

# 正弦扫频电激励法测量与识别地震检波器特性参数

张改慧, 胡时岳

(西安交通大学建筑工程与力学学院, 710049, 西安)

**摘要:** 依据动圈式地震检波器的互易性质, 将检波器的电特性与力学特性相结合, 提出了用正弦扫频电激励测量动圈式检波器特性参数的新方法, 建立了这一方法的数学模型; 以此为目标函数, 对实测频率响应函数进行了曲线拟合并确定了检波器的特性参数; 分析了影响测量精度的各种因素. 理论分析、实验结果和与振动台激励方法的比较结果均表明, 此方法稳定性好, 精度高, 测试系统简单, 适合于检波器生产、维修和施工检测使用. 研究结果为便携式检波器特性参数测试仪的研制提供了新的依据.

**关键词:** 检波器; 特性参数; 正弦扫频电激励; 频率响应函数; 曲线拟合

**中图分类号:** TB53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)07 - 0722 - 03

## Characteristic Parameter Measurement and Identification of Geophone by Electric Sine Sweeping Exciting

Zhang Gaihui, Hu Shiyue

(School of Architectural Engineering and Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A new method for measuring and identifying characteristic parameters of moving-coil geophone was proposed based on geophone's reciprocity, where sine sweeping signal is considered as the exciting. A corresponding mathematical model was constructed and used as the objective function for curve fitting. Geophone characteristic parameters were then obtained by fitting the measured amplitude-frequency curves. Several factors affecting measure accuracy were analyzed. The theoretical and experimental results indicate that the present method is suitable for production and maintenance, especially for in situ calibration of the geophone due to its easy operation, high accuracy, and good stability. This work provides a new way to design and manufacture of the portable geophone parameter tester.

**Key words:** geophone; characteristic parameter; electric sine sweeping exciting (ESSE); frequency response function; curve fitting

动圈式地震检波器是目前油气勘探中大量使用的一种检波器, 其特性参数的测量是保证地震勘探数据采集精度的一个重要环节. 传统的测量方法是采用振动台激励, 测量系统比较笨重, 造价高, 往往仅适宜于检波器生产和维修时使用. 直流激励法<sup>[1]</sup>测试系统简单, 适宜于小阻尼低固有频率检波器, 但对于较大阻尼及较高固有频率检波器, 测量误差较大. 为了满足油气勘探施工现场方便、快速测试各类检波器的需求, 为便携式检波器特性参数测试仪的研制提供新的理论依据和方法, 本文提出了一种新

的适用于各种阻尼和固有频率检波器的测试方法, 即采用正弦扫频电信号作为激励, 利用曲线拟合确定检波器的特性参数.

### 1 正弦扫频电激励法的原理与建模

动圈式地震检波器可简化为单自由度质量 - 弹簧 - 阻尼系统, 图 1 为简化的动力学模型, 其中  $m$  为悬挂系统的质量,  $k$  为支撑弹簧的刚度系数,  $c$  为阻尼系数,  $F$  为作用在线圈上的电动力. 设检波器的电阻抗为  $Z_c$ , 检波器工作气隙的磁感应强度为  $B$ , 线

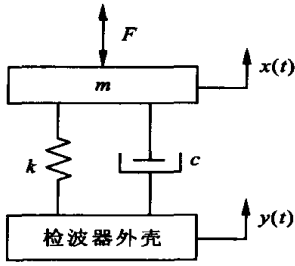


图 1 检波器的动力学模型

圈导线在工作气隙磁场中的长度为  $l$ , 输入线圈的电流为  $I$ , 则线圈切割磁力线产生的感应电动势  $E_e = B\dot{\theta}l$ , 线圈在磁场中受到的电动力  $F = BIl$ , 检波器的输出电压  $u_0 = Z_c I + E_e$ . 当给检波器输入一正弦激励电流时, 其运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx - BIl = 0 \quad (1)$$

图 2 为测试电路示意图. 将一阻抗为  $Z_f$  的固定电阻与检波器串联, 以电阻的端电压  $u_R$  作为输入, 检波器输出信号  $u_0$  作为输出, 则测试系统的频率响应函数表达式为

$$H(\omega) = \frac{u_0(\omega)}{u_R(\omega)} = \frac{I(\omega) Z_c(\omega) + B\dot{\theta}(\omega)}{I(\omega) Z_f(\omega)} \quad (2)$$

由式(1)可知

$$I(\omega) = \frac{k - m\omega^2 + j c \omega}{j B l} \dot{\theta}(\omega) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得

$$H(\omega) = \frac{1}{Z_f(\omega)} \left[ Z_c(\omega) + \frac{j G^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + j 2\zeta\omega)} \right] \quad (4)$$

式中: 固有频率  $\omega_0$ 、阻尼比  $\zeta$  和灵敏度  $G$  分别定义为

$$\omega_0 = \left( k/m \right)^{1/2}; \quad \zeta = c/2(km)^{1/2}; \quad G = B l$$

检波器线圈阻抗  $Z_c$  可由其等效直流电阻  $r$  和电感  $L$  表示, 即  $Z_c = r + j \omega L$ ,  $Z_f$  为纯电阻  $R$ , 则

$$|H(\omega)| = \frac{1}{R} \left\{ \left[ r + 2\zeta \frac{b}{a} \right]^2 + \left[ L\omega + \left( \frac{2}{\omega_0^2} - \omega^2 \right) \frac{b}{a} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

式中  $a = (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega)^2$ ;  $b = G^2 / m$   
当  $\omega = \omega_0$  时

$$|H(\omega_0)| = \frac{1}{R} \left[ \left( r + \frac{G^2}{2m\omega_0} \right)^2 + (\omega_0 L)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$G^2 = 2m\omega_0 \left[ R^2 |H(\omega_0)|^2 - (\omega_0 L)^2 \right]^{1/2} - r \quad (7)$$

$$r = R |H(\omega_{011})| \quad (8)$$

由式(5)可知, 正弦扫频电激励法为六参数模型, 其频率特性曲线不仅与检波器的固有频率、阻尼比和灵敏度有关, 还与直流电阻、线圈电感和质量有关. 振动台激励法的频率响应曲线只与检波器的固有频率、阻尼比和灵敏度有关, 其幅频响应函数表达式为

$$|H_{21}(\omega)| = \frac{|E(\omega)|}{|y(\omega)|} = \frac{G^2}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega)^2]^{1/2}} \quad (9)$$

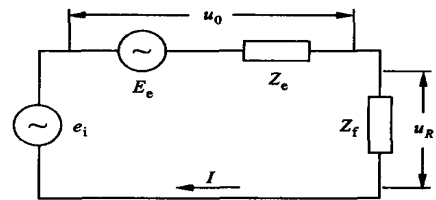


图 2 正弦扫频测量电路

## 2 实验方法与特性参数识别

将检波器外壳固定在非导磁底座上, 按图 2 连接好测试系统. 正弦扫频信号由高精度信号源提供. 以固定电阻的端电压作为输入, 检波器信号作为输出, 测量其频率响应函数. 扫频范围由检波器的参数决定, 一般情况下可将检波器的固有频率作为扫频的中心频率.

动圈式检波器的特性参数有固有频率  $f_0$ 、阻尼比  $\zeta$ 、灵敏度  $G$  和直流电阻  $r$  等, 这些参数都可通过对测量的幅频响应函数进行曲线拟合获得. 拟合以式(5)为目标函数, 利用最小二乘法实现<sup>[2]</sup>. 特性参数的初始值选取是加快拟合速度的关键步骤, 本文根据实测频率响应函数曲线及式(6)、式(7)和式(8)确定初始值. 图 3 是不同检波器的实测幅频曲线与拟合曲线, 表 1 为拟合结果. 在初始值的确定和拟合过程中,  $R$  取 5 030  $\Omega$ , SN10、VG20-1 和 SN35 检波器的动圈质量分别为 1113、1517 和 912 g, 线圈电感初始值分别为 0.1075、0.1871 和 0.1214 H,  $f_0 = \omega_0/2$ .

表 1 拟合得到的特性参数

参数	SN10	VG20-1	SN35
$G/10^{-3} \text{ xV} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$	204	812	310
$f_0/\text{Hz}$	9178	19148	35166
	01690	01924	01589
$r/\Omega$	271	1 823	570
$L/\text{H}$	01077	11012	01351

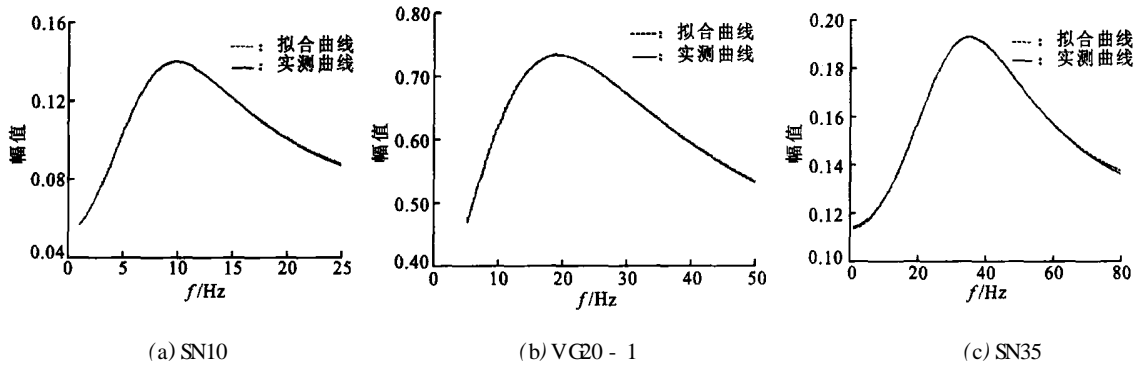


图3 电激励法的频率响应函数实测曲线和拟合曲线的比较

### 3 误差分析

#### 3.1 串联电阻对检波器特性参数的影响

为了保证可比性,串联不同电阻时加给检波器线圈的电流均为 0.113 mA. 表 2 给出了测试结果,可以看出,检波器的灵敏度和固有频率随着阻值的增大而有所减小,但阻尼比的变化不大,阻尼比和灵敏度的变化误差小于 1%,固有频率的变化误差小于 112%,这样的误差远低于工程测量的允许误差. 由实验结果和理论分析可知,在保证测量信号具有较高信噪比的情况下,串联电阻阻值应该大一些,以减小对检波器特性参数的影响.

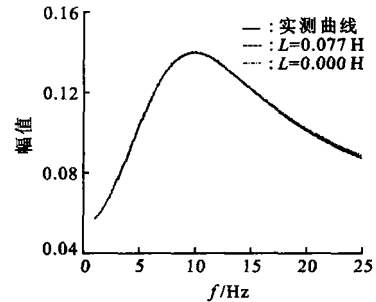
表 2 串联 3 种电阻时 VG20-2 检波器的特性参数

$r/$	$f_0/\text{Hz}$	$G/10^{-3} \times \text{V} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$	$e_i/\text{V}$
2 518	191864 01975	834	0157
5 030	191745 01978	830	0190
10 980	191638 01974	828	1168

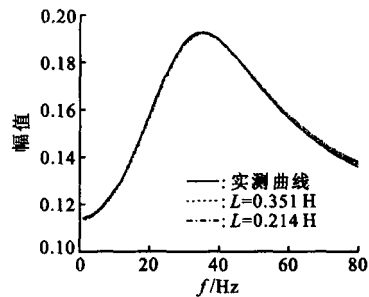
#### 3.2 检波器线圈电感的影响

由式(5)可知,正弦扫频电激励法考虑了检波器线圈电感的影响. 图 4 显示了 SN10 和 SN35 检波器线圈电感取不同值时拟合曲线与实测曲线的比较. 线圈电感对拟合曲线的影响随着频率的增加而增大,尤其在固有频率以上的范围内,拟合曲线值大于测量值. 对于低频检波器 SN10,线圈电感量取 0 或取初始值时,拟合曲线与实测曲线在 15 Hz 以下完全重合,而对于较高频检波器 SN35,电感量取不同值时拟合曲线与实测曲线的差异值不同. 为了保证拟合速度和精度,低频检波器线圈电感取本文第 2 节中的初始值(采用串并联谐振电路测量)即可,但高频检波器的线圈电感  $L$  必须与其他参数( $f_0$ 、和

$G$ ) 同时进行曲线拟合确定. 拟合区间不要取得太宽,上限以取 115 倍固有频率为宜.



(a) SN10



(b) SN35

图 4 线圈电感对拟合曲线的影响

#### 3.3 检波器动圈质量对灵敏度测量的影响

检波器的灵敏度测量有几种方法. 用振动台激励方法测量时,一种是取幅频响应曲线上 4 倍或 8 倍固有频率处的幅值为灵敏度值<sup>[3]</sup>,一种是采用曲线拟合的方法确定. 用电激励法测量时,只能通过曲线拟合的方法获得. 电激励法中灵敏度的计算及拟合精度与检波器的动圈质量有关,但动圈质量的取值并不是被测检波器的,而是一批检波器动圈质量的平均值,若每只检波器动圈质量的分散度为 5%,

(下转第 766 页)

棘轮演化关系,材料本构行为进一步复杂化.

(5) 基于高温棘轮试验提出的抛物律 SRMT 模型,可以较好地描述单轴  $r_s - r$  关系.

#### 参考文献:

- [1] Chaboche J L, Nouailhas D. Constitutive modeling of ratcheting effects, part I: experimental facts and properties of the classical models [J]. ASME J Eng Mater Tech, 1989, 111 (4): 384 - 392.
- [2] Mizuno M, Mima Y, Ohno N. Uniaxial ratcheting of 316FR steel at room temperature, part I: experiments [J]. ASME J Eng Mater Tech, 2000, 122(1): 29 - 33.
- [3] Jiang Y Y, Sehitoglu H. Modeling of cyclic ratcheting pla2

ticity, part I: development of constitutive relations [J]. ASME J Appl Mech, 1996, 63(3): 720 - 725.

- [4] 高庆,康国政,杨显杰. 304 不锈钢室温单轴循环棘轮行为的粘塑性本构描述 [J]. 固体力学学报, 2002, 23 (2): 167 - 172.
- [5] 刘宇杰,蔡力勋,高庆. 考虑温度效应的材料单轴饱和棘轮本构模型研究 [J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(s): 59 - 61.
- [6] 牛清勇. 反应堆材料的棘轮与疲劳行为研究 [D]. 成都:西南交通大学应用力学与工程系, 2003.
- [7] 蔡力勋,牛清勇,刘宇杰. 描述不锈钢材料单轴棘轮行为的一元参量体系 [J]. 金属学报, 2002, 38(9): 966 - 973.

(编辑 葛赵青)

(上接第 724 页)

则灵敏度的分散度将大于 2%,因此要保证一定的测量精度,动圈质量的取值非常关键.减小误差的途径有两种:一是在检波器生产过程中减小动圈质量的分散度;二是通过曲线拟合确定每一只检波器的动圈质量,但这会增大拟合的运算工作量,不利于大批量测量.

#### 3.4 电激励与振动台激励方法的比较

用振动台激励系统测试时,将检波器和标准传感器固定在振动台上,检波器外壳跟随台面运动,以标准传感器输出作为输入,检波器信号作为输出,测量其频率响应函数,激励方式为正弦扫频,扫频范围与电激励方法相同.检波器的特性参数是以式(9)为目标函数、对实测频响函数进行曲线拟合获得的.表 3、表 4 分别给出了 VG20-1 和 SN35 检波器用振动台激励和电激励两种方法的测试结果,所测特性参数基本一致.

表 3 VG20-1 检波器特性参数测试结果

参数	振动台激励	电激励 (1 V)
$f_0 / \text{Hz}$	19146	19148
	01925	01924
$G / 10^{-3} \text{ xV} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$	817	812

表 4 SN35 检波器特性参数测试结果

参数	振动台激励	电激励 (1 V)
$f_0 / \text{Hz}$	35162	35166
	01594	01589
$G / 10^{-3} \text{ xV} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$	303	310

## 4 结 论

(1) 用正弦扫频电激励测量检波器特性参数的方法是可行的.该方法易于实现,数据重复性好,精度高,可以替代振动台激励法.

(2) 对于具有较高固有频率的检波器,在确定特性参数时需同时拟合线圈电感量,以保证测量精度.检波器生产时减小动圈质量的分散度有助于提高电测法的测量精度.

(3) 电激励法测试系统结构简单,成本低,携带方便,是勘探现场测量检波器特性参数的理想方法.

(4) 本文提出的方法适用于各种动圈式检波器的特性参数测量,特别是大阻尼检波器,从而为研制便携式检波器测试仪提供了新的依据.

#### 参考文献:

- [1] Bowden G B. Calibration of geophone microseismic sensors [EB/OL]. <http://www2ssl.slac.stanford.edu/lcls/tech2/notes/LCL2TN20326.pdf>, 2003 - 10 - 01.
- [2] 李方泽,刘馥清,王正. 工程振动测试与分析 [M]. 北京:高等教育出版社, 1992.
- [3] 胡时岳,张改慧,彭名昌,等. 涡流检波器特性测量与参数识别 [J]. 应用力学学报, 1991, 8(4): 11 - 18.

(编辑 葛赵青)