

143399



# 地震勘探组合法

苏联 A·A·兹维达也夫著



23

石油工业出版社

## 內 容 提 要

本書詳細描述目前广泛应用的各種油田地震勘探組合法。除闡明这些方法如何应用于研究地質構造复杂的探区之外，附帶还探討了一些有关組合法的論著。著者的論点在地震勘探文献中有着很宝贵的供献。

本書可供地震勘探队工程技术人员閱讀参考。

**А.А.ЦВЕТАЕВ**

МЕТОДЫ ГРУППИРОВАНИЯ  
В СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

根据苏联国立石油燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1953年莫斯科版翻譯

統一書号: 15037·350

地 震 勘 探 組 合 法

傅存博 謝明達譯 刘光鼎校訂

石油工业出版社出版(地址:北京六鋪炕石油工業部內)

北京市書刊出版業營業許可證出字第086號

北京市印刷一厂排印 新华書店发行

787×1092 $\frac{1}{2}$ 开本 \* 印張3張 \* 72千字 \* 印1—850册

1958年1月北京第1版第1次印刷

定价(11)0.75元

## 地球物理和地球化学勘探科学研究所

## 管理处的說明

近十年至十五年来，在研究与改进地震勘探的方法方面，各种不同的組合法得到了广泛的注意。苏联独自發明、制定和应用組合接收法要比外国进行的类似試驗工作早得多。組合法的發明者 B.C. 伏尤茨基于 1943 年荣获斯大林獎金。地震勘探法方面的新的改进和近几年来成功地研究出的方法無疑地証明，各种不同的組合法还有很大的沒有被利用的潛力。因此，現在把 1950 年不幸夭折的地球物理和地球化学勘探科学研究所一級科学研究员 A.A. 茲維达也夫 專門討論組合法的論文刊出發表是适时的，而且他的論文也是地震勘探文献中的宝貴貢獻。

A.A. 茲維达也夫在著作中用統一和严格的科学观点把所有各式各样極不相同的資料系統化起来并且加以分析。書中所述作者本人研究的結果，使組合法的理論大大地向前推进了一步。

地球物理和地球化学勘探科学研究所管理处認為本書有重大的科学价值，因而有义务出版 A.A. 茲維达也夫的这本作品，作为对他的永久紀念，并委託技术碩士 M.Л. 安托科利斯基审查、編輯并出版 A.A. 茲維达也夫的最后遺稿。

本書出版时作了一些不重要的編輯上的刪节和改动，M.Л. 安托科利斯基所做的註解明确了并發展了作者的某些原理。

# 目 录

## 地球物理和地球化学勘探科学研究所

管理处的说明 ..... 1

序 言 ..... 1

第一章 在地震勘探中应用的几种组合法的概述 ..... 4

§ 1. 地震仪组合法 ..... 4

(1) 方向性效应 ..... 4

(2) 统计效应 ..... 15

(3) 平均效应 ..... 26

§ 2. 地震仪的联合连接线路法 ..... 27

§ 3. 调整方向接收法 ..... 48

§ 4. 爆炸组合法 ..... 52

結論 ..... 57

第二章 地震勘探中应用的组合法的理论 ..... 58

§ 1. 有效信号 ..... 58

§ 2. 干扰 ..... 65

§ 3. 干扰对记录有效信号的影响 ..... 70

§ 4. 组合法的作用 ..... 85

(1) 地震仪的组合 ..... 85

(2) 地震仪的联合连接线路 ..... 90

(3) 调整方向接收法 ..... 95

註解 ..... 102

参考文献 ..... 108

## 序 言

現在，地震勘探法在綜合地質勘探工作中佔有巩固的地位，它在油田勘探中获得特別广泛的应用。

很早(从B.B.加利清时代起)以前，地震学数据就被利用来确立地球深層構造的假說，地震勘探法用于解决地質勘探的問題，在近30年来已發展起来了[20]。

在地震勘探法發展的初期，大家采用初至波法。以后进一步發展，便采用了反射波法。早在1923年，俄国發明家B.C.伏尤茨基曾因發明了用声学研究地層的方法和仪器而获得創作証書<sup>①</sup>，証書中論述到反射波法的原理。但当时首先因为缺乏灵敏的仪器，其次因为在各种干扰振动的背景上难以辨認所记录的反射波，所以阻碍了反射波法的实际应用。为了在卅年代初，能在地質勘探事業中广泛应用反射波法，当时曾要求在地震勘探中应用电子管放大器，大力研究制造灵敏而輕便的仪器的以及減少干扰作用的各种方法。

本書所闡述的組合法和地震波方向接收法，是防止干扰的最有效措施之一。

組合法首先是由B.C.伏尤茨基提出的<sup>②</sup>。1935—1937年期間，將該方法在野外进行了試驗，并付諸实际应用[6, 7, 8]。

組合法是把排列在一定距离上的几个地震仪接成串联或

① 1923年2月28日第7685号創作証書。

② 1934年6月11日第42640号創作証書。

并联的地震仪组，地震仪组的总输出经过放大器后再由一个电流计记录下来。许多这样的地震仪组同时在一張记录紙上进行记录。

除了用反射波法进行地震勘探之外，组合法在折射波对比法中也得到广泛的应用。折射波对比法是由Г.А. 甘布尔采夫领导下的苏联科学院理論地球物理研究所在1938—1940年期间研究出来的[16, 25, 18]。

组合法的效应与下列三个因素有关：第一，地震接收器组的方向作用；第二，不規則的偶然干扰面的相对减小；第三，平均性即与地震仪排列条件有关的不均匀性的平均作用。

组合法的缺点是，野外勘探队需要大量的地震仪；因此，以后就开始研究各式各样的联接线路，在这些线路中，同一个地震仪可以同时两个或两个以上的组内使用。这样就創造出許多联合连接地震仪的装置[20, 9]，现在已得到广泛应用的混波器就属于这种装置[17]。

调整方向接收法(РНП)应当被認為是另外一种组合法。使用这种方法时，必須以能够复制的方式来记录振动。实际上就是利用光学记录和有声电影中常用的光电复制。这是最初由Г.А. 甘布尔采夫提出的[10, 12]。

在苏联，Л.А. 里亞賓金曾研究过把这种方法应用在“调整方向接收法”方面[28]。估計调整方向接收法比普通地震勘探法能更可靠地測定反射波的到达方向和区分由不同方向同时到达的反射波，这样就能使所提出的仪器和方法适用于研究具有复杂地質構造的区域。

组合法不仅可以在记录仪器中应用，而且可以在激發地

震波时应用。

空中爆炸地震勘探法[33]的出現，又重新提出了利用組合爆炸是否合理的問題[34, 35]。这种地震勘探法可以得到更广泛的应用。

上面我們已对組合法作了一个簡短的概述，現在我們將更詳細地分別研究这种組合法。

## 第一章 在地震勘探中应用的 几种組合法的概述

如上所述，組合法可分为下列四类：（1）普通組合法；（2）地震仪的联合連接綫路法；（3）調整方向接收法；（4）爆炸組合法。

在討論这几类組合法时，我們尽可能地根据年代次序来研究与組合法有关的各項工作。

### § 1. 地震仪組合法

用組合接收法記錄反射波的最初試驗工作是在1935—1937年进行的。这些試驗工作是在發明人B. C. 伏尤茨基參加下完成的。在各种著作[6, 7, 8]中，对这些工作有相当全面的記述。

1937年在伊申拜地区所进行的工作，最后确定組合法为改进野外資料質量的方法。

（1）方向性效应 組合法是防止面波干扰的方法。面波在地層上部傳播，它有很大的强度，通常，面波週期比有效波週期有較多的低頻成分。

在地震勘探中，为了防止表面波的干扰，曾采用了許多措施：加深爆炸井、高頻濾波、当地的特殊觀測綫路。

可是在許多区域内，实施这些方法沒有获得預期的效果，所以选择有效波时，可以利用有效波与面波到达方向的差別。为此，必須利用有方向作用的仪器。

有效波(在組合法發展的初期指的只是反射波)是由深處發出的,其進行方向接近垂直;面波則在水平方向傳播。

方向作用的概念需要加以確定。在地震勘探中通常都研究Г. А. 甘布尔采夫[13, 14]所引用的三種方向特性。

1. 第一種方向特性是確定地震儀靈敏度與地震儀外殼振動方向間的關係。

2. 第二種方向特性是(假設地震波傳播方向變化而振動方向不變時)。確定地震儀靈敏度與地震波進行方向間的關係。

3. 第三種方向特性表示地震儀的靈敏度與地震波進行的方向的關係(考慮到振動方向的變化與波到達方向的變化有關)。

現在的地震勘探儀有與儀器垂直軸相合的一個自由度(參考註解1)。因此,地震儀的第一種方向特性可以用圖解法在空間用兩個中心在垂綫上的相切的圓來表示[15]。振動產生在垂直方向上時,儀器具有最大的靈敏度,這樣才適合於應用深層縱波的地震勘探的要求。因此,單獨地震儀具有第一種方向性。所有各種組合法都具有第二種方向性。

嚴格地說,應該研究总的方向性,但在研究第三種方向性時必須考慮地層上部彈性波傳播時所產生的複雜現象[12]。這裡應該考慮到:(1)由地面和空氣界面傳來的彈性波反射,(2)由於存在低速層而產生的折射以及(3)地震儀安置的深度等。在組合法的理論中,只考慮第二種方向性。

在最上部地層(風化帶)內地震射綫發生折射,這就是這種簡化的物理根據,這種折射使直接到達地震儀的波差不多成垂直,並與主要地層內的地震波的傳播方向無關。因此,

第一种特性的影响是不重要的。

正如我們將在下面看到的那樣，這種簡化的主要原因是，相同檢波器組的方向作用很少與單個檢波器的方向特性有關。在所有使用的地震儀中，這些特征在這方面幾乎沒有什麼差別。因此，我們今後只討論第二種方向特性。

現在來談談地震儀組合法的理論。我們必須重復地說：單個的儀器沒有上述的方向作用。

如果現在用沿剖面排列的儀器組來代替單個地震儀，把它們聯成一個電路，並和前面一樣，使這些地震儀組在一張總的地震記錄圖上記錄自己的振動，那就不難看出，這些組對於不同方向來的振動將有不同的靈敏度。

因為這些地震儀排列在地面上，所以這個組對於垂直於地面而來的波將有最大的靈敏度。對於所有其它方向來說，總輸出將取決於疊加振動的相位差。

對於正弦振動來說，不難找到總輸出等於零的方向。正弦振動方向接收法的理論是根據應用聲學[32,19]和無線電工程學[23]而來的。這種理論的基礎是，在光學教程中有关干涉一章內[36]詳細談到的諧波的疊加。

Г. А. 甘布尔采夫的著作[14]和 Л. А. 里亞賓金的著作[28]，最完整地提出了適用於地震勘探的組合法的理論。

現在我們來談談該理論的主要計算原理。假定，平面單諧波傳播於理想的均勻介質中，地震儀沿直綫排列在地面上，彼此相隔距離相等。

通常只討論平面問題（圖1）。此處  $A, A'$  是地層的表面； $1, 2, 3, \dots, n$  是由  $n$  個地震儀組成的地震儀組；相鄰地震儀間的距離等於  $\Delta x$ ； $B, B'$  是與地面成  $i$  角的平面波波前。

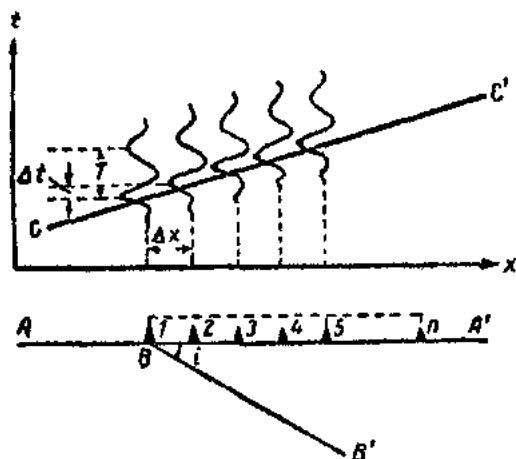


圖 1 地震儀組合簡圖  
1, 2, 3, …… n—地震儀; B, B'—記錄波的波前; C C'—該波的相位時距曲綫。

組成記錄道的地震檢波儀器，一般假設為綫性的，因而產生疊加原理。

實驗証明，這個重要的假設在很廣的範圍內保持不變。最近生產出的儀器包含非綫性的元件——自動振幅控制器。但自動振幅控制器的作用甚慢，在短的地震記錄段上，振幅保持均勻即保持綫性關係。這樣就可以在一兩個周期測得的有限時間間隔內不必考慮非綫性關係了。

再假設各個地震接收道是彼此相同的。

在這些假設中，相鄰地震儀的外殼振動之間的相位差等於儀器輸出端的相位差，由電流計記錄的振幅將與輸入端的振幅成正比。

由圖 1 我們可求得相鄰儀器的振動之間的相位差  $\varphi$

$$\varphi = -\omega \Delta t = -\frac{\omega \Delta x \sin i}{v}, \quad (1,1)$$

式中  $\omega$ ——被记录的振动的圆週頻率；  
 $\Delta t$ ——波到达两个相鄰仪器的時間差；  
 $v$ ——波傳播的速度。

$n$  个地震仪組成的組的輸出端的总振动  $R$  为：

$$R = R_0 \{ \sin \omega t + \sin (\omega t + \varphi) + \sin (\omega t + 2\varphi) + \dots + \sin [\omega t + (n-1)\varphi] \}, \quad (1,2)$$

式中  $R_0$ ——單个地震仪的振幅。

变换公式(1,2), 得：

$$R = R_0 \frac{\sin \frac{n\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \cdot \sin \left[ \omega t + (n-1) \frac{\varphi}{2} \right] \quad (1,3)$$

即我們求出同一頻率的諧和振动，振动的相位与組中心的地震仪符合。

振动振幅  $R_x$  等于

$$R_x = R_0 \frac{\sin \frac{n\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \quad (1,4)$$

因为根据(1,1)式,  $\varphi$  与波到达的角  $i$  有关, 所以(1,4)式可以确定地震仪組的方向作用。

通常, 以  $i$  角的总振动的振幅  $R_x$  与其極大值  $R_{\max}$  之比当作方向性系数  $F$ 。在这种情况下,  $R_{\max}$  为：

$$R_{\max} = nR_0, \quad (1,5)$$

因此

$$F = \frac{H_v}{R_{\max}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sin \frac{n\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sin \frac{n\omega \Delta x \sin i}{2v}}{\sin \frac{\omega \Delta x \sin i}{2v}}. \quad (1,6)$$

表示  $F$  为  $i$  的函数的曲线叫作方向特性曲线。通常，在极坐标上绘制特性曲线。

我们用直角坐标上的曲线族来表示 (1,6) 式，使其横轴为  $\frac{\Delta t}{T}$  值，其中  $T$  为所记录的波的周期。

我们将在所有场合保持这种表示法，因为变数  $\frac{\Delta t}{T}$  在应用时很方便，并且可以从地震记录上直接求出。

$$\text{因为} \quad \varphi = -\omega \Delta t = -\frac{2\pi \Delta t}{T}, \quad (1,7)$$

$$F = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sin n\pi \frac{\Delta t}{T}}{\sin \pi \frac{\Delta t}{T}}. \quad (1,8)$$

图 2 表示组内地震仪数量  $n$  不同时，按公式 (1,8) 求出的方向性系数  $F$  的曲线族。

方向性系数是  $\frac{\Delta t}{T}$  的週期函数，如  $n$  为奇数，函数週期为 1，如  $n$  为偶数，函数週期为 2。当  $\frac{\Delta t}{T} = 0$  时， $F$  的最大值等于 1。当  $\frac{\Delta t}{T} = 1, 2, 3 \dots$  时，得到其他的极大绝对值和等于 1 的值。这些数值通常叫做二次极大或二等极大。在  $0 \leq \frac{\Delta t}{T} \leq 1$  的间隔中，在系数为  $\frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n} \dots, \frac{n-1}{n}$  的诸点上，曲线与横坐标相交  $n-1$  次。并有  $n-2$  个三等极大。取三等极大的平均值与组内地震仪数近似成反比例

[42]。

用地震仪组工作时，力求使有效信号的振幅获得最大增益。从公式(1,5)看出，增加  $n$  (地震仪数目) 可以做到这一

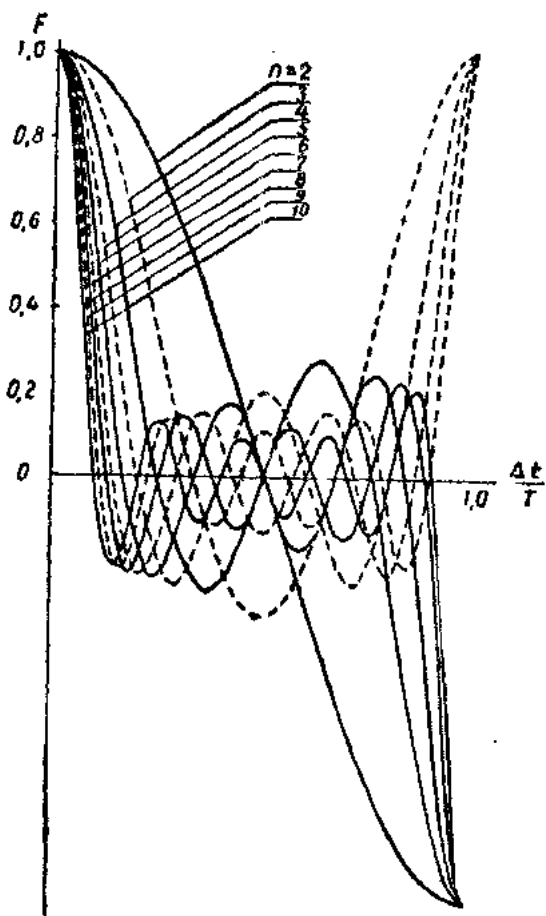


圖 2  $n$  个地震仪组成的组的方向特性曲线

点。但增加  $n$  有这样的危险： $\frac{\Delta t}{T}$  不等于零的有效反射波，即以有限视速度到达仪器的有效反射波，将不能到达灵敏度最大的范围内，并且不能被识别出来。这个问题同极大的宽度有关。

П. А. 里亚宾金把等于  $\frac{\Delta t}{T}$  一半的数值(当  $F$  为第一个另值时)当作表示主要极大宽度及与之有关的方向性尖锐度的值。这个值等于  $\frac{1}{n}$ ，因此， $\left(\frac{\Delta t}{T}\right)_{01} = \frac{1}{2n}$ 。(I, 9)

根据(I, 8)式，方向性系数的相应值为：

$$F_{01} = \frac{1}{n \sin \frac{\pi}{2n}}, \quad (\text{I}, 10)$$

即与  $n$  有关。但由计算证明，该值的变化范围相当小——由  $n=2$  时的 0.71 到  $n \rightarrow \infty$  时的  $\frac{2}{\pi} = 0.64$ 。所以当  $\frac{\Delta t}{T} = \frac{1}{2n}$  时，可以认为该值近似地等于 0.7。

由此得出所提问题的解答，也就是为了使地震仪组对有效波的灵敏度不小于最大值的 70%，必须使一切有效波满足：

$$\frac{\Delta t}{T} \leq \frac{1}{2n}. \quad (\text{I}, 11)$$

为了实际应用起见，最好将(I, 11)式加以变换。根据所记录的波的时距曲线，视速度等于：

$$v^* = \frac{\Delta x}{\Delta t}; \quad (\text{I}, 12)$$

代入(I, 11)式，得

$$\Delta x \leq \frac{1}{2n} v^* T. \quad (I, 13)$$

由 (I, 13) 式可以确定組內地震仪之間的最大距离。在圖 3a 中,  $\Delta x$  为  $n$  之函数。取  $v^* T$  为参数。

如果干扰波的視速度很低, 即  $\frac{\Delta t}{T}$  很大, 則它們將會处于三級極大的範圍內。为了消弱干扰波, 最好用增加組內仪器数目的方法来減少这些極大的絕對值。如果干扰波的視速度很低, 而且  $\frac{\Delta t}{T}$  很大时, 那么就会發生干扰波落于二級極大範圍內的危險, 即干扰波將要增强。为了估計这种危險性, 我們导出一个能确定地震仪間距离  $\Delta x$  的公式, 增加这个距离后, 就能得到二級極大。

如果

$$\frac{\Delta t}{T} > \frac{i-1}{n}. \quad (I, 14)$$

就会落入二級極大的範圍內。

用下列公式表示干扰波的視速度

$$v_i^* = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (I, 15)$$

我們可求出:

$$\Delta x > \frac{n-1}{n} v^* T. \quad (I, 16)$$

这些临界值  $\Delta x$  示于圖 3b。

現在我們来談談对調整方向接收法很有意义的問題。

由 (I, 1) 式和 (I, 7) 式得出:

$$\Delta t = \frac{\Delta x \sin i}{v}. \quad (I, 17)$$

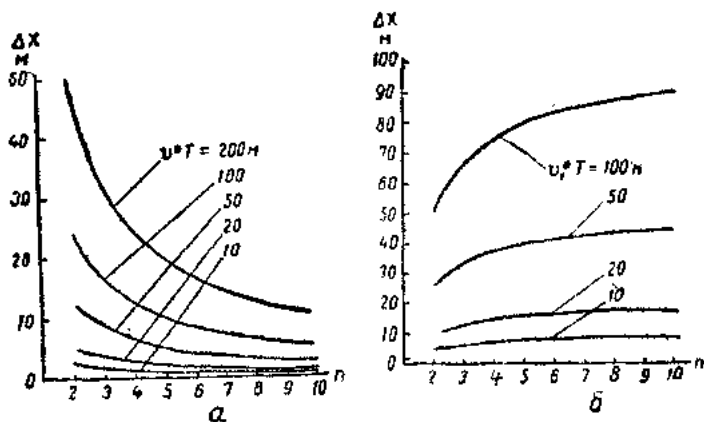


圖 3 組內地震儀之間的最大容許距離  $\Delta x$   
 $n$ —地震儀組具有 70% 灵敏度的情况； $\delta$ —增加距離時，可能出現  
 二級極大的情况。

將求得值代入 (I, 9) 式，当地震儀組的灵敏度降到 70% 时，我們可以求出波的到达方向与地面間的角度的公式，即：

$$\sin i_{01} = \frac{vT'}{2n\Delta x}, \quad (\text{I}, 18)$$

显然， $i_{01}$  角愈小，地震儀組的方向性灵敏度愈大。由 (I, 18) 式可以看出，在規定的接收条件  $v$ ， $t$  和地震儀数  $n$  的情况下，要提高地震儀組的方向性灵敏度，就必须增加儀器間的距離  $\Delta x$ ；若  $\Delta x$  为定值，那就必須增加地震儀的数目。但是，如果总長度——組的基綫  $d$  已确定，則增加地震儀数目就会使方向性灵敏度减小。事实上：

$$d = (n-1) \Delta x, \quad (\text{I}, 19)$$

代入 (I, 18) 式，就得出