

李农发,耿丽霞,赵义飞,等.SKZ-3 分量钻孔应变仪的测试方法研究[J].地震工程学报,2020,42(3):818-824.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.818
LI Nongfa, GENG Lixia, ZHAO Yifei, et al. Testing Method of SKZ-3 Component Borehole Strainmeter[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 818-824. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.818

SKZ-3 分量钻孔应变仪的测试方法研究

李农发^{1,2}, 耿丽霞², 赵义飞^{1,2}, 李震², 余剑锋^{1,2}

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

2. 武汉地震科学仪器研究院有限公司, 湖北 咸宁 437000)

摘要: 基于四分量自检原理研制出的 SKZ-3 分量钻孔应变仪, 不仅具有传统地应力观测优势, 还具备地球深部高频应变监测。而对 SKZ-3 分量钻孔应变仪进行测试和校验, 是保证观测数据真实有效的基础。

关键词: 分量钻孔应变仪; 应力观测; 应变监测; 测试

中图分类号: P319

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)03-0818-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.818

Testing Method of SKZ-3 Component Borehole Strainmeter

LI Nongfa^{1,2}, GENG Lixia², ZHAO Yifei^{1,2}, LI Zhen², YU Jianfeng^{1,2}

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

2. Wuhan Institute of Seismologic Instrument Co. Ltd., Wuhan 437000, Hubei, China)

Abstract: The SKZ-3 component borehole strainmeter, which was developed on the basis of the principle of four-component self-checking, not only has the advantage of traditional geostress observation but can also monitor the high-frequency strain in the depths of the earth. Testing and calibration of the SKZ-3 component borehole strainmeter ensured the validity and reliability of observation data.

Keywords: component borehole strainmeter; stress observation; strain monitoring; test

0 引言

近年来四分量钻孔应变仪作为地震观测仪器被大量安装应用,取得了一些重要的观测成果,特别是一些典型的地震震例等^[1],越来越受到专家学者的重视。新一代的 SKZ-3 分量钻孔应变仪开始被安装应用,因此如何更准确地测量该类仪器出厂前的格值、灵敏度、线性度、频率响应等是至关重要的^[2]。

SKZ-3 分量钻孔应变仪是以中国地震局地壳应

力研究所苏恺之研究员提出的“四分量自检理论”为基础研制出来的新一代四分量钻孔应变仪,在力学结构、深井安装、信号处理、传感器换能、格值标定及防雷抗干扰等方面进行优化设计,不仅具有传统地应力的观测优势,还具备地球深部高频应变监测,特别是监测大震发震前岩板蠕滑激发的高频应变波信号,可广泛用于探索大震的短临可靠预警技术,弥补地震波预警盲区^[1]。

收稿日期:2020-01-15

基金项目:中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项资助项目中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项(Y201804);湖北省技术创新专项重大项目(2019AAA053)

第一作者简介:李农发(1961-),高级工程师,主要从事地震仪器设备研发。E-mail:271291159@qq.com。

通信作者:赵义飞,中级工程师,主要从事地震仪器设备研发。E-mail:280749956@qq.com。

SKZ-3 分量钻孔应变仪的传感器探头比较精密,分辨力达到 10^{-10} 一般测试设备无法直接准确测量其格值、灵敏度、线性度、频率响应等参数^[2-3],本文主要讨论 SKZ-3 分量钻孔应变仪的测试方法。

1 SKZ-3 分量钻孔应变仪传感器探头

分量钻孔应变观测的对象是水平面应变的状态变化,分量钻孔应变仪直接测量的是探头套筒内壁某方位直径的相对变化。SKZ-3 分量钻孔应变仪,采用三极板电容传感器,感受筒为不锈钢材质,使用高精度线切割加工成 8 个均布的肋条,沿着 45° 夹角水平放置四个电容式位移传感器,以便感受筒内径的变化,钻孔孔径的变化使电容极板的间隙变化,引起电容量改变。测量电路将电容量的变化转换成电信号并通过信号电缆送至地面,其四个测量值 S_i ($i=1, 2, 3, 4$) 满足自洽方程: $S_1 + S_3 = S_2 + S_4$ 。SKZ-3 分量钻孔应变仪传感器探头内部机械结构示意图参见图 1 所示。

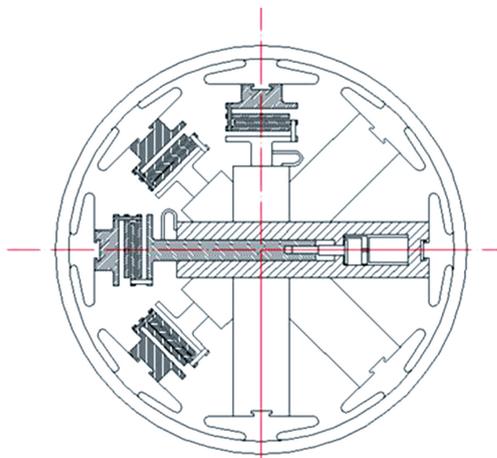


图 1 传感器内部机械结构图

Fig.1 Mechanical structure of sensor

2 SKZ-3 分量钻孔应变仪测试方法

2.1 测试设备与测试环境

SKZ-3 分量钻孔应变仪出厂测试中用到的主要测试设备有:专用应变仪探头测试平台、高精度数字万用表;德国 PI 压电陶瓷控制系统;美国 Lion 高精度电容位移传感器;高频数据采集器;示波器等。

SKZ-3 分量钻孔应变仪对测试环境有严格要求,尽量模拟安装后的工作环境,测试实验室为恒温密闭环境,电网电压 $220\text{ V} \pm 10\text{ V}$,有网络接入,无强电磁干扰,测试实验室隔断为内外两间,内间有宽 2 m 长 3 m 深 1.5 m 的基岩墩,专用测试平台放置

在基岩墩上,测试设备和被测仪器传感器应在测试平台上安装稳定 24 h 以上,测试时测试人员在外间操作。

2.2 线性度测试

(1) 测试方法

① 由高精度闭环压电陶瓷控制系统向应变仪探头输入径向位移量 X_i ,并按探头量程满度值的 10% 等步距变化;在与压电陶瓷安装方向垂直的径向通过高精度美国微位移传感器测得应变仪传感器的径向位移变化量,由高精度数据采集器记录应变仪传感器的输出电压信号 Y_i ,采用最小二乘法拟合求出线性偏差。

② 采用最小二乘法拟合曲线:

$$y_i = a + bx_i \quad (1)$$

式中: x_i 为压电陶瓷给定的位移量; y_i 为电压拟合值。

$$\text{平均值为: } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, n \text{ 为测量}$$

点数。

各系数计算公式:

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, b = L_{xy}/L_{xx}$$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

③ 求线性偏差值:

$$\Delta y_i = y_i - Y_i \quad (2)$$

式中: Δy_i 为拟合值 y_i 和实测值 Y_i 的差值,其最大差值为 Δy_{\max} ; Y_i 表示数据采集器记录的与 x_i 对应的实际电压输出,则线性度为:

$$\delta = \frac{\Delta y_{\max}}{\Delta y_{FS}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Δy_{FS} 表示电压测量值的满量程输出。

(2) 测试连接图

测试设备连接图见图 2 所示,其中压电陶瓷采用高精度德国 PI 压电陶瓷,控制系统为德国 PI 闭环压电陶瓷控制系统。

2.3 分辨力测试

(1) 分辨力推算方法

限于实验室条件容易受到电磁干扰和温度的影响,根据 DB/T 31.2-2008 地震行业标准规定用固体潮平缓变化部分的微小信号作为信号源,用观测记录值推算仪器的分辨力。因固体潮数据曲线中会有

一段变化相对平稳,故可取该段理论固体潮作为信号源来推算仪器的分辨力。在固体潮信号(理论值)极值点附近约10~20个分辨力指标(即 $5 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-10}$)范围内,将以时间为变量的信号序列转换成以0.5~1倍分辨力的应变量为变量的信号序列,在极值点区域归算后的测量值与理论值之差就是仪器不能响应的部分,也即仪器的分辨力。为此我们选取了已经安装好的盐津北西和北东两个方向的数据来做分辨力分析处理。

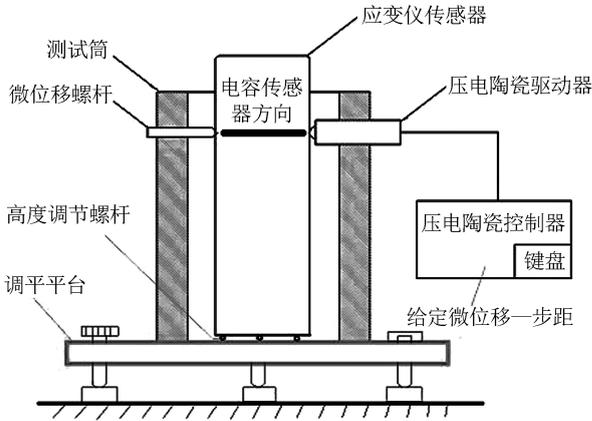


图2 线性度测试设备连接图

Fig.2 Connection diagram of linearity test equipment

首先,在理论值序列中找到波峰或者波谷作为极值数 d_0 ,其对应时间序列为 t_0 。按公式(4)和(5)计算 d_0 两边应变值变化 Δd ($i=1$)时相应的理论值 d_1, d_{-1} ,并在理论值序列中找到 d_1, d_{-1} 对应时间 t_1, t_{-1} ,并计算出时间间隔 $T_1 = t_1 - t_0, T_{-1} = t_{-1} - t_0$ 。

$$d_1 = d_0 + i * \Delta d \quad (4)$$

$$d_{-1} = d_0 - i * \Delta d \quad (5)$$

式中: Δd 为标准步进量即数据取样点的应变值差值,取值应小于仪器要求的分辨力(5×10^{-10})。四分量钻孔应变仪取标准步距 $\Delta d = +(2 \sim 3) \times 10^{-10}$ 或 $-(2 \sim 3) \times 10^{-10}$ 为宜,当以曲线波峰为极值时用“-”表示,以曲线波谷为极值时用“+”表示。用同样方式在理论值序列中可以得到 $i=2$ 时对应的 d_2, d_{-2} 及时间间隔 T_2, T_{-2} 。以此类推,直到 $i=n$,即可得到 $2n$ 个以 Δd 为间隔的理论值序列 d_i 和相应时间间隔序列 $T_1, T_2, T_3 \dots T_n \dots T_{-n}$,同时得到该序列总时间差 $T = T_n - T_{-n}$ 。 n 的取值个数以7~15为宜,使应变值变化速度维持在 $3 \times 10^{-10}/4 \text{ min} \sim 3 \times 10^{-10}/4.5 \text{ min}$ 。

在经过平滑后用于推算的观测序列中,用 $T = T_n - T_{-n}$ 找到波峰或者波谷两边具有相同观测值

的两点 d'_n 和 d'_{-n} ,其对应时间为 $t_n + \Delta t, t_{-n} + \Delta t, \Delta t$ 是观测值对应于理论值的滞后。根据曲线的对称性计算观测值序列的极值点对应的 $t'_0 = \Delta t + (t_n + t_{-n})/2$,并确定极值 d'_0 。

以 d'_{-n} 和 d'_n 为起点,根据时间间隔序列 T_i ($i = -n, \dots, -1, 1, \dots, n$),找出对应的 $2n$ 个观测序列 d'_i ($i = -n, \dots, -1, 1, \dots, n$),由式(6)计算归一化系数 k 。

$$k = \frac{2 \times (n - 2)}{(d'_n - d'_{-2}) + (d'_{-n} - d'_{-2})} \times \frac{3 \times 10^{-10}}{10^{-10}} \quad (6)$$

由式(7)计算归一化序列值 d''_i

$$d''_i = k \times d'_i, (i = -n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n) \quad (7)$$

通过公式计算出来归一化序列的拟合值 \bar{d}''_i ,则 $\Delta d''_i$ 系列中 $\Delta \bar{d}''_{-2} \sim \Delta d''_2$ 之间的最大值 $\Delta d''_{\max}$ 为仪器的分辨力。

$$\Delta d''_i = d''_i - \bar{d}''_i \quad (8)$$

2.4 灵敏度(格值)测试

灵敏度(格值)测试采用闭环压电陶瓷和微位移螺杆在1号元件方向上重复给定位移 $1 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m} \dots$ 同时在与1号成 90° 的3号元件方向上用美国微位移传感器分别测量该方向上应变仪传感器的径向位移 $\Delta d_1, \Delta d_2$,则该测量方向总位移 $\Delta d = \Delta d_1 + \Delta d_2$,同时记录应变仪3号元件的电压输出值改变量 Δu ,则灵敏度为: $s = \Delta u / \Delta d$ (单位: mV/nm),格值为: $\eta = \Delta d / (D * \Delta u)$ (单位: $10^{-9}/\text{mV}, D = 100 \text{ mm}$)。其测试设备连接图见图3和图4所示。

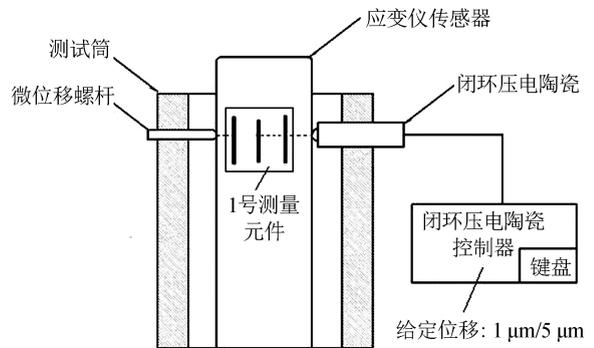


图3 灵敏度(格值)测试设备连接图——给定位移测试

Fig.3 Connection diagram of sensitivity (cell value) test equipment——Testing under displacement constraints

2.5 频带范围测试

通过开环压电陶瓷控制器给开环压电陶瓷输入正弦波电压信号,该正弦波信号通过开环压电陶瓷

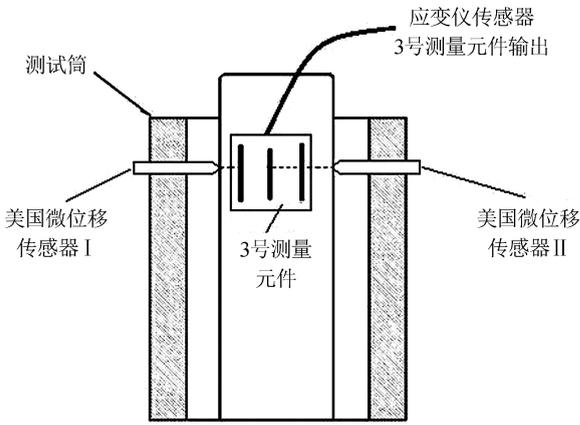


图 4 灵敏度(格值)测试设备连接图——应变仪形变检测

Fig.4 Connection diagram of sensitivity (cell value) test equipment——Detection of strain gauge deformation

传递给应变仪传感器筒壁,传感器筒壁做正弦波震动,用测震的凯尼高频数据采集器采集应变仪传感

器输出信号(其中 $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} = 1 \text{ mV}$),采样率设为 2 000 Hz,设备连接图见图 5 所示。测试中首先给开环压电陶瓷施加 30 V 的直流电压,数采记录应变仪的输出,然后给压电陶瓷施加峰值 30 V 不同频率的正弦交流电压信号,通过高频数采记录应变仪传感器的输出波形(图 6)和数据,进而分析应变仪的频带范围。

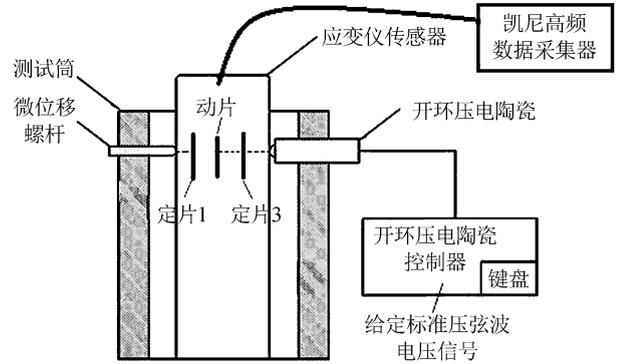


图 5 频带测试连接图

Fig.5 Connection diagram of band test

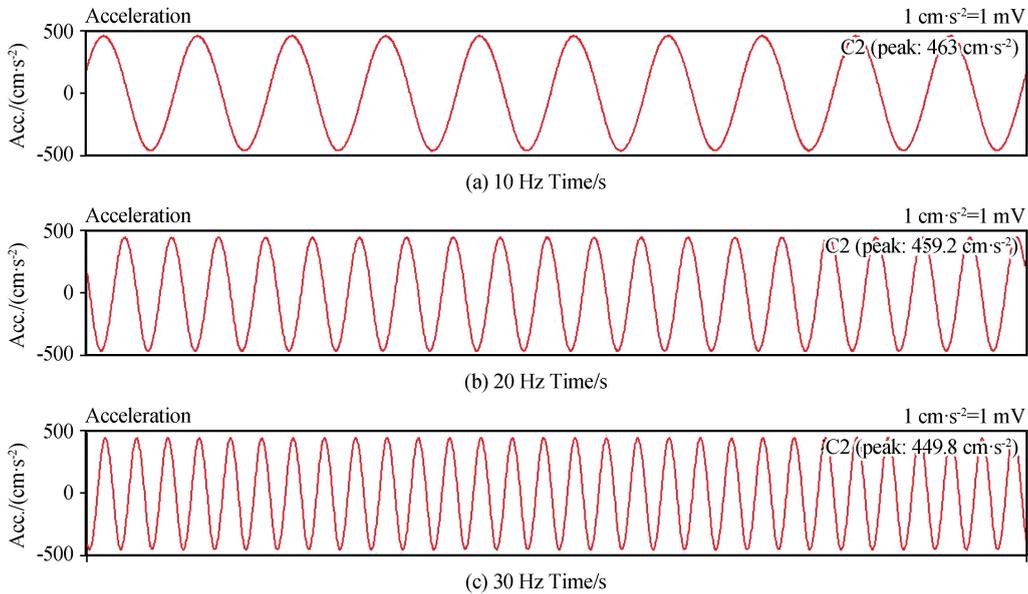


图 6 凯尼数采的存储波形

Fig.6 Storage waveform of data acquisition

3 测试结果分析

3.1 线性度测试

测试数据如表 1、表 2 所列,分别为应变仪传感器 1 号和 3 号两个方向的线性度测试结果,当 $\delta \leq 1\%$ 时,判定为仪器满足线性度要求。

由上述公式(3)计算 1 号通道的线性度为:

$$\delta = \frac{\Delta y_{\max}}{\Delta y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.0232}{1.643 - (-1.661)} \times 100\% = 0.70\%$$

由上述公式(3)计算 3 号通道的线性度为:

$$\delta = \frac{\Delta y_{\max}}{\Delta y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.0186}{1.553 - (-1.526)} \times 100\% = 0.60\%$$

3.2 分辨力计算

计算数据选择山西大宁县地震台大潮段 2019 年 3 月 15 日分钟数据进行计算,计算结果见表 3、表 4 所列,经计算 NS 向分辨力 = 3.92×10^{-10} ,EW 向分辨力 = 4.61×10^{-10} ,满足分量钻孔应变仪入网技术指标 $\leq 5 \times 10^{-10}$ 的要求。

表1 应变仪探头1号通道线性度测试记录表

Table 1 Linearity test table for channel 1 of strain gauge

序号	压电陶瓷输出 位移 $x_i/\mu\text{m}$	应变仪输出 电压 Y_i/V	拟合值 y_i/V	偏差 Δy_i /V
1	0.9	1.643	1.665 6	0.022 6
2	1.1	1.323	1.335 3	0.012 3
3	1.3	1.007	1.004 9	-0.002 1
4	1.5	0.684	0.674 6	-0.009 4
5	1.7	0.359	0.344 3	-0.014 7
6	1.9	0.031	0.013 9	-0.017 1
7	2.1	-0.300	-0.316 4	-0.016 4
8	2.3	-0.638	-0.646 8	-0.008 8
9	2.5	-0.978	-0.977 1	0.000 9
10	2.7	-1.317	-1.307 5	0.009 5

表2 应变仪探头3号通道线性度测试记录表

Table 2 Linearity test table for channel 3 of strain gauge

序号	压电陶瓷输出 位移 $x_i/\mu\text{m}$	应变仪输出 电压 Y_i/V	拟合值 y_i/V	偏差 Δy_i /V
1	0.5	1.553	1.571 6	0.018 6
2	0.7	1.257	1.263 0	0.006 0
3	0.9	0.960	0.954 4	-0.005 6
4	1.1	0.655	0.645 9	-0.009 1
5	1.3	0.346	0.337 3	-0.008 7
6	1.5	0.038	0.028 7	-0.009 3
7	1.7	-0.271	-0.279 8	-0.008 8
8	1.9	-0.585	-0.588 4	-0.003 4
9	2.1	-0.901	-0.897 0	0.004 0
10	2.3	-1.210	-1.205 6	0.004 4
11	2.5	-1.526	-1.514 1	0.011 9

表3 大宁2019年3月15日分辨率推算—北南向

Table 3 Resolution calculation for Daning on March 15, 2019 (NS)

i	日期和 时间	理论值 d_i ($\times 10^{-9}$)	时间间隔 T_i/min	观测值 d'_i /($\times 10^{-10}$)	归一化值 d''_i /($\times 10^{-10}$)	拟合值 d'''_i /($\times 10^{-10}$)	差值 $\Delta d''_i$ /($\times 10^{-10}$)
-7	19:20	13.472 6	62	7 904.74	-12 692.96	-	-
-6	19:25	13.685 3	57	7 906.77	-12 696.21	-12 698.30	2.09
-5	19:30	13.881 6	52	7 908.59	-12 699.14	-12 700.30	1.16
-4	19:36	14.094 9	46	7 910.64	-12 702.44	-12 702.30	0.14
-3	19:42	14.283 4	40	7 912.54	-12 705.49	-12 704.30	1.19
-2	19:49	14.471 4	33	7 914.26	-12 708.24	-12 706.30	1.94
-1	19:59	14.679	23	7 916.03	-12 711.09	-12 708.30	2.79
0	20:22	14.876 4	0	7 917.98	-12 714.22	-12 710.30	3.92
1	20:45	14.674 8	23	7 915.64	-12 710.46	-12 708.30	2.16
2	20:54	14.487	32	7 914.04	-12 707.89	-12 706.30	1.59
3	21:01	14.298 9	39	7 912.31	-12 705.11	-12 704.30	0.81
4	21:07	14.108 8	45	7 910.80	-12 702.69	-12 702.30	0.39
5	21:13	13.892 3	51	7 908.66	-12 699.26	-12 700.30	1.04
6	21:18	13.692	56	7 906.71	-12 696.12	-12 698.30	2.18
7	21:23	13.473 9	61	7 904.88	-12 693.17	-	-
$K = -1.605 74$				分辨率 = $\Delta d''_{\max} = 3.92 \times 10^{-10} < 5 \times 10^{-10}$			

表4 大宁2019年3月15日分辨率推算—东西向

Table 4 Resolution calculation for Daning on March 15, 2019 (EW)

i	日期和 时间	理论值 d_i ($\times 10^{-9}$)	时间间隔 T_i/min	观测值 d'_i /($\times 10^{-10}$)	归一化值 d''_i /($\times 10^{-10}$)	拟合值 d'''_i /($\times 10^{-10}$)	差值 $\Delta d''_i$ /($\times 10^{-10}$)
-7	19:06	15.27	71	-6 789.945	13 192.05	-	-
-6	19:12	15.48	65	-6 788.411	13 189.07	13 187.33	1.74
-5	19:18	15.68	59	-6 786.976	13 186.28	13 185.33	0.95
-4	19:24	15.87	53	-6 785.375	13 183.17	13 183.33	0.16
-3	19:32	16.08	45	-6 783.378	13 179.29	13 181.33	2.04
-2	19:41	16.29	36	-6 781.705	13 176.04	13 179.33	3.29
-1	19:52	16.49	25	-6 780.633	13 173.96	13 177.33	3.37
0	20:17	16.688	0	-6 778.972	13 170.73	13 175.33	4.60
1	20:44	16.49	27	-6 781.321	13 175.29	13 177.33	2.04
2	20:54	16.3	37	-6 783.047	13 178.65	13 179.33	0.68
3	21:02	16.11	45	-6 784.041	13 180.58	13 181.33	0.75
4	21:09	15.91	52	-6 785.896	13 184.18	13 183.33	0.85
5	21:15	15.71	58	-6 787.098	13 186.52	13 185.33	1.19
6	21:21	15.49	64	-6 788.667	13 189.57	13 187.33	2.24
7	21:26	15.29	69	-6 790.248	13 192.64	-	-
$K = -1.942 88$				分辨率 = $\Delta d''_{\max} = 4.60 \times 10^{-10} < 5 \times 10^{-10}$			

3.3 灵敏度(格值)测试

由表 5 计算可知 1 号元件正向位移灵敏度重复性为: $R_s = \frac{s'_{\max}}{\bar{s}} \times 100\% = \frac{0.011}{1.802} \times 100\% = 0.62\%$;

由表 5 计算可知 1 号元件正向位移格值重复性为:

$$R_\eta = \frac{\eta'_{\max}}{\bar{\eta}} \times 100\% = \frac{0.028}{5.236} \times 100\% = 0.53\%; \text{由表 6}$$

计算可知 3 号元件正向位移灵敏度重复性为: $R_s =$

$$\frac{s'_{\max}}{\bar{s}} \times 100\% = \frac{0.0083}{1.776} \times 100\% = 0.46\%; \text{由表 6 计}$$

算可知 3 号元件正向位移格值重复性为: $R_\eta = \frac{\eta'_{\max}}{\bar{\eta}}$

$$\times 100\% = \frac{0.026}{5.309} \times 100\% = 0.49\%.$$

表 5 灵敏度测试数据——正向位移 1 μm 到 5 μm 计算结果(1 号元件数据)

Table 5 Sensitivity test data: results of forward displacement 1 μm to 5 μm (data for component 1)

测微移 $\Delta d_1/\mu\text{m}$	测微移 $\Delta d_2/\mu\text{m}$	测量方向总位移 $\Delta d/\mu\text{m}$	输出电压值 $\Delta u/\text{mV}$	灵敏度 s /(mV/nm)	灵敏度均差 s' /(mV/nm)	格值 η /($\times 10^{-9}$ mV)	格值均差 η' /($\times 10^{-9}$ mV)
0.85	0.7	1.55	2 799	1.806	0.004	5.226	0.010
0.84	0.69	1.53	2 771	1.811	0.009	5.208	0.028
0.84	0.69	1.53	2 756	1.801	0.001	5.236	0.000
0.83	0.69	1.52	2 744	1.805	0.003	5.226	0.010
0.83	0.69	1.52	2 731	1.797	0.005	5.255	0.019
0.82	0.69	1.51	2 721	1.802	0.000	5.236	0.000
0.82	0.69	1.51	2 711	1.795	0.007	5.255	0.019
0.82	0.69	1.51	2 704	1.791	0.011	5.264	0.028
0.81	0.69	1.5	2 692	1.795	0.007	5.255	0.019
0.81	0.67	1.48	2 681	1.811	0.010	5.208	0.028
0.81	0.67	1.48	2 671	1.805	0.003	5.226	0.010
0.81	0.67	1.48	2 669	1.803	0.002	5.236	0.000
灵敏度平均值 $\bar{s} = 1.802 \text{ mV/nm}$		灵敏度均差最大值 $s'_{\max} = 0.011$		格值平均值 $\bar{\eta} = 5.236(\times 10^{-9}/\text{mV})$		格值均差 $\eta'_{\max} = 0.028$	

表 6 灵敏度测试数据——正向位移 1 μm 到 5 μm 计算结果(3 号元件数据)

Table 6 Sensitivity test data: results of forward displacement 1 μm to 5 μm (data for component 3)

测微移 $\Delta d_1/\mu\text{m}$	测微移 $\Delta d_2/\mu\text{m}$	测量方向总位移 $\Delta d/\mu\text{m}$	输出电压值 $\Delta u/\text{mV}$	灵敏度 s /(mV/nm)	灵敏度均差 s' /(mV/nm)	格值 η /($\times 10^{-9}$ mV)	格值均差 η' /($\times 10^{-9}$ mV)
0.76	0.712	1.472	2 627	1.785	0.008 3	5.283	0.026
0.76	0.711	1.471	2 619	1.780	0.004 1	5.302	0.007
0.76	0.708	1.468	2 612	1.779	0.003 0	5.302	0.007
0.76	0.715	1.475	2 609	1.769	0.007 5	5.330	0.021
0.76	0.708	1.468	2 603	1.773	0.003 2	5.321	0.012
0.76	0.704	1.464	2 604	1.779	0.002 4	5.302	0.007
0.76	0.71	1.47	2 600	1.769	0.007 6	5.330	0.021
0.75	0.712	1.462	2 595	1.775	0.001 4	5.311	0.002
0.75	0.708	1.458	2 590	1.776	0.000 1	5.311	0.002
0.75	0.702	1.452	2 582	1.778	0.001 9	5.302	0.007
灵敏度平均值 $\bar{s} = 1.776 \text{ mV/nm}$		灵敏度均差最大值 $s'_{\max} = 0.0083$		格值平均值 $\bar{\eta} = 5.309(\times 10^{-9}/\text{mV})$		格值均差 $\eta'_{\max} = 0.026$	

由此可见,压电陶瓷给定正向位移时灵敏度及格值标定重复性均小于 1%,符合分量钻孔应变仪行业规定。

3.4 频带范围测试

由图 7 分析可知幅度增益在 -3 dB 时频率处于 100~105 Hz 之间,认为该频带处即为本仪器的截止频率,因此本传感器频率响应能够达到 100 Hz。

4 结语

经测试数据计算结果分析及实际台站运行结果可以看出,SKZ-3 分量钻孔应变仪各项技术指标均达到了分量钻孔应变入网观测技术要求,可安装应用于高精度应变观测。通过对测试设备的不断更新和测试方法的改进,可有效检测 SKZ-3 分量钻孔应变仪出厂安装前的技术指标,保证仪器的出厂质量,

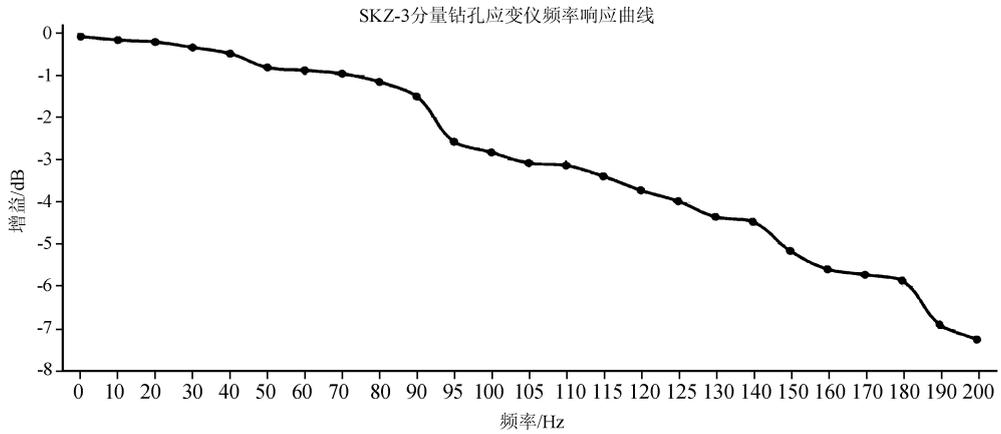


图7 频带范围测试

Fig.7 Band range test

能更客观地反应 SKZ-3 分量钻孔应变观测资料的质量,这对及时、准确评价 SKZ-3 分量钻孔应变仪的安全可靠性具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] 欧阳祖熙,等.地壳形变深井综合观测技术的新进展[J].国际地震动态,2009,(11):1-13.
OUYANG Zuxi, et al. New Progress in Multi Component Observation of Crustal Deformation in Deep Boreholes[J]. Recent Developments in World Seismology, 2009, (11): 1-13.

- [2] 邱泽华,石耀林等.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,(2):1-25.
QIU Zehua, SHI Yaolin, et al. Relative in-situ Calibration of 4-component Borehole Strain Observation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, (2): 1-25.
- [3] 欧阳祖熙.RZB型钻孔应变仪原位标定技术研究[J].大地测量与地球动力学,2013,(2):1-33.
OUYANG Zuxi. Research on in-situ Calibration Technique of RZB Borehole Strainmeters[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, (2): 1-33.