第6卷 第1期 地震学报 Vol. 6, No. 1
1984年2月 ACTA SEISMOLOGICA SINICA Feb., 1984

最小相位地震仪及其相频特性的确定*

王广福 于桂生 周公威
(中国科学院地球物理研究所) (国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文根据最小相位系统判据，对目前我国地震台站普遍使用的几种类型地震仪做了分析指出，这些仪器都是最小相位系统；最小相位系统的相频特性可由其幅频特性计算出来.

作者按照"地震台站观测规范"规定，标定了 DD-1 型、DK-1 型和基式地震仪的幅频特性. 然后，用希尔伯特（Hilbert）变换由实测幅频特性计算了它们的相频特性. 并把计算结果与用相位特性测试仪器实测的结果做了比较：对于 DD-1 型地震仪，在从 0.0125 秒到 12.5 秒的周期范围内，最大误差小于 5°；对于 DK-1 地震仪，在从 0.05 秒到 100 秒的周期内，最大误差小于 5°；对于基式地震仪，在从 0.01 秒到 100 秒的周期范围内，最大误差小于 1.5°.

这种方法可以解决台站仪器相频特性的标定问题. 标定精度比快速傅里叶变换（FFT）方法和用近似解析表达式计算方法要高.

应用这种方法的关键是能对被测系统幅频特性曲线高频段和低频段的斜率做出正确的判断. 这种方法的误差取决于幅频特性曲线的标定精度. 用插值方法计算，计算的尾差和截断误差可以不必考虑.

一、前 言

地震仪，做为线性系统，无畸变记录准则是：在频率域里，在地震波通频带内，系统的幅频特性应是平直的，相频特性等于零或是过坐标原点的一条斜线；在时间域里，系统的时间特性（脉冲响应函数）应是狄拉克（Dirac）δ 函数，或是延迟 τ 狄拉克函数 $\delta(t-\tau)$. 但是，严格来说，任何一种地震仪都无法满足上述条件. 因此，地震图上反映的地动规律会产生畸变，特别是在体波的初动部分.

随着地震学与测震学的不断发展，对于地震图的解释工作愈加趋向定量化，从而对地震仪记录的波形精度提出了要求. 从地震图上消除观测系统本身带来的畸变和地面的脉动干扰，使得真实地动波形得以恢复这一测震学的反演问题提上了日程. 为此，必须确知系统的幅频特性和相频特性，或系统的时间特性.

此外，在地震波的群速度和相速度测量，以及地震波的折射和衰减测量中，也都对地震仪的相频特性提出了要求.

对于输入和输出都是电量的系统，测定相频特性并不困难，借助于电子示波器或频率

* 1982年12月22日收到初稿，1983年5月9日收到修改稿.

http://www.dizhenxb.org.cn

特性测试仪就可进行．然而，地震仪是个机电系统：输入是力学量(地动位移，速度和加速度)，输出是电学量．直接测量机电系统相频特性，目前还没有很好的办法．

在地震台站上，通常，对于传递函数已知的地震仪，如电流计记录地震仪，采用分段标定方法，测得仪器基本常数，而后由传递函数可计算出地震仪系统幅频特性和相频特性[1]．对于包含有复杂环节的地震仪，像电子放大笔绘记录地震仪，反馈地震仪等，亦可用近似方法写出传递函数的解析表达式，可是，要确定传递函数的系数，并不容易．为此，要在标定实验基础上，根据实测幅频和相频特性或脉冲响应进行曲线拟合．对于高阶系统来说，计算很复杂，甚至可能得不到收敛的计算结果[2][3][4]．因此，用传递函数计算系统幅频和相频特性的方法并不总是能成功的．脉冲标定方法近年来得到了相当广泛的运用．由地震仪对已知标定信号的响应的傅里叶变换可求得地震仪的幅频和相频特性．脉冲标定方法的发展是与快速傅里叶变换（FFT）算法的出现分不开的．但是，用 FFT 方法求得的系统幅频特性与相频特性，高频段误差很大．因此至今，用 FFT 方法标定地震仪的高频特性仍是一个尚待解决的课题[5][6]．最近，在自动控制系统的动态测试中，广泛采用了伪随机二进制信号（Pseudo-random binary signal）．在地震仪的标定中，采用伪随机信号和相关分析方法，相频特性的标定精度，据说能达到 1°[7]．这是一种很有前途的标定方法．

综上所述，对于复杂系统相频特性的标定，无论采用哪一种方法，都需要对仪器的响应记录进行采样，而后进行数值计算．可是，目前，在我国地震台站上，采用的是笔绘记录和电流计记录方式，采样频率受到记录滚筒转速的限制，因而，也限制了这些方法的应用．

在国家地震局制订的“地震台站观测规范”中，对于台站使用的各种类型地震仪幅频特性的标定做了统一规定，并在台站上配备了相应的测试设备，这对在我国地震台站应用最小相位原理确定相频特性提供了可能．

如果一种类型地震仪是最小相位系统，那么，它的幅频特性 $U(\omega)$ 与相频特性 $\gamma(\omega)$ 之间存在一一对应关系．这种关系可用希尔伯特变换表示[8]

$$\ln U(\omega) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\gamma(\omega)}{u-\omega}du, \tag{1}$$

$$\gamma(\omega) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\ln U(\omega)}{u-\omega}du. \tag{2}$$

由上式可见，最小相位系统地震仪的相频特性可由其幅频特性计算出来，反之亦然．

二、最小相位系统及其识别

对于任何物理可实现测量系统，它总是要使得通过的被测信号在时间上产生延迟：在 t 时刻系统的输出，不仅取决于 t 时刻系统的输入，还与 t 时刻之前系统的输入有关．基于线性时不变系统对于通过信号的延时作用，线性系统可分为最小相位滞后系统，最大相位滞后系统和混合相位滞后系统．与此相应，在时间域中，有最小能量延迟系统，最大能量延迟系统和混合能量延迟系统之分．

http://www.dizhenxb.org.cn

最小相位滞后系统（最小相位系统）是指这样一个系统，假如它的幅频特性和相频特性是 $U(\omega)$ 和 $\gamma(\omega)$，时间特性是 $w(t)$，对于另外任何一个物理可实现系统，其幅频特性、相频特性和时间特性分别为 $U_g(\omega)$、$\gamma_g(\omega)$ 和 $w_g(t)$，如果它们的幅频特性相同

$$U(\omega)=U_g(\omega),$$

在频率域中恒有

$$-\frac{d\gamma_g(\omega)}{d\omega}\geqslant-\frac{d\gamma(\omega)}{d\omega}, \tag{3}$$

在时间域中恒有

$$\int_0^t w^2(t)dt\geqslant\int_0^t w_g^2(t)dt. \tag{4}$$

和单一频率正弦波 $\sin\omega t$ 通过系统时产生的时延 $(-\gamma(\omega)/\omega)$ 的概念相似，$(-d\gamma(\omega)/d\omega)$ 表示系统对波包的群延时．(3) 和 (4) 式表明，最小相位系统的群延时最小，最小相位系统时间特性的能量分布要比最大相位系统和混合相位系统靠前．

最小相位系统的一个重要性质是，它们的幅频特性和相频特性之间满足希尔伯特变换关系．所以，又称满足希尔伯特变换的线性系统为最小相位系统．

在一个不存在不稳定性的局部反馈系统中，如果组成系统的诸环节都是最小相位环节，那么该系统必定是最小相位系统．我国台站现有地震仪无例外由以下两种类型环节

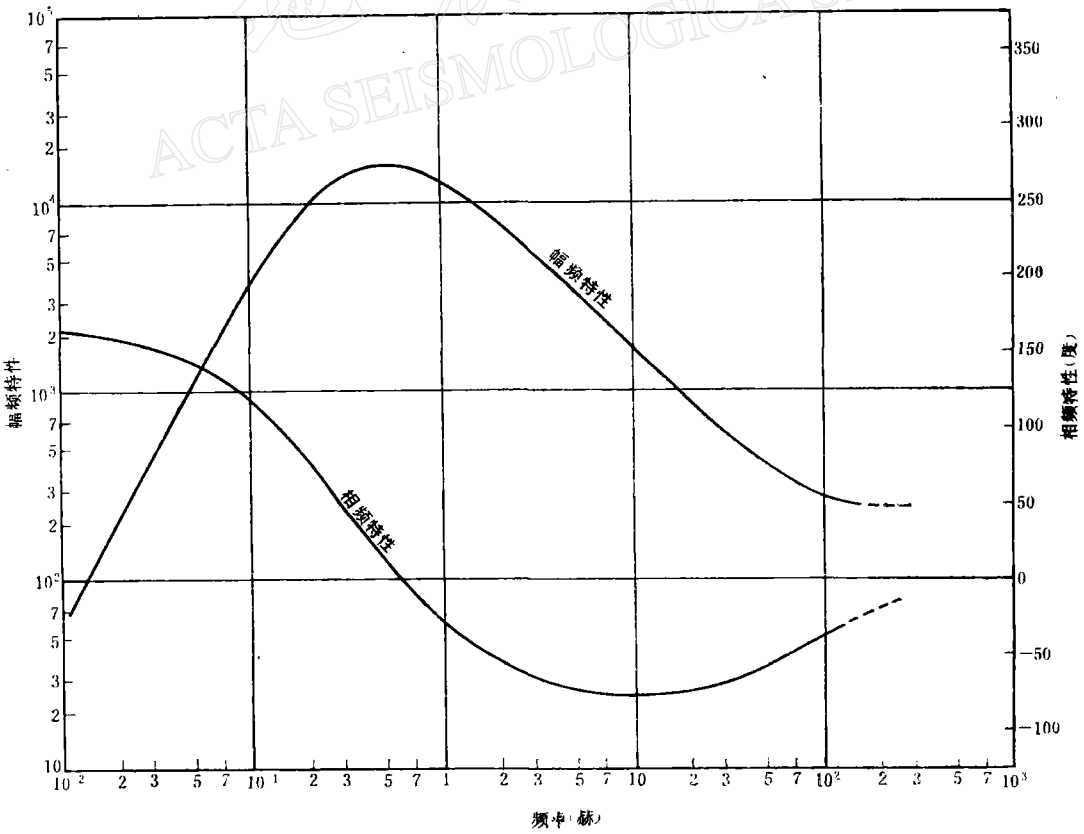

图 1 实测 DD-1 放大器频率特性曲线

http://www.dizhenxb.org.cn

组成：传递函数已知的二阶环节、一阶环节，如拾震器，电流计，记录笔，电动式换能器等；电子积分放大环节．如对这些地震仪最小相位特性做出判断，只需两种判据．

当某个环节的传递函数 $W(S)$ 已知时

$$W(S)=\frac{A_0+A_1S+\cdots\cdots+A_nS^n}{B_0+B_1S+\cdots\cdots+S^m},\tag{5}$$

如果 $W(S)$ 的全部零点和极点都在 S 左半平面上(零点可以在虚轴上)，则它是最小相位环节．众所周知，上述一、二阶环节都满足这一条件．

如果待识别的系统或环节，其传递函数难于用解析式表达，或对其不甚了解时，可用实验方法确定其最小相位性质[9]．这种情况适用于电子网络中．

将实验测得的幅频特性 $U(\omega)$ 和相频特性 $\gamma(\omega)$ 绘在双对数坐标上(作波德图)．1．由幅频特性曲线得到高频段的斜率渐近于 $-20(m-n)$ 分贝/十倍频程，m 和 n 分别为传递函数分母和分子多项式次数；2．如果相频特性曲线的高频渐近线是 $-90°(m-n)$，那么，被测系统或环节必定是最小相位．值得注意的是，在标定系统幅频和相频特性时，频率应该选取足够高，以便能对它们的渐近趋势做出正确判断．

实测 DD-1 放大器幅频和相频特性曲线如图 1 所示．由幅频特性曲线判定：当 $\omega\to\infty$ 时，$m-n=0$，这时相频特性曲线亦渐近于零，满足最小相位条件．它们的传递函数的解析表达式可近似写作

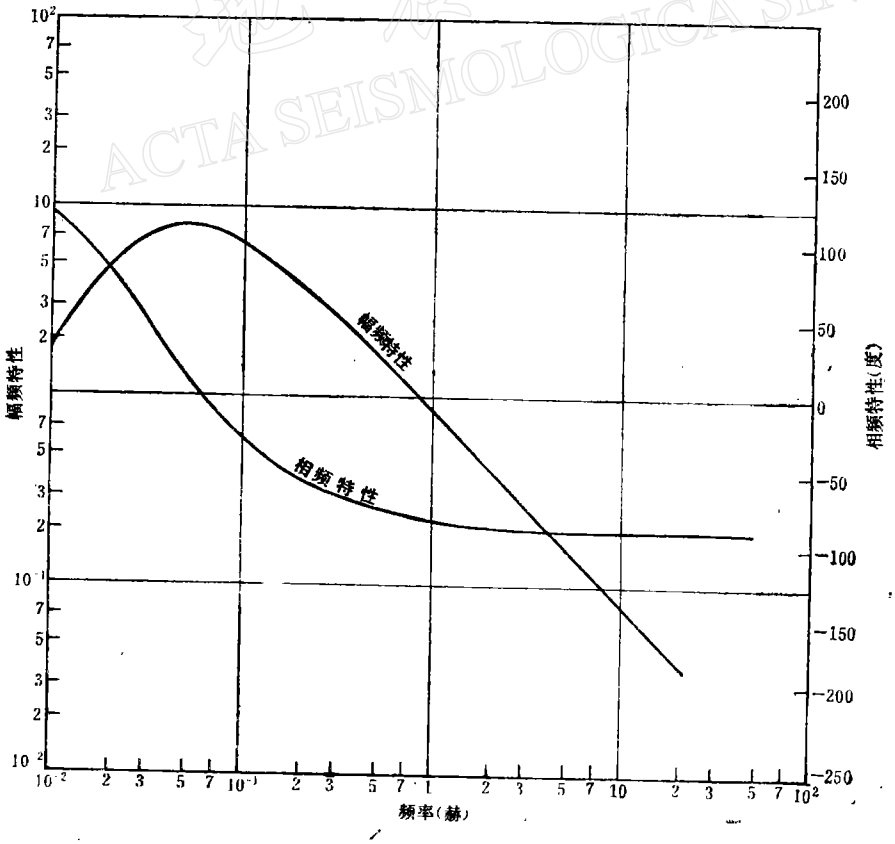

图 2　实测 DK-1 放大器频率特性曲线

http://www.dizhenxb.org.cn

$$W(S)=\frac{A_2S^2+A_3S^3}{B_0+B_1S+B_2S^2+S^3}. \tag{6}$$

实测 DK-1 放大器频率特性曲线如图 2 所示. 由幅频特性曲线高频段判定: 当 $\omega\to\infty$, 斜率为 -20 分贝/十倍频程, $m-n=1$, 这时相频曲线渐近线恰为 $-90°$, 故满足最小相位条件. 它的传递函数的解析表达式可近似写作

$$W(S)=\frac{A_2S^2}{B_0+B_1S+B_2S^2+S^3}. \tag{7}$$

三、最小相位地震仪相频特性的计算

由最小相位系统的幅频特性计算其相频特性,可用两种方法: 折线近似法和积分法.

折线近似法[10]的基本原理是, 用折线段逼近系统的幅频特性曲线. 这样做的结果相当于把系统看做是由若干个具有最小相位特性的典型环节级联而成. 这些典型环节的幅频特性不外两种类型: 斜率为常量的直线型幅频特性曲线和斜率为常量的半无限直线型幅频特性曲线. 对于这两种典型环节的相频特性可依不同斜率为参量查表得到. 诸环节相频特性曲线相加,得到仪器系统的相频特性.

积分法,就是对公式(2)进行图解积分或数值积分. 图解积分法[11]简单, 在一般情况下都可使用,但精度比较低. 在具备一定计算条件的情况下,用数值积分法可以得到满意的结果.

在对公式(2)进行积分时, 为减少奇点的个数 ($u=0$, $u=\omega$, $u\to\infty$), 先进行坐标变换[12],引入新的变量

$$x=\ln(u/\omega),$$

并令 $L(x)=\ln U(x)$, 则可得到相频特性的计算式

$$\gamma(\omega)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\frac{dL(x)}{dx}-\left.\frac{dL(x)}{dx}\right|_{x=0}\right]\ln\coth\left|\frac{x}{2}\right|dx+\frac{\pi}{2}\left.\frac{dL(x)}{dx}\right|_{x=0}. \tag{8}$$

(8)式表明,系统在某一频率的相频特性 $\gamma(\omega)$, 不仅取决于幅频特性曲线在该点的斜率值 $\left.\frac{dL(x)}{dx}\right|_{x=0}$,而且还与在该频率附近幅频特性曲线斜率的变化

$$\left(\frac{dL(x)}{dx}-\left.\frac{dL(x)}{dx}\right|_{x=0}\right)$$

有关,不同频率贡献大小是由加权因子波德 (Bode) 权函数 $\ln\coth\left|\frac{x}{2}\right|$ 决定的. 当 $x=0$ 时, $\ln\coth\left|\frac{x}{2}\right|\to\infty$; $x\to\infty$ 时, $\ln\coth\left|\frac{x}{2}\right|=0$. 因此, 在被测频率附近幅频特性曲线斜率变化越大,对该频率相位特性贡献就越大;而在远离测点频段上, 幅频特性的影响可以忽略不计.

数值积分的计算框图如图 3 所示. 输入量: M 是幅频特性实测点数, $TT(M)$ 和 $UU(M)$ 是实测周期和幅频特性值, N 是积分区间, B 和 C 是实测幅频特性曲线的插值区间, Z_1 和 Z_2 是计算相频特性的下限和上限. 数值计算的步长取 $\ln 10^{0.05}$. 实测幅频特

http://www.dizhenxb.org.cn

性的插值是用拉格朗日三次插值公式．幅频特性曲线斜率 $FL(K)$ 的计算采用五点平滑公式．斜率的插值，在低频端亦采用三次插值公式，在高频端，则用线性插值公式．近似求积，是用辛普生公式．计算区间从 0.01 秒到 100 秒．

四、实验和计算结果

我们用分段标定方法，标定了DD-1、DK-1和基式地震仪的幅频特性，并分别由DD-1地震仪和基式地震仪系统幅频特性计算了它们的相频特性；由 DK-1 地震仪放大器-记录

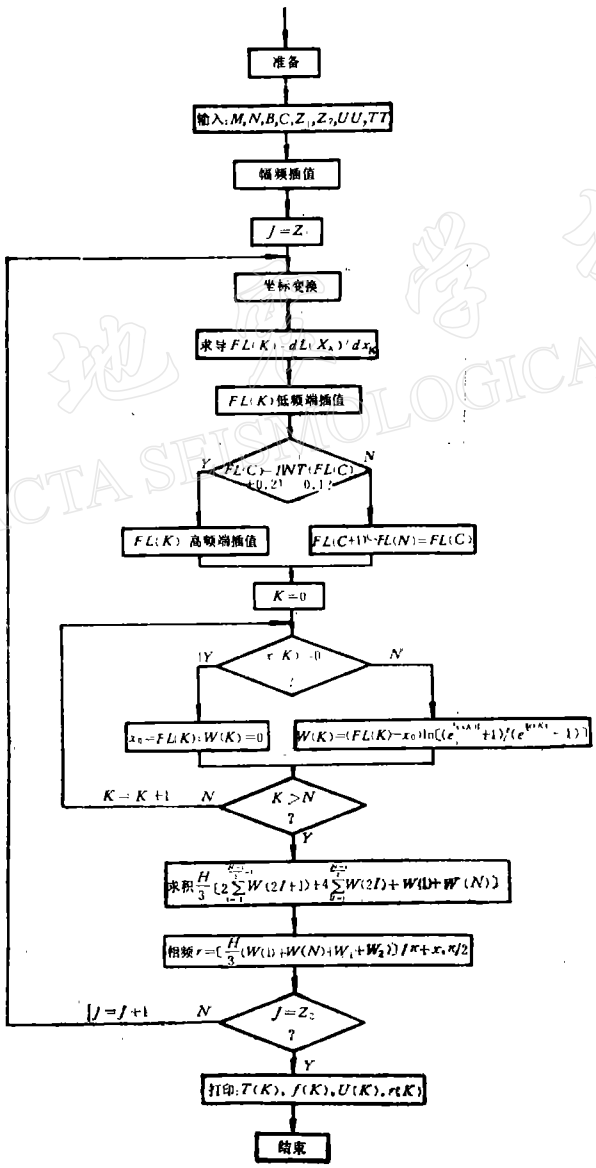

图 3　相频特性计算框图

http://www.dizhenxb.org.cn

笔的幅频特性计算出它的相频特性. 然后把计算结果与用分段标定法标定和用 BT6 超低频频率特性测试仪测定的结果做了比较,见图 4、5、6 和 7,图中"·"是实测点.

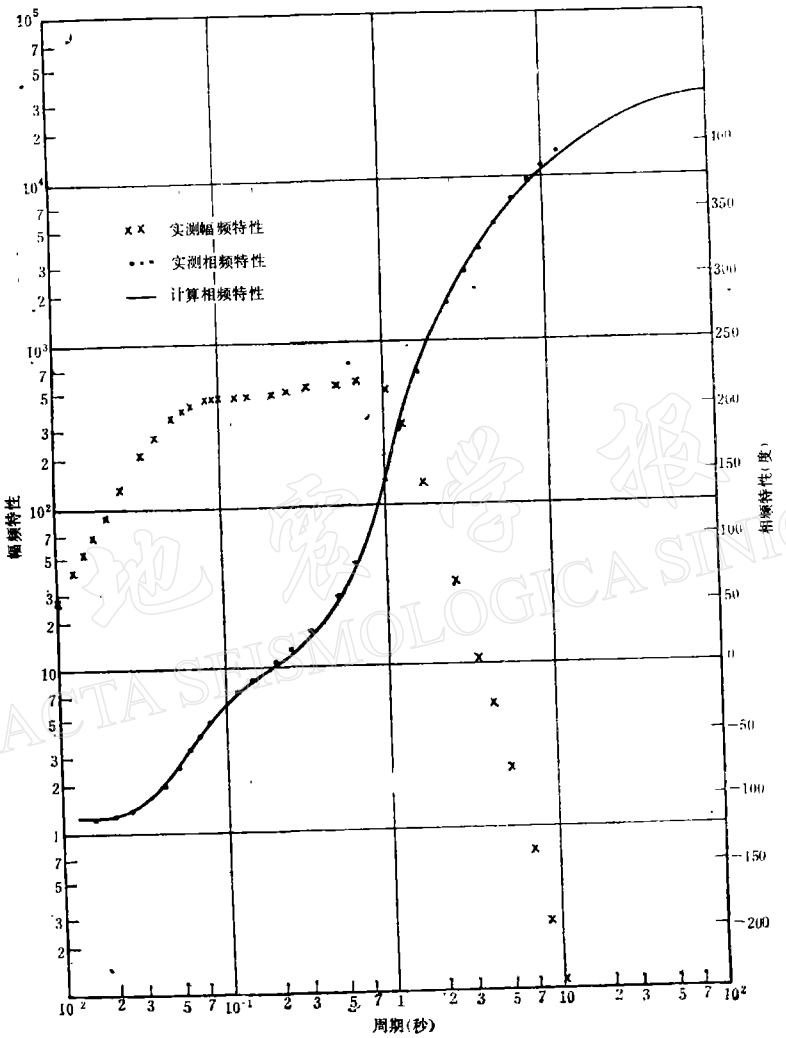

图 4 DD-1 地震仪实测和计算相频特性 (见附表 1)

由实验和计算结果可以得出以下几点结论:

1. 按照"地震台站观测规范"的规定,测定地震仪的幅频特性,再由幅频特性计算仪器系统的相频特性,计算结果与用 BT6 实测结果相比较: 对于 DD-1 地震仪,在从 0.0125 秒到 12.5 秒范围内,最大误差小于 5°;对于 DK-1 地震仪, 在从 0.05 秒到 100 秒的周期范围内,最大误差小于 5°; 对于基式地震仪,在从 0.01 秒到 100 秒的周期范围内,最大误差小于 1.5°.

2. 计算相频特性的最大误差出现在幅频特性曲线拐弯处和实测幅频特性曲线存在明显偏差段(实测中有时难免出现这种情况),如图 6、7DK-1 地震仪放大器-笔头的幅频特

http://www.dizhenxb.org.cn

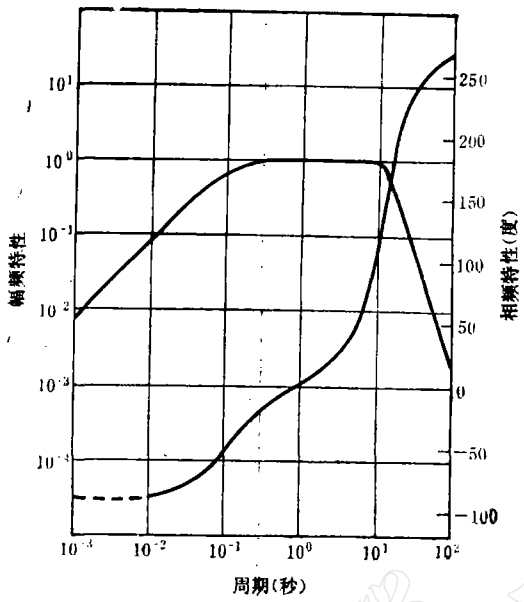

图 5　基式地震仪实测和计算相频特性　(见附表 II)

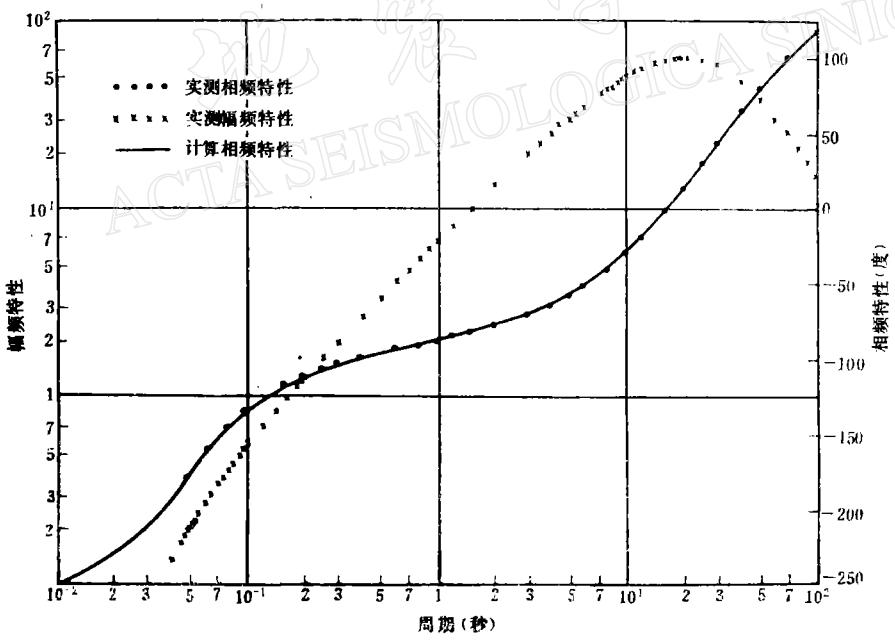

图 6　DK-1 地震仪放大器-记录笔实测和计算相频特性　(见附表 III)

性曲线，在 0.1 秒到 0.2 秒周期附近，其斜率由 20 分贝/十倍频程过渡到 40 分贝/十倍频程，计算相频特性的误差大于 4°，而在其它频率，都小于 3°；再如图 4，DD-1 地震仪实测幅频特性曲线在 0.1 秒到 1 秒周期范围内比较平坦，但在 0.3 秒附近测量值有起伏，结果导致最大误差出现．显然，在幅频特性曲线拐弯处加密测点和提高平坦段的测量精度，还可以把相频特性的标定精度提高．

http://www.dizhenxb.org.cn

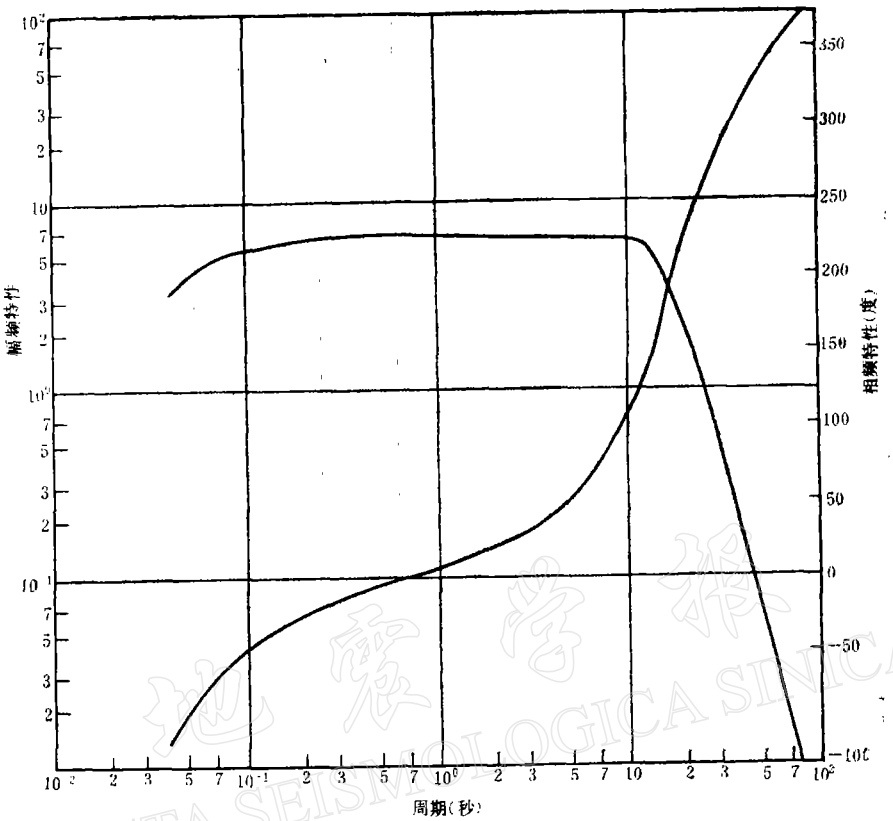

图 7 DK-1 地震仪的频率特性 (见附表 IV)

3. 为计算某一频段的相频特性，所需幅频特性在高频端和低频端至少应延伸出一个十倍频程. 在实际标定中，很难做到这一点. 但是，在高频端和低频端对幅频特性曲线的

表 1 DD-1 地震仪相频特性低频段插值计算结果

周期(秒)	实测相频特性(度)	计算相频特性(度)	误差(度)
20	434.04	440.15	−6.11
33.33	423.435	423.77	−0.335
47.62	428.29	431.33	−3.04
66.67	431.46	436.57	−5.11
76.9	438.35	433.25	5.1
90.9	440.15	434.035	6.11

表 2 DK-1 地震仪放大器-记录笔相频特性高频段插值计算

周期(秒)	实测相频特性(度)	计算相频特性(度)	误差(度)
0.04	−199.04	−198.94	−0.1
0.0300	−218.56	−214.68	−3.88
0.02	−237.52	−231.93	−5.59
0.015	−246.41	−241.69	−4.72
0.01	−254.2	−252.132	−2.068

http://www.dizhenxb.org.cn

附表 I

周期(秒)	实测幅频特性	实测相频特性(度)	计算相频特性(度)	误差(度)
0.0125	41.72	−112.89	−112.0	−0.89
0.02	87.07	−111.25	−111.36	0.11
0.025	127.48	−107.78	−107.6	−0.18
0.04	266.59	−86	−85.8	−0.2
0.05	345.64	−70.52	−70.23	−0.29
0.0833	451.27	−34.65	−35.71	1.06
0.1	464.34	−24.48	−25.55	1.07
0.142	474.22	−7.4	−9.66	2.26
0.2	474.5	7.03	2.79	4.24
0.333	523.71	30.08	26.65	3.43
0.5	541.64	55.91	53.32	2.59
1.0	505.05	143.79	144.07	−0.28
1.25	317.86	184.6	186.73	−2.13
2.5	34.25	275.19	276.84	−1.65
3.33	11.63	303.17	304.9	−1.73
4.0	5.8	319.57	320.78	−1.21
5.0	2.357	337.95	338.61	−0.66
6.67	0.711	358.68	358.82	−0.14
8.33	0.26	373.17	372.66	0.51
10.0	0.1139	383.19	381.96	1.23
12.5	0.038	394.69	391.05	3.64

附表 II

周期(秒)	实测幅频特性	实测相频特性(度)	计算相频特性(度)	误差(度)
0.01	0.0831	−85.19	−85.13	−0.06
0.0158	0.131	−82.39	−82.31	−0.08
0.0199	0.1641	−80.47	−80.36	−0.11
0.0398	0.3152	−71.47	−71.27	−0.2
0.1	0.6426	−49.6	−49.41	−0.19
0.158	0.8020	−36.03	−35.94	−0.09
0.199	0.8628	−29.98	−29.5	−0.48
0.398	0.9658	−13.53	−13.52	−0.01
1.0	1.0034	1.63	1.67	−0.04
1.585	1.0099	9.16	9.27	−0.11
1.995	1.0131	13.64	13.74	−0.1
3.981	1.0318	33.08	33.36	−0.28
10.0	1.0292	103.78	104.98	−1.2
15.849	0.472	173.79	172.35	1.44
19.952	0.2422	197.94	196.89	1.05
39.81	0.0299	236.08	235.79	0.29
100.0	0.00188	256.65	256.55	0.1

斜率进行插值计算，其误差与频段内相当，尾差可不考虑．对幅频插值，亦可忽略求导中的截断误差．如对 DD-1 地震仪，大于 12.5 秒频段相频特性的插值计算结果见表 1．对于 DK-1 地震仪放大器-记录笔周期小于 0.04 秒频段的相频特性插值计算结果见表 2．

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA

http://www.dizhenxb.org.cn

附表 III

周期(秒)	实测幅频特性	实测相频特性(度)	计算相频特性(度)	误差(度)
0.051	0.213	−179.93	−179.13	−0.8
0.064	0.306	−161.43	−160.47	−0.96
0.08	0.413	−146.41	−148.25	1.84
0.1	0.56	−134.14	−138.27	4.13
0.16	0.993	−116.59	−121.39	4.8
0.2	1.288	−110.83	−114.96	4.13
0.25	1.616	−106.74	−109.45	2.71
0.3	1.98	−103.12	−105.93	2.81
0.4	2.678	−98.68	−100.7	2.02
0.6	4.04	−93.28	−94.8	1.52
0.8	5.4	−90.37	−90.93	0.56
1.0	6.8	−87.22	−87.78	0.56
1.2	8.1	−84.7	−85.16	0.46
1.5	9.96	−82.2	−81.94	−0.26
2.0	13.21	−78.0	−78.1	0.1
3.0	19.28	−70.68	−70.1	−0.58
4.0	24.9	−64	−63.56	−0.44
5.0	29.91	−57.63	−57.44	−0.19
6.0	34.7	−50.68	−51.35	0.67
8.0	43.33	−40.18	−40.71	0.53
10.0	50.0	−29.23	−30.42	1.19
12.0	55.0	−19.83	−20.62	0.79
16.0	60.33	−1.92	−3.28	1.36
20.0	62.67	13.13	11.57	1.56
25.0	60.67	30.01	27.93	2.08
30.0	56.67	43.7	43.44	0.26
40.0	46.67	65.57	63.45	2.12
50.0	36.67	80.66	78.38	2.28
70.0	26	101.0	97.99	3.01
100.0	15	118.67	118.67	0

附表 IV

周期(秒)	幅频特性	相频特性(度)	周期(秒)	幅频特性	相频特性(度)
0.051	4.10	−88.95	3.0	6.58	30.58
0.064	4.78	−70.25	4.0	6.49	41.01
0.08	5.16	−57.97	5.0	6.38	51.32
0.1	5.6	−47.92	6.0	6.34	62.06
0.16	6.21	−30.84	8.0	6.16	83.50
0.2	6.44	−24.27	10.0	6.12	107.16
0.25	6.47	−18.59	12.0	5.69	133.38
0.3	6.60	−14.89	16.0	3.86	185.51
0.4	6.70	−9.32	20.0	2.17	224.98
0.6	6.75	−2.73	25.0	1.03	258.07
0.8	6.76	1.84	30.0	0.532	282.73
1.0	6.82	5.69	40.0	0.176	312.14
1.2	6.77	9.01	50.0	0.0688	331.95
1.5	6.68	13.28	70.0	0.0174	356.61
2.0	6.68	18.90	100.0	0.00339	380.847

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA

http://www.dizhenxb.org.cn

4. 实测幅频特性曲线高、低频段斜率的渐近趋势判断要正确，每差 20 分贝/十倍频程，计算的相位误差可达 90°. 在高阶系统中，特别要注意.

这项工作得到国家地震局地球物理研究所曲克信同志的关心和支持；其中一些结果曾和张奕麟同志做过有益的讨论，对作者很有启发和帮助，在此一并致谢.

参　考　文　献

[1] 中国科学院地球物理所，地震仪器概论，科学出版社，1975.
[2] W. D. T. 戴维斯，自适应控制系统的识别，(中译本，潘裕焕译)科学出版社，1977.
[3] A. Plešinger, R. Vich, On the identification of seismometric systems and correction of recorded signals for identified tranfer functions, *Z. Geophysik*, **38**, 543—554, 1972.
[4] N. K. Sinha, Estimation of transfer function of continuous system from sampled data, *Proc. IEE*, **119**, 1972.
[5] З. И., Аранович, Э. И. Зеликман, и др., Вопросы импульсной калибровки сейсмологических трактов, Veröff. Zentralinst. *Phys. Erde*, 31, *Teil*, 2, 1975.
[6] H. Bakun. William, Dratler Jay, Jr., Empirical transfer functions for stations in the central Califonia seismological network, Menlo Park, California, 1976.
[7] Jon Berger, D. C. Agnew, R. L. Parker, Seismic system calibration: 2. Cross-spectral calibration using random binary signals, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **69**, 1, 271—288, 1979.
[8] 燃料化学工业部石油地球物勘探局计算中心站等，地震勘探数字技术，第二册，科学出版社，1974.
[9] 绪方胜彦著，现代控制工程，(中译本，卢伯英译)，科学出版社，1976.
[10] 王广福，地震观测系统的标定与检查，地震出版社，(待出版).
[11] N. A. 安斯提，地震勘探仪器，(中译本，牛毓荃等译)，科学出版社，1976.
[12] P. M. Bolduc, R. M. Ellis, and R. D., Russell, Determination of the seismograph phase response from amplitude response, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **62**, 6, 1665—1672, 1972.

ACTA SEISMOLOGICA SINICA

http://www.dizhenxb.org.cn

MINIMUM-PHASE SEISMOGRAPHS AND THE DETERMINATION OF THEIR PHASE RESPONSES

WANG GUANGFU YU GUISHENG
(*Institute of Geophysics, Academia Sinica*)

ZHOU GONGWEI
(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

Abstract

On the basis of minimum-phase criteria analysis has been made for some kinds of seismographs which are now in common use at Chinese seismological stations. The result shows that such seismographs are minimum-phase systems. The phase responses may be calculated from their amplitude responses.

According to The Operating Code for eismological Observation promulgated by State Seismological Bureau the amplitude desponse of the type DD-1, DK-1, and SK seismographs have been calibrated and their phase responses were calculated from these amplitude responses by the Hilbert transformation. The calculated phase responses were compared with that measured by a phasometer. The maximum error was found to be less than 5° for type DD-1 and DK-1 seismographs in the period range from 0.0125 s to 12.5 s and 0.05 s to 100 s, respectively. For type SK seismograph in the period range of 0.01 s t o100 s the maximum error is less than 1.5°.

This technique may be used to calibrate the seismograph phase response at the permanent stations. It is more accurate than the FFT method and the analytical method by means of approximate expression of a transfer function.

The key to the use of this technique lies in the correct judgement of the slopes of the higher and lower frequency parts of the amplitude response curve. The error depends on the calibration accuracy of the amplitude response. By interpolation the tail and the truncation error may be neglected.

http://www.dizhenxb.org.cn