



波现象与智能反演成像研究组



# 勘探地震学的物理基础质疑

---保真与定量的地震波成像的逻辑基础

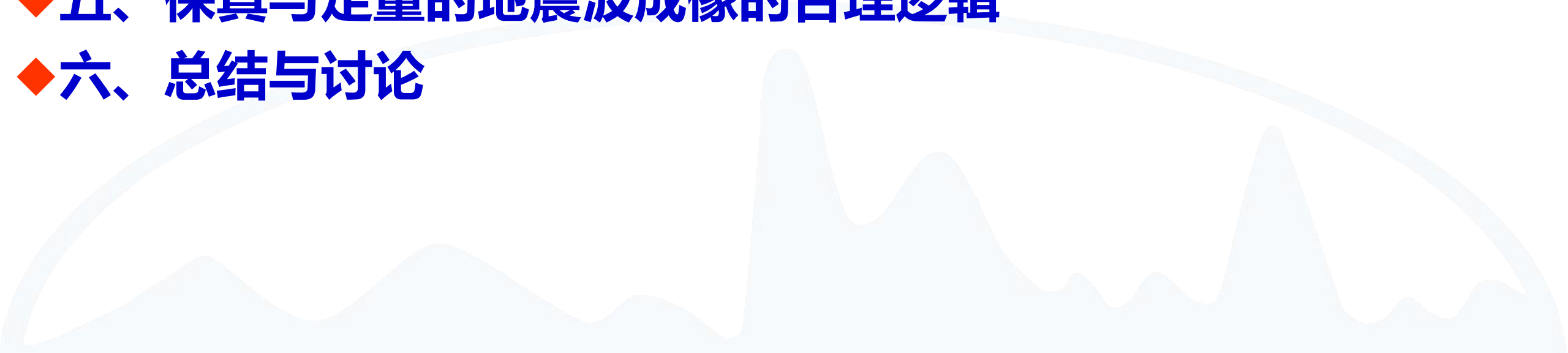
报告人：王华忠

波现象与智能反演成像研究组 (WPI)

同济大学海洋与地球科学学院，上海

2022年10月20日

# 目录

- ◆一、概述
  - ◆二、震源的物理基础质疑
  - ◆三、检波器的物理基础质疑
  - ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑
  - ◆五、保真与定量的地震波成像的合理逻辑
  - ◆六、总结与讨论
- 

# ◆一、概述

## ◆油气地震勘探最终目的：

◆精确地描述油气藏，进行准确的含油气性分析，做出最佳的钻井决策，得到最高的油气勘探效益。

## ◆油气地震勘探核心问题：

◆由叠前地震数据及其它相关的先验信息，进行宽波数带的弹性参数估计（或称广义的高精度地震波成像），与岩石物理知识结合，进行精确的油气藏描述和准确的含油气性评价。

# ◆一、概述

## ◆宽波数带的弹性参数估计问题：

- ◆基于叠前地震数据和待估计参数的先验信息，基于地震波理论和波动方程（及其各种简化形式），基于Bayes参数估计理论，一个信息不足情形下的（强）非线性反问题（系统参数反演问题）。

## ◆油藏描述问题：

- ◆宽波数带的弹性参数估计+井数据+油气地质学+岩石物理学 ➡ 油藏描述+含油气性评价
- ◆一个基于信息综合的最佳决策问题。

# ◆一、概述

- ◆把三维油气探区视为一个弹性介质系统，人工震源作为激励该系统的输入，地表观测的波场作为该系统的输出（理论上讲，应该在三维油气探区的所有边界上布设地震波震源和接收器，才能采集到系统的完整激励和输出），该实际物理系统被认为可以由人为建立的数学物理方程来描述，然后在上述正过程描述的基础上，基于Bayes估计理论对实际物理系统的弹性参数（主要是纵波速度、横波速度和密度）进行估计。在弹性参数估计结果的基础上，结合岩石物理关系，进行岩石物性参数的估计，进而对储层含油气性进行评价，最后进入油气开发阶段。这是从反演成像角度出发的油气地震勘探的基本逻辑。
- ◆这是勘探地震学的基本思想，这也是“广义遥感”领域的核心问题。

# ◆一、概述

- ◆油气地震勘探的需求逐渐地要求地震波成像严格地按Bayes估计理论进行，FWI+LS\_RTM就是代表性技术。
- ◆但是，我们并没有深究FWI+LS\_RTM真正的目的是什么。当前的勘探技术提供的叠前数据体能否适应FWI的基本理论假设。
- ◆我们更多地还是延续了Migration的观点看待FWI。
- ◆任何反问题的根本基础在于：观测波场与待估计参数之间存在可以预测的关系。一般地，正问题  $d = G(m)$  表达这个关系。实测数据  $d^{obs}$  落在正算子  $G$  的值域  $Range(G)$  中是反问题有解的基本条件。

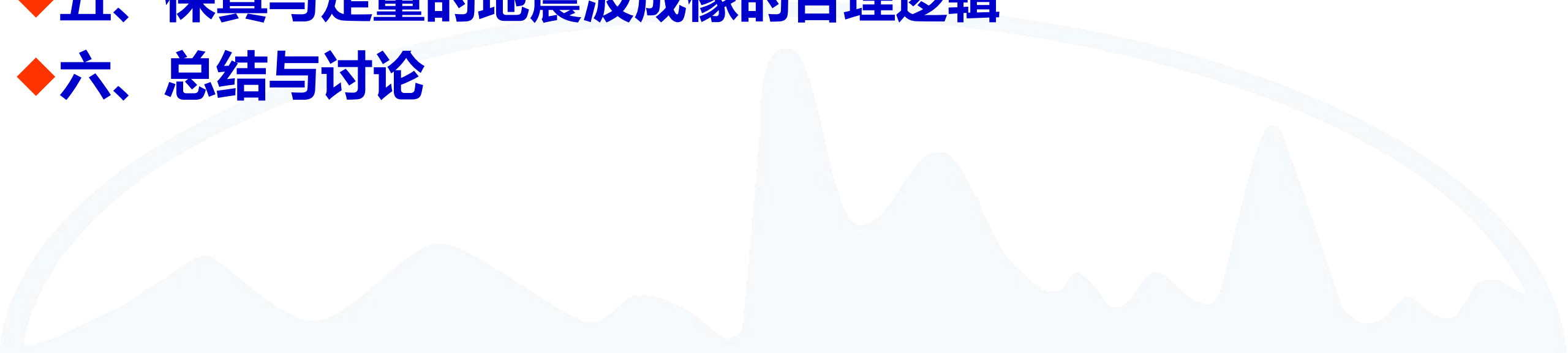
# ◆一、概述

◆勘探地震中，参数估计反问题（定量地震波成像问题）求解最基本的要求满足吗？

◆Inverse Crime情形下，这当然是完全满足的。

◆野外实际激发、传播、接收条件下，基本满足？基本不满足？  
完全不满足？

# 目录

- ◆一、概述
  - ◆二、震源的物理基础质疑
  - ◆三、检波器的物理基础质疑
  - ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑
  - ◆五、保真与定量的地震波成像的合理逻辑
  - ◆六、总结与讨论
- 



## ◆二、震源的物理基础质疑

◆当前，油气地震勘探中的震源主要有陆上的炸药震源、可控震源；海上的气枪震源和可控震源。

◆最经典的地震波成像对应与如下正问题：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ u(x, y, z; t) \Big|_{t=0} = f(\mathbf{x}_S; t) \\ \frac{\partial u(x, y, z; t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = g(\mathbf{x}_S; t) \end{array} \right.$$

◆这个正问题，期望震源应该是什么样的？

## ◆二、震源的物理基础质疑

### ◆地震波成像所期望的震源函数特征：

◆均匀半无限介质空间，远场波前面是球面，其上的震源激励函数是一致的。

◆目前，数学上用Ricker子波来描述该震源子波函数。Ricker子波是Gauss函数的二阶导数演化来的。

◆实际半无限介质空间，波前面是球面波按Huygens原理产生，其上的震源激励函数是一致的。

◆但是，实际情况下，波前面上子波函数是空变和时变的、子波形态是未知的，我们并不知道用什么样的函数关系表达波动方程中的震源函数是合理的。

## ◆二、震源的物理基础质疑

### ◆地震波成像对震源的物理基础的质疑：

- ◆实际震源激发的远场波前面，符合Huygens原理吗？
- ◆波动方程本身并没有考虑震源的激发过程和近场传播的复杂物理机制，各传播方向上远场波前面上地震子波的形态和幅值变化不是波动方程可描述的。
- ◆地震波方程产生的远场波前面上地震子波的形态和幅值变化与实际震源激发的远场波前面上地震子波的形态和幅值变化出现差异。
- ◆波动方程和实际物理过程的不一致，目前主要靠地表一致性校正来解决。但是，能解决到什么程度？缺乏定量的评价。



## ◆二、震源的物理基础质疑

### ◆当前的地震波成像方法如何应对上述不一致？

◆仅仅利用波场中的到达时！放弃完全的定量地震波成像！

◆利用波场中同相轴上地震子波的到达时，只要波动方程能比较准确地预测到达时，就可以进行有效的背景速度反演成像。

◆这个是比较可以做到的！

◆层析成像、相关准则的FWI、NMO/PSTM/PSDM/RTM都仅仅利用了波场中同相轴上地震子波的到达时信息。

◆这是常规地震波成像处理流程的物理根基。

◆因此，常规地震波成像处理分成背景速度层析+反射系数偏移成像是充分的物理原因的。不是数学推演出来的！

## ◆二、震源的物理基础质疑

### ◆如何解释当前地震波成像方法对同相轴上地震子波振幅的利用？

◆只有利用同相轴上地震子波的振幅，才能反映出地下介质弹性参数的变化。因为是波阻抗的异常变化才引起了同相轴上地震子波的振幅变化。

◆本质上，勘探地震也仅仅对地下介质弹性参数的空间异常变化感兴趣。只有它们才可能与有意义的油藏有关联。

◆当然，弹性参数的背景变化对刻画地下介质岩性（变化）也很重要。

◆Migration ( $I_{\text{mig}} = G^T d^{\text{obs}}$ ) 实质上是把地表观测的数据（反/散/绕射波场）中同相轴上地震子波“搬（反向外推）”到成像点处。算子  $G^T$  是个振幅全通的相移算子。理想情况下，反射强度的相对关系是保持的。

## ◆二、震源的物理基础质疑

### ◆如何解释当前地震波成像方法对同相轴上地震子波振幅的利用？

- ◆可以看出，Migration并没有反演/估计反射系数，只是利用背景速度场定义的走时，把同相轴上地震子波的振幅值“搬”到成像点处。
- ◆反射强度相对关系被保持的成像结果反映了地下介质弹性参数（波阻抗）的空间异常变化。
- ◆这就是保幅成像的要义！也是当前油藏描述的核心物理基础。

## ◆二、震源的物理基础质疑

### ◆地震波成像对震源的物理基础的质疑：

- ◆常规的地震波成像处理流程，通过放弃**直接利用同相轴上地震子波的振幅值**，而仅仅利用它的走时，部分地解决了地震波成像的问题。
- ◆直到现在为止，这还是油气地震勘探的核心技术。
- ◆在这样的情形下，我们对震源的物理基础没有太多可质疑的地方，尽管地震子波的形态也会影响走时的估计。
- ◆但是，保真和定量的地震波成像（譬如**宽带速度成像、宽带波阻抗成像等**），对震源的物理基础质疑就挥之不去！

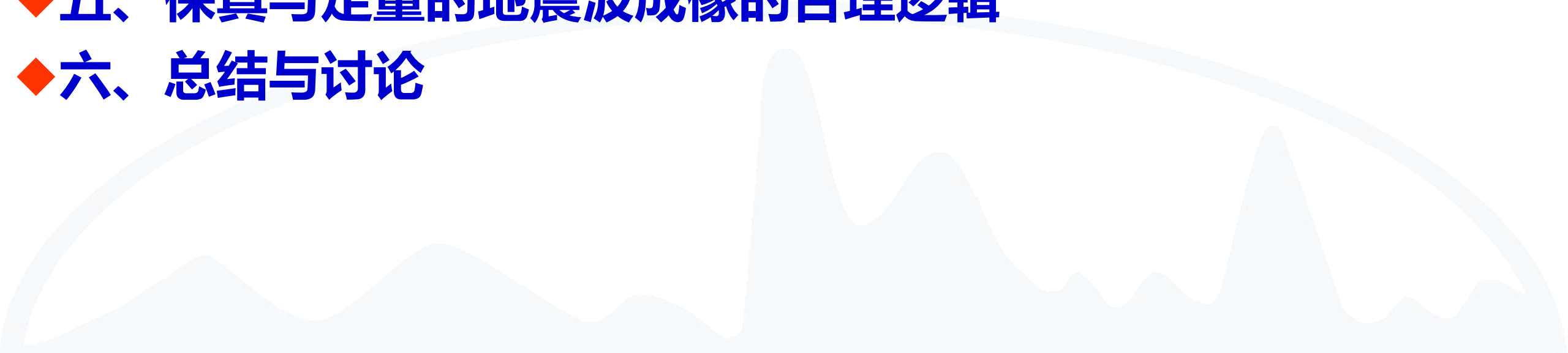
## ◆二、震源的物理基础质疑

### ◆地震波成像对震源的物理基础的质疑：

- ◆远场波前面上地震子波的幅值和形态，实测的和理论计算的，差异甚大！
- ◆这是波动方程的问题？还是实际震源（及近场介质复杂）引起的问题？  
地表一致性校正能把二者的不一致弥合好吗？
- ◆在这样的情况下，定量的地震波成像如何有可能？



# 目 录

- ◆一、概述
  - ◆二、震源的物理基础质疑
  - ◆三、检波器的物理基础质疑
  - ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑
  - ◆五、保真与定量的地震波成像的合理逻辑
  - ◆六、总结与讨论
- 

### ◆三、检波器的物理基础质疑

- ◆主被动源产生的波场  $u(x_S, y_S, z_S; x_R, y_R, z_R; t)$  , 引起地表介质在空间和时间上连续震动。
- ◆检波器试图在一个空间点上感知地表介质震动, 并保真地记录下来。
- ◆当震动波的波长远大于检波器尺度时, 可以认为检波器测量的就是某个空间点的波场震动。
- ◆我相信勘探地震中地震波波长和检波器的尺度关系是满足上述假设的。

### ◆三、检波器的物理基础质疑

◆勘探地震中，检波器主要是包括Geophone和Hydrophone。Geophone检测地震波引起的介质位移、速度或加速度；Hydrophone检测声波在液体中传播引起的声压变化。

◆动圈式Geophone和压电式Geophone是两种典型的测振物理机制。分别检测介质沿  $z$  方向的位移；沿  $x$  方向的位移；沿  $y$  方向的位移。也可以分别检测介质沿  $z$  方向的位移速度；沿  $x$  方向的位移速度；沿  $y$  方向的位移速度。也可以分别检测介质沿  $z$  方向的位移加速度；沿  $x$  方向的位移加速度；沿  $y$  方向的位移加速度。

### ◆三、检波器的物理基础质疑

◆动圈式和压电式仅仅是震动转化成电信号的机制不同，这不是本质问题，但可能会影响检波器的动态范围。压电式检波器体积可以更小，动态范围可以更大，各频率响应更一致。当前，MEMS检波器都是用压电式检波的原理。

◆令人质疑的地方是：

◆波的震动方向与检波器的 $z$ 、 $x$ 、 $y$ 的方向不一致。

◆检波器理论上与介质应该融为一体，才能保真地感知地表介质震动。实际上，野外施工很难做到。

◆各频率的响应是否是保真的。

◆Geophone检测到的物理量的（数值）量级是如何人为标定的？

### ◆三、检波器的物理基础质疑

◆Hydrophone检测声波在液体中传播引起的声压变化。测振的物理原理依然是动圈式和压电式。压力变化的感知与检测应该比介质位移变化的感知与检测要容易。

◆令人质疑的地方是：

- ◆封装在电缆中的Hydrophone感知到的压力变化是否受封装材料的影响，水中的压力变化保真地传导到Hydrophone上，被真实地感知到。
- ◆当检波器间距越来越小时，条件“当震动波的波长远大于检波器尺度时，可以认为检波器测量的就是某个空间点的波场震动”是否还满足。
- ◆各频率的响应是否是保真的。
- ◆Hydrophone检测到的物理量的（数值）量级是如何人为标定的？

### ◆三、检波器的物理基础质疑

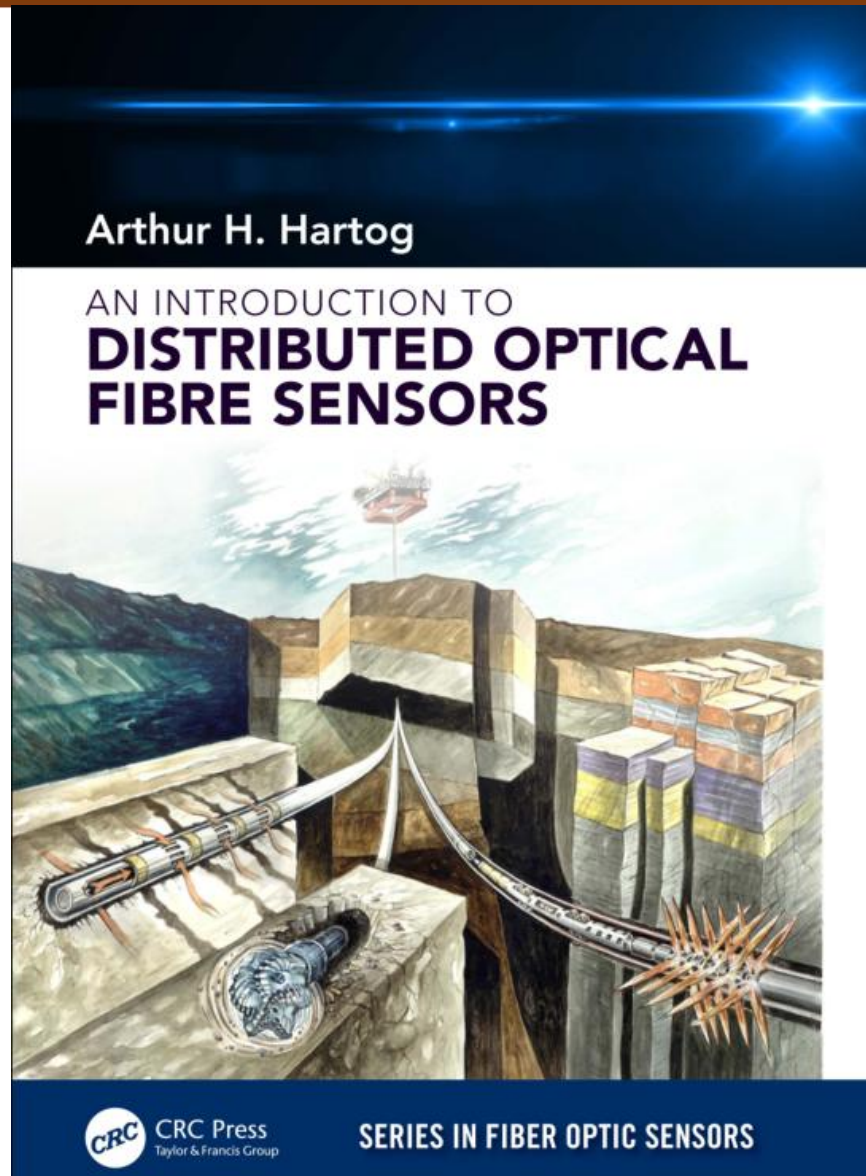
- ◆目前的光纤测振，同样要检测声波的压力变化和地震波的位移变化。
- ◆DAS = Distributed **Acoustic** Sensing，名称有点误导人。实际上，DAS对上述两种变化都要感知，不仅仅感知**Acoustic**。
- ◆为什么强调Distributed？原则上，假如光纤与介质融为一体，光纤随着介质一起波动，光纤能连续地感知介质的波动。这是Distributed的物理基础，这应该是光纤测振的最大优势。
  - ◆但是，光纤测振的物理机制比动圈式和压电式感知震动的物理机制复杂太多了。
- ◆光纤测振能否像常规检波器那样真实地感知到压力场和矢量震动波场并保真地记录下来？



### ◆三、检波器的物理基础质疑

- ◆利用压力场和矢量震动波场变化引起的光纤应变，基于布里渊散射、拉曼散射和瑞利散射，真的能真实地感知到压力场和矢量震动波场并保真地把它转化成数字记录的波场吗？
- ◆这个需要对光纤测振原理进一步理解。目前还不能确认！
- ◆目前看到的光纤测振结果，尚有很多令人存疑的地方。目前，期望光纤测振的结果能与常规检波器测振结果有可比性，最好能很好地一致起来。

## ◆三、检波器的物理基础质疑



这本书的作者基本上从光纤感知技术的起始到现在，全程参与了光纤感知技术的出现、低落、发展过程。而且在理论和应用领域都是核心人物之一。本书应该是本领域第一要参考的文献。



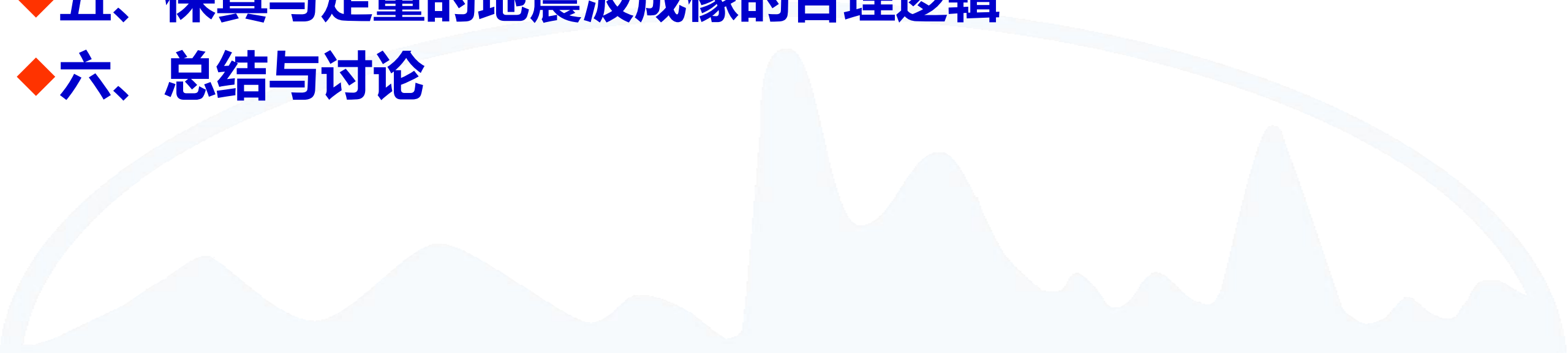
## ◆三、检波器的物理基础质疑

### ◆可以预计的光纤测振的优势：

- ◆光纤十分廉价；
- ◆可以进行高密度、宽频、多尺度观测；
- ◆光纤测振不需要供电、不需要信号传输、没有电磁干扰、不怕腐蚀等等，应用场景十分广泛。

◆如果真的攻克了光纤测振的保真测量问题，真的能真实地感知到压力场和矢量震动波场并保真地把它们转化成数字记录的波场，会打开一个巨大的新领域，产生很多值得研究的问题和诸多应用。

# 目录

- ◆一、概述
  - ◆二、震源的物理基础质疑
  - ◆三、检波器的物理基础质疑
  - ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑
  - ◆五、保真与定量的地震波成像的合理逻辑
  - ◆六、总结与讨论
- 

# ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



## ◆波动方程（地震波成像中常用（常密度）标量（拟）声波）、Zoeppritz方程和褶积模型

### ◆波动方程的导出，基于两条定律：

- ◆胡克定律 (Hooke's Law) ;

- ◆Newton第二定律（运动定律）

### ◆胡克定律建立介质单元体上的应力-应变之间的关系；

- ◆岩石物理学与波动力学据此建立起联系

- ◆地下介质参数变化与波场变化之间也据此建立起联系

### ◆Newton第二定律建立起介质单元体上受外力及质点运动之间的关系。

- ◆检波器实测数据（波场）与波动方程中的波场是对应的吗？

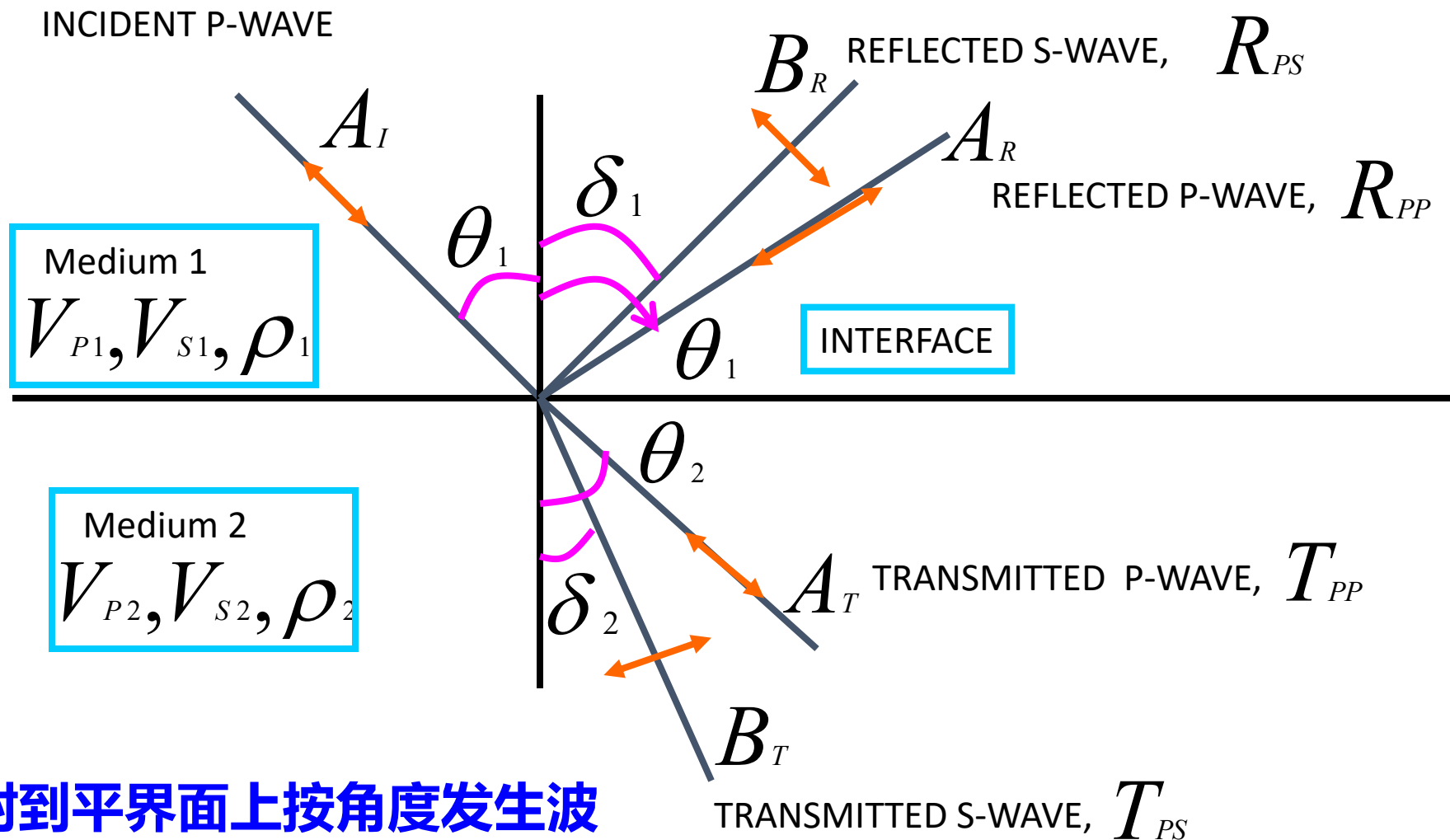
## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



◆波动方程（地震波成像中常用（常密度）标量（拟）声波）、Zoeppritz方程和褶积模型

◆波动方程的平面波解（WKBJ近似解），与介质平界面两边的边界条件结合（应力连续和应变连续），导出Zoeppritz方程。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



## 平面波入射到平界面上按角度发生波的分解

# ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \delta_1 & \cos \theta_2 & \sin \delta_2 \\ \sin \theta_1 & \cos \delta_1 & -\sin \theta_2 & \cos \delta_2 \\ \cos 2\theta_1 & -\frac{\rho_1 V_{S_1}}{\rho_1 V_{P_1}} \sin 2\delta_1 & \frac{\rho_2 V_{P_2}}{\rho_1 V_{P_1}} \cos \theta_2 & -\frac{\rho_2 V_{S_2}}{\rho_1 V_{P_1}} \sin 2\delta_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{V_{P_1}}{V_{S_1}} \cos 2\delta_1 & \frac{\rho_2 V_{S_2}^2 V_{P_1}}{\rho_1 V_{S_1}^2 V_{P_2}} \sin 2\theta_2 & -\frac{\rho_2 V_{S_2} V_{P_1}}{\rho_1 V_{S_1}^2} \sin 2\delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ -\sin \theta_1 \\ -\cos 2\delta_1 \\ \sin 2\theta_1 \end{bmatrix}$$

## Zoeppritz方程的矩阵形式

$$R_{P0} = \frac{Z_{P2} - Z_{P1}}{Z_{P2} + Z_{P1}} \approx \frac{\Delta Z_P}{2Z_P}, \quad Z_P = \rho V_P. \quad R_{P0} \approx \frac{\Delta \ln Z_P}{2} = \frac{\Delta \ln V_P}{2} + \frac{\Delta \ln \rho}{2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right].$$

## 零角度入射的纵波反射系数

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



- ◆水平层状介质+平面波正入射，各层的反射系数合起来成为一个反射系数序列。该反射系数序列表达在时间域。
- ◆时间域反射系数与地震子波的褶积构成褶积模型。
- ◆注意：此处没有对程函方程（波动方程的高频近似形式）和时距关系进行质疑是因为我认为这两个（或两类）方程描述同相轴上地震子波的走时是没有大问题的。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对Zoeppritz方程和褶积模型用于地震波成像的质疑：

◆实际上，是带限地震子波描述的平面波入射到地下介质分解面上，实际介质的物理分解面不是数学分解面。Zoeppritz方程和褶积模型令人质疑。

◆Zoeppritz方程和褶积模型目前的数学抽象是存在问题的，与物理实际不符。

◆褶积模型：用选择的地震子波与地下反射系数的褶积生成一维地震道。一维地震道中传播时间不存在大问题，传播时间由反射系数位置确定，反射子波的形态由输入地震子波决定，反射系数的幅值由反射系数的大小定，反射系数的大小由波阻抗变化定。看起来褶积方程没有大问题。

◆注意：褶积方程是线性方程，假设反射系数都是弱的。否则，必须考虑多次波存在时的褶积模型。



## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对Zoeppritz方程和褶积模型用于地震波成像的质疑：

◆实际上，是带限地震子波描述的平面波入射到地下介质分解面上，实际介质的物理分解面不是数学分解面。Zoeppritz方程和褶积模型令人质疑。

- ◆应该注意到：Zoeppritz方程中完全没有了波传播的因素，只有界面两边的弹性参数与角度反射系数之间的关系。这是不符合物理的。
- ◆再退化到零角度反射系数与波阻抗之间的关系，并直接给出褶积模型。这都不是很合理的数学物理近似。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对Zoeppritz方程和褶积模型用于地震波成像的质疑：

◆实际上，是带限地震子波描述的平面波入射到地下介质分解面上，实际介质的物理分解面不是数学分解面。Zoeppritz方程和褶积模型令人质疑。

◆公式  $R_{p0} = \frac{Z_{p2} - Z_{p1}}{Z_{p2} + Z_{p1}} \approx \frac{\Delta Z_p}{2Z_p}$ ,  $Z_p = \rho V_p$ . 反映褶积模型的数学实质。但，不是勘探地震的物理实质。

◆褶积模型本身与地下介质的物理是脱节的！实际上，是带限地震子波在看实际介质波阻抗的变化。

◆勘探地震中褶积方程与任何领域（包括数据驱动的信号分析）中的褶积模型一致，足以说明它与勘探地震物理实际的脱节。一个数学模型越泛，与具体的实际物理越脱节。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对Zoeppritz方程和褶积模型用于地震波成像的质疑：

◆实际上，是带限地震子波描述的平面波入射到地下介质分解面上，实际介质的物理分解面不是数学分解面。Zoeppritz方程和褶积模型令人质疑。

◆我认为，褶积模型在输入的地震子波合理、反射系数序列合理的情况下，产生的地震道与水平层状介质下一维地震道的匹配度会是很高的。因为这层状介质下平面波垂直入射到水平层状介质下，线性化的波动方程的解。已知子波和反射系数时，波动方程的解自然是合理的。

◆但是，如何由带限反射系数恢复成阻抗是存在问题的！

◆方程  $R_{p0} = \frac{Z_{p2} - Z_{p1}}{Z_{p2} + Z_{p1}} \approx \frac{\Delta Z_p}{2Z_p}$ ,  $Z_p = \rho V_p$ . 不是在描述带限反射系数与波阻抗扰动的关系。这是抽象后的数学，不是物理。勘探地震中，只可以得到带限反射系数。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对Zoeppritz方程和褶积模型用于地震波成像的质疑：

◆实际上，是带限地震子波描述的平面波入射到地下介质分解面上，实际介质的物理分解面不是数学分解面。Zoeppritz方程和褶积模型令人质疑。

◆Zoeppritz方程的数学抽象存在问题，首先是认为无限高频的平面波入射到无限的广大平面上。这样才可以有应力和位移的连续关系，据此导出Zoeppritz方程。实际勘探地震物理情况越来越不是这样。

◆横向变化快的地层和油藏是常见的。

◆无限高频+无限广大平面必须要匹配数学意义下的弹性参数跃变。实际物理情形下，没有无限高频平面波、没有无限广大平面、也没有弹性参数数学跃变。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对Zoeppritz方程和褶积模型用于地震波成像的质疑：

- ◆实际上，是带限地震子波描述的平面波入射到地下介质分解面上，实际介质的物理分解面不是数学分解面。Zoeppritz方程和褶积模型令人质疑。
- ◆Zoeppritz方程在勘探地震中应用的物理合理性更难被验证、被证明。
- ◆一维褶积模型还可以在水平层状介质情形下，用测井阻抗+反演子波得到基本验证。
- ◆所以，基于Zoeppritz方程的弹性参数反演的可靠性更令人质疑。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对波动方程用于地震波成像的质疑：

- ◆对波动方程的质疑主要体现在：波动方程完全不能模拟震源机制和接收机制，仅仅靠地表一致性处理这样的简单做法消除掉实际震源和接收的影响是不可能的。
- ◆前面的分析指出，感知地面震动和/或压力变化并把它们尽可能真实地记录下来，这本身就是令人质疑的。
- ◆无论如何，Zoeppritz方程和褶积模型都是波动方程在一定条件下的退化，基于波动方程的成像，其精度一定会优于Zoeppritz方程和褶积模型。直接用波动方程进行地震波成像是合理的选择。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对波动方程用于地震波成像的质疑：

◆实际数据情况下，在地震子波未知，波动方程完全不能模拟震源机制和接收机制，地表一致性处理这样的简单做法无法很好地消除掉实际震源和接收的影响的条件下，利用同相轴上地震子波振幅的LS\_RTM（它是高波数段的FWI反演）方法，并不是定量的地震波成像的有效方法。

◆尽管Inverse Crime情况下，LS\_RTM结果看起来是没有问题的。

## ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑



### ◆对波动方程用于地震波成像的质疑：

- ◆总之，即使用波动方程进行定量的地震波成像，也因为震源和激发机制的不能被波动方程描述，因为检波器不能真实地检测地表震动和/或压力变化，因为地表一致性处理不能很好地消除掉激发和接收影响，**定量**的地震波成像，**不可以照搬Bayes估计下参数估计理论，而是应该设计一套合理的方案。**



# 目录

- ◆一、概述
- ◆二、震源的物理基础质疑
- ◆三、检波器的物理基础质疑
- ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑
- ◆五、保真与定量的地震波成像的合理逻辑
- ◆六、总结与讨论

## ◆五、保真与定量的地震波成像的合理逻辑

- ◆保真与定量的地震波成像的合理逻辑应该是什么？
- ◆从Inverse Crime的角度，定量的地震波成像似乎很简单，因为正问题能完全预测数据中的波场，余下的就是尽可能好地解一个Bayes参数估计问题。
  - ◆实质上，若地下介质异常复杂，波场也极为复杂，即便Inverse Crime反演，也不容易做到。
- ◆在实际数据情况下，更需要一个好的方案。
- ◆根本着眼点还是：建立波场变化与介质变化之间的基本线性的关系。
  - ◆当然，还要假设检波器没有畸变实际物理波场。

## ◆五、保真与定量的地震波成像的合理逻辑

◆因此，保真与定量的地震波成像的合理逻辑应该是：

- ◆基于同相轴上地震子波的走时，尽可能建立精确的、包含尽可能多中波数成分的背景速度场。
  - ◆尽可能的意思就是：要借用一切可能用的先验信息。
- ◆对于同相轴上地震子波的振幅的利用，还是要尽可能做到保真的偏移成像。然后，再提升偏移成像子波的频带，尽可能到Gauss型成像子波。最后用信息融合产生宽带阻抗模型。
- ◆这就是我们坚持做CWI+WBIM的物理依据。

# 目录

- ◆一、概述
- ◆二、震源的物理基础质疑
- ◆三、检波器的物理基础质疑
- ◆四、褶积模型、Zoeppritz方程及波动方程的物理基础质疑
- ◆五、保真与定量的地震波成像的合理逻辑
- ◆六、总结与讨论



## ◆六、总结与讨论

◆面对当前的实测数据（尤其是陆上实测数据），基于Bayes估计理论，进行经典FWI/LS\_RTM的地震波反演成像，若试图得到宽带的、定量的成像结果，这个目标是脱离物理实际的。实测数据和波动方程都不支持能达到这样的目标。

◆实测数据，只有波场中同相轴地震子波的到达时是比较可靠的。能用来进行定量反演的。对这个工作过程和结果还是比较有信心的。

◆实测波场中同相轴地震子波的形态和振幅都是相对的，震源端和检波端都有说不清楚物理机制的因素影响它们。震源端的影响相对清楚一些，检波端的影响目前有很多令人困惑的地方，检波器检测的数据（波场）到底是什么物理意义，并不如理论上讲的那么令人信服。

## ◆六、总结与讨论

◆基于背景速度，把波场中同相轴地震子波的振幅值“搬”到成像点处，进行偏移成像。这个工作已经涉及到了地震子波的振幅。如果对炮集中接收到的地震子波的形态和幅值有信心，这个成像结果的振幅相对保真性也是令人可信的。

◆百多年来的油气地震勘探一致这么干，所得效果十分令人鼓舞。至少说明这样的做法一定程度上是符合物理实际的，否则不可能有如此辉煌的勘探效果。

◆但是，即便如此，还是令人质疑实际中波的激发、传播和接收过程与波动方程正问题 ( $d = G(m)$ ) 的一致性。

◆尤其是当期地震波成像已经在逐步定量化，把宽带弹性参数估计结果作为成像目标的情况下，这样的质疑更被加深。经典FWI/LS\_RTM在实际数据上的失败（宽带弹性参数估计的失败）已经预示着这样的质疑是有道理的。

## ◆六、总结与讨论

◆我们提出的CWI+WBIM的技术路线，用保真成像+宽带子波估计+井震标定+信息融合宽带阻抗建模的流程，避开同相轴上地震子波波形和振幅值的不可“高精度”预测的现实，也是一种无奈的变通方法。

◆CWI+WBIM的技术路线是正确的定量地震波成像的技术路线吗？我认为的是！

◆保真、定量的地震波成像一定是多信息约束下的、依然充分利用同相轴上地震子波走时信息、合理利用同相轴上地震子波波形和振幅值的、综合性的方法技术。

◆叠前地震数据、成像剖面、测井数据、岩石物理信息、地质信息（构造、沉积=沉积相+沉积岩相）的合理综合应用，才能走向定量的地震波成像，Bayes估计理论下的单一数学算法，不可能实现实际数据下的定量的地震波成像（以宽带速度建模、宽带波阻抗建模为成像目标）！

## ◆六、总结与讨论

- ◆科学（波动理论、反演成像理论）与技术（波场感知与测量）都是对真实物理过程的认识与感知。
- ◆科学有科学的问题；技术有技术的问题。
- ◆它们都不是完美的。
- ◆这正是科学、技术不断向前发展的动力。
- ◆科学与技术应该是并列的关系，不是技术依附于科学。
- ◆科学同样严重依赖于技术的进步。否则，科学同样会停滞不前。
  - ◆技术依附于科学的观点是不正确的。很多人都或多或少的有这样的看法。



## ◆六、总结与讨论

### ◆创新科研的四种模式：

- ◆新方法解决新问题 ✓ ✓ ✓ ； 新方法解决老问题 ✓ ✓ ；
- ◆老方法解决新问题 ✓ ✓ ； 老方法解决老问题 × 。



**谢谢  
欢迎批评指正**