

郇怀龙, 王发胜, 禹小军, 等. 韶关台 VS 型垂直摆映震效能分析[J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 84-91. [GAO Huailong, WANG Fasheng, YU Xiaojun, LI Zhuang, et al. Analysis of Seismic Performance of VS Vertical Pendulum in Shaoguan Station [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(3): 84-91]

韶关台 VS 型垂直摆映震效能分析

郇怀龙¹, 王发胜², 禹小军², 李 壮¹, 李 翀¹

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 广东华远国土工程有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 对 20 组近年台湾区域地震数据预处理分析, 提取韶关台同震区间的 VS 型垂直摆监测数据。通过对地震引起的 VS 型垂直摆的曲线形态异常进行对比, 分析韶关台站的 VS 型垂直摆的映震性能。利用样本点混合函数差值法模拟韶关台垂直摆倾斜仪阶跳幅度-震级曲线, 解算引发阶跳的临界值。对韶关台、信宜台跳幅度-震级曲线进行线性差分处理, 分析距离对阶跳幅度的影响, 使用最小二乘法对 T 差分数据进行处理, 解算差分数据的最或似值, 即韶关台与信宜台距离对阶跳幅度的影响系数。

关键字: 阶跳-震级曲线; 阶跳临界值; 震中距影响系数

中图分类号: P315.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 03-0084-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.03.012

Analysis of Seismic Performance of VS Vertical Pendulum in Shaoguan Station

GAO Huailong¹, WANG Fasheng², YU Xiaojun¹, LI Zhuang¹, LI Chong¹

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. Guangdong Huayuan National Land Space Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

Abstract: The pre-processing analysis of 20 groups of seismic data in Taiwan in recent years is carried out to extract the VS vertical pendulum monitoring data in the coseismic area of Shaoguan Station. By comparing the curve shape anomalies of the VS vertical pendulum caused by the earthquake, the seismic reflection performance of the VS vertical pendulum at Shaoguan Station is analyzed. The sample point mixing function difference method was used to simulate the step-magnitude-magnitude curve of the vertical pendulum tiltmeter at Shaoguan Station, and the critical value of the induced step jump is solved. The paper performed linear difference processing on the amplitude-magnitude curve of the Shaoguan Station and Xinyi Station, analyzed the influence of the distance on the jump amplitude, and used the least squares method to process the differential data to solve the most or similar value of the difference data, that is the influence coefficient of the distance from the head to the order jump.

Keywords: Order jump-magnitude curve; Order jump critical value; Epicenter distance influence coefficient

收稿日期: 2019-04-02

作者简介: 郇怀龙 (1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事测绘工程工作。

E-mail: 798061889@qq.com

0 引言

地壳形变、地倾斜变化直接反应了地壳运动的定量特性，是对地球动力学和地震前兆观测的重要研究手段，VS 型垂直摆倾斜仪作为地震前兆观测仪器之一，主要是用来观测地壳垂线相对运动的变化形态，利用记录的相关数据可以对震源参数进行分析，本文通过研究韶关地震台 VS 型垂直摆倾斜仪异常波动与震源参数的相关性，对其映震效能进行分析。韶关地震台 VS 型数字化垂直摆倾斜仪，自 2007 年正式验收以来工作至今，工作状态良好、数据稳定，但运行 12 年期间从未对仪器的映震效能，映震灵敏度进行测算。本文对近年来监测的台湾地区地震异常数据进行统计，从形变数据异常时间、特征，异常波动幅度与震中距、震级的相关性进行分析，并收集同震区间的信宜台地倾斜异常数据，通过不同区域地倾斜数据对同震区映震性差异分析，肯定了韶关台形变数据的映震能效，并解算出韶关台 VS 型垂直摆倾斜仪映震临界值与震中距影响系数。

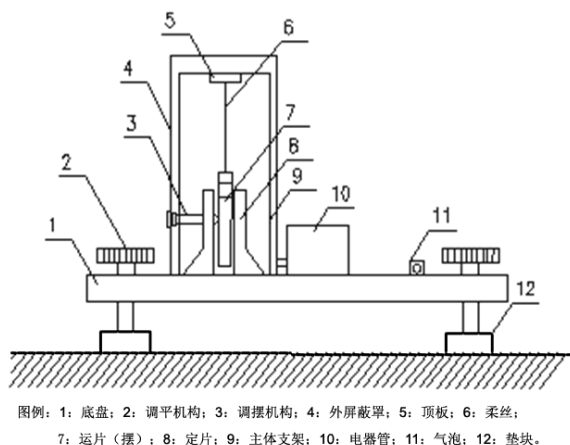


图1 垂直摆倾斜仪机械结构图

Fig.1 Mechanical structure diagram of vertical pendulum tiltmeter

2 仪器的稳定性和可靠性分析

按照 VS 型垂直摆倾斜仪观测《规范》及仪器的设计技术指标，对仪器观测数据的稳定性进行分析，利用卡尔曼滤波法^[1-2]对近十年的地倾斜观测数据进行预处理，分别计算滤噪后数据的相对噪声水平和潮汐因子均方根误差，

1 观测概况

韶关地震台隶属广东省基本台网，地处中国东南部，位于广东省韶关市城区北部，北纬 24.84°、东经 113.59° 背靠黄岗山，海拔 74 m。地倾斜观测室位于黄岗山脚下观测巷道内，主巷道深 50 m，设有 7 道密封门，仪器室年温差 $\leq 3^{\circ}\text{C}$ ，巷道岩性为黄岗岩，密度高、刚度强、稳定性好，仪器观测墩长 1.2 m，宽 0.9 m，墩底附着在基岩上，墩面平整，使用聚苯基乙烯泡沫塑料全包式保温密封，仪器观测环境良好，有利于仪器的监测的稳定性。

地震台安置了一套 VS 型垂直摆倾斜仪，分别记录 NS、EW 方向观测数据，该仪器由摆系、主体支架、电容位移传感器探头、底座、调平机械、锁摆机构组成（图 1、2）。板底为铝制等腰三角形，用于稳定、支撑摆系，通过电容测微传感器的探头测量摆体与两个定片间距离，并将测量数据以电压信号传输至显示设备，其测量精度为千分之一角秒。因此 VS 型垂直摆倾斜仪能够完整的测量出地倾斜固体潮数据，并清晰的记录同震引发的地形变数据异常。

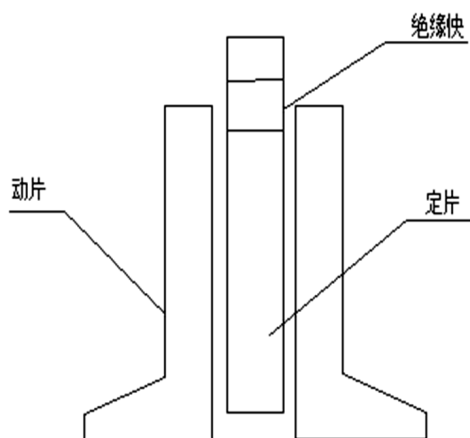


图2 电容式位移传感器探头示意图

Fig.2 Schematic diagram of capacitive displacement sensor probe

以反映潮汐因子的波动形态和非潮汐因素的稳定性，从表中的数据可以分析出：EW 向数据的绝对误差和相对误差在 1% ~ 2% 之间，能够达到 I 类台标准；NS 向数据的绝对误差和相对误差在 1% ~ 6% 之间，虽精度较低但也能够达到观测标准。

垂直摆倾斜仪主要反映地倾斜变化，而引

发地倾斜的主要因素为固体潮汐的变化^[3], 韶关台垂直摆倾斜仪, 正常情况下记录的数据形态能够清晰的反映出固体潮汐的变化规律, 日变形态曲线基本呈两峰两谷, 与正弦波类似(图3)。从日变形态曲线可以看出, NS 向观测数据有锯齿

脉动现象, 该现象是由于 NS 向数据的潮汐因子均方根误差和相对噪声水平较大造成的, 而仪器记录的 EW 向数据比 NS 向数据波动更为平滑, 此现象正与之前对数据稳定性分析的结果相吻合。

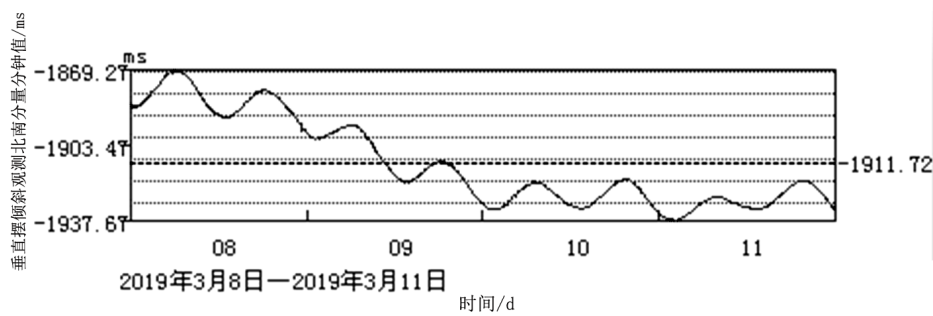


图3 韶关台地倾斜固体潮汐变化形态
Fig.3 The solid tidal change pattern of ground tilt in the Shaoguan Station

3 垂直摆同震变化分析

3.1 同震响应数据对比

为研究同一震区域对不同区域的地倾斜影

响, 本文收集了信宜台、韶关台对台湾区域近 20 次代表性的地震记录数据(表 1), 分别对不同震级的同震响应持续时间, 同震响应延迟时间, 同震阶跳幅度进行分析。

表 1 韶关台、信宜台 VS 型垂直摆倾斜仪同震响应参数表
Table 1 Co-seismic response parameter table of VS vertical pendulum tiltmeter

地点	时间 / (年 - 月 - 日)	纬度 / (°)	经度 / (°)	震级 / <i>M</i>	最大相应幅度 / (ms)		持续时间 /min		响应延迟 /min	
					韶关	信宜	韶关	信宜	韶关	信宜
台湾屏东县	2019-03-03	21.27	121.45	3.8	0.30	0.00	3	-	4	-
台湾花莲县	2018-12-12	23.93	121.60	4.6	2.37	0.00	5	-	5	-
台湾花莲县	2018-10-24	24.01	122.68	5.7	30.59	3.75	8	3	2	4
台湾花莲县	2018-10-23	24.01	122.65	6.0	39.55	7.34	9	4	4	4
台湾花莲县	2018-06-12	23.96	121.70	4.6	3.60	0.00	6	-	5	-
台湾南投县	2018-06-02	23.90	121.02	4.3	2.61	0.00	5	-	4	-
台湾台东县	2018-05-31	22.77	121.34	4.9	10.30	2.68	5	-	4	-
台湾台东县	2018-04-27	22.35	121.00	4.2	0.55	0.00	4	-	8	-
台湾花莲县	2018-02-10	24.00	121.83	4.5	3.17	0.00	6	-	5	6
台湾花莲县	2018-02-08	23.94	121.62	4.9	11.51	2.78	6	5	5	-
台湾花莲县	2018-02-07	24.07	121.79	6.1	40.18	13.59	10	9	4	5
台湾花莲县	2018-02-07	23.92	121.78	4.6	1.02	0.00	5	-	4	-
台湾花莲县	2018-02-04	24.20	121.72	6.4	71.30	23.59	20	17	4	4
台湾宜兰县	2016-05-12	24.71	122.00	6.2	37.95	18.43	12	10	3	3
台湾南投县	2013-06-02	23.90	120.90	6.7	107.7	68.46	36	31	2	2
台湾屏东县	2012-02-26	22.75	120.75	6.0	63.47	31.59	8	7	4	4

(1) 同震响应持续时间分析: 对样本数据中韶关地震台地倾斜阶跳持续时间进行统计排列, 地震 3.8 级, 没有明显的阶跳现象, 地震 4.6 级, 阶跳持续时间 5 min, 地震 5.7 级, 阶跳持续时间 8 min, 地震 6.7 级, 阶跳持续时间 36 min, 对比信宜台站的响应持续时间也表现出同样的规律, 显示同震响应时间随着震级的增加而增长。4.5 级地震, 韶关台站阶跳持续时间 5 min, 信宜台没有明显的阶跳现象; 5.7 级地震, 韶关台站阶跳持续时间 8 min, 信宜台站持续时间 3 min; 6.4 级地震, 韶关台站阶跳持续时间 20 min, 信宜台站持续时间 14 min, 对于震级相同的地震韶关地震台阶跳持续时间比信宜台短, 说明随震中距的增加阶跳持续时间逐渐减小。

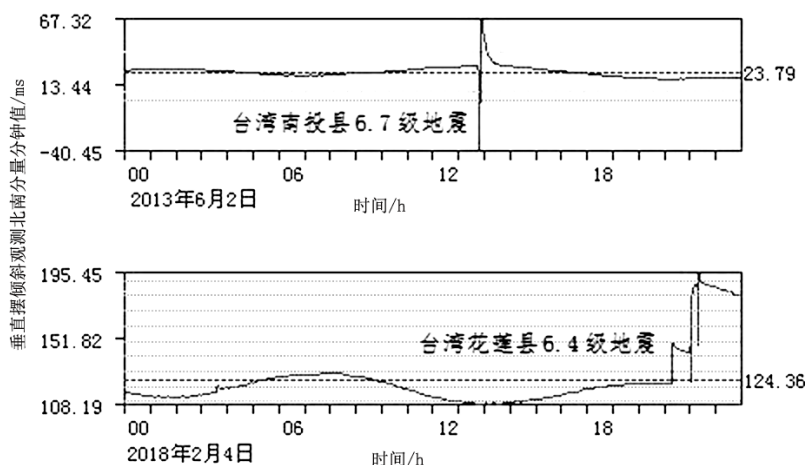
(2) 同震响应延迟时间分析: 样本数据中除了 18 年 4 月 27 日的 4.2 级地震以外, 韶关台站的垂直摆倾斜仪同震响应延迟时间均随在 4.2 min 上下波动, 信宜台垂直摆倾斜仪同震响应延迟时间均随在 5.1 min 上下波动, 2018 年 2 月 7 日, 地震 6.1 级, 韶关台响应延迟时间 4.1 min, 信宜台响应延迟 5.2 min; 2015 年 4 月 20 日, 地震 6.0 级, 韶关台响应延迟时间 3.9 min, 信宜台响应延迟 5.1 min, 样本数据显示对于同震级的响应延迟时间韶关台均小于信宜台响应延迟时间, 表明震中距与同震响应延迟时间呈正比变化形态。

(3) 同震响应阶跳幅度分析: 样本数据中韶关台站地倾斜阶跳幅度数据显示, 地震 3.8 级, 韶关台最大阶跳幅度 0.30 ms, 信宜台没有明显阶跳现象; 地震 4.6 级, 韶关台最大阶跳幅度 2.37 ms, 信宜台没有明显阶跳现象; 地震 5.7 级, 韶关台最大阶跳幅度 30.59 ms, 信宜台最大阶跳幅

度 0.75 ms; 地震 6.4 级, 韶关台最大阶跳幅度 71.30 ms, 信宜台最大阶跳幅度 23.59 ms; 地震 6.7 级, 韶关台最大阶跳幅度 107.7 ms, 信宜台最大阶跳幅度 68.46 ms, 样本数据显示两个台站的同震响应时间随着震级的增加而增大, 对于震级相同的地震, 韶关地震台阶跳幅度比信宜台大, 表明随震中距的增加阶跳幅度逐渐减小。

3.2 最大阶跳幅度与震级关系及临界值计算

采用近年来韶关台站记录的台湾区域具有代表性的地震数据, 对数据进行预处理, 提取排除噪声污染的地倾斜最大幅度数据 (图 4), 图中分别是台湾区域 2013 年 6 月 2 日, 台湾南投县 6.7 级地震引发的同震阶跃幅最大值为 107.7 ms; 2018 年 2 月 4 日, 台湾花莲县 6.4 级地震引发的同震阶跃幅度最大值为 71.30 ms; 2016 年 5 月 12 日, 台湾宜兰县 6.2 级地震引发的同震阶跃幅度最大值为 37.95 ms; 2018 年 12 月 12 日, 台湾花莲县 4.6 级地震引发的同震阶跃幅度最大值为 2.37 ms, 2018 年 5 月 31 日, 台湾台东县 4.9 级地震引发的同震阶跃幅度最大值为 101.3 ms, 图中显示不同的震级对阶跳影响不同, 除了 2018 年 5 月 31 日, 台湾台东县 4.9 级地震引发的阶跳以外, 其他的基本都是同震阶跃幅度随震级增大而增大, 甚至一些微小型地震不能引发震阶跃幅, 经事后查阅资料分析后, 5 月 31 日, 台湾台东县 4.9 级引发的阶跳异常的原因是, 该段时间通向观测巷道内有人进行重力测量, 人为因素对倾斜仪观测数据造成了影响, 因此在对同震阶跃幅度分析时, 应先对数据预处理, 过滤掉噪声污染^[4-5]。



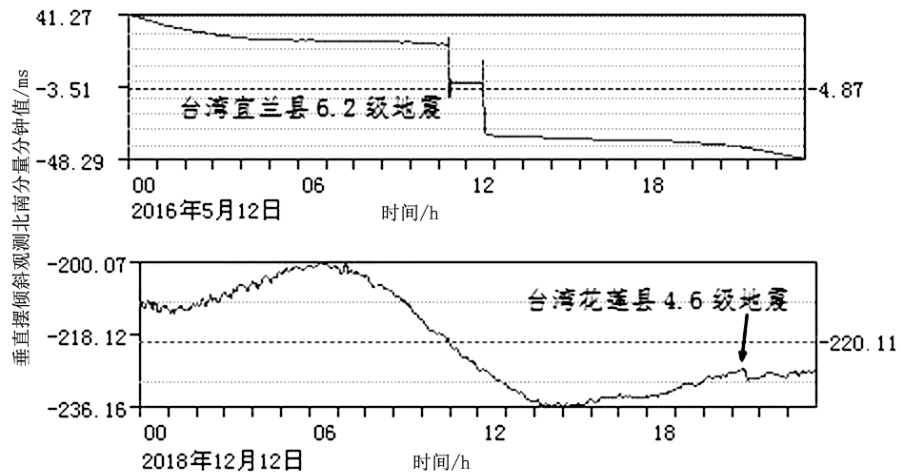


图4 韶关垂直摆倾斜仪同震响应曲线
Fig.4 Co-seismic response curve of vertical pendulum tiltmeter

为研究最大阶跳幅度与震级变化的确切关系^[6-7], 对上文样本中韶关台垂直摆倾斜仪记录的数据, 进行滤波降噪处理, 统计排列出震级由小到大的最大阶跳幅度数据(表2、图5)。

表2 韶关台垂直摆倾斜仪震级—阶跳幅度统计表
Table 2 Magnitude-order jump amplitude statistics of vertical pendulum tiltmeter in Shaoguan Station

震级 / <i>M</i>	最大响应幅度 /ms	时间 / (年 - 月 - 日)	地点	纬度 / (°)	经度 / (°)
3.8	0.3	2019-03-03	台湾屏东县	21.27	121.45
4.2	0.55	2018-04-27	台湾台东县	22.35	121.00
4.3	2.61	2018-06-02	台湾南投县	23.90	121.02
4.5	3.17	2018-02-10	台湾花莲县	24.00	121.83
4.6	2.37	2018-12-12	台湾花莲县	23.93	121.6
4.6	3.6	2018-06-12	台湾花莲县	23.96	121.70
4.6	1.02	2018-02-07	台湾花莲县	23.92	121.78
4.9	10.30	2018-05-31	台湾台东县	22.77	121.34
4.9	11.51	2018-02-08	台湾花莲县	23.94	121.62
5.7	30.59	2018-10-24	台湾花莲县	24.01	122.68
6.0	39.55	2018-10-23	台湾花莲县	24.01	122.65
6.0	41.63	2015-04-20	台湾花莲县	24.10	122.50
6.0	63.47	2012-02-26	台湾屏东县	22.75	120.75
6.1	40.18	2018-02-07	台湾花莲县	24.07	121.79
6.2	37.95	2016-05-12	台湾宜兰县	24.71	122.00
6.2	67.24	2015-02-14	台湾台东县	22.61	121.54
6.4	71.3	2018-02-04	台湾花莲县	24.20	121.72
6.4	70.5	2015-04-20	台湾花莲县	24.00	122.50
6.7	107.7	2013-06-02	台湾南投县	23.90	120.90

线性拟合样本点的坐标为 $p_1(x_1, y_1), p_2(x_1, y_1), \dots, p_n(x_n, y_n)$, 设该方程的参数形式是 $x=f_x(u)$, $y=f_y(u)$, 分别用两个多项式函数来表示 $f_x(u)$ 和 $f_y(u)$, 使 $f_x(u)$ 和 $f_y(u)$ 与各样本点有关^[8]。

$$f_x(u)=\sum_{i=1}^n x_i B_i(u), f_y(u)=\sum_{i=1}^n y_i B_i(u)$$

(1)

其中 $B_i(u)$ 为样本点混合函数, 其表达构造为

$$B_i(u) = \frac{(u+1)u(u-1)\dots[u-(i-1)]\dots[u-(n-2)]}{(i-1)(i-2)(i-3)\dots(1)(-1)\dots(-i-n)} \quad (2)$$

这时只需连续改变中间参考量的值,就可以使曲线按照样本点的位置拟合出相似曲线(图6)。

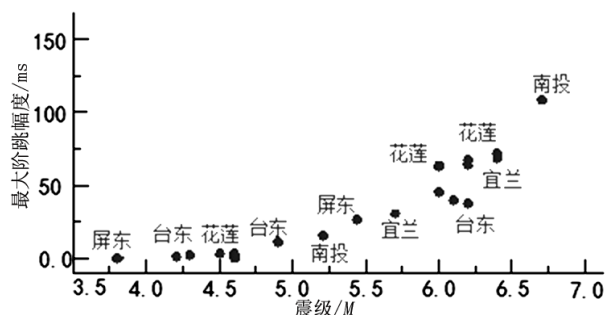


图5 韶关台震级—阶跳展点图

Fig.5 Magnitude-order jump point graph of Shaoguan Station

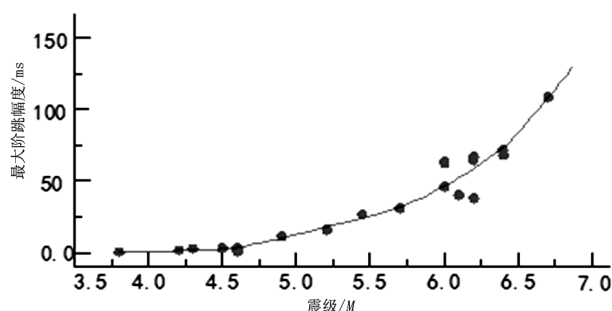


图6 韶关台最大阶跳幅度曲线图

Fig.6 Maximum order jump amplitude graph of Shaoguan Station

模拟的阶跳—震级关系曲线图中显示地震发生后,小震级地震时没有引发地倾斜阶跳现象,当震级达到一定程度才会形成同震阶跳^[9-11],当震级由小到大从未触发到触发阶跳时的震级程度即为阶跳-震级的临界值。为解算临界值的具体数值,利用样本点混合函数^[8], $f_x(u)=\sum_{i=1}^n x_i B_i(u)$, $f_y(u)=\sum_{i=1}^n y_i B_i(u)$, y 代表同震阶跳幅度, x 代表震级大小,计算当 y 无限接近0时,解算出 x 的最大数值,即为临界值,计算表达式为: $\max\{f_x(u)=\sum_{i=1}^n x_i B_i(u), f_y(u)=\sum_{i=1}^n y_i B_i(u)\}(x=0)$,通过解算,韶关台站垂直摆倾斜仪对台湾区域的地震触发同震阶跳的临界值为3.6级,通过对样本外台湾地震的记录数据,对比解算出的临界值,不同震级所触发的同震阶跳现象基本与

解算出的数值吻合,也再次印证了利用样本点混合函数解算阶跳-震级临界值的准确性。

3.3 最大阶跳幅度与震中距关系

影响垂直摆倾斜仪同震阶跳幅度的另一个因素是与震中的距离,为研究震中距离不同对同震阶跳幅度变化的影响,以韶关台站与台湾震区为基准距离,对比分析与信宜台的同震阶跳幅度间差异的相关性^[9-11],为此使用上文中20起地震信宜台的地倾斜记录数据,使用样本点混合函数方法分别对两个台站的同震阶跳幅度进行线性拟合,模拟两个台站的阶跳-震级关系曲线(图7、8)。

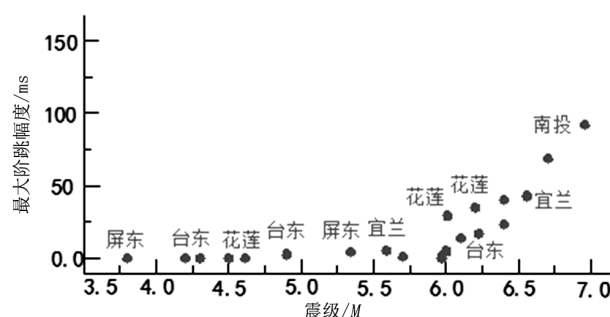


图7 信宜台震级—阶跳展点图

Fig.7 Magnitude-order jump point graph of Xinyi Station

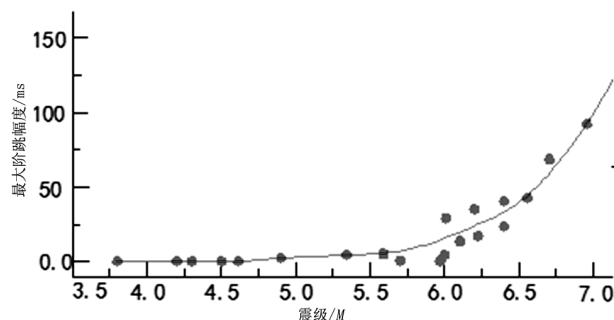


图8 信宜台最大阶跳幅度曲线图

Fig.8 Maximum order jump amplitude graph of Xinyi Station

信宜台站的阶跳-震级模拟图与上文中韶关台站的线性形态表现出了一定的相似性,但三个台站的模拟线性叠加图中显示,两个台站的线性呈现 y 向的偏离,映震性临界值有明显差异,2019年3月3日,台湾屏东县3.8级地震,韶关台最大阶跳幅度为0.30 ms,信宜台没有阶跳现象;2018年2月8日,台湾台花莲县4.9级地震,韶关台最大阶跳幅度为11.51 ms,信宜台最大阶跳幅度为2.78 ms;对于同级别地震,

韶关台、信宜台垂直摆倾斜仪最大阶跳幅度逐渐减小，与震中距离成反比。

为进一步分析三个台站间随震中距离不同最大阶跳振幅变化的规律，解算震中距对的影响系数，对上文中阶跳-震级模拟曲线进行一阶线性差分^[12]计算，利用一阶非齐次线性差分函数式： $\begin{cases} a_{n+1}=ax_n+by_n+c \\ b_{n+1}=dx_n+ey_n+f \end{cases}$ ，当 $\begin{cases} c=0 \\ f=0 \end{cases}$ 时，可以

得出 $\begin{cases} x_{n+1}=ax_n+by_n \\ b_{n+1}=dx_n+ey_n \end{cases}$ ，当 y 值相同时，即可得出 x 的差分值，依次递推分别解算出韶关台与信宜台阶变差—震级曲线，韶关台与信宜台阶变差—震级曲线（图9、表3），图中平滑曲线表示，韶关台与信宜台的震中距影响系数。

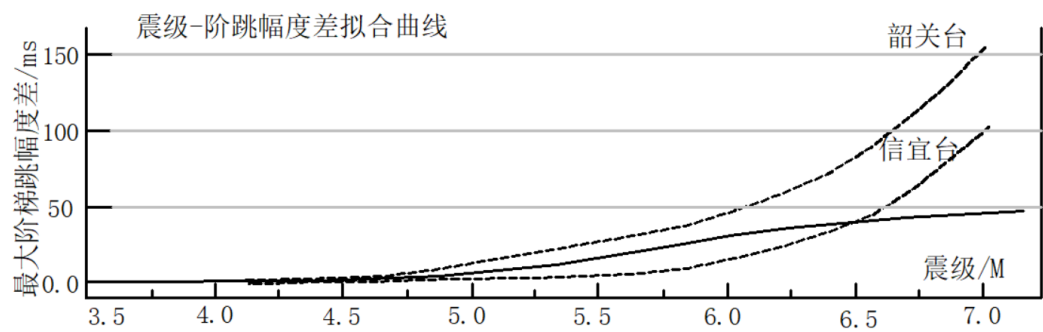


图9 韶关台—信宜台最大阶跳差分曲线图
Fig.9 Maximum order jump difference graph of Shaoguan Sation and Xinyi Sation

表3 韶关台—信宜台最大阶跳差分表
Table 3 Maximum step difference table of Shaoguan Station and Xinyi Station

震级 /M	距离影响系数	中误差 /ms
4.0	-	-
4.5	-	-
5.0	-	-
5.5	19.87	2.64
6.0	30.94	5.56
6.5	36.14	9.44
7.0	43.12	9.12

根据韶关台与信宜台阶变差-震级曲线，可以判断两个台站间的最大阶变幅度差，即震中距影响系数，通过最小二乘法计算震中距影响系数的最或似值，利用 $Q=\sum_{i=1}^n (y_i-\hat{y}_i)^2=\sum_{i=1}^n (y_i-a-bx_i)^2$ 作为总离差，并使之达到最小，这样回归线就是所有直线中误差最小的那一条，即是影响系数的最或似值。根据函数式首先计算系数 a 、 b ， $\hat{b}=\frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}$ ， $\hat{a}=\bar{y}-\hat{b}\bar{x}$ ，其中 \bar{x} 、 \bar{y} 为 x_i 、 y_i 的值， a 、 b 上方加“ $\hat{}$ ”表示是由观察值按最小二乘法求得的估计值， a 、 b 系数求出后，即可解算出系数的最或似值（表4）。

表4 韶关台—信宜台距离影响系数表
Table 4 Distance influence coefficient table of Shaoguan Station and Xinyi Station

震级 /M	距离影响系数 /ms	中误差 /ms	震级 /M	距离影响系数 /ms	中误差 /ms	震级 /M	距离影响系数 /ms	中误差 /ms
5.0	-	-	5.7	25.28	3.15	6.4	37.32	7.14
5.1	8.84	1.68	5.8	27.71	3.56	6.5	36.14	7.34
5.2	9.99	2.02	5.9	28.61	4.08	6.6	37.22	7.19
5.3	12.18	1.56	6.0	30.94	5.56	6.7	39.48	7.35
5.4	16.50	2.03	6.1	31.07	5.98	6.8	40.33	7.76
5.5	19.87	2.64	6.2	29.34	4.79	6.9	41.82	8.24
5.6	22.56	2.89	6.3	35.46	5.27	7.0	43.12	9.12

利用震中距影响系数，可以通过对韶关台垂直摆倾斜仪最大阶跳幅度初步判断台湾区域地震的震级，推算信宜台站的最大阶跳幅度，亦可利用信宜台的数据反演韶关台的阶跳数据，验证韶关台地倾斜数据的稳定性、可靠性。本文使用样本外的地倾斜数据，对韶关台站的阶

跳数据加入韶关台与信宜台的震中距影响系数，解算信宜台站的同震阶跳幅度理论值，与实际值进行比较（表 5），理论值在误差范围内，没有超出两台站间的阶变差 - 震级曲线震荡区间，充分验证了震中距影响系数的准确性。

表 5 韶关台、信宜台 VS 型垂直摆倾斜仪同震响应参数统计表
Table 5 Statistical table of co-seismic response parameters of VS vertical pendulum tiltmeter at Shaoguan Station and Xinyi Station

地点	时间 / (年 - 月 - 日)	震级 / <i>M</i>	影响系数 /ms	最大响应幅度 (ms)			
				韶关	信宜理论值	信宜实际值	误差
台湾台南市	2018-03-20	5.1	8.84	13.56	3.26	3.26	1.46
台湾花莲县	2015-04-20	6.0	30.94	41.63	10.69	12.87	2.18
台湾花莲县	2015-04-20	6.4	37.32	70.50	33.18	40.07	6.89
台湾台东县	2015-02-14	6.2	29.34	63.24	33.9	35.29	1.39

4 结语

本文通过垂直摆倾斜仪的同震最大阶跳幅度与震级相关性的分析表明：同震的响应时间随着震级的增大而增大；同震响应延迟时间与震中距呈正相关性；同震最大阶跳幅度随着震级的增大而增大，随着震中距的增大而减小。

进一步探究震级、震中距对同震最大阶跳幅度的影响规律，使用样本点混合函数差值法对 20 组地震数据进行处理，拟合出台湾区域地震引发的韶关台垂直摆倾斜仪阶跳幅度—震级曲线图，模拟了最大阶跳幅度随震级增大呈指数级上升的趋势，并反演曲线解算出台湾区域地震引发韶关台垂直摆倾斜仪阶跳的临界值为 3.6 级。对韶关台、信宜台阶跳幅度 - 震级曲线进行线性差分，拟合出韶关台与信宜台阶跳幅度差—震级曲线，并计算出韶关台—信宜台震中距影响系数表。

利用阶跳临界值可以初步判断，台湾区域地震对韶关地倾斜数据的影响程度，对垂直摆倾斜仪映震效能初步的判断。使用韶关台—信宜台震中距影响系数表，可以根据韶关台阶跳幅度数值和震级大小计算出信宜台的阶跳数据，亦可使用该方式反演韶关台的阶跳数值，从而验证垂直摆倾斜仪数据记录的稳定性、可靠性。

由于本次分析数据的局限性，以上得出的仅仅是一些初步结论，对于韶关台—信宜台震中距影响系数规律、及阶跳临界值结论的可靠

性和适用范围有待更多数据的试验和研究。

参考文献：

[1] 帕夫利迪斯. 计算机图形显示和图像处理的算法 [M]. 吴成柯, 译. 北京: 科学出版社, 1987.

[2] 沈伟烈. 计算机图形学教程 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.

[3] 李学川, 刘仕锦, 阳光. 姑咱地震台 VS 型垂直摆倾斜数字仪观测资料分析 [J]. 四川地震, 2013, 20(1):112-114.

[4] 熊先保, 黄晓华, 杨 婕, 等. 施工振动对水管倾斜仪观测干扰的定量分析 [J]. 华南地震, 2018, 38 (1): 91-94.

[5] 郭国祥, 张红秀, 郭林旺. 临汾地震台垂直摆倾斜观测常见异常图像分析 [J]. 地震地磁观测与研究, 2013, 2(3):34-37.

[6] 张肖, 崔泽岩, 赵慧琴. 河北易县地震台水管倾斜仪与垂直摆倾斜仪同震响应分析 [J]. 地震工程学报, 2019, 39(1):123-126.

[7] 郭国祥, 张红秀, 郭林旺. 山西临汾中心地震台水平摆与垂直摆倾斜仪效能对比研究 [J]. 山西地震, 2013, 29(2):162-164.

[8] 鄢兆伦, 陈学良, 高志兵, 等. 共振柱试验的非线性拟合研究 [J]. 地震工程学报, 2018, 26(5):268-271

[9] 韩忠民, 陈作全, 金正燮. 中国西部地震视应力的空间分布 [J]. 科技传播, 2011, 12(16):126-128.

[10] 张玉林, 宋晓冰, 郭亚亚, 等. 承德地震台 VP 型宽频带垂直摆运行效能分析 [J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 42(2):265-267.

[11] 冯万鹏, 李振洪. InSAR 资料约束下震源参数的 pso 混合算法反演策略 [J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4):189-196.