地震观测方位法

E· И· 加尔彼林 著

地质出版社

地震觀測方位法

地震观测方位法

E. И. 加尔彼林著

刘光鼎譯

地質出版社

1956·北京

Е. И. ГАЛЬПЕРИН

АЗИМУТАЛЬНЫЙ МЕТОД СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

ГОСТОПТЕХИЗДАТ

МОСКВА 1955.

本書簡明地描述了地震观測的新方法——方位法。这个方法在地震勘探和地震学中用來确定地面位移向量的方向；根据波的極化特性，可在地震記錄上分析波型。

書中比較詳尽地闡述了这个方法的基本理論問題，介紹了方位裝置、观測技術和相对灵敏度的控制等。

另外，还特別討論了一般地震观測法（位置对比）与方位观測法（方位对比）間的配合运用問題，并举了例子。最后还指出了这个方法在地震勘探中發展的远景。

本書可供地球物理勘探人員、各院校的本專業的师生、地震学工作者参考之用。

本書由刘光鼎譯，范偉粹校。

地震观測方位法

著者	Е. И. 加尔彼林
譯者	刘光鼎
出版者	地質出版社
	北京宣武門外永光寺西街3号
	北京市書刊出版業營業許可証出字第050号
發行所	新華書店
印刷者	地質印刷厂
	北京廣安門内教子胡同32号

編輯：顧燕庭　技術編輯：張華元　校对：洪梅玲

印数(京)1—6800册　1956年11月北京第1版

开本31″×43″1/32　1956年11月第1次印刷

字数56,000字　印張2 9/16　插頁1

定价(10)0.38元

目　録

緒言……………………………………………………………4
第一章　方位观测法原理…………………………………6
　§1.兩种对比型式…………………………………………6
　§2.論基本类型地震波的極化性質……………………8
　§3.基本方程式的推導…………………………………10
第二章　在方位地震記錄上識別地震波基本类型的标志……………………………………………………33
　§1.縱綫性極化波和橫綫性極化波……………………33
　§2.面波……………………………………………………39
　§3.干涉波…………………………………………………43
第三章　位移向量方向的測定……………………………52
第四章　方位裝置……………………………………………59
第五章　方位观测的方法問題……………………………64
　§1.論錐形方位裝置参数的选擇………………………64
　§2.仪器相对灵敏度的控制………………………………69
　§3.低速帶的影响，平台裝置……………………………71
　§4.方位对比法与位置对比法的配合……………………72
　§5.应用方位观测的某些补充可能性……………………78
参考文献………………………………………………………80

紀念我的老师
格·亞·甘布尔采夫

緒　　言

在研究地面的彈性振动时，广泛运用兩种基本的观测方法。

在地震学中，研究地震波时，观测主要是在單个的点——地震台上進行的。这种点的观测方法是以振动向量的三个分量來研究振动的总向量为根据的。

在地震勘探中常应用测綫观测法；这个观测法研究的是振动向量的一个分量，通常为垂直分量。这个分量是由沿着某条观测綫——地震测綫分布的一排地震仪來記錄的。测綫观测法的發展在極大程度上与应用在地震記錄上識别和追踪波的对比原則有关；这种發展保証了应用現代地震勘探方法的成功。

因此，可以認为把对比原理应用于点的观测法也是合理的，在1952年，格·亞·甘布尔采夫院士提出了地震观测方位法，这个方法的基礎是，在一点上作地震观测时应用对比原則〔1〕。在观测方位法中，位移的总向量不是由三个，而是由一整組地震仪來記錄的。方位地震記錄是利用專門的方位裝置在一个点上的观测而獲得的。这种方位裝置包括其軸指着不同方位而与水平成同等角度（錐形裝置），或与水平成不同角度的几个地震仪。

方位观测可以解决兩个問題：（1）用方位相位对比法分析地震記錄和在地震記錄上識别不同类型的波；（2）测

定綫性極化波位移向量的方向。这些問題在原則上是沒有區别的，只有在观測方法上有某些差别。現在，对于地震勘探來說，根据波型（方位对比）來分辨波，顯然具有重要的意义。这里应該着重指出，利用方位的相位对比只能在波傳播的最后地段上，即波接近地震檢波器时，确定波的类型。方位观測用的是普通的地震勘探仪器，因此在任何地震勘探隊中都可以很容易地应用它們。

方位观測法是由苏联科学院地球物理研究所研究出來的。在1952和1953年內，这个方法已發展到应用來研究弱的地方性地震。

在1954年，观測方位法在地震勘探工作中作了实驗。实驗是由苏联科学院地球物理研究所会同苏联石油工業部地球物理勘探科学研究所（НИИГР）進行的。

在这几年中，研究了这个方法的基本理論問題，設計了某些方位裝置的結構和观測的工作方法，并且証实了方法的有效性。方位观測法开始在工業中扎下了根。

这本小册子主要是供熟悉地震勘探基本方法的地震勘探技術員和工程师用的。由于这些問題的新穎，对这个方法的个别理論問題加以闡明，也是适宜的。

在編寫这本小册子时，作者广泛地参照了格·亞·甘布尔采夫院士的建議和指示。

第一章　方位观测法原理

1909年，俄國学者Б. Б. 加利清〔5、9〕提出了根据在一点上，按三个互相垂直的方向（兩个水平的，一个垂直的）布置的地震仪的观测來测定位移向量的方向。这个方法在地震学中研究地震时業已得到發展。

Б. Б. 加利清关于地震仪三分量装置的理論，对解决勘探地震測計学中的專門問題，也得到了具体的运用。在三十年代中，这个方向發展得最广闊。但是，时距曲綫法的优点，以及解釋三分量观測資料的許多困难，使得三分量观測在地震勘探中实际上停止了使用。以研究时距曲綫为基礎的方法獲得根本的發展〔6〕。

現代的地震勘探方法順利地得到發展，在很大的程度上是依仗于地震記錄上識别和追踪波的对比原則的应用。結合相位对比和波的頻率选擇，可以在干擾振动的背景上識别反射波，从而將反射波应用于地震勘探。由于这个緣故，反射波法（МОВ）在短时間內就成为勘探石油構造的基本方法。

在折射波領域內，对比原則的得以推广是創立折射波对比法（КМПВ）的基礎〔2〕。在一点上观測时，应用对比原理也導致新的方位观測法的發展。这里所討論的方位的相位对比乃是以地震观測为基礎的对比原則的進一步發展。

§ 1. 兩種对比型式

对于每个波來說，都可以有兩种方向特性：在通过某种

波时，确定某一点上質点位移性質的第一种方向特性；以及与波在空間的傳播方向有关的第二种方向特性。

在折射波对比法及反射波法中应用的位置对比中，应用第二种方向特性。根据在一点上的观測作方位对比，应用第一种方向特性。兩种对比的原則区别就在这里。

位置对比

在地震勘探中位置对比是追踪波或波的相位的手段，波或波的相位是观測点（通常是沿某一定方向的測綫）的位置函数。位置对比是以規則波在某个追踪間隔內保持記錄形狀特点的性質为根据的。記錄形狀和波振幅随离开爆炸点的程度而平穩的变化是識別和对比單波的基本标志。

位置对比可以在地震記錄上識別一定类型的波。并且在面上追踪它們。但是，在个别情况中，特別是地震地質条件复雜，以及与其有关的地震記錄上波形圖复雜时，位置对比就不夠了，屬于这种情况的首先就应該是相近視速度的波的干涉。也有这样的情况，干涉波沿測綫得到很好地追踪，并且用位置对比法來确定这种波的复雜性質并不老是能成功的。

方位对比

所謂方位对比就是波或波的个别相位的追踪，波或波的个别相位为在一点上观測时地震仪最大灵敏度軸的方向的函数。这种追踪是为了要在方位地震記錄上識別縱的綫性極化波和橫的綫性極化波以及極化一般为非綫性的干涉波而進行的。因为方位对比是在一点上研究振动时地震仪最大灵敏度軸的方向的函数，并考慮到不僅可以改变方位，而且可以改变地震檢波器的傾角，因此方位对比也可以称为極性对比。

方位对比时，保持随时間的極化規律是識別規則波的基本标志，这就是說，在經过某一波的任一时刻，点的位移就按同一个規律發生。研究波的極化性質，可以在方位地震記錄上識別地震波的基本类型。

§2. 論基本类型地震波的極化性質

可將波的極化理解成質点位移的方向或这个方向随时間的变化。縱波（P）和橫波（S），勒夫面波（L）和瑞雷面波（R），以及干涉波是在地震勘探和地震学中常遇到的基本类型的地震波，干涉波是由同一类型或不同类型的兩个或几个波的叠加而形成的。

按極化性質，可以將地震波的基本类型分为兩組：（1）綫性極化波；質点受綫性極化波的作用而沿直綫移动，和（2）复雜極化波；受复雜極化波的作用，質点的位移是按比較复雜的跡綫進行的。

縱波和橫波都是綫性極化波，对于如目前地震勘探最感兴趣的縱波來說，在均匀的和无限的介質中，質点位移的方向与波傳播的方向一致。在有分界面存在时，位移的方向可以改变，但是，此时仍保持極化的綫性性質。位移方向的最大改变發生于大地空气界面上。这是因为在地面上產生了反射波，入射的位移方向就改变了。这特別是因为在地震学中解釋三分量裝置的观測时要計算，观測“視”出射角和“真”出射角的不同。这样，縱綫性極化波在不均匀介質中傳播时，位移向量的方向可能不同于波的傳播方向，但是，波的極化性質仍旧是綫性的。

对于橫波來說，位移向量的方向在垂直于波傳播方向的

平面內。除了横波入射到大地空气界面上成大于臨角界的情况以外，横波入射到大地空气界面时，横波的極化性質也不改变。在这种情况中，由于入射波和反射波之間的相位移，綫性極化波可以成为橢圓極化波。

勒夫面波也屬于綫性極化波，在勒夫面波的作用下，質点沿垂直于波傳播方向的水平直綫移动。

瑞雷面波可以作为复雜極化波的例子。瑞雷波傳播时，每一个振动的質点描繪着橢圓，几乎所有的干涉波也都是复雜極化波。

具有任意相位、振幅、到达方向、而周期相等的兩个綫性極化振动發生干涉时，在这兩个振动所在的平面內，总是可以求得这样兩个互相垂直的方向，沿这兩个方向的振动的每个相位移动 90° 的角。

大家都知道〔8〕，因为同一个周期的、相位移动 90° 的兩个互相垂直的振动是橢圓極化的条件，因此兩个这种綫性極化振动的干涉造成按橢圓極化的振动。因为任意个相同周期的綫性極化振动之和总可以合成兩个綫性極化振动之和，任何多少任意方向、振幅、相位，但相等周期的綫性極化振动的干涉总的作成沿橢圓極化的干涉振动。

兩个或几个橢圓極化波的干涉作成也按橢圓極化的干涉振动。

不同周期的波的干涉造成比較复雜的極化跡綫（例如，綫性極化波的李沙育圖形）。在地震勘探中由于頻率的选擇所記錄的振动的頻率区域十分狹灰，并且波頻率在地震記錄上的差别不很大，因此分析橢圓極化振动是最有意义的，尤其是可以將綫性極化振动作为沿橢圓極化振动的特殊情况。在以后的叙述里，主要的注意力將放在橢圓極化波的分析上。

§ 3. 基本方程式的推導

每个波的方位地震記錄决定于兩个特性：相位特性和振幅（动力学的）特性。相位特性确定方位地震記錄上相位移(β)与装置上地震仪的軸的方向（ω—地震仪軸的方位，ψ—地震仪与水平所成的夾角）的关系，并确定方位地震記錄上的同相軸。方位地震記錄上的同相軸，也和位置地震記錄上的同相軸一样，就是波的相同相位的連綫。方位地震記錄上同相軸形狀的变化与波傳播的速度无关。方位地震記錄的同相軸形狀只决定于波的極化性質。方位地震記錄的同相軸决定于表达式$\beta=\beta(\omega, \psi)$，这个表达式也是同相軸的方程式。

方位地震記錄的振幅（动力学的）特性确定地震記錄上相对記錄振幅（A）与地震仪的軸的方向（ω, ψ）的关系。方程式$A=A(\omega, \psi)$是方位地震記錄上的振幅方程式。

同相軸方程式和振幅方程式完全决定着方位的地震記錄。研究这些方程式，可以确定在方位地震記錄上識別地震波基本类型的标志。这样，相位特性和振幅特性的解析式可以作为方位相位对比的基本方程式。

同相軸方程式和振幅方程式的推導

根据相同周期的綫性極化諧和振动的討論，導出橢圓極化波的方位地震記錄的同相軸方程式和振幅方程式。如上所述，这种情况对于分析相同周期的綫性極化波的干涉是夠的。我們求每个干涉振动在一个方向上的分量，然后再把这些分量加起來以導出这些方程式。

我們討論任意方向的、有不同振幅A_0和B_0以及起始相位

β_1和β_2的、但相同周期的兩个綫性極化振动。諧和函数$A(t)$和$B(t)$值随时間的变化表示于下例公式：

$$A(t)=A_0 \sin\left(2\pi\frac{t}{T}+\beta_1\right);$$

$$B(t)=B_0 \sin\left(2\pi\frac{t}{T}+\beta_2\right).$$

已知在直角坐标系中，位移向量$\vec{U}$由三个分量u,v,w确定。Б•Б•加利清所提出的方法就是以这三个振动分量的分析为根据的〔9〕。在球坐标系中，位移向量$\vec{U}$的方向可以由兩个角來确定：方位角（ω_i）和与垂綫所成的角ψ_i。設地震仪的軸的方向决定于兩个角：方位角ω和与水平綫所成的ψ角。我們討論在由角ω及ψ所确定的方向上的上述兩个振动的分量。它們对于每个振动可以由下列方程式表示：

$$A_{\omega\psi}(t)=\frac{A_0}{2}[\sin(\psi+\varphi_1)+\sin(\psi-\varphi_1)]\times$$

$$\times[1+\operatorname{ctg}\psi\operatorname{tg}\varphi_1\cos(\omega-\omega_1)]\sin\left(\frac{2\pi}{T}t+\beta_i\right);\quad (1)$$

$$B_{\omega\psi}(t)=\frac{B_0}{2}[\sin(\psi+\varphi_2)+\sin(\psi-\varphi_2)]\times$$

$$\times[1+\operatorname{ctg}\psi\operatorname{tg}\varphi_2\cos(\omega-\omega_2)]\sin\left(\frac{2\pi}{T}t+\beta_2\right),$$

此处$A_{\omega\psi}(t)$和$B_{\omega\psi}(t)$——在由ω和ψ所确定的方向中的位移分量。

如果ω及ψ值固定，我們就可以求得裝置中一个地震仪軸的方向。（1）式中的每一个式子都可以作为在給定方向（ω, ψ）上相应位移分量的理論地震記錄的方程式，而且在这些地震記錄上，記錄的振幅决定于下列表达式：

$$A_{\omega\psi}=\frac{A_0}{2}[\sin(\psi+\varphi_1)+\sin(\psi-\varphi_1)]\times$$
$$\times[1+\operatorname{ctg}\psi\operatorname{tg}\varphi_1\cos(\omega-\omega_1)];$$
$$B_{\omega\psi}=\frac{B_0}{2}[\sin(\psi+\varphi_2)+\sin(\psi-\varphi_2)]\times$$
$$\times[1+\operatorname{ctg}\psi\operatorname{tg}\varphi_2\cos(\omega-\omega_2)].$$

方程式（1）可以表示为这种形式：

$$A_{\omega\psi}(t)=A_0\sin\psi\cos\varphi_1[1+\operatorname{ctg}\psi\times$$
$$\times\operatorname{tg}\varphi_1\cos(\omega-\omega_1)]\sin\left(\frac{2\pi}{T}t+\beta_1\right);\qquad(2)$$
$$B_{\omega\psi}(t)=B_0\sin\psi\cos\varphi_2[1+\operatorname{ctg}\psi\operatorname{tg}\varphi_2\times$$
$$\times\cos(\omega-\omega_2)]\sin\left(\frac{2\pi}{T}t+\beta_2\right).$$

这样，借方程式（2）可确定在由角（ω，ψ）所确定的方向中兩个任意方向振动的分量。如果使地震仪最大灵敏度軸在（ω，ψ）方向上，則由方程式（2）所确定的振动相当于用这个地震仪所記錄的每个干涉綫性極化振动的記錄。为了得到用这种地震仪獲得干涉振动的記錄，必須使兩个分量加起來。在一个方向上有兩个振动的分量，我們用通常的方法把它們加起來。

人們从参考文献〔3〕中知道，相同方向、具有相等周期、但不同振幅a和b及不同起始相位β_1和β_2的兩个諧和振动相加为一个諧和振动，这个振动的振幅A和相位β决定于公式

$$A^2=a^2+b^2+2ab\cos(\beta_1-\beta_2);\qquad(3)$$

$$\operatorname{tg}\beta=\frac{a\sin\beta_1+b\sin\beta_2}{a\cos\beta_1+b\cos\beta_2}.\qquad(4)$$

我們应用这兩个公式以求方位相位对比的方程式。

同相軸方程式

我們求由方程式（2）所确定的合振动的相位。为此，从方程式（2）中將分振动的振幅值代入公式（4），并且經不复雜的变換之后，我們对于合振动的相位移求得如下的表达式：

$$\beta = \operatorname{arc\,tg}\left\{\frac{\operatorname{ctg}\psi\left[\cos\alpha\left(\frac{A_0}{B_0}\sin\beta_1\sin\varphi_1\cos\omega_1+\sin\beta_2\sin\varphi_2\cos\omega_2\right)+\sin\alpha\left(\frac{A_0}{B_0}\sin\beta_1\sin\varphi_1\sin\omega_1+\sin\beta_2\sin\varphi_2\sin\omega_2\right)\right]+\frac{A_0}{B_0}\sin\beta_1\cos\varphi_1+\sin\beta_2\cos\varphi_2}{\operatorname{ctg}\psi\left[\cos\alpha\left(\frac{A_0}{B_0}\cos\beta_1\sin\varphi_1\cos\omega_1+\cos\beta_2\sin\varphi_2\cos\omega_2\right)+\sin\alpha\left(\frac{A_0}{B_0}\cos\beta_1\sin\varphi_1\sin\omega_1+\cos\beta_2\sin\varphi_2\sin\omega_2\right)\right]+\frac{A_0}{B_0}\cos\beta_1\cos\varphi_1+\cos\beta_2\cos\varphi_2}\right\}. \quad (5)$$

这个表达式为方位地震記錄上的同相軸方程式。在方程式（5）中圓括号內的几項只和确定原始振动的要素有关。圓括号前面的系数确定相位移与地震仪軸的方位的关系。方括号前面的系数确定相位移与地震仪軸的傾角的关系。为了簡易起見，如果第一个振动的方位作为方位讀数的始点（$\omega_1=0$），取第一个振动的相位为相位讀数的始点（$\beta_1=0$），則公式可以表示成这种形式：

$$\beta = \operatorname{arc\,tg}\left\{\frac{\sin\beta_2[\operatorname{ctg}\psi\sin\varphi_2\cos(\omega-\omega_2)+\cos\varphi_2]}{\cos\beta_2[\operatorname{ctg}\psi\sin\varphi_2\cos(\omega-\omega_2)+\cos\varphi_2]+}\right.$$

$$\left.\frac{\sin\beta_2\,[\operatorname{ctg}\psi\sin\varphi_2\cos(\omega-\omega_2)+\cos\varphi_2]}{+\dfrac{A_0}{B_0}(\sin\varphi_1\cos\omega\operatorname{ctg}\psi+\cos\varphi_1)+\cos\varphi_1\cos\beta_2}\right\}.\quad(6)$$

如果現在对沿橢圓極化的振动使 $\beta_2=\dfrac{\pi}{2}$，而兩个干涉振动間的夾角等于90°，則同相軸方程式(6)可以寫成这样：

$$\beta=\operatorname{arc\,tg}\left\{\frac{\operatorname{ctg}\psi\sin\varphi_2\cos(\omega-\omega_2)+\cos\varphi_2}{m[\operatorname{ctg}\psi\cos\omega\sin\varphi_1]+\cos\varphi_1}\right\},\quad(7)$$

此处m—極化振动分量的振幅之比。

因为由（φ_1,ω_1）和（φ_2,ω_2）所确定的兩个方向垂直性的条件以如下方程式表示：

$$\sin\varphi_2\sin\varphi_1\cos(\omega_1-\omega_2)+\cos\varphi_1\cos\varphi_2=0,\quad(8)$$

則沿橢圓極化的波的同相軸方程式具有下列形式：

$$\operatorname{tg}\beta=\frac{\operatorname{ctg}\psi\ \cos(\omega-\omega_2)-\operatorname{tg}\varphi_1\cos\omega_2}{m\cos\varphi_1[\operatorname{ctg}\psi\cos\omega\operatorname{tg}\varphi_1+1]\sqrt{\operatorname{tg}^2\varphi_1\cos^2\omega_1+1}}.\quad(9)$$

振幅方程式

振幅方程式可以由式（2）中的振幅值代入公式（3）而求得。經代換和某些簡化之后，振幅方程式具有形式：

$$\begin{aligned}C^2_{\omega\psi}&=\sin^2\psi(A_0^2\cos^2\varphi_1+B_0^2\cos^2\varphi_2+\\&+2A_0B_0\cos\varphi_1\cos\varphi_2\cos\beta_2)+\sin2\psi\times\\&\times\{A_0\sin\varphi_1\cos(\omega-\omega_1)[A_0\cos\varphi_1+B_0\cos\varphi_2\cos\beta_2]+\\&+B_0\sin\varphi_2\cos(\omega-\omega_2)[A_0\cos\varphi_1\cos\beta_2+B_0\cos\varphi_2]\}+\\&+\cos^2\psi[A_0^2\sin^2\varphi_1\cos^2(\omega-\omega_1)+2A_0B_0\sin\varphi_1\sin\varphi_2\times\\&\times\cos(\omega-\omega_1)\cos(\omega-\omega_2)\cos\beta_2+\\&+B_0^2\sin^2\varphi_2\cos^2(\omega-\omega_2)].\end{aligned}\quad(10)$$

振幅方程式(10)也可以化簡。設 $\beta_2=90°$，$\omega_1=0$，我們求得

$$C_{\omega\psi}^2=A_0{}^2(\sin\psi\cos\varphi_1+\cos\psi\sin\varphi_1\cos\omega)^2+$$
$$+B_0{}^2[\sin\psi\cos\varphi_2+\cos\psi\sin\varphi_2\cos(\omega-\omega_2)]^2. \quad (11)$$

如果考慮垂直性条件（8），則方程式（11）可以寫成这样：

$$C_{\omega\psi}^2=A_0{}^2(\sin\psi\cos\varphi_1+\cos\psi\sin\varphi_1\cos\omega)^2+$$
$$+B_0\frac{[\cos\psi\cos\varphi_1\cos(\omega-\omega_2)-\sin\psi\sin\varphi_1\cos\omega_2]^2}{\sin^2\varphi_1\cos^2\omega_2+\cos^2\varphi_1}. \quad (12)$$

方程式（9）和（12）是方位地震記錄上橢圓極化波的同相軸方程式和振幅方程式。从方程式（9）和（12）可以很容易地求得各种基本类型地震波的方位相位对比方程式。我們研究各种类型地震波的同相軸方程式和振幅方程式。我們从最有意义的綫性極化波开始研究。

綫性極化波方程式的研究

綫性極化振动方位地震記錄的同相軸方程式和振幅方程式可以从橢圓極化振动的相应方程式中求得。

可以將綫性極化作为橢圓極化的特殊情况。为此，設半軸比（m）等于0或∞，在这兩种情况下到达方向和相位移將差90°。

綫性極化波的同相軸和振幅方程式

我們从公式（6）中求得同相軸方程式。如果設公式中

$m=\frac{A_0}{B_0}=0$（$A_0=0$），于是 $\mathrm{tg}\,\beta=\mathrm{tg}\beta_2$，并且 $\beta=\beta_2=90°$。

如果設 $m=\infty$（$B_0=0$），則 $\mathrm{tg}\,\beta=0$，并且 $\beta=0+n\pi$。我們知道所采用的讀数系統中 $\beta_1=0$，就可以作出下列重要的結論。

1.在綫性極化波的方位地震記錄上，相位移与地震仪軸