

垂直摆倾斜仪校准试验报告

1 . 试验目的

在《垂直摆倾斜仪校准规范》（以下简称“校准规范”）制定过程中，为了合理的确定各校准项目的技术要求及方法，我们选取台网中应用的三种垂直摆倾斜仪作为校准对象，按照校准规范制定的校准方法对各项目进行测试，验证该校准规范的正确性、可行性和可操作性。

2. 试验情况

2.1 试验一基本情况

被校设备：井下垂直摆倾斜仪

校准地点：武汉地震台九峰山洞（温度19.7℃，湿度70.67%）

校准设备：（1）激光干涉仪
 （2）倾斜检测平台
 （3）数据采集器

2.2 试验一校准项目

校准现场见图1所示。



图1 井下垂直摆倾斜仪校准

(1) 灵敏度

校准结果:

分量: 北南向

	输入		仪器输出	灵敏度
	干涉仪	倾角		
序号	ΔH (μm)	x (")	y (V)	n (V/")
1	9.2135	1.900423	3.4932	1.82
2	9.2128	1.900278	3.4492	
3	9.2157	1.900876	3.4767	
4	9.2144	1.900608	3.4437	
5	9.2156	1.900856	3.4713	
6	9.2133	1.900381	3.4492	
7	9.2155	1.900835	3.467	
8	9.2143	1.900588	3.4438	
9	9.2176	1.901268	3.4603	
10	9.2146	1.900649	3.4437	
平均值	9.21473	1.900676	3.45981	

分量: 东西向

	输入		仪器输出	灵敏度
	干涉仪	倾角		
序号	ΔH (μm)	x (")	y (V)	n (V/")
1	9.2235	1.902485	3.2632	1.71
2	9.2228	1.902341	3.2592	
3	9.2257	1.902939	3.2367	
4	9.2244	1.902671	3.2437	
5	9.2256	1.902918	3.2713	
6	9.2233	1.902444	3.2492	
7	9.2255	1.902898	3.2182	
8	9.2243	1.902650	3.2438	
9	9.2276	1.903331	3.2603	
10	9.2246	1.902712	3.2437	
平均值	9.22473	1.902739	3.24893	

(2) 分辨力

校准结果:

固体潮推算倾斜仪分辨力计算表

分量：北南向

i	日期和时间	理论值 d_i (0.001")	时间间隔 T_i (min)	观测值 d'_i (0.001")	归一化 d''_i (0.001")	拟合值 $\overline{d''_i}$ (0.001")	差值 $\Delta d''_i$ (0.001")
-7	05: 14	0.467	42	7.381	-10.002		
-6	05: 17	0.563	39	7.450	-10.095	-10.084	0.01
-5	05: 21	0.680	35	7.530	-10.202	-10.184	0.02
-4	05: 25	0.785	31	7.603	-10.301	-10.284	0.02
-3	05: 29	0.877	27	7.657	-10.375	-10.384	0.01
-2	05: 34	0.976	22	7.730	-10.474	-10.484	0.01
-1	05: 41	1.080	15	7.782	-10.544	-10.584	0.04
0	05: 56	1.174	0	7.861	-10.652	-10.684	0.03
1	06: 12	1.076	16	7.807	-10.579	-10.584	0.00
2	06: 19	0.969	23	7.753	-10.506	-10.484	0.02
3	06: 24	0.868	28	7.654	-10.370	-10.384	0.01
4	06: 28	0.774	32	7.567	-10.253	-10.284	0.03
5	06: 32	0.667	36	7.504	-10.167	-10.184	0.02
6	06: 35	0.579	39	7.449	-10.093	-10.084	0.01
7	06: 38	0.484	42	7.364	-9.978		
$K=-1.355$				分辨力 $\Delta d''_{i \max} = 0.00004''$			

分量：东西向

i	日期和时间	理论值 d_i (0.001")	时间间隔 T_i (min)	观测值 d'_i (0.001")	归一化 d''_i (0.001")	拟合值 $\overline{d''_i}$ (0.001")	差值 $\Delta d''_i$ (0.001")
-7	08: 49	11.235	36	12.107	-15.527		
-6	08: 52	11.351	33	12.200	-15.646	-15.624	0.02
-5	08: 55	11.457	30	12.285	-15.755	-15.724	0.03
-4	08: 58	11.553	27	12.356	-15.846	-15.824	0.02
-3	09: 02	11.666	23	12.443	-15.959	-15.924	0.03
-2	09: 06	11.761	19	12.521	-16.058	-16.024	0.03
-1	09: 12	11.870	13	12.579	-16.132	-16.124	0.01
0	09: 25	11.967	0	12.627	-16.195	-16.224	0.03
1	09: 39	11.864	14	12.518	-16.054	-16.124	0.07
2	09: 45	11.754	20	12.449	-15.965	-16.024	0.06
3	09: 49	11.660	24	12.386	-15.885	-15.924	0.04
4	09: 53	11.549	28	12.315	-15.794	-15.824	0.03

5	09: 56	11.454	31	12.252	-15.713	-15.724	0.01
6	09: 59	11.351	34	12.175	-15.614	-15.624	0.01
7	10: 02	11.238	37	12.083	-15.496		
K=-1.828				分辨力 $\Delta d_{i \max}''=0.00007''$			

分辨力计算数据选择大潮段2021年2月12日分数据进行计算，经计算北南向NS分辨力为0.00004''，东西向EW分辨力0.00007''。

(3) 量程

校准结果：

量程测试数据表格

分量：北南向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i (")
1	1.1376	0.23464
2	2.1034	0.43385
3	3.1654	0.65292
4	4.1322	0.85233
5	5.1497	1.0622
6	6.1984	1.2785
7	7.2629	1.4981
8	8.1481	1.6807
9	9.2155	1.9008
10	10.266	2.1175

分量：东西向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i (")
1	1.1376	0.23464
2	2.1034	0.43385
3	3.1654	0.65292
4	4.1322	0.85233
5	5.1497	1.0622
6	6.1984	1.2785
7	7.2629	1.4981
8	8.1481	1.6807
9	9.2155	1.9008
10	10.266	2.1175

量程由以上可得出北南向：2.12 "，东西向：2.11 "。

(3) 线性度误差

校准结果:

线性度误差数据表格

分量: 北南向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i ($''$)	倾斜仪输出 y_i (mV)	直线拟合值 Y_i (mV)	线性偏差 Δy_i (mV)
1	1.1376	0.23464	427.09	427.2	0.10673
2	2.1034	0.43385	789.68	790.44	0.75725
3	3.1654	0.65292	1190.1	1189.9	0.17732
4	4.1322	0.85233	1552.7	1553.5	0.79637
5	5.1497	1.0622	1936.3	1936.2	0.08862
6	6.1984	1.2785	2330.7	2330.6	0.12699
7	7.2629	1.4981	2731.7	2731.0	0.76038
8	8.1481	1.6807	3066.7	3063.9	2.7496
9	9.2155	1.9008	3467.0	3465.4	1.622
10	10.266	2.1175	3856.6	3860.5	3.8646
		$x = \frac{\Delta H}{L} \rho$	$\Delta y_{FS} = 3856.6$	$d = 0.1\%$	

分量: 东西向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i ($''$)	倾斜仪输出 y_i (mV)	直线拟合值 Y_i (mV)	线性偏差 Δy_i (mV)
1	1.1376	0.23464	394.65	393.9	0.75623
2	2.1034	0.43385	731.28	731.41	0.13531
3	3.1654	0.65292	1101.5	1102.6	1.0489
4	4.1322	0.85233	1439.8	1440.4	0.6122
5	5.1497	1.0622	1795.4	1796.0	0.60073
6	6.1984	1.2785	2162.3	2162.5	0.17028
7	7.2629	1.4981	2535.0	2534.5	0.5417
8	8.1481	1.6807	2846.7	2843.8	2.8879
9	9.2155	1.9008	3218.2	3216.9	1.3583
10	10.266	2.1175	3581.0	3584.0	2.9767
		$x = \frac{\Delta H}{L} \rho$	$\Delta y_{FS} = 3581.0$	$d = 0.1\%$	

线性度误差校准结果北南向: 0.1%, 东西向0.1%。

(4) 频带范围

校准结果:

频带范围测试数据

分量: 北南向

传递函数: $\frac{1}{0.1255s^2+0.7643s+1}$

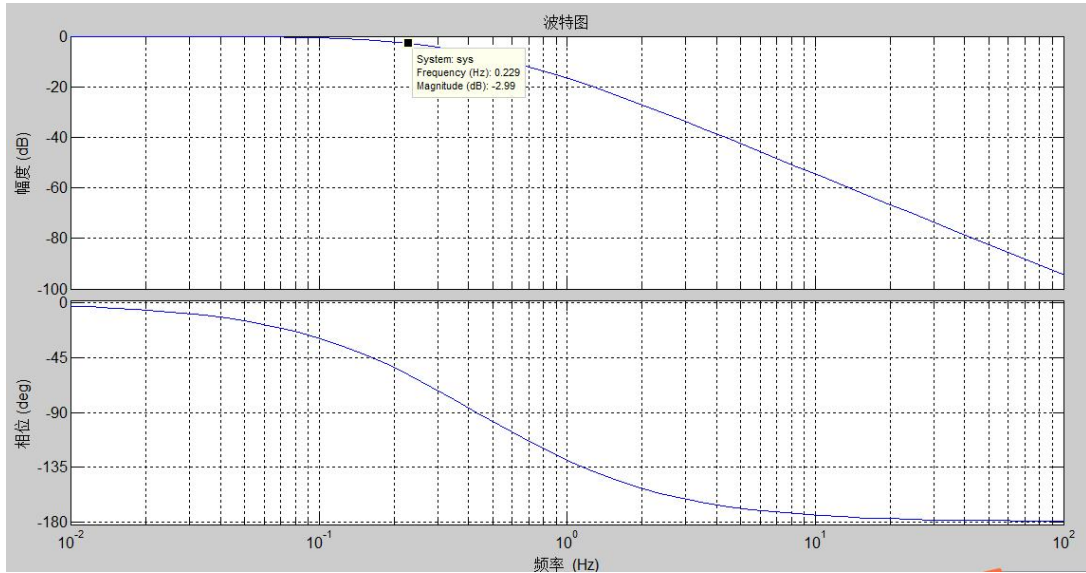


图2 北南向幅频特性曲线图

分量: 东西向

传递函数: $\frac{1}{0.2035s^2+0.963s+1}$

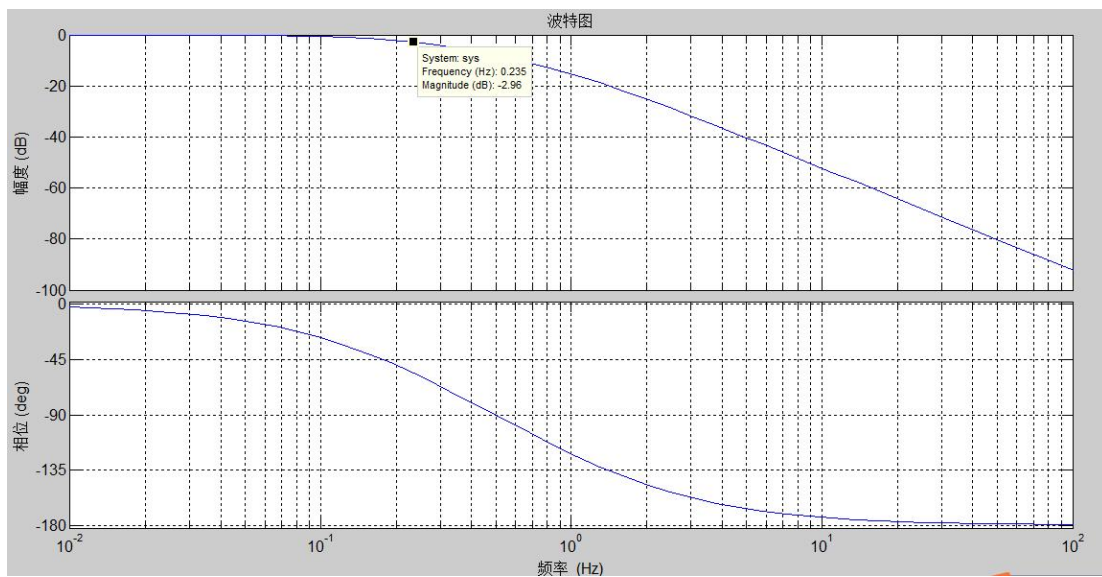


图3 东西向幅频特性曲线图

频带范围校准结果北南向: 0.229Hz (4.36s) ~1a, 东西向: 0.235Hz (4.25s) ~1a。

2.3 试验二基本情况

被校设备：垂直摆倾斜仪

校准地点：武汉地震台九峰山洞（温度19.2℃，湿度72.1%）

校准设备：（1）激光干涉仪
（2）倾斜检测平台
（3）数据采集器

2.4试验二校准项目

校准现场见图4所示。



图4垂直摆倾斜仪校准

（1）分辨力

校准结果：

固体潮推算倾斜仪分辨力计算表

分量：北南向

i	日期和时间	理论值 d_i (0.001")	时间间隔 T_i (min)	观测值 d'_i (0.001")	归一化 d''_i (0.001")	拟合值 \bar{d}''_i (0.001")	差值 $\Delta d''_i$ (0.001")
-7	01:51	-5.0217	59	12.808	17.71238		
-6	01:56	-4.9061	54	12.881	17.81333	17.766	0.05
-5	02:01	-4.7998	49	12.944	17.90045	17.866	0.03
-4	02:06	-4.7031	44	12.984	17.95577	17.966	0.01
-3	02:12	-4.6001	38	13.026	18.01385	18.066	0.05
-2	02:19	-4.4981	31	13.065	18.06778	18.166	0.10
-1	02:28	-4.3967	22	13.164	18.20469	18.266	0.06
0	02:50	-4.2935	0	13.239	18.30841	18.366	0.06
1	03:11	-4.3905	21	13.157	18.19501	18.266	0.07
2	03:20	-4.4905	30	13.118	18.14108	18.166	0.02
3	03:27	-4.5923	37	13.064	18.0664	18.066	0.00
4	03:33	-4.696	43	13.001	17.97928	17.966	0.01
5	03:38	-4.7937	48	12.938	17.89215	17.866	0.03
6	03:43	-4.9017	53	12.893	17.82992	17.766	0.06
7	03:47	-4.9953	57	12.835	17.74971		
$K=1.8518$				分辨力 $\Delta d''_{i \max} = 0.0001''$			

分量：东西向

i	日期和时间	理论值 d_i (0.001")	时间间隔 T_i (min)	观测值 d'_i (0.001")	归一化 d''_i (0.001")	拟合值 \bar{d}''_i (0.001")	差值 $\Delta d''_i$ (0.001")
-7	05:19	11.8967	43	23.616	32.65892		
-6	05:22	11.9917	40	23.7	32.77509	33.19477	0.12
-5	05:26	12.1079	36	23.839	32.96731	33.29477	0.13
-4	05:30	12.2122	32	23.977	33.15815	33.39477	0.14
-3	05:34	12.3044	28	24.066	33.28123	33.49477	0.11
-2	05:39	12.4025	23	24.142	33.38633	33.59477	0.11
-1	05:46	12.5076	16	24.283	33.58132	33.69477	0.11
0	06:02	12.6051	0	24.484	33.85929	33.79477	0.06
1	06:18	12.5032	16	24.487	33.86344	33.69477	0.17
2	06:25	12.3963	23	24.423	33.77493	33.59477	0.18
3	06:30	12.2971	28	24.402	33.74589	33.49477	0.15
4	06:34	12.2041	32	24.374	33.70717	33.39477	0.11
5	06:38	12.0992	36	24.31	33.61866	33.29477	0.12
6	06:42	11.9823	40	24.248	33.53292	33.19477	0.14
7	06:44	11.9195	42	24.224	33.49973		
$K=1.37931$				分辨力 $\Delta d''_{i \max} = 0.00018''$			

经计算北南向NS分辨力为0.0001"，东西向EW分辨力0.00018"。

(2) 量程

校准结果：

量程测试数据表格

分量：北南向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i (")
1	1.087	0.22421
2	2.05	0.422843
3	3.123	0.644166
4	4.097	0.845068
5	5.116	1.055252
6	6.169	1.272449
7	7.249	1.495215
8	8.236	1.698799
9	9.221	1.90197
10	10.3	2.12453

分量：东西向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i (")
1	1.085	0.223798
2	2.052	0.423256
3	3.121	0.643753
4	4.089	0.843418
5	5.113	1.054633
6	6.169	1.272449
7	7.202	1.485521
8	8.156	1.682297
9	9.295	1.917233
10	10.284	2.121229

量程由以上可得出北南向：2.12"，东西向：2.12"。

(3) 线性度误差

校准结果：

线性度误差数据表格

分量：北南向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i ($''$)	倾斜仪输出 y_i (mV)	直线拟合值 Y_i (mV)	线性偏差 Δy_i (mV)
1	1.087	0.22421	199.589	203.2257	3.636679
2	2.05	0.422843	376.902	376.843	0.058974
3	3.123	0.644166	569.005	570.2921	1.287053
4	4.097	0.845068	749.127	745.8926	3.234431
5	5.116	1.055252	929.793	929.606	0.186956
6	6.169	1.272449	1126.29	1119.449	6.840689
7	7.249	1.495215	1318.993	1314.16	4.832645
8	8.236	1.698799	1480.03	1492.105	12.07461
9	9.221	1.90197	1672.6	1669.688	2.911703
10	10.3	2.12453	1863.152	1864.219	1.067052
		$x = \frac{\Delta H}{L} \rho$	$\Delta y_{FS} = 1663.563$	$d = 0.65\%$	

分量：东西向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i ($''$)	倾斜仪输出 y_i (mV)	直线拟合值 Y_i (mV)	线性偏差 Δy_i (mV)
1	1.085	0.223798	184	182.3269	1.673095
2	2.052	0.423256	339	337.4987	1.501261
3	3.121	0.643753	509	509.0382	0.038233
4	4.089	0.843418	662.2	664.3705	2.170534
5	5.113	1.054633	826.3	828.689	2.389001
6	6.169	1.272449	996	998.1424	2.142421
7	7.202	1.485521	1171	1163.905	7.094907
8	8.156	1.682297	1314.19	1316.991	2.800853
9	9.295	1.917233	1490.9	1499.763	8.863054
10	10.284	2.121229	1666.6	1658.465	8.134833
		$x = \frac{\Delta H}{L} \rho$	$\Delta y_{FS} = 1485.6$	$d = 0.53\%$	

线性度误差校准结果北南向：0.65%，东西向0.53%。

(4) 频带范围

校准结果：

频带范围测试数据

分量：北南向

传递函数：
$$\frac{1}{0.1255s^2+0.7643s+1}$$

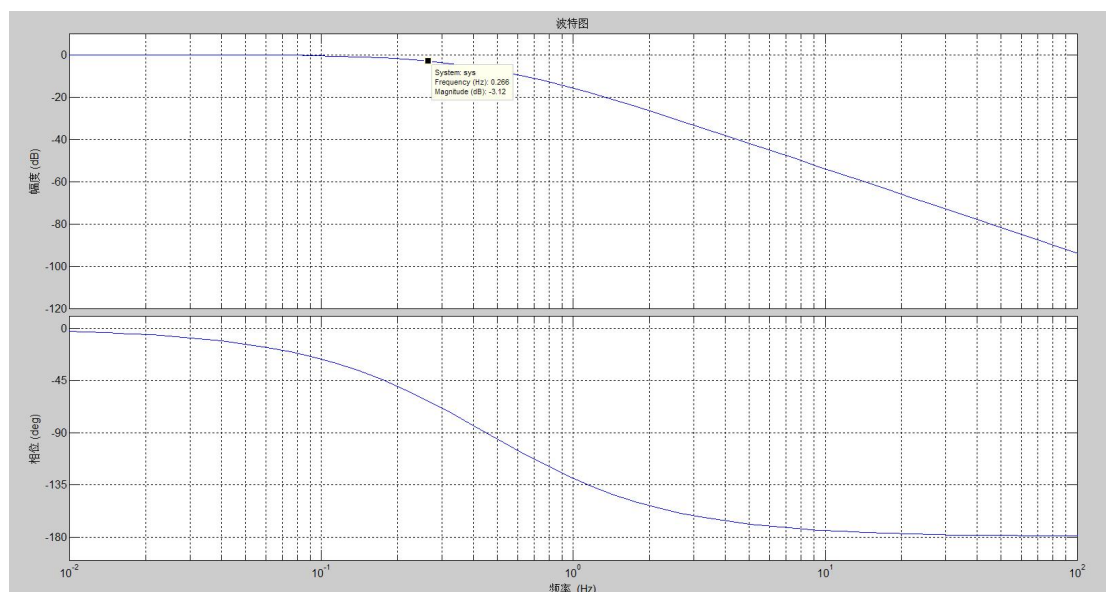


图5 北南向幅频特性曲线图

分量：东西向

传递函数：
$$\frac{1}{0.2035s^2+0.963s+1}$$

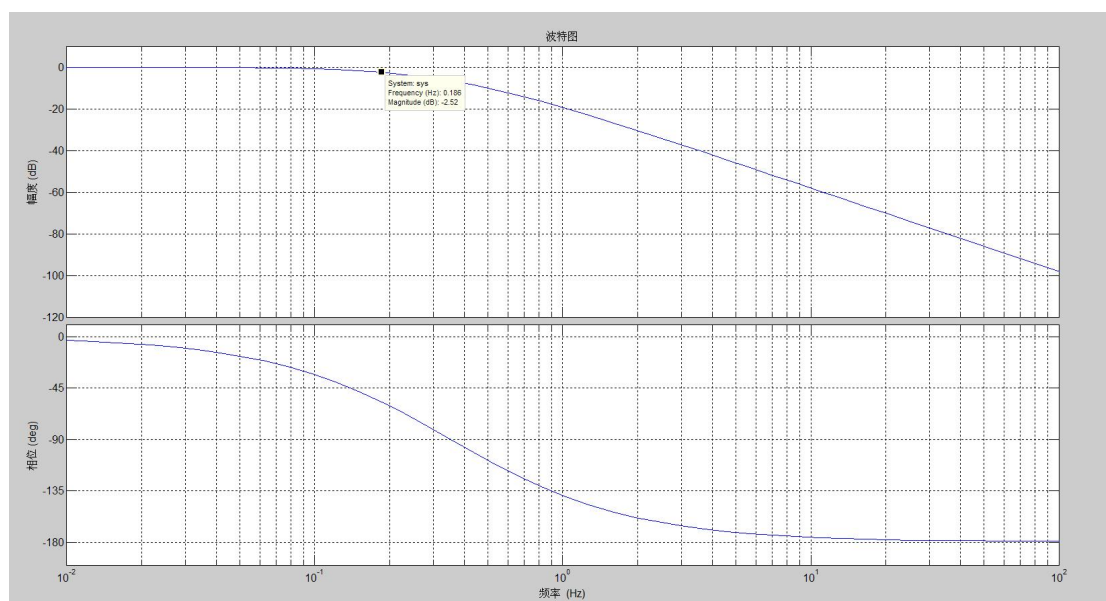


图6 东西向幅频特性曲线图

频带范围校准结果北南向：0.266Hz（3.76s）～1a，东西向：0.186Hz（5.37）～1a。

2.5 试验三基本情况

被校设备：竖直摆钻孔倾斜仪

校准地点：武汉地震台九峰山洞（温度19.2℃，湿度72%）

校准设备：（1）激光干涉仪

（2）倾斜检测平台

（3）数据采集器

2.6 试验三校准项目

校准现场见图7所示。

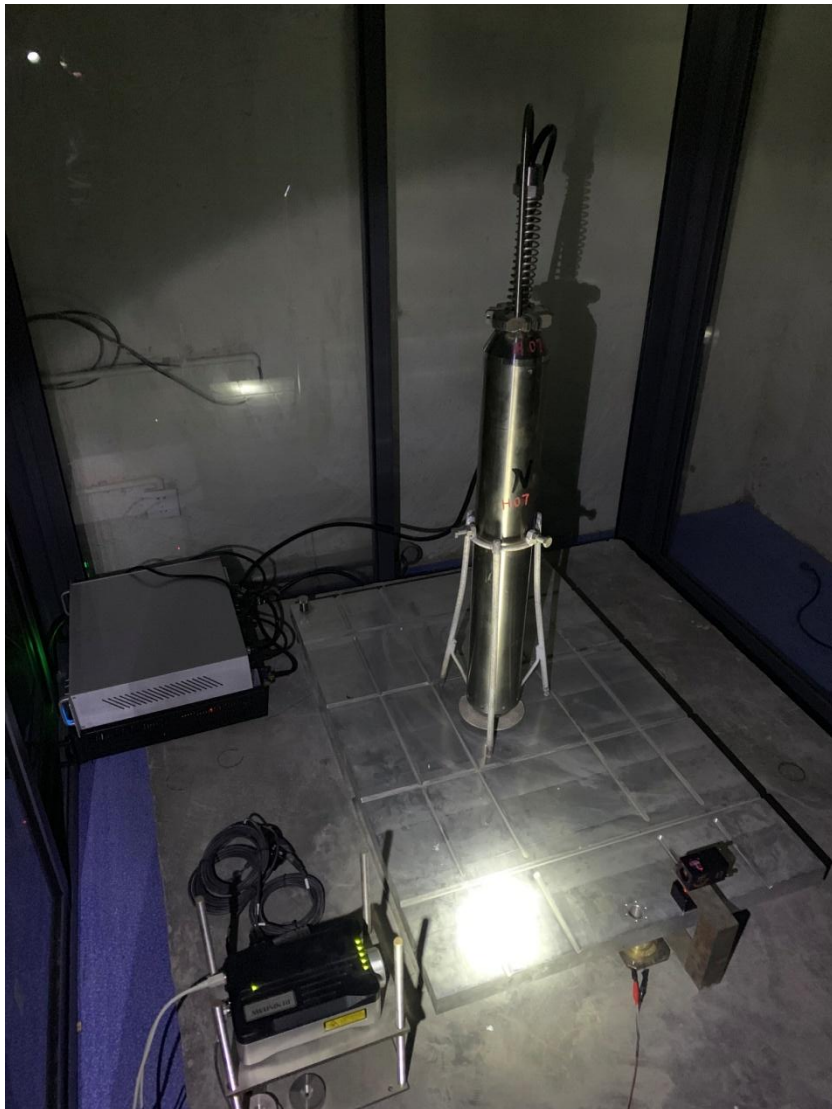


图7竖直摆钻孔倾斜仪校准

(1) 分辨力

校准结果:

固体潮推算倾斜仪分辨力计算表

分量: 北南向

i	日期和时间	理论值 d_i (0.001")	时间间隔 T_i (min)	观测值 d'_i (0.001")	归一化 d''_i (0.001")	拟合值 $\overline{d''_i}$ (0.001")	差值 $\Delta d''_i$ (0.001")
-7	15: 43	-0. 8103	48	-727.056	-1005. 46		
-6	15: 47	-0. 6999	44	-727.003	-1005. 38	-1005. 64	0. 16
-5	15: 51	-0. 5986	40	-726. 999	-1005. 38	-1005. 54	0.17
-4	15: 55	-0. 5065	36	-726.987	-1005. 36	-1005. 44	0. 08
-3	16: 00	-0. 4044	31	-726. 977	-1005. 35	-1005. 34	0. 00
-2	16:06	-0. 3012	25	-726. 989	-1005. 36	-1005. 24	0.12
-1	16:13	-0. 2081	18	-726. 913	-1005. 26	-1005. 14	0.12
0	16: 31	-0. 1049	0	-726. 872	-1005.2	-1005. 04	0.16
1	16: 49	-0. 1998	18	-727. 011	-1005. 39	-1005.14	0. 15
2	16: 57	-0. 3053	26	-727. 03	-1005. 42	-1005. 24	0.18
3	17:03	-0. 4098	32	-727. 066	-1005.47	-1005. 34	0.13
4	17:07	-0. 4913	36	-727.087	-1005.5	-1005. 44	0. 06
5	17: 12	-0. 6066	41	-727. 12	-1005. 55	-1005. 54	0. 00
6	17: 16	-0. 7092	45	-727. 203	-1005. 66	-1005. 64	0. 02
7	17: 19	-0. 7923	48	-727.241	-1005. 71		
$K=3.597122$				分辨力 $\Delta d''_{i \max} = 0.00018''$			

分量：东西向

i	日期和时间	理论值 d_i (0.001")	时间间隔 T_i (min)	观测值 d'_i (0.001")	归一化 d''_i (0.001")	拟合值 $\overline{d''_i}$ (0.001")	差值 $\Delta d''_i$ (0.001")
-7	19: 04	14. 1127	35	478. 86	662.2227		
-6	19: 06	14.1888	33	478. 934	662. 325	662. 1806	0.14
-5	19: 09	14. 2951	30	478. 998	662. 4135	662.2806	0.13
-4	19: 12	14. 3915	27	479. 059	662.4979	662. 3806	0.12
-3	19: 16	14. 5048	23	479. 001	662.4177	662. 4806	0. 06
-2	19: 20	14. 6006	19	478. 848	662. 2061	662. 5806	0. 17
-1	19: 26	14. 7109	13	478. 959	662. 3596	662. 6806	0. 12
0	19:39	14. 8115	0	479. 325	662. 8657	662. 7806	0. 09
1	19:53	14. 7071	14	478. 944	662.3388	662. 6806	0. 14
2	19: 58	14. 6163	19	478. 965	662. 3679	662.5806	0.11
3	20: 03	14. 4976	24	478. 979	662. 3872	662. 4806	0. 09
4	20: 06	14. 413	27	478. 95	662.3471	662.3806	0. 03
5	20: 09	14.3185	30	478.984	662.3942	662. 2806	0.11
6	20: 12	14. 2141	33	479. 024	662. 4495	662.1806	0. 17
7	20: 15	14. 0998	36	479. 025	662.4509		
$K=-13.8889$				分辨力 $\Delta d''_{i \max} = 0.00017''$			

计算北南向NS分辨力为0.00018"，东西向EW分辨力0.00017"。

(2) 量程

校准结果：

量程测试数据表格

分量：北南向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i (")
1	1.093	0.225448
2	2.062	0.425318
3	3.132	0.646022
4	4.106	0.846924
5	5.125	1.057108
6	6.179	1.274511
7	7.241	1.493565
8	8.143	1.679616
9	9.223	1.902382
10	10.284	2.121229

分量：东西向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i (")
1	1.093	0.225448
2	2.071	0.427175
3	3.14	0.647672
4	4.105	0.846718
5	5.123	1.056696
6	6.172	1.273068
7	7.231	1.491502
8	8.119	1.674666
9	9.154	1.88815
10	10.172	2.098128

量程由以上可得出北南向：2.12"，东西向：2.1"。

(3) 线性度误差

校准结果：

线性度误差数据表格

分量：北南向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i ($''$)	倾斜仪输出 y_i (mV)	直线拟合值 Y_i (mV)	线性偏差 Δy_i (mV)
1	1.093	0.225448	80.03	79.16898	0.861018
2	2.062	0.425318	148.9	148.4604	0.439598
3	3.132	0.646022	226	224.9741	1.025853
4	4.106	0.846924	296.34	294.6231	1.716892
5	5.125	1.057108	367.75	367.4899	0.260063
6	6.179	1.274511	441.06	442.8596	1.799552
7	7.241	1.493565	512.38	518.8012	6.421232
8	8.143	1.679616	580.54	583.3016	2.761604
9	9.223	1.902382	662.44	660.5304	1.909568
10	10.284	2.121229	741.17	736.4006	4.769396
		$x = \frac{\Delta H}{L} \rho$	$\Delta y_{FS} = 661.14$	$d = 0.87\%$	

分量：东西向

序号	干涉仪读数 ΔH (μm)	平台倾斜量 x_i ($''$)	倾斜仪输出 y_i (mV)	直线拟合值 Y_i (mV)	线性偏差 Δy_i (mV)
1	1.093	0.225448	73.56	69.09154	4.46846
2	2.071	0.427175	138.37	136.5622	1.807766
3	3.14	0.647672	209.16	210.3109	1.150877
4	4.105	0.846718	274.27	276.8847	2.614721
5	5.123	1.056696	343.47	347.115	3.644953
6	6.172	1.273068	413.87	419.4838	5.613827
7	7.231	1.491502	492.15	492.5426	0.392585
8	8.119	1.674666	556.9	553.8043	3.09568
9	9.154	1.88815	629.53	625.2074	4.322644
10	10.172	2.098128	695.16	695.4376	0.277588
		$x = \frac{\Delta H}{L} \rho$	$\Delta y_{FS} = 621.6$	$d = 0.81\%$	

线性度误差校准结果北南向：0.87%，东西向0.81%。

(4) 频带范围

校准结果：

频带范围测试数据

分量：北南向

传递函数： $\frac{1}{0.201s^2 + 1.03s + 1}$

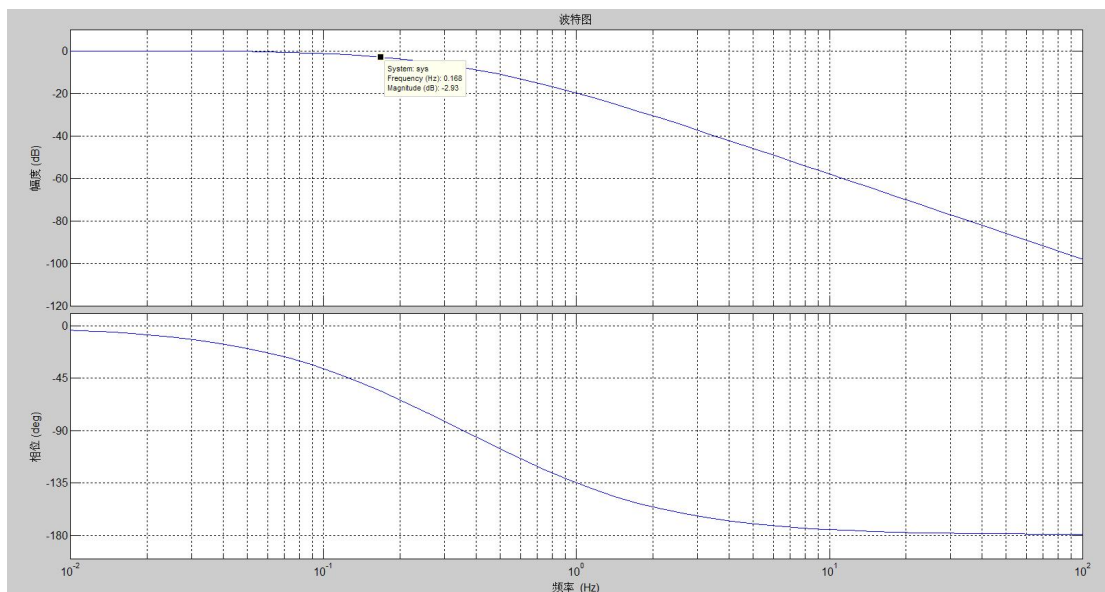


图8 北南向幅频特性曲线图

分量：东西向

传递函数： $\frac{1}{0.211s^2+1.056s+1}$

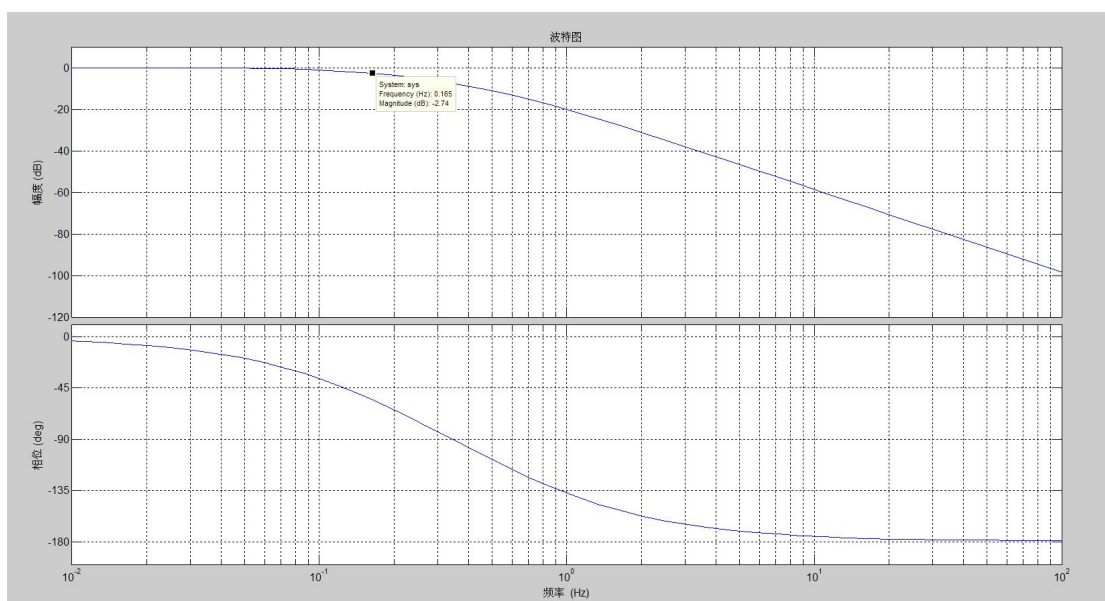


图9 东西向幅频特性曲线图

频带范围校准结果北南向：0.168Hz（5.95s）～1a，东西向：0.183Hz（5.46s）～1a。