

STRATA 程序的原理

1.0前言

STRATA 程序的基本原理从图 1.1 可容易看出。

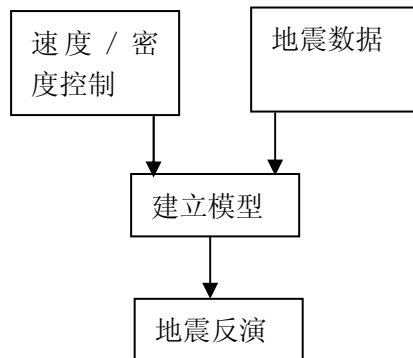


图 1.1 STRATA 基本原理

从包括迭加地震数据和速度/密度信息的两个输入流（以井的测井曲线或 RMS 速度格式），得到一个基本的地下速度模型，然后用这个模型做整个地震数据的反演。虽然这个目的简单，但达到这个目的要产生许多困难。因此，这个程序包括做下面事的算法：

合成地震记录的产生

交互的测井曲线的拉伸和压缩

子波提取

叠后地震处理

地震拾取

用垂直的和横向的插值建立模型

应用几种反演算法反演

这些项目的相互作用在图 1.2 已经表明。

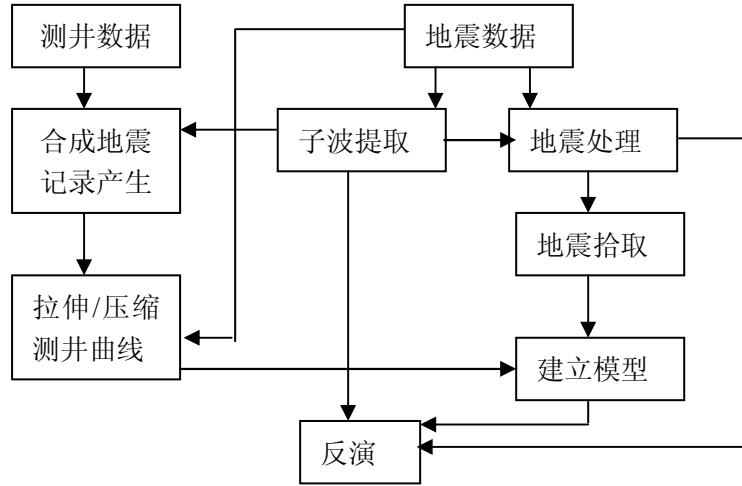


图 1.2 STRATA 各部分的相互关系

程序设计具有高质量的图解方式和用户友好的菜单控制。对于程序运行和特定菜单项目的信息，参考这个用户手册的前面部分。在这一章里我们将叙述用于 STRATA 的主要算法的原理。所研究的问题包括褶积模型、反褶积、反演和属性。假设程序的其它部分，如测井曲线的拉伸和压缩、处理步骤象滤波和 AGC、模型建立用户十分熟悉，或当用这个程序时是显然的。

2.0 褶积模型

$$T(i) = \sum_j r(j)W(i-j+1) + n(i) \quad 2-1$$

地震道基本的褶积模型可写为：

公式中： $r(j)$ = 以时间序列表示的地表零偏移距反射系数；

$W(i)$ = 地震子波，假设固定；

$N(i)$ = 附加的测量噪音。

注意在这个模型里，假设多种被忽略。

反演可认为是给定地震道 $T(i)$ ，求去反射系数 $r(j)$ 的处理。在公

$$R(j) = \frac{I(j) - I(j-1)}{I(i) + I(j-1)} \quad 2-2$$

式 2-1 中，反射系数与地表波阻抗的关系是公式：

$$\text{公式中： } I(i) = \rho(j) V(j)$$

$$\rho = \text{密度}$$

$$V = P \text{ 波速度}$$

在第 5 章里我们将看到，反演的目的是从地震道估算地表的速度。显然，首先需要从褶积模型中提取一个估算的反射系数，然后研究在第 4 章论述的相关的反褶积处理。在考虑反褶积或反演前，让我们更详细的看看褶积模型的两个主要的组成部分，子波和反射系数。

2.1 反射系数

当震源的能量通过爆炸或一个座板突然碰撞地面释放时，这种能量以弹性波通过地层传播。

人们熟悉的最简单类型的波是压缩波（纵波），象声音一种声波干扰。岩石允许声波通过的性能是通过岩石纵波的速度和密度产生的声波阻抗给定的（类似于电路里电阻的原理）。同预期的一样，岩石越强，声波阻抗越高。例如，一般压实砂岩具有比泥岩高声波阻抗（孔隙度也影响速度：孔隙度越高，速度越低）。

每当地震反射出现就有声波阻抗的改变。如果我们研究两个不同声波阻抗的层之间地层走向边界的声波幅度，反射幅度可记为上述的公式 2-2。

公式 2-2 表明反射系数可正可负，它取决于 $I(j-1)$ 或 $I(j)$ 比较大，但它的绝对值大小不超过 1。对下行波从上地层走向边界的上述分析，

上行波的反射系数的确相对于下行波的反射系数是负的。

显然，不是所有的入射幅度都能反射（虽然海上记录在空气-水界

$$T(j) = 1 - r(j) = \frac{2I(j-1)}{I(j) + I(j-1)} \quad 2-3$$

面这种情况，几乎反射系数接近 1)。传播幅度的大小入射幅度和反射幅度之间是不同的，或：

注意如果 r 为负，T 大于 1，也就大于入射幅度！解决这种明显矛盾的方法只有通过物理系统记录能量被保存得知，而不是幅度。能量

$$\Sigma^{5\text{max}} = (1 - r(j))(1 + r(j)) = 1 - r^2(j) \quad 2-4$$

与下行和上行的路径有关。对于下行路径，我们仅看 r 符号的变化。

因此，总的透射系数可记为：

我们可看到，公式 2-4 告诉我们总的透射幅度总是小于 1。注意，随层数的增加透射损失的影响也比较大。总的影响可表示为：

$$T_{total} = \prod_{j=1}^N (1 - r(j)^2) = (1 - r_{AV}^2)^N \quad 2-5$$

公式中：N=层数；

$r(j)$ =第 j 个界面的反射系数；

r_{AV} =平均反射系数。

也就是说，总的透射损失是透射通过我们感兴趣的每层界面上面的损失产生的。公式 2-5 也认为，如果我们用平均反射系数替代各个反射系数，透射影响近似等于两种图景透射系数 N 次幂。为了获得影响的设想，假设是 100 层叠加（采样率 2ms，相当于 200ms）。如果平均反射系数是 0.1，透射比例系数是 0.366。然而，如果平均反射系

数是 0.05，总的比例仅仅是 0.779。

重点注意，仅在 P 波是垂直入射界面时公式 2-2 到 2-5 成立。非垂直入射时，波型转换发生，产生反射和透射的横波。测定岩性地震学的精确量度时，为了推测这个影响是非常重要的。对于叠后的情况，我们假设公式 2-2 精确地预测反射振幅。

2.2 地震子波

地震数据记录的第一步是震源图象的产生。陆地上，两种最普遍的震源是炸药——通常比较深的埋藏，和可控震源——长时间延续振动地面震源。海上记录，空气枪是最普遍的震源。如果我们知道震源的准确类型，我们可以用反褶积处理反演。参考确定性反褶积。然而，我们常常没有这种记录信息，必须用统计反褶积技术估计震源类型。（在 STRATA 中包括了这两种反褶积类型）。

子波通过振幅和相位谱定义。相位谱的类型我们认为是零相位、常数相位、最小相位、和非最小相位。

为了了解零相位和常数相位子波的原理，不同的振幅、频率和所有零相位和常数相位（即 90° ）正弦波的数简单地加起。然而，最小相位不是作为简单的原理去理解，有许多不同的描述方法。最简单的是一种直观的方法，时间计算起点前最小相位子波的情况不存在（数学上我们说子波是由某种原因引起的），能量的大部分集中在波前。实地上，术语“最小相位”指的是所有具有相同振幅和不同相位谱的因果子波的事实，唯一的它的相位谱最接近零的是最小相位子波。

原来子波相位大量的有效信息可通过应用简单两点子波获得

$$W_1 = (2, 1) \quad 2-6$$

$$W_2 = (1, 2) \quad 2-7$$

子波 W_1 是最小相位，而子波 W_2 是非最小相位。事实上，把子波 W_2 称为最大相位。让我们现在推导有关这两个子波振幅和相位谱的信息。

首先，设想该公式 2-6 的子波 Z 变换：

$$W(Z) = 2 + Z \quad 2-8$$

$$Z = e^{-j\omega t} = \cos(\omega t) - j \sin(\omega t) \quad 2-9$$

现在，作代换

公式中 $j = \sqrt{-1}$

$$\omega = 2\pi f$$

注意这是合理的代换，由于 2-9 复指数包含余弦和正弦函数，是傅立叶变换基本原理。

$$W(e^{-j\omega t}) = 2 + \cos(\omega t) - j \sin(\omega t) = \text{Re} - j \text{Im} \quad 2-10$$

现在把公式 2-9 代入公式 2-8，我们就得到子波的傅立叶变换：

公式中 $\text{Re} =$ 傅立叶变换的实数部分 $= 2 + \cos(\omega t)$

$\text{Im} =$ 傅立叶变换的虚数部分 $= \sin(\omega t)$

为了从实数部分和虚数部分得到傅立叶变换的振幅和相位谱，我

$$W(\omega) = |W(\omega)| e^{j\theta(f)} \quad 2-11$$

们以下面的方法从直角坐标变换到极坐标：

公式中 $|W(\omega)| = W$ 的振幅谱

$$= (\text{Re}^2 + \text{Im}^2)^{1/2} = [4 + 4\cos(\omega t) + \cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t)]^{1/2}$$

$$= [5 + 4\cos(\omega t)]^{1/2}$$

$$= \arctan[\text{Im} / \text{Re}] = \arctan[\sin(\omega t) / (2 + \cos(\omega t))]$$

$\theta(f) = W$ 的相位谱

用类似的方法， $W_2 Z$ 的变换和傅立叶变换可以用下式表示：

$$W_2(Z) = 1 + 2Z \quad 2-12$$

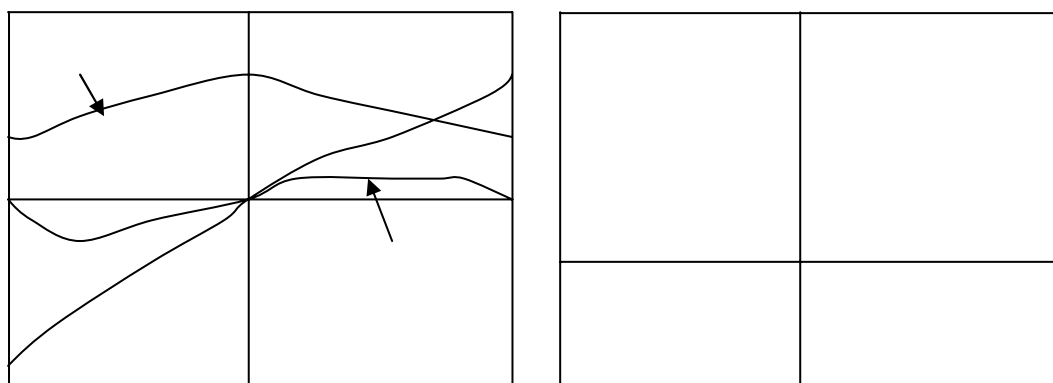
$$W_2(\omega) = |W_2(\omega)| e^{j\phi_2(\omega)} \quad 2-13$$

$$|W_2(\omega)| = [5 + 4\cos(\omega t)]^{1/2}$$

$$\phi_2(\omega) = -\arctan[2\sin(\omega t) / (1 + 2\cos(\omega t))]$$

公式中；

W_1 和 W_2 振幅和相位曲线图如图 2.1 所示



注意两种信号的振幅谱是相同的, 而它们的相位谱不同, 图 2.1 没有, 子波 W_1 具有最小相位谱。子波 W_2 是非最小相位谱。事实上, 子波 W_2 具有最大相位的特性。

$$A(Z) = a_0 + a_1 Z + a_2 Z^2 \quad 2-14$$

首先，考虑三点子波的 Z 变换：

傅立叶变换可记为：

$$\begin{aligned} A(\omega) &= a_0 + a_1 e^{-j\omega} + a_2 e^{-2j\omega} \\ &= (a_0 + a_1 \cos(\omega) + a_2 \cos(2\omega)) - j(a_1 \sin(\omega) + a_2 \sin(2\omega)) \end{aligned} \quad 2-15$$

振幅和相位谱可用前面导出的关系计算。

让我们通过三种可能的组合旋转子波 W_1 和 W_2 产生三点子波：

$$W_3 = W_1 * W_1 = (4, 4, 1) \quad 2-16$$

$$W_4 = W_1 * W_2 = (2, 5, 2) \quad 2-17$$

$$W_5 = W_2 * W_2 = (1, 4, 4) \quad 2-18$$

这三个子波的振幅谱如图 2.2 顶部所示，是相同的。当我们认识到子波 W_1 和 W_2 的振幅谱是相同的这有意义。相位谱如图 2.2 底部所示。注意子波 W_3 应该是最小相位，因为它是两个最小相位子波的褶积。同样，子波 W_5 应该是最大相位，因为它是两个最大相位子波的褶积。但子波 W_4 是最小和最大相位子波褶积它怎么样呢？这称之为混和相位子波。从图 2.2 可以看出，混和相位子波的相位谱在最小和最大相位子波的相位谱之间。

叙述的原理仅概括出了 N 脉冲子波。如子波可通过 $N-1$ 2-点子波褶积，这些子波的每一个都具有形式：

$$W_i = (a_i, b_i) \quad 2-19$$

如果 $a > b$ 任何 2-脉冲子波是最小相位，如果 $a < b$ 是最大相位（如果 $a = b$ ，我们得到位置称为单位园上的原点，可能引起问题，碰巧，

很少出现)。下面三种叙述可能产生：

- 1) 如果所有 2-脉冲子波都是最小相位，所得到的 N-脉冲子波是最小相位；
- 2) 如果所有 2-脉冲子波都是最大相位，所得到的 N-脉冲子波是最大相位；
- 3) 如果 2-脉冲子波是最小和最大相位组合，所得到的 N-脉冲子波是混合相位；。

反褶积可认为是一个两步处理。第一；我们寻找子波。第二，我们通过应用其反演除去子波。再提到反褶积部分的注解之前，让我们提一个问题：任何子波都有准确的反演吗？我们将通过研究公式 2-6 和 2-6 的最小相位 2-点子波试着回答的这个问题。通过公式 2-8 的多项式除法子波的反演可记为：

$$W_t^{-1} = f = (1/2, -1/4, 1/8, -1/16, \dots) \quad 2-20$$

也就是说，子波具有无限多的反演，为了应用子波反演，因此，必须在一些点上截取。怎样大小的井可做反演运算，我们可比较最后输出的理想结果的脉冲。让我们首先考虑截取长度为 2 的反演滤波器。

$$W_t f_t = (2, 1) * (1/2, -1/4) = (1, 0, -1/4) \quad 2-21$$

应用一个长为 3 的反演滤波器长，我们得到

$$W_t f_t = (2, 1) * (1/2, -1/4, 1/8) = (1, 0, 0, -1/8) \quad 2-22$$

注意最后的样点总有一个错误项。虽然算子的长度越长，输出错误越小，但对于无限长的算子仅趋于零。当我们寻找时，精确的反演

总不是最好的。再第三章里，我们将研究解反演的最小二乘方法。

2.0子波提取

为了完成反演 STRATA 需要有关地震子波的信息。在地震处理中子波的问题是一个复杂的问题，是现行研究的普遍领域。虽然已产生了许多子波提取方法，但下面做出了概括的叙述：

1. 在频率域里，我们可认为子波提取的问题由两部分组成：

确定振幅谱；

确定相位谱。

这两部分，确定相位谱要困难的多，而且是存在于反演中的主要的错误源。

2. 子波提取方法分成三个主要的类型：

a) 完全确定性：这意味着直接应用地表接受器和其它方法测量子波：

b) 纯统计：这意味着仅从地震数据中确定子波。这些方法确定可靠的相位谱往往有困难。

c) 应用测井：这意味着除了地震数据还要用测井信息。原理上，在井位置这可提供准确的相位信息问题是这种方法决定性的取决于测井和地震之间的好的联系。特别是，把深度采样的测井转换到双程旅行时的深-时转换可能引起模糊不清降低结果。

3. 作为旅行时的函数子波从一道到另一道可能改变。这意味着每

个地震剖面子波处理过程见确定一大组子波。实际上，设法确定可变子波比数据可以分解可引起更多的误差。实际和有用的解决办法是整个剖面提取一个单独的平均子波。

下面部分叙述在 STRATA 中子波提取能力。

3.1 统计子波提取

在 STRATA 中统计子波提取方法仅应用地震道提取子波。这个方法不计算相位谱单必须由用户提供一个独立的参数。相位谱选择上：

- a) 等于某个数的常相位（即 45^0 ）。
- b) 最小相位。

如下所示应用地震道的次自相关计算振幅谱，对每一道分析：

- 1) 提取分析时窗；
- 2) 时窗的开始和结束斜坡，斜坡长度适当小（10 样点，时窗的 $1/4$ ）；
- 3) 计算数据时窗的自相关。自相关长度等于期望子波长度的二分之一；
- 4) 计算自相关的振幅谱；
- 5) 获得自相关谱的平方根，这接近子波的振幅谱；
- 6) 加期望的相位；
- 7) 做反快速傅立叶变换产生子波；
- 8) 在分析时窗里加从其它道计算的子波。

注意在这个过程中，在确定道振幅谱上完成的有效滤波中子波长

度是关键性的参数。当增加子波长度，子波谱接近数据时窗。

3.2 应用全测井子波提取

STRATA 应用的子波提取方法的第二个类型需要利用测井。STRATA 以两种方法应用。一种方法是应用测井确定子波的全振幅和相位谱。第二种方法利用测井应用与上面叙述的统计方法结合仅确定常相位。

首先在子波提取菜单上选择选项全子波应用测井引用测井方法。这个方法需要小对每道有用的密度和声波测井分析。当然，由于测井仅是可获得的独立点，STRATA 提供了漏侧测井以相同的方法通过外推和插值建立反演模型。着意味着在子波提取中把测井校正的影响（拉伸）和数据拾取引入测井应用。着允许应用井位置周围的道。

对每道分析：

- 1) 提取声波、密度、地震数据分析时窗；
- 2) 声波和密度相乘得到波阻抗。从波阻抗中计算反射系数；
- 3) 时窗的开始和结束反射系数序列和地震数据的斜坡，斜坡长度适当小（10 样点，时窗的 1/4）；
- 4) 计算最小平方整形滤波器 W，解决下列问题：

$$\text{TRACE} = W * \text{REFLECTIVITY}$$

由于子波的样点数一般小于道收据的样点数，也就是相当于应用最小平方体解超定的线性系统

- 5) 应用希尔伯特变换计算子波的振幅包络。如果包络的波峰偏离了时间零，改变测井和地震道之间的互相关，应用第四步重新

计算子波。相加之前确保测井和地震道之间随机时间偏移一道一道校正。

6) 该子波与其它子波相加计算另外一道。

7) 如下所述通过滤除高频成分稳定计算子波：对于振幅小于最大振幅 $1/4$ 的原始数据时窗谱里的每个频率值。零对应提取子波的成分。

全子波提取方法具有计算精确子波的优点，但也具有测井和地震数据之间联系非常敏感的缺点。实际上，时间调整或拉伸错可能引起迅速降低，表征为子波高频丢失、相位谱畸变、不实际的旁瓣产生。

3.3 应用测井常相位子波提取

STRATA 中子波提取的第三种类型是一二两种类型的混合，该方法通过选择选件：**应用常相位测井引用**。在该方法中，仅应用地震数据计算振幅谱，在 3.1 节中已正确描述。相位谱假定为一个通过解一个自由度（平均相位）的最小平方整型滤波器而确定的常数。反射系数应用测井确定单个常相位数。因此，该方法在井联系不完善的情况下达到最稳固。

4.0 反褶积

4.1 维纳—莱文森整型滤波器

反褶积的目的是寻找把输入子波转换成某种期望的输出型状的滤波器。虽然该期望输出常常是一个单脉冲，我们可设定为我们期望的任何。该问题典型的解法是假定在期望输出和实际输出之间最小二乘

拟合。这称为维纳—莱文森整型滤波器。为了简化事情，我们在两点子波上完成我们的分析然后假设一般情况成立。

首先，让

$$W_t = (W_0, W_1) \quad (4-1)$$

为子波，

$$f_t = (f_0, f_1) \quad (4-2)$$

为子波滤波器，和

$$d_t = (d_0, d_1, d_2, \dots) \quad (4-3)$$

为期望结果。

然后，我们看

$$x_t = f_t * W_t = (f_0 W_0, f_1 W_0 + f_0 W_1, f_1 W_1) \quad (4-4)$$

是实际结果。

现在，最小二乘方方法告诉我们期望和实际的结果之间差的平方

$$\frac{dI}{df_i} = 0 \quad (4-5)$$

和必须为最小值。为了寻找最小值，我们对滤波器值和设置结果平方差求导为零。也就是：

公式中：

$$\begin{aligned} I &= e_0^2 + e_1^2 + E_2^2 \\ e_t &= (d_0 - x_0, d_1 - x_1, d_2 - x_2) \\ I &= (d_0 - f_0 w_0)^2 + (d_1 - f_1 w_0 - f_0 w_1)^2 + (d_2 - f_1 w_1)^2 \end{aligned} \quad (4-6)$$

把公式 4-4 和 4-3 代入 4-5 得到：

意味着：

$$\frac{dI}{df_0} = -2w_0(d_0 - f_0 w_0) - 2w_1(d_1 - f_1 w_0 - f_0 w_1) = 0 \quad (4-7)$$

$$\frac{dI}{df_1} = -2w_0(d_1 - f_1 w_0 - f_0 w_1) - 2w_1(1 - f_1 w_1) = 0 \quad (4-8)$$

$$\begin{bmatrix} w_0^2 + w_1^2 & w_1 w_0 \\ w_0 w_1 & w_0^2 + w_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 w_0 + d_1 w_1 \\ d_1 w_0 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

注意公式 4-7 和 4-8 代表两个有两个未知数， f_0 和 f_1 的线性方程，以矩阵的形式可表示为：

现在，子波 w_t 的自相关可写为：

同样，期望的结果和子波的互相关是：

$$\phi_{ww} = (\phi_{ww}(-1), \phi_{ww}(0), \phi_{ww}(+1)) \quad (4-10)$$

$$\phi_{dw} = (\phi_{dw}(-1), \phi_{dw}(0), \phi_{dw}(+1)) \quad (4-11)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ww}(-1) & \phi_{ww}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{dw}(0) \\ \phi_{dw}(+1) \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

公式 4-10 和 4-11 表明公式 4-9 可重新表示为：

归纳 N-点子波的情况给出维纳莱文森方程：

$$Rf=g \quad (4-13)$$

公式中：R=输入的自相关矩阵；

F=期望的滤波器；

g =期望输出与输入的互相关。

解该方程：

$$f=R^{-1}g \quad (4-14)$$

公式中： R^{-1} =R 的逆矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$$

注意：为了解 2×2 个问题，应该注意矩阵：

通过下式给出矩阵的逆:

$$A = \frac{1}{ad - bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

4.2 最小相位统计反褶积 (脉冲反褶积)

给出的公式是很一般的, 且有许多应用。这种应用的一种是脉冲

$$W_{\min} = \sqrt{(2,1)} \quad (4-15)$$

反褶积。对于最小相位子波让我们看看脉冲反褶积。

在这种情况下, 期望结果是一个在原点的尖脉冲, 或

$$D_t = (1, 0, 0) \quad (4-16)$$

$$\begin{array}{l} \downarrow \text{零延迟} \\ \phi_{ww} = (2, 5, 2) \quad (4-17) \\ \phi_{dw} = (1, 2, 0) \quad (4-18) \end{array}$$

然后我们看出:

$$\begin{bmatrix} 5 & 2 \\ 2 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

我们获得维纳莱—文森方程的下列格式:

解为:

$$\begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = 1/21 \begin{bmatrix} 5 & -2 \\ -2 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10/21 \\ -4/21 \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

$$W_{\min} * f_t = (2,1) * (10/21, -4/21) = (20/21, 2/21, -4/21) \quad (4-21)$$

应用反褶积滤波器, 我们看出:

但如果我们选择了最大相位子波反褶那么:

$$W_{\max} = (1, 2) \quad (4-22)$$

$$\phi_{ww} = (2, 5, 2) \quad (4-23)$$

在这种情况下，自相关是：

与最小相位子波自相关相同。由下式给出互相关：

$$g_t = (1, 0) \quad (4-24)$$

$$\begin{bmatrix} 5 & 5 \\ 2 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

在最小相位的情况下，是一种互相关的简单换算形式。因此最终的维纳方程可写为：

解为：

$$\begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = 1/21 \begin{bmatrix} 5 & -2 \\ -2 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5/21 \\ -2/21 \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

$$W_{\max} * f_t = (1, 2) * (5/21, -2/21) = (5/21, 8/21, -4/21) \quad (4-27)$$

应用滤波器，我们得到：

根本不是尖脉冲。

总之，如果应用了 STRATA 的最小相位统计反褶积，你必须认识到最好在最小位上工作。

在 STRATA 中应用零相位统计反褶积方法与按推导出的反子波（算子）的振幅谱的方法的最小相位选件相同。因此，在应用之前反褶积算子设置为零。

4.3 反褶积应用情况

在上述两节里，我们已看到最小相位和零相位统计反褶积的理论方面。我们应用非常简单的 2—点子波的例子。因此当应用真实数据

时 工作原理怎样？

对于真实的数据，我们假设公式 2-1 的地震道模型成立。也就是说，我们只知道地震道而不知道反射系数或单个的子波。因此，可给出统计反褶积的主要假设：

地震道的自相关相当于子波的自相关。

你可看到该假设在实际中不完全正确。同样地，由于获得自相关函数，我们丢失了有关子波相位的所有信息。因此，我们必须做最小相位或零相位的假设。

如果我们接受子波的自相关和地震道的自相关是相同的前提，为了优化反褶积我们仍有可用的三个参数。

1. 算子长度（相当于自相关本身的长度）；
2. 控制反褶积灵敏度的预白噪系数；
3. 设置用于自相关的时窗的长度和位置。

在 STRATA 程序中算子长度的缺省值是 60ms，应用标准的地震数据证明是合理的值。如果输入数据分辨率很低，而你希望结果的有效高频加强，你也许要附带有一个比较高的数。如果数据已经是高分辨率的，你可以去掉一比较低的数。用不同的算子长度做几个测试是可行的。

本质上，预白噪是计算逆算子之前加到数据振幅谱（时间域预白噪实际上是加到零延迟自相关系数）上噪音级。显然，如果不加预白噪可获得最好的结果。因此，某些预白噪必须做稳定化运算。在程序里，我们建议的 1%的预白噪。

最后，设计时窗在反褶积结果的质量上是一个重要的系数。人们凭经验方法说指定时窗至少 10 的时间算子长度。把时窗定在重要的区域上是关键，尤其除去数据的噪音部分。

必须强调反褶积充其量不过是一种技术，而不是一种科学。开始整个反褶积之前在数据体的一小块上测试不同参数的组合总是可行的。

4.4 双边的脉冲反褶积

注意脉冲反褶积的结果是时间计算起点的脉冲和在延迟时处的误差。我们可通过做比较长的算子延伸误差。为什么期望的结果在某个大于零的时刻没有脉冲呢？这具有使误差项更对称的作用。例如，让：

$$d_t = (0, 1, 0) \quad (4-28)$$

$$\begin{bmatrix} 5 & 2 \\ 2 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (4-29)$$

因此维纳-莱文森方程成为：

解为：

应用滤波器得出反褶积的解：

$$\begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix} = 1/21 \begin{bmatrix} 5 & -2 \\ -2 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/21 \\ 8/21 \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

$$\hat{w}_t = w_t * f_t = (2/21, 17/21, 8/21) \quad (4-31)$$

这称为双边脉冲反褶积。虽然结果不完全对称，但比第一个解更对称。因此，以这种方法，输入子波必须已知，单边脉冲反褶积不是这种情况。

在 STRATA 程序中方法描述仅用于全反的确定性反褶积。如果选择仅相移选项，仅应用子波的反相位谱。

5.0 反演

叠后地震反演是分析迭加地震道和设法重建地下的速度和波阻抗

$$T(i) = \sum_j r(j)W(i-j+1)n(i) \quad (5-1)$$

结构。基于 1-D 褶积模型的反演主要描写为：

公式中： $r(j)$ =以时间表示的地下零偏移距反射系数；

$W(i)$ =地震子波，假设为常数；

$N(i)$ =附加的测量噪音。

注意在该模型里假设多次波忽略不计。

反演可认为是给定地震 $T(i)$ 确定反射系数 $r(j)$ 的过程。由于反射

$$r(j) = \frac{I(j) - I(j-1)}{I(j) + I(j-1)} \quad (5-2)$$

系数与一系列地层的波阻抗有关：

$$I(j) = \rho(j)v(j)$$

公式中：

如第一节所述，反演同样可确定地下的波阻抗。

在 STRATA 中应用了两种反演方法，它们主要的不同在于地震子波 W 的处理和与反演相关的不唯一性问题的处理。在下节里详细的描述它们。

5.1 限带反演

限带反演是研制出的迭后反演方法的第一种类型。在原理上该技术很简单。如果我们假设地震道代表地层反射系数的近似值，因此该反射系数可转化成声波阻抗。由于地震道是限带的，该过程似乎不容

易。缺少反射系数谱的低截频（0-10 赫兹范围）和高截频（80-250 赫兹范围）。复杂化该问题可能发生地震道相位误差和噪音混杂。

在 STRATA 程序中，限带反演输出的结果包括三步骤：

1. 应用声波测井或 RMS 速度，或两种的结合得到频速度模型。
2. 应用公式 5-2 的逆递归反演方法反演地震道。这给出声波阻抗或速度的中间频率带（大约为 10-60 赫兹）。
3. 低频和中频信息结合计算限带反演结果。

现在让我们详细地讨论以上各点每一个。模型信息是由地震数据上拾取的主要反射和测线上选择的点处提供的详细的速度信息。然后这些速度函数后控制点插值产生反演的每道每个样点的速度值。拾取的同相轴可引导插值。如果没有拾取同相轴，在每个时间样点的插值旧不是线性插值。

一旦定义了速度模型，它代表整个带宽，但也许块状的速度模型，。首先限带反演参数是一个约束滤波器频率。因为这个参数出现在递归反演中，我们希望加速度模型的低频成分到来自地震的中频模型中。实际上，该参数在低和中之间有区分。用 10 赫兹的缺省值，因为标准的地震数据不包含低于 10 赫兹的能量。

$$I(j) = I(j-1) \left[\frac{1+r(j)}{1-r(j)} \right] \quad (5-3)$$

反演过程第二步包括转化地震道产生中频波段，应用公式：

实际应用这个公式之前，换算地震振幅降低反射系数约为+/-0.1 大小是必要的。再限带反演中，这是通过计算 RMS 或地震道最大样点

的大小和确定换算的乘数使数降到用户规定的值完成。

当转换地震道时遇到的另一个问题是转换值是声波阻抗而不是速

$$V = A\rho^B \quad (5-4)$$

度。因此我们必要应用某个关系式换算声波阻抗回到速度。关系式选择是公式：

公式中 A 和 B 是常数值。如果没有提供密度测井，与伽得纳公式一起应用值 A=109 和 B=4。如果提供了密度，做回归分析拟合最好值 A 和 B。在公式 5-4 里应用这些值。转换导出波阻抗到速度。

处理时间可是主要考虑的事。因此我们在整个时窗上完成反演。然而如果每个递归反演的起始点是不同的有效采样值这可导致复杂化。这可能产生最终反演结果的条带影响，因为在整个速度值从一道到另一道不同的整体移动。在 STRATA 程序里，在反演之前这个影响通过在道的前面应用一个余弦斜坡而减到最小。

最后，完整的反演包括附加低频模型值到中频递归反演值中。

5.2 块状反演

所谓 STRATA 的块状反演算法，由于它能产生一系列块状伪速度测井。块的平均大小由用户确定。单一般大于输入数据的采样率。因此，块状伪速度测井具有比从井信息计算的声波或密度粗糙的分辨率。

假设我们处理的地层是 1-D，由 N 层组成的。对我们来说三个主要的参数是由下给出的每层的厚度、速度和密度：

$d(i)$ =第 i 层的厚度；

$V(i)$ = 第 i 层的速度；

$\rho(i)$ = 第 i 层的密度。

公式中： $I=1, N$

我们可把厚度 d 参数转换为相应的时间参数：

$$t(i) = \text{到达第 } i \text{ 层的双程旅行时} = 2d(i) / V(i)$$

现在假设时间 $t(i)$ 已经知道。他们不必相等，也就是不同层可有不同的厚度。注意这些厚度与测量数据的采样率不需有任何特定的关系。

$$\tau(i) = \sum_{j=1}^{i-1} t(j), \quad I=1, N \quad (5-5)$$

给出更合适的时间参数：

=从地表到 i 层顶再反回的双程旅行时。

$\tau(i)$ 是在零偏移距地震道上第 i 层顶的绝对观测时间。

$$T(i) = \sum_{j=1}^N r(j)W(i - \tau(j) + 1) + n(i) \quad (5-6)$$

因此，1-D 模型地震道的度量可以通过下式给定：

在这个公式中， i 代表在度量振幅 $T(i)$ 处的样点数，假设 $\tau(j)$ 为以样点数表示的增量。

实际上公式 5-6 是一组方程。如果地震道的样点数是 NSAMP，那么公式 5-6 是 NSAMP 个方程。另一方面，相对于层数 N 的 $r(j)$ 数不是已知的。根据线性代数原理，有以下几种情况：

1. $N < \text{NSAMP}$:

如果层数比样点数少，出现这种情况。如果层的平均大小大于单个时间样点，这是正常情况。在这种情况下，方程比未知数

多,解这个方程组通常的方法是下面描述的最小平方最佳优化。

2. $N > NSAMP$:

如果层数大于地震道的时间数,出现这种情况。如果没有更多已知的信息,该方程无解的。

3. $N = NSAMP$

地震道的层数正好等于采样数,出现这种情况。在原理上,是可以解的。但不稳定,特别对噪音 $n(i)$ 极其敏感。

如果对模型有一些初始假设和估计,可以用反射系数

$$M(i) = \sum_{j=1}^N r_0(j)W(i - \tau(j) + 1) \quad (5-7)$$

$r_0(j)$, $j=1, N$, 因此可以用下式计算模型道:

该模型道不同于原始地震道 T , 这是由以下两个原因导致的。其一: 反射系数 r_0 同实际 r 不完全相同; 其二: 原始地震道包含了测量噪音 $n(i)$ 。对于 $r_0(j)$ 的值最小平方优化处理使得 T 和 M 之间的差尽可能的小。

现定义误差道量为:

$$e(i) = T(i) - M(i) \quad (5-8)$$

假设精确的反射系数可以用公式:

$$r(i) = r_0(i) + \Delta r(i), \quad i=1, N$$

$$\begin{aligned}
J &= \sum_{i=1}^{NSAMP} e(i)^2 = \sum_{i=1}^{NSAMP} \left[T(i) - \sum_{j=1}^N \{r_0(j) + \Delta r(j)\} W(i - \tau(j) + 1) \right]^2 \\
&= \sum_{i=1}^{nsamp} \left[e(i) - \sum_{j=1}^N \Delta r(j) W(i - \tau(j) + 1) \right]^2
\end{aligned} \tag{5-9}$$

因此希望找到校正量 $\Delta r(i)$ 使得误差平方和最小，即：

公式 5-9 有时叫“目标函数”。它使单个数 J 与未知参数 $\Delta r(j)$ 相联系。 J 为总误差或原始地震道与应用公式 5-7 和初始假设反射系数 $r_0(j)$ 计算的模型道 M 之间的误差。最小平方最优化用矢量标记法

$$\begin{aligned}
T &= \begin{bmatrix} T(1) \\ T(2) \\ \vdots \\ T(NSAMP) \end{bmatrix} = && \text{矢量的长为 NSAMP, 包含地震道的所有样点} \\
r &= \begin{bmatrix} r(1) \\ r(2) \\ \vdots \\ r(N) \end{bmatrix} = && \text{矢量的长为 N, 包含地震道的所有未知的反射系数} \\
W &= \begin{bmatrix} W(1) & 0 & \dots \\ W(2) & 0 & \\ \vdots & W(1) & \\ W(m) & W(2) & \\ 0 & \vdots & \\ 0 & W(m) & \\ \vdots & \vdots & \\ 0 & 0 & \end{bmatrix} = && \text{N 列} \times \text{NSAMP 行阶矩阵, 元素包括地震子波}
\end{aligned}$$

最好理解。定义下面的矢量：

矩阵 W 的列通过双程时移 $\tau(i)$ 容纳子波。假设 N 层中每层的顶已知。

$$M = \begin{bmatrix} M(1) \\ M(2) \\ \vdots \\ M(NSAMP) \end{bmatrix} = Wr$$

现在模型道可记为：

误差矢量是：

公式 5-9 的目标函数是：

$$J = e^T e = (T - Wr)^T (T - Wr) \quad (5-10)$$

$$e = \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(NSAMP) \end{bmatrix} = T - M$$

$$\partial J / \partial r(i) = 0, i = 1, N \quad (5-11)$$

最小平方解是使 J 尽可能小的矢量 r。这是通过 J 对 r 的每个元素的导数为零计算的。

从方程组 5-11 得到有名的标准方程组：

$$W^T W r = W^T T \quad (5-12)$$

$$r = (W^T W)^{-1} W^T T \quad (5-13)$$

公式 5-12 是有 N 未知数的可直接的解或通过迭代方法解的 N 个方程组。方程 5-12 的整个数学解可记为：

方程 5-13 也许不总有稳定的逆这种情况。为了稳定解，可引进预白噪系数。再程序中缺省值是 5%。在数学表示形式上，这可写为：

$$r = (W^T W + \lambda I)^{-1} W^T T \quad (5-14)$$

公式中 λ = 预白噪系数；

I = 单位矩阵。

现在我们获得下面几点：

如果我们已知有准确的 N 层；

如果我们已知那些层是以双程旅行时表示的；

如果我们知道地震子波 W：

然后我们可寻找反射系数序列 r ，使其具有将来的合成模型与地震道的匹配尽可能的接近的特性。

这意味着得到的反射系数模型与钷实地层的反射系数匹配吗？可惜不必要。理由之一是，上面提到的有些如果也许已经违反了。用不同的子波 W 解方程 5-12，必定产生一个不同的答案 r 。

比这更糟，即使所有的如果都正确。我们仍然不能特别相信得到的结果。这是因为预期的地震道 T 包含噪音，而获得的模型 r 也许对

$$I(j) = I(j-1) \left[\frac{1+r(j)}{1-r(j)} \right] \quad (5-15)$$

噪音很敏感。噪音很小的量可以细微的方式影响 r 的值，意味着破坏性的影响。在方程 5-2 中取消反射系数的定义，可给出层内波阻抗：

方程 5-15 告诉我们，如果我们知道两层之间的反射系数和上一层的声波阻抗，旧可确定比较深层的声波阻抗。该公式能推广到 i 层，记住我们必须通过估算第一层的波阻抗开启处理。给出一般的方程：

$$I(j) = I(1) \prod_{j=2}^i \left[\frac{1+r(j)}{1-r(j)} \right] \quad (5-16)$$

每个波阻抗值取决与上面各层的所有反射系数。这些反射系数的小误差可合并产生获得的波阻抗的大的累积误差。我们常常叫低频趋势误差因为获得的波阻抗有产生错误的长波长趋向，并因为它直接归因于地震道缺乏低频信息。

低频误差与地震反演的非唯一性问题有关。首先，这似乎是难解之事。标准方程 5-12 有唯一的答案。有一组最小误差 J 的精确的反射系数。最小的 J 意味着从获得反射系数计算的模型 M 将尽可能接近地震。多于一的反射系数产生的其它模型 M 的组和的事实产生非唯一性几乎和从公式 5-12 计算的最好的模型一样。事实上，经验表明有许多几乎接近原始道的其他模型，它们在视觉上与地震道难区分。这些反射系数模型与计算出的波阻抗相关的低频趋势正好趋于不同。

一组可能模型之间区分的一种方法是使用一种约束。在 STRATA 中这是由一块与地震道独立的数据组成，也告诉我们有关未知的反射系数。对反演的每一道，在程序的模型建立阶段 STRATA 产生初始预测道。通过工区里各个点指定井的曲线或速度/时间对导出的道，插值产生每个地震道的波阻抗道。

应用的约束有两种方法。一种方法是把附加的信息看作是“软”约束，意味着初始预测波阻抗是附加到地震道上的独立的一块信息，两者加权。在 STRATA 中这方法叫“随机的”。第二种方法是把附加的信息看作是“硬”约束，设置绝对的边界，最终的答案偏离初始预测多远。在 STRATA 中这方法叫“约束”。在下面章节里描述这两种方法。

随机反演

随机反演认为地震道和初始预测波阻抗是两块（也许相互矛盾）数据，为了提供最终反演结果必须合并。

假设初始预测波阻抗是： $I_0(i) \quad i=1, NSAMP$

如果我们把该波阻抗的对数定义为： $L(i)=\log[I_0(i)]$

$$I_{0l}(i) \approx L(1) + \sum_{j=2}^i 2(r(j) + \frac{r^3(j)}{3} + \frac{r^5(j)}{5} + \dots) \quad (5-17)$$

我们可指出方程可写为：

$$L(i) - L(1) \approx \sum_{j=2}^i 2r(j) \quad (5-18)$$

对于小的反射系数（即小于 0.2 ），方程 5-17 可近似的为：

这意味着样点 i 波阻抗的对数大约等于层 i 以上所有反射系数两倍的和。

定义下面：

$$L = \begin{bmatrix} L(1) - L(1) \\ L(2) - L(1) \\ \vdots \\ L(NSAMP) - L(1) \end{bmatrix} \quad \text{因此方程 (5-18) 可以矢量形式写为:}$$

$$H = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 2 & 2 & 0 & & 0 \\ \vdots & \vdots & 2 & & \vdots \\ 2 & 2 & \vdots & & 0 \\ 2 & 2 & 2 & & 2 \end{bmatrix}$$

$$L \approx Hr \quad (5-19)$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(NSAMP) \end{bmatrix} = \mathbf{L} - \mathbf{H}\mathbf{r}$$

注意这是正如方程 5-14 定义的一样线性方程系统。矢量 \mathbf{L} 类似于地震道，而矩阵 \mathbf{H} 作用就象子波。正如我们用公式 5-10 获得反射系数产生与地震道最优匹配，我们可得到一个方程的最小平方解计算产生与测井约束 \mathbf{L} 最佳匹配的反射系数。在这种情况下，误差矢量可写为：

这得到一个新的目标函数：

用方程 5-11 可解方程 5-20，产生一组新的标准方程。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{r} &= \mathbf{H}^T \mathbf{L} & (5-21) \\ \mathbf{J} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} &= (\mathbf{L} - \mathbf{H}\mathbf{r})^T (\mathbf{L} - \mathbf{H}\mathbf{r}) & (5-20) \\ \mathbf{r} &= (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{L} & (5-22) \end{aligned}$$

没有预白噪声时解方程可写为：

由于测井约束不是正确的校正，我们不希望得到完美的吻合。换句话说上的噪音部分类似于地震数据的噪音。

$$\mathbf{J} = w_1 (\mathbf{L} - \mathbf{H}\mathbf{r})^T (\mathbf{L} - \mathbf{H}\mathbf{r}) + (1 - w_1) (\mathbf{T} - \mathbf{W}\mathbf{r})^T (\mathbf{T} - \mathbf{W}\mathbf{r}) \quad (5-23)$$

组合的最小平方问题构成最小化的总目标函数：

公式中 w_1 是 0 和 1 之间的权系数，表示在两种类型的度量 \mathbf{T} 和 \mathbf{L} 可信程度。如果我们设置 w_1 是 0，我们说地震道比初始预测约束更无限地稳定，而方程 5-23 的第二项完全处于支配地位。设置 w_1 为 1 有相反的作用。

方程 5-23 仍然不是最优的，由于两项有不同的单位，为此一项也

$$\begin{aligned} TMS &= \frac{1}{NSAMP} \sum_i T(i)^2 \\ LMS &= \frac{1}{NSAMP} \sum_i L(i)^2 \end{aligned}$$

许完全处于支配地位。为了解决这个问题定义均方电平：

新的目标函数是：

最小化 5-24 反射系数序列 r 同时努力使地震道与初始预测约束匹

$$J = \frac{w_1(L - Hr)^T(L - Hr)}{LMS} + \frac{(1 - w_1)(T - Wr)^T(T - Wr)}{TMS} \quad (5-24)$$

配。由于约束很好的定义了低频成分，这往往解决低频漂移问题。

约束反演

约束反演用初始预测约束作为反演的出发点，设置绝对的或硬的边界对任何的参数偏离初始预测多远。让初始预测波阻抗为：

$$L(i) \cong L(0) + \sum_{j=1}^i 2 \left[r(j) + \frac{r^3(j)}{3} + \frac{r^5(j)}{5} + \dots \right]$$

$$I_0(i) \quad i=1, NSAMP$$

$$L(i) \cong L(0) + \sum_{j=1}^i 2r(j)$$

$$r = \begin{bmatrix} L(0) \\ L(1) \\ \vdots \\ L(m) \end{bmatrix}^{-1} W^T W$$

$$r = \begin{bmatrix} r(0) \\ r(1) \\ \vdots \\ r(m) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_0(0) \\ L_0(1) \\ L_0(2) \\ L_0(3) \\ L_0(4) \\ L_0(5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ -0.2 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 0.4 \end{bmatrix} \quad (5-26)$$

或 $W r = T$

$$r = \left[\begin{array}{cccccc} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 2 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 2 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \right]^{-1} \\ \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.1 \\ -0.2 \\ 0.1 \\ -0.2 \\ 0.4 \\ -0.2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0.6 \\ 1.2 \end{bmatrix} = \frac{1}{36} \begin{bmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.6 \\ 1.2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1 \\ 0.2 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 2 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.2 \end{bmatrix}$$

$$r = \left[\begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 2 \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -0.2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 8 & 4 \\ 4 & 4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -0.2 \end{bmatrix} \\ = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 4 & -4 \\ -4 & 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -0.2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1 \end{bmatrix}$$

$$A(t) = (s(t)^2 + h(t)^2)^{1/2} \quad (6-2)$$

$$W(t)=\frac{d\Phi(t)}{dt}$$