	17.222	0.000	22.719	-19.870	-0.506	0.014
	NW分量	0.313	6.843	0.000	30.541	-39.302	6.268	-0.107
2023	NS分量	0.706	23.167	0.000	154.962	-59.435	1.314	-0.008
	EW分量	0.675	20.046	0.000	227.092	-83.107	1.746	-0.010
	NE分量	0.661	18.831	0.000	72.336	-32.036	0.760	-0.005
	NW分量	0.714	24.103	0.000	-62.597	24.060	-0.400	0.002
2022、2023	NS分量	0.552	32.071	0.000	112.724	-62.281	1.252	-0.007
	EW分量	0.482	24.210	0.000	191.391	-90.100	1.584	-0.008
	NE分量	0.532	29.596	0.000	68.221	-36.998	0.712	-0.004
	NW分量	0.236	8.035	0.000	-120.949	49.088	-0.556	0.002

表 5 陵川台四分量各测项变化幅度与降雨量回归拟合结果

Table 5 Regression fitting results of variation amplitude and rainfall of the four components of Lingchuan

年份	测项	回归方程	R ²
2022	NS分量	$Y=51.110-49.307X+0.385X^2+0.005X^3$	0.509
	EW分量	$Y=7.533-3.077X-4.683X^2+0.089X^3$	0.510
	NE分量	$Y=22.719-19.870X-0.506X^2+0.014X^3$	0.534
	NW分量	$Y=30.541-39.302X+6.268X^2-0.107X^3$	0.313
2023	NS分量	$Y=154.962-59.435X+1.314X^2-0.008X^3$	0.706
	EW分量	$Y=227.092-83.107X+1.746X^2-0.010X^3$	0.675
	NE分量	$Y=72.336-32.036X+0.760X^2-0.005X^3$	0.661
	NW分量	$Y=-62.597+24.060X-0.400X^2+0.002X^3$	0.714
2022、2023	NS分量	$Y=112.724-62.281X+1.252X^2-0.007X^3$	0.552
	EW分量	$Y=191.391-90.100X+1.584X^2-0.008X^3$	0.482
	NE分量	$Y=68.221-36.998X+0.712X^2-0.004X^3$	0.532
	NW分量	$Y=-120.949+49.088X-0.556X^2+0.002X^3$	0.236

由图 5 可以看出,陵川台四分量对当地降水比较敏感,降水导致固体潮曲线畸变有以下几个特征:

(1) 固体潮的畸变变化与降雨的相关性较强,并且会有一定的延迟性;当降雨发生时,数据不会立即变化,大约延迟 1~2 h,降雨结束后,数据的畸变现象不会立即消失,具有一定的持续性。

(2) 固体潮畸变的幅度与大气降水强度有关,降雨量越大畸变幅度越大。固体潮畸变与降雨具有一定的同步性,随着降雨的开始而开始,随着降雨的终止而终止。降水发生时,北南、东西和北东分量表现为压性变化,北西分量表现为张性变化,且东西分量变化幅度最大,北西分量变化幅度最小。

3 降雨干扰机理分析

钻孔应变资料受降雨影响的机制非常复杂,不仅与当地的地质结构情况有关,还受到周边环境的影响^[21-22]。孙玺皓等人对青海玉树台钻孔应变资料的研究表明,认为曲线变化是降雨渗透和载荷的结果^[23];

彭登靖等人对昭通台钻孔应变资料进行分析,定量分析曲线变化原因,认为降雨干扰影响主要来自降雨渗透和台站周边地质抗水体荷载量大小两个方面^[24];陆明勇等人结合水文地质学相关理论分析降雨对钻孔应变的渗透影响过程^[25]。本研究在前人的研究基础上,分析降雨对陵川台钻孔应变的影响。

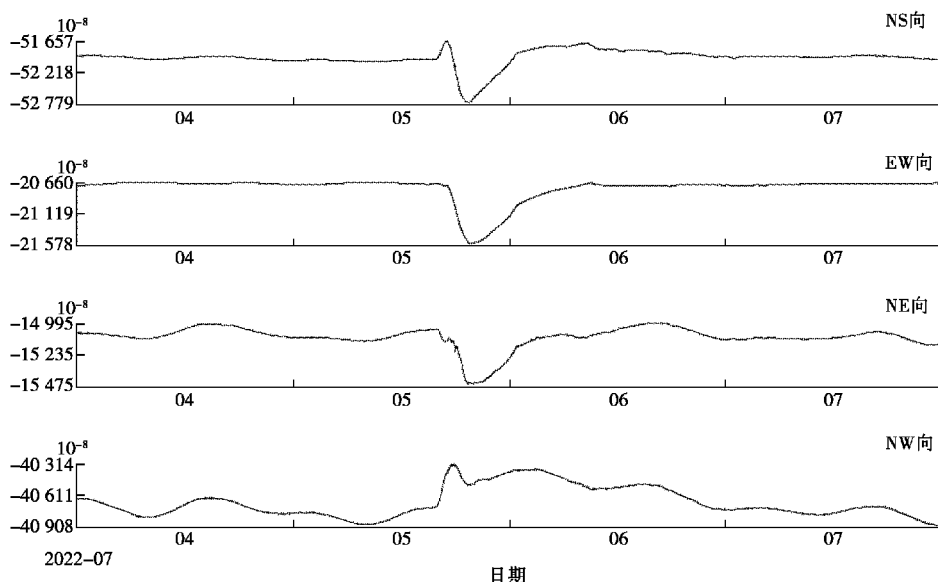


图5 2022年7月4—7日陵川台钻孔应变观测曲线

Fig. 5 Borehole Strain Observation Curve at Lingshuan Terrace, July 4—7, 2022

(1) 降水渗透产生的影响。

当降雨发生时,一部分雨水蒸发或沿地表流走,另一部分则沿着岩石的裂隙渗入到地面。渗入到地层之后会使岩石发生膨胀发生形变现象。陵川台出露地层为奥陶纪灰岩,主要矿物为方解石,含少量石英粉砂、黏土矿物。该岩层较软弱、易变形,为吸水率高的岩层结构,易受到雨水的侵蚀,降雨使得观测仪器基岩受浸润、膨胀、挤压等作用,因而对应观测值产生影响。

(2) 降雨产生的载荷影响。

降雨载荷主要是通过影响地下水位产生相应的影响。降雨时地下水位短时间上升,使重力负荷发生变化,即发生加载作用导致地表发生形变;降雨结束后水分蒸发等因素导致荷载减小。

4 结论与讨论

通过计算降雨量与陵川地震台 YRY-4 钻孔应变相关系数,建立相应的回归模型,并进行降雨干扰的内在机理分析,得出如下结论:

(1) 通过自检可知陵川台仪器工作正常,对数据影响较小。在降雨比较集中的4—9月,当降雨量超过10 mm时,陵川台钻孔应变四个分量的数据曲线形态发生明显变化,具体表现为 NS 分量、EW 分量和 NE

分量为压性变化,NW 分量为张性变化。

(2) 陵川台应变数据受降雨干扰明显,固体潮畸变与降水有很强的相关性,且降雨干扰曲线有明显的规律性,北南、东西和北东分量为压性变化,北西分量为张性变化;从时间特征上看,具有同步效应,降雨发生1~2 h后四个分量开始发生变化,且北西分量最敏感;从量级特征上看,受降雨干扰程度最大为东西分量,最小为北西分量。

(3) 由于降雨具有迟滞性,导致 YRY-4 钻孔应变仪受到降雨持续或间断性干扰,陵川四分量受降水影响的驱动降水量约为10 mm,降雨的累积稳定值大约40 mm,即当降雨量大于40 mm时应变观测值将不会持续受到影响。

参考文献:

- [1] 杨小林,丁晓光,杨锦玲,等.地震前兆还是降雨干扰?——与“宁强5.7级地震前陕西定点形变的异常现象”作者商榷[J].地震工程学报,2023,45(1):138-144.
- [2] 孙伶俐,罗俊秋,龙涛.大气降水对数字化地倾斜观测干扰特征分析[J].大地测量与地球动力学,2010,30(Z1):105-110.
- [3] 王梅,宋治平,李峰,等.形变数字化资料综合评价[J].大地测量与地球动力学,2003,23(4):60-64.

- [4] 孙玉军,李杰,曹建玲,等.深部洞室中微小温度年度变化足以造成地应变年度变化[J].地震学报,2009(5):464-473.
- [5] 张晶,牛安福,高福旺,等.数字化形变观测提取的地震短临异常特征[J].地震,2003,23(1):70-76.
- [6] 汪翠芝,张磊,刘双庆,等.定点形变观测的降雨干扰及排除方法研究[J].华北地震科学,2010,28(1):42-47.
- [7] 张淑英,刘瑞春,王霞.汶川地震前后太原盆地应力场变化特征研究[J].中国地震,2017,33(1):46-55.
- [8] 李惠玲,李冬梅,李颖,等.山西活动断陷带主要断层垂直变形分段特征[J].中国地震,2023,39(4):821-831.
- [9] 杨学慧,崔庆谷.昆明地震台形变观测资料降雨干扰[J].地震地磁观测与研究,2016,37(4):1-5.
- [10] 吴大铭,韩大宇.用多道维纳滤波方法处理唐山地震前后大灰厂三种形变资料[J].地震学报,1983,5(1):31-38.
- [11] 邱泽华,石耀磷,欧阳祖熙.四分量钻孔应变观测的实地相对标定[J].大地测量与地球动力学,2005,25(1):118-122.
- [12] 刘琦,张晶,池顺良.四分量钻孔应变资料的质量评价及拟合分析[J].地震,2011,4(2):87-96.
- [13] 刘仕锦,阳光,李学川.姑咱地震台数字化形变观测资料干扰识别[J].四川地震,2007(2):31-35.
- [14] 郑江蓉,徐徐,王俊,等.六合体应变干扰因素与地震短临异常特征研究[J].西北地震学报,2011,33(1):84-90.
- [15] 李智蓉,付虹,张中旭.鲁甸6.5级地震前昭通地震台形变异常与降雨关系分析[J].云南大学学报(自然科学版),2018,40(5):919-928.
- [16] 陈敏,郭欣,郑许东.重庆台倾斜潮汐形变干扰异常与震兆异常的识别[J].大地测量与地球动力学,2007,27(Spec):79-83.
- [17] 王时,马栋,李胜强,等.河北应变固体潮汐参数及震例研究[J].地震工程学报,2017,39(5):934-938.
- [18] 刘序俨.应用褶积同态滤波排除降雨对地形变观测的干扰[J].地震,1985(6):48-51.
- [19] 祁蒙,吴继炜,张岑,等.徐州地震台2016年11月—2017年YRY-4分量钻孔应变仪异常核实[J].地震地磁观测与研究,2020,41(5):83-89.
- [20] 魏良帅,黄安邦,罗雲丰,等.乌蒙山昭通地区玄武岩地下水赋存规律及开发利用[J].地质通报,2020,39(12):1891-1898.
- [21] Hui C, Xia W, Jin G. B value Characteristics of Depth in Shanxi Fault Basin[G]//Hubei Zhongke Geology and Environment Technology Institute • Proceedings of The 8th Academic Conference of Geology Resource Management and Sustainable Development • Beijing; Hubei Zhongke Geology and Environment Technology Institute, 2020:916-921.
- [22] 陈慧,郭瑾.内蒙古阿拉善左旗及邻区中强地震前 ECRS 方法的异常特征研究[J].山西地震,2018(3):5-9.
- [23] 孙玺皓,马震,苏维刚.青海玉树台钻孔应变降雨干扰特征分析[J].高原地震,2019,31(1):31-36.
- [24] 彭登靖,马敏伟,秦波,等.降雨变化对昭通中心站 YRY-4 钻孔应变仪的影响分析[J].地震科学进展,2022,52(9):414-419.
- [25] 陆明勇,牛安福,张凌空,等.基于潜水层研究钻孔应力一应变对降雨的响应[J].国际地震动态,2012(6):265.

Quantitative Analysis of Borehole Strain Rainfall Disturbance Characteristics at Lingchuan Station, Shanxi

WEI Kaiyan^{1,2}, CHEN Hui^{1,2}, LI Ying^{1,2}, LI Huiling^{2,3}, CHEN Yongqian^{1,2}

(1. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030021, China; 2. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan, Shanxi 030025, China; 3. Yuncheng Earthquake Monitoring Center Station of Shanxi Earthquake Agency, Xia County, Shanxi 044400, China)

Abstract: To determine earthquake precursor anomalies in a timely and effective manner and improve the role of four-component borehole strain observation data in earthquake short-term tracking, the borehole strain data at Lingchuan station was used as the basis to systematically analyze the data and extract rainfall events, and the observed deformation value and deformation amplitude were used for correlation analysis with rainfall respectively. The results with high correlation coefficient were selected to establish a regression model to quantitatively analyze the influence of rainfall on the observed data. The results show that the correlation coefficient between the deformation amplitude and rainfall is higher, and the highest degree of fitting is a cubic function of one yuan. When the precipitation of the four components of Lingchuan is about 10 mm or more, the dependent variable changes correspondingly, and when the cumulative value of rainfall is about 40 mm, the observed value tends to be stable and no longer affected. The research results accumulate experience for the quantitative analysis of rainfall interference.

Key words: rainfall disturbance; anomaly recognition; borehole strain; quantitative analysis

· 工程抗震 ·

文章编号:1000-6265(2024)04-0033-07

基于应县木塔的地震易损性分析及隔震性能研究

王雷雷^{1,2}, 韩晓飞^{1,2}

(1. 山西省地震局, 山西 太原 030021; 2. 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 山西 太原 030025)

摘要: 应县木塔是我国现存最为完好的木结构建筑, 有着珍贵的文物属性。木塔历经千年风霜, 发生一定程度的损害。为确保木塔在遭受突发地震影响时可正常使用, 需对木塔进行加固与修缮。本文从整体结构特性出发, 采用有限元方法建立应县木塔三维立体模型, 分析木塔在不同地震作用下的损害情况。结果显示, 木塔结构上部属于薄弱层, 在大震作用下发生明显损害, 根据分析结果, 设计三种不同隔震组合方案, 探究其隔震效果, 得出隔震方案一隔震效果最佳, 并提出木塔后续修缮工作建议。

关键词: 三维立体模型; 应县木塔; 高烈度地震; 隔震方案

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

0 引言

应县木塔始建于辽清宁二年, 位于应州佛宫寺内, 是现存最古老、最高的木结构楼阁式建筑。木塔高65.84 m, 外部五层, 内部九层, 主体均为木构件, 具有极高历史、文化和艺术价值^[1]。木塔历经沧桑, 长期遭受地震、暴风雨等自然灾害的侵蚀, 加之木材本身也存在不断老化现象, 故木塔遭受了不同程度的损害, 急需开展加固维护工作。现针对木塔开展大震易损性分析, 并进行隔震效果研究, 对木塔保护具有重要意义。

20世纪30年代起, 我国众多专家学者便对应县木塔开展调查研究。梁思成等对木塔进行精细测量, 整理绘制出木塔结构外观、柱子及斗拱等特征; 1943年, 陈明达测量并绘制出比例为1:20木塔详图, 并在此基础上于1964年编制《应县木塔》^[1]一书; 90年代末, 我国成立专门管理委员会, 开始系统保护与研究。杜雷鸣^[2]等人利用数值模拟方法研究应县木塔抗震性能, 发现其二层为薄弱层; 黑梅玲^[3]引入刚度偏心理论建立应县木塔动力模型, 分析木塔抗震可靠度; 刘崇治^[4]建立应县木塔柱头铺作BIM模型, 分析铺作节点对木塔抗震性能的影响。

20世纪60年代末, 美国学者 Cornell^[5]提出结构地震易损性理论, 因其对地震风险评估的优越性, 受到越来越多地震工程领域学者的重视; 随后, 我国专家学者也对地震易损性分析方法展开研究。1996年, 尹之潜^[6]定义结构易损性指数, 划分易损性类别指标; 在此

后的研究中, 地震易损性理论研究大多集中在传统抗震结构, 对木结构相关研究较少。马林林^[7]等建立残损古建筑木结构地震易损性模型, 分析其抗震性能, 发现古建筑节点残损程度较低, 其结构已不满足抗震设防要求, 需加固和修复; 焦鹏^[8]以嘉峪关光化楼木构城楼为研究对象, 进行地震易损性分析, 研究其抵御地震的能力, 发现光化楼结构可较好地抵御地震作用; 王贺^[9]建立光岳楼木结构地震易损性模型, 对其进行损害评估及抗震性能分析, 得出在地震作用下, 整体结构损害程度高于仅考虑上部木结构地震的损害程度。众多学者研究表明, 应用地震易损性分析理论对木结构进行分析可达到预期效果, 具有可行性。

在以往对应县木塔的研究中, 未能从整体结构角度探索其抗震性能, 也未能形成科学木构架加固方案。本文旨在从整体结构出发, 基于木塔公开数据建立地震易损性三维有限元模型, 采用动力时程分析方法, 揭示在不同地震作用下木塔结构失稳机理, 以结构自振周期、弹塑性变形能力为指标, 探索木塔的易损部位。结合当前的隔震垫情况设计比较不同隔震方案效果, 提出隔震技术在木塔保护中的应用建议, 为保护木塔工作提供参考。

1 木塔结构有限元模型的建立

1.1 构建模型

根据以往学者研究结果, 本文结合陈明达编制《应县木塔》一书的数据^[1]及清华大学王南博士对应县木

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 山西省地震局科研项目(SBK-2401)。

第一作者简介: 王雷雷(1996—), 男, 山西临汾人。硕士研究生, 助理工程师, 主要从事地震灾害风险评估工作, E-mail: 420897482@qq.com。

塔几何作图研究数据^[10]建立应县木塔有限元模型,考虑木材性能折损,选取力学性能相近落叶松作为材料属性输入。因木材各向异性,将其分为顺纹向(L)、径向(R)和切向(T)。为尽可能提高有限元模拟精度,采取尽量少的单元数量进行建模,木构件中梁柱采用梁单元模拟,墙体、屋面、楼板采用厚壳单元模拟。其中,屋面赋予瓦材属性,并施加面荷载;楼板采用木材属性,用杆件单元模拟斗拱;在斗拱与柱,柱与柱的连接处采用半刚性弹簧模拟^[11];门窗及其他荷载处以面荷载形式施加。

1.2 模态分析

采用 Ritz 向量法进行模态分析,木塔前 10 阶自振频率与周期如表 1 所示。

表 1 模态分析结果

Table 1 Results of modal analysis

阵型序号	周期/s	UX	UY	X 方向振型质量参与系数	Y 方向振型质量参与系数
1	1.853	0.861	0.027	0.861	0.027
2	1.724	0.033	0.814	0.849	0.841
3	1.195	0.068	0.068	0.917	0.909
4	1.190	0.006	0.036	0.923	0.945
5	0.561	0.008	0.005	0.931	0.950
6	0.542	0.016	0.014	0.947	0.964
7	0.524	0.003	0.004	0.950	0.968
8	0.436	0	0	0.950	0.968
9	0.411	0	0	0.950	0.968
10	0.356	0	0	0.950	0.968

可以看出,木塔结构第一阶周期 T_1 为 1.853 s,第二阶周期 T_2 为 1.724 s,第一阶、第二阶振型 X、Y 向

为平动。木塔结构在两个主轴方向动力特性相近,结构振动特性合理。从第三阶振型开始,地震参与系数已大于 0.9,模型满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)第 3.5.3 条规定^[12]要求。

2 木塔结构在地震作用下的结构响应

2.1 选取地震波

应县木塔所处区域及场地特征如表 2 所示。

表 2 木塔场地特征

Table 2 Site characteristics of wooden tower

所在区域	朔州应县
抗震设防烈度	7 度(0.15 g)
设计地震分组	第一组
场地类别	II 类
场地特征周期	0.35 s

根据表 2 所示木塔结构场地特征,依据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)要求^[12]及考虑《中国地震动参数区划图》GB 18306—2015 规定,满足地震动三要素,选取 3 条地震波进行分析。所选地震波分别为 EL—Centro 波、DLT 波 2 条自然波及 RGB 波一条人工波所记录区域地震烈度均大于 7 度,EL—Centro 波、DLT 波均为南北分量,其加速度时程曲线如图 1 所示。为匹配抗震规范所对应小震、中震、大震加速度时程要求,在不改变波形前提下,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)第 5.1.2 规定,对所选地震波进行调幅处理以满足表 3 要求。因应县木塔本身的重要性,现考虑中震作用下损害情况及隔震设计后大震作用下的抗震性能。

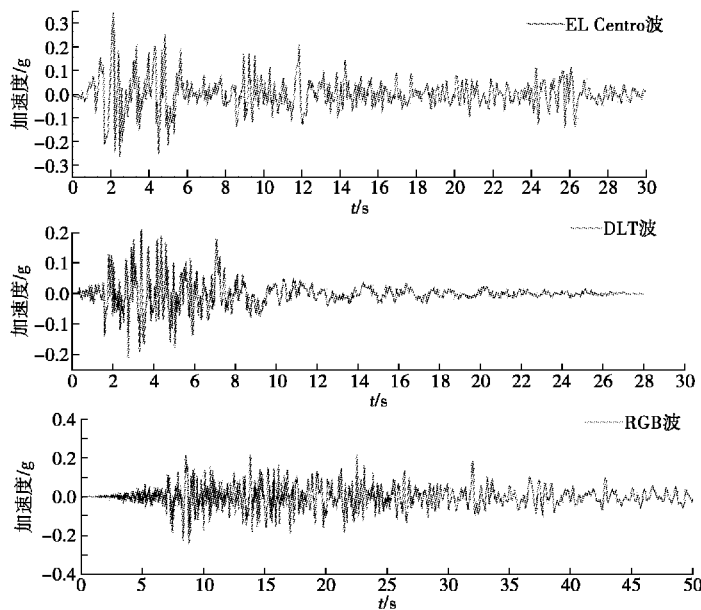


图 1 3 条地震波加速度时程图

Fig. 1 Acceleration time history of three seismic waves

表 3 加速度时程曲线最大值 (cm. s⁻²)

Table 3 Maximum acceleration time history curve /cm. s⁻²

地震类型	地震影响程度			
	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	18	35(55)	70(110)	140
罕遇地震	125	220(310)	400(510)	620

注:括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15 g 和 0.30 g 的地区。

2.2 验证地震波合理性

将所选 3 条地震波输入进行小震时程分析,基底剪力如表 4 所示。可以得出,3 条地震波下木塔结构基底剪力均大于反应谱基底剪力的 65%,3 条地震波平均基底剪力均大于反应谱基底剪力的 80%,所选 3 条地震波符合《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)规范要求,可用于后续分析计算。

2.3 木塔结构地震易损性分析

合理的损伤分析指标对结构抗震性能评估至关重要^[13]。根据木塔结构特性,选择层间位移和层间位移

角作为结构损伤分析指标,评判结构抗震性能。其中,层间位移角能综合反映结构构件损害变形情况,层间位移能较好反映结构位移延性。

表 4 基底剪力对比

Table 4 Comparison of base shear forces

方向	反应谱法计算结果(kN)	时程分析计算结果(kN)		
		EL 波	DLT 波	人工波
X	7 652.9	6 829.5	7 847.6	7 235.8
Y	7 524.6	6 726.3	7 796.4	7 149.5

(1) 层间位移。

将选取地震波加速度时程调整为 150 (cm/s²),对木塔结构模型进行中震下动力时程分析,楼层位移分析,如图 2 所示。木塔结构位移最大值出现在顶层,随着结构层数增高,位移也随之变大,表明塔体结构上部属于相对薄弱位置。从整体结构位移来看,不同地震波下,其结构响应变化规律相似,其中,RGB 波引起的结构响应最大。

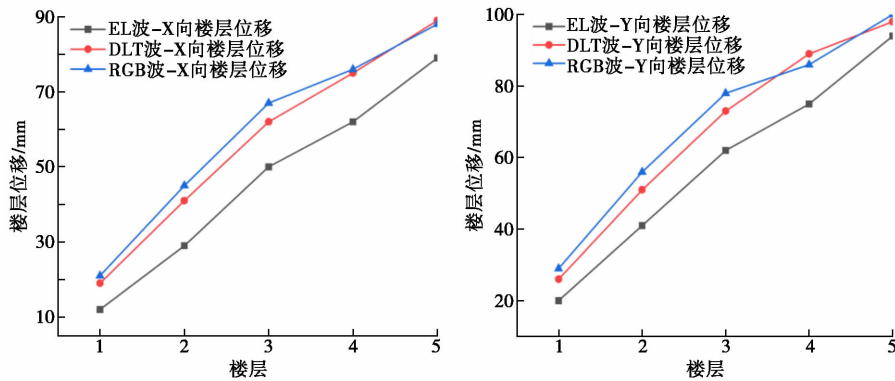


图 2 不同地震波下木塔结构楼层位移

Fig. 2 Floor displacement of wooden tower structure under different seismic waves

(2) 木塔结构层间位移角。

由图 3 可知,在多遇地震作用下,木塔结构上部层间位移角发生突变,分析其原因可能为木塔结构上部刚度比下部刚度小,使得在上部层间位移角发生突变,

其可能为地震作用下的薄弱部位。其中,最大层间位移角 X 向为 $\frac{1}{218}$, Y 向为 $\frac{1}{357}$, X 向为更不利方向,在不同地震波作用下,木塔结构层间位移角变化规律一致。

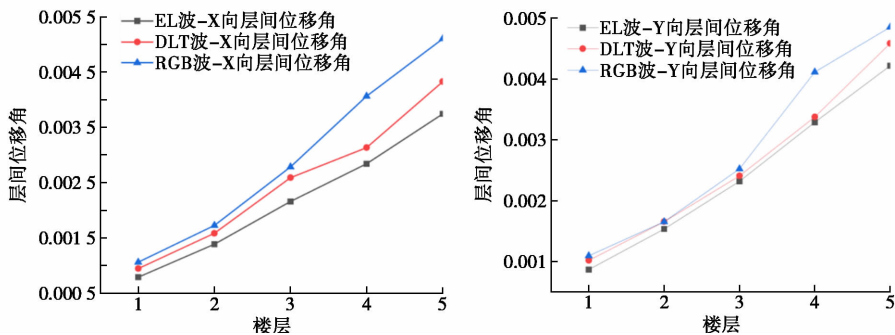


图 3 不同地震波下木塔结构层间位移角

Fig. 3 Inter-story displacement Angle of the wooden tower structure under different seismic waves

3 木塔结构隔震性能分析

3.1 木塔结构隔震层设计

木塔结构一层外墙为刚度较大泥土墙,为防止倾覆危险,减少对塔基干扰,将隔震层布置在一层底部。为使结构有更好的隔震性能,选取阻尼比较大的铅芯橡胶支座(LRB)进行布置,尽可能使质心与刚度重心

重合,对支座进行对称设计。按照塔基承重柱情况,布置16个隔震支座。根据规范要求,选取隔震支座长期面压限值为12 MPa,根据上文所建立模型计算柱底反力,取隔震支座尺寸LRB为300和400,设计三种不同隔震支座布置方式(见图4)。验算支座长期面压,对三种结构模型进行重力荷载作用分析,支座最大面压均未超过规范限值,所布隔震层合理。

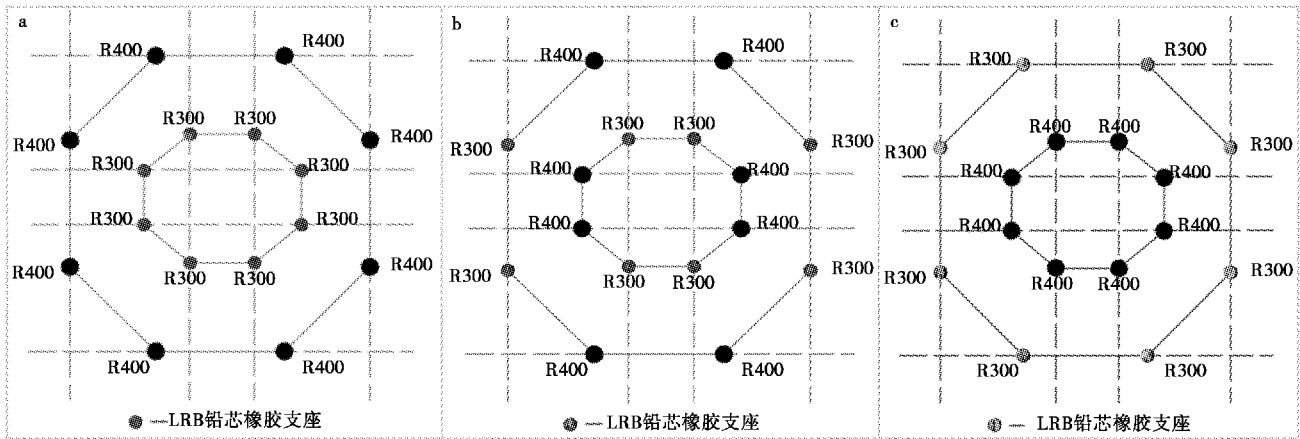


图4 三种隔震支座布置方案
Fig. 4 Layout schemes of three isolation supports

3.2 木塔隔震结构模态分析

对三种木塔隔震结构模型进行模态分析,得到其前10阶阵型周期(见表5)。

表5 隔震结构模态分析结果

Table 5 Results of modal analysis of isolation structure

方案一		方案二		方案三	
振型序号	周期(s)	振型序号	周期(s)	振型序号	周期(s)
1	3.861	1	3.934	1	3.904
2	3.231	2	3.346	2	3.348
3	3.047	3	3.158	3	3.097
4	1.654	4	1.824	4	1.749
5	0.863	5	0.946	5	0.912
6	0.725	6	0.741	6	0.732
7	0.519	7	0.516	7	0.526
8	0.412	8	0.469	8	0.419
9	0.347	9	0.416	9	0.368
10	0.329	10	0.358	10	0.341

在布置隔震支座后,三种隔震结构周期都有较大程度增加,结构动力特性增强,并且其平动和扭转特性与原结构一致。隔震的布置,给木塔结构提供附加刚度,增强结构整体抗震性。

3.3 木塔隔震结构地震响应分析

采用第2.1节选取的地震动,将加速度调整为310 (cm/s²)进行输入,分析木塔隔震结构在大震作用下的隔震性能。

(1) 隔震层水平位移分析。

在大震作用下,橡胶隔震支座最大位移不应超过支座有效直径0.55倍和橡胶厚度3倍的较小值^[14]。隔震结构支座布置最小型号为LRB300,则水平位移限值为165 mm。通过有限元分析软件,提取木塔隔震结构在大震作用下隔震支座最大水平位移为158 mm。研究发现,在大震作用下,隔震支座未发生破坏,满足规范限值,可用于后续分析。

(2) 木塔结构层间剪力对比分析。

大震作用下木塔原结构与不同隔震结构层间剪力对比如图5、6、7所示。在大震作用下,木塔原结构楼层剪力较大,隔震结构层剪力大幅度减小,其中,RGB波所引起的木塔结构地震响应最大。方案一X向平均减幅30.1%,Y向平均减幅29.6%;方案二X向平均减幅21.8%,Y向平均减幅22.5%;方案三X向平均减幅20.6%,Y向平均减幅19.3%。方案一平均减幅最大,其隔震效果最优。三种隔震方案均能较大幅度降低木塔结构的地震响应,则表明隔震层对地震能量有较好的吸收能力,减少对上部木塔结构的破坏作用,较大程度降低上部结构的地震响应,提高木塔结构整体抗震能力。

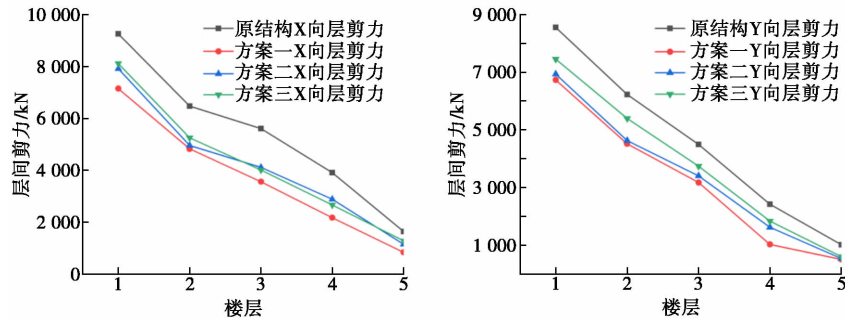


图5 EL波下木塔结构层剪力

Fig. 5 Shear force of the wooden tower structure under EL wave

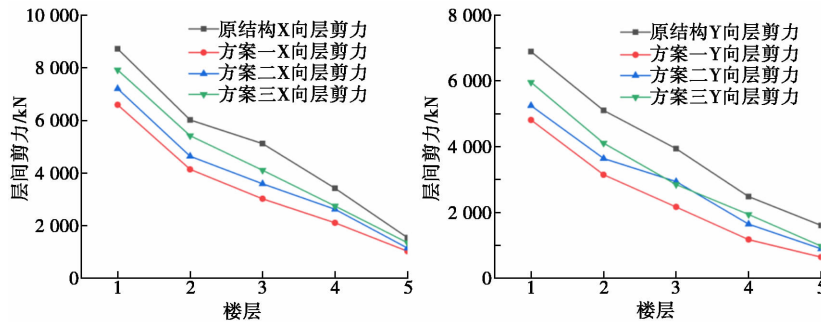


图6 DLT波下木塔结构层剪力

Fig. 6 Shear force of DLT wooden tower structure under wave

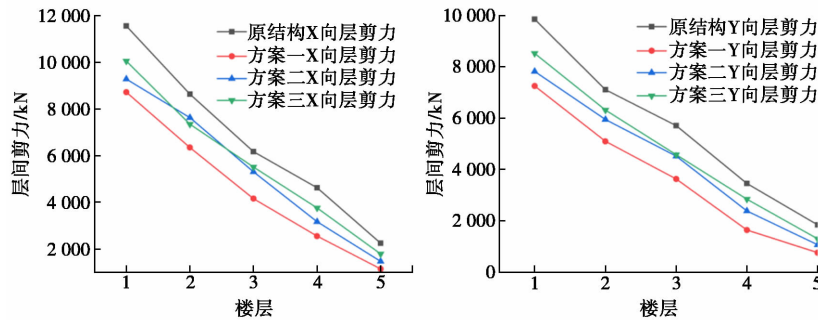


图7 RGB波下木塔结构层剪力

Fig. 7 Shear force of the structural layer of the wooden tower under RGB wave

(3) 木塔结构楼层位移对比分析。

大震作用下木塔原结构与隔震结构楼层位移对比如图8、9、10所示。在大震作用下,木塔原结构地震响应明显,位移随高度增加而增大,最大位移出现在塔顶位置,表明木塔结构上部相对薄弱。隔震结构楼层水平位移减幅较大,且变化趋势与原结构相同。其中,方案一平均减幅最大,达48.6%,表明其隔震效果最好。隔震层的布置可明显降低上部结构位移幅度,减轻地震作用对木塔结构的破坏。

(4) 木塔结构层间位移角对比分析。

大震作用下木塔原结构与隔震结构层间位移角对比如图11、12、13所示。在大震作用下,木塔原结构层间位移角整体较大。根据木结构破坏状态判断准则,一层因有刚性外墙,层间位移角未超限,其余各层均超过限值;二层出现中等破坏,塔顶为严重破坏。木塔隔震结构层间位移角大幅度减小,其中,方案一平均减幅最大,隔震效果最佳。在布置隔震层后,各层层间位移角均未超过限值,未发生明显突变,对层间位移角控制效果较好,不因局部突变而造成木塔结构明显损害。

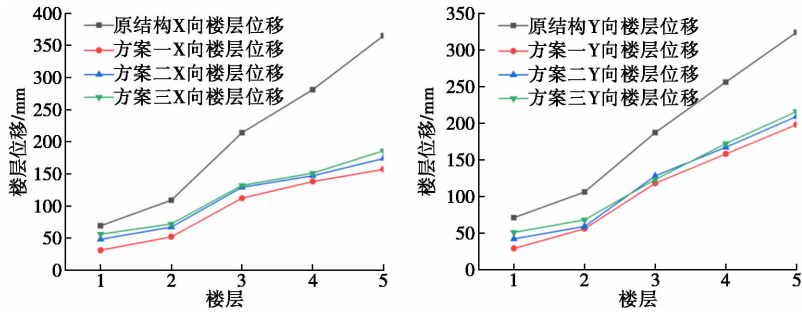


图 8 EL 波下木塔结构楼层位移
Fig. 8 Floor displacement of EL wave wooden tower structure

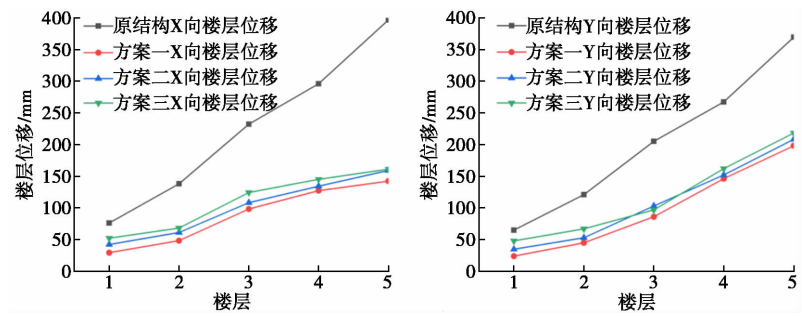


图 9 DLT 波下木塔结构楼层位移
Fig. 9 Floor displacement of wooden tower structure under DLT wave

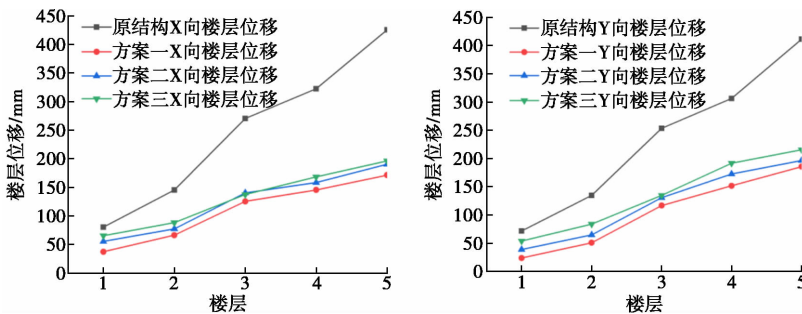


图 10 RGB 波下木塔结构楼层位移
Fig. 10 Floor displacement of wooden tower structure under RGB wave

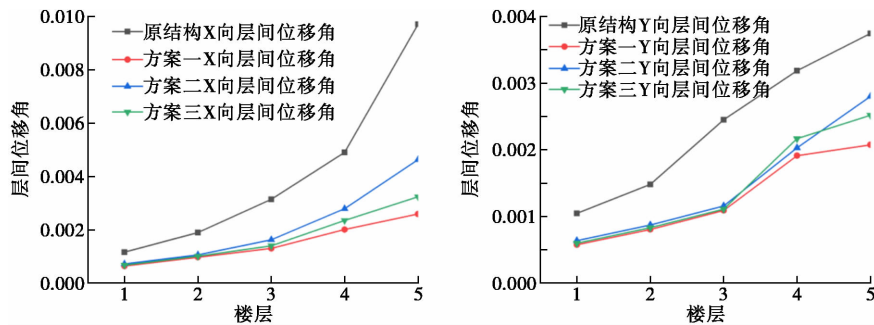


图 11 EL 波下木塔结构层间位移角
Fig. 11 Displacement Angle between floors of EL wave wooden tower structure

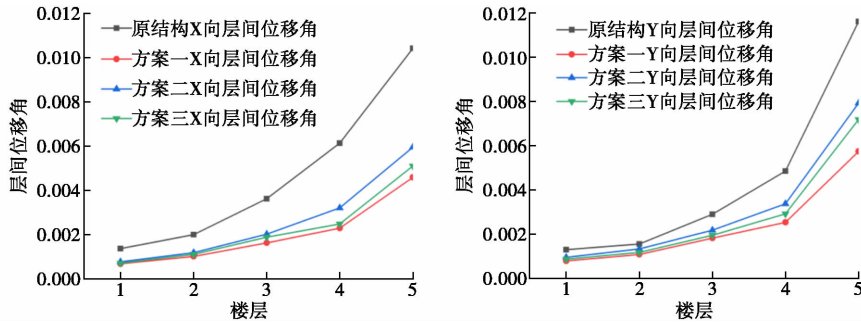


图 12 DLT 波下木塔结构层间位移角

Fig. 12 Displacement Angle between floors of wooden tower structure under DLT wave

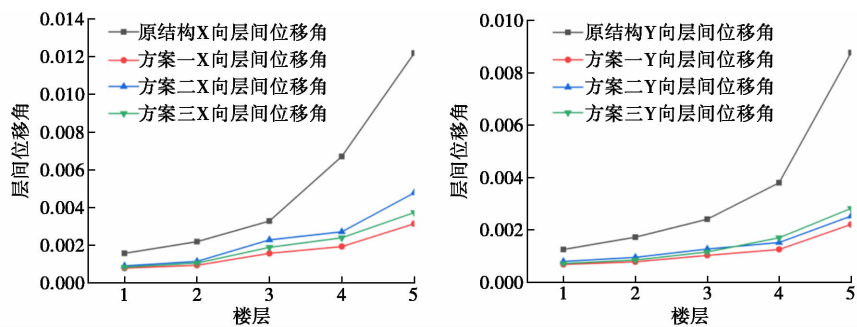


图 13 RGB 波下木塔结构层间位移角

Fig. 13 Inter-story displacement Angle of the wooden tower structure under RGB wave

4 结论与讨论

以应县木塔为研究对象,建立木塔结构有限元模型,根据场地特性及结构实际选取合适地震波作为激励输入,设计不同隔震方案,进行模态分析和动力时程分析,以木塔结构楼层位移、层间位移角等弹塑性变形能力为指标,研究木塔结构损伤情况及隔震性能,探讨古建筑应用隔震技术保护的可行性,得出如下结论:

在中震作用下,木塔原结构未出现明显损伤,第二层层间位移角发生突变,木塔结构上部为薄弱层;在大震作用下,木塔原结构地震响应较大,在刚度变化层其楼层位移、层间剪力均发生一定突变,并且除第一层外,其余各层层间位移角均超过限值,发生明显损伤。在布置隔震层后,木塔结构地震响应得到较好控制,各控制指标均有大幅度降低。其中,木塔隔震结构与原结构相比,层剪力平均减幅 26.4%,楼层位移平均减幅 42.6%,层位移角平均减幅 53.8%,并且综合对比分析发现方案一隔震设计效果最优。采用隔震技术进行控制后,木塔损伤程度显著降低,隔震层的布置可提高木塔结构在大震作用下的抗震能力,不同隔震方案的布置还需未来进一步研究。

因木塔结构的复杂性和其珍贵的文物属性,本文所做的工作只是木塔隔震保护中的初步探索,可为后

续木塔的修缮保护工作提供一定的参考借鉴。对木塔的保护干预应慎之又慎,保存其文物价值与信息载体属性,实施最小干预,遵循“修旧如旧”原则,让研究方案走在解决问题之前,做到“有备无患”。

参考文献:

- [1] 陈明达. 应县木塔[M]. 北京:文物出版社,1966.
- [2] 杜雷鸣,李海旺,薛飞,等. 应县木塔抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2010,43(S1):363-370.
- [3] 黑梅玲. 基于刚度偏心模型的应县木塔抗震性能分析[D]. 北京:北京交通大学,2022.
- [4] 刘崇治. 应县木塔柱头铺作抗震性能试验[D]. 北京:北京建筑大学,2022.
- [5] Cornell C A. Engineering seismic analysis[J]. Bull Sism Son Amer,1968(58):1583-1606.
- [6] 尹之潜. 结构易损性分类和未来地震灾害评估[J]. 中国地震,1996,12(1):49-55.
- [7] 马林林,薛建阳,张锡成. 残损古建筑木结构的地震易损性分析[J]. 振动工程学报,2023,36(5):1390-1401.
- [8] 焦鹏. 嘉峪关光化楼木构城楼地震易损性分析研究[D]. 天津:天津大学,2021.
- [9] 王贺. 光岳楼木结构地震易损性分析[D]. 山东:聊城大学,2020.

(下转第 52 页)

EEMD 模态分解算法在振动数据噪声抑制中的应用

李宏伟^{1,2}, 曾金艳^{1,2}, 任瑞国^{1,2}

(1. 山西省地震局, 山西 太原 030021; 2. 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 山西 太原 030025)

摘要: 桥梁结构响应容易受到环境噪声干扰, 导致振动响应信号中的各模态分量无法准确提取。针对现有降噪方法的局限性, 引入 EEMD 经验模态分解算法, 对桥梁振动信号进行降噪处理, 基于数学模拟实验分析 EEMD 降噪效果。结果表明, 该方法能较好地过滤叠加在已知曲线上的高斯白噪声, 且大幅度提高信噪比。在实测的振动观测曲线上, EEMD 降噪较好地消除了混杂在实测振动数据曲线中的随机误差和异常波动成分; 降噪后的振动曲线更加平稳, FFT 频谱曲线能直观地反映出更清晰、连续的数据。

关键词: 桥梁结构; EEMD 降噪方法; 振动数据

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

0 引言

桥梁结构健康诊断系统是基于部署在桥梁关键部位的各种传感器数据来间接评估结构的状态, 为桥梁管养部门提供决策服务。基于桥梁结构的振动模态参数, 可对桥梁结构健康状态进行评估, 并发出预警和预报。绝大多数的桥梁运营环境极易受到环境噪声的干扰, 使各种监测传感器数据信号淹没于噪声中, 造成错误识别各阶模态参数, 影响桥梁的健康预警决策, 无法准确、客观地对桥梁结构状态进行评估^[1-2]。因此, 在数据分析之前, 需要对桥梁实测数据进行预处理及噪声滤波等处理, 为桥梁结构状态分析提供相对可靠的输入数据。

针对信号滤波、降噪处理问题, 国内外许多学者进行了大量的研究与应用^[3-6]。在传统的信号处理方法中, 许多学者对降噪的实现是通过频谱分析技术, 即采用 FFT 变换或者小波变化等把信号映射在频域内加以分析。当噪声与信号在频域可分时, 可设计合适的滤波器, 滤除噪声所对应的频带^[7-8]。根据研究发现, 桥梁振动信号通常具有显著的非线性和非平稳性, 其频谱特征也较复杂, 且不同时间段的频谱特征也不同, 因此采用传统特定的滤波降噪方法不能满足自适应降噪需求, 对信号进行自适应分解重构降噪是目前研究的一个热点^[7-9]。Huang et al^[10]提出一种自适应分解方法, 称之为经验模态分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD)。该方法根据信号自身时间尺度的局部特征, 将信号分解为有限带宽的本征模态函

数(Intrinsic Mode Function, IMF)之和, 可适用于非线性、非平稳信号。但该方法存在模态混叠问题, Wu 和 Hang^[11]基于噪声辅助数据分析(NADA)理论, 针对 EMD 存在的模态混叠进行改进, 提出 EEMD 分解方法。EEMD 分解方法的核心就是在 EMD 的分解过程中为目标数据增加一个白噪声序列。

本文将 EEMD 分解方法引入到桥梁振动数据预处理中, 实现数据的滤波降噪。通过模拟实验分析 EEMD 降噪效果, 对某大型斜拉桥主梁振动加速度数据曲线进行滤波降噪, 消除其异常的波动成分, 验证该方法在桥梁实测信号中降噪效果的有效性。

1 研究方法

EMD 分解步骤: 找出原始信号 $S(t)$ 所有的极大值点与极小值点, 用三次样条函数插值拟合得到原始数据序列的上、下包络线; 计算上、下包络线的均值得到平均包络线 $m(t)$, 用 $S(t)$ 减去 $m(t)$, 得到一个去掉低频的新序列 $c_i(t)$ 。如果 $c_i(t)$ 满足 IMF 的数学条件, 定义 $c_i(t)$ 为 IMF 的一个分量, 否则以 $c_i(t)$ 为分析信号继续重复以上步骤, 直到满足要求为止。通过 EMD 后信号被分解成 n 个 IMF 分量和一个信号余量, 如式(1)所示:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n, \quad (1)$$

式中: c_i 表示第 i 个 IMF 分量; r_n 为残余项。

EEMD 的核心是在 EMD 的分解过程中为目标数据增加一个白噪声序列。经大量数据实验, EEMD 分

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 山西省自然科学研究面上项目(202303021221251)、山西省地震局科研项目(SBK-2319)。

第一作者简介: 李宏伟(1986—), 男, 山西浑源人。硕士研究生, 高级工程师, 主要从事地震风险评估工作, E-mail: lhw_one@163.com。

解方法能有效避免分解过程中的模态混叠现象,分解后的各模态分量频谱更加单一。

根据 Wu 等的研究成果,白噪声经 EEMD 分解后的各阶模态分量平均周期与能量密度乘积是一个常数 C ,具体如式(2)~(4)所示:

$$E_n \bar{T}_n = \text{const}, \quad (2)$$

$$E_n = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (C_n(j))^2, \quad (3)$$

$$\bar{T}_n = \frac{2N}{N_{ext}}, \quad (4)$$

式中: N 为数据长度; E_n 表示模态分量的能量密度; T_n 代表各阶平均周期; C_n 代表振幅大小; N_{ext} 代表各阶模态参数的极大值与极小值个数之和。

基于上述理论, EEMD 降噪的核心是在信号重构时如何选取不含噪声的模态分量。大量研究实验表明,噪声主要存在于低阶的模态参数中,具有频率高、非线性等特征。因此,若 EEMD 分解后的前 $k-1$ 阶模态参数为噪声,则信号重构模型如下,实现了信号的降噪,具体可采用式(5)表示:

$$X_{lk} = \sum_{i=k}^n C(i) + R. \quad (5)$$

因此,基于 EEMD 降噪模型的关键在于如何确定 k 值。在实际应用中,可选取式(6)作为 k 值的确定标准^[12]。

$$R_k = \left| \frac{E_n \bar{T}_n(k) - E_n \bar{T}_n(k-1)}{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} E_n \bar{T}_n(i)} \right|, \quad (6)$$

式中: $E_n T_n$ 为第 k 个 IMF 分量的能量密度与平均周期之积。当 $R_k \geq C$ (C 一般取 2~3) 时,前 $k-1$ 个 IMF 量为噪声部分,重构剩余 IMF 分量和残余量 R 即可得到滤波后的信号。

为证明该降噪模型的可靠性,采用数学模拟的方法构造出一个不含噪声的理想信号,叠加噪声信号生成模拟的观测曲线。采用 EEMD 降噪模型对模拟的

观测曲线进行降噪,并采用信噪比 SNR 和均方误差 MES 等评价指标评价降噪效果。本研究用于产生随机噪声的正态分布选取为 $N(0,1)$ 。

对降噪效果的评价标准为信噪比 SNR 和均方误差 MES,具体计算如式(7)~(8)所示:

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{\sum_{i=1}^N (s_i - x_i)^2} \right), \quad (7)$$

$$\text{MES} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - x_i)^2, \quad (8)$$

式中: x 作为理想的数据; s 代表扣除噪声的信号。信噪比 SNR 越高,表明信号中叠加的噪声越小; MES 越小,表明降噪效果越好。

2 基于 EEMD 降噪实验

为对比小波分解与 EEMD 分解的优势性,本文通过生成一段由 20 Hz 的正弦波、10 Hz 的正弦波和白噪声叠加而成的已知信号,采用 EEMD 方法与小波方法(采用 db5 小波基函数)分别对已知的合成信号进行分解,来验证分解效果(见图 1)。选取能量占比较大的三个分解层进行对比,从图中对比发现 EEMD 分解方法基本可以把已知的 20 Hz 和 10 Hz 信号分解出来,频率和振幅基本保留原有的状态,而小波分解未能客观真实地把已知的信号分解出来,分解的信号频率和振幅均与原始的已知成分信号有较大误差;另外,从各分解层的能量分布发现(见图 2), EEMD 分解能量主要集中在 IMF3 和 IMF4 两层中,占比约 87%,对应的频率为 20 Hz 和 10 Hz,其他分量为趋势项和伪信号;小波分解的信号并未集中到两个已知的信号频段上,能量占比最高的第 5 层与第 6 层约占总能量的 76%,分解产生较大的伪信号分量。因此,本文将选用 EEMD 分解方法对数据进行降噪处理。

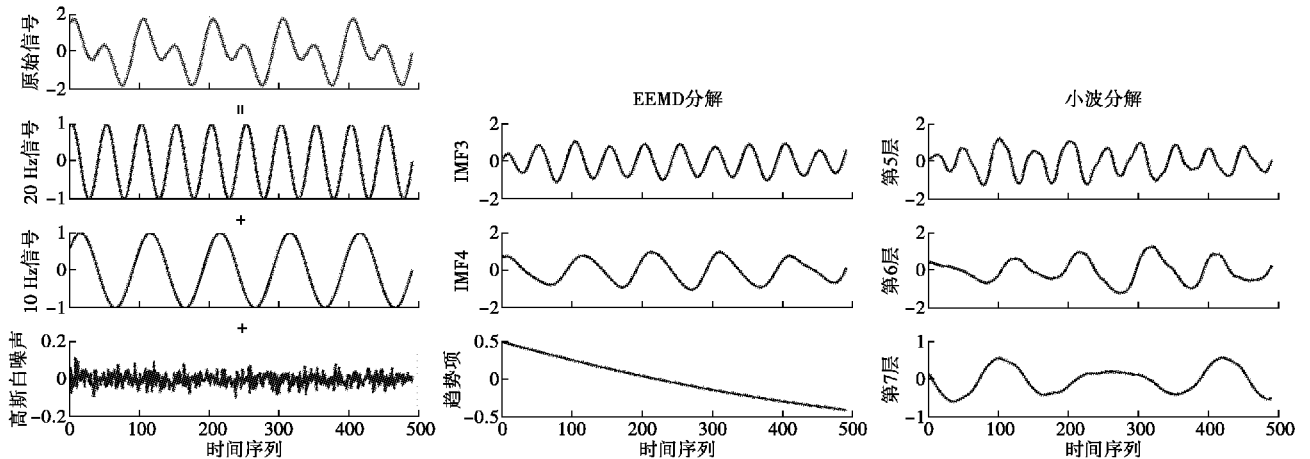


图 1 EEMD 与小波分解对比图

Fig. 1 Comparison between EEMD and wavelet decomposition

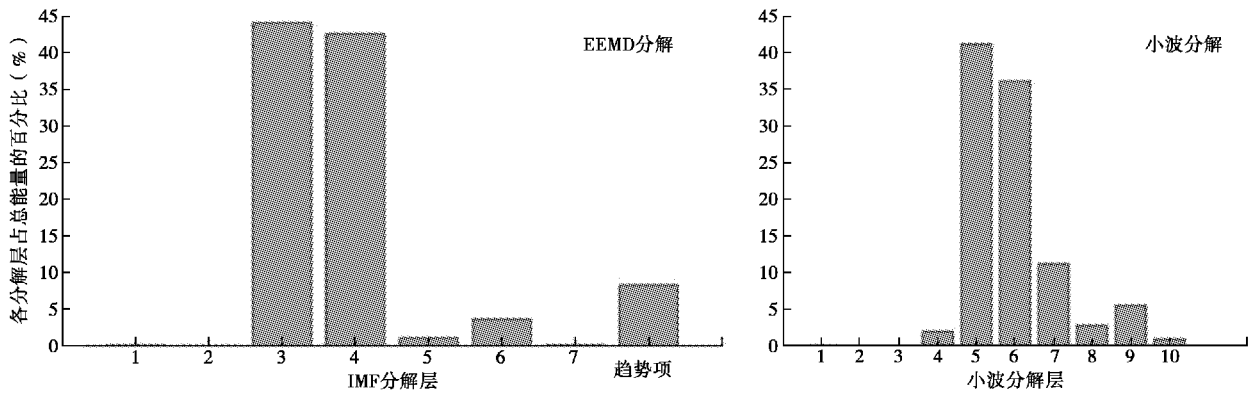


图2 EEMD和小波分解各分解层能量占比图
Fig. 2 Energy ratio of each decomposition layer in EEMD and wavelet decomposition

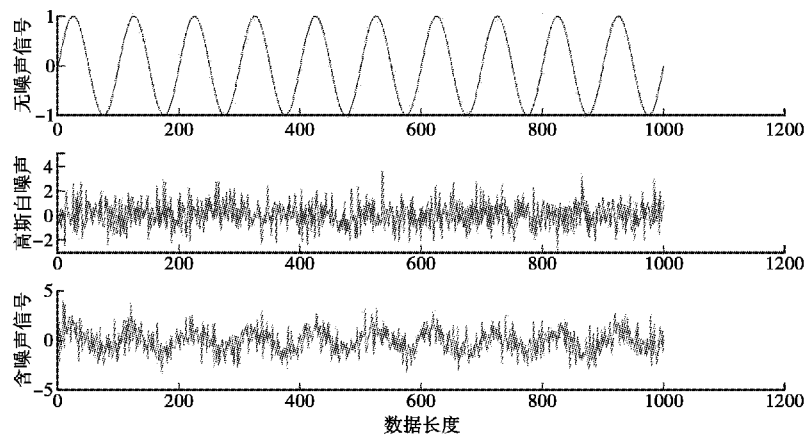


图3 构造的模拟曲线及噪声图
Fig. 3 Constructed simulation curve and noise map

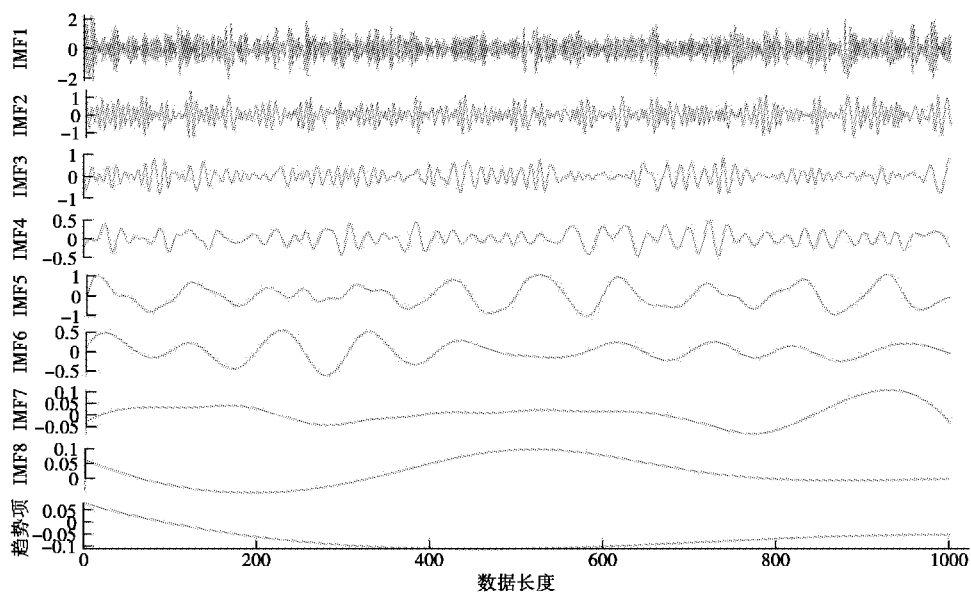


图4 EEMD分解各阶IMF图
Fig. 4 EEMD decomposition of IMF diagrams of various orders

由图 3 和图 4 可知,噪声从高频到低频排列,前几阶主要为高频噪声。按照噪声判定标准,如图 5 所示,前 4 阶 IMF 为噪声序列,重构信号为 IMF5~ IMF8 和趋势项。从图 6 可看到降噪较好地消除添加在模拟曲线中的噪声,信号信噪比 SNR 得到明显提升,均方误差指标 MES 也大幅降低(见表 1)。综上所述,基于 EEMD 分解方法的滤波降噪模型可大幅提高信号的信噪比,可将该方法应用于桥梁振动监测数据中。

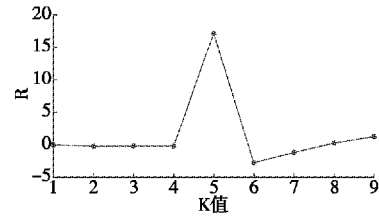


图 5 K 值与 R 关系图

Fig. 5 Relationship between K value and R

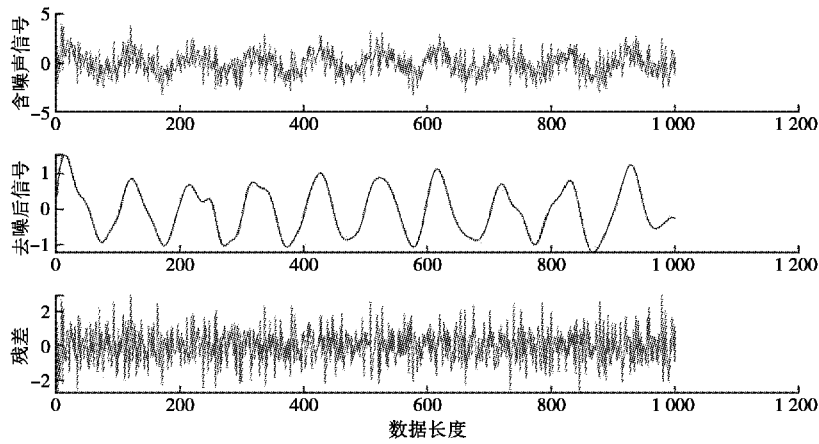


图 6 去噪效果对比图

Fig. 6 Comparison of denoising effects

表 1 模拟曲线降噪效果对比表

Table 1 Comparison table of noise reduction effect of simulation curve

观测曲线类型	SNR(dB)	MES
模拟振动观测数据	17.06	0.009 8
降噪后振动观测数据	27.76	0.000 83

3 实测振动数据降噪

通过模拟数据,论证 EEMD 分解方法具有良好的降噪效果,因此可以将 EEMD 降噪运用于桥梁振动监测数据中。选取某斜拉桥为研究对象,图 7 为某斜拉桥主梁 1/2 跨中实测振动加速度数据及 FFT 频谱曲

线。可以看出,跨中特征频率主要集中在 8 Hz 以内,由于受到环境噪声的影响,FFT 曲线特征频率模糊,且 8 Hz 以上的高频段叠加了一定的环境噪声,对后续模态参数的提取有一定影响。如图 8、图 9 所示,除 IMF1 频段外,其余各阶模态的频率基本按照高频到低频排列,各阶模态频率较为集中。 k 值域与 R 的关系如图 10 所示,当 $k=2$ 、 R 大于 2 时,IMF1 可判定为噪声部分,剩余各阶模态为有效的信号部分。信号重构及 FFT 频谱曲线如图 11 所示,降噪后的观测曲线高频噪声信号得到明显的抑制,特征频段内的频谱曲线更清晰和连续,能量主要集中在 8 Hz 频段以下的低频段,反映出该方法具备良好的降噪性能。

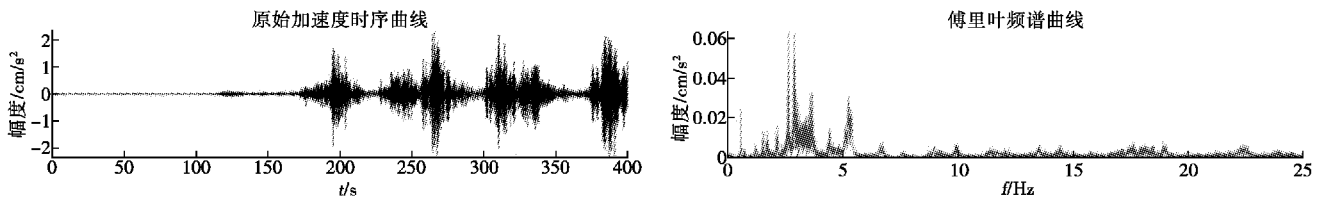


图 7 某斜拉桥实测加速度数据及 FFT 频谱曲线

Fig. 7 The measured acceleration data and FFT spectrum curve of a certain cable-stayed bridge

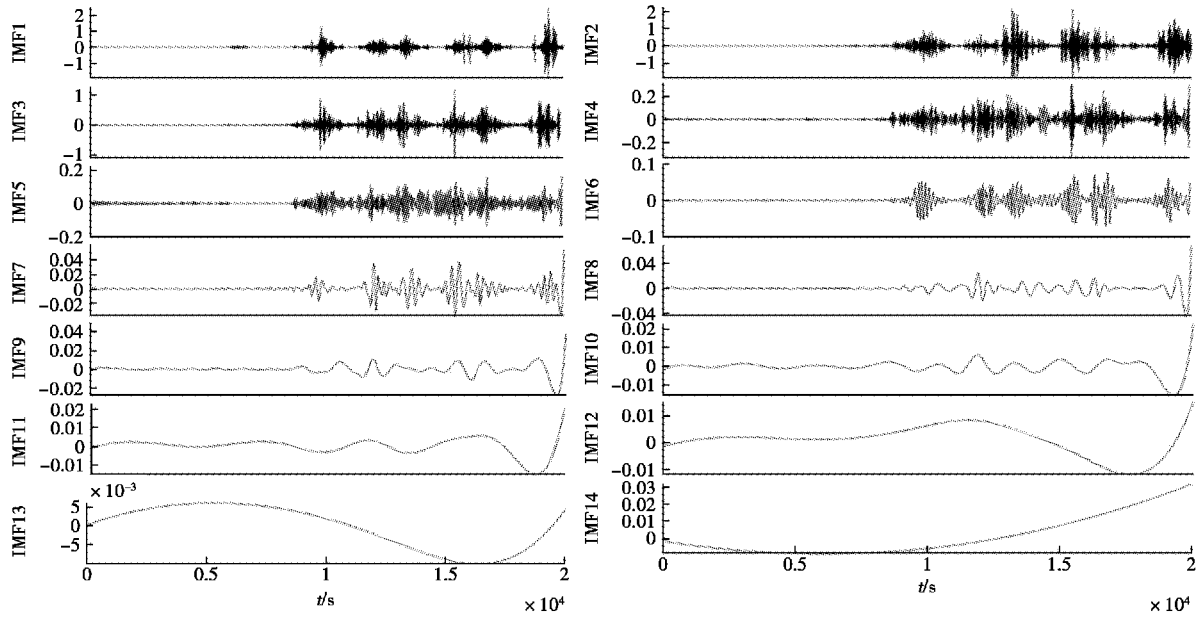


图 8 某斜拉桥 EEMD 分解各模态分量

Fig. 8 EEMD decomposition of various modal components for a cable-stayed bridge

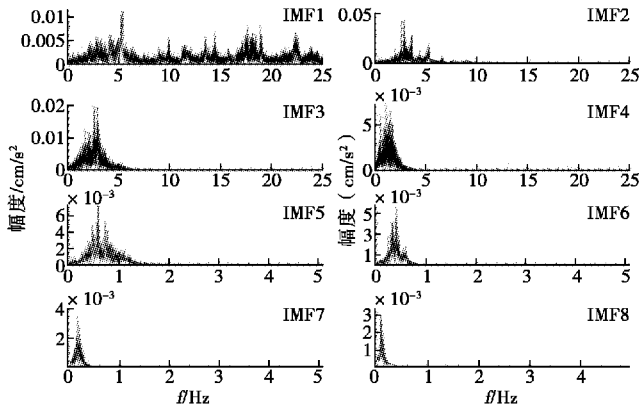


图 9 各模态分量的 FFT 频谱 (前 8 阶)

Fig. 9 FFT spectra of each modal component (first 8 orders)

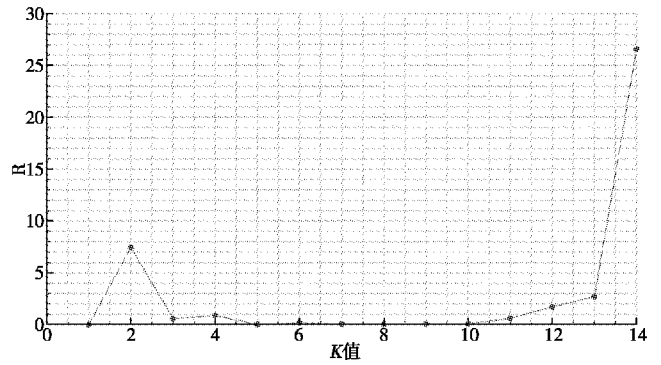


图 10 实测振动数据的 K 值与 R 关系图

Fig. 10 Relationship between K value and R of measured vibration data

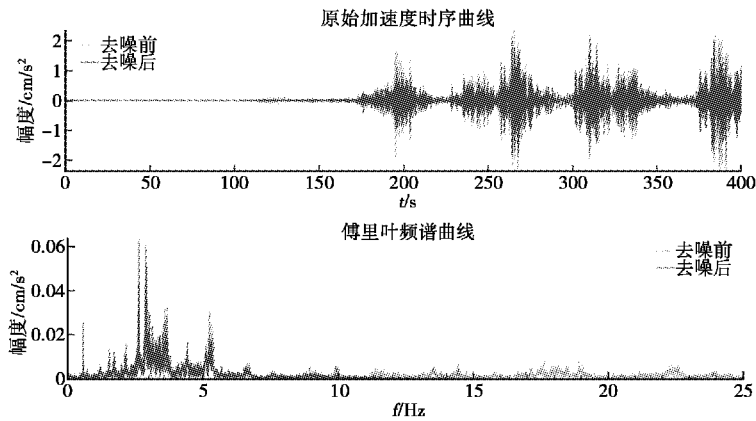


图 11 降噪后的振动数据及 FFT 频谱图

Fig. 11 Vibration data and FFT spectrum after denoising

4 结论与讨论

(1) 通过模拟数据,对比 EEMD 分解与小波分解的优势性。结果显示,EEMD 能较好分离出实际的频段,小波分解不仅要指定小波基函数,分解后引入了其他伪频段。

(2) 通过模拟数据,验证 EEMD 降噪效果,较好地消除了叠加的白噪声,提高数据的信噪比。

(3) EEMD 降噪的关键点在于 k 值的确定,通过模拟数据及实测数据可知,本文引入的 k 值确定方案是可行的。

(4) 将 EEMD 降噪方法引入到桥梁振动监测数据中,并选取某斜拉桥 1/2 跨中的实测振动加速度数据曲线进行验证。结果显示,降噪后的数据异常波动明显减少,FFT 曲线高频段得到较好的抑制,特征频段内数据更加清晰、连续,为桥梁结构健康监测中的数据提供一种新的思路,可进一步扩展到其他传感器数据降噪中。

参考文献:

- [1] 殷鹏程,熊芳来,单德山,等.基于自适应变分模态分解的桥梁振动信号降噪[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2023,36(3):23-29.
- [2] 董是,龙志友,毕洁夫,等.基于 Savitzky-Golay 平滑-小波降噪处理的桥梁结构监测数据分析方法[J].测绘通报,2023(9):100-106.
- [3] 熊春宝,王猛,于丽娜.桥梁 GNSS-RTK 变形监测数据的 CEEMDAN-WT 联合降噪法[J].振动与冲击,2021,40(9):12-18.
- [4] 张晖,鲁明明,丁华平,等.基于经验模态分解法的桥梁应变信号降噪方法研究[J].电子测量技术,2016,39(10):166-170.
- [5] 罗焯钊,陈永高,李升才.基于经验小波变换-噪声辅助分析的桥梁信号降噪方法[J].振动与冲击,2022,41(21):246-256.
- [6] 刘建军,黄方林,王学敏.基于 EMD 和 ARMA 模型桥梁振动信号降噪的处理方法[J].铁道科学与工程学报,2006,3(5):55-59.
- [7] Shun L, Jiandong M, Zhiyuan L. An EEMD-SVD method based on gray wolf optimization algorithm for lidar signal noise reduction[J]. International Journal of Remote Sensing, 2023, 44(17): 5448-5472.
- [8] Jiajia X, Ying L, Chuang Z, et al. INS/GPS Integrated Navigation for Unmanned Ships Based on EEMD Noise Reduction and SSA-ELM[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(11): 1733-1733.
- [9] Zicheng X. Bearing fault diagnosis method based on EEMD and adaptive redundant lifting scheme packet[J]. Vibroengineering PROCEDIA, 2020: 3414-3419.
- [10] 刘靖洁,陈桂明,刘晓方,等. FFT 和小波变换在信号降噪中的应用[J].数据采集与处理,2009,24(B10):58-60.
- [11] Wu Z H, Huang N E. Ensemble Empirical Mode Decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [12] 周俊,马建林,徐华,等. EMD 降噪在高速铁路路基沉降预测中的应用[J].振动与冲击,2016,35(8):66-72.

Application of EEMD Modal Decomposition Algorithm in Noise Suppression of Vibration Data

LI Hongwei^{1,2}, ZENG Jinyan^{1,2}, REN Ruiguo^{1,2}

(1. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030021, China;

2. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan, Shanxi 030025, China)

Abstract: The response of bridge structure is easily disturbed by environmental noise, which leads to the failure to extract the modal components of vibration response signal accurately. In response to the limitations of existing noise reduction methods, this paper introduces the EEMD empirical mode decomposition algorithm to denoise bridge vibration signals. Mathematical simulation experiments were conducted to analyze the effectiveness of EEMD in noise reduction. The results indicate that this method effectively filters out Gaussian white noise superimposed on known curves and significantly enhances the signal-to-noise ratio. In actual measured vibration curves, EEMD denoising successfully removes random errors and abnormal fluctuations present in the data, resulting in a smoother vibration curve. Additionally, the FFT spectrum of the denoised data provides a clearer and more continuous representation of the signal.

Key words: bridge structure; EEMD noise reduction method; vibration data

· 技术交流 ·

文章编号:1000-6265(2024)04-0046-07

临汾地球物理站网故障分析及运维建议

张聪聪^{1,2}, 张红秀^{1,2}

(1. 山西省地震局临汾地震监测中心站, 山西 太原 041000;
2. 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 山西 太原 030025)

摘要: 为提高中心站地球物理观测数据质量,提升台站运维处置能力,为台站备机备件提供科学依据,通过对临汾地球物理站网2013—2023年间出现的各类故障及自主维修情况进行统计,总结出台站故障特征,查找故障产生原因,分析不同类型故障台站运维能力,列举典型故障排除案例,并从供电系统完善、日常运行维护和科学备机备件等方面提出运维建议,以进一步保障地球物理站网高质量运行。

关键词: 地球物理站网;故障排除;运维能力;备机备件

中图分类号: P315.62

文献标志码: A

0 引言

地球物理观测是地震监测预报的重要基础保障,分为形变、磁电和流体三大学科。据统计,全国地球物理设备已达三千多套,每年产出1 TB的观测数据^[1],为中国地球科学研究和地震预测预报研究提供丰富的科学数据。目前,地球物理观测设备存在种类繁多、市场化程度低、老化严重、故障率较高、备机备件不足、维修能力不足和运维效率低等问题,每年故障数量近一千套。因此,建设维修保障体系,保障仪器高效运维非常重要^[2]。中心站作为全国地球物理站网的基本单元,承担着具体运维任务,同时也积累了较多故障排除运维经验^[3-7]。如何合理搭建观测系统、科学备机备件和高效运维是保障观测质量的关键所在。2020年底,山西省地震局机构改革,长治中心地震台与临汾中心地震台合并,改名为临汾地震监测中心站(以下简称临汾站)。本文以临汾站地球物理站网为例,对不同故障及自我运维修复情况进行统计,并对台站运维案例进行分析,从备机备件、运维保障和观测系统建设等方面提出运维建议。

1 临汾站地球物理站网概况

临汾站隶属于山西省地震局,始建于1953年,其核心地球物理观测站网龙祠站位于临汾凹陷内的龙祠沉降中心,紧靠临汾盆地西侧的全新世活动断裂——

罗云山山前断裂,新生代沉积厚度1 800 m,其中上新统1 100 m,第四系700 m^[8]。临汾盆地内历史上发生过1303年洪洞8级地震和1695年临汾7 $\frac{3}{4}$ 级地震,

两次历史强震时间间隔不到300年,这在全国少有。自现代地震仪器观测以来,断陷带内地震活动强烈,临汾盆地地震构造及地震危险性一直是研究重点^[9]。临汾站地球物理观测手段分布拓扑如图1所示,现有地球物理观测设备22套,涵盖形变、磁电、流体三大学科,为区域地球物理研究和地震预测预报研究提供综合数据支撑。

2 故障分析

2.1 故障分类统计

基于地球物理数据预处理系统、跟踪分析平台、台站维修案例总结、已有台站运维成果和相关技术人员经验总结^[10-15],结合临汾站地球物理故障特征统计,将临汾站地球物理站网2013—2023年间出现的地球物理站网故障分为观测系统、供电系统、网络系统三类故障。其中,观测系统故障包括主机故障、传感器故障、观测线缆故障和雷击故障四种,供电系统故障包括配电路故障、UPS故障和市电发电机故障三种,网络系统故障包括网络设备故障、网络线路故障和网络运营商故障三种,故障次数和占比如表1所示。考虑到台站观测系统故障实际情况及备机备件需求,将主机

收稿日期:2024-06-13

基金项目:山西省地震局科研项目(SBK-2407);山西省地震局创新团队。

第一作者简介:张聪聪(1989—),男,山西临汾人。硕士研究生,工程师,主要从事地震监测运维工作,E-mail:1019276634@qq.com。

通信作者:张红秀(1973—),女,山西临汾人。高级工程师,主要从事地震监测运维工作,E-mail:1019276634@qq.com。

故障细分为电源模块故障、主板故障、上位机故障、网络单元故障、程序参数故障、接地故障、死机故障和不明原因故障等,故障次数和占比如表 2 所示。

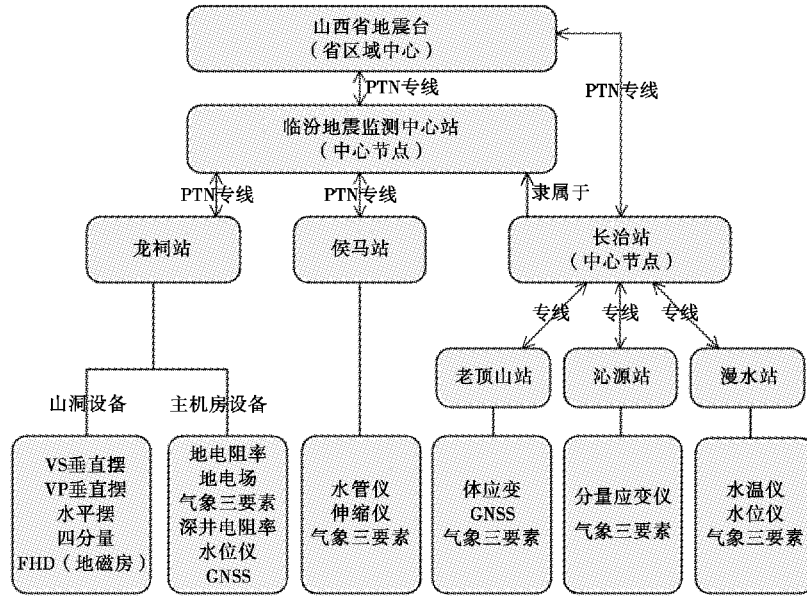


图 1 临汾站地球物理观测分布拓扑图

Fig. 1 Geophysical observation distribution topology of Linfen Earthquake Monitoring Center station

故障出现后,台站技术人员若能尽快修复,可显著提升设备运行率。为探究台站技术人员运维水平及可自主修复的故障类型,更好指导今后运维工作,统计不同类型故障自主维修次数及自主维修率。其中,自主

修复包括自主维修恢复、更换备机备件及专家远程指导自主修复等,自主修复率=自主修复次数/故障总次数×100%(见表 1、表 2)。

表 1 临汾站地球物理站网故障统计表

Table 1 Fault statistics of geophysical station network of Linfen Central Station

故障类型	故障次数	故障占比(%)	自主修复次数	自主修复率(%)	故障种类	故障次数	故障占比(%)	自主修复次数	自主修复率(%)
观测系统故障	116	64.4	77	66.4	主机故障	98	84.4	65	66.3
					传感器故障	9	6.3	4	44.4
					观测线缆故障	5	2.5	5	100
					雷击故障	4	3.7	4	100
供电系统故障	31	17.2	25	80.6	配电线路故障	21	67.7	19	93.7
					UPS 故障	4	12.9	4	100
					市电发电机故障	3	9.6	0	0
					防雷系统故障	3	9.6	2	66.6
网络系统故障	33	18.3	27	81.8	网络设备故障	10	30.3	9	90
					网络线路故障	18	54.5	18	100
					网络运营商故障	5	15.1	0	0
备注	1、自主维修率=自主修复次数/故障总次数×100% 2、自主修复有且包括自主维修恢复、更换备机备件、专家远程指导自主修复等								

2.2 故障类型分析

由表 1 可见,临汾站地球物理站网故障中,观测系统类故障占比 64.4%,远高于供电系统故障和网络系统故障,这与观测系统仪器设备众多、拓扑复杂及仪器

老化等有关。

(1) 观测系统故障。

由表 1 可见,主机故障远多于其他类型故障,占比达 84.4%。主要原因是临汾站地球物理观测仪器多

为“十一五”设备,多数仪器使用期已超八年,老化严重,同时架设地球物理仪器的龙祠站山洞潮湿严重,加速仪器老化,造成故障增多。在 2018 年后依靠省局仪器更新项目陆续更新 VS、VP、地磁 FHD 等仪器,由于观测环境或 VS、VP 调试维修多次,总体故障次数并无减少。临汾站观测系统 10 年间仅有 4 次雷击故障,相较于其他台站雷击故障较少,这与台站地理位置及台站较好的防雷系统有关。

表 2 临汾站主机故障统计表

Table 2 Main engine fault statistics of Linfen Central Station

故障种类	内容	故障次数	故障占比 (%)	自主修复次数	自主修复率 (%)
主机故障	电源模块故障	16	16.3	16	100
	主板故障	10	10.2	3	30
	上位机故障	11	11.2	3	27.3
	网络单元故障	6	6.1	4	66.6
	程序参数故障	8	8.2	5	62.5
	接地故障	2	3.1	2	100
	死机故障	19	19.3	19	100
	不明原因	26	26.5	13	50

由表 2 可见,观测系统主机故障以电源模块、死机和不明原因故障为主,占到主机故障数的 62%。其中,死机故障和不明原因故障中故障占到观测系统故障的 45%。此类故障易于处置,基本采用现场重启或远程重启就可以解决。临汾站电源模块损坏 16 次,在主机故障中占比较高,属于易损部件,故障与模块本身质量、供电系统不稳定、雷击、仪器老化或观测环境恶劣有关。主板故障、上位机故障、网络单元故障与程序故障占比相近,故障总和占到主机故障数的 35%。接地故障仅有 2 次,这与台站日常运维重视防雷接地,保障仪器和机柜具有良好接地有关。

(2) 供电系统故障。

配电线路故障为供电系统故障的主要故障,临汾站配电线路改造于“十一五”期间,存在电气设备和电缆老化的情况,同时龙祠站观测山洞潮湿严重,配电线路漏电、跳闸也是造成配电线路故障的原因之一。十年间 UPS 故障 4 次,因其配电集中性,每次故障会致使龙祠站山洞地球物理设备全部停电,造成较大的数据损失。因龙祠站山洞市电+UPS 配电方式存在一定的隐患漏洞,台站需对供电系统进行优化改造。市电发电机故障共计出现 3 次,全部为长治站老顶山站市电停电故障,具体原因为老顶山站与附近农村使用同一变压器供电,农村供电故障对台站供电产生连带作用。龙祠站采用高压专线配电,保障台站供电稳定。

2017 年龙祠站更换大功率变压器,及时排除了变压器老化、功率欠缺隐患。

(3) 网络系统故障。

网络设备故障和网络线路故障占比较大。其中,网络设备故障多为光纤收发器故障和交换机故障,网络线路故障多为地球物理设备网口松动、制作网线不达标所致。网络运营商故障较少,台站相关技术人员积极配合网络运营商运维人员做好日常巡检工作,可及时排查解决隐患。

2.3 故障运维分析

相较于观测系统故障,供电系统故障和网络系统故障次数少,自主修复率高,说明台站在供电系统故障和网络系统故障方面具有较好的运维能力,与这两者系统结构相对简单,便于运维有一定的关系。在观测系统故障中,自主修复基本达到 50% 以上。其中,主机故障自主修复占 66.3%,台站运维人员可完成电源模块、网络单元、程序参数、接地及死机等故障的自主修复,对于主板、上位机和不明原因等故障自主修复水平较差,主要原因是这些故障对运维技术和电子理论技术要求较高,而台站运维人员这方面能力相对比较欠缺。

地球物理观测主机系统采用模块化,包含供电模块、数采模块和网络存储模块(上位机)等。临汾站主板故障和上位机故障自我修复率较低的原因除上述的运维人员能力欠缺外,还与无充足的备用件有关。台站自主运维大多只能做到更换电路板级别,难以做到对电路板、芯片维修,因此,及时更换备机备件是台站高效运维的方式之一。基于地球物理设备主板和上位机存在市场化低、价格较高的缺点,解决模块维修配足备机备件显得尤为重要。供电模块故障自主修复率较高原因是供电模块市场通用较多、价格低廉,台站备用电源模块充足。在主机故障中死机故障和不明原因故障占比高,但这类故障采用远程重启或现场重启,基本都能排除,这是台站运维人员故障处置中采用最多的办法之一。

2.4 运维案例分析

以临汾龙祠站山洞地球物理观测为例,将其分为供电系统、观测系统和网络系统三大类,其拓扑结构如图 2 所示。在网络系统中,临汾站监控电脑通过单线路与龙祠站山洞观测设备链接(监控电脑—单线路交换机—网络传输设备—PTN 专线—网络传输设备—龙祠主交换机—光纤收发器—山洞光纤收发器—山洞交换机—观测设备)。在供电系统中,配电站通过高压专线将市电传输至台站变压器后,通过一级、二级、三级配电箱进入龙祠站山洞机房,再通过 UPS 传输至地球物理机柜。在观测系统中,山洞机柜中地球物理主机通过信号电缆和供电线缆与洞室内传感器连接。

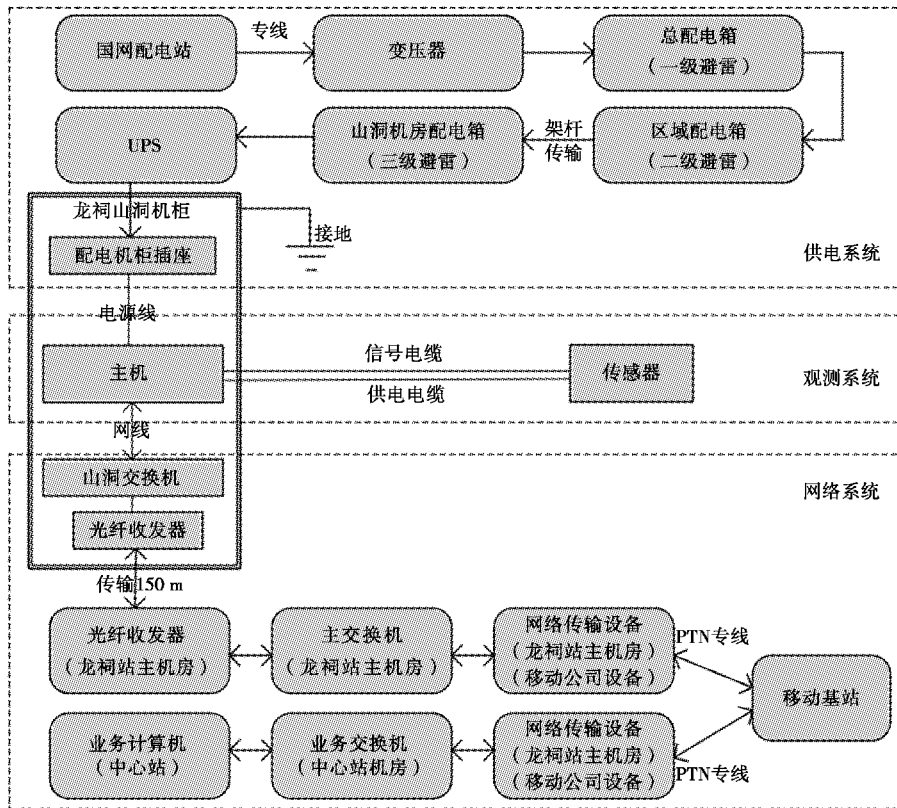


图 2 龙祠站山洞站点拓扑图

Fig. 2 Topology of cave site of Longci Station

(1) UPS 故障。

2019 年 6 月 9 日,龙祠站山洞所有观测设备和网络设备断记。采用远程访问主机和 Ping 网络设备方式都无法成功。根据图 2 所示,故障原因初步判定为供电系统中断或网络系统中断,经山洞现场查看确认,所有观测设备和网络设备停电,UPS 漏电报警,后重启 UPS 所有设备恢复正常,仪器正常观测。经分析,此次故障原因可能为山洞供电线路漏电造成 UPS 漏电保护或 UPS 自身存在故障。经排查排除山洞供电线路漏电原因为防止由于 UPS 自身故障造成再次停电,后更换备用 UPS。

2020 年 9 月 15 日,龙祠站山洞所有仪器设备再次无法远程连接。现场查看发现同 2019 年 6 月 9 日故障现象相同,重启 UPS 后所有设备均恢复正常。由于已更换 UPS,此次基本可以确定山洞供电确实存在漏电现象。该供电线路改造于 2013 年,时间不长,山洞潮湿严重,可能造成供电线路漏电。认真巡视供电线路,拆除灯具,发现照明线路存在压降现象,确定故障原因为照明线路漏电,并通过重新铺设照明电路解除故障。

(2) 山洞网络设备丢包。

2023 年 12 月底,龙祠站出现网络设备偶尔丢包现象。根据图 2,第一时间联系移动公司运维人员查看后台是否为 PTN 专线问题,同时龙祠站山洞网络设备和龙祠站院内网络设备 Ping 处理发现只有山洞网络设备存在丢包,龙祠站院内网络设备并无此现象,由此排除移动运营商所管辖的 PTN 专线和网络设备故障,基本判定故障点在龙祠站总交换机到龙祠站山洞交换机之间的光纤连接。根据以往维修经验,光纤收发器和光线折损易造成丢包,运维人员现场更换备用的光纤收发器后,丢包故障得以修复。

(3) VP 垂直摆网络丢包。

2022 年 11 月 25 日,龙祠站山洞 VP 仪器出现严重丢包现象,影响 VP 仪器正常收数。工作人员第一时间同时 Ping 同机柜中的其他网络设备,发现其他网络设备无丢包现象,故障基本判断为 VP 仪器本身网络模块故障或 VP 与交换机之间的网络连接故障。远程和现场重启 VP,检查并更换网线网口,故障仍未解决。故判定故障原因为主机内网络模块故障,更换备用网卡后,VP 恢复正常。

(4) 水平摆无法正常采数。

2023 年 11 月,龙祠站山洞水平摆观测无法正常

收数、成功登录主页和 Ping 仪器 IP,同机柜中的其他网络设备均正常,对水平摆进行远程断电重启后会出现短暂 Ping 通现象。根据图 2 所示,故障点首先锁定为水平摆自身网络故障或水平摆供电故障。经现场检查,排除供电故障,现场重启设备、更换网线网口后依然无法排除故障,故推断网络故障原因可能是网卡故障或是网络配置参数故障。该水平摆是返厂维修后进行重新架设,工作人员重新认真检查网络配置参数,在检查上位机配置时,提示框提示计算机名在局域网存在,更换上位机局域网名称后,水平摆恢复正常。最终判定造成本次故障的原因是该水平摆返厂维修过程中,龙祠站山洞安装了一套新水平摆,旧水平摆维修完重新安装后,未更换网络名造成新、旧水平摆网络冲突。

(5) VP 垂直摆调零故障。

2022 年 6 月 4 日,龙祠站 VP 仪器出现无法调零的故障。在远程或现场给出调零指令后,马达调到零点后依然同向运转不停。经分析此故障为调零电路板反馈机制失效所致,调零电路无法接收到调零后的信息,导致马达一直运转。采取更换调零电路板上的 LM356 和 TL084 控制芯片的措施后,VP 仪器可正常调零。

(6) 传感器线缆故障。

2022 年 10 月中旬,龙祠站水位仪观测数据曲线开始出现向上挂幕现象,甚至 12 月 5 日观测数据开始出现断记现象(见图 3)。在更换调拨主机后,故障依然存在。在准备测试传感器是否故障时,发现主机和传感器之间的信号线缆存在接头,发现接头虽用焊锡焊接但存在氧化现象,重新接通后故障排除。

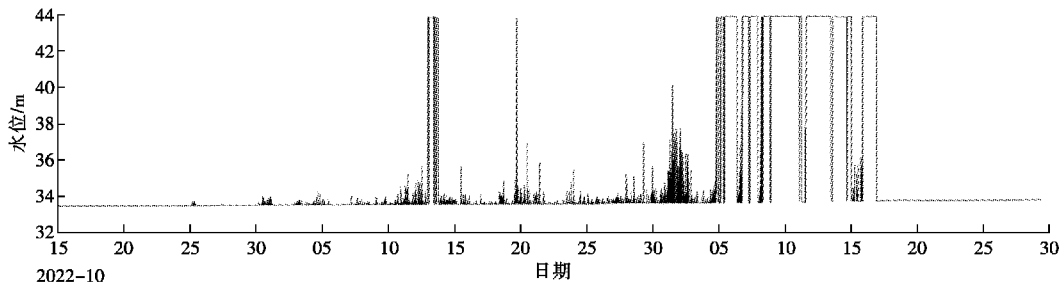


图 3 龙祠站水位仪信号线缆接头故障曲线

Fig. 3 Fault curve of signal cable connector of water level meter at Longci Station

3 运维建议

地球物理观测设备种类繁多、结构复杂,对供电系统和网络系统要求较高。基于地球物理观测系统故障特征,对临汾站故障类型及运维经验进行分析,为保障地球物理观测系统连续可靠的运行,提出以下几点建议。

3.1 完善供电系统

在有市电的地球物理观测台站,一般采用市电+发电机+UPS 供电方式。UPS 与观测设备采用单线程连接,临汾站的龙祠站、侯马站和长治站等台站均采用此供电方式。该供电方式存在的隐患是一旦 UPS 自身故障或 UPS 负载漏电,UPS 输出负载设备会全部断电,如地球物理设备较多,则会造成巨大的数据损失。UPS 故障解决方案有:(1)在条件允许下考虑采用两台 UPS 并机方案。如,采用模块化并机+外置静态开关方案,该方案任意一台 UPS 因故障停机,负载都由剩余 UPS 承担。或采用单台 UPS+STS 静态切换开关方案,将 UPS 设置为主电源,市电设置为备用电源,在主电源有故障时,自动切换到市电供电,此方案可以处理 UPS 自身故障造成负载设备断电,无法处

理漏电造成的断电。(2)采用市电+发电机+智能电源多负载输出供电方式,保障负载设备的独立性,对某一路出现供电故障时,其余负载保证正常供电。(3)对于市电供电不稳定的台站,如长治站,可采用市电+发电机+太阳能+智能电源多负载输出供电模式,在市电停电时,且不能及时发电的情况下,太阳能可保障智能电源供电的稳定性。

3.2 加强日常监控

随着全国地震监测台站的改革,无人值守台站越来越多,为保障中心站对无人值守台站全方位监控,台站应采用较成熟软硬件监控系统对供电系统、网络系统、观测系统实施三重监控。在市电+发电机+UPS 供电系统中,需对 UPS 前端和后端都进行停电监控:对 UPS 前端断电监控能有效防止工作人员未能及时发现市电或发电机停电情况,对 UPS 后端断电监控能有效防止 UPS 自身故障造成负载停电。网络系统中,针对不同的位置,安装网络监控设备,以利于中心站工作人员远程判断网络故障点。观测系统中,安装远程重启设备对观测设备进行远程重启,安装数据监控平台对观测数据实时监控。除此之外,还需安装视频监控对观测环境和观测仪器面板显示进行监控,安装智

能电源对不同观测设备电源进行监控。综上,台站需要安装全方位软硬件监控系统,提供观测系统故障报警和预警功能。

3.3 科学备机备份

通过对临汾站故障统计分析可知,除观测系统中不明原因故障无法自行修复外,其余故障均可通过更换对应模块解决故障。台站备机备件的数量应该和在线观测设备数量、台站自身故障特征保持一定比例。在临汾站观测系统仪器主机中电源模块是更换最多的模块,10年间更换16次,以这样的频率,每年须保证至少2个备用电源模块。台站可借鉴已成熟领域备机备件配置数量和管理办法对台站观测设备进行备机备件管理^[16-18],同时要充分考虑地震监测特殊性,全年每天24小时不间断观测,保障设备稳定性。由于地球物理观测设备很多模块具有通用性,所以对这部分模块需进行统一备份,如供电模块、PC104、网卡等模块。随着2024年“巨灾防范工程”的实施,台站可根据自身易故障观测设备和部件按照一定比例进行备机备件,以缓解台站备机备件不足的问题。

3.4 提高运维能力

从临汾站故障统计中的自主修复率可知,台站总体运维能力尚可,主要集中于更换备机备件方面,对于板级、芯片级故障,处置能力较弱。台站运维人员须熟知对台站每个站点供电系统、网络系统和观测系统的拓扑图,以便快速找到故障点,高效运维。随着电子产品的集成化发展,模块化更换是高效的维修方式之一。台站运维人员如能不断提升对仪器观测原理、仪器结构和电路图件的了解,加强电子技术、网络技术和供电技术的学习,台站运维水平将会取得极大的进步。

4 结论与讨论

地球物理观测站网是地震监测预报、地球物理研究的数据基础。中心站作为地球物理站网直接管理部门,承担其所有运维职责。本文通过对临汾站地球物理站网2013—2023年间出现的各类故障及自主维修情况进行统计,分析台站故障特征及不同故障类型台站运维能力,列举典型故障排除案例,针对地球物理站故障特征,提出行之有效的运维建议。

(1) 临汾站地球物理站网故障中以观测系统故障为主,这与观测设备多,拓扑结构复杂有关。在观测系统故障中主机故障最多,主要原因是仪器老化、观测环境潮湿;在主机故障中,电源模块、死机占主要部分,保证充足的电源模块备件非常重要;在供电系统故障中,由于UPS多采用集中供电模式,需关注UPS的可靠性;在网络系统故障中,除要与移动网络供应商及时沟通外,还需保证储备充足的光纤收发器和交换机。

(2) 临汾站故障运维中供电系统故障和网络系统自主修复率较高,与这两个系统结构简单、便于运维有

关。在观测系统主机故障中,电源模块、网络单元模块、主板故障等自主维修主要通过更换备机备件完成,主板内部元器件及芯片故障运维是台站运维人员所欠缺的技能。

(3) 从完善供电系统、加强日常监控、科学备机备件及提高运维能力四个方面,对地球物理站网运维提出行之有效的建议。如在日常监控中要重点监控依赖于UPS的相关硬件或软件,根据台站自身情况及地球物理观测设备故障特征备足备机备件等。

参考文献:

- [1] 刘高川,腾云田,庞晶源,等.地球物理台网仪器维修信息管理的研究与实现[J].地震研究,2021,44(1):121-128.
- [2] 刘高川,李正媛,王莉森,等.地震前兆台网观测仪器维修保障体系[J].地震地磁观测与研究,2016,37(4):142-148.
- [3] 张聪聪,靳宝萍.临汾中心地震台FHD质子磁力仪噪声干扰分析[J].山西地震,2020(3):30-33.
- [4] 马武刚.河北VP型宽频带垂直摆倾斜仪映震效能及时频特征分析[J].大地测量与地球动力学,2022,42(6):643-649.
- [5] 吝利民,张聪聪,荆红亮,等.临汾站宽频带倾斜仪故障处理与维护[J].山西地震,2023(4):37-40.
- [6] 赵黎明,胡雪琪,李颖楠,等.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(4):52-56.
- [7] 张聪聪,靳宝萍.临汾地震监测中心站容栅式雨量计故障处理与运维技术[J].山西地震,2022(4):25-27.
- [8] 山西省地震局.山西省地震监测志[M].北京:地震出版社,2006:9.
- [9] 张聪聪,宋美琴,吴昊昱,等.临汾盆地及周边地区双差层析成像研究[J].大地测量与地球动力学,2023,43(7):715-721.
- [10] 张红秀,郭林旺,郭国祥,等.山西数字化前兆观测系统的常见故障与维护[J].大地测量与地球动力学增刊(II),2013,33(10):139-141.
- [11] 陈常俊,张亮娥,张建增,等.数字地震前兆观测仪器供电及维护[J].地震地磁观测与研究,2013,34(增刊):189-193.
- [12] 马武刚,庞聪,龚燕民,等.VP型宽频带倾斜仪故障信号的BBA-SOM智能诊断[J].科学技术与工程,2023,23(14):6012-6017.
- [13] 邹成栋.云南省地球物理台网仪器更新情况调研[J].地震地磁观测与研究,2023,44(5):182-184.
- [14] 朱冰清,王建国,郭巍,等.天津地区VP宽频带倾斜仪与宽频带地震仪数据融合分析[J].大地测量与地球动力学,2021,41(7):759-764.
- [15] 颜欢,陈碧洪,张正伟,等.四川西昌地球物理站网故障分析及运维建议[J].四川地震,2023,12(4):36-40.
- [16] 赵宇,伏洪勇,张坚,等.航空电子设备备件需求量分析[J].系统工程与电子技术,2002,24(3):1-3.

- [17] 杨杰,张斌,华中生. 间断需求预测方法综述[J]. 预测, 2005,24(5):70-75.
- [18] 卢山,燕云,高业欣,等. 地震仪器备机备件查询管理系统开发与应用[J]. 防灾减灾学报,2020,36(1):79-86.

Analysis and Suggestions for Faulty Operation and Maintenance of Linfen Geophysical Station Network

ZHANG Congcong^{1,2}, ZHANG Hongxiu^{1,2}

(1. Linfen Earthquake Monitoring Center Station of Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 041000, China;
2. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan, Shanxi 030025, China)

Abstract: To further improve the quality of geophysical observation data of the central station, enhance the operation and disposal capacity of the station, and provide scientific basis for the spare parts of the station, this paper makes statistics on various faults and autonomous maintenance of the Linfen Geophysical station network from 2013 to 2023. Summarize the fault characteristics of the station, find the cause of the fault, analyze the operation and maintenance ability of different types of fault stations, and give a typical troubleshooting case. The suggestions of operation and maintenance are put forward from the aspects of power supply system improvement, daily operation and maintenance and scientific spare parts, so as to further ensure the high-quality operation of the geophysical station network.

Key words: geophysical station network; troubleshooting; operation and maintenance ability; spare parts

(上接第 39 页)

- [10] 王南. 规矩方圆浮图万千——中国古代佛塔构图比例探析(上)[J]. 中国建筑史论汇刊,2017(2):216-256.
- [11] 王尧. 高烈度地震下应县木塔隔震性能研究[D]. 西安: 西安工业大学,2020.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] 侯艳芳,王鑫,侯婷婷,等. 古建筑木结构损伤检测方法研究进展[J]. 粘接,2022,49(1):123-126+130.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. G/T 118—2018 建筑隔震橡胶支座[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

Seismic Vulnerability Analysis and Seismic Isolation Performance Research Based on Yingxian Wooden Tower

WANG Leilei^{1,2}, HAN Xiaofei^{1,2}

(1. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030021, China;
2. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan, Shanxi 030025, China)

Abstract: Yingxian wooden tower is the best existing wooden structure in our country, has very precious cultural properties. After thousands of years of wind and frost, the wooden tower has a certain degree of disease. To ensure that the wooden tower can be used normally under the influence of sudden earthquakes, it is necessary to strengthen and repair the wooden tower. In this paper, a three-dimensional model of Yingxian wooden tower is established by finite element method based on the characteristics of the whole structure, and the damage of the wooden tower under different earthquakes is analyzed. The results show that the upper part of the wooden tower structure belongs to the weak layer, and obvious damage occurs in the upper part of the tower under the action of large earthquake. According to the results of damage analysis, three different isolation combination schemes are designed to explore their isolation effects, and it is concluded that the isolation scheme has the best isolation effect.

Key words: three-dimensional model; yingxian wooden tower; high intensity earthquake; isolation scheme

基于VB语言的水位校测软件研发

王永杰,马磊,翟世恒,徐婉君,王兵,王莉

(开封市防震减灾救灾中心,河南 开封 475001)

摘要:根据地下流体水位观测学科规范和观测要求,对地下水位的校测运算过程进行剖析,运用数学方法将其进行公式化表示,使计算结果符合水位校测要求。同时采用VB编程语言,编写水位校测软件。该软件可协助实施校测数据计算、结果判断等复杂的逻辑运算任务,台站工作人员只需将校测数据正确录入,即可生成校测文档。校测软件基于VB平台开发,具备自主计算和反馈校验结果意见、产出水位校测报表的功能,以提升地下流体台站水位校测工作的高效性和便捷性。

关键词:水位校测;VB语言;计算机软件

中图分类号:P315.6-39

文献标志码:A

0 引言

随着地震前兆观测技术的进步,水位及水温观测站网的运行质量与监测效能备受中国地震台网中心地下流体学科组关注。依据《地震地下流体观测方法并水位观测》(DB/T 48-2012)地震行业标准要求^[1],根据《观测井水位校测与水温梯度测量要求》,有人值守台站需选取每月14至16日的一天时间进行校测,无人值守台站需在每季度相对固定的时间内完成校测。水位校测作为地下流体观测中的基础步骤,对观测仪器的稳定运行起到关键作用。在传统的水位校测过程中,存在诸如数据处理效率低、精度不足及报表格式不统一等问题。鉴于此,设计并研发高效、精准且稳定的水位校测软件,对提高水位观测运行的有效性和稳定性尤为必要。

本文介绍一种基于VB语言的水位校测软件开发方法。该软件具备数据录入、数据处理和校测结果显示及报表生成等多种功能,在VB编程语言及Microsoft Word工具的配合下,能够有效提升水位校测工作的数据精确度及处理效率,更好地满足用户需求。

1 水位校测计算过程

1.1 水位校测值计算

无论是静水位观测仪器还是动水位观测仪器,均采用测钟法、电极法、测压管法或高精度压力表法来获取水位校测值^[2],根据水位校测值与仪器显示水位值结果,计算两者的均值和误差值来判定仪器工作状态。校测要求规定需连续重复测量5次,读取水位校测值

$\{h_{1i}, i=1, 3, 2, 4, 5\}$ 和仪器显示水位值 $\{h_{2i}, i=1, 3, 2, 4, 5\}$,分别计算水位校测值和仪器显示水位值的平均值 $\overline{H_1}$ 和平均误差值 σ 。其中,水位校测值的平均误差值为:

$$\sigma_1 = \frac{\sum_{i=1}^5 |\overline{H_1} - h_{1i}|}{5}$$

式中: σ_1 为水位校测值平均误差值; $\overline{H_1}$ 为5次水位校测值的均值; h_{1i} ($i=1, 2, \dots, 5$)为5次水位校测值。

若水位校测的平均误差值小于误差阈值,则表示水位校测的平均误差值符合要求,实测结果正常;若不满足要求,需重新测量5次,直到满足要求为止。其中,误差阈值从表1中根据水位埋深范围取值。

1.2 观测误差值和观测误差判定值比对

当水位校测的平均误差值符合要求后,还需计算观测误差值 $\Delta H'$ 和观测误差判定值 ΔH 来判定仪器是否符合水位观测技术要求。观测误差值 $\Delta H'$ 为:

$$\Delta H' = \overline{H_1} - \overline{H_2}$$

式中: $\overline{H_1}$ 为水位校测值的平均值; $\overline{H_2}$ 为仪器显示水位值的平均值。

观测误差判定值 ΔH 计算如下:

$$\Delta H = \Delta h + |\sigma_1| + |\sigma_2|$$

式中: $\Delta h=0.2\%$ 水柱高度平均值+0.02; σ_1 为水位校测值平均误差值; σ_2 为仪器显示水位值平均误差值。

若观测误差值 $\Delta H'$ 小于或等于观测误差判定值 ΔH ,则表示仪器工作正常,校测合格;否则需送厂家重新标定。

表 1 水位校测值平均误差表

Table 1 Average error of water level calibration values

项目	静水位/m				动水位/m
	0~10	10~30	30~60	>60	
水位埋深	0~10	10~30	30~60	>60	/
误差阈值	0.005	0.010	0.015	0.02	0.005

校测完成后,按照《观测井水位校测与水温梯度测量要求》将数据及结论填写到水位校测样表中(见图 1)。

校测日期	年 月 日			传感器导压孔至基准面(点)的垂直距离/m					平均值	误差
	1	2	3	4	5	6	7			
井水位测量次数										
水位校测值 h_1/m										
观测 仪器	水柱高度 h_2									
	水位值 h_2/m									
1. 是否满足条件: $ \sigma_1 < \text{给定阈值}$ 2. 计算误差值: $\Delta H' = \bar{H}_1 - \bar{H}_2 =$ 3. 计算下列判定值: $\Delta h = 0.2\% \text{水柱高度的平均值} + 0.02 =$ $\Delta H = \Delta h + \sigma_1 + \sigma_2 =$ 4. 是否满足条件: $ \Delta H' \leq \Delta H$ *气压传感器 5. 校测结论 说明: \bar{H}_1 为校测值平均值, \bar{H}_2 为仪器测值平均值 σ_1 —校测值平均误差; σ_2 —观测仪器测值平均误差; Δh —仪器最大允许误差										
校测人:	校核人:	台站技术人员:								

图 1 水位校测样表

Fig. 1 Water level calibration sample table

2 水位校测软件的设计与开发

2.1 软件设计

根据上述计算原理及水位校测的有关设计技术规范,编制水位校测计算软件,图 2 为水位校测软件设计流程图。

软件的编制语言采用微软的 Net Framework4.0 框架及稳定的编程环境 Visual Studio 2010^[3],能够完全兼容 WindowsXP/ Windows7/Windows10 等多元化操作系统。

本软件使用标准的 Windows 窗体技术,应用其主程序中的图形用户界面(GUI)及鼠标、键盘的交互控制能力,以加快数据的输入和输出速度。同时,利用 VB 程序提供的各类控件,如标签、按钮、文本框等,使用户操作更具便捷性。此外,可视化编排界面使界面设计更快捷,VB 强大的调试工具和测试工具,有助于快速定位和修复程序中存在的错误,确保程序的稳定

性和安全性。基于此,选择 VB 语言作为主要的开发语言。



图 2 软件设计流程图

Fig. 2 Software design flowchart

2.2 软件开发

软件主界面主要采用标签、文本框及按钮等控件构成,界面设计简单、直观。图 3 为水位校测软件程序界面。

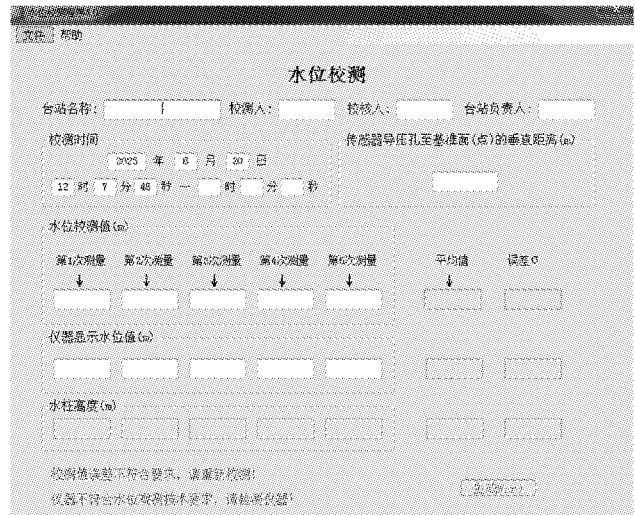


图 3 软件程序界面

Fig. 3 Software program interface

软件架构采用面向对象的编程理念,以模块化组织完成。软件主要分为三大模块:数据采集模块(收集基础信息)、数据处理模块(进行数值运算)及校测结果显示模块(展示结果和得出结论)。

(1) 数据采集模块。

该模块负责基础信息采集,主要包括台站名称、人员姓名、校测时间等。软件将基础信息数据保存在 VB 字符串变量中,不参与运算,只在导出报表时使用。

(2) 数据处理模块。

该模块承担对采集到水位数据的处理任务。经过平均值、误差值及水柱高度值等多项处理,得出校测结果和误差值。

在数据输入过程中,由文本框的 TextChanged() 事件驱动计算,使计算和结果同步更新,确保软件界面实时反馈结果。

另外,在已知条件的输入部分,软件还具有一定的

智能容错功能,对数字文本框添加限制^[4]。如,对数字文本框设置为可接受数字与非数字且能自动过滤无效数据,以实现人工智能容错功能。

(3) 校测结果显示模块。

该模块用于将校测结果以可视化的方式呈现出来,运用文字提示方式展现水位校测结论,同时将结果导出至 Word 文档。

由于软件使用对 Word 文档的编辑操作,在构建过程中引入 Microsoft Word 12.0 Object Library 的 Office 类库。建立 Word 模板,并在指定位置添加书签项,在报表生成过程中,利用 VB 的 Bookmarks() 指令完成数据替换^[5],最终生成如图 4 所示的水位校测记录报表。

校测日期		2015年3月15日 10:22:11-11:49:22		传感器导压孔至基准面(点) 的垂直距离 /m			26.6	
井水位测量次数		1	2	3	4	5	平均值 \bar{H}	误差 σ
水位校测值 h_i/m		20.960	20.961	20.960	20.961	20.961	20.9606	0.0005
观测 仪器	水柱高度 m	5.6552	5.6553	5.6555	5.6551	5.6552	5.6553	0.0002
	水位值 h_i/m	20.9445	20.9444	20.9445	20.9449	20.9448	20.9447	0.0002
说明: 1. 校测值误差 $ \sigma_i = 0.0005 < 0.01m$ - 校测误差符合要求 2. 计算观测误差值: $\Delta H' = \bar{H}_1 - \bar{H}_2 = 20.9606 - 20.9447 = 0.0159m$ 3. 计算观测误差判定值: 公式: $\Delta H = \Delta h + \sigma_i + \sigma_j $ $\Delta h = 0.2\% \times \text{水柱高度平均值} + 0.02 = 0.2\% \times 5.6553 + 0.02 = 0.011 + 0.02 = 0.031m$ $\Delta H = 0.031 + 0.0005 + 0.0002 = 0.0317m$ 4. 结果判定: $ \Delta H' < \Delta H$ 5. 校测结论: (1) $ \sigma_i = 0.0005 < 0.01$, 校测误差符合规范要求。 (2) $ \Delta H' = 0.0159 < \Delta H = 0.0317$, 仪器正常, 校测合格。 说明: \bar{H}_1 为校测值平均值, \bar{H}_2 为仪器测值平均值 σ_i - 校测值平均误差; σ_j - 观测仪器测值平均误差; Δh - 仪器最大允许误差 校测人: XX 校核人: XXX 台站技术负责人: XX								

图 4 水位校测记录报表

Fig. 4 Water level calibration record report

Development of Water Level Calibration Software Based on VB Language

WANG Yongjie, MA Lei, ZHAI Shiheng, XU Wanjun, WANG Bing, WANG Li

(Kaifeng Earthquake Prevention, Disaster Reduction and Relief Center, Kaifeng, Henan 475001, China)

Abstract: Based on the discipline norms and observation requirements of groundwater level observation, this paper analyzes the calibration calculation process of groundwater level, and uses mathematical methods to formalize it, so that the calculation results meet the requirements of water level calibration. At the same time, VB (Visual Basic) programming language is used to write water level calibration software. This software can assist in implementing complex logical operations such as calibration data calculation and re-

3 软件测试

为验证该软件的性能和稳定性,经过反复测试与调试后,在河南省内各流体台站推广使用。测试结果表明,该软件能满足水位校测需求,具有较强的稳定性;在处理大批量数据时,运行速度快,得出的校测结果精确;在用户体验调研测试得出的结论显示,该软件的操作模式简单、界面设计美观实用,易于校测人员快速掌握并灵活运用。

4 结论与讨论

本文介绍一种基于 VB 语言的水位校测软件开发方法,该软件在研发之初便注重提升水位校测工作的安全性与稳定性,同时运用先进的面向对象编程理念来提升数据处理速度及效果。通过测试和应用,验证该软件具有高效能、高稳定性等特性。今后,可以考虑增加以下三方面的功能,以提高软件的可靠性与可操作性,增强实用性。

(1) 实时监控功能。添加实时监控功能,具备实时记录水位数据并在程序界面中加以展示,便于用户及时掌握水位变化趋势,及早做出相应的应对措施。

(2) 异常处理功能。增加异常处理功能,当软件系统出现异常情况时,能够及时进行报警提醒或自动解决,确保软件的稳定运行。

(3) 云端存储和数据共享功能。把软件与云端存储技术有机融合,使各项数据得以安全存储于云端服务器,为用户提供随时随地查看和分享数据的便利条件,提升工作效率与管理水平。

参考文献:

- [1] 全国地震标准化技术委员会. DB/T 48-2012 地震地下流体观测方法井水位观测[S]. 北京:地震出版社,2012.
- [2] 刘春国,孔令昌,杨竹转,等. 我国地震井水位观测网监测效能评估[J]. 中国地震,2015,31(2):329-336.
- [3] 高璐,马玉志. 浅谈 Microsoft Visual Studio 2010 新特性[J]. 黑龙江科技信息,2010(32):96.
- [4] 李蓓蓓. C# 的 Windows 应用程序中验证用户输入[J]. 计算机与网络,2006(21):88-90.
- [5] 张青晖. VB 对 WORD 97 中书签的编程[J]. 电脑编程技巧与维护,2000(9):21-23.

sult judgment. Station staff only need to correctly input calibration data to generate calibration documents. The calibration software is developed based on the VB platform and has the function of independently calculating and providing feedback on verification results and opinions, as well as producing water level calibration reports. It provides efficient and convenient operation for water level calibration of underground fluid stations.

Key words: water level calibration; VB programming language; computer software

(上接第26页)

经过雷击及维修后参数变化有关。

(2) 从观测环境、供电防雷系统、仪器性能、人为干扰等方面对背景噪声影响因素排查表明,地磁观测环境良好,观测设施正常,测点周边无显著干扰源,梯度复测结果符合规范,具有开展地磁绝对、相对观测的有利条件,地磁仪背景噪声过大及频繁故障死机的主要原因为网络通信工控机系统故障、仪器运行时间过长和内部性能下降。

(3) 永安台更新 dIdD 矢量磁力仪至今,仪器运行稳定,背景噪声达标,地磁观测质量得到有效提升。

参考文献:

- [1] 林苗禄,方传极,梁凯,等. 邵武台 FHD-2B 磁力仪性能综合分析经验点滴[J]. 地震科学进展, 2022, 52(12): 574-580.
- [2] 王斌,梁雪萍,周健,等. 江苏盐城地震台新台地磁 FHD 运行质量分析[J]. 山西地震, 2014(2): 8-10.
- [3] 胡秀娟,张素琴,何宇飞,等. 地磁观测参考背景噪声分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(增刊 1): 124-129.
- [4] 纪加迎,夏忠,杨冯威,等. FHD 质子磁力仪观测数据噪

声的影响因素及对策[J]. 地震地磁观测与研究, 2011, 32(增刊 1): 18-23.

- [5] 孙雷,立凯,曾智. 连云港地震台 FHD 观测精度影响因素及解决方案[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(增刊 1): 149-153.
- [6] 何宇飞,赵旭东,杨冬梅,等. 地磁观测台网参考背景噪声指标及应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(4): 65-73.
- [7] 夏忠,稽才建,冯志生,等. 数字化选频与自动跟踪技术在分量核旋仪中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(2): 87-90.
- [8] 居海华,夏忠. FHD-2B 分量质子磁力仪维护技术[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(5/6): 135-141.
- [9] 李庆武,胡秀娟,张玉林,等. 丰宁台 FHD 仪背景噪声减小措施分析[J]. 山西地震, 2019(4): 48-51.
- [10] 邹广,高守全,赵刚,等. 温泉台 FHD-2B 质子磁力仪资料干扰分析[J]. 内陆地震, 2015, 29(4): 371-377.
- [11] 彭玉柱,何宇飞,夏忠,等. 温度对 FHD 磁力仪观测数据噪声影响[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(2): 103-107.
- [12] 夏忠,稽才建,冯志生,等. FHD 分量核旋仪观测系统的抗干扰技术[J]. 地震研究, 2005, 28(1): 102-107.

Analysis of Influencing Factors on Background Noise of Yong'an Magnetometer

LIU Shuilian¹, LIU Suyun¹, GONG Wei², CHEN Junfeng³

(1. Longyan Earthquake Monitoring Center Station, Longyan 364000, Fujian, China; 2. Nanping Earthquake Monitoring Center Station, Nanping 353000, Fujian, China; 3. Quanzhou Earthquake Monitoring Center Station, Quanzhou 362000, Fujian, China)

Abstract: This paper investigates and analyzes the main factors that affect the unexplained crash and background noise of Yong'an Station FHD-2B instrument from the aspects of observation environment, technical system, observation instrument and human noise. The results show that the observation environment of Yong'an Station is good and the gradient meets the requirements. The main reasons for excessive background noise and unexplained crash of the geomagnetic instrument are the long running time of the instrument and the deterioration of internal performance. After the transformation of the industrial computer, the failure rate is greatly reduced, and the data noise is also greatly improved after the update of the instrument, which effectively improves the maintenance experience and observation data quality of Yong'an geomagnetic instrument and provides reference for the observation and maintenance of the station.

Key words: geomagnetic observation; background noise; instrument modification

《山西地震》2024 年第 1 期~4 期(总第 197 期~200 期)总目次

目 录	作 者	期 页
· 地震活动性 ·		
邢台震区应力场特征及 $M_L 3.5$ 以上地震的发震背景分析	章 阳,董 博,王 时	1 (5)
利用初至震相定位法测定 2013 年辽宁灯塔 $M_S 5.1$ 地震震源深度	戴盈磊,张欣然,孔祥雪,田雨佳,王姝婷	1 (10)
新疆中强地震前震频谱偏移特征分析	李 奎,张青远,刘立夏,毛玉剑,张 峰,周 静	1 (17)
川滇地区地震动预测模型研究	雷德明,彭海斌,宋庆辉,邹育麟,栗怀广	2 (1)
抛掷爆破当量与震级对应关系及波形特征研究	郭 伟,刘 芳,范玲玲	4 (11)
· 地震地质 ·		
运城盆地相关块体运动学特征初步研究	郭春杉,李文巧,闫小兵	4 (1)
· 观测分析 ·		
马鞍山皖 27 井数字化水位观测资料分析与效能评估	袁鸣望,王 俊,刘园园	1 (23)
昌黎台地磁观测 Z 分量秒值受电气化铁路影响的分析	佟 鑫,张国苓,郭建芳,周剑青,殷金平	1 (29)
易县地震台伸缩仪 NE 分量异常分析	屈 曼,侯晓真,马 栋,高 晨,张 娜,龚燕民	1 (33)
用不同方法评估山西地震台网的监测能力	梁向军,吴叔坤,王 霞,刘林飞	1 (38)
承德地区摆式仪器观测背景功率谱密度特征分析	周 硕,王嘉琦,王向亮,李明威	1 (44)
降雨对宝昌台地电阻率观测的影响	贾彦杰,贾昕晔,白少奇,高云峰,闫纪文	1 (51)
介休井水位异常变化特征分析	李 艳,吕 芳,王 霞,赵 凯,穆慧敏	2 (7)
宽城台体应变更换探头前后观测资料对比分析	王嘉琦,王晓霞,夏英培,杨东辉,袁国旭	2 (14)
夏县断层气氢高值异常探讨	常 姣,杨 静,黄春玲	2 (19)
榆树沟洞体应变观测质量及干扰因素浅析	毛玉剑,翟世龙,李 奎,贾 路,木拉提江·阿不来提	2 (25)
中条山断裂带痕量氢观测网建设及观测现状	黄春玲,李 芸,穆慧敏,闫亚荣	2 (32)
山西预警台网监测能力及预警能力研究	刘 炜,梁 艳,吕飞亚,李 晨	3 (1)
山西阳高 $M_{3.9}$ 地震预警系统未触发台站的检测分析	李 晨,梁永烨,陈永新,刘 炜,冯凯宇	3 (9)
2023 年山西清徐 $M_{3.7}$ 地震预警处理结果分析	冯凯宇,梁永烨,吕 睿,刘雪娇,窦立婷	3 (15)
山西地震预警站网数据质量评估	丁大业,宫卓宏,徐 博,张文璇	3 (21)
大同、朔州地震预警基准、基本站运行质量分析	李文超,殷 锴,刘 炜,陈永新,王天琦,张子俊	3 (28)
腾冲站垂直摆倾斜仪观测质量及同震响应分析	番绍辉,张山元,熊家伟,周克鹏	4 (16)
永安台地磁仪背景噪声影响因素分析	刘水莲,刘憬昀,龚 薇,陈俊峰	4 (21)
山西陵川台钻孔应变降雨干扰特征定量分析	魏凯艳,陈 慧,李 颖,李惠玲,陈永前	4 (27)
· 技术交流 ·		
基于震后舆情的灾情信息提取研究	闫晓美,牛艳杰,王 宁,许振鹏	1 (1)
山西防震减灾媒体文件管理系统设计与实现	兰思莹,许振鹏,谷利国,刘俊芳,闫远芳,王 宁	2 (38)
地震流体观测井防止积水倒灌装置的研究与应用	马 永,东得森,孟敬贤	2 (44)
地震系统政务信息中的风险内容探析	王 宁,闫晓美,张瑞芳,许振鹏	2 (48)

山西预警台站信息管理系统的设计与开发 吕飞亚,梁 艳,刘 炜,宫卓宏 3 (35)

预警基本二类站观测设备问题诊断与排除 刘国俊,李晓锐,刘焱坤,姚林鹏,李 芸 3 (39)

山西省地震预警区域网的运行与分析 刘俊芳,谷利国,陈存田,张甲瑞,高 翔 3 (43)

临汾地球物理站网故障分析及运维建议 张聪聪,张红秀 4 (46)

基于 VB 语言的水位校测软件研发 王永杰,马 磊,翟世恒,徐婉君,王 兵,王 莉 4 (53)

· 工作论坛 ·

国家重点建设项目档案管理研究——以国家地震烈度速报与预警工程山西子项目为例
..... 许振鹏,张瑞芳,刘敏娟,李媛媛,张正霞 3 (48)

校园地震预警科普宣传现状及展望 兰思莹,张瑞芳,陈存田,徐 博,张馨怡 3 (51)

· 防震减灾 ·

四川绵阳农村地区防震减灾能力调研 龚 康,唐悦洋,李国超,李贵元,张 映 2 (53)

· 工程抗震 ·

基于应县木塔的地震易损性分析及隔震性能研究 王雷雷,韩晓飞 4 (33)

EEMD 模态分解算法在振动数据噪声抑制中的应用 李宏伟,曾金艳,任瑞国 4 (40)

· 来稿须知 · 《山西地震》编辑部 3 (56)

Composite Catalogue of EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI

(No. 1~4, 2024, Sum No. 197~200)

· Seismicity ·

Analysis of the Stress Field Characteristics in the Xingtai Seismic Region and the Seismogenic Background of Earthquakes with Magnitudes above $M_L 3.5$ ZHANG Yang, DONG Bo, WANG Shi 1 (5)

Determination of the Focal Depth of the 2013 Liaoning Dengta $M_S 5.1$ Earthquake Using the First-Arrival Seismophase Location Method DAI Yinglei, ZHANG Xinran, KONG Xiangxue, TIAN Yujia, WANG Shuting 1 (10)

Analysis of Spectral Shift Characteristics of Foreshocks before Strong Earthquakes in Xinjiang Region
..... LI Kui, ZHANG Qingyuan, LIU Lixia, MAO Yujian, ZHANG Feng, ZHOU Jing 1 (17)

Research on Earthquake Motion Prediction Models in the Sichuan-Yunnan Region of China
..... LEI Deming, PENG Haibin, LAI Qinghui, ZOU Yulin, LI Huaiguang 2 (1)

Research on the Correspondence between Throwing Blasting Equivalent and Earthquake Magnitude, as well as Waveform Characteristics——Taking the Heidaigou Open-pit Coal Mine as an Example GUO Wei, LIU Fang, FAN Lingling 4 (11)

· Earthquake Geology ·

Preliminary Study on Kinematic Characteristics of Related Blocks in Yuncheng Basin
..... GUO Chunshan, LI Wenqiao, YAN Xiaobing 4 (1)

· Observation and Analysis ·

Analysis and Efficacy Evaluation of Digital Water Level Observation Data from Ma'anshan Well No. 27 in Anhui Province
..... YUAN Mingwang, WANG Jun, LIU Yuanyuan 1 (23)

Analysis of the Influence of Electrified Railways on the Second Value of Z-component in Geomagnetic Observation at Changli Station	TONG Xin,ZHANG Guoling, GUO Jianfang,ZHOU Jianqing, YIN Jinping	1 (29)
Analysis of Anomalies in the NE Component of the Extensometer at the Yixian Seismic Station	QU Man,HOU Xiaozhen,MA Dong,GAO Chen,ZHANG Na,GONG Yanmin	1 (33)
Evaluating the Monitoring Capability of the Shanxi Seismic Network Using Different Methods	LIANG Xiangjun,WU Shukun,WANG Xia,LIU Linfei	1 (38)
Analysis of Background Power Spectral Density Characteristics of Pendulum Instruments in the Chengde Area	ZHOU Shuo,WANG Jiaqi,WANG Xiangliang,LI Mingwei	1 (44)
The Impact of Rainfall on the Earth's Resistivity Observations at Baochang Platform	JIA Yanjie,JIA Xinye,BAI Shaoqi,GAO Yunfeng,YAN Jiwen	1 (51)
Study on the Characteristics of Abnormal Water Level Changes in Jiexiu Well	LI Yan,LYU Fang,WANG Xia,ZHAO Kai,MU Huimin	2 (7)
Comparative Analysis of Observational Data Before and After the Replacement of the Strain Probe at Kuancheng Station	WANG Jiaqi,WANG Xiaoxia,XIA Yingpei,YANG Donghui,YUAN Guoxu	2 (14)
Exploration of High Hydrogen Anomaly in Fault Gas of Xia County	CHANG Jiao,YANG Jing,HUANG Chunling	2 (19)
Analysis of the Quality and Interference Factors of Strain Observation in Yushugou Cave	MAO Yujian,ZHAI Shilong,LI Kui,JIA Lu,Mulatijiang Abulaiti	2 (25)
Construction and Current Status of the Trace Hydrogen Observation Network in the Zhongtiao Mountains Fault Zone	HUANG Chunling,LI Yun,MU Huimin,YAN Yarong	2 (32)
Research on the Monitoring and Early Warning Capability of Shanxi Earthquake Early Warning Network	LIU Wei,LIANG Yan,LV Feiya,LI Chen	3 (1)
Analysis of the Reasons for the Failure to Trigger Stations in the Shanxi Yanggao M3.9 Earthquake Early Warning System	LI Chen,LIANG Yongye,CHEN Yongxin,LIU Wei,FENG Kaiyu	3 (9)
Analysis of the Early Warning Processing Results for the 2023 Qingxu M3.7 Earthquake in Shanxi Province	FENG Kaiyu,LIANG Yongye,LV Rui,LIU Xuejiao,DOU Liting	3 (15)
Data Quality Assessment of Shanxi Earthquake Early Warning Station Network	DING Daye,GONG Zhuohong,XU Bo,ZHANG Wenying	3 (21)
Analysis of the Operation Quality of Datong and Shuozhou Earthquake Warning Standards and Basic Stations	LI Wenchao,YIN Kai,LIU Wei,CHEN Yongxin,WANG Tianqi,ZHANG Zijun	3 (28)
Analysis of Observation Quality and Co-seismic Response of Tengchong Vertical Pendulum Inclinometer	FAN Shaohui,ZHANG Shanyuan,XIONG Jiawei,ZHOU Kepeng	4 (16)
Analysis of Influencing Factors on Background Noise of Yong'an Magnetometer	LIU Shuilian,LIU Suyun,GONG Wei,CHEN Junfeng	4 (21)

Quantitative Analysis of Borehole Strain Rainfall Disturbance Characteristics at Lingchuan Station, Shanxi
 WEI Kaiyan, CHEN Hui, LI Ying, LI Huiling, CHEN Yongqian 4 (27)

• Academic Exchange •

Research on Disaster Information Extraction Based on Post-Earthquake Public Sentiment
 YAN Xiaomei, NIU Yanjie, WANG Ning, XU Zhenpeng 1 (1)

Design and Implementation of Shanxi Earthquake Prevention and Disaster Reduction Media File Management System
 LAN Sixuan, XU Zhenpeng, GU Ligu, LIU Junfang, YAN Yuanfang, WANG Ning 2 (38)

Research and Application of a Device for Preventing Water Backflow in Seismic Fluid Observation Wells
 MA Yong, DONG Demiao, MENG Jingxian 2 (44)

Analysis of Risk Content in Earthquake System Government Information
 WANG Ning, YAN Xiaomei, ZHANG Ruifang, XU Zhenpeng 2 (48)

Design and Development of Shanxi Early Warning Station Information Management System
 LV Feiya, LIANG Yan, LIU Wei, GONG Zhuohong 3 (35)

Diagnosis and Elimination of Observation Equipment Problems in Basic Second-class Warning Stations
 LIU Guojun, LI Xiaorui, LIU Yaokun, YAO Linpeng, LI Yun 3 (39)

Operation and Analysis of Shanxi Earthquake Early Warning Regional Network
 LIU Junfang, GU Ligu, CHEN Cuntian, ZHANG Jiarui, GAO Xiang 3 (43)

Analysis and Suggestions for Faulty Operation and Maintenance of Linfen Geophysical Station Network
 ZHANG Congcong, ZHANG Hongxiu 4 (46)

Development of Water Level Calibration Software Based on VB Language
 WANG Yongjie, MA Lei, ZHAI Shiheng, XU Wanjuan, WANG Bing, WANG Li 4 (53)

• Work Forum •

Research on Archive Management of National Key Construction Projects—Taking the Shanxi Sub Project of the National Earth-
 quake Intensity Rapid Reporting and Early Warning Engineering as an Example
 XU Zhenpeng, ZHANG Ruifang, LIU Minjuan, LI Yuanyuan, ZHANG Zhengxia 3 (48)

Current Situation and Prospects of Campus Earthquake Warning Science Popularization and Publicity
 LAN Sixuan, ZHANG Ruifang, CHEN Cuntian, XU Bo, ZHANG Xinyi 3 (51)

• Seismic Disaster Prevention and Mitigation •

Research on Earthquake Prevention and Disaster Reduction Capabilities in Rural Areas of Mianyang, Sichuan
 GONG Kang, TANG Yueyang, LI Guochao, LI Guiyuan, ZHANG Ying 2 (53)

• Antiseismic Engineering •

Seismic Vulnerability Analysis and Seismic Isolation Performance Research Based on Yingxian Wooden Tower
 WANG Leilei, HAN Xiaofei 4 (33)

Application of EEMD Modal Decomposition Algorithm in Noise Suppression of Vibration Data
 LI Hongwei, ZENG Jinyan, REN Ruiguo 4 (40)

• Requirements for Paper • Editorial Office of “EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI” 3 (56)

《山西地震》2024年第1期~4期(总第197期~200期)作者索引

作者索引以作者姓之汉语拼音为序,英文以字母顺序为序。①:表示第1作者,(1):表示期,1:表示页次。

- B** ③.(2):38 李明威④.(1):44 马 栋③.(1):33 王嘉琦①.(2):14 殷金平⑤.(1):29
白少奇③.(1):51 郭 伟①.(4):11 李文超①.(3):28 马 磊②.(4):53 ②.(1):44 袁国旭⑤.(2):14
- C** 郭春杉①.(4):1 李文巧②.(4):1 马 永①.(2):44 王雷雷①.(4):33 袁鸣望①.(1):23
常 姣①.(2):19 郭建芳③.(1):29 李晓锐②.(3):39 毛玉剑①.(2):25 王姝婷⑤.(1):10
陈 慧②.(4):27 **H** 李媛媛④.(3):48 ④.(1):17 王天琦⑤.(3):28 曾金艳②.(4):40
陈存田③.(3):43 韩晓飞②.(4):33 栗怀广⑤.(2):1 孟敬贤③.(2):44 王向亮③.(1):44 翟世恒③.(4):53
③.(3):51 侯晓真②.(1):33 梁 艳②.(3):1 木拉提江·阿不来 王晓霞②.(2):14 翟世龙②.(2):25
陈俊峰④.(4):21 黄春玲①.(2):32 ②.(3):35 提⑤.(2):25 王永杰①.(4):53 张 峰⑤.(1):17
陈永前⑤.(4):27 ③.(2):19 梁向军①.(1):38 穆慧敏③.(2):32 魏凯艳①.(4):27 张 娜⑤.(1):33
陈永新③.(3):9 **J** 梁永焯②.(3):15 ⑤.(2):7 吴叔坤②.(1):38 张 映⑤.(2):53
④.(3):28 贾 路④.(2):25 ②.(3):9 **N** **X** 张聪聪①.(4):46
D 贾昕晔②.(1):51 刘 芳②.(4):11 牛艳杰②.(1):1 夏英培③.(2):14 张国苓②.(1):29
戴盈磊①.(1):10 贾彦杰①.(1):51 刘 炜①.(3):1 **P** 熊家伟③.(4):16 张红秀②.(4):46
丁大业①.(3):21 **K** ③.(3):28 彭海斌②.(2):1 徐 博③.(3):21 张甲瑞④.(3):43
东得森②.(2):44 孔祥雪③.(1):10 ③.(3):35 **Q** ④.(3):51 张青远②.(1):17
董 博②.(1):5 **L** ④.(3):9 屈 曼①.(1):33 徐婉君④.(4):53 张瑞芳②.(3):48
窦立婷⑤.(3):15 来庆辉③.(2):1 刘国俊①.(3):39 **R** 许振鹏①.(3):48 ②.(3):51
F 兰思萱①.(2):38 刘俊芳①.(3):43 任瑞国③.(4):40 ②.(2):38 ③.(2):48
番绍辉①.(4):16 ①.(3):51 ④.(2):38 **T** ④.(1):1 张山元②.(4):16
范玲玲③.(4):11 雷德明①.(2):1 刘立霞③.(1):17 唐悦洋②.(2):53 ④.(2):48 张文瑛④.(3):21
冯凯宇①.(3):15 李 晨①.(3):9 刘林飞④.(1):38 田雨佳④.(1):10 田 鑫①.(1):29 **Y** 张欣然②.(1):10
⑤.(3):9 ④.(3):1 刘敏娟③.(3):48 佟 鑫①.(1):29 闫纪文⑤.(1):51 张馨怡⑤.(3):51
G 李 奎①.(1):17 刘水莲①.(4):21 **W** 闫小兵③.(4):1 张正霞⑤.(3):48
高 晨④.(1):33 ③.(2):25 刘懋昀②.(4):21 王 兵⑤.(4):53 闫晓美①.(1):1 张子俊⑥.(3):28
高 翔⑤.(3):43 李 艳①.(2):7 刘雪娇④.(3):15 王 俊②.(1):23 ②.(2):48 章 阳①.(1):5
高云峰④.(1):51 李 颖③.(4):27 刘垚坤③.(3):39 王 莉⑥.(4):53 闫亚荣④.(2):32 赵 凯④.(2):7
宫卓宏②.(3):21 李 芸②.(2):32 刘园园③.(1):23 王 宁①.(2):48 闫远芳⑤.(2):38 周 静⑥.(1):17
④.(3):35 ⑤.(3):39 吕 芳②.(2):7 ③.(1):1 杨 静②.(2):19 周 硕①.(1):44
龚 康①.(2):53 李贵元④.(2):53 吕 睿③.(3):15 ⑥.(2):38 杨东辉④.(2):14 周剑青④.(1):29
龚 薇③.(4):21 李国超③.(2):53 吕飞亚①.(3):35 王 时③.(1):5 姚林鹏④.(3):39 周克鹏④.(4):16
龚燕民⑥.(1):33 李宏伟①.(4):40 ③.(3):1 王 霞③.(1):38 殷 锴②.(3):28 邹育麟④.(2):1
谷利国②.(3):43 李惠玲④.(4):27 **M** ③.(2):7

Author Index of EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI (No. 1~4, 2024, Sum No. 197~200)

- B**
 BAI Shaoqi③. (1):51
- C**
 CHANG Jiao①. (2):19
 CHEN Cuntian③. (3):43;
 ③. (3):51
 CHEN Hui②. (4):27
 CHEN Junfeng④. (4):21
 CHEN Yongqian⑤. (4):27
 CHEN Yongxin③. (3):9;
 ④. (3):28
- D**
 DAI Yinglei①. (1):10
 DING Daye①. (3):21
 DONG Bo②. (1):5
 DONG Demiao②. (2):44
 DOU Liting⑤. (3):15
- F**
 FAN Lingling③. (4):11
 FAN Shaohui①. (4):16
 FENG Kaiyu①. (3):15;
 ⑤. (3):9
- G**
 GAO Chen④. (1):33
 GAO Xiang⑤. (3):43
 GAO Yunfeng④. (1):51
 GONG Kang①. (2):53
 GONG Wei③. (4):21
 GONG Yanmin⑥. (1):33
 GONG Zhuohong
 ②. (3):21;④. (3):35
 GU Ligu②. (3):43;
 ③. (2):38
 GUO Chunshan①. (4):1
 GUO Jianfang③. (1):29
 GUO Wei①. (4):11
- H**
 HAN Xiaofei②. (4):33
- HOU Xiaozhen②. (1):33
 HUANG Chunling
 ①. (2):32;③. (2):19
- J**
 JIA Lu④. (2):25
 JIA Xinye②. (1):51
 JIA Yanjie①. (1):51
- K**
 KONG Xiangxue③. (1):10
- L**
 LAI Qinghui③. (2):1
 LAN Sixuan①. (2):38;
 ①. (3):51
 LEI Deming①. (2):1
 LI Chen ①. (3):9;
 ④. (3):1
 LI Guiyuan④. (2):53
 LI Guochao③. (2):53
 LI Hongwei①. (4):40
 LI Huaiguang⑤. (2):1
 LI Huiling④. (4):27
 LI Kui ①. (1):17;
 ③. (2):25
 LI Mingwei④. (1):44
 LI Wenchao①. (3):28
 LI Wenqiao②. (4):1
 LI Xiaorui②. (3):39
 LI Yan①. (2):7
 LI Ying③. (4):27
 LI Yuanyuan④. (3):48
 LI Yun ②. (2):32;
 ⑤. (3):39
 LIANG Xiangjun①. (1):38
 LIANG Yan②. (3):1;
 ②. (3):35
 LIANG Yongye②. (3):15;
 ②. (3):9
 LIU Fang②. (4):11
- LIU Guojun①. (3):39
 LIU Junfang①. (3):43;
 ④. (2):38
 LIU Linfei④. (1):38
 LIU Lixia③. (1):17
 LIU Minjuan③. (3):48
 LIU Wei ①. (3):1;
 ③. (3):28;③. (3):35;
 ④. (3):9
 LIU Shuilian①. (4):21
 LIU Suyun②. (4):21
 LIU Xuejiao④. (3):15
 LIU Yaokun③. (3):39
 LIU Yuanyuan③. (1):23
 LV Fang②. (2):7
 LV Feiya ①. (3):35;
 ③. (3):1
 LV Rui③. (3):15
- M**
 MA Dong③. (1):33
 MA Lei②. (4):53
 MA Yong①. (2):44
 MAO Yujian①. (2):25;
 ④. (1):17
 MENG Jingxian③. (2):44
 MU Huimin③. (2):32;
 ⑤. (2):7
 Mulatijiang Abulaiti
 ⑤. (2):25
- N**
 NIU Yanjie②. (1):1
- P**
 PENG Haibin②. (2):1
- Q**
 QU Man①. (1):33
- R**
 REN Ruiguo③. (4):40
- T**
 TANG Yueyang②. (2):53
 TIAN Yujia④. (1):10
 TONG Xin①. (1):29
- W**
 WANG Bing⑤. (4):53
 WANG Jiaqi①. (2):14;
 ②. (1):44
 WANG Jun②. (1):23
 WANG Leilei①. (4):33
 WANG Li⑥. (4):53
 WANG Ning①. (2):48;
 ③. (1):1;⑥. (2):38
 WANG Shi③. (1):5
 WANG Shuting⑤. (1):10
 WANG Tianqi⑤. (3):28
 WANG Xia③. (1):38;
 ③. (2):7
 WANG Xiangliang
 ③. (1):44
 WANG Xiaoxia②. (2):14
 WANG Yongjie①. (4):53
 WEI Kaiyan①. (4):27
 WU Shukun②. (1):38
- X**
 XIA Yingpei③. (2):14
 XIONG Jiawei③. (4):16
 XU Bo ③. (3):21;
 ④. (3):51
 XU Wanjun④. (4):53
 XU Zhenpeng①. (3):48;
 ②. (2):38;④. (1):1;
 ④. (2):48
- Y**
 YAN Jiwen⑤. (1):51
 YAN Xiaobing③. (4):1
 YAN Xiaomei①. (1):1;
 ②. (2):48
 YAN Yarong④. (2):32
- YAN Yuanfang⑤. (2):38
 YANG Donghui④. (2):14
 YANG Jing②. (2):19
 YAO Linpeng④. (3):39
 YIN Jinping⑤. (1):29
 YIN Kai②. (3):28
 YUAN Guoxu⑤. (2):14
 YUAN Mingwang①. (1):23
- Z**
 ZENG Jinyan②. (4):40
 ZHAI Shiheng③. (4):53
 ZHAI Shilong②. (2):25
 ZHANG Congcong
 ①. (4):46
 ZHANG Feng⑤. (1):17
 ZHANG Guoling②. (1):29
 ZHANG Hongxiu②. (4):46
 ZHANG Jiarui④. (3):43
 ZHANG Na⑤. (1):33
 ZHANG Qingyuan
 ②. (1):17
 ZHANG Ruifang②. (3):48;
 ②. (3):51;③. (2):48
 ZHANG Shanyuan
 ②. (4):16
 ZHANG Wenying④. (3):21
 ZHANG Xinran②. (1):10
 ZHANG Xinyi⑤. (3):51
 ZHANG Yang①. (1):5
 ZHANG Ying⑤. (2):53
 ZHANG Zhengxia⑤. (3):48
 ZHANG Zijun⑥. (3):28
 ZHAO Kai④. (2):7
 ZHOU Jianqing④. (1):29
 ZHOU Jing⑥. (1):17
 ZHOU Kepeng④. (4):16
 ZHOU Shuo①. (1):44
 ZOU Yulin④. (2):1

《山西地震》2024 年第 1 期~4 期(总第 197 期~200 期)主题词索引

主题词索引以汉语拼音为序。(1):表示期,1:表示页数。

C	(4):21	环境干扰(2):44	S	T	应力场(1):5
残差(2):1	地电阻率(1):51	J	三维立体模型	体应变(2):14	Z
潮汐因子(1):33;	G	降雨干扰(4):27	(4):33	Y	震级(4):11
(2):14	干扰(1):29;(2):7	井水位(2):7	数据分析(2):32;	异常(1):33;(2):7;	震源机制解(2):19
D	干扰因素(2):25	Q	(2):44	(2):19	震源深度(1):10
地磁观测(1):29;	H	前震(1):17	水位校测(4):53	异常识别(4):27	中强地震(1):17

Key Word Index of EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI (No. 1~4, 2024, Sum No. 197~200)

A	estimation(4):11	G	earthquakes(1):17	T
abnormal(2):19	environmental inter-	geomagnetic observation	R	three-dimensional model
anomaly recognition(4):27	ence(2):44	(1):29;(4):21	rainfall disturbance(4):27	(4):33
anomaly(1):33;(2):7	F	I	residual(2):1	tidal factor(1):33;(2):14
D	focal depth(1):10	interference factor(2):25	resistivity(1):51	W
data analysis(2):32;(2):44	focal mechanism solu-	interference(1):29;(2):7	S	water level calibration
E	tion(2):19	M	strain(2):14	(4):53
earthquake magnitude	foreshocks(1):17	moderate to strong	stress field(1):5	well water level(2):7

《山西地震》2024 年第 1 期~4 期(总第 197 期~200 期)自由词索引

自由词索引以汉语拼音为序。(1):表示期,1:表示页数。

B	电气化铁路(1):29	观测质量(4):16	L	山西清徐 M3.7 地震	网络爬虫(1):1
摆式倾斜仪(1):44	电性结构(1):51	管理系统(2):38	链路故障分析(3):43	(3):15	未触发台站(3):9
备机备件(4):46	定量分析(4):27	国家预警项目(3):48	流体观测(2):44	山西预警(3):35	文本挖掘(1):1
背景噪声(1):44;	洞体应变仪(2):25	H	M	伸缩仪(1):33	问卷调查(2):53
(4):21	断层气氢观测(2):19	荷载模型(1):33	媒体文件(2):38	时频分析(2):14	X
C	E	黑岱沟露天煤矿	媒体资源库(2):38	首报时间(3):1	项目档案(3):48
测孔建设(2):32	EEMD 降噪方法	(4):11	绵阳农村(2):53	数据库设计(3):35	小波变换(2):14
初至 P 震相(1):10	(4):40	痕量氢观测(2):32	P	数据质量(2):25;	效能评估(1):23
垂直摆倾斜仪(4):16	F	J	抛掷爆破(4):11	(3):21	信息管理(3):35
D	发震背景(1):5	Java(3):35	PGA(3):21	数字化水位(1):23	信息提取(1):1
当量(4):11	防震减灾(2):38;	积水倒灌(2):44	PGD(3):21	水位校测(4):53	邢台震区(1):5
档案管理(3):48	(2):53;(3):51	基本基准站(3):43	PGV(3):21	速度模型(1):10	学校师生(3):51
地壳应力场(2):19	风险(2):48	计算机软件(4):53	频谱偏移法(1):17	随机效应(2):1	Y
地球物理站网(4):46	G	监测能力(1):38;	PMC 方法(1):38	T	仪器改造(4):21
地震预警(3):1;	高烈度地震(4):33	(3):1	破裂方向(1):5	台基噪声(3):28	异常识别(4):27
(3):9;(3):15;	隔震方案(4):33	检测分析(3):9	python(3):35	抬升方式(4):1	影响系数(1):51
(3):28;(3):51	功率谱密度(1):44	降雨(1):51	Q	同震响应(4):16	应县木塔(4):33
地震预警区域网	构造模式(4):1	降雨干扰(4):27	桥梁结构(4):40	V	预测模型(2):1
(3):43	故障排除(4):46	K	S	VB 语言(4):53	预警处理能力(3):15
地震灾情(1):1	观测设备(3):39	科普宣传(3):51	三维立体模型(4):33	W	预警基本二类站
地质薄弱带(1):5	观测数据(2):7	块体(4):1	山西地区(1):38	皖 27 井(1):23	(3):39

预警站网(3):21	运维巡检(3):39	真实地震动记录	震级(4):11	政务网站(2):48	资料分析(1):23
运城盆地(4):1	Z	(2):1	震级一序号法(1):38	政务信息(2):48	自动识别(2):48
运行率(3):28;(3):43	噪声功率谱(3):21	振动数据(4):40	震源机制解(2):19	重点建设项目(3):48	钻孔应变(4):27
运维能力(4):46	褶积滤波(1):51	震后舆情(1):1	震源深度(1):10	装置研究(2):44	最优拟合度法(1):38

Free Word Index of EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI (No. 1~4, 2024, Sum No. 197~200)

A	(3):1;(3):28;(3):51;	(4):21	inspection(3):39	Shanxi region(1):38
archive management(3):48	(3):9	isolation scheme(4):33	P	shanxi warning(3):35
automatic identification	EEMD noise reduction	J	pendulum inclinometer	spare parts(4):46
(2):48	method(4):40	Java(3):35	(1):44	spectral shift method
B	efficacy evaluation(1):23	K	PGA(3):21	(1):17
background noise(1):44;	electrical structure(1):51	key construction projects	PGD(3):21	station not triggered(3):9
(4):21	electrified railway(1):29	(3):48	PGV(3):21	T
basic benchmark station	east-earthquake public	L	platform noise(3):28	tectonic model(4):1
(3):43	sentiment(1):1	lifting mode(4):1	PMC method(1):38	text mining(1):1
blasting equivalent(4):11	extensometer(1):33	link failure analysis(3):43	power spectral density	throwing blasting(4):11
block(4):1	F	load model(1):33	(1):44	time-frequency analysis
borehole strain(4):27	fault gas hydrogen ob-	M	prediction model(2):1	(2):14
bridge structure(4):40	servation(2):19	Magnitude-Number	processing capacity of	trace hydrogen observa-
C	first report time(3):1	method(1):38	warning(3):15	tion(2):32
cavity strain gauge(2):25	first-arrival P phase(1):10	management system	project archives(3):48	troubleshooting(4):46
computer software(4):53	fluid observation(2):44	(2):38	python(3):35	V
convolution filtering(1):51	G	measuring well con-	Q	VB programming lan-
coseismic response(4):16	geological weak zones	struction(2):32	quantitative analysis(4):27	guage(4):53
crustal stress field(2):19	(1):5	media files(2):38	questionnaire survey(2):53	velocity model(1):10
D	geophysical station net-	media resource library	R	vertical pendulum incli-
data quality (2):25;	work(4):46	(2):38	rainfall(1):51	nometer(4):16
(3):21	Goodness-of-Fit Test	monitoring capability	random effects(2):1	vibration data(4):40
database design(3):35	method(1):38	(1):38;(3):1	real earthquake motion	W
detection and analysis	government information	N	records(2):1	warning basic second-
(3):9	(2):48	national early warning	risk(2):48	class station(3):39
device research(2):44	government website(2):48	project(3):48	rupture direction(1):5	warning station network
digital water level(1):23	H	noise power spectrum	rural areas in Mianyang	(3):21
E	Heidaigou open-pit coal	(3):21	(2):53	water backflow(2):44
early warning network	mine(4):11	O	S	wavelet transform(2):14
(3):1	high intensity earthquake	observation data(2):7	school teachers and	Web crawler(1):1
earthquake disaster	(4):33	observation equipment	students(3):51	well No. 27(1):23
information(1):1	I	(3):39	science popularization	X
earthquake prevention and	impact coefficient(1):51	observation quality(4):16	propaganda(3):51	Xingtai seismic area(1):5
disaster reduction(2):38;	information extraction	operating rate (3):28;	seismogenic background	Y
(2):53;(3):51	(1):1	(3):43	(1):5	yingxian wooden tower
earthquake warning regional	information management	operation and maintenance	Shanxi Qingxu M3. 7	(4):33
network(3):43	(3):35	ability(4):46	earthquake(3):15	Yuncheng Basin(4):1
earthquake warning(3):15;	instrument modification	operation and maintenance		