

# 基于干涉成像与系统辨识的 缝洞型油气藏伪随机地震刻画研究

## 一、立项依据与研究内容

### 1. 立项依据

#### 问题来源与研究意义

油气是关系我国国计民生的紧缺战略资源。“我国油气可采储量严重不足”，“但我国油气资源勘探开发潜力很大，陆地、海洋石油资源探明率分别为 36%和 26%，天然气探明率仅为 10%”，为“将潜在的石油资源迅速转化为可采储量”，必须“重点开发复杂环境与岩性地层类油气资源勘探技术”、“重点研究西部特殊地质条件下油气资源、深海油气资源和煤层气的高精度地震勘探等地球物理勘探技术”<sup>[1]</sup>。

经过近半个世纪的大规模勘探，我国陆上常规油气藏基本寻找殆尽，剩余待勘探油气藏主要是各类复杂油气藏，其中缝洞型油气藏约占 40%，而在我国西部的塔里木盆地、鄂尔多斯盆地以及四川盆地等地更是占有绝大的比例。缝洞型油气藏的勘探需要解决两个问题：结构的成像与属性的预测，前者常用地震偏移成像的方法解决，后者常用储层预测（或称储层刻画：reservoir characterization）的方法解决。

缝洞型油气藏通常具有强的非均质性与多尺度的非规则几何边界，地震响应表现为具有漫反射特性的 Lambert 体。现有地震偏移成像理论方法多数基于确定性的 Snell 定律与 Zoeppritz 方程建立，对具有随机漫反射（散射）特点的缝洞型油气藏地震响应难以准确反演成像。

储层预测（刻画）没有严格的内涵界定，一般而言应包括对储层岩性、孔隙度、渗透率、孔隙流体属性（油、气、水）与饱和度等的预测。储层预测通常是利用数字信号处理方法提取已知储层（以井资料做约束）地震响应的各种属性特征，然后由已知推未知<sup>[2-3]</sup>。因此可视为是一种模式识别。模式识别方法的有效性取决于识别对象与训练样本的一致性，而对缝洞型油气藏这样结构与物质组成都复杂多变的系统，很难

做到训练样本与识别对象的一致，因而出现失误也就在所难免。并且，如无井资料做标定或约束，基于模式识别的储层预测基本上就无从开展。

如视缝洞型油气藏为一个具有特定结构与物质组成的系统，则地震响应可视为系统的输出，而**偏移成像与储层预测均可视为是对油气藏系统的辨识**，只不过偏移成像侧重的是对系统结构特征的辨识，而储层预测侧重的是对系统物质组成与微观结构特征的辨识。按照系统辨识的理论方法，**系统辨识的关键是选择合适的探测信号<sup>[4-5]</sup>**，而**最佳的探测信号是伪随机信号<sup>[6]</sup>**。现行地震勘探输入的探测信号通常是可用雷克子波近似的确定性信号，从反射成像的角度看，这是较好的，但从系统辨识的角度看，这是有缺陷的。现有储层预测方法预测效果的不稳定性很可能源于此。因此，**从系统辨识的角度看，应使用伪随机地震作为油气藏系统的探测信号，即进行伪随机地震勘探**。如此以来，我们就可以使用系统辨识的方法，而非模式识别的方法进行储层预测。使用系统辨识方法进行储层预测的优越性主要体现在可以减少对井资料的依赖，从而显著地提高勘探效益与效率。

缝洞型油气藏的缝洞相对于地震波的波长而言，通常都是尺度很小的异常体，地震响应即使可观测也是表现为微弱的散射，按常理无法用反射地震成像方法识别。但缝洞型油气藏的缝洞通常以群组的形式出现（孤立的缝洞即使存在对于油气勘探而言也没有实际意义），地震响应上表现为漫反射或随机散射<sup>[7-11]</sup>，且散射波在自源向地表的传播过程中会发生干涉消涨，因此应可用干涉成像的方法进行缝洞结构的反演成像。干涉成像是一种精细测量方法，它用两个或多个探测器观测记录目标体的回波信号，利用不同探测器记录的信号的相位差确定目标体的位置与形体，在薄膜测量、对地观测、天体测量等众多领域都有广泛的应用，三维地球数字高程（DEM）就是使用干涉合成孔径雷达（inSAR: Interferometric SAR (Synthetic Aperture Radar))测定的。inSAR的分辨率能力甚高，在30km高空的对地观测精度在水平向可达到厘米级，而在垂向可达到毫米级。雷达探测与地震勘探观测的都是回波，理论上干涉成像能用于雷达成像就能应用于地震成像，但实际上雷达的干涉成像方法很难直接推广应用到地震勘探中来，其主要原因在于二者的观测条件不同。雷达观测的背景介质（空气）是均匀的，而地震勘探的背景介质（地质介质）通常是随机非均匀的，甚至是各向异性的。应用干涉成像方法反演解释地震观测数据的关键是获得随机非均匀介质中点源场的Green函数的解析表达式<sup>[12-18]</sup>，而这是一个长期困扰地球物理学家的难题。但新近的研究表

明，非均匀介质中两点间波场的 Green 函数可由在这两点观测的随机噪声记录的互相关获得<sup>[12-18]</sup>。如果我们用伪随机信号作震源进行地震勘探，就可以利用干涉相关的方法由观测记录确定测点间随机非均匀介质的 Green 函数，而这同时也能兼顾并利用缝洞型油气藏地震响应的随机散射特点，并且同时也满足了基于系统辨识的储层预测对探测信号的要求。相较于 inSAR，地震勘探也有应用干涉成像方法的有利条件，如基线可以任意布置并精确确定等。

综上所述，为更精确的刻画缝洞型油气藏，我们必须进行伪随机地震勘探。

缝洞型油气藏的地震成像与属性刻画是油气勘探领域的难点问题之一，相关技术的突破对我国油气工业的“增储上产”意义非凡。缝洞油气藏的地震响应与刻画研究国内外都有开展，国内的研究始于上世纪八十年代，比美国还早。国内研究关注的重点主要是碳酸盐岩缝洞的预测与低渗透致密储层裂缝的识别。国外研究关注的重点除低渗透储层裂缝的识别外，还将其与各向异性及流体运移的预测相联系<sup>[19-20]</sup>。目前有关缝洞油气藏的勘探研究，无论是缝洞检测还是地震响应模拟，都以地震响应的确定性假设为基础<sup>[7-11]</sup>。缝洞油气藏是一个尺度与结构均多变的复杂系统，其地震响应不可能完全是确定性的。使用确定性的方法解释具随机性的数据必然导致不稳定的结果，现有缝洞检测方法预测效果的不稳定性很可能源于此。本申请项目从系统辨识与缝洞结构精细成像的角度考虑，提出研究发展基于干涉成像与系统辨识的缝洞油气藏伪随机地震刻画方法，既有综合借鉴，更有源头创新，既试图解决科学技术问题，更直接服务于国家能源战略目标，工作具有科学意义与实用价值。

### **研究历史与现状分析**

本研究主要涉及两方面的内容：基于干涉原理的地震成像与基于系统辨识的油气储层预测（刻画），相关的研究历史与现状简要总结分析如下：

#### **(1) 干涉地震成像**

干涉地震成像以光的干涉原理为基础。光的干涉现象发现于 1675 年(牛顿环实验)。利用光的干涉原理进行精细测量的历史可追溯到 19 世纪的迈克逊 (A.A.,Michelson,1852-1931)，他曾用干涉方法测量了公尺的绝对长度与猎户星座中 Belgeous 星的直径。1887 年迈克逊与莫雷在实验中用干涉方法否定了以太的存在，并同时确认了光在真空中的传播速度为定值。此一实验在物理学上称之为“迈克逊-莫雷 (Michelson- Morley) 实验，是导致相对论诞生的重要实验之一。干涉测量 19 世纪即

被用于薄膜厚度测定，20世纪50年代扩展到了天文、雷达、声纳、遥感等众多领域，形成了射电天文学、合成孔径雷达干涉测量等学科。在对地观测体系中起支柱作用的干涉合成孔径雷达（inSAR）是合成孔径雷达（SAR）技术与射电天文学干涉测量技术相结合的产物。InSAR的原型可追溯到1969年Rogers和Ingalls利用干涉雷达对金星的观测，随后Zisk使用同样的方法测绘了月球表面的地形。首次利用InSAR进行对地观测的是Graham（1974）<sup>[21]</sup>，他在机载SAR系统上垂直于航向加装了一套天线系统，构成成像干涉仪，获得了反映地形变化的干涉条纹。经过40多年的软、硬件交互促进发展，InSAR现已成为现代对地观测体系的支柱<sup>[22]</sup>。各种机载、星载多频段、多极化模式的InSAR除应用于地形测绘、军事侦察与监测外，也被应用于火山活动、冰山移动以及地面沉降的监测等众多领域。

地震勘探中应用干涉原理的探索可以追溯到1968年Claerbout对层状介质声波响应的研究<sup>[23]</sup>。至上世纪末，有关研究探讨的基本上都是层状介质的情况。因为对层状介质情况有更便捷的处理办法，而对需要解决的随机非均匀介质情况又无法处理，因而干涉成像并未受到重视。最近几年，Weaver and Lobkis（2001），Snieder et al（2004），Wapenaar et al.（2004）等多位学者从不同的假设出发推证出由在两点观测的随机场的互相关可以导出测点间的Green函数<sup>[12-14]</sup>，这为非均匀介质中点源场（Green函数）的解析表达提供了一个可行的解决方案，同时也基本扫清了利用干涉成像方法进行非均匀地质介质地震成像的理论障碍。基于干涉原理的地震成像方法不同的学者赋予了不尽相同的名称，如“日光成像（Daylight imaging）”、“干涉地震成像（interferometric seismic imaging）”、“被动成像（passive imaging）”、“虚源成像（Virtual source imaging）”等<sup>[24-26:15-18]</sup>。干涉地震成像应用于天然地震噪声反演取得了确定的良好效果<sup>[15-18]</sup>，应用于VSP数据也取得了肯定的结果<sup>[27]</sup>。

地震勘探中所称的干涉成像与inSAR中所称的干涉成像有很大的不同，前者计算的是“道”相干，得到的是相干道集，图像重建采用的是偏移成像或散射源反演；后者计算的是合成孔径复数图像的“像”相干，得到的是干涉相位图，图像重建采用的是Fourier逆变换或小波变换；现行的地震干涉成像无需进行图像配准、基线估计，而这在inSAR干涉成像中则是必须的关键环节。目前未见有直接仿照干涉合成孔径雷达（inSAR）的成像方法进行地震干涉成像的研究报道。地震干涉成像与InSAR干涉成像的差别主要源于其观测方式与背景介质属性的不同。在观测方面，地震是“道”

测量, InSAR 是合成孔径成像, 地震的激发、观测阵列可以任意布置并精确测定, InSAR 的基线只能依靠估计; 在背景介质属性方面, InSAR 的背景介质(空气)可视为是均匀的, 而地震勘探的背景介质是非均匀的, 由此导致的问题是在 InSAR 中电磁波的传播可以用几何光学近似, 而在地震勘探中地震波的传播必须用波动方程描述。

基于Weaver和Lobkis的理论<sup>[12]</sup>发展起来的干涉地震成像的应用对象是随机场数据, Campillo et al. (2003), Shapiro et al. (2005) 等发表在《Sciences》上的结果<sup>[15-18]</sup>使用的数据是地震尾波噪声。油气勘探记录的地震数据是确定性输入的响应, 虽因介质的非均匀散射(如缝洞油气藏的散射)使观测记录具有随机场的特征, 但毕竟不是随机场, 而且在简单地层构造情况下更不可视为随机场。因此, 理论上讲, 不能应用现有干涉地震成像方法进行油气地震勘探数据的数据解释。为利用干涉成像的方法进行缝洞型油气藏的精细成像, 必须进行伪随机源地震勘探。伪随机源地震勘探的输入可用伪随机信号表示。伪随机信号是按一定的规律将不同的信号合成、编码组成的序列, 它看似随机信号, 实质上仍遵循某种规律。伪随机信号含有近似等幅的各种频率的信号, 频谱十分丰富, 并可人为控制。按伪随机方式编码的电磁波列在雷达测距、GPS 定位以及电磁探测等领域都有非常成功的应用<sup>[28-29]</sup>, 其显著的特点是具有很强的抗干扰能力。使用伪随机编码的可控震源进行地震勘探已进入地球物理学家与产业部门的视野, 美国Geometrics地球物理仪器公司、法国石油研究所等都进行过有关研究, 法国石油研究所的M·贝克还在我国申请了有关专利<sup>[30]</sup>, 国内常旭等人(2005)与美国劳雷公司合作成功地进行了近地表强噪声环境下的伪随机源地震勘探实验<sup>[31]</sup>。从确定性源到伪随机源, 地震勘探正孕育着革命性的变革, 并且关键的硬件基础已基本具备<sup>[30]</sup>, 现在迫切需要解决的是加紧研发相应的数据解释方法。

## (2) 系统辨识与储层刻画

系统辨识 (identification of system) 指从输入和输出数据中辨识系统的模型。其发端历史比较久远, 上世纪60年代逐渐成型, 并成为现代控制论的一个重要分支。Zadeh (1962) 对系统辨识下的数学化定义是: “系统辨识是在输入和输出数据的基础上, 从一类模型中确定一个与所测系统等价的模型”<sup>[32]</sup>。按照对辨识对象的了解程度的不同, 系统辨识问题大致可分为三类: 黑箱问题(对系统一无所知)、灰箱问题(了解系统的部分)、参数估计(了结系统的结构)。多数系统辨识问题属于灰箱问题。系统辨识的发展在相当长的时间内同系统控制有关, 20世纪70年代开始推广应用到其它

学科领域。

储层刻画 (reservoir characterization) 通常指基于地震属性分析的储层岩性与孔隙流体预测 (对这种意义上的储层刻画更恰当的称谓可能是储层预测)。从系统辨识的角度看, 储层刻画 (预测) 与地震成像均属油气藏系统的辨识问题, 只不过前者针对的主要是系统的物质属性, 而后者针对的主要是系统的几何结构。严格地讲, 储层刻画既包括对其物质组成的辨识, 也包括对其结构特征的辨识, 即指储层预测 (狭义的储层刻画) 与地震成像。

储层刻画涉及的参量大致可分为两类: 几何参量与物理参量, 前者指储层的埋深、产状、厚度、断层、岩石配置等, 后者指储层的岩性、孔隙度、孔隙流体及饱和度、渗透率等; 前者属于地震成像的研究对象, 后者是储层预测或狭义的储层刻画所考虑的问题。储层刻画使用 (过) 的地震响应参量 (称地震属性) 大约有50多个 (也有统计称多达200个)。除走时、振幅等少数参数外, 大部分地震属性参数是采用数字信号分析方法由地震记录计算出来的<sup>[33,2-3]</sup>。使用人工地震方法勘探石油始于上世纪30年代, 基于地震属性分析的油气储层刻画始于上世纪60年代, 即在数字记录替代模拟记录之后。最早利用的地震属性是“亮点”。不过早期对“亮点”的利用与今天不完全相同, 早期它主要是作为油藏的伴随特征使用, 现在更多的是直接作为气藏的标志。上世纪70年代, 能源危机推动了石油地震勘探事业的发展与技术进步, 今天使用的许多地震勘探方法技术都发端于这一时期, 包括地震属性分析、复数地震道分析、地震地层学、波阻抗反演以及地震属性的彩色显示等<sup>[2, 34-35]</sup>。至上世纪80年代, 随着能源危机的缓解, 地震勘探步入了精细化发展阶段, 主要依靠地震属性分析的储层预测在经历了一系列的失败之后步入低谷。综合地震与井资料的模式识别方法, 如神经网络、聚类分析等被引入储层刻画并逐渐占居主导地位<sup>[2,36-38]</sup>。自上世纪90年代以来, 地震勘探因三维地震技术的采用而步入了一个新的发展阶段, 基于三维数据体相干分析与基于小波变换的时频分析方法技术的出现使基于地震属性分析的储层刻画重获重视<sup>[2,39-56]</sup>, 当然这也与复杂油气藏及岩性油气藏的勘探需求上升有关。油气藏地震响应特征主要体现为地震波振幅的变化, 它是油气藏系统结构、岩基岩性、孔隙流体等诸要素综合作用的结果。各要素的影响彼此叠加消涨, 相同的振幅变化可能由多种完全不同的要素组合产生, 这使得系统各要素贡献的分离辨识异常困难, 传统地震属性分析方法如无其它条件作约束则对此几乎无能为力。基于小波变换的时频分析方法引入地

震数据的分析后发现在时频域能更好地区分、研究地震响应的特征，如基于小波变换获得的时间-尺度谱在大尺度有很好的频率分辨率而在小尺度有更好的时间分辨率；由小波变换导出的时间奇异谱不仅具有良好的边界分辨能力，而且能从岩性影响中区分出孔隙流体的影响等<sup>[56]</sup>。这意味着利用基于小波变换的时频分析可以由地震响应对储层的岩性做出预测，甚至能够检测是否有油气的存在。但要做到这一点有一个先决条件，就是需要有井资料作约束标定，而这会使其功用大打折扣。勘探决策期望的是在布井之前就对油气储层做出比较准确的预测，即进行无井标定的储层刻画。研究历史表明，现有基于地震属性分析的储层刻画方法很难做到这一点。即使有井资料作约束的储层预测也常有失误，特别是在缝洞发育的碳酸盐岩地区更是如此。分析现有储层刻画方法发现，除AVO分析等少数方法外，大部分基于地震属性分析的储层刻画方法是由已知推未知，很少考虑输入信号（震源）。从这点讲，目前的储层刻画使用的主要是模式识别方法而非系统辨识方法。模式识别方法的有效性取决于识别对象与训练样本的一致性，对缝洞型油气藏这样复杂多变的系统，很难做到训练样本与识别对象的一致，因而出现失误也就在所难免。

油气藏的地震响应可视为油气藏系统的输出信号，其特征首先取决于输入信号。基于模式识别的储层地震刻画可视为不考虑输入信号的系统响应分析，这在理论上是不完备的，在实践上是有缺陷的，表现在应用效果上是不稳定的。完备的油气藏地震响应的属性分析应以输入信号（震源）的属性分析为基础，即进行系统辨识意义上的储层地震刻画。基于系统辨识的储层刻画与基于模式识别的储层刻画有所不同，前者使用的数据主要是输入输出信号（即地震源信号与地震响应），对井资料的约束需求较少，因此有可能在勘探的初期阶段就对储层的岩性与含油气性做出比较准确的预测评价。系统辨识的关键是选择恰当的探测信号，最佳的探测信号是伪随机信号<sup>[6]</sup>。但目前地震勘探的输入信号基本上都是可用雷克子波近似的确定性信号，不满足进行系统辨识的要求。为利用系统辨识方法研究缝洞型等复杂油气藏，提高勘探效益与效率，需要进行以伪随机信号作为系统输入的地震勘探，即进行伪随机源地震勘探。

#### **关于术语“油气藏”与“储层”的注释**

“油气藏”与“储层”两个概念既有联系又有区别，“油气藏”指包含油气储层的岩石组合系统，“储层”指油气富集赋存的岩石；“储层”是“油气藏”最重要的组成部分，也是油气勘探的直接目标。“储层”所指大致相当于“reservoir”，“油气藏”所指大致相当于“traps”。本

报告在讨论地震响应与成像时针对的主要是油气藏，讨论地震刻画时针对的主要是储层。

## 主要参考文献

1. 国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006-2020),  
<http://www.most.gov.cn/ztl/gjzcggy/zcggygynr/>
2. Chopra,S. and K. J. Marfurt, 2005, Seismic attributes - A historical perspective, *Geophysics*, Vol. 70(5), P. 3S0–28S0.
3. Castagna J.P., 2001, Recent advances in seismic lithologic analysis, *Geophysics* 66(1) P.42–46
4. Lennart Ljung 等著, 2004, 《系统辨识》(英文版), 清华大学出版社。
5. Manolakis D. G, et al., 2005, *Statistical and adaptive signal processing*, Artech House.
6. MacWilliams F. J. and N.J. Sloane, 1976, “Pseudo-Random Sequences and Arrays”, *Proc. IEEE*, Vol.64, pp.1715-1729
7. 贺振华, 黄德济, 胡光岷等, 1999, 复杂油气藏地震波场特征方法理论及应用. 四川科学技术出版社, 成都。
8. 贺振华, 杜正聪, 文晓涛. 碳酸盐岩喀斯特溶洞和裂缝系统的地震模拟与预测. 地球科学进展, 2004, 399
9. 贺振华等编, 2005, 裂缝储层地震学——致密油气储层裂缝系统地震检测和预测研究进展.
10. 姚姚, 2005, 菲涅耳带与洞缝型油气藏地震波场, 石油物探, 2005, 44(5), P.491-495.
11. Yao Yao et al., 2005, Research on the Seismic Wave Field of Karst Cavern Reservoirs near Deep Carbonate Weathered Crusts, *APPLIED GEOPHYSICS*, 2(2), P.94-102.
12. Weaver R. L. and Lobkis O. I., 2001, Ultrasonics without a Source: Thermal Fluctuation Correlations at MHz Frequencies, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 134301.
13. Snieder,R., 2004, Extracting the Green’s function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase, *PHYSICAL REVIEW E* 69, 046610
14. Wapenaar K., Thorbecke J. and Draganov D., 2004, Relations between reflection and transmission responses of three-dimensional inhomogeneous media, *Geophys. J. Int.*, 156, 179-194.
15. Campillo, M. and Paul, A., 2003, long-range correlations in the diffuse seismic coda, *Science* 299: 547-549
16. Shapiro, N. M., et al., 2005, High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise, *Science*, 307: 1615-1618
17. Weaver, R., 2005, Information from Seismic Noise, *Science*, 307: 1568-1569
18. Pandolfi D., et al., 2006, Coda wave interferometric detection of seismic velocity changes associated with the 1999 M = 3.6 event at Mt. Vesuvius, *EOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 33, L06306, doi:10.1029/2005GL025355.
19. [http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/EP\\_Technologies/ExplorationTechnologies](http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/EP_Technologies/ExplorationTechnologies)
20. 贺振华等编, 2005, 裂缝储层地震学——致密油气储层裂缝系统地震检测和预测研究进展.
21. Graham L C. 1974, Synthetic interferometric radar for topographic mapping. *Proc of the IEEE*,

- 62: 763~ 768.
22. 唐智,周荫清,李景文,2005,干涉合成孔径雷达信号处理研究综述,遥测遥控, Vol.26(3), p.1-9.
  23. Claerbout, J. F., 1968, Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, 33,264-269.
  24. Richett, J., and Claerbout, J., 1999, Acoustic daylight imaging via spectral factorization: *Helioseismology and reservoir monitoring, The Leading Edge*, 18 957-960.
  25. Schuster, G.T., Yu, J., Sheng, J., and Rickett, J., 2004, Interferometric/daylight seismic imaging: *GJI* 157, 838-852.
  26. Schuster, G.T., Zhou M.,2005, A Theoretical Comparison among Model-Based and Correlation-Based Redatuming Methods, 75<sup>th</sup> SEG Abstract Expand.
  27. Xiao X., Zhou M., and Schuster G. T. 2005, Salt flank delineation by PS interferometric imaging, 75<sup>th</sup> SEG Abstract Expand.
  28. 戚征, 1972, 伪随机序列, 数学的实践与认识, No.4
  29. 何继善, 2006, 双频地电场理论, 中国论文下载中心  
(<http://www.studa.net/paper/Physics/060123/11491481.html>)
  30. M·贝克, 2003, 使用同步发射的基于伪随机序列的地震信号进行地震勘测的方法及设备, 专利: CN03121793.1
  31. 常旭、程大祥、刘伊克等, 2005, 伪随机可控震源方法在近地表强噪声勘探中的应用. 中国地球物理学会年第 21 届地球物理年会论文集. 长春, p.646.
  32. Zadeh L.A., 1962, From circuit theory to system theory, *Proc. IRE*. Vol.50.
  33. Brown, A. R., 1996, Seismic attributes and their classification: *The Leading Edge*, 15, 1090.
  34. Payton, C. E., ed., 1977, *Seismic stratigraphy — Applications to hydrocarbon exploration: American Association of Petroleum Geologists Memoir* 26.
  35. Taner, M. T., F. Koehler, and R. E. Sheriff, 1979, Complex seismic trace analysis: *Geophysics*, 44, 1041–1063.
  36. de Figueiredo, R. J. P., 1982, Pattern recognition approach to exploration, in R. J. P. de Figueiredo, ed., *Concepts and techniques in oil and gas exploration: SEG*, 267–286.
  37. Conticini, F., 1984, Seismic facies quantitative analysis: New tool in stratigraphic interpretation: 54<sup>th</sup> Ann. Int. Mtg, SEG, session S18.3.
  38. Thadani, S. G., F. Aldabert, and A. G. Journel, 1987, An integrated geostatistical/pattern recognition technique for characterization of reservoir spatial variability: 57<sup>th</sup> Ann. Int. Mtg. SEG, session SEG 1.2.
  39. White, R. E., 1991, Properties of instantaneous seismic attributes: *The Leading Edge*, 10(7), 26–32.
  40. Mallat, S. and Hwang, W. L., 1992, Singularity Detection and processing with wavelets, *IEEE transactions on Information theory*, Vol 38( 2).
  41. Okaya, D. A., 1995, Spectral properties of the Earth's contribution to seismic resolution: *Geophysics*, 60, 241–251.
  42. Luo, Y., W. G. Higgs, and W. S. Kowalik, 1996, Edge detection and stratigraphic analysis using 3-D seismic data: 66<sup>th</sup> SEG, Expanded Abstracts, 324–327.

43. Chen, Q., and S. Sidney, 1997, Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring: *The Leading Edge*, 16, 445–456.
44. Marfurt, K. J., R. L. Kirlin, S. L. Farmer et al., 1998, 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm: *Geophysics*, 63, 1150–1165.
45. Partyka, G, J Gridley and J Lopez, 1999. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, 18, 353.
46. Partyka, G., J. Gridley, and J. Lopez, 1999, Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization: *The Leading Edge*, 18, 353–360.
47. 李霞等编译, 2000, 俄罗斯地球物理勘探前沿技术文集, 石油工业出版社. 北京.
48. Chopra, S., 2002, Coherence cube and beyond: *First Break*, 20(1), 27–33.
49. Duncan, W., P. et al., 2002, Comparison of 3-D edge detection seismic attributes to Vinton Dome, Louisiana: 72nd SEG, Expanded Abstracts, 577–580.
50. Castagna, J, S Sun & R Siegfried, 2003. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, February
51. Chopra, S., D. et al., 2004, Multi-attribute seismic analysis — Tackling non-linearity: *First Break*, 22, no. 12, 43–47.
52. Matt H. and Eric T., 2004, Predicting stratigraphy with spectral decomposition, *The Leading Edge*,
53. Brown, A. R., 2004, Interpretation of three-dimensional seismic data, 6th ed.: American Association of Petroleum Geologists Memoir 42.
54. 陈树民, 于晶, 2004, 松辽盆地北部储层预测技术发展历程及岩性油藏地震识别技术, 大庆石油地质与开发, 23 (5)
55. Galikeev, T., and T. Davis, 2005, Time-lapse seismic attributes and reservoir volumetric calculation: 67th Ann. Int. Mtg., European Association of Geoscientists and Engineers, Z99.
56. Devi, K. R. S. and. Cohen1, A. J., 2005, Analysis of seismic singularity spectra in terms of the sensitivity to reservoir properties, Proc. Rainbow in the Earth – 2nd International Workshop 2005

## 2. 研究内容、研究目标，以及拟解决的关键问题

### ● 研究目标

研究发展基于干涉成像与系统辨识的缝洞型油气藏伪随机地震刻画理论方法。

### ● 研究内容

#### (1) 缝洞型油气藏伪随机地震响应的分析与计算

以缝洞型碳酸盐岩油气藏为原型构建强多尺度非均质介质模型, 使用高阶时域有限差分 (FDTD) 方法, 分三种情况模拟计算模型对伪随机时序调制脉冲探测信号的响应 (地质介质中不同物性的组相 (岩石矿物) 的分布具有随机性,

但在具体的研究中，模型对象是确定的；对随机性的研究主要通过研究不同结构的模型来实现。因此，在如下的陈述中不再显式提及随机性问题）

- ① 多尺度非均匀介质，声波方程；
- ② 多尺度双相非均匀介质，弹性波方程；
- ③ 多尺度各向异性非均匀介质，弹性波方程。

理论上讲，最接近实际情况的模拟应是基于各向异性双相非均匀介质模型与粘弹性波动方程的模拟，但考虑到问题的复杂性与难度，本项目暂未将其列入研究计划。

## (2) 伪随机地震勘探数据采集试验

作为新的方法技术，伪随机地震勘探的可行性必须以实验证明。考虑到在实验室物理模拟缝洞型油气藏的成本较高，难度较大，拟在野外寻找适当场地，人工开挖构建典型地质结构模型，租用伪随机可控震源，使用我们自己的地震仪器，进行伪随机地震勘探的数据采集试验，为干涉成像与系统辨识研究提供试验数据。

拟在研究工作取得初步的理论成果后寻求油气勘探生产部门的协助，在已知油气藏上进行真实环境下的伪随机地震勘探实验。

## (3) 多尺度非均匀介质伪随机地震干涉成像

拟从不同的理论假设出发，分四种情况研究，以寻找最有效的成像方法：

- ① “道”相干，偏移成像。逐道计算相邻道的互相关，形成相干道集，然后对相干道集进行偏移成像。
- ② “道”相干，逆散射成像。通过相邻道相关方法逐道求取道间 Green 函数，然后进行逆散射反演成像。
- ③ “像”相干，干涉成像。对同一观测阵列记录的两个炮集的地震图像分别进行变换得到两幅复图像；对复图像进行配准后计算其相干性并获得干涉相位图；对干涉相位滤噪后进行相位展开，然后使用基于小波的自适应反褶积等方法进行散射源图像重建。
- ④ “伪散射”散射源密度概率成像。缝洞型油气藏可视为地质剖面中的一个局部异常（塔里木盆地碳酸盐油气储层的埋深一般为 5000 米左右，储层纵

向延展范围一般不超过 300 米)。剖面的绝大部分区域的结构可用常规成像方法精确确定，因而可视为已知。由此，缝洞型油气藏响应也可宏观地视为是已知结构模型中的局部散射，因此可由差分方法提取的“散射场”进行逆散射成像。考虑到缝洞型油气藏的宏观“散射”响应是其微观缝洞集群散射的干涉叠加，因此应进行散射源分布的密度概率成像。

本项研究是本项目的研究重点。

#### (4) 基于系统辨识的油气储层预测研究

①对伪随机源信号与伪随机地震响应记录分别作基于小波变换的时-频-幅分析，对比筛选变化幅度较大、特征性明显的属性参数作为系统响应，以物性参数表示油气藏系统的岩基岩性与流体，以标度参数表征系统的结构特征；分别建立线性与非线性系统辨识模型并求解。

②以伪随机源信号与伪随机地震记录的相干扰动为系统响应，以物性参数表示油气藏系统的岩基岩性与流体，以标度参数表征系统的结构特征；分别建立线性与非线性系统辨识模型并求解。

本项研究是本项目的另一个研究重点。

#### (5) 基于贝叶斯估计的信息融合与油气储层刻画

以干涉成像等方法获得的油气藏几何结构框架及其它先验知识为基础，以贝叶斯 (Bayesian) 估计为准则，融合系统辨识获得的各种储层刻画参数的概率密度分布，形成复杂油气藏的综合刻画图像。

### ● 拟解决的关键问题

#### (1) 强非均匀介质中伪随机地震波场的模拟计算

缝洞型油气藏可描述为多尺度随机强非均匀介质。地震波在此类介质中传播时除反射、透射、折射外，还会发生散射、多次散射以及反复的干涉。现有地震模拟方法考虑的场源多是确定性的单次脉冲，尚未曾见有对伪随机多次脉冲场源情况的模拟研究报道。伪随机地震响应的计算与传统的地震响应的计算的差别远不只是源的不同，最主要的可能是在前一种情况下波动在介质系统中传播时会发生干涉调制。

## （2）多尺度强非均匀介质的伪随机地震干涉成像

现行地震成像方法以确定性单次地震事件的响应为研究对象。伪随机地震在随机非均匀介质中传播时会发生干涉调制，响应记录是系统在观测点处的相干输出，记录上事件的到时不具有通常意义上的时-距含义。因此，现行地震成像方法不能直接推广应用于伪随机地震记录的反演成像。

基于 R. L. Weaver 与 K. Wapenaar 等人的理论发展起来的干涉地震成像方法目前针对的主要是随机散射源的一次场（“直达波”）记录，而伪随机地震勘探的干涉成像针对的主要是“二次散射”场记录。如何将现有针对“一次”散射场数据的干涉成像方法推广应用到伪随机地震勘探的“二次散射场”数据的反演解释，有许多理论与技术问题需要研究解决。

## （3）基于系统辨识的油气储层预测

现有油气储层预测方法基本上都可归为模式识别。基于模式识别的油气储层预测采用的是“由已知推未知”，需要以井资料作约束标定。基于系统辨识的油气储层预测采用的是由系统的输入输出推断系统的结构与属性。基于系统辨识的储层预测与基于模式识别的储层预测有较大的不同，前者理论上无需井资料的约束标定，但它需要确切的知道输入信号。目前未能见有基于系统辨识的油气储层预测研究报道。进行基于系统辨识的油气储层预测必须研究解决两个关键性的问题：一是选择恰当的岩石与孔隙流体物性参数及微观结构特征标度参数表征缝洞型油气储层，二是建立基于系统辨识的油气储层预测模型。

### 3. 拟采取的研究方案及可行性分析

- **研究方案与技术路线**（参见如下框图）

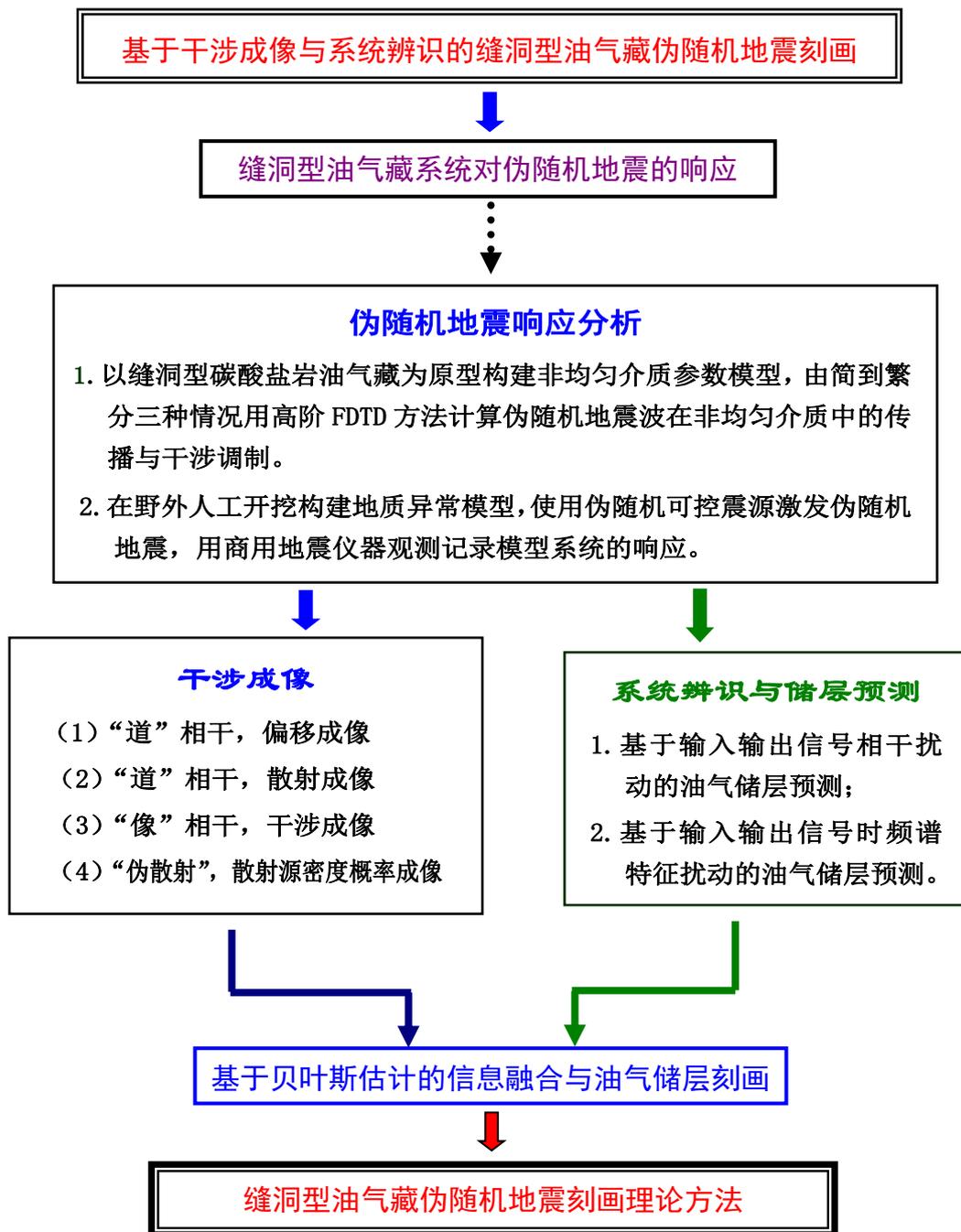


图 1 研究方案与技术路线框图

● **关键技术问题的解决方案**

(1) 缝洞型油气藏伪随机地震响应的分析与计算

在油气地球物理勘探领域，国内外对复杂介质中的地震波模拟都进行过很多深入的研究，发展了许多有效的算法，但所考虑的源基本上都是确定性子波；

在地震灾害分析领域，对建筑结构或特定地质体的随机地震响应也进行过许多模拟研究，但所考虑的主要是能量与最大位移问题，甚少计算时序响应信号。本研究拟以多尺度强非均匀介质近似描述缝洞型油气藏，以现有地震波 FDTD 模拟方法与计算程序为基础，研究发展多尺度强非均匀介质中伪随机地震波场的数值计算方法并开发相应的计算程序。

## (2) 随机非均匀介质的伪随机地震干涉成像

拟在前人研究的基础上，采用四种方法进行伪随机地震观测数据的干涉成像，以在有所比较的基础上发展适合油气勘探的干涉成像方法。

### (i) “道”相干，偏移成像

其基本思路可概括为：

① 记  $A, B$  两点处的频域伪随机地震响应为：

$$\begin{aligned}\bar{d}_A &= W_i(\omega)e^{i\omega\tau_{sA}} - W_i(\omega)Re^{i\omega(\tau_{sA'} + \tau_{A'r'} + \tau_{rA})} + o.t. \\ \bar{d}_B &= W_i(\omega)e^{i\omega\tau_{sB}} - W_i(\omega)Re^{i\omega(\tau_{sA} + \tau_{Ar} + \tau_{rB})} + o.t.\end{aligned}$$

式中  $W_i(\omega)$  表示第  $i$  个散射源的子波， $\tau_{sB}$  表示波从散射源到点  $B$  的旅行时（其它相似项类推，唯  $A'$  标示  $A$  的镜像位置）， $o.t.$  表示除直达波与镜像反射之外的其他波。

② 计算两道的互相关，得

$$\begin{aligned}\Phi(A, B) &= d_A^* \cdot d_B = -|W_i(\omega)|^2 Re^{i\omega(\tau_{Ar} + \tau_{rB})} + o.t. \\ &\approx -|W_i(\omega)|^2 Re^{i\omega(\tau_{Ar} + \tau_{rB})}\end{aligned}$$

③ 对相干道集进行偏移成像，得

$$m(x) = \sum_{\omega} \sum_{A, B} \Phi(A, B) e^{-i\omega(\tau_{Ax} + \tau_{xB})} = \sum_{A, B} \phi(A, B, \tau_{Ax} + \tau_{xB})$$

式中的  $e^{-i\omega(\tau_{Ax} + \tau_{xB})}$  为伪偏移核， $\phi(A, B, \tau)$  为  $A, B$  处记录的延时（ $t$ ）相关。

### (ii) “道”相干，散射成像

其基本思路可概括为：

① 记源  $s$  的散射为  $S_s(t)$ ，记距源  $s$  分别为  $r_1$  与  $r_2$  两点  $A, B$  处的

场响应为

$$p_{A,B} = \sum_s S_s \left( t - \frac{r_{A,B}}{V} \right) / r_{A,B}$$

② 计算  $p_A$ ,  $p_B$  在时长为  $T$  的时窗内的互相关, 得

$$\begin{aligned} C(\tau) &= \sum_{s,s'} \int_0^T S_s(t) S_{s'}(t + \frac{r_A^{s'} - r_B^{s'}}{V} + \tau) dt / r_A^{s'} r_B^{s'} \\ &\downarrow C_s(\tau) = \int_0^T S_s(t) S_s(t + \tau) dt \\ &= \sum_s C_s \left( \tau + \frac{r_A^s - r_B^s}{V} \right) / r_A^s r_B^s, \end{aligned}$$

其功率谱为

$$\begin{aligned} C(\omega) &= \sum_s |S_s(\omega)|^2 \frac{\exp[i\omega(r_B - r_A)/V]}{r_A r_B} \\ &= \overline{|S_s(\omega)|^2} \sum_s \frac{\exp[i\omega(r_B - r_A)/V]}{r_A r_B} \end{aligned}$$

③ 定义单位体积内的散射源密度为  $n_s$ , 以体积分替代相关道功率谱表达式中的求和, 得

$$C(\omega) = \overline{|S_s(\omega)|^2} \int \frac{\exp[i\omega(r_B - r_A)/V]}{r_A r_B} n_s dx dy dz$$

对沿  $y$  与  $z$  向的积分引用稳恒相位近似 (Bender, 1978), 得

$$\begin{aligned} C(\omega) &= 2\pi \overline{|S_s(\omega)|^2} \frac{V}{-i\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{ik(|R-x|-|x|)}}{\|R-x|-|x|\|} n_s dx \\ &\approx 8\pi^2 \overline{|S_s(\omega)|^2} \left( \frac{V}{-i\omega} \right) \times \left( -\frac{e^{ikR}}{4\pi R} \int_{-\infty}^0 n_s dx - \frac{e^{ikR}}{4\pi R} \int_R^{\infty} n_s dx \right) \end{aligned}$$

式中  $R$  为位于  $x$  轴上  $A, B$  两点间的距离, 坐标系的原点置于点  $A$  处。

④ 离散上式并考虑所有的时窗与频率, 形成关于散射密度  $n_s$  的线性方程系统, 求解即可得散射源密度分布图像。

(iii) “像” 相干, 干涉成像

其基本思路可概括为:

① 设在相距为  $R$  的两炮点  $A, B$  处分别激发伪随机地震波, 在地面使用同一观测阵列进行观测, 记所得共炮点道集为  $S_A(t)$  与  $S_B(t)$ , 对其进行 Hilbert 变换得复数道集  $S_A(\omega)$  与  $S_B(\omega)$ 。

②进行两复数图像的图像配准与相干性计算,获得相干性图与干涉相位图;

③滤去干涉相位图的噪音并进行相位展开

④使用基于小波的自适应反褶积等变换方法进行散射源图像

(iv)“伪散射”散射源密度概率成像

其基本思路可概括为:

①记观测数据集为  $S_{ob}(\tau)$ , 记猜测或已知背景介质模型的理论响应数据为  $S_{ct}(\tau)$ , 定义目标体的伪散射场  $s_{scat}(\tau) = S_{ob}(\tau) - S_{ct}(\tau)$

②用逆散射方法由伪散射场  $s_{scat}(\tau)$  反演重建“散射源”的概率密度分布。

### (3) 基于系统辨识的油气储层预测

油气储层预测的惯常做法是在已知油气藏上(通常指有井资料作标定的油气储层)用统计或模式识别方法总结储层参数与地震属性参数之间的相关性规律,然后由已知推未知。本研究拟以储层的岩石物性参数、孔隙流体参数以及微观结构标度参数表征油气储层的属性与特征,分四种情况直接由系统的输入(伪随机地震的源信号)输出(伪随机地震的观测记录)推求系统表征参数的数值:

(i)以输入信号(伪随机地震的源信号)与输出信号(地震记录)的相关扰动为系统响应,构建以系统表征参数为未知参量的线性系统响应模型并求解;

(ii)以输入信号与输出信号的相关扰动为系统响应,构建以系统表征参数为未知参量的非线性系统响应模型并用快速模拟退火算法求解;

(iii)对输入与输出信号分别作时频分析,以时频特征参数的扰动为系统响应,构建以系统表征参数为未知参量的线性系统响应模型并求解;

(iv)对输入与输出信号分别作时频分析,以时频特征参数的扰动为系统响应,构建以系统表征参数为未知参量的非线性系统响应模型并用快速模拟退火算法求解。

## ● 可行性分析

(1) 项目的研究方案与技术路线以既有研究工作为基础制定，理论上可行，实践上有可供借鉴的应用范例。本申请项目所涉及的干涉成像、系统辨识、伪随机信号的时频分析等在不同的领域都有相当深入的研究，理论成熟、方法技术完善。本项目研究涉及的关键问题之一：干涉地震成像也有可供借鉴的成功范例（图 2-3）。

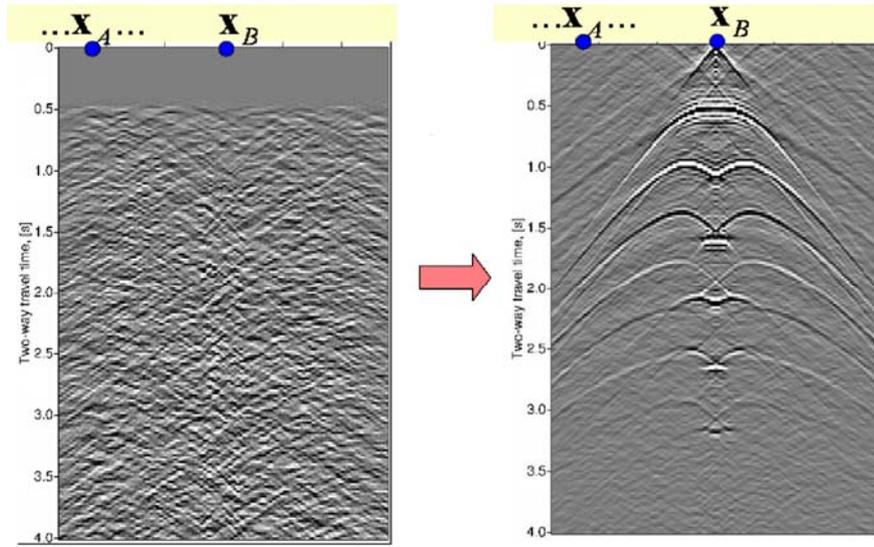


图 2 伪随机源声散射记录（左）与“道”相干图像（右）  
(Wapenaar at al., 2005)

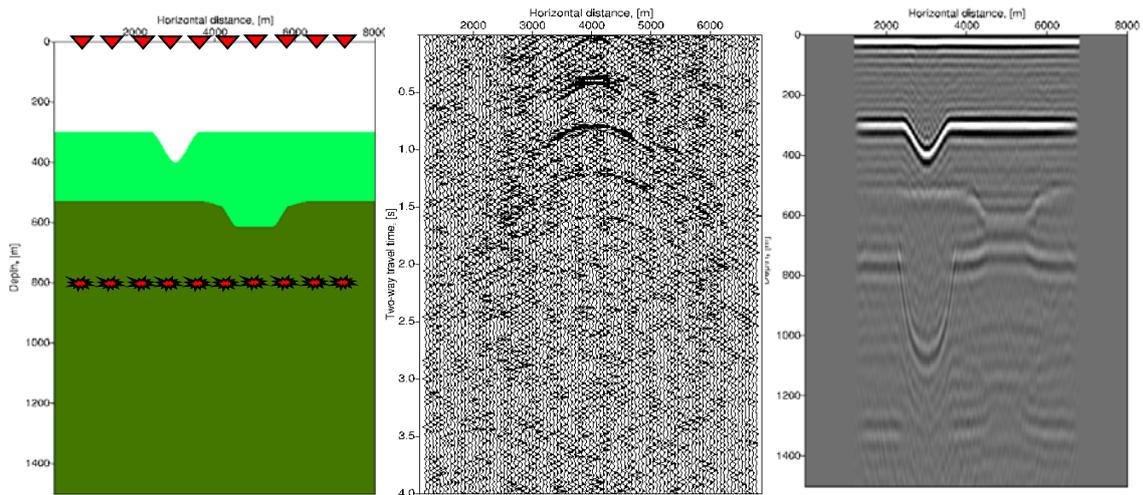


图 3 非均匀介质模型（左）的“反射”声场记录（中）与干涉成像（右）  
(Wapenaar at al., 2005)

(2) 课题组势力强大，研究工作基础雄厚，科研攻关能力强，有能力完成预定的研究任务。我们的课题组年龄上老中青相结合，学缘上物探、地质、数学、物理、计算机多学科相结合，人员上以博士研究生为生力军，并不断有新的成员加盟，朝气蓬勃，势力强大；课题组主要成员长期从事石油地球物理勘探，承担完成各类有关研究课题超过百余项，在复杂介质中的地震波场模拟、地震偏移成像、岩石缝洞识别、油气储层刻画、岩石物理等方面取得了多项创新的成果，先后获国家科技进步三等奖 2 次、省部级科技成果奖 10 余次，发表有关论著 200 余篇部，培养博硕士研究生 80 多名，课题组的研究工作基础雄厚，科研攻关能力强。

(3) 国际联系广泛，能与世界学科前沿保持同步发展。

申请者

2001 年以来先后在英国莱斯特大学、日本东京大学、美国麻省理工学院（MIT）作访问学者；

总之，课题组成员与国外同行保持有极为密贴的联系，能及时获知国外的研究动态与进展，使我们的研究工作能与世界学科前沿保持同步发展。

(4) 具有良好的工作条件，能安心开战研究工作。申请者及半数课题组成员都是成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室与“地球探测与信息技术”教育部重点实验室的负责人或研究人员，可以便利的使用实验室功能强大的并行集群计算机系统、先进的岩石物理测试系统，以及丰富的地震模拟和处理解释软件，因此具有很好的研究工作条件。

综上，申请项目的研究工作以既有理论与技术成果为基础，目标明确、内容具体，技术路线切实可行；课题组研究工作雄厚，科研攻关能力强，国际学术联系广泛，工作条件良好，有能力、有条件完成预定任务，达到预期目标。

## 4. 项目的特色与创新之处

### 主要特色

**持续探索、借鉴发展、累积创新。**

本研究项目是申请者在复杂油气藏地震波场特征、缝洞油气藏地震刻画、电磁场散射成像等多个国家自然科学基金课题的研究基础上新提出的研究课题，是

课题组主要成员长期从事油气地球物理勘探研究的升华。研究方案综合借鉴了伪随机信号系统探测、干涉合成孔径雷达、系统辨识、现代数字信号分析等学科领域解决类似问题的思维方法与最新研究成果，体现了科学研究持续探索、借鉴发展、累积创新的原则。

### **主要创新**

- (1) 提出并研究发展伪随机地震复杂油气藏勘探方法技术
- (2) 提出并研究发展基于系统辨识的油气储层预测方法技术

## **5. 年度研究计划及预期研究结果**

### **年度研究计划**

2007. 01-2007. 12: (1) 研究并编程实现多尺度强非均匀介质中伪随机地震波场的数值计算，并进行典型缝洞油气藏结构模型伪随机地震响应的数值模拟实验；(2) 研究论证伪随机地震记录的干涉成像反演算法；(3) 伪随机地震勘探数据采集试验。

2008. 01-2008. 12: (1) 研究并编程实现随机非均匀双相介质与随机非均匀各向异性介质中伪随机地震波场的数值计算，并进行典型缝洞油气藏结构不同近似模型响应的对比分析；(2) 编程实现伪随机地震记录的干涉成像算法；(3) 基于系统辨识的油气储层预测方法及模型研究。

2009. 01-2009. 12: (1) 伪随机地震记录干涉成像数值实验与算法完善；(2) 伪随机地震记录的时频分析；(3) 基于系统辨识的油气储层预测方法及算法研究；

2010. 01-2010. 12: (1) 伪随机地震记录干涉成像实验；(2) 基于系统辨识的油气储层预测实验；(3) 基于贝叶斯估计的信息融合与油气藏刻画；(4) 缝洞型复杂油气藏伪随机地震勘探方法效果总结；(5) 撰写研究报告。

研究计划执行期间地球探测及相关学科领域肯定会有许多新的探索与进展，我们将密切关注并及时吸收最新的研究成果以为我之所用；研究工作的部署拟齐头并进与重点突破相结合，力争早出成果，出好成果。

### **国际合作与交流计划**

(1) 研究计划执行期间拟于2009年秋举办伪随机地震与缝洞油气藏勘探国际学术讨论会；

(2) 国际学术交流不少于8人次，课题组成员参加国际学术会议不少于10人次，参加国内学术会议不少于20人次。

(3) 计划与美国麻省理工学院（MIT）地球资源实验室（ERL）Dan Burns, Youshun Sun, Jonathan Ajo-Franklin 等, 在伪随机地震波场模拟、地震干涉成像等方面进行合作研究。

### **预期研究成果**

**理论成果：**奠定利用伪随机地震进行地球探测与复杂油气藏勘探的理论方法基础；发表论文30-40篇，其中国内外核心期刊 20 篇以上；

**技术成果：**研究建立基于系统辨识的油气储层伪随机地震刻画方法技术；研究建立非均匀介质的伪随机地震干涉成像方法技术；争取申请获得1-2项专利。

**人才培养：**培养博士8-10人，硕士10-15人。