第10卷 第1期 西北地震学报 Vol.10,No.1

1988年3月 NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL March, 1988

爆源地震效应的分析方法

李清河 闵祥仪 郭建康

李刘玉 盛国英 虞雪君

(国家地震局兰州地震研究所)

摘

要

本文把爆炸源产生的地震波的某些动力学特性及效果定义为爆源地震效 应,提出了用以评价爆源地震效应的方法及指标:凝聚函数、能量转换系数、 振动时间衰减因子、频谱特性等,其中凝聚函数是首先引入到爆源分析中並给 出相应计算方法的。

本文介绍了上述指标的物理含义及求取方法,分析处理了某种炸药对比试 验结果及鲁西南--豫北人工地震测深中的试验炮资料。所得结果为爆源综合评 价提供了基本定量依据。

本文所提出的分析方法,可以在地震勘探、人工地震测深、工程地震和地震 波透视研究中应用。

前 言

在地震勘探、人工地震测深、工程地震和地震波透视的研究中,人们常常使用爆炸源激 发地震波。然而,不同的爆源所产生的地震波的特性,尤其是其动力学特性有较大差别,这 就限制了地震波信息的应用。为了分析不同爆源所激发的地震波的相似性和评价爆源产生的 地震波效果,我们定义了"爆源地震效应"这一概念,用以下几个指标来描述爆源地震效 应:

(1)凝聚函数:用以分析同一类型的多次爆破产生的地震波动力学特性的再现性、相似性,(2)能量转换系数;(3)振动时间衰减因子,(4)频谱特性。

本文介绍了上述指标的物理含义及求取方法。作为应用实例,分析处理了某种炸药对比 试验结果及鲁西南一豫北人工地震测深中的试验炮资料,所得结果,为爆源综合评价提供了 基本定量依据。

一、分析方法

1.爆源地震效应分析中的凝聚函数方法

(1)多输入单输出系统的凝聚函数

把爆源、传播介质和接收器看成是输入,输出线性系统。如果传播介质不变,接收器也 不变,爆源不同时,称此系统为多输入单输出系统。

在频率域里,地壳介质相当于滤波器,它是频率的单值函数。

对于输入信号X(t)与输出信号Y(t)之间定义凝聚函数为[1];

$$r_{XY} = \frac{|G_{XY}(f)|}{G_{X}(f)G_{Y}(f)}$$
(1)

式中 $G_x(f)$ 、 $G_y(f)$ 分别是输入X(t)与输出Y(t)的自功率谱密度函数, $G_{xy}(f)$ 是X(t)与Y(t)间的互谱密度函数, (1)式要求 $G_x(f)$ 与 $G_y(f)$ 非零,且不包含 δ 函数。

凝聚函数表征线性系统输出与输入间的相似程度。倘若二者完全 相 似,则r_x = 1。该 值越小,表示二者之间的线性程度越差。

对于两个随机过程 X_i (f)、 X_i (f),它们之间的凝聚函数定义为:

$$r_{1,2} = \frac{|G_{x1;x2}(f)|}{G_{x1}(f)G_{x1}(f)}$$
(2)

式中 G_{11} (f)、 G_{11} (f)分别为过程 X_1 (f)、 X_2 (f)的自谱密度函数, $G_{11,12}$ (f)则 为两个过程之间的互谱密度函数。(2)式的物理意义为任意两个平稳随机过程之间的谱密 度相似程度。 $r_{1,2}$ 越按近 1 表明二者越接近。

(2)凝聚函数的求法

设连续样本记录u(t)采样后得离散数据序列{u;}, i=1, 2,…, N, 其均值为:

$$\mu_{i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \mu_{i}$$
 (3)

定义一个新的时间历程:

x(t)=u(t)-μ₁ (4) 对x(t)采样后得离散数据序列:

 $\{x_i\} = \{u_i - \mu_i\}$ $i = 1, 2, \dots N$ (5)

则新的数据序列 { x_i } 的均值 $\mu_x = 0$,此后的分析即以 { x_i }数据为基础。

样本记录中周期大于记录长度的频率成分称为趋势项。当分析记录确认为有趋势项时, 应消除趋势。一般采用最小二乘拟合多项式法和数字滤波法等。

为了减少泄漏误差,应选择适当的窗函数。具体选择何种窗函数,要视问题与数学处理的要求而定。

分别对第一个和第二个记录时间序列作付里叶变换,然后求其功率谱G₁, G₁和互谱 密度函数G₁;x₂

降低随机误差是信号保真的重要步骤,可分别用频率平滑,分段平滑等方法。

2.能量转换系数

炸药爆破时,仅有少部分能量转换为地震波,其余大量的则转换为热冲击波和克服介质 形变的动能,势能。为测定不同次爆破地震波能量转换系数,可采用两种办法处理。

(1)对比同一测点,同一仪器对各次爆破所得记录的振幅。由于炮点、测点、仪器固定,故记录波形之差异,取决于各炮爆破时炸药自身的地震波能量转换系数。

根据振动理论,波振幅与波能量的关系为

$$\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \propto \frac{E_1}{E_2} \tag{6}$$

由于传播介质的吸收和源区介质的非弹性损耗,爆破能量仅有一部分转换为地震波,以W示 爆破能量,则

$$\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \propto \frac{E_1}{E_2} \propto \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{\frac{1}{m}}$$
(7)

式中m大于1,它可由实测给出。取某一次记录作基准。其它记录与它对比,比较A₁/A₁即 可得出转换系数的相对值。

(2)几何发散与转换系数的计算

对于各次爆破,都有下述地动速度表达式[2]:

 $V_i = Kr_i^{-*}Q^{*/3}$ $i = 1, 2 \cdots n$ (8)

式中V₁为速度振幅, K为比例常数, r₁为各测点震中距, Q为药量, a为与儿何发散有 关的 因子。

对于(8)式两边取自然对数,可得:

 $l_n V_i = l_n k + a \left(\frac{1}{3} l_n Q - l_n r_i \right)$

利用最小二乘法,可求得K值,再用统计办法求得能量转换系数^[2]

 $\alpha = (K \times 10^{-2})^{3/a} \times 10^{-3}$

对于观测数据,应注意改善其离散性,用平滑,插值等办法可以获得较为满意的结果。

3. 振动时间衰减因子

由于介质的吸收, 地震波的振幅可用下式表示:

 $A_1 = A_0 e^{j \cdot w \cdot i} \cdot e^{-\beta \cdot i}$

式中A₁为瞬时振幅,A₀为最大振幅,t为时间,ω为角频率,β为振动时间衰减因子。对于 位于同一测点上同一仪器测出的各炮的记录,由于传播介质相同,故各式β的差异反映了各 炮自身激发的地震波之不同,我们可以借助于介质衰减来反映源特性的差异。

以某时刻t的振幅A,和下一周期A,+T的振幅根比:

$$\frac{A_{t}}{A_{t+T}} = \frac{A_{0}e^{i\omega t}e^{-\beta t}}{A_{0}e^{i\omega (t+T)}e^{-\beta (t+T)}}$$
(12)

因为是周期函数,故(12)式可化为

$$\frac{A_{t}}{A_{t+T}} = \frac{e^{-\beta t}}{e^{-\beta (t+T)}} = e^{\beta T}$$
(13)

对(13)式取对数,得:

$$L_{n} \frac{A_{t}}{A_{t+T}} = \beta T$$
(14)

可求得:

$$\beta = l_a \frac{A_t}{A_{1+T}} / T \tag{15}$$

对每一个测点的记录,从最大振幅开始量起到下一个周期,便可计算每个测点上各炮的 β值。为了直观地看出不同爆破的时间衰减特性,可作出相应的理论振幅曲线与实测值加以

46

(9)

(10)

(11)

比较。若振动持续时间较长,则可说明单位药量转为地震波的能量较大。

4.频谱特性

如前所述,记录谱中既包含了源谱作用,也包含介质频响的影响,一般我们无法区分出 两者各自的绝对作用。但是若能选择适当的观测方法,是可以把源的谱特性变化量反映出来 的。在试验研究中,我们设法在各炮的观测点上固定仪器,保证了逐次爆破时介质特性不 变,仪器不变,则记录谱的差异反映了各次爆源辐射的谱差异。

在进行频谱分析时应注意: (1)要对同一震相进行谱分析,不可把不同属性的波混在 一起分析; (2)作FFT时,应保证各次填零个数相同,否则会引起频移。

二、应用实例

我们用以分析的实例有两个,一个是为鉴定某种炸药的爆破地震效应而做的试验,一个 是国家地震局DSS协调组为探测鲁西南地壳构造而进行的测深中所做的一致性试验。两次 试验均采用CBY-2型爆破地震仪进行模拟磁带纪录。第一个试验共放5炮,有10台仪器 参加观测,仪器安放位置不变,炮点平面分布相对于炮检距而言可认为在同一点上,各炮药 量相同,且装药与引爆方式相同。在第二个试验中,观测仪器集中在同一水泥平台上,在离 测点约2公里处放炮。

1.利用凝聚函数求源相似性

我们对鲁西南测深试验炮的97[•]—104[•]观测仪器在某日22点、00点和01点记录的波形采样,然后进行数值计算,作出22点—00点、00点—01点的凝聚函数—频率图(见图1)。

由图 1 a 可见, 22点—00点两炮间各测点的凝聚函数在不同频率上是类似的,基本上平行,结果可信,不同频率上凝聚函数值不同,在3.125至19.53赫 兹之间,凝聚函数上下波动,这些波动可用来鉴别源的频谱特性。

由图1b可见,00点一01点两炮间的凝聚函数在19.5赫兹以上基本平行,小于19.5赫兹的



图 1 梁山试验炮中凝聚函数—频率图 a.22^b-00^b b.00^b-01^b





图 2 梁山试验炮的平均凝聚函数 a.22^b-00^b b.00^b-01^b Fig. 2 The average coherencefrequency relation

各点凝聚函数则交叉起伏。但若把101°、103°两个点的图形向低频段移动3.12—3.9赫兹, 图形很相似,表明101°、103°两点有相移;00点—01点两炮间凝聚函数关系也可信。

经计算得到各测点的平均凝聚函数(图2)。结果表明00点—01点两炮间的平均凝聚函数(0.4779至0.7913)低于23点—00点的值(0.7285至0.9053)。

为进一步比较,我们定义一个比例系数: K = r²23/r²12,用以表征1、2炮间凝聚函数对2、3炮间凝聚函数之比,即反映两者之间的相对关系,表1列出了各炮间的平均凝聚函数与K值。

演率(Hz)	2200	. 00-01	К
1	0.7419	0.7002	0.9437
4	0.7814	0.4779	0.6116
7	0.7285	0.5019	0.6889
10	0.8953	0.6058	0.6766
13	0.9000	0.6996	0.7774
16	0.8852	0.7233	0.8170
19	0.9053	0.7657	0,8458
22	0.8903	0,7691	0.8634
25	0.8844	0.7812	0,8833
28	0.8874	0.7829	0,8822
3]	0.8860	0.7913	0.8931
34	0.8836	- 0.7876	0.8913
37	0.8821	0.7831	0.8878
40	0.8801	0.7793	0.8885

表1梁山试验炮中各炮间的平均凝聚函数和K值表

从表中可以看到, K小于1则说明00点-01点炮间相似度小。事实上, 从记录波形也可 直观地看出22点-00点间的波形比00^b-01^b更相似些,可见,凝聚函数的分析是可信的。



图 3 炸药试验中的记录波形 (左边数字为炮号)及凝聚函数图 Fig. 3 Digitized waveforms of dynamical experiment and coherence-frequency scheme from them

各炮的a、k与α值 表 2						
炮	a	k	α(×104)			
1	1.338	75.94	5.395			
2	1.377	117.35	14.169			
8	1.287	66.379	3.846			
4	1.313	81.066	6.191			
5	1.285	67.22	3.956			

图 3 a 为炸药地震效应试验中 1 号测点的观测记录图, 3 b 是 1 - 2 、 1 - 3 、 1 - 4、

1—5各次炮之间的凝聚函数。由图可见,各 炮间函数关系相似,说明过程可信,按各炮 对第1炮的相似程度分析,其顺序是4、 3、5、2。

2.炸药的地震波转换系数求取

按前面所述公式(8),求得炸药试验 中各炮的a、k与α,列于表2。按转换系数 的大小各炮的排列顺序为:2、4、1、 5、3。

还可以计算各炮的最大振幅及其相对比值(表3)。

各炮各测点最大振幅及其比例表

袅 3

点 导标幅	1	2	8	4	5	A1/Ai(i=2,8,4,5)				
2*	24	32	27.5	30	28	1/1.33	/1.15	/1.25	/1.17	_
4 *	34	35	33	33	34	1/1.03	/0.97	/0.97	/1	
6•	22	29	28	29.5	29	1/1.32	/1.27	/1.34	/1.32	
7•	21	25	31	31.5	30.5	1/1.19	/1.48	/1.50	/1.45	

综合考虑各炮各测点的最大振幅比例,可得其能量转换的顺序为2、4、5、3、1。 可见两种方法所得结果基本吻合。

轰 4

3. 振动时间衰减因子的应用

用这一指标衡量炸药试验的结果列于表4。

振动时间衰减因子β	
-----------	--

庶号炮	1	2	8	4	5
1	4.782	4.855	7.074	2.189	10.925
4	4.53	1,935	5.431	3.851	3.023
6	3.425	0.771	2.782	2.24	5.572
7	4.046	2.136	7.601	1.099	4.41

不同测点对不同次爆破记录所求的β值有基 本相似的趋势,这说明它们受相同的物理因 素所支配。仅在个别点有例外,这可能是由 于各测点记录时仪器工作状态及场地因素不 一致,或受外界干扰所致。通常最大振幅並 不出现在初至震相中,有其它类型的波的成 分迭加,也会造成一些偏差,然而最大振幅 携带了地震波大部分能量,故其结果具有较 大的可信度。

图 4 是各炮的地震波衰减值的对比曲线,由图也可以看到各炮β值虽不同,但 各测点对 各炮的β值趋势一致,且第 2 炮、第 4 炮β值最小,说明这两炮激发的地震波衰减最慢。

4.频谱分析的应用

应用快速付氏变换对炸药试验记录进行谱分析结果见图5。从图5可以看出:

(1)优势频率大体相似,第一列第4炮的幅频特性大体相似。均呈双峰,第一峰频率 在8一9赫兹,第二峰则在12—14赫兹,第5炮频谱特性较为紊乱,这说明其源的谱特征较 前4炮有差异。







Fig. 4 β —value of every shots

(2)拐角频率基本相同。第1-4炮的拐角频率大体上是17、16、15、18赫兹。由于 是同一台仪器在同一地点观测,故各炮记录谱之差异即为源谱之差异。

三、结论与讨论

1.本文所提出的凝聚函数方法,爆破能量转换系数的计算,振动时间衰减因子的测定, 源谱特性的分析都是爆源地震效应的定量分析的方法,可望在实际应用中改进和推广。

2.在以爆源为激发源的反应谱,响应谱计算中,应考虑爆破源间不一致所引入的影响。 源谱特性的差异是可以通过凝聚函数反映出来的。经过试验之后,可半理论、半经验地给出 不同爆破环境、不同起爆方式、不同炸药量等条件下的权函数,以此修正记录谱。因此,凝 聚函数的研究在工程地震中将有其应用价值。在以地震监视为目的的地震波透视研究中,亦 应求出逐次爆源之间的权函数;方可把地震波动力学特性的变化确认为介质的变化,进而判 断地震孕育过程。

3.苏联学者Kondratyev等提出了记录波谱的解析解公式[8]

$$M_{P}(\omega, r) = S(\omega) \frac{1}{r} \left(\frac{1}{C_{P}^{2}} + \frac{1}{\omega^{2} r^{2}} \right)^{\frac{1}{2}} T_{P}(\omega, r)$$
(16)

式中S(ω)是爆源势谱, $\frac{1}{r} \left(\frac{1}{C_{p}^{2}} + \frac{1}{\omega^{2}r^{2}} \right)^{\frac{1}{2}}$ 是P波谱模量变化的因子分布, C_p是距离为r处 无限弹性介质中心波速, T_p(ω , r)是介质的谱特征化量, M_p(ω , r)是距离r处P波谱的模 量。当 ω r »C_p时, M_p(ω , r) $\alpha \frac{S(\omega)}{r} \cdot T_{p}(\omega, r)$ 。可见爆源谱之大小受r调制, 若r较 大, 相应S(ω)/r就较小, M_p(ω , r)受T_p(ω , r)的影响就大, S(ω)的影响就小, 反之, 若r较小, $\frac{S(\omega)}{r}$ 的作用就很大了。这就是说,远场时,源的变化对接收谱影响较 小, 而近场时,源的影响就不可忽视了,这个结论在工程地震中可能有一定意义。 (本文1987年3月5日收到)

参考文献

(1)R.K.Otnes and L. Enochson、Digital time series analysis, John Wiley and Sons Inc., 1972.
(2)张少泉、郭建明,爆炸地震的能量转换系数计算及其应用,地球物理学报, Vol.27, No.6, 1984.
(8)Yu. V. Kondrat'yev, et al., The speetra of longitudinal and converted seismic waves as a function of underground explosion energy, Izvestiya Earth Physics, Vol.20, No.4, 1984.

THE METHODS TO ANALYSE SEISMTC EFFECT OF EXPLOSION SOURCE

Li Qinghe, Min Xiangyi, Guo Jiankang, Li Liuyu Sheng Guoying and Yu Xuejun (Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau)

Abstract

Some dynamic feature and effect of seismic waves by explosion are defined as seismic effects of explosion source. The methods and targets to appraise seismic effect of explosion source are put forward, including coherence function, converted coefficient of energy, attenuation factor of vibration time, spectra etc. The coherence function was introduced to analyse explosion for the first time. The physical principle and computational method of the aforementioned targets are represented. For the application, the experiment results of a certain charges are analysed and the data of the experiment shots from the DSS in the area from southwest of Shandong to north of Henan was dealt with, and they are basically identical. The method mentioned above will be useful for seismic exploration, seismic sounding, engineering seismics and seismic tomography.