

冯雪东,李贵明,刘芳,等,2021. 策克台井下宽频带地震计 GL-S120B 正弦波标定衰减因子的讨论. 中国地震,37(3):717~727.

策克台井下宽频带地震计 GL-S120B 正弦波 标定衰减因子的讨论

冯雪东¹⁾ 李贵明¹⁾ 刘芳²⁾ 安全²⁾ 胡玮¹⁾

1) 乌加河地震台,内蒙古巴彦淖尔 015331

2) 内蒙古自治区地震局,呼和浩特 010010

摘要 为解决 EDAS-24GN6 数据采集器对策克台井下宽频带地震计 GL-S120B 进行正弦标定的过程中产生的响应波形限幅问题,分析了数据采集器-地震计这一系统的标定过程及原理,结合 GL-S120B 的幅频响应特征,推导出正弦标定频点参数中的频率 f 、衰减因子 λ 与标定响应波形限幅之间的关系。分析表明,在 GL-S120B 平坦响应频带内,为避免出现标定波形响应限幅,频率 f 与衰减因子 λ 的乘积应至少大于限幅下限 50.93;而在其衰减响应频带内,由于地震计电压灵敏度的衰减,频率 f 与衰减因子 λ 的乘积最小取值也相应减小。据此,对衰减因子 λ 进行校正,并再次对 GL-S120B 进行正弦标定。标定及计算结果显示:标定波形未限幅,GL-S120B 三分向幅频响应特征较为一致;灵敏度对出厂值的变化率保持在 5% 范围内。本研究结论可为采用 EDAS-24GN6 和 GL-S120B 地震观测系统的台站进行正弦波标定提供频点参数,并为其他台站解决正弦标定波形限幅问题提供分析依据。

关键词: GL-S120B 正弦标定 衰减因子 限幅下限

[文章编号] 1001-4683(2021)03-0717-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

近年来,随着经济的快速发展,地震监测环境受到的干扰越来越大。安装一套受环境噪声干扰小的地震计对台站产出高质量数据尤为重要。在多种地震监测设备中,井下宽频带地震计由于远离地面干扰源而降低了环境对数据的干扰,提高了信噪比,具有良好的应用前景(周焕鹏,1986)。

内蒙古地震局乌加河中心地震台策克子台是中国地震背景场探测项目建设的固定观测台站之一,策克台井下宽频带地震计 GL-S120B 现已安装完毕并即将投入运行。笔者对 GL-S120B 的频率特征进行正弦标定,选择一系列频点进行测试,用来测量地震计在全频带上的幅度响应(江晓涛等,2015),为今后的仪器稳定运行及维护奠定基础。为保证标定检测结果的准确可信,在标定之前必须选用一套合理的频点参数。现针对 GL-S120B 正弦波标定

[收稿日期] 2020-05-30 [修定日期] 2020-11-23

[作者简介] 冯雪东,男,1992年生,助理工程师,主要从事地震监测工作。E-mail:937896898@qq.com

刘芳,通讯作者,女,1962年生,高级工程师,主要从事地震学研究等工作。E-mail:lfm88@163.com

过程中频点参数的选择进行分析,最终确定一组合理的参数,并对该参数相应的标定响应波形进行计算。

1 频点讨论

策克台井下宽频带地震计 GL-S120B 采用的数据采集器为 EDAS-24GN6。如前所述,在对 GL-S120B 进行标定之前必须设置一套合理的频点参数,但 GL-S120B 的仪器说明书中未给出正弦标定的频点数据,从地震台网目前积累的各类资料中,也未找到对应型号的标定参数,笔者就该问题咨询了多位相关专家,建议采用相近型号的 BBVS-120 宽频带地震计的频点参数(表 1)进行标定。

表 1 BBVS-120 正弦标定的频点参数

序号	周期数 N	频率 f/Hz	衰减因子 λ
1	2	200^{-1}	4000
2	2	120^{-1}	5000
3	2	100^{-1}	4000
4	4	50^{-1}	2500
5	20	10^{-1}	500
6	100	1	50
7	500	5	10
8	900	9	10
9	1900	19	10
10	2300	23	10
11	3900	39	10
12	4400	44	10

在采用表 1 的参数完成标定后,发现各频点的周期数与周期/频率的设置均正确,但是第 3 至第 7 频点的波形出现了振幅超范围的问题(图 1),表明宽频带地震计 BBVS-120 的正弦标定频点参数不能直接作为 GL-S120B 的正弦标定参数进行标定。

结合地震计灵敏度、标定灵敏度及数据采集器量程等地震仪固有参数特征,综合分析正弦标定的原理,笔者认为限幅的原因在于正弦标定设置的衰减因子 λ 偏小,导致数据采集器设定的标定电流输入到地震计后偏大,地震计向数据采集器输出的电压值超过了数据采集器的量程范围。因此需要从标定过程进行分析,通过修正现有资料中的衰减因子,设定合理的正弦标定频点参数。

1.1 标定过程分析

在 EDAS-24GN6 数据采集器中设置正弦标定的频点参数:衰减因子 λ ,频率 f ,周期数 N ;数据采集器的标定信号发生器向地震计标定线圈中输入满幅值为 I_m 的正弦电流信号,实时电流 $i(t)$ 为恒流信号,即标定电流大小与负载无关(吕永清等,2007),仅与频率 f 、衰减因子 λ 、满幅标定电流值 I_m 有关(蔡亚先等,2005)

$$i(t) = I_m \cdot \sin(2\pi ft) / \lambda \tag{1}$$

在 GL-S120B 的标定线圈中输入正弦电流信号后,电磁感应产生磁场,地震计摆锤在磁

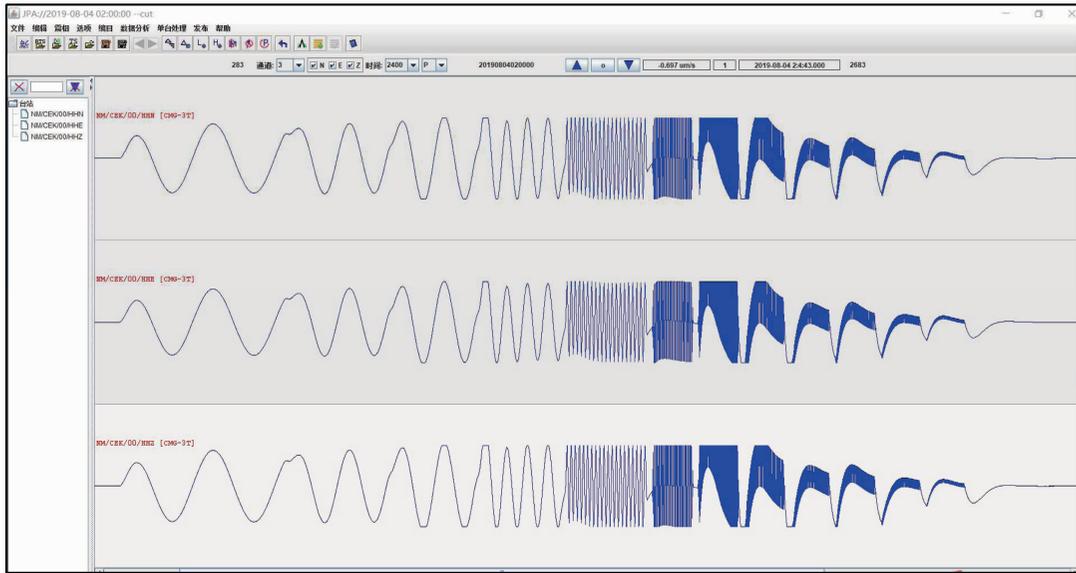


图 1 参照 BBVS-120 的正弦标定频点参数对 GL-S120B 进行正弦标定的结果

场中受到磁力 F 而摆动(在负平衡反馈系统作用下,摆锤并未发生摆动,但地震计输出电流等效于摆锤发生了摆动,即“等效摆动”,下文“摆动”均为等效摆动)。滕云田(2001)给出摆锤摆动加速度 $a(t)$ 、摆锤质量 m 与电流 $i(t)$ 的关系为

$$F = m \cdot a(t) = B \cdot 2\pi nr \cdot i(t) \quad (2)$$

其中, n 为标定线圈匝数, r 为标定线圈半径, $2\pi nr$ 为标定线圈长度, B 为磁场强度。令 $G = 2\pi \cdot Bnr/m$ 为地震计的标定常数,单位为 $m/s^2/A$ 。则有

$$a(t) = G \cdot i(t) \quad (3)$$

摆锤摆动的速度 $v(t)$ 为加速度对时间的积分(江晓涛等,2015),即

$$v(t) = \int a(t) \cdot dt \quad (4)$$

将式(1)、式(3)代入式(4),有

$$v(t) = -G \cdot I_m \cdot \cos(2\pi ft) / (2\pi f\lambda) \quad (5)$$

摆锤带动工作线圈与磁缸相对运动,机械能转换为电动势能,经地震计系统电子线路处理,产生输出电压 $U(t)$ (Wielandt et al,1982)

$$U(t) = S_0 \cdot v(t) = -S_0 \cdot G \cdot I_m \cdot \cos(2\pi ft) / (2\pi f\lambda) \quad (6)$$

其中, S_0 为地震计的电压灵敏度,单位为 $V/m/s$ 。 $U(t)$ 的频率和输入电流信号的频率对应相同,但幅度和相位产生了变化(林湛,2008)。据式(6),可知地震计输出电压峰值为

$$|U_m| = S_0 \cdot G \cdot I_m / (2\pi f\lambda) \quad (7)$$

地震计输出电压信号被数据采集器采集放大后输出为标定波形。数据采集器输出信号 $d(t)$ 与地震计输出电压 $U(t)$ 的关系为

$$d(t) \cdot k = U(t) \quad (8)$$

其中, k 为数据采集器转换因子,单位为 $count/V$ 。数据采集器输出信号峰值为

$$D_m = U'_m/k \tag{9}$$

式中, U'_m 为数据采集器的量程,即数据采集器的最大输入电压。在正弦标定过程中,地震计的最大输出电压应不超过数据采集器的量程,即

$$|U_m| \leq U'_m \tag{10}$$

将式(7)、式(9)代入式(10),有

$$\begin{aligned} S_0 \cdot G \cdot I_m / (2\pi f\lambda) &\leq D_m \cdot k \\ f\lambda &\geq S_0 \cdot G \cdot I_m / (D_m \cdot k \cdot 2\pi) \end{aligned} \tag{11}$$

已知地震计标定常数 G 为 $80\text{m/s}^2/\text{A}$, 满幅标定电流值 I_m 为 20mA , 地震计电压灵敏度 S_0 为 $2000\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}$, EDAS-24GN6 数据采集器的输入量程 U'_m 为 10V , 则有

$$f\lambda \geq 2000 \times 80 \times 0.02 / (2\pi \times 10) \approx 50.93 \tag{12}$$

由式(12)可知,在 EDAS-24GN6 数据采集器中设置对 GL-S120B 地震计的正弦标定参数时,频率 f 与衰减值 λ 的乘积应至少大于 50.93 ,即 $f\lambda$ 的限幅下限值为 50.93 。

1.2 限幅原因分析

地震计的归一化幅频特性反映了地震计在不同频率处的灵敏度特征(中国地震局监测预报司,2017)。GL-S120B 的幅频响应特征如图 2 所示,为了便于分析,这里将该曲线分为 2 部分:

(1)平坦响应部分,频带为 $\sim 0.01\text{Hz} < f < \sim 30\text{Hz}$,此次标定的第 4 至第 10 频点(图 2 中用蓝色圆点标出)均处于该段。地震计对这一段对应的频点响应平坦,不同频点处灵敏度不变,均为 $2000\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}$, $f\lambda$ 应全部大于 50.93 。处于该段的第 4 频点至第 7 频点,由于 $f\lambda$ 均小于 50.93 而出现限幅(表 2)。

(2)衰减响应部分,频带为 $f < \sim 0.01\text{Hz}$ 和 $f > 30\text{Hz}$,此次标定的第 1、2、3、11 和 12 频点(图 2 中用红色圆点标出)均处于该段。地震计对这部分频带的响应表现为:在低频部分,灵敏度随着频率减小而衰减(如第 1 至第 3 频点);在高频部分,灵敏度随着频率增大而衰减(如第 11 和 12 频点)。据图 2 可知,在该部分,灵敏度下降速率为每倍频程下降 15dB 。由于灵敏度的衰减,据式(11), $f\lambda$ 的限幅下限值小于 50.93 ,且灵敏度越小, $f\lambda$ 的限幅下限值越小(表 3)。

第 1、第 2 频点处, $f\lambda$ 虽小于 50.93 ,但均大于各自的限幅下限,故均未出现限幅;而第 3

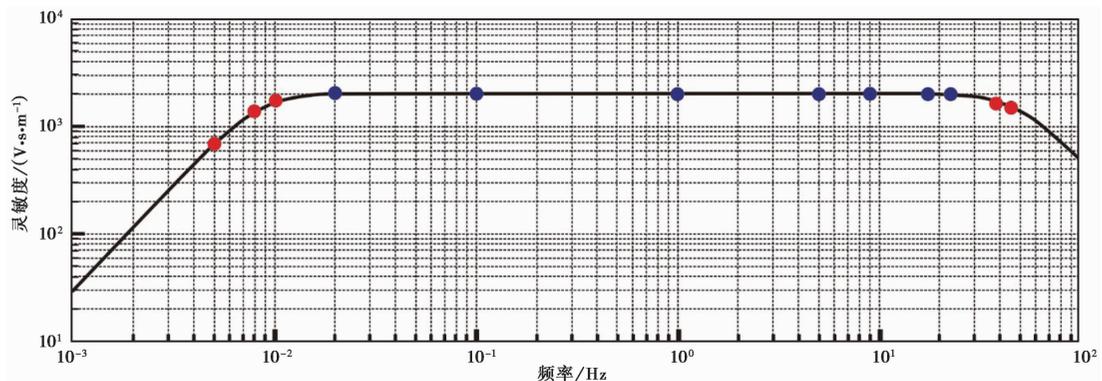


图 2 GL-S120B 幅频响应

表 2 平坦响应部分出现限幅的频点参数

频点序号	f/Hz	λ	$f\lambda$	限幅下限值
4	50^{-1}	2500	50	50.93
5	10^{-1}	500	50	50.93
6	1	50	50	50.93
7	5	10	50	50.93

表 3 衰减响应部分的频点参数及其限幅下限

频点序号	f/Hz	λ	$f\lambda$	灵敏度(估计值)	限幅下限(估计值)
1	200^{-1}	4000	20	700	17.8
2	120^{-1}	5000	41.67	1300	33.0
3	100^{-1}	4000	40	1600	40.6

频点的 $f\lambda$ 略小于其限幅下限值,故其正弦波形表现为轻度限幅。

根据北京港震科技股份有限公司提供的地震计使用指南(《Broadband Seismometer GL-S60/120 Operation Manual(宽频带地震计 GL-S60/120 操作指南)》、《Broadband Seismometer GL-S60B/120B Operation Manual(宽频带地震计 GL-S60B/120B 操作指南)》)可知:GL-S120 为“十五”期间在台站得到推广应用的地震计产品,其标定常数 G 为 $10\text{m/s}^2/\text{A}$,该型号地震计的标定工作可以参照与其性能参数相近的宽频带地震计 BBVS-120(标定常数 G 为 $10\text{m/s}^2/\text{A}$)进行;而 GL-S120B 是继 GL-S120 之后推出的一款较新的同系列地震计,其标定常数 G 为 $80\text{m/s}^2/\text{A}$,在本次最初的正弦标定过程中,我们根据咨询结果参照宽频带地震计 BBVS-120 的标定参数对其进行标定,由式(11)可知, G 的增大使得 $f\lambda$ 的下限增大,使 GL-S120B 在一些频点处(如第 4 频点至第 7 频点)的 $f\lambda$ 小于各自的限幅下限值,从而在相应频点出现正弦波形限幅的问题。

1.3 正弦标定参数的修正

根据上述分析可知,由于 GL-S120B 标定常数 G 相对较大,所以使用宽频带地震计 BBVS-120 的正弦标定参数进行标定后出现标定波形限幅问题,但其频率、周期数的设置均无问题,可以较好地覆盖 GL-S120B 的整个频带。故仅需适度增大各频点相应的衰减因子(表 4),即可避免出现限幅(图 3)。

2 正弦标定计算

正弦标定计算是对设置了特定正弦标定参数的标定结果进行定量检验,对标定工作具有重要意义。

2.1 标定参数的设置

乌加河地震台采用 Edsp-icheck 软件进行标定计算。进行正弦标定计算之前,在计算软件中设置好正弦标定参数。地震计的标定灵敏度以及灵敏度基准值均为安装地震计时的现场实测值。参照宽频带地震计 BBVS-120 正弦标定频点参数的设置说明,由于衰减因子 λ 放大了 10 倍,在进行标定结果计算时,应该将满幅标定电流 I_m 值缩小 10 倍,即为 2mA。据此

表 4 修正后的正弦标定频点参数

频点序号	N	f/Hz	λ
1	2	200^{-1}	8000
2	2	120^{-1}	10000
3	2	100^{-1}	8000
4	4	50^{-1}	5000
5	20	10^{-1}	1000
6	100	1	100
7	500	5	20
8	900	9	20
9	1900	19	20
10	2300	23	20
11	3900	39	20
12	4400	44	20

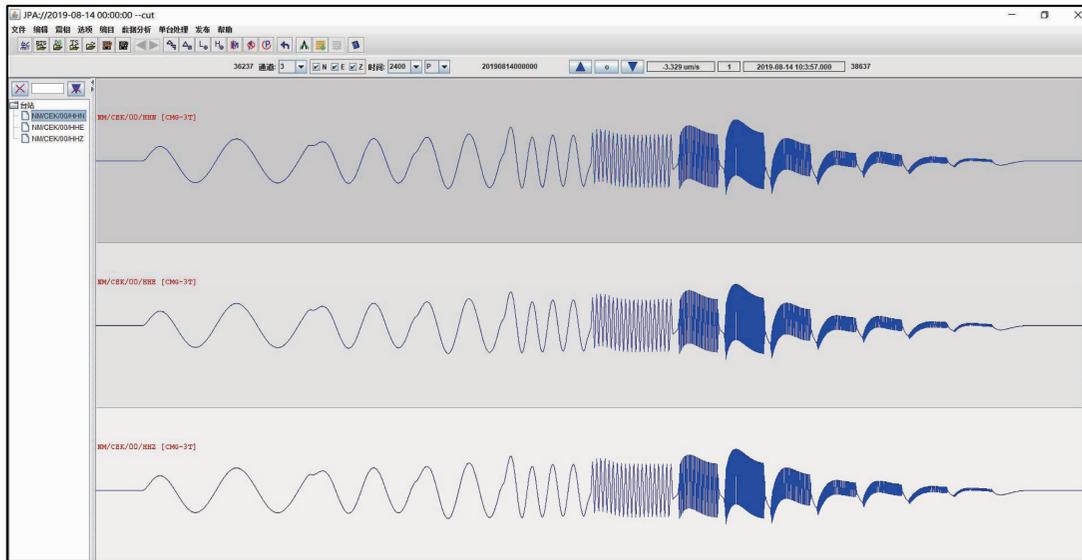


图 3 将衰减因子修正后重新标定结果

进行标定计算,地震计灵敏度变化率高达 1000% 以上,显然满幅标定电流设置不正确。笔者修正后的正弦标定的频点参数中,衰减因子均为实际值,并未放大,故应将满幅标定电流值仍设置为 20mA,即为 20000uA (图 4)。

2.2 标定结果与讨论

依照图 4 设置的标定参数进行计算(归一化频率为 1Hz),得到的正弦标定结果包括 12 个频点的归一化幅频特性(表 5)、3 分向的幅频响应图(图 5~7)、系统灵敏度以及地震计灵敏度变化率(表 6、7)。计算结果显示:三通道(分向)的幅频响应特征非常接近,GL-S120B 井下宽频带地震计对带宽(40Hz~120s)内的各频率信号响应较为平坦,地震计灵敏度对出



图 4 Edsp-icheck 软件正弦标定参数设置界面

表 5

归一化幅频特性

序号	f/Hz	通道 1 幅度响应	通道 2 幅度响应	通道 3 幅度响应	通道 1 峰值 /count	通道 2 峰值 /count	通道 3 峰值 /count
1	200 ⁻¹	0.336572	0.335641	0.334587	7407876	6882867	7175861
2	120 ⁻¹	0.711971	0.711247	0.707607	7521756	7000927	7284475
3	100 ⁻¹	0.833923	0.833114	0.829126	9177228	8542165	8891096
4	50 ⁻¹	0.952059	0.948614	0.947725	8381844	7781138	8130308
5	10 ⁻¹	0.996745	0.992507	0.992793	8775253	8141177	8516937
6	1	1	1	1	8803913	8202642	8578762
7	5	1.040749	1.059936	1.061736	9162662	8694279	9108378
8	9	1.04192	1.063247	1.063456	5096096	4845242	5068408
9	19	1.026834	1.039814	1.036722	2378989	2244533	2340471
10	23	0.991058	0.99317	0.993957	1896781	1771004	1853679
11	39	0.86727	0.845247	0.866895	978894	888879	953447
12	44	0.38459	0.3829	0.376523	384761	356908	367057

厂实测值(表 8)的变化率均在 5%之内,标定结果理想。

据图5、图 6 和图 7,我们注意到在 ~2~20Hz 频带内,地震计的幅度响应较理论值偏高,使幅频响应曲线在该频带范围内不够平坦。经初步分析,我们认为该现象出现的原因是:观测环境中存在不规则的高频干扰信号,地震计在标定时受到这种干扰,在 5Hz、9Hz 等频点处

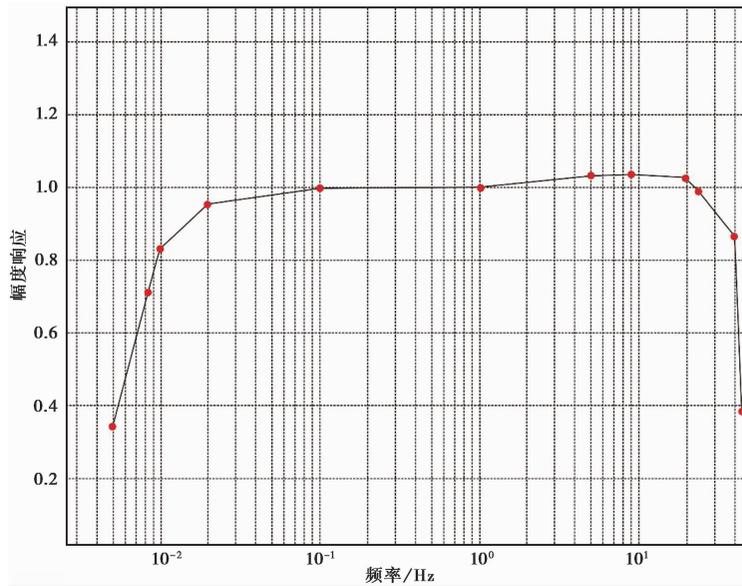


图 5 GL-S120B 第一通道幅频响应

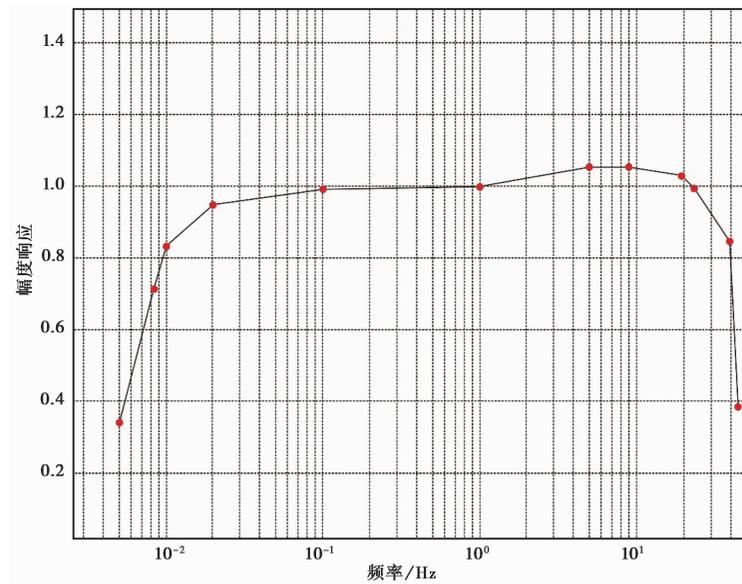


图 6 GL-S120B 第二通道幅频响应

测得的灵敏度较实际值偏高,与 1Hz 处测得的正常结果进行散点连接后,造成幅频响应曲线在 ~2~20Hz 频带内呈现凸起形态;加之计算结果是用“线性”纵坐标来表示的(图 4),使这种“凸起形态”更为明显。

地震震级 m_b 、 m_B 、 M_s 分别在 0.5 ~ 2.5s、3.5 ~ 12s 和 3.8 ~ 30s 周期内测算,即在 ~0.03~2Hz 频带内测得,而该频带内幅频响应曲线整体较为平坦,仅在 ~0.03~0.1Hz 范围

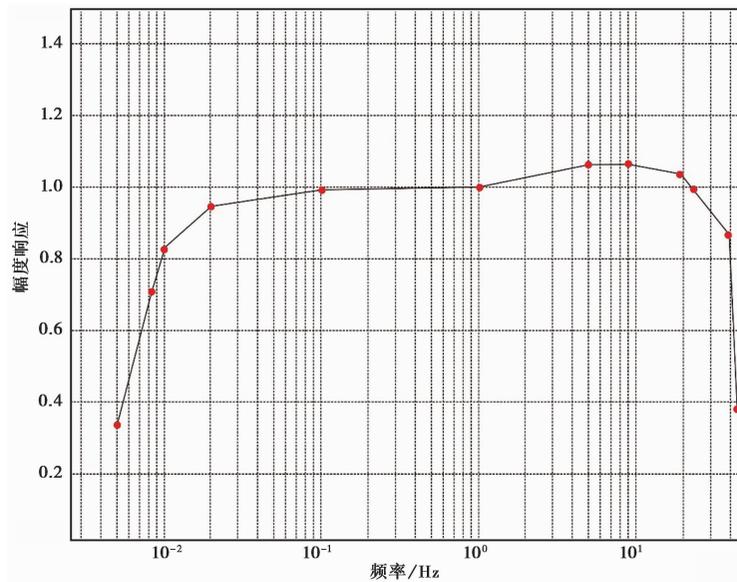


图 7 GL-S120B 第三通道幅频响应图

表 6 地震计灵敏度、数据采集器转换因子和观测系统灵敏度计算结果

通道号	地震计灵敏度/(V · s · m ⁻¹)	数采转换因子/(n · V · count ⁻¹)	观测系统灵敏度/(count · s · μm ⁻¹)
1	2008.30	1192	1684.82
2	1974.58	1192	1656.52
3	1972.26	1192	1654.58

表 7 地震计灵敏度标定结果和其基准值的比较

通道号	地震计灵敏度/(V · s · m ⁻¹)	地震计灵敏度基准值/(V · s · m ⁻¹)	地震计灵敏度变化率/%
1	2008.30	2010.68	0.12
2	1974.58	1991.68	0.86
3	1972.26	1995.07	1.14

表 8 GL-S120B 井下宽频带地震计性能参数 (灵敏度测试频率为 1Hz)

仪器序列号	传感器分向	工作周期/s	阻尼系数	输出电压灵敏度/(V · s · m ⁻¹)	标定灵敏度/(ms ⁻² · A ⁻¹)
G15104BH	UD	120.42	0.699	2010.68	82.0810
	EW	119.85	0.694	1991.68	77.7814
	NS	119.94	0.698	1995.07	81.4437

内略为偏低,使 10~30s 内测得的 M_s 震级略小,故其对震级测定虽有一定的影响,但影响不大。在接下来的工作中,我们将针对这种不规律的高频干扰信号展开更深入的研究,以期提高观测数据的质量。

3 结论

(1)在采用 EDAS-24GN6 数据采集器和 GL-S120B 井下宽频带地震计的地震观测系统中,经过对该系统正弦标定原理和过程进行分析,总结出为避免标定波形限幅,标定信号频率 f 与其对应的衰减因子 λ 须具有如下关系:在地震计对信号平坦响应频带 ($\sim 0.1\text{Hz} < f < \sim 30\text{Hz}$) 内, $f\lambda \geq 50.93$; 在地震计对信号衰减响应频带 ($f < \sim 0.1\text{Hz}$ 和 $f > \sim 30\text{Hz}$) 内, $f\lambda$ 的最小值随灵敏度的减小而减小。

通过多次实验,对衰减因子进行修正,得出该系统的正弦波标定的频点参数参考值(表4)。采用同样型号观测系统的台站也可以使用该套频点参数对地震计进行正弦标定,并可通过放大(缩小)衰减因子来减小(增大)标定结果中正弦波的幅度。

(2)通过分析得出,井下宽频带地震计 GL-S120B(标定常数 $G = 80\text{m/s}^2/\text{A}$)因参照宽频带地震计 BBVS-120(标定常数 $G = 10\text{m/s}^2/\text{A}$)的频点参数进行标定,标定常数 G 的增大使得 GL-S120B 正弦标定出现响应波形限幅问题。

(3)通过标定计算,井下宽频带地震计 GL-S120B 的电压灵敏度对其出厂测定值的变化率在 5% 范围内,其幅频特性曲线整体较为平坦。

致谢:北京港震科技股份有限公司祝祥工程师为本次研究提供了地震计性能参数,审稿专家对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- 蔡亚先,吕永清,2005.超宽频带与甚宽频带地震计的台站现场标定.大地测量与地球动力学,25(4):117~122.
- 江晓涛,杜兴忠,杨正刚,等,2015.地震计标定及特性分析应用研究.工程地球物理学报,12(2):254~259.
- 林湛,2008.地震计台站标定技术研究.硕士学位论文.北京:中国地震局地震预测研究所.
- 吕永清,蔡亚先,2007.地震计正弦标定自动处理系统.大地测量与地球动力学,27(5):119~122.
- 滕云田,2001.现代地震地磁观测技术研究.博士学位论文.北京:中国地震局地球物理研究所.
- 中国地震局监测预报司,2017.测震学原理与方法.北京:地震出版社,226~230.
- 周焕鹏,1986.深井摆与地面摆的记录差异.地震地磁观测与研究,7(6):65~72.
- Wielandt E, Streckeisen G, 1982. The leaf-spring seismometer: design and performance. Bull Seismol Soc Am, 72(6A): 2349~2367.

The Discussion on Decay Factor in Sine Calibration of CEK Borehole Broadband Seismometer GL-S120B

Feng Xuedong¹⁾ Li Guiming¹⁾ Liu Fang²⁾ An Quan²⁾ Hu Wei¹⁾

1) Wujiahe Seismic Station, Bayannur, Inner Mongolia Autonomous Region 015331, China

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

Abstract In this paper, the relationship between frequency f , decay factor λ and clipping of response waveform has been derived by analyzing the calibration process, principle of the Data Collector-Seismometer system and amplitude-frequency response characteristics, to solve the clipping problem of response waveform when conducting a sine calibration on Data Collector EDAS-24GN6 and Borehole Broadband Seismometer GL-S120B system. The results show that in order to avoid the clipping problem of response waveform, the product of frequency f and decay factor λ should be at least greater than the lower limit of 50.93 in the flat response frequency band of GL-S120B. However, in the decay response frequency band, the minimum value of the product is also reduced accordingly for the decay of voltage sensitivity. After the correction of decay factor, sine calibration of GL-S120B is conducted for the second time accordingly. The calculation results of calibration show that no clipping of the response waveform occurred and the amplitude-frequency response characteristics of its three-component are relatively consistent, with the change rate of voltage sensitivity to factory value within 5%. The conclusions of this study can provide frequency points parameters for sine calibration of stations using EDAS-24GN6 and GL-S120B seismic systems, and provide analytical basis for solving the clipping problem of sine calibration response waveform.

Keywords: GL-S120B; Sine calibration; Decay factor; Lower limit of clipping