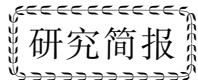


文章编号: 0253-3782(2003)06-0667-05



数字地震仪系统传递函数的一种计算方法^{*}

颜其中 何家斌 高杰

(中国昆明 650041 云南省地震局)

关键词 数字地震仪系统 脉冲标定 传递函数 仿真

中图分类号: P315.62 **文献标识码:** A

随着科学技术的发展,近年来我国地震观测大量采用数字地震仪系统,并将逐步取代原模拟记录系统,这是地震观测工作中的一大飞跃。它使我们有可能更快地进行大震速报,更方便地从地震记录中获取更多、更真实的信息,从而进行更深入的地震科学的研究。

由我国港震公司生产的速度型数字地震仪系统包括 FBS-3A 宽带反馈式地震计^①、EDAS-3 型地震数据采集器以及电信传输系统和计算机系统。当地震发生时,仪器记录了地震信号,而我们从计算机中读出的信号只是一些无量纲整数,并非是真正的地动速度或地动位移,它必须和数字地震仪系统的传递函数进行反褶积才能得到地动速度,再积分一次得到地动位移,因此,获得数字地震仪系统的传递函数是至关重要的,可以说,没有完整的传递函数(包括幅频特性和相频特性),许多基于地震波形资料进行的研究和大震速报工作不能正确地进行。

数字地震仪系统在时间域的传递函数,即系统对单位脉冲 δ 的响应函数,是定量反映系统特性的时问函数,在频率域包括幅频特性和相频特性。获得传递函数的方法一般采用实测法,即所谓的“标定”。但现在采用的正弦波标定方法只能获得幅频特性,不能获得相频特性,至今未见直接实测整个数字地震仪系统相频特性的方法。目前,国际上通常使用的获得整个地震仪系统传递函数的方法是分别计算地震计、数采(或电流计、记录器)等各组成部分的传递函数,然后在变换域相乘。计算地震计的传递函数是直接求解简化了的摆的动力学微分方程,而数据采集器(包括放大器、滤波器、模数转换等)是由理论设计分析得到的传递函数,各部分的传递函数通常用零点、极点的形式给出(陈运泰 等, 2000; Bormann, 2002)。

笔者认为,这种方法过于复杂、繁琐,各种假定、简化不可避免地带有一定的人为性。而本文计算数字地震仪系统传递函数采用的方法简单、直观,具有清晰的物理意义。

1 计算方法

本研究用数字地震仪系统来笼统地表示包括 FBS-3 宽带反馈式地震计、EDAS-3 型地震数据采集器、电信传输系统和计算机在内的一个黑匣子。地震信号 $f(t)$ 输入后被数字地震仪系统褶积成计算机所显示的输出信号 $g(t)$ 。显然,数字地震仪系统应具有线性和稳定性两个基本特性,因此,输入信号 $f(t)$ 和输出信号 $g(t)$ 之间的关系由褶积积分给出(Bath, 1973),即

* 云南省自然科学基金(2001D0080M)资助。

2002-07-01 收到初稿, 2003-05-26 收到最后修改稿并决定采用。

① 北京港震机电技术有限公司. 1998. FBS-3A 宽带反馈式地震计用户手册, 10,12, 15.

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

或

$$g(t) = h(t) * f(t) \quad (2)$$

或在频率域表示为

$$G(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (3)$$

其中, $h(t)$ 是数字地震仪系统的传递函数; $G(\omega)$, $H(\omega)$, 和 $F(\omega)$ 分别是 $g(t)$, $h(t)$ 和 $f(t)$ 的富氏谱, 即

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

显然, 如果标定时输入的信号为单位 δ 函数, 由式(2)可知, 在计算机中获得的输出信号 $g(t)$ 即为数字地震仪系统的传递函数 $h(t)$. 然而, 实际上我们不可能获得这种输入信号, 因此, 在实际系统标定中采用正弦波和矩形方波两种输入信号, 分别称为正弦波标定和脉冲标定.

在作正弦波标定时, 每次输入的信号 $f(t)$ 分别为不同频率的单频正弦波, 计算机上得到的输出信号 $g(t)$ 也为相应频率的单频正弦波. 由式(3)即可得到系统的幅频特性, 因输入信号为单频正弦波, 相位移动难以测量, 所以, 正弦波标定不进行相位特性测量.

在作脉冲标定时, 对宽频带地震计输入信号宽度为 300 s 的矩形方波, 而对甚宽频带地震计输入信号宽度为 1 200 s. 由于方波宽度较宽, 系统对前、后沿的响应基本上是完全分开的, 因此, 可单独将方波前沿(或后沿)阶跃函数作为输入信号 $f(t)$. 原理上, 这等同于频率、幅度各不相同的单频正弦波同时输入, 经与系统传递函数 $h(t)$ 褚积, 在计算机上得到输出信号 $g(t)$ 亦是相应频率正弦波的合成信号. 若能计算输入信号 $f(t)$ 和输出信号 $g(t)$ 的富氏谱, 即可由式(3)得到系统传递函数 $h(t)$ 的富氏谱(包括幅频特性和相频特性)

$$H(\omega) = \frac{G(\omega)}{F(\omega)} \quad (7)$$

进而由富里叶逆变换得到时间域的系统传递函数 $h(t)$.

实际上, 由于对无限长连续函数的截断和离散化, 再对离散序列进行快速富里叶变换(FFT)时不可避免地出现“泄漏”和“高频混迭”(aliasing)现象, 使得计算的谱和原函数的谱产生差别. 许多文献(Båth, 1973; Brigham, 1974)对这些现象以及减轻它们影响的途径进行了详细讨论, 本文不再赘述, 也难于作理论上的定量误差分析. 这里先对数字地震仪系统标定中输入的矩形方波前沿阶跃信号 $f(t)$ 进行理论谱与 FFT 计算的离散谱进行比较, 然后再用实例分析截断和离散化对响应信号的影响.

系统输入信号 $f(t)$ 是由式(8)定义的阶跃函数, 其中 $t_1 = 75.12$ s.

$$f(t) = \begin{cases} 0.0 & t < t_1 \\ 0.5 & t = t_1 \\ 1.0 & t > t_1 \end{cases} \quad (8)$$

容易计算得到 $f(t)$ 的富氏谱为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \frac{1}{\omega} e^{j(1.5\pi - \omega t_1)} \quad (9)$$

用 Hanning 函数式(10)对 $f(t)$ 从 0.0 s 至 $T_c = 163.84$ s 进行截断, 并按抽样间隔 $dt = 0.02/64$ s 抽样, 取抽样点数 $N = 524\,288$. 由于 $f(t)$ 是已知的阶跃函数, 故采样间隔 dt 可以取得很小.

$$X(t) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi t/T_c) \quad 0 \leq t \leq T_c \quad (10)$$

对离散序列 $f(k \times dt)$ ($k = 1, N$) 进行快速富里叶变换(FFT), 可得相应离散富氏谱

$$F(n/N \times T_c) \quad (n = 1, N/2 + 1)$$

图 1, 2 分别给出了两种谱的幅频特性和相频特性。从图 1, 2 可以看出, 在 20 s~20 Hz 的频率范围内, 式(8)给出的阶跃函数 $f(t)$ 的谱可用 Hanning 函数式(10)截断的、抽样间隔为 0.02/64 s 的阶跃函数离散序列的富氏谱 $F(n/N \times T_c)$ 很好地近似。

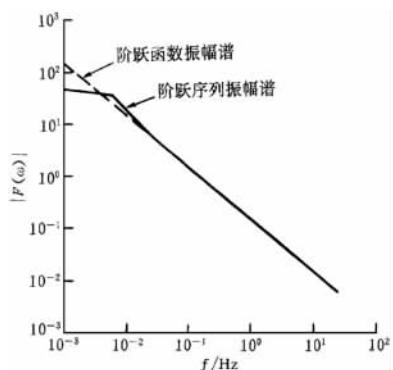


图 1 阶跃函数的振幅谱和
阶跃序列的振幅谱

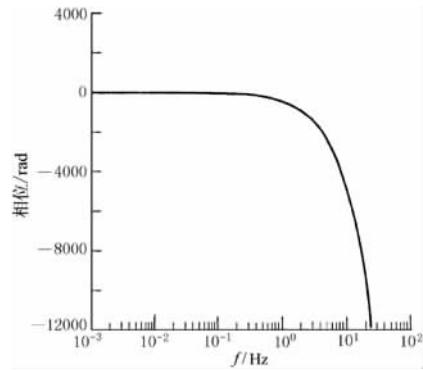


图 2 阶跃函数的相位谱和
阶跃序列的相位谱

数字地震仪系统对输入阶跃信号的响应输出如图 6 所示。首先对它进行分段多项式拟合。虽然数采的采样间隔为 0.02 s, 但我们仍可将多项式拟合函数用抽样间隔 0.02/64 s 来离散化。然后对拟合函数的离散序列加 Hanning 窗式(10)。实际上, 分段拟合的多项式与实际的阶跃信号响应输出可以非常好地一致, 加窗离散的影响也很小。对加窗后的离散序列进行快速富里叶变换, 得到系统阶跃信号响应的离散富氏谱 $G(n/N \times T_c)$ 。在得到系统输入函数 $f(t)$ 和输出函数 $g(t)$ 的富氏谱后, 即可由式(3)得到系统在频率域的传递函数, 即

$$H(n/N \times T_c) = \frac{G(n/N \times T_c)}{F(n/N \times T_c)} \quad (n = 1, N/2 + 1) \quad (11)$$

进而获得系统在时间域的传递函数 $h(t)$ 。

2 计算实例

2.1 从脉冲标定记录获得的传递函数

数字地震仪系统每日进行脉冲标定时, 对 FBS-3A 宽带反馈式地震计输入的方波脉冲宽度为 300 s。图 6 给出畹町台 2002 年 5 月 22 日脉冲标定时, 数字地震仪系统输出的垂直向脉冲前沿(阶跃函数)归一化响应记录, 数采采样间隔为 0.02 s。实践表明, 如果我们用这样的采样间隔对阶跃函数和相应的响应记录离散化, 即便再加 Hanning 窗后进行快速富里叶变换(FFT), 但由于抽样间隔太大, 造成“高频混迭”现象十分严重, 以致在约 3 Hz 以后无法确定谱的取值。经数字试验表明, 当抽样间隔 $dt = 0.02/64$ s 后, 离散阶跃函数序列加 Hanning 窗后的离散富氏谱 $F(n/N \times T_c)$ 在所关心的频带范围内无“高频混迭”现象, 且与阶跃函数的富氏谱是一致的(图 1,2)。因此, 我们以同样的抽样间隔离散系统阶跃函数响应的拟合多项式, 加 Hanning 窗后进行快速富里叶变换, 得到相应的离散富氏谱 $G(n/N \times T_c)$, 并由式(11)得到系统对输入信号为电流时的幅频特性和相频特性(图 3,4)。地震计标定线圈输入不同频率电流时, 其等价的地动速度输入 X 可表示为

$$X = \frac{S_c \times L_s^2 \times I}{J_s \times 2\pi \times f} \quad (12)$$

其中, f , I , S_c , L_s 和 J_s 分别为输入标定线圈电流的频率、电流强度、地震计标定线圈灵敏度、地震计折合摆长和转动惯量。将标定时输入的电流强度、系统响应的归一化因子和式(12)带入式(11), 即可得到系统对地动速度的幅频特性(图 5)。

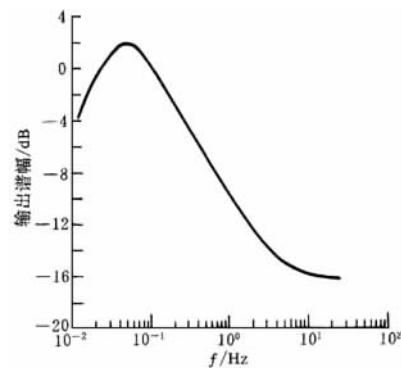


图 3 输入为电流时系统的幅频特性

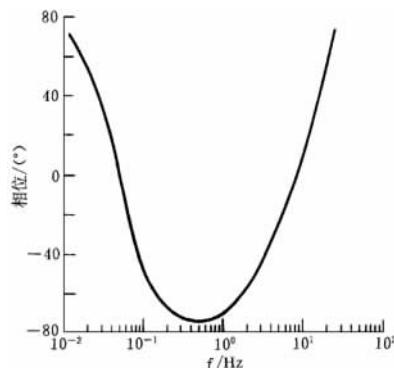


图 4 系统的相频特性

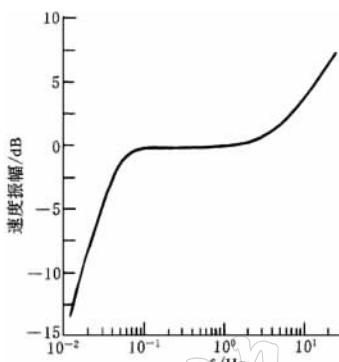


图 5 系统对地动速度的幅频特性

手册给出的相频特性却大相径庭。这说明地震仪系统数采部分对系统的传递函数有明显的影响，特别对相频特性的影响很大。

由图 3,4 所示畹町台数字地震仪系统垂直向幅频特性和相频特性进行快速逆富里叶变换，可得到系统垂直向在时间域输入为电流时的传递函数 $h(t)$ ，用它和脉冲标定时方波脉冲前沿(阶跃信号)褶积，为了便于比较，将其褶积结果绘入图 6 中。可以看出，系统的阶跃函数响应和阶跃信号与系统传递函数的褶积两条曲线除尾部稍有差异外，其余大部分都非常好地一致。说明所得到的系统幅频特性和相频特性是可信的。

同样，由图 4,5 所示畹町台数字地震仪系统垂直向幅频特性和相频特性，可得到系统垂直向对地动速度在时间域的传递函数，即系统对 δ 速度脉冲的响应函数。

2.3 地震记录的仿真

用从 2002 年 5 月 26 日脉冲标定曲线计算得到的系统 3 个方向的幅频、相频特性，首先将 5 月 26 日缅甸 $M_s 4.5$ 地震的畹町台记录还原成地动速度记录，地动速度记录积分一次得到地动位移记录，用地动位移记录和 DD-1 地震仪的传递函数褶积，即可得到仿真的 DD-1 地动位移记录。同样，用地动速度记录和 DK-1 地震仪的传递函数褶积，即可得到仿真的 DK-1 地动速度记录。图 7 给出了该地震畹町台记录仿真 DD-1 的地动位移记录。宽频带数字地震仪的频带范围涵盖了 DD-1 和 DK-1 的频带，因此，可以进行 DD-1 和 DK-1 的仿真。与原始记录相比，仿真的记录可以更清晰地看出许多震相。它是地震学家已经习

2.2 计算结果的验证

畹町台于 2002 年 5 月 22 日作了正弦波标定，测定系统的幅频特性。5 月 26 日附近缅甸发生一次 $M_s 4.5$ 地震，因此，对 22 日和 26 日的脉冲标定曲线均进行了传递函数的计算。表 1 给出了正弦波标定测得的和由两天脉冲标定曲线计算的地动速度响应因子 A_0 (count/ $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。从表中可以看出，由正弦波标定实测的系统响应因子和由脉冲标定计算的响应因子是相当一致的，并且系统是稳定的。

图 3 给出的系统对输入为电流时的幅频特性，与 FBS-3A 宽带反馈式地震计用户手册中给出的地震计相应的幅频关系，在 2 Hz 以前是相当一致的，但在 2 Hz 以后两者差别逐渐加大；而图 4 给出的系统相频特性曲线与由用户手册给出的相频特性却大相径庭。这说明地震仪系统数采部分对系统的传递函数有明显的影响，特别对相频特性的影响很大。

表 1 畹町台正弦波标定和脉冲标定计算结果

标定方法及日期	A_0 (UD 向)	A_0 (EW 向)	A_0 (NS 向)
5 月 22 日正弦波标定	111.490	29.835	30.585
5 月 22 日脉冲标定	111.528	29.884	30.356
5 月 26 日脉冲标定	111.272	29.898	30.376

惯了的地震记录，并且，用仿真结果可以按规范(GB17740-1999)测定地震震级 M_L 和 M_S (国家质量技术监督局，1999)。

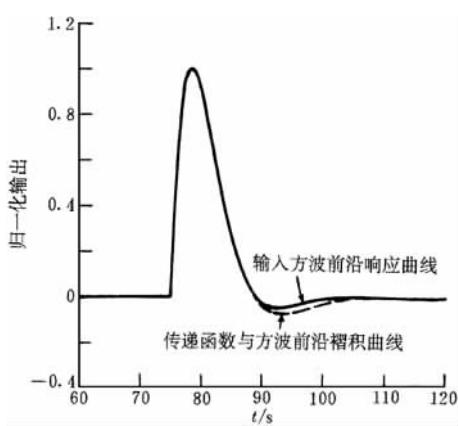


图 6 系统方波前沿响应和方波
前沿与传递函数的褶积

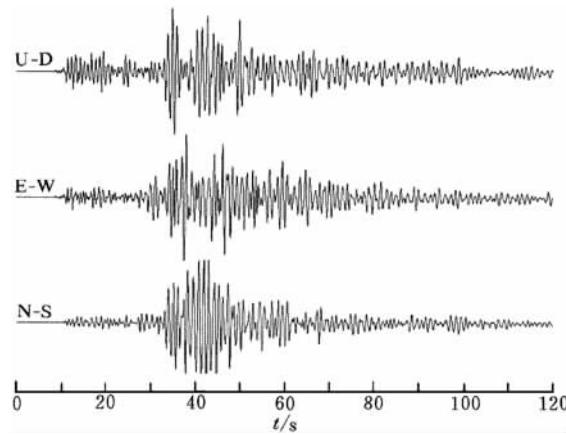


图 7 仿真的 DD-1 记录

3 结语

本研究采用的计算方法可以比较方便地得到数字地震仪系统的传递函数。其物理意义清楚、直观，从而可方便、适时地仿真 DD-1、DK-1 等不同类型地震仪的地动位移记录和速度记录，准确测定地震震级，进行大震速报。同时，根据扣除仪器效应的地面运动的位移、速度资料，可进行更深入的地球介质和震源物理的研究。

实际上，如能研制一个简单装置，使地震计产生一快速的“地动”位移，由数采的输出用本研究的计算方法可直接得到地震仪系统的传递函数，无须用标定电流和标定线圈来进行标定，从而可避免地震计各种参数的变化所带来的影响。

参 考 文 献

- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 等. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社, 15~34
 国家质量技术监督局. 1999. 地震震级的规定 GB17740-1999[M]. 北京: 中国标准出版社, 1~2
 Bath M 著. 1973; 郑治真, 叶正仁, 安镇文, 等译. 1978. 地球物理学中的谱分析[M]. 北京: 地震出版社, 93~108, 147~150
 Brigham E O 著. 1974; 柳群译. 1979. 快速富里叶变换[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 57~72, 100~136
 Bormann P. 2002. *New Manual of Seismological Observatory Practice*[M]. Potsdam: GeoForschungsZentrum, 382

A METHOD FOR CALCULATING THE TRANSFER FUNCTION OF DIGITAL SEISMOGRAPH SYSTEM

Yan Qizhong He Jiabin Gao Jie

(Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650041, China)

Key words: digital seismograph system; pulse calibration; transfer function; emulation