

# FBS-3A 型反馈式宽频带地震计 电流标定方法研究<sup>\*</sup>

刘庆伟 庄灿涛

(中国北京 100036 中国地震局分析预报中心)

**摘要** 随着时间的推移和环境条件的缓慢变化,地震计各部件的性能参数会有所改变,及时了解这种变化并加以控制和调整,有助于提高地震计输出结果的可信度。所以,一台地震计无论在交付使用前,还是在使用过程中,都需要进行标定。目前,比较常用的标定方法有方波电流标定和正弦电流标定。本文从系统分析的角度出发,在分析得到地震计传递函数的基础上,将方波电流标定和正弦电流标定过程进行理论抽象,进而在复频域对两种电流标定过程进行仿真推导;并在此基础上,讨论了方波电流标定输出曲线与地震计固有参数之间以及正弦电流标定的稳态输出与标定电流之间的关系,并且论述了两组特定频率正弦电流的标定输出之间的关系。最后,作为理论分析在实践中的具体应用,给出了两种电流标定过程在实际工作中的应用方法。本文旨在阐明两种常用的电流标定方法的物理意义,对地震计的调试及应用有积极的参考作用。

**关键词** 电流标定 FBS-3A 型 宽频带地震计

**中图分类号:** P631.4<sup>+</sup>32 **文献标识码:** A

## 引言

由于各种原因,随着时间的推移和环境条件的缓慢变化,地震计各部件的性能参数可能会有所变化,若不及时了解这种变化并加以控制和调整,将降低地震计输出结果的可信度,有时甚至产生错误。所以,一台地震计无论在交付使用前,还是在使用过程中,都需要进行标定,以确定其工作参数是否正确或正常,频率特性是否符合使用要求。对仪器进行定期标定,是保证系统观测质量,为地震学和地震预报研究提供高可信度记录的一项重要措施(庄灿涛,1995)。

FBS-3A 型反馈式地震计是目前已被广泛使用的一种宽频带、大动态的地震计(赵康等,1997)。本文以 FBS-3A 型地震计为例,对地震计的电流标定过程进行了分析。其它型号地震计标定过程的分析可以参照进行。

<sup>\*</sup> 2000-05-17 收到初稿,2000-08-01 收到修改稿,2000-10-17 决定采用。

1 电流标定一般原理

地震计的电流标定过程是对地震计特性参数进行评判的一种简易手段。它将特定的标定电流(如方波电流<sup>①</sup>、正弦电流等)输入至地震计的标定线圈内,由于电磁感应原理,标定线圈与磁钢之间产生的策动力矩迫使摆产生振动,从而在工作线圈中产生电压输出,通过分析输出电压与输入电流之间的幅值、相位关系等,可以基本掌握地震计的工作性能。

该过程可以用图 1 所示的框图加以描述。图中  $i(t)$ ,  $h(t)$ ,  $v_o(t)$  和  $I(s)$ ,  $H(s)$ ,  $V_o(s)$  分别是时间域和频率域内的输入信号、传递函数和输出信号的表达符号。

由系统分析理论可知,地震计系统在时间域的标定输出应为系统的传递函数与输入信号的褶积(郑君里等,1981)

$$v_o(t) = i(t) * h(t) \tag{1}$$

而在复频域,则应为系统的传递函数与输入信号拉氏变换结果的乘积,即

$$V_o(s) = I(s) \cdot H(s) \tag{2}$$

乘积相对于褶积而言易于实现,所以研究过程宜在频域进行。若需在时域分析标定输出结果,只需将所得到的频域输出信号进行拉氏反变换即可。

由式(2)可知,对电流标定过程的研究,应建立在确知地震计的传递函数表达式和标定电流的频域表示的基础上。

1.1 地震计的传递函数

FBS-3A 型地震计的工作原理如图 2 框图所示。

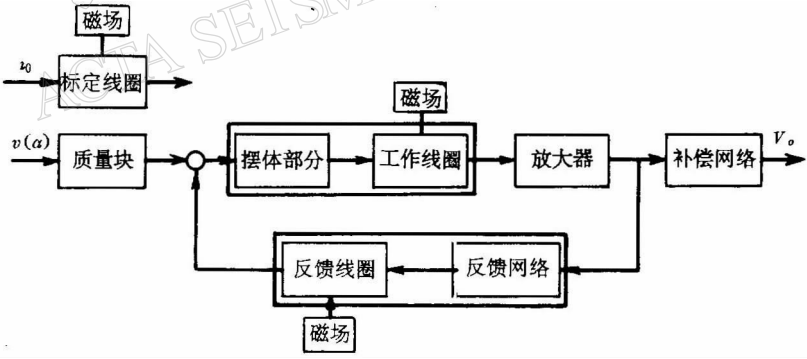


图 2 FBS-3A 型地震计工作原理框图

通过对图 2 所示的地震计工作原理的分析,不难得到 FBS-3A 型地震计的输出电压  $v_o(s)$  对输入标定电流  $I(s)$  的传递函数为(刘庆伟等,2001)

$$H_s(s) = \frac{V_o(s)}{I(s)} = \frac{K \cdot s(s + \omega_2)}{(s + \omega_3)(s^3 + As^2 + Bs + C)} \tag{3}$$

式中,  $K, A, B, C$  为与仪器内部参数有关的比例系数;  $\omega_2, \omega_3$  为地震计系统的两个频率常

① 习惯上称为脉冲电流,与之相对应的标定过程称为脉冲标定,但不确切。

数.

显然,这是一个四阶系统. 经过对系统零、极点的分析,可以将该系统简化为一个二阶系统,即可以写成如下形式:

$$H_s(s) \approx \frac{K \cdot s}{s^2 + Ds + E} = \frac{K \cdot s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{K \cdot s}{(s + \zeta\omega_n)^2 + (\omega_n^2 - \zeta^2\omega_n^2)} \quad (4)$$

式中,  $D, E$  为与系统的主导极点分布情况有关的比例系数;  $\zeta$  为地震计系统的阻尼比, 且  $0 < \zeta < 1$ ;  $\omega_n$  为地震计系统的固有角频率.

为简化分析过程, 引进两个过渡参数

$$\sigma = \zeta\omega_n \quad \omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

显然,  $\sigma^2 + \omega^2 = \omega_n^2$ . 通常称  $\omega_n$  为地震计系统的无阻尼自振角频率, 而定义  $\omega$  为系统的有阻尼自振角频率. 则 FBS-3A 型地震计标定过程的传递函数可以改写成

$$H_s(s) = \frac{K \cdot s}{(s + \sigma)^2 + \omega^2} \quad (5)$$

### 1.2 标定电流的频域表示

#### 1.2.1 方波标定电流

对地震计进行方波电流标定, 就是将一幅值保持长期稳定、持续时间远大于地震计的固有工作周期的单个方波电流输入至摆的标定线圈内, 使摆产生偏移, 地震计系统输出相应信号的过程(王广福, 1986). 标定用的方波电流信号形式如图 3 所示. 其正向与负向脉冲宽度应远大于被标定地震计的固有工作周期.

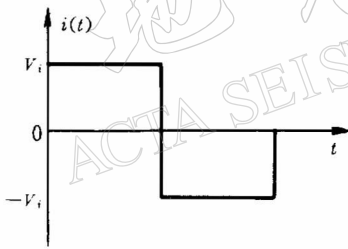


图 3 方波电流信号示意图

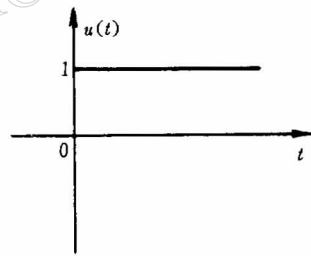


图 4 单位阶跃函数示意图

为了分析上的方便, 我们只对正向方波过程进行分析(负向方波只是与之相差负号的关系); 同时进一步将正向方波抽象成单位阶跃函数(图 4). 这样, 对地震计输入的方波标定电流为

$$i(t) = u(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t > 0) \end{cases} \quad (6)$$

该电流信号的拉氏变换为

$$I(s) = L[i(t)] = L[u(t)] = \frac{1}{s} \quad (7)$$

#### 1.2.2 正弦标定电流

对地震计进行正弦标定, 实质上是将一组不同频率的正弦波电流输入至地震计的标定线圈内. 这里, 假设输入的正弦波电流可以用如下形式进行描述:

$$i(t) = B \cdot \sin \beta t \quad (8)$$

式中,  $B$  为正弦电流幅值;  $\beta$  为正弦电流的角频率. 对公式(8)进行拉氏变换, 得

$$I(s) = \frac{B \cdot \beta}{s^2 + \beta^2} \quad (9)$$

## 2 方波电流标定的输出响应

在已知地震计标定过程传递函数和标定电流频域表示的基础上, 由式(2)得方波电流标定的频域输出响应为

$$V_s(s) = H_s(s) \cdot I(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{Ks}{(s + \sigma)^2 + \omega^2} = \frac{K}{(s + \sigma)^2 + \omega^2} \quad (10)$$

为了更直观地将理论分析结果与实际标定输出进行比较, 将复频域的标定输出转换到时间域来进行分析, 只需对公式(10)做拉氏反变换

$$v_s(t) = L^{-1}[V_s(s)] = L^{-1}\left[\frac{K}{(s + \sigma)^2 + \omega^2}\right] \quad (11)$$

则由式(11)可得, FBS-3A 型地震计方波电流标定的时域输出为

$$v_s(t) = \frac{K}{\omega} \cdot e^{-\sigma t} \cdot \sin \omega t \quad (12)$$

令  $K=1$ , 对上式进行归一化处理后得

$$v_s(t) = \frac{1}{\omega} \cdot e^{-\sigma t} \cdot \sin \omega t \quad (13)$$

由上式可见, 方波电流标定电压输出的表达式是由指数衰减与正弦振荡两部分相乘构成. 这表明该电压输出具有衰减振荡的曲线形式, 且振荡周期为  $2\pi/\omega$ .

### 2.1 电流方波标定输出曲线的特征点

在得到了 FBS-3A 型地震计方波电流标定时域电压输出表达式的基础上, 不难绘制出其在时域的输出波形. 以一个标准的 FBS-3A 型地震计为例, 其固有周期的标称值为  $T_n = 20$  s, 则其固有角频率为  $\omega_n = 0.1\pi$  rad/s, 其阻尼比的标称值为  $\zeta = 0.707$ , 将它们代入公式(13), 可以得到 FBS-3A 型地震计进行方波电流标定时的标准电压输出为

$$v_s(t) = 4.501 \cdot e^{-0.222t} \cdot \sin 0.222t \quad (14)$$

将上式所描述的衰减振荡过程用时间域曲线的形式给出, 如图 5 所示.

显然, 方波标定的时域输出曲线的特征点主要为曲线的峰值点和过 0 点. 下面将分析这些曲线的特征点与系统固有参数之间的关系.

#### 2.1.1 对输出曲线过 0 点的分析

由式(13), 要得到曲线的过 0 点, 只需通过求解下式:

$$\frac{1}{\omega} \cdot e^{-\sigma t} \cdot \sin \omega t = 0 \quad (15)$$

即

$$\sin \omega t = 0 \quad (16)$$

解此三角方程得

$$\omega t = k\pi \quad (k \in Z) \quad (17)$$

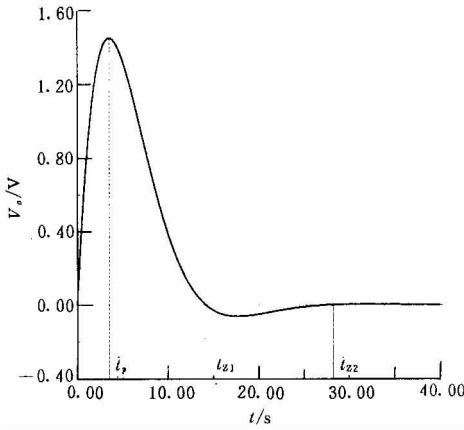


图 5 方波电流标定时域输出曲线

整理得

$$\tan \omega t = \frac{\omega}{\sigma} = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \tag{19}$$

解该三角方程，得

$$\omega t = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} + k\pi \quad (k \in \mathbb{Z}) \tag{20}$$

显然，方波电流标定输出曲线的第一极大峰值点对应的时间  $t_{p1}$  应为当  $k=0$  时的解，即

$$t_{p1} = \frac{\arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}}{\omega} \tag{21}$$

2.2 地震计固有参数与输出曲线特征点之间的关系

从图 5 可见，方波标定输出曲线上最明显且最有意义的两个特征点是第一峰值点和第二过 0 点。

显然，将式(17)的解  $t_{z2}=\pi/\omega$  与式(21)相结合，就可以得出地震计系统的固有参数与其方波标定输出曲线特征点之间的关系。这只需经过简单的推导即可。

由  $t_{z2}=\pi/\omega$  可得

$$\omega = \frac{\pi}{t_{z2}}$$

将上式代入式(21)，有

$$\frac{\pi}{t_{z2}} \cdot t_{p1} = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \tag{22}$$

等号两边同时做正切运算，有

$$\tan\left(\frac{\pi}{t_{z2}} \cdot t_{p1}\right) = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \tag{23}$$

解此关于  $\zeta$  的方程，得

$$\zeta = \cos\left(\frac{t_{p1}}{t_{z2}} \cdot \pi\right) \tag{24}$$

当  $k=0$  时，式(17)的结果对应第一个过 0 点  $t_{z1}=0$ ；当  $k=1$  时，式(17)的结果对应第二个过 0 点  $t_{z2}=\pi/\omega$ ；当  $k=2$  时，式(17)的结果对应第三个过 0 点  $t_{z3}=2\pi/\omega$ 。上述结果与对式(13)的简要分析是一致的。

2.1.2 对输出曲线峰值点的分析

要得到一条曲线的峰值点，从数学上就是求其极大值，这只需使其表达式的一阶导数为 0 即可求得。

令式(13)对时间  $t$  求导，并且使其为 0，即

$$\frac{-\sigma}{\omega} e^{-\sigma t} \sin \omega t + e^{-\sigma t} \cos \omega t = 0 \tag{18}$$

相应地

$$\omega_n = \frac{\omega}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{\pi}{t_{z2} \cdot \sin\left(\frac{t_{p1}}{t_{z2}} \cdot \pi\right)} \quad (25)$$

式(24)、(25)表明,在得到方波电流标定输出曲线的基础上,就可以方便地得到地震计系统的固有参数,如固有角频率(固有周期)、阻尼等.当然,前提是两个特征点所对应的时间值要具有足够的精度.

### 3 正弦电流标定的输出响应

如前所述,正弦电流标定的输出结果在复频域可以表示为

$$V_s(s) = H_s(s) \cdot I(s) = \frac{s}{(s+\sigma)^2 + \omega^2} \cdot \frac{B \cdot \beta}{s^2 + \beta^2} \quad (26)$$

为了更直观地对标定输出  $V_s$  进行考察,有必要通过拉氏反变换将式(26)所描述的复频域输出结果转换到时间域,为此,按式(26)的极点情况对其做如下分解:

$$\begin{aligned} V_s(s) &= \frac{s}{(s+\sigma)^2 + \omega^2} \cdot \frac{B \cdot \beta}{s^2 + \beta^2} \\ &= \frac{s}{(s+\sigma-j\omega)(s+\sigma+j\omega)} \cdot \frac{B \cdot \beta}{(s-j\beta)(s+j\beta)} \\ &= B \cdot \left( \frac{K_0}{s+\sigma-j\omega} + \frac{K_1}{s+\sigma+j\omega} + \frac{K_2}{s-j\beta} + \frac{K_3}{s+j\beta} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

式中,  $K_i (i=0, 1, 2, 3)$  为 4 个待定系数.

显然,只要求得每个极点所对应的系数  $K_i (i=0, 1, 2, 3)$ , 就可以得到  $V_s(s)$  的拉氏反变换结果. 经过计算不难得到

$$K_0 = \frac{\beta\omega(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2) - 2\beta\omega\sigma^2 + j[2\beta\omega^2 + \beta\sigma(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2)]}{2\omega[(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2)^2 + 4\sigma^2\omega^2]} \quad (28)$$

$$K_1 = \frac{\beta\omega(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2) - 2\beta\omega\sigma^2 - j[2\beta\omega^2 + \beta\sigma(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2)]}{2\omega[(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2)^2 + 4\sigma^2\omega^2]} \quad (29)$$

$$K_2 = \frac{\beta(\sigma^2 + \omega^2 - \beta^2) - j2\sigma\beta^2}{2(\sigma^2 + \omega^2 - \beta^2)^2 + 8\beta^2\sigma^2} \quad (30)$$

$$K_3 = \frac{\beta(\sigma^2 + \omega^2 - \beta^2) + j2\sigma\beta^2}{2(\sigma^2 + \omega^2 - \beta^2)^2 + 8\beta^2\sigma^2} \quad (31)$$

为方便推演和计算而引入过渡参数  $a, b, c, d$ .

$$a = \frac{\beta\omega(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2) - 2\beta\omega\sigma^2}{2\omega[(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2)^2 + 4\sigma^2\omega^2]}$$

$$b = \frac{2\beta\omega^2 + \beta\sigma(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2)}{2\omega[(\sigma^2 - \omega^2 + \beta^2)^2 + 4\sigma^2\omega^2]}$$

$$c = \frac{\beta(\sigma^2 + \omega^2 - \beta^2)}{2(\sigma^2 + \omega^2 - \beta^2)^2 + 8\beta^2\sigma^2}$$

$$d = \frac{2\sigma\beta^2}{2(\sigma^2 + \omega^2 - \beta^2)^2 + 8\beta^2\sigma^2}$$

则式(28)~(31)可以改写成

$$K_0 = a + jb \quad (32)$$

$$K_1 = a - jb \quad (33)$$

$$K_2 = c + jd \quad (34)$$

$$K_3 = c - jd \quad (35)$$

有了上述结果, 式(27)则可以写成

$$V_s(s) = B \cdot \left( \frac{a + jb}{s + \sigma - j\omega} + \frac{a - jb}{s + \sigma + j\omega} + \frac{c - jd}{s - j\beta} + \frac{c + jd}{s + j\beta} \right) \quad (36)$$

通过查表, 式(36)的拉氏反变换, 即正弦电流标定的时域输出为

$$v_s(t) = 2B \sqrt{a^2 + b^2} \cdot e^{-\sigma t} \cdot \sin\left(\omega t - \arctan \frac{a}{b}\right) + 2B \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \sin\left(\beta t + \arctan \frac{c}{d}\right) \quad (37)$$

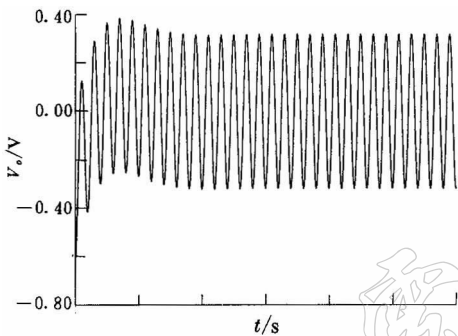


图6 正弦电流标定输出信号的时域示意图

上式表明, 正弦电流标定的输出是由两部分组成的: 第一部分为衰减振荡项, 振荡的角频率为  $\omega$ ; 第二部分为正弦振荡项, 振荡的角频率为所输入正弦电流的角频率  $\beta$ . 显然, 第一部分为暂态过程, 随着时间的推移, 该过程将逐渐衰减消失; 而第二部分为稳态过程, 只要标定电流存在, 该部分就构成稳定的输出成分. 这一点可以从图6的仿真图形中得到验证.

### 3.1 地震计正弦标定的稳态输出与标定电流的关系

对于本文所讨论的正弦电流标定过程, 我们主要关心的是其稳态成分, 而忽略其暂态成分. 所以, 进一步的研究和讨论将重点针对式(37)的第二部分稳态项.

$$2B \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \sin\left(\beta t + \arctan \frac{c}{d}\right) = 2B \sqrt{c^2 + d^2} \cdot \sin\left(\beta t + \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{d}{c}\right) \quad (38)$$

上式与输入信号  $i(t) = B \sin \beta t$  相比, 存在相位差

$$\phi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{d}{c} \quad (39)$$

而其幅值为  $2B \sqrt{c^2 + d^2}$ , 将过渡参数  $c$  和  $d$  的值代入, 并利用前面对过渡参数的定义, 有

$$\sigma^2 + \omega^2 = \omega_n^2$$

所以有

$$2B \sqrt{c^2 + d^2} = \frac{B \cdot \beta}{\sqrt{(\omega_n^2 - \beta^2)^2 + 4\beta^2 \zeta^2 \omega_n^2}} \quad (40)$$

当输入的正弦电流的角频率远大于地震计的固有角频率时, 即当  $\beta \gg \omega_n$  时, 上式可以近似地写成

$$2B \sqrt{c^2 + d^2} \approx \frac{B}{\beta} \quad (41)$$

则式(37)所描述的输出信号的稳态响应为

$$v_s(t) \approx \frac{B}{\beta} \cdot \sin\left(\beta t + \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{d}{c}\right) \quad (42)$$

上式表明,在满足一定近似条件的情况下,正弦电流标定稳态输出的幅值  $B/\beta$  与所输入正弦电流的角频率  $\beta$  成反比. 这就是为何在粗略评价地震计工作是否正常时,利用两组不同频率和幅度的正弦波响应输出来检查仪器: 一组采用频率 0.1 Hz 幅度  $V_b$  的正弦波,另一组采用频率 1 Hz 幅度  $10 V_b$  的正弦波,若仪器对这两组正弦波的响应保持输出幅度一样大,则说明仪器工作正常<sup>①</sup>的原因.

还可以从零点和极点的角度来讨论这一现象. 通过考察式(26)

$$V_s(s) = \frac{s}{(s+\sigma)^2 + \omega^2} \cdot \frac{B \cdot \beta}{s^2 + \beta^2} = \frac{s}{(s+\sigma+j\omega)(s+\sigma-j\omega)} \cdot \frac{B \cdot \beta}{(s+j\beta)(s-j\beta)} \quad (43)$$

可以看出,这是一个四阶系统,共有两对共轭极点. 由于这是一个稳定的系统,所以其极点在复频域  $[s]$  内的分布可以用图 7 示意.

图 7 表明,极点  $p_{1,2}$  表征的是衰减振荡成分,对应于式(43)的前半部分;  $p_{3,4}$  表征的是稳定振荡成分,对应的是式(43)的后一部分. 这里我们只关心稳态响应,即将极点  $p_{3,4}$  作为系统的主导极点,只考虑它们对系统输出的影响,而忽略极点  $p_{1,2}$  的作用. 这时,式(43)可以改写成

$$V_s(s) = \frac{B \cdot \beta \cdot s}{(s+j\beta)(s-j\beta)} = \frac{B \cdot \beta \cdot s}{s^2 + \beta^2} \quad (44)$$

对上式进行拉氏反变换,可以得到它所对应的时域输出

$$v_s(t) = B\beta \cdot \cos\beta t \quad (45)$$

由于忽略了一对共轭极点,所以需对上式积分两次才得到式(43)所对应的时域输出

$$v_s(t) = -\frac{B}{\beta} \cdot \cos\beta t = \frac{B}{\beta} \cdot \sin\left(\beta t + \frac{3\pi}{2}\right) \quad (46)$$

这依然表明了稳态输出幅度与输入标定电流角频率  $\beta$  之间的反比关系. 当然,前提仍然是要满足一定的条件,在这里就是极点  $p_{1,2}$  的影响较  $p_{3,4}$  的影响可以忽略不计,而这与前面提到的式(41)成立的条件  $\beta \gg \omega_n$  是等同的.

表 1 列出了对于不同的输入电流角频率,式(40)和(41)所描述的稳态响应的幅值大小的比较. 其中对输入标定电流的幅度进行了归一化处理.

计算中,取无阻尼自振角频率  $\omega_n = 2\pi/T_n = 2\pi/20 = 0.314 \text{ rad/s}$ , 阻尼  $\zeta = 0.707$ .

仿真计算表明,在满足一定近似条件的情况下,稳态输出的幅值用式(41)描述是可行的,精度也是足够高的.

图 8 所描述的是一组等幅度正弦标定电流所对应的输出序列,以图中竖向划线为界,最左边的输出序列对应输入正弦电流频率  $f = 0.1 \text{ Hz}$ ; 中间的序列对应正弦电流频率  $f = 0.5 \text{ Hz}$ ; 最右边的序列对应  $f = 1 \text{ Hz}$ .

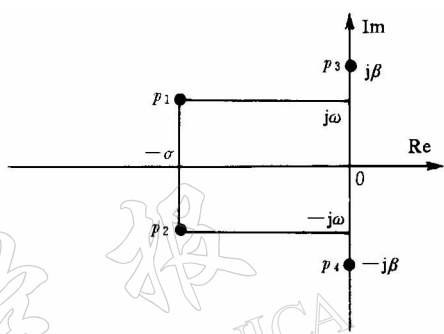


图 7 两对共轭极点在复频域内的分布示意图

① 北京港震机电技术有限公司. FBS-3A 宽带反馈式地震计用户手册.



表 1 不同电流频率所对应的稳态响应幅值比较

输入电流频率 $f/\text{Hz}$	输入电流角频率 $\beta/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	输入电流角频率的倒数 $1/\beta$	稳态响应的幅值 $2 \sqrt{c^2 + d^2}$
0.05	0.314	3.183	2.251
0.1	0.628	1.592	1.544
0.2	1.257	0.796	0.794
0.5	3.142	0.318	0.318
1	6.283	0.159	0.159
2	12.566	0.080	0.080
5	31.416	0.032	0.032
10	62.832	0.016	0.016

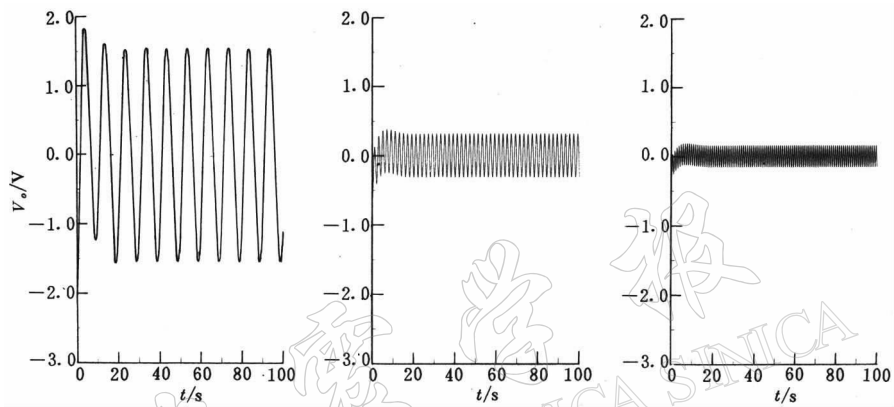


图 8 3 组正弦电流标定输出结果比较示意图

为了更清楚地显示这种反比关系，图 9 给出了另外一组曲线。最左边的输出序列对应输入正弦电流频率  $f=0.1\text{ Hz}$ ，幅度  $B$ ；中间的序列对应正弦电流频率  $f=0.5\text{ Hz}$ ，幅度  $5B$ ；最右边的序列对应  $f=1\text{ Hz}$ ，幅度  $10B$ 。

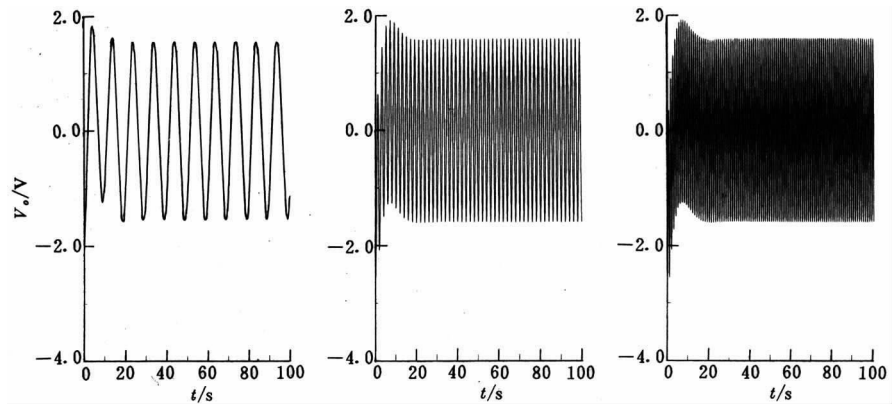


图 9 3 组正弦电流标定输出结果比较示意图

3.2 两组特定频率正弦电流标定输出之间的关系

考察式(40)，若正弦标定输入电流的角频率与地震计的无阻尼自振角频率相等，即  $\beta$

$=\omega_n$ , 幅值为  $B$ , 则标定输出的稳态项的幅度值可以写成

$$Y_1 = \frac{B\beta}{\sqrt{(\omega_n^2 - \beta^2)^2 + 4\beta^2\zeta^2\omega_n^2}} = \frac{B\omega_n}{\sqrt{4\omega_n^4\zeta^2}} = \frac{B}{2\omega_n\zeta} \quad (47)$$

若正弦标定输入电流的角频率为地震计无阻尼自振角频率的 0.1 倍, 即  $\beta=0.1\omega_n$ , 同时幅度为  $5B$ , 则标定输出的稳态成分的幅度值为

$$Y_2 = \frac{5B \times 0.1\omega_n}{\sqrt{(\omega_n^2 - 0.01\omega_n^2)^2 + 4 \times 0.01\omega_n^4\zeta^2}} \approx \frac{0.5B\omega_n}{\sqrt{\omega_n^4 + 0.04\omega_n^4\zeta^2}} \approx \frac{B}{2\omega_n} \quad (48)$$

同样, 若正弦标定输入电流的角频率为地震计无阻尼自振角频率的 10 倍, 即  $\beta=10\omega_n$ ; 而幅度为  $5B$ , 则不难类似地得到标定输出的稳态成分的幅度值也为  $B/2\omega_n$ .

用式(48)除以式(47), 就可得到阻尼值

$$\zeta = \frac{Y_2}{Y_1} \quad (49)$$

$\zeta$  即为两组标定稳态输出电压幅度的比值.

## 4 电流标定的实际应用

前面已经在将地震计系统简化成二阶形式的基础上, 对地震计电流方波标定和正弦标定过程进行了分析. 从式(24)、(25)看, 似乎通过电流方波标定就可以准确计算出系统的无阻尼自振周期和阻尼, 而在实际标定过程中, 电流方波标定输出曲线的几个特征点对应的时间值很难准确获取, 当存在外界干扰时更是如此, 所以采取式(24)和(25)在实际计算工作中是有难度的.

下面将在前面所述的理论基础上讨论如何在实际工作中, 简便、准确地测量地震计的特征参数, 即无阻尼自振周期和阻尼.

### 4.1 方波电流标定的应用——无阻尼自振周期 $T_n$ 的测定

无阻尼自振周期, 顾名思义就是地震计系统在没有阻尼或阻尼可以忽略的情况下的振动周期. 对于 FBS-3A 地震计而言, 无阻尼自振周期的标称值为 20 s.

无阻尼自振周期的测量过程如下: 将反馈地震计电子线路中起阻尼作用的阻尼电阻断开, 然后对地震计执行电流方波标定过程. 由于电子阻尼已经去除, 只有空气阻尼在起作用, 当忽略空气阻尼的作用时, 地震计系统将处在自由振荡状态. 该自由振荡的周期就是地震计系统的无阻尼自振周期.

### 4.2 正弦电流标定的应用——阻尼的测定

依据式(53)和(54), 可以设计阻尼的测定步骤如下: 向地震计的标定线圈中输入两组正弦电流: 一组电流具有频率  $\omega_n$ 、幅度  $B$ ; 另一组电流具有频率  $0.1\omega_n$  (或  $10\omega_n$ )、幅度  $5B$ . 分别测量出两组标定电流对应的输出幅度后, 将两个幅度值相除, 就可得到阻尼值  $\zeta$ .

### 4.3 地震计工作状态的简易判定

地震计架设完成后, 在使用过程中, 经常需要对地震计的工作状态作一个简易的判定. 通常的做法是: 给地震计一个合适的方波标定电流, 然后观察其输出响应, 尤其是观察其几个过 0 点之间的间距是否对称, 以及前后两个峰值的比例是否合适; 对地震计进行正弦电流标定, 可以在地震计的整个工作频带内进行, 也可以取两个特殊的频率进行. 具

体操作方式如前所述：一组采用频率 0.1 Hz、幅度  $V_b$  的正弦波；另一组采用频率 1 Hz、幅度  $10 V_b$  的正弦波，若仪器对这两组正弦波的响应保持输出幅度一样大，说明仪器工作正常。

## 5 结论

(1) 对地震计进行电流标定，是获取系统参数和了解仪器工作状态的一个简便而有效的手段。

(2) 从传递函数入手，应用系统分析手段，可以精确地对电流标定过程及输出情况进行描述和仿真。这种分析既可以在时间域进行，也可以在复频域进行。

(3) 电流方波标定输出曲线的特征点与仪器的固有参数之间有着密切的联系，通过分析这些特征点，可以方便地大致了解仪器的性能参数，如自振周期和阻尼等。

(4) 电流正弦标定的输出包含暂态过程和稳态过程，分析应用中所关心的是最终稳态过程；而且当输入的正弦电流的角频率远大于地震计的固有角频率，即  $\beta \gg \omega_n$  时，正弦电流标定的稳态输出的幅值与输入电流的角频率成反比。这可以简化对仪器工作性能判断的过程。

(5) 在深入了解电流标定过程的物理意义后，对于正确使用电流标定方法来测量地震计的无阻尼自振周期及阻尼有很好的指导意义；

(6) 由方波电流和正弦电流标定方法获得地震计的工作参数(如无阻尼自振周期和阻尼)，都是有一定的条件的。

(7) 除本文给出的测定地震计工作参数的几种实用方法外，还有振动台法、伪随机码法(李海亮，2000)等多种方法。在测定地震计工作参数方面，它们都是非常重要的方法。

在开展相关研究的过程中，笔者得到了中国地震局分析预报中心地震观测技术研究所诸位同仁的大力帮助和良好合作，同时也得到了童汪练先生和张少泉先生的悉心指导和热情帮助。在此一并表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- 李海亮. 2000. 地震计阻尼和自振频率的频域测定[J]. 地震地磁观测与研究, **21**(2): 7~12
- 刘庆伟, 庄灿涛, 刘慧宁. 2001. FBS-3A 型反馈式宽频带地震计的传递函数[J]. 地震学报, **23**(1): 79~86
- 王广福. 1986. 地震观测系统的标定与检查[M]. 北京: 地震出版社, 14~18
- 赵康, 庄灿涛, 沈善杰. 1997. 适用于数字地震台网的宽频带反馈地震计[J]. 地震, **17**(增刊): 36~44
- 郑君里, 杨为理, 应启珩. 1981. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 333~336
- 庄灿涛. 1995. 数字地震观测台网基础[A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 地震观测技术[C]. 北京: 地震出版社, 235~257

## STUDY ON THE CALIBRATION OF FEEDBACK BROADBAND SEISMOMETER FBS-3A WITH CURRENT SIGNAL

Liu Qingwei      Zhuang Cantao

*(Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China)*

**Abstract:** With the time passing by and the environment changing, the characteristics of the components in a seismometer may change a little to some extent. To realize this kind of change and take steps to control or adjust it is helpful to improve the reliability of the sensor's output. Therefore, every seismometer must be calibrated, either before leaving factory or in use. Up to now, there are two kinds of calibrations used frequently with current signals, namely using square-wave signal and sine-wave signal. From the point of view of systematic analysis, after getting the transfer function of the seismometer and simplifying the process of calibration with current signal, research has been done, in complex frequency domain, to the process of calibration with simulation method. On the basis of this, the relationship between the output figure of square-wave calibration and the intrinsic parameters of a sensor is discussed in this paper. The relationship between the steady output of sine-wave calibration and the calibration current, as well as the relationship of the calibration outputs caused by two sine waves with specific frequencies is presented. As the result of the theoretical analysis, two applications of the calibration with current signal are provided. The aim of this paper is to clarify the meanings of these two commonly used calibration methods, which would be fairly positive and helpful to the adjustment and the practical application of the seismometers.

**Key words:** calibration with current signal; FBS-3A; broadband seismometer