

复杂山地

地震资料处理**关键细节与实践**

Key Techniques and Practices

in Seismic Data Processing of Complex Mountain Areas

罗仁泽 / 编著



科学出版社

1 资料处理目标

随着油气田勘探开发向超深层、复杂构造区域的深入，地震资料处理的目标和要求也在随之发生转变。

1. 目标

资料处理的目标是配合采集和解释人员完成当前形势下的地质任务，为国家多找油气。目前，常规处理正向精细化处理解释一体化转变，地震资料处理服务正向油气开发服务领域延伸。随着目标和服务对象变更，技术需求相应变更，深度、广度均有较大拓宽；目标处理项目加大，针对不同目标，形成不同的处理流程。岩性解释数据要求“三高”，除走时外需动力学方面信息，以及横波、泊松比、密度等信息，详细描述井间不均匀性。

2. 指标

资料处理的指标是，对于任何地区采集的资料，通过加强处理过程质量的控制，达到最佳质量状态。利用高速卫星通信和地面 ATM 网络等方式，实现采集实时交互处理与解释。新一代软件系统表现出开放性、网络化、集成化、可视化、并行化特点，支持计算机集群处理。

3. 技术要求

资料处理的技术要求是，达到最佳的去噪效果、最准的静校正量和速度，实现信噪比和分辨率的完美统一。思路上，从多项目批量作业方式转向单项目交互处理作业方式，从一般地质任务转向针对目的层目标的处理，从单一处理任务转向处理解释一体化的任务，从时间域处理逐渐转向深度域处理，从双曲线模型逐渐转向非双曲线模型，从叠后偏移转向叠前偏移，从叠后修饰去噪转向叠前压噪信号增强，从二维剖面构造解释处理转向“三高”的三维数据体构造、岩性解释处理。对于复杂山地地区，地震资料信噪比很低，与多次覆盖技术相应的叠加、成像难度大；采集技术中使用大炮检距和高覆盖次数，也加剧了叠加成像（同相）的困难。方法研究的效果只有通过解释才能真正体现，只有通过解释才能发现问题，进而实现与地质的结合。

4. 关键

资料处理的关键是充分发挥处理人员的聪明才智，充分利用现代化设备，以及野外采集的有效波成分，从而向解释人员展示丰富的地震地质信息。

2 确保空间关系检查

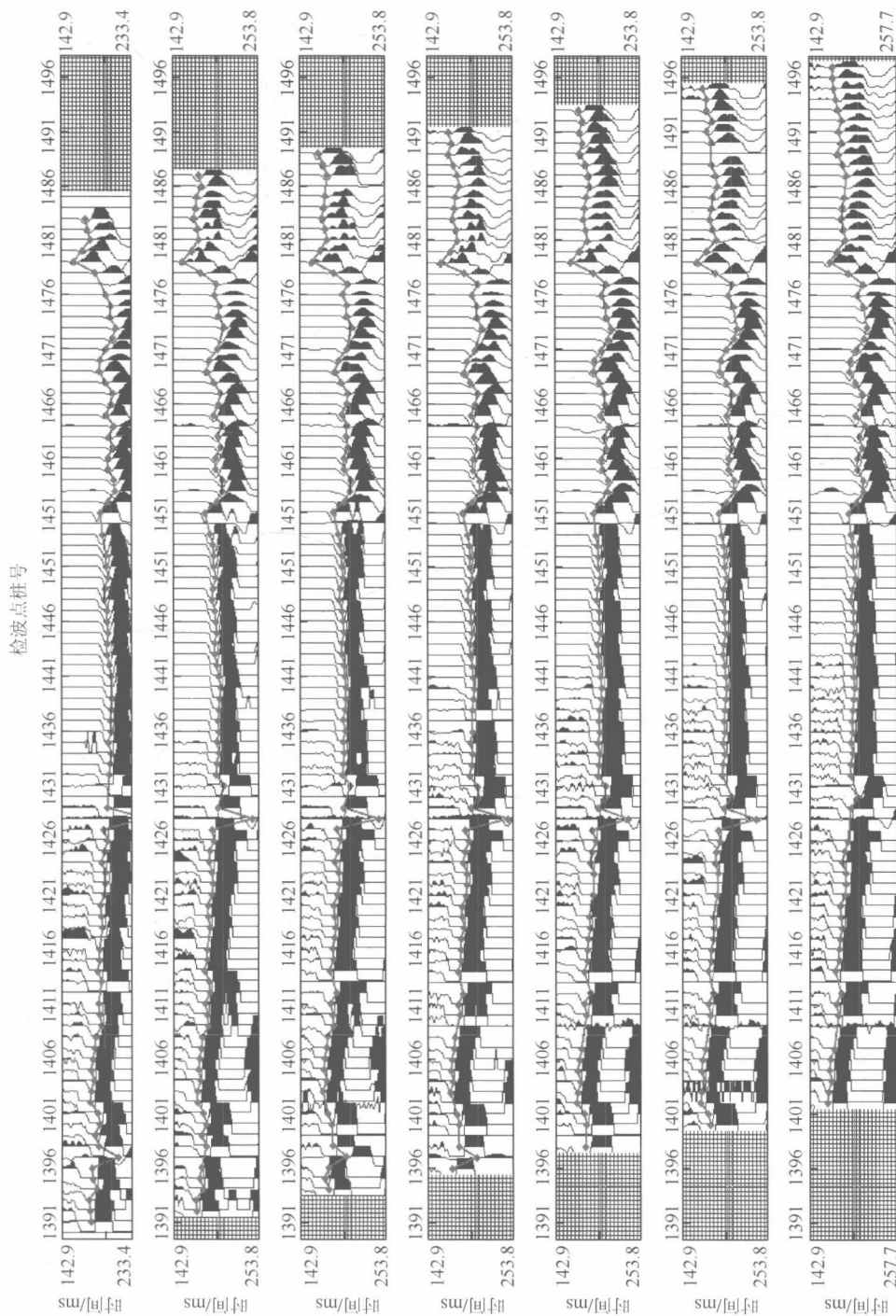
为了使资料处理与野外紧密配合，目前野外都配备有现场处理人员。当天施工记录由现场处理人员输入机器中，一旦发现空间关系有问题，立即与野外有关人员联系，立即纠正。尽管如此，处理上还是会不时地发现空间关系问题。因此，强调在室内资料处理前（数据加载空间关系后），再一次确认空间关系的正确性十分必要。此时，须做好以下两项工作：共检波点检查和初至切除检查。

2.1 共检波点检查

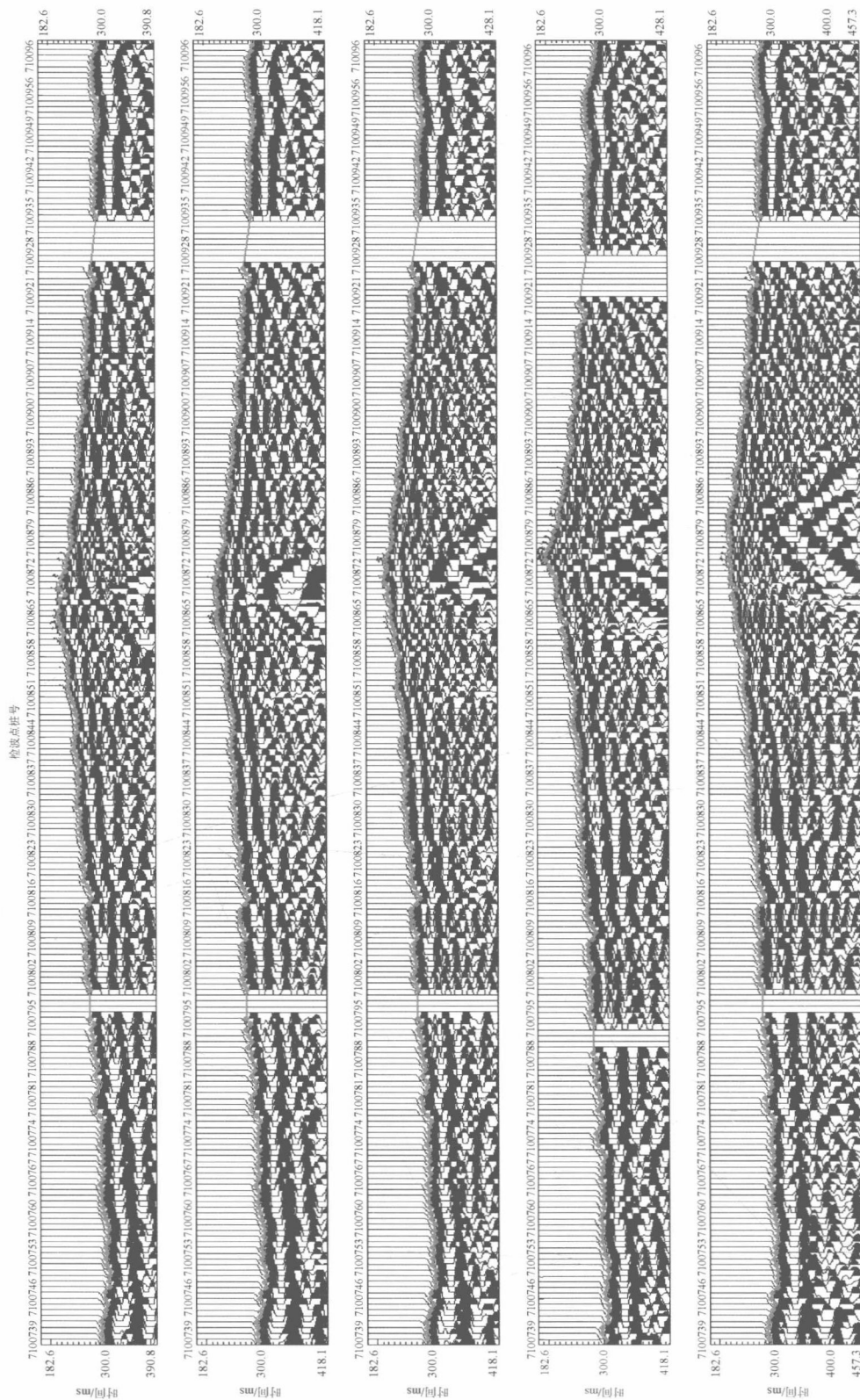
利用初至折射波相邻检波点间时差的相对稳定性，在共检波点（已作线性校正）下查看排列关系（图 2-1（a）），使共检波点特征一目了然，一切有关排列之错，甚至炮位之错将明显地展现出来供我们仔细分析。例如，检波点是否具有 consistency 及两边排列的对称性，可利用共检波点拾取初至的方法，确认炮检关系及排列之间的有效性（图 2-1（b））。图 2-2 就是先用全部的初至确认初至拾取的合理性，若发现问题，再锁定目标、具体检查^[1]。

2.2 初至切除检查

所有记录都必须作初至切除（或“顶切”）检查。这是利用其近炮点、小偏移距道对速度不敏感的特点，查看炮检关系的一种方法。一般情况下，不正确的炮点都能查出来。当全方位采集时（图 2-3），炮点之间仅一道的距离，3D 观测的地面位置对应的大方格中远、近排列炮记录的关系特征如图 2-4 所示。其中，近排列最好辨认（图 2-4（a））；3D 两排列线的中点炮记录差异最不易发现。相邻炮点之间有一道的差距，距离两边排列最远、受近地表影响最大，其分辨能力下降，使错一炮位的时间误差淹没在静校正量中（图 2-4（b）），只有静校正之后才能发现，这时必须重新计算静值和处理其他工作。



(a) 2D共检波点排列检查 (横向为检波点位置, 纵向是炮记录)



(b) myx07线(宽线分排列显示)第3炮线上的ID172炮的1线排列(图中第四炮)显然有错,可明显看出该炮记录的初至特征不是本排列上的
图2-1 共检波点下排列关系图

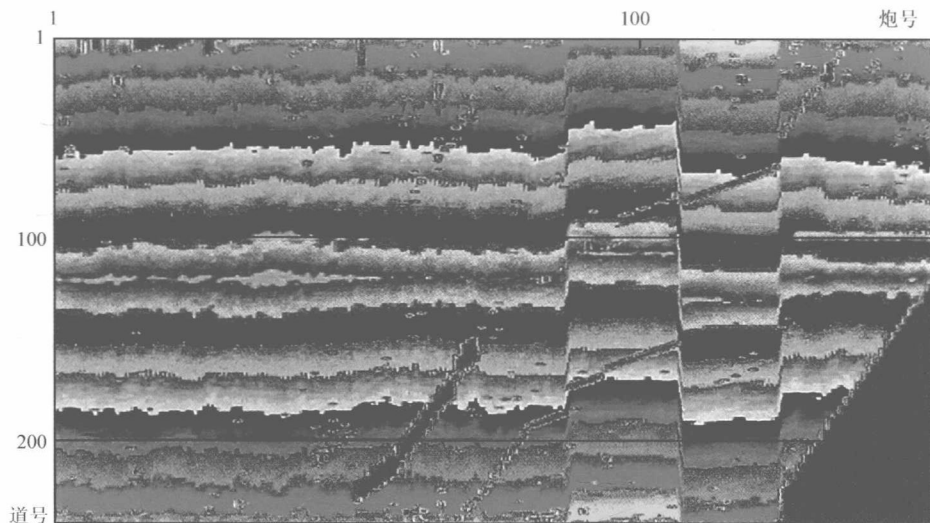


图 2-2 初至拾取质量监控

注：图中显示属性是拾取时间。图中可以看到，100 炮所在位置附近的两列之内的炮记录时间显然有问题

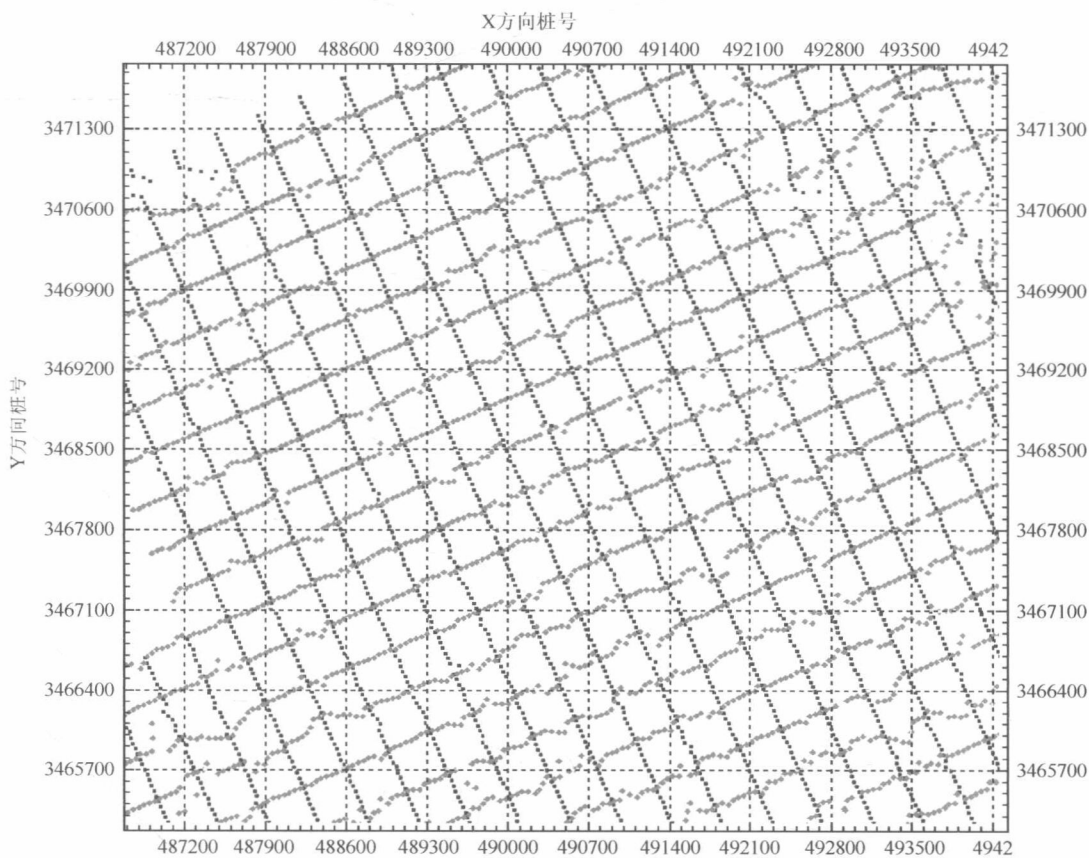


图 2-3 全 3D (炮点距 $d_y=d_x$ 检波点距) 炮、检关系 (红色为炮点、蓝色为检波点)

显然，检波线之间中点的炮点误差最难辨认（检验），一道位置的误差将淹没在近地表静校时差中

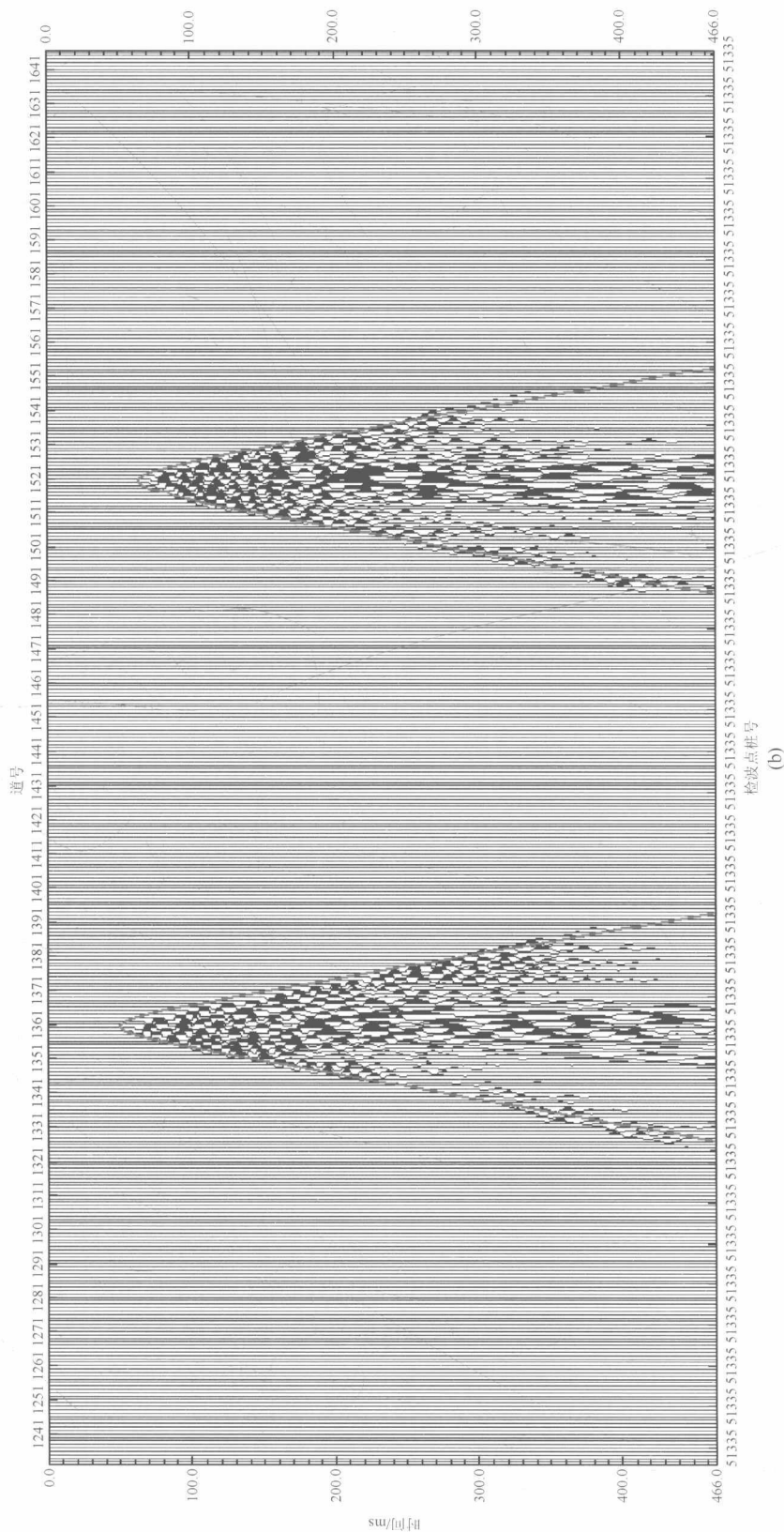


图 2-4 炮记录

(a) 3D 最近、最远 (差异最大) 排列记录; (b) 3D 两排列线中点激发炮记录

3 静校正

静校正的“静”字是相对于动校正的“动”字而说的，通常指其校正量相对于记录时间“变与不变”的特性（如地表一致性）。静校正量的实质就是近地表结构的非均质性对记录时间（有效波反射旅行时）的影响（即有效反射旅行时的畸变量）。近地表结构是地下地质岩体经构造运动与大气圈长期相互作用的结果，也就是近地表低速带所涉及的范围^[2]。静校正的目的就是研究近地表结构对地震波传播时间的影响，并对其时差进行校正。

1. 静校正方法分类

野外静校正——又称为**基准面校正**或**高程静校正**。它是对野外直接观测数据（如高程、井口记录时间、微测井、小折射等）进行整理，换算成静校正量并将其记入道头中，以便后续处理，或直接进行校正的过程。

折射波静校正——以全线（区）约束速度（或近地表平均速度）为基准，以折射理论为依据，以给定的折射波初至时间为约束条件，用扩展的广义互换法统计出近地表速度、厚度及其横向变化，并计算各炮、检点的静校正量。

层析反演静校正——以记录初至时间为约束条件，依据波动理论，借助空间网格方式层析模拟近地表结构，并用近地表结构和记录的初至时间计算长、短波长静校正量。

波动方程基准面校正——在已知近地表模型情况下，用波动方程理论作基准面延拓校正，解决复杂近地表静校正问题。

自动剩余静校正（miser 法）——一个成熟而广泛应用的方法。它利用有效反射波，在共中心点（或共反射点）域内，经动校正、基准面校正后，以道集的每一道与相邻多个道集所形成的模型道、在给定的时窗内相关求时差，并经共炮点和共检波点统计、分解出炮、检点剩余静校正量，并加以校正。

自动剩余静校正（模拟退火、最大能量法）——目前的自动剩余静校正方法中，比较好的大约可分为两类：一个是旅行时拾取法（如前所述 miser 法），另一类就是目标函数最小化法。该法把地表一致性的炮点和检波点静值当作一个目标函数，使该目标函数最小化即可求得炮点和检波点的剩余静校正量。

2. 基本概念

长、短波长（周期）静值——静校正量的横向变化周期所达到的横向距离，长（短）于一个排列长度叫长（短）波长静值。通常，长波长静值影响构造形态，短波长静值影响成像效果。

剩余静校正——使用野外、折射波或层析静校正后，再利用反射波计算静校正量的方法。凡是利用反射波的方法只能计算短波长静值。因为有效波的采集及其静值的统计都是在一个排列范围内得到的，不可能获得大于一个排列长度的静值信息。

初至（时间）——每道地震记录的起跳点信息。其特点为：和反射信息一样，能量随

炮检距和时间的增大而衰减,直至信噪比很低而无法使用;波形特征与激发接收条件有关;初至一般由直达波、折射波和反射波组成,其同相轴随层次、速度而不同,拐点时隐时现;近炮点初至,有时受井口及管道波干扰而时间不准;2D线炮、检点左右摆动大,近炮检距初至没有地表一致性特征。

基准面——由解释统一成图而给定的一个水平参考面。它也是炮、检点总静校正量的参照面。

浮动基准面——由一个排列长度对静值平滑所产生的短波长静值参考面。它把静值分为长、短波长两部分。相对于CMP点的短波长静值是非地表一致性的,这时的浮动基准面又叫CMP基准面;而炮、检点相对于浮动基准面的短波长静值是地表一致性的。通常,速度分析及所选速度都参考浮动基准面。浮动基准面的一个好处是叠前叠加到浮动基准面,再静校正到基准面,这相当于叠前直接叠加到基准面。

中间基准面——根据需要而设置的临时参考面,可以是水平或起伏的。

真地表——一个以炮、检点所在位置(或炮检中点的虚拟面)为参考的动校正(NMO)速度参考面。

替换速度——或叫充填速度。在不用近地表结构或野外静校正的情况下,它相当于近地表的平均速度;有了近地表结构,它应该用高速层顶面速度;小范围内它应该是一个恒定的速度;大范围看,受岩性的横向变化,它应该是变化的,不过其影响误差比较小。

3.1 野外静校正

3.1.1 高程静校正

如图3-1, S=炮点, R=检波点, E_S =炮点高程, E_R =检波点高程, E_D =基准面高程, D_S =炮点井深, D_{SR} =检波点的井深, T_{UH} =相邻炮点内插的检波点上的井口时间, V_r =替换速度。则有

$$T_s = \frac{E_D - (E_S - D_S)}{V_r}, \quad T_r = \frac{E_D - (E_R - D_{SR})}{V_r} - T_{UH}$$

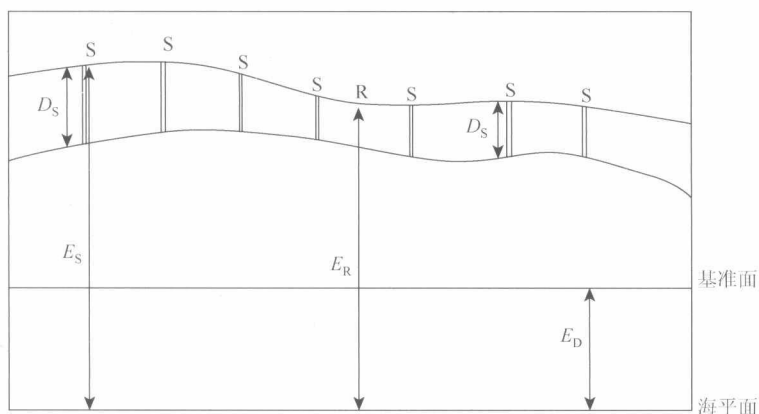


图 3-1 不考虑低降速带下的高程静校正示意图

高程静校正不考虑低降速带情况, 仅在探区近地表起伏不大、低降速带变化较小时应用, 仅对固定基准面和物理点的高程差进行校正^[3]。

其静校正量计算公式为

$$T_r = \frac{E_D - E_W}{V_r} + \frac{E_W - E_G}{v_0} \quad (3-1)$$

$$T_s = \frac{E_D - E_W}{V_r} + \frac{E_W - (E_G + D - H_W)}{v_0} \quad (3-2)$$

式中, T_s 为炮点静校正量; T_r 为检波点静校正量; E_G 、 E_W 和 E_D 分别为地面、高速顶面和基准面高程; D 为炮点偏移高差; H_W 为炮点井深; v_r 为近地表平均速度 (即替换速度); v_0 为基准面以上, 所谓的低降速带速度。

当有了近地表模型后, 通常计算一个物理点 (炮点或检波点) 相对一固定基准面静校正量的公式为^[3]

$$t = -\sum_{i=1}^M \frac{h_i}{v_i} + \frac{E_D - E_G + \sum_{i=1}^M h_i}{V_r} \quad (3-3)$$

式中, h_i 和 v_i 是该点低降速带各层的厚度和速度; M 为低降速带层数。该式表明: 通过剥离低降速带, 填充速度为 V_r 的介质于低降速带底界面和固定基准面间, 可获得近地表一致性的静校正量; 计算出检波点和炮点的静校正量后, 按照观测系统对应关系把静校正量分配到每个地震道上^[3]。

按照建立表层速度模型 (即近地表模型) 方法的差异, 可将静校正方法划分为不同类型。

实际上, 高程静校正只适合不存在低降速带或者低降速带结构横向变化不大的地区。如果有低降速带, 但低降速带横向上变化对静校正量的影响仅是高频时, 可在简单的高程静校正基础上使用细致的剩余静校正。这是因为低降速带的剥离和填充对整个地区的影响基本是一致的, 对叠加效果和构造形态基本没有影响。在采用合适的浮动基准面技术情况下, 对叠加速度基本上没有多大影响^[3, 4]。

在资料处理时, 高程静校正静校正质量控制的最基本标准。在使用其他静校正方法前, 先对地震资料进行高程静校正, 经速度分析获得初叠剖面, 了解地震资料基本情况。在使用其他静校正方法后, 将其叠加结果与高程静校正的叠加结果对比, 判断所用静校正方法对该地区是否适应, 计算静校正量参数的合理性^[3, 4]。

3.1.2 控制点数据线性内插法

模型内插法是早期常用的一种野外静校正方法。它是根据近代沉积的连续性与继承性、相邻界面之间存在一定的相似性的原理, 利用表层调查控制点数据内插表层模型, 计算静校正量的方法。线性内插法的原理如图 3-2 所示。

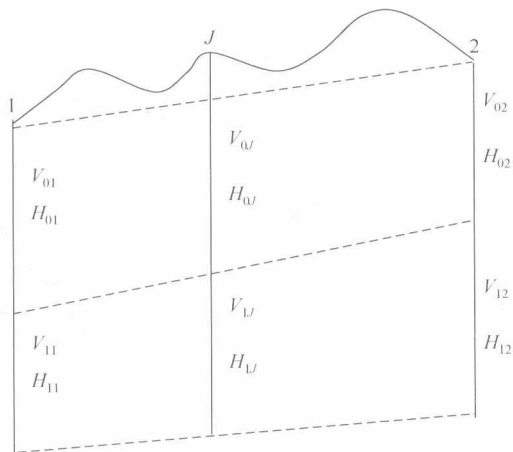


图 3-2 线性内插法原理图

在图 3-2 中, 1 号点与 2 号点位置为静校正控制点的位置, 其低速层与降速层的速度和厚度分别为 V_{01} 、 V_{11} 、 V_{02} 、 V_{12} 和 H_{01} 、 H_{11} 、 H_{02} 、 H_{12} ; J 点表示需要求取静校正值的点位。根据测量资料, 各点的高程和纵横坐标均为已知, 利用 1 号、2 号两个控制点的线性内插办法即可求得 J 点处的低降速层的速度和厚度 (V_{0J} 、 V_{1J} ; H_{0J} 、 H_{1J}), 则 J 点的静校正改正值为

$$T_J = - \left(\frac{HH_{0J}}{V_{0J}} + \frac{HH_{1J}}{V_{1J}} \right) + \frac{E_{DJ} - (E_{GJ} - HH_{0J} - HH_{1J})}{V_r} \quad (3-4)$$

式中, $HH_{0J} = HH_{0J} + S\Delta H$; $HH_{1J} = HH_{1J} + SS\Delta H$; T_J 为 J 点的静校正改正值; E_{DJ} 和 E_{GJ} 分别代表 J 点处地面高程和基准面高程。

当 $S^{\text{②}} + SS = 1$ 时, 表示高速层顶面与近地表起伏无关。

当 $S + SS = 0$ 时, 表示高速层顶面随近地表起伏而变化。

当 $S = 0$ 时, 表示近地表高程起伏与低速层无关; 当 $S \neq 0$ 时, 相关程度随 S 值增大而增大。

当 $SS = 0$ 时, 表示近地表高程起伏与降速层无关; 当 $SS \neq 0$ 时, 相关程度随 SS 值增大而增大。

表示相邻界面之间关系的系数叫层间关系系数, 它是该方法应用中的关键参数。对于表层结构复杂的地区, 利用层间关系系数很难描绘控制点间的界面变化。因此, 解决高频静校正问题的效果往往不好, 但对解决中、长波长静校正问题有一定作用。目前, 该方法的主要用途有: ① 计算结构简单区的静校正量; ② 生成初至约束反演的初始模型; ③ 计算中、长波长静校正量, 与其他方法结合求取最终静校正量。

3.1.3 延迟时法

在山前巨厚砾石区, 可通过研究巨厚砾石厚度与其延迟时的对应关系来求取静校正量。首先, 选择有代表性的、高差较大的砾石地段, 用生产记录的初至折射或专门布设的相遇折射观测系统, 要求追踪的是同一高速折射层, 可用 ABC 法或广义互换法 (GRM)

① SS 表示近地表高程起伏与降速层的相关程度;

② S 表示近地表高程起伏与低速层相关程度。

求得砾石区各接收点的高速折射层的延迟时间；再根据控制点的低降速带厚度结合各点高程求得各接收点的厚度；然后把各点对应的延迟时和厚度用最小二乘法拟合延迟时曲线，利用这条曲线，对工区内任何点只要知道它的地面高程和高速层顶界（中间基准面）高程，两者作差即为该砾石区厚度，有了厚度就可从延迟时曲线上找到对应的延迟时。有了延迟时就可以计算它的静校正改正值，即

$$T = -\frac{T_{dt}}{\cos A_{ci}} + \frac{E_{DM} - E_G + \Delta Z}{V_r} \quad (3-5)$$

式中， T_{dt} 为该点的延迟时； ΔZ 为该点的砾石厚度； E_{DM} 为该点中间基准面高程； A_{ci} 为临界角。

3.1.4 数据库法

在小幅度构造地区施工中，由构造幅度所产生的时差已接近或相当于常规静校正点控制的长波长的误差。这种误差往往在地震剖面上会出现从浅到深同相轴形态一致的所谓“假凸起”和“假凹陷”。要克服上述问题，首先是严格地野外施工，使每个静校正控制点数据精度提高，这是基础；其次是建立一系列数据库，经过数据的数理统计方法剔除异常值，即相当于控制点数据中的高速层在全工区是稳定的、可以连续追踪的。因此，需要建立多种数据库，得到正确的静校正量。

1) 地震导线成果数据库

测量成果是十分重要的原始数据库，利用它可以对测线交点的表层数据进行质量控制和闭合误差检查。这个数据库内容包括测线号、测线拐点桩号及 x 、 y 坐标等。

2) 浮动基准面数据库

对一个连片施工的地区，必须采用统一的浮动基准面，以减少静校正的误差。数据可按一定间隔的控制线逐条输入，之后在计算机内内插，形成网络化数据库。

3) 小折射成果数据库

建立小折射成果数据库的目的是对控制点的表层数据进行平滑，消除异常和随机误差，提高长波长静校正精度。例如，平滑采用半径为 300m 的圆平面拟合时自动剔除异常值；也可采用勾绘等值线图的方法剔除异常和光滑随机误差。

4) 小折射和近地表高程数据库

以测线为单位把工区所有地震测线上小折射和测量高程数据存入数据库，以便检查测线交点的近地表高程和低降速带数据是否闭合。

5) 高速层顶界数据库

当高速层顶界为一稳定潜水面或高速层界面时，为了提高长波长静校正精度，消除小折射数据的随机误差，对小折射控制点求得的高速层顶界高程数据进行平面光滑、内插建成网格化的数据库。这样各控制点的厚度可直接由近地表高程和数据库中高速层顶界高程相减求得，然后可得到静校正量。

6) 静校正数据库

以测线为单位建立静校正数据库，库中包括炮、检点桩号、 x 坐标、 y 坐标、近地表

高程、高速层顶界高程、基准面高程、炮点校正量和接收点校正量等内容。这是重要的野外静校正数据成果，要求记录成光盘文件随磁带、班报等原始资料提交给处理单位。

利用以上数据库信息，可以形成炮、检点的静校正量。它们可以通过高程静校正法加入道头或数据中，或通过空间关系加入道头中作为野外静校正量的一部分。

3.2 折射波静校正

1. 常用的折射波静校正计算方法

- (1) 延迟时法：包括 FARR（见图 3-5）和 ABC 等^[4]；
- (2) 斜率截距法：包括单倾斜和多倾斜折射层^[4]；
- (3) 互换法：包括 GRM、EGRM（见图 3-8~图 3-10）和 ABCD 法等；
- (4) 层析法：包括 GLI、模型反演和数值等效法等；
- (5) 波前重建法：包括加减法、折射波向下延拓法和波前重建法等；
- (6) 时间项法；
- (7) 波数域折射静校正法等。

2. 初至智能拾取技术

因为从折射波静校正到层析静校正都以初至时间为约束条件，其处理工作以初至拾取为先导。所以，这里先介绍一下关于初至拾取技术方面值得一提的“初至智能拾取技术”。

30 年前，各国学者开始研究初至拾取技术并应用，方法很多，但各有其局限性^[5]。特别是在复杂地形和表层条件下，记录的初至自动拾取一直是资料处理人员迫切需求的技术。特别是当前层析静校正广泛应用之际，初至拾取成了资料处理效率的瓶颈。目前处理人员常用人机交互法智能拾取初至，模拟人机交互半自动拾取初至，采用“好初至波”拾取技术、模拟人工辅助线的“架桥”技术、波峰（谷）相位域追踪技术、炸药震源初至波起跳点的相位域估算技术^[5]。其实际应用效果见图 3-3，为最好记录（ Q 值为 74 分）；图 3-4 为最差记录（ Q 值仅为 8 分，通常认为低于 10 分为废炮记录），类似这种记录，在实际生产中需人工逐道拾取初至。

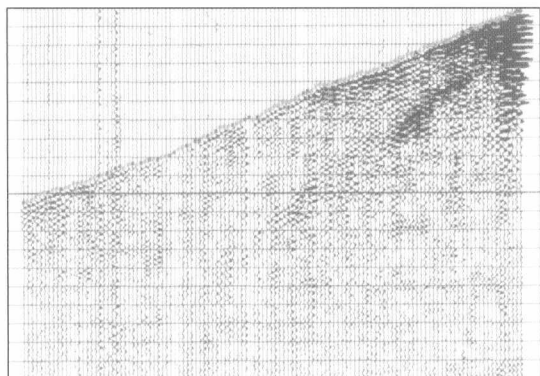


图 3-3 第 202 炮好记录初至 ($Q=74$)

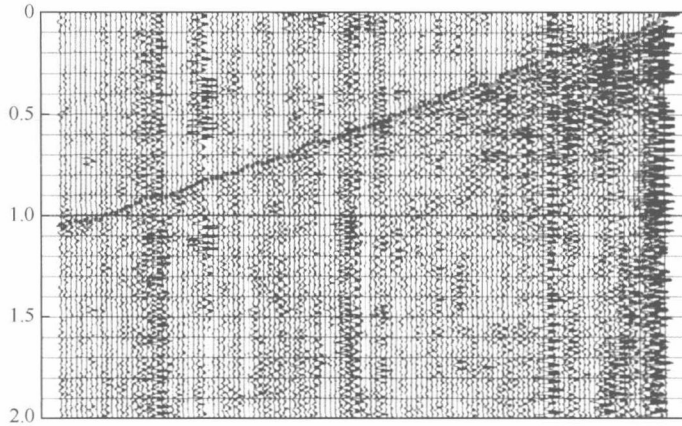


图 3-4 第 160 炮好初至道数百分比 (Q=8), 实为坏炮记录

3.2.1 FARR 静校正

这一方法的原理和步骤为：①对浅层折射用低降速带底界的高速作线性校正，使每炮的折射初至基本上呈水平状态；②开一个时窗，把每个炮集记录初至经线性校正后的波形连续显示拼接在一张图上（图 3-5）；③利用共接收点关系连续拼接相邻炮记录的初至时间，从中分离出各炮点和各接收点的延迟时。

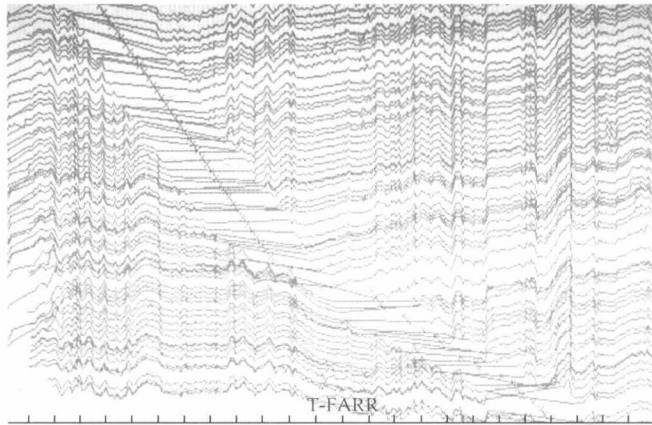


图 3-5 记录初至经线性校正后的波形按共检波点连续排列在一起显示在一张图上 (FARR)

3.2.2 相对折射静校正

相对折射静校正方法 (RRS)，主要是利用生产排列的共炮点和共接收点记录的折射旅行时间，根据静校正控制点的数据来内插求取控制点之间各点的静校正量。它的方法原理和计算步骤如下。

(1) 拾取折射旅行时

选择两个相邻控制点有关的多张记录，其中，求取检波点校正量选用共炮点记录，求

取炮点校正量应选用共接收点记录。下面以共炮点记录为例,说明其原理和基本要求:要求控制点位于记录的正常记录道上,炮点必须在两个控制点之外,以确保控制点之间各道追踪高速折射层。它可以拾取波峰或波谷,不必非要拾取初至。

(2) 折射旅行时线性校正

对每张记录拾取各道折射旅行时间,以控制点的静校正值为准,按炮检距的大小作线性校正,校正后的各道时间就相当于该道的静校正量。如果两个控制点之间追踪了两个高速折射层,则程序会自动判别是否存在追踪两个折射层,如存在就会自动地分段进行线性校正。

在图 3-6 中,1 和 2 代表控制点位置,控制点的静校正值已经求得; J 、 K 及 T 点代表需要取静校正值的点位; S_1 、 S_2 和 S 代表炮点的位置; $v_0(x)$ 和 $v_1(x)$ 代表低降速带空变的速度; v_{r1} 和 v_{r2} 分别代表高速层顶界以下的两个高速折射界面。

首先分析 S_1 炮点记录上(图 3-6 (a))1 号和 2 号控制点之间各道折射旅行时的射线路径。1 号点射线路径是 S_1CDI , 2 号点射线路径是 S_1COQ2 。其中 S_1C 是共同的,在求相对值时是无关系的,两者路径差别在于 CDI 和 $COQ2$ 。从图上明显地看出 $D1$ 和 $Q2$ 路径的旅行时间分别相当于 1 号点和 2 号点的低降速带的静校正量,而剩下 CD 和 COQ 路径差别是与炮检距呈线性关系。因为高速折射界面 v_{r2} 与高速 v_2 顶界基本上平行,故 CD 和 OQ 的路径基本相等,若有变化也应与炮检距呈线性比例关系。剩下路径 CO 是代表沿折射界面滑行的路径,理所当然它是与炮检距呈线性比例关系。再加上拾取折射波波峰变化造成的时差,这种时差也是与炮检距呈线性比例关系。把 1 号点到 2 号点各道折射旅行时用 1、2 号点的静校正量作控制,进行一次线性校正,剩下的时间相当于各道在低降速带的旅行时间,即相当于静校正量。就 J 点而言,线性校正后的时间就相当于 NJ 的射线路径。

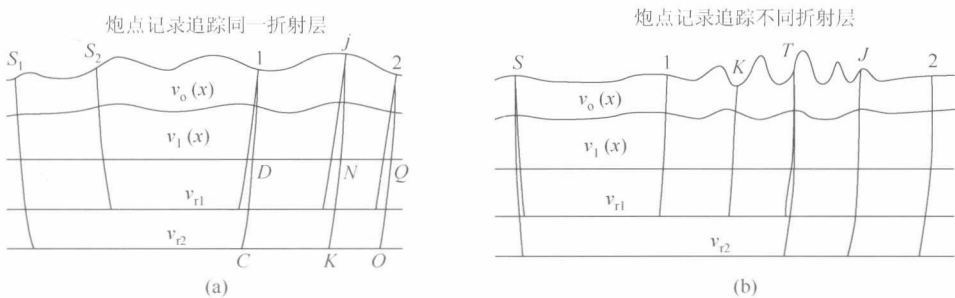


图 3-6 相对折射波静校正原理图

如果两控制点之间追踪了两个折射层(图 3-6 (b)),即 1 号点与 T 点之间追踪了 v_{r1} 折射层,而 T 点与 2 号点之间追踪了 v_{r2} 折射层,这时必须采用分段的线性校正方可求得各点的静校正量。分段线性校正可用最小二乘法拟合而获得。在进行分段线性校正之前必须用一系列办法判别,确信两个控制点之间追踪了两个折射层,方可进行分段线性校正。

每张记录经过上述的线性校正或分段线性校正后,控制点之间各点的静校正量就可计算得到。

(3) 静校正值进行统计平均

为了提高精度，把每个点的静校正值进行数理统计，剔除异常值后，即可求平均值和均方根误差。再用平均值作为各点最终的静校正值，用均方根误差分析计算所得数据的可信程度。

自动剩余静校正方法与 RRS 配合，能较好地实现短波长静校正^[6]。RRS 方法完全适用于弯线施工。RRS 方法不要求追踪真正的初至，也不要求追踪同一个折射层，使用条件不像其他折射静校正方法那么严格，适合于复杂地区。RRS 方法是从控制点数据出发，只要控制点精度高、控制点间隔合理，RRS 方法的静校正值交点是闭合的。

3.2.3 时间项延迟时消去法

时间项延迟时消去法是钱荣钧近年来提出的方法，它适用于二维与三维观测系统。现以三维勘探为例，简单介绍其原理。

对于平面上任意两个炮点和两个接收点（图 3-7），根据基本折射方程，可得到

$$t_1 - t_2 = t_{iR_1} - t_{iR_2} + \frac{(x_1 - x_2)}{v}$$

$$t_3 - t_4 = t_{iR_1} - t_{iR_2} + \frac{(x_3 - x_4)}{v}$$
(3-6)

整理后得

$$v = \frac{(x_1 - x_2) - (x_3 - x_4)}{(t_1 - t_2) - (t_3 - t_4)}$$
(3-7)

式中， x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别表示两点间的距离（图 3-7）； t_{iR_1} 、 t_{iR_2} 分别表示 R_1 、 R_2 点的延迟时； t_1 、 t_2 表示 S_1 到 R_1 与 R_2 的折射波旅行时； t_3 、 t_4 表示 S_2 到 R_1 与 R_2 的折射波旅行时； v 表示折射层速度。

用式（3-7）可计算折射层速度，并且它与相关点的延迟时无关，也不受近地表起伏的影响。该法通过基本折射方程推出，再用于基本折射方程求取延迟时会更合理^[7]。

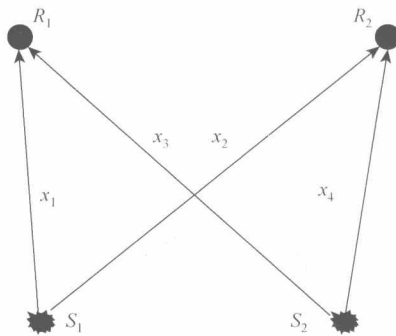


图 3-7 时间项法计算三维速度

对于某一炮，根据折射层速度可以求出炮点、检波点延迟时的总和 $t_{iS_n} + t_{iR_n}$ ，这样就可以得到若干个与炮、检点延迟时有关的方程，求解这个方程组便可得到炮、检点延迟时。