

# 检波器数量对组合压噪能力的影响

魏继东

(胜利石油管理局物探公司, 山东东营 262400)

**摘要:** 根据组合压噪的有关理论, 在其他因素不变的情况下, 采用数量越多的检波器, 组合压制干扰波的效果越好。这使得人们认为在施工中应该采用尽量多的检波器以提高资料的信噪比。但是通过分析组合中检波器数量对规则干扰波, 随机干扰波以及耦合高频微震衰减的影响证明: 在其他因素不变的情况下, 线性等灵敏度组合增加到“ $\gamma_{\max} + 3$ ”个检波器以后 (其中  $\gamma_{\max} =$  组合基距/最小干扰波视波长), 组合对于规则干扰波的衰减能力不再随着检波器数量的增加而显著提高。在组合基距确定的情况下, 检波器数量越多, 对随机干扰的衰减越明显 (包括在组内距小于随机干扰相关半径的情况下); 但是增加到一定数量后, 衰减效果不再出现明显变化。检波器数量的多少对衰减耦合高频微震没有明显作用。同时指出, 确定组合中合理的检波器数量要与组合的摆放形式相结合; 组合图形不合理的情况下, 增加检波器数量不会显著提高组合的压噪能力; 灵敏度分布不合理, 是导致组合压噪能力降低的重要原因。在线性等灵敏度组合的基础上, 利用玫瑰图进行分析, 可以确定工区面积组合 (包括道间混波后) 中使用的合理的检波器数量。

**关键词:** 检波器数量; 压噪能力; 相干噪声; 环境噪声; 内部噪声; 耦合谐振噪声

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2011)02-0238-05

地震勘探野外采集中的检波器组合既可以压制规则干扰波, 又可以压制随机干扰波。其中, “规则干扰波” (如面波、折射波、声波等) 主要通过组合的“方向性效应”来压制, “随机干扰波”则通过组合的“统计性效应”进行压制<sup>[1]</sup>。前人对检波器组合理论的研究主要集中在几个方面: 检波器线性组合响应曲线的计算方法或不同组合形式组合效应的影响; 具体地区采用不同组合形式的成效分析; 检波器性能参数对地震资料的影响; 检波器与大地之间的耦合谐振等内容, 对于野外采集应该采用多少个检波器参与野外施工则论述较少。而在目前的野外实践中, 采用检波器越多越有利于压制干扰波的观点正在很多施工实例中得到体现; 这在一定程度上降低了施工效率, 特别是在地表极端复杂的地区。所以, 有必要研究组合中检波器数量对相干噪声、随机噪声以及耦合高频微震等各类噪声的衰减能力的影响, 以期在施工中采用合理的检波器数量, 在保证采集质量的前提下提高施工效率。

## 1 组合的方向性效应与相干噪声的衰减

对大多数地区而言, 沿地面传播干扰波的视波长一般在10~200m, 如果有效组合基距不大于最

大干扰波视波长的话, 则  $\gamma$  ( $\gamma =$  组合基距/干扰波视波长) 在0~20之间。根据相关公式, 可以计算出不同检波器数量对应的方向特性曲线 (图1, 分别以12、100个检波器为例)。

为了方便问题的讨论, 提出几个概念:

(1) 理想压制效果: 仅仅从检波器数量对组合方向特性影响的角度来考虑, 当  $\gamma$  处在某个范围 ( $\gamma_{\min} - \gamma_{\max}$ ) 时, 若采用  $n$  个检波器与采用100个检

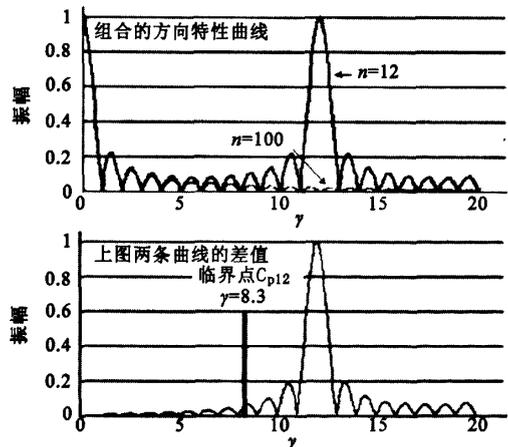


图1  $n = 12$  时对应的临界点 (谐波)

收稿日期: 2010-04-08

基金项目: 中石化重点项目“超万道单点高密度数字地震采集试验与应用”(P09072)资助

波器的方向特性曲线比较不超过一定的差值(比如 0.05),则可以认为使用  $n$  个检波器就能达到与 100 个检波器几乎相当的衰减干扰波的效果,即“理想压制效果”。在此之所以采用 100 个检波器作为“理想压制效果”的衡量基准,是因为目前野外线性组合时采用的检波器数量多在 100 个以下。

(2) 最经济检波器数量  $n$ : 在  $\gamma_{\min} - \gamma_{\max}$  范围内,与 100 个检波器的方向特性曲线差值不要超过一定范围(比如 0.05)的最少检波器数量。

(3) 临界点  $C_p$ : 不同数量检波器的方向特性曲线与 100 个检波器的方向特性曲线相比,差值超过一定数值(比如 0.05)的第一个点对应的  $\gamma$  值(如图 1, 12 个检波器对应临界点  $C_{p12} = 8.3$ ); 分别计算 1~20 个检波器对应的临界点,得到表 1。

表 1 不同数量检波器( $n$ )对应的临界值  $C_p$

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_{pn}$	0.18	0.39	1.2	1.4	2.3	3.26	3.46	4.39	5.35	6.33
$n$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$C_{pn}$	7.31	8.3	9.29	9.49	10.45	11.43	12.41	13.4	14.39	15.36

从表 1 可知,只要  $\gamma_{\max}$  不超过临界点  $C_{pn}$ ,那么采用  $n$  个检波器就会达到与 100 个检波器几乎相同的衰减相干噪声的效果(差值小于 0.05)。所以,可以计算不同  $\gamma_{\max}$  对应的最经济检波器数量  $n$ (图 2)。由图可知,如果某个工区  $\gamma_{\max} = 8.3$ ,则采用 12 个检波器就可以达到与 100 个检波器几乎相同的压制相干噪声的效果。

将图 2 蓝线进行线性拟和,可知最经济检波器数量  $n$  与  $\gamma_{\max}$  之间符合  $n = 1.1 \times \gamma_{\max} + 2$  的变化规律(图 2 粉线)。同时,因为大多数工区的  $\gamma_{\max}$  均小于 20,为简便起见,可用  $n = \gamma_{\max} + 3$  来推算工区的“最经济检波器数量”。如果某个工区的  $\gamma_{\max} = 6.7$ ,则该工区可以采用线性组合的“最经济检波器数量”  $n = \gamma_{\max} + 3 \approx 10$ 。

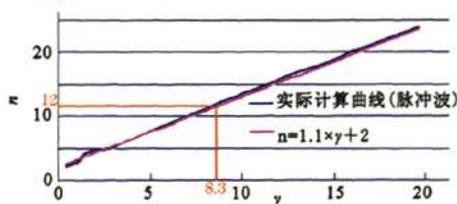


图 2 不同  $\gamma_{\max}$  值对应的“最经济检波器数量”

以上计算说明:①只要采用“ $\gamma_{\max} + 3$ ”个检波器,就会使得组合的压噪能力与使用 100 个检波器的压噪效果基本相当;②在组合基距一定的情况下,有效压制小波长的干扰波需要更多的检波器;因为在组合基距一定的情况下, $\gamma_{\max}$  决定于波长最小的

干扰波。

据此,可以推算出沿排列(on-line)及垂直排列(cross-line)方向所需要的“最经济检波器数量”。

(1) 沿排列方向。目前,多数野外采集中道距一般在 5~50 m,沿排列方向  $\gamma$  的范围在 0.025(5/200 m)~5(50/10 m)之间,那么沿排列方向需要的最经济检波器数量就是  $5 + 3 = 8$ ,即在沿排列方向最多采用 8 个检波器,就可以在多数地区得到“理想压制效果”。

(2) 垂直排列方向。如果采用沿排列的线性组合,那么在垂直排列方向的组合基距为 0 m;如果采用垂直排列拉开的组合方式,其拉开的最大基距一般不会超过一个最大干扰波视波长;即垂直排列方向的组合基距范围在 0~200 m。由此可知垂直排列方向  $\gamma$  的范围在 0~20 之间。那么多数地区垂直排列方向最多采用  $20 + 3 \approx 23$  个检波器,就可达到“理想压制效果”。

文献[1]中提到:在最有利的情况下,组合的方向性效应与组合内检波器的数量相等,检波器数量  $n$  越多,信噪比的改善程度越大。从地震勘探的角度来看,这种说法容易形成误导。因为所谓最有利的情况,实际上指的是组内距大于干扰波视波长,也就是组内距/视波长  $> 1$  时的情况。在这种情况下,干扰波被衰减后的最大振幅是组合前最大振幅的  $1/n$ ( $n$  为检波器数量)。但是,应该认识到,目前该范围内的干扰波并不是影响信噪比的主要因素。

## 2 组合的统计性效应与随机噪声的衰减

文献[1]中关于组合压制随机干扰的一个重要结论是:当组内各检波器之间的距离大于该地区随机干扰相干半径时,用  $n$  个检波器组合后,信噪比可以提高  $\sqrt{n}$  倍。上述论述给人的印象是:在设计检波器组合的时候,应该使组内距大于随机干扰的相干半径,并使用尽量多的检波器,以便最大限度地提高信噪比。很多文献的论述中,大多是在“组内距大于相干半径”这一前提下展开的。而在实际生产中设计组合基距的时候,无论排列方向还是垂直排列方向都是有一定限制的。所以,应该在固定组合基距的前提下,看检波器数量变化对组合压噪能力的影响。

以东部某地区干扰波调查资料为例(相干半径 5 m)进行介绍。首先保证有效组合基距 50 m,然后将检波器数量由 5 个逐渐增加到 50 个(组内距依次为 10、9、...、1 m,包含了小于以及大于相干半径两种情况),得到了不同检波器数量对应的组合后随

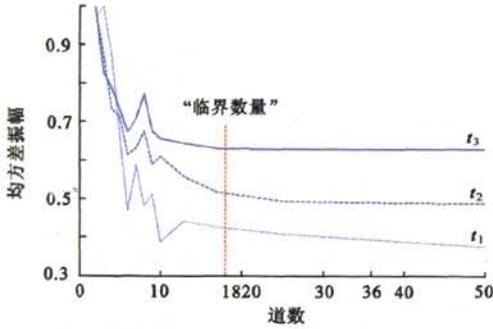


图3 不同数量检波器组合后环境噪声的均方差振幅机干扰的均方差振幅变化曲线(图3)。

由图3可见,尽管随着检波器数量的增加、组内距的减小,使得不同检波器之间的环境噪声彼此“相干”,但是随着检波器数量的增加,均方差振幅仍然逐渐变小,或者说信噪比依然有一定程度的提高;同时,在增加到18个检波器以上时,信噪比不再显著地提高;也就是说,此时再增加检波器数量,不会对衰减随机噪声产生明显的效果。计算了固定组合基距20、30、100 m时均方差振幅的变化情况,也得到了类似的结论。所以:

(1) 在组合基距确定的前提下,增加检波器数量有利于信噪比的提高(包含组内距小于相干半径的情况),但是超过一定的“临界数量”后,压噪能力不再发生明显变化。

(2) 应该使得检波器数量大致等于“临界数量”,采用过少的检波器达不到有效衰减环境噪声的目的(即使在组内距大于相干半径的情况下),采用过多的检波器则是设备的浪费。

### 3 耦合高频微震

检波器与大地之间的耦合会产生高频微震。为了分析耦合高频微震随检波器数量变化的规律,进行了以下试验:每6个单点检波器为一排,共计6排,形成一个6×6的微型排列(图4,检波器之间距离1 cm);然后从36个检波器中随机抽取1~36个

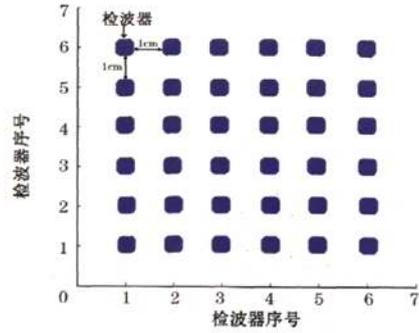


图4 检波器排列方式

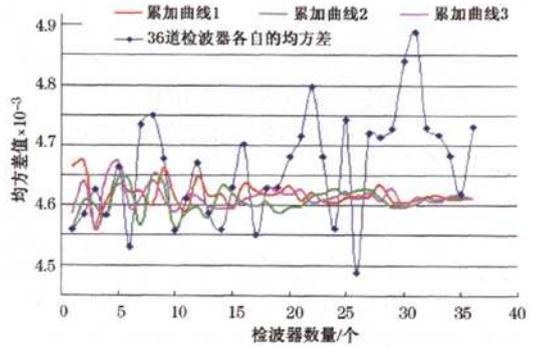


图5 随机抽取1~36个检波器累加后的均方差曲线  
检波器进行累加、平均,计算其均方根振幅(可以代表噪声水平),得到图5中曲线1;重复上述过程两次,得到图5中累加曲线2,3。因为在微型排列分布的40 cm×40 cm如此小的范围内,无论是环境噪声还是沿地面传播的相干噪声都不会有明显差异,所以检波器之间噪声水平的变化仅反映了耦合高频微震的变化(这类噪声与空间位置无关)。

据图5中累加曲线可知,耦合高频微震没有随着检波器数量的增加而出现明显的增强或削弱,即检波器数量的变动对衰减这类噪声没有影响。

### 4 检波器组合的摆放形式

图6右图是新疆某工区采取宽线+大组合施工时采用的布线方式,室内组合后总计使用了432个

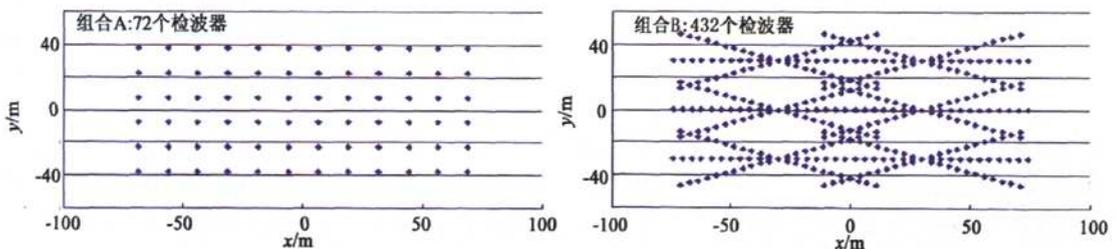


图6 有效组合基距相同的两种检波器组合方式

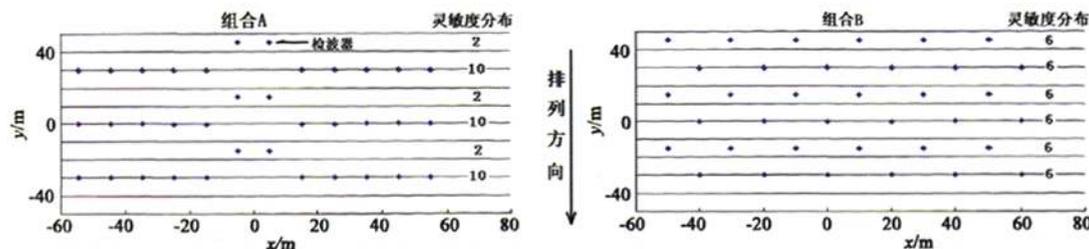


图7 排列方向灵敏度不同的A、B检波器组合

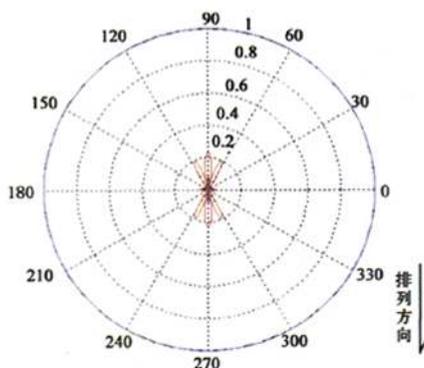


图8 图6A、B两种组合方式对应的玫瑰图

检波器,对应的玫瑰图为图8中的红线,比传统的主要沿排列拉开的组合方式压噪能力有了很大的提高。但是如果采用图6左图所示的72个检波器组合方式(对应图8蓝线),却可以达到比(室内组合后)432个检波器更好的压噪效果。

计算发现,图6中组合B压噪效果不理想的一个重要原因是灵敏度分布不够合理,导致了压噪能力的降低。由于在设计检波器组合时,灵敏度的分布不像组合基距一样直观,而没有引起足够的重视。图7中两种组合方式在排列方向的组合基距、组内距以及检波器数量都是一样的,不同的仅是两种组合的灵敏度分布,但是A(蓝色曲线)、B(红色曲线)两种组合在排列方向的压噪能力有很大差距(图9)。分析发现,组合A在排列方向的灵敏度分布为2、10、2、10、2、10,组合B的灵敏度分布均为6(图10),可见灵敏度分布不合理,呈现出“跳跃性”的特点,正是令组合A压噪能力差的原因。

计算证明,如果灵敏度的分布是等灵敏度或者三角形(即中间的灵敏度大,两边的灵敏度小)分布,组合的压噪效果会比较好;相反,如果组合的灵敏度分布为哑铃型(即中间的灵敏度小,两边的灵敏度大)或跳跃型(即灵敏度分布变化剧烈),那么即使组合基距拉开很大距离,压噪效果也会大打折扣(图11)。所以,在野外施工中,检波器组合图形的设计显得尤为重要,很多看似具有“全方位压噪

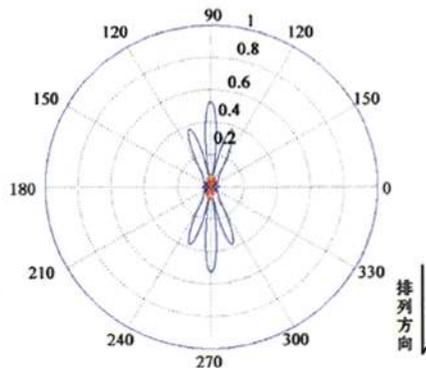


图9 图7A、B两种组合方式对应的玫瑰图

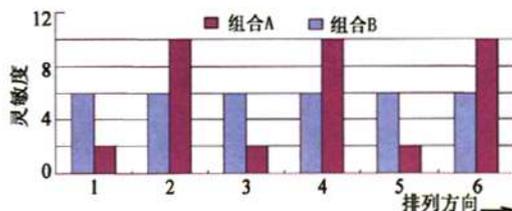


图10 图7A、B两种组合在in-line方向的灵敏度分布

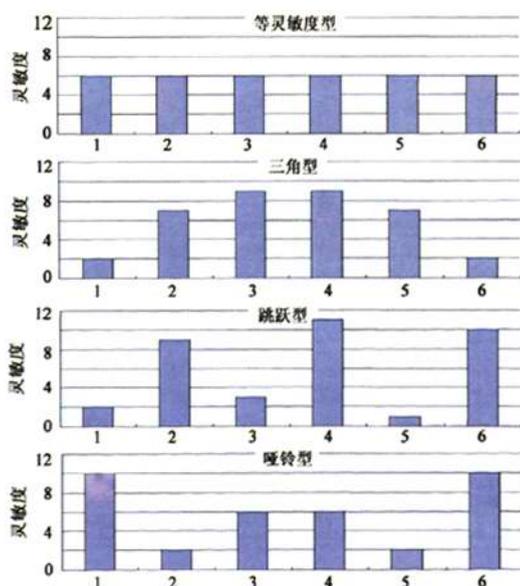


图11 四种不同类型的灵敏度分布

能力”的组合方式,却往往在某个方向上出现压噪能力显著变差的情况。这是因为设计图形时,仅关注组合基距的大小,未注意灵敏度的合理分布,也未利用玫瑰图考察各个方向的压噪能力,使得虽然使用了大量检波器进行组合,却没有取得满意的效果。

### 5 野外试验结果

为了验证以上论证,在我国东部某地区进行了

不同检波器数量的野外试验(图 12,检波器从 1 个逐渐增加到 10 个)。从对应的监视记录可见,检波器增加到 7 个以上时,记录面貌不再随着检波器数量的增加而出现更大程度的改进。该区干扰波视波长在 12.5~113 m,组合基距 50 m,所以  $\gamma_{max} = 50/12.5 = 4$ ,符合最经济检波器数量  $n = \gamma_{max} + 3 = 7$  的规律,同时经过计算,该区压制环境噪声的检波器“临界数量”为 6,这与野外试验的结果也是相符的。

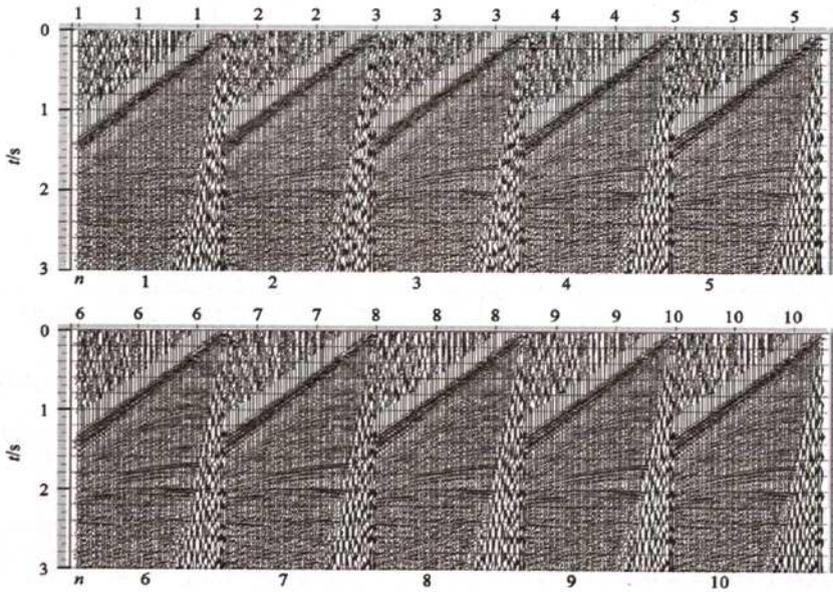


图 12 组合基距相同、检波器数量不同的监视记录

### 6 结束语

研究表明,检波器数量与相干噪声、环境噪声以及耦合高频微震等不同类型噪声之间的关系可以归结为表 2。同时,在施工中应该做到:

(1)通过选择合理的 in-line 以及 cross-line 方向的组合基距以及参与混波的道数,使得  $\gamma_{min}$  接近 1,

表 2 不同类型噪声与“合理检波器数量”之间的关系

	噪声类型	合理检波器数量
1	相干噪声	$\gamma_{max} + 3$
2	环境噪声	确定组合基距的前提下,检波器个数越多,压噪能力越强(包括组内距小于随机干扰相干半径的情况);但是,当检波器达到某个临界数量时(决定于环境干扰的参数),压噪能力不再明显提高
3	耦合高频微震	无明显关联

也就是使有效组合基距接近最大干扰波的视波长。反之,如果  $\gamma_{max}$  非常小,即使检波器数量非常多,也不会达到理想的压制效果。这一点对于次生干扰波发育的复杂地表地区更有意义。

(2)确定检波器数量要与组合图形相结合。如果组合图形的灵敏度分布不合理,即使采用非常多的检波器,仍然不会有效衰减干扰波。同时,还要考虑到室内混波后的组合方式,以便在使用较少检波器的情况下,实现室内外“联合压噪”,达到最好的压噪效果。

(3)两个检波器紧紧并列放置无论对压制规则干扰波还是压制随机干扰波均没有提高信噪比的作用,是一种资源的浪费。

#### 参考文献:

[1] 陆基孟.地震勘探原理[M].北京:石油大学出版社.1990.

- [16] 李貅. 瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [17] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002, 85-92.

## A 3D CONTINUOUS VELOCITY ANALYSIS OF TEM FICTITIOUS WAVE-FIELD AND ITS APPLICATION TO TUNNEL ADVANCED PREDICTION

FAN Tao

(*Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China*)

**Abstract:** In view of the fact that tunnel advanced geological prediction cannot effectively predict the flood in front of the tunnel face, this paper proposes a new method, i. e., transient electromagnetic wave-field transform continuation and imaging, which is based on the theory of floating plate and has proved to be very effective in predicting the unfavorable geological body in front of the tunnel face. With this desirable 3-D virtual velocity continuous analysis method, the problems of velocity extraction of observed data in migration imaging can be well solved. This paper puts forward the suitable working method of transient electromagnetism for the application in tunnel. In addition, the theoretical models and application examples were analyzed and calculated, and the results obtained coincide with the actual situation, showing that this velocity analysis method is feasible and effective.

**Key words:** transient electromagnetic method; tunnel prediction; wave field transform; migration imaging; velocity analysis

作者简介: 范涛(1983-),男,汉族,陕西安康人,助理工程师,硕士,主要从事地球物理瞬变电磁方法研究,公开发表学术论文数篇。

上接 242 页

## THE EFFECTS OF THE NUMBER OF GEOPHONES IN ARRAY ON NOISE ATTENUATION

WEI Ji-dong

(*Geophysical Corporation, Shengli Oil Administration Bureau, Dongying 262400, China*)

**Abstract:** The geophone array in field data acquisition can suppress both the regular interference noise and the scattering interference noise. The regular interference noise is mainly suppressed by directional effect, while the scattering interference noise is mainly suppressed by statistical effect. Relevant theories hold that, when other factors remain fixed, the more geophones are used, the better results are obtained. It seems therefore that more geophones should be used to improve the seismic data quality; nevertheless, the authors' studies have proved that, if the number of geophones in a liner array whose sensitivities are suitably weighted is more than " $n+3$ " (where  $n$  = effective-array-length / minimum-wavelength of regular interference noise), no obvious advantage can be seen by using more geophones. On such a basis, by calculating rose diagrams, the suitable number of geophones in an area-geophone-array or smearing can be pointed out, which is more economical. On the other hand, for the purpose of attenuating environmental noise, the more geophones are used in an array, the better result can be obtained under the condition that the effective array length is fixed. However, when the number of geophones reaches a certain level, no obvious improvement can be made. In addition, the authors' study also shows that the number of geophones has no definite relationship with the couple resonance noise. If the number of geophones in array is to be fixed, the geophone pattern should be taken into account. If the geophone pattern is unsuitable, adding geophones will not be beneficial to the noise attenuation. If the geophone sensitivity is not reasonably distributed, it cannot be helpful to the noise attenuation.

**Key words:** number of geophones in array; capability for suppressing noises; coherent noise; environmental noise; geophone inside noise; couple resonance noise

作者简介: 魏继东(1974-),男,山东寿光人,2007年毕业于中国海洋大学海洋地球物理专业,获博士学位,目前在胜利油田博士后工作站物探公司分站从事地震采集方法研究工作,公开发表学术论文数篇。