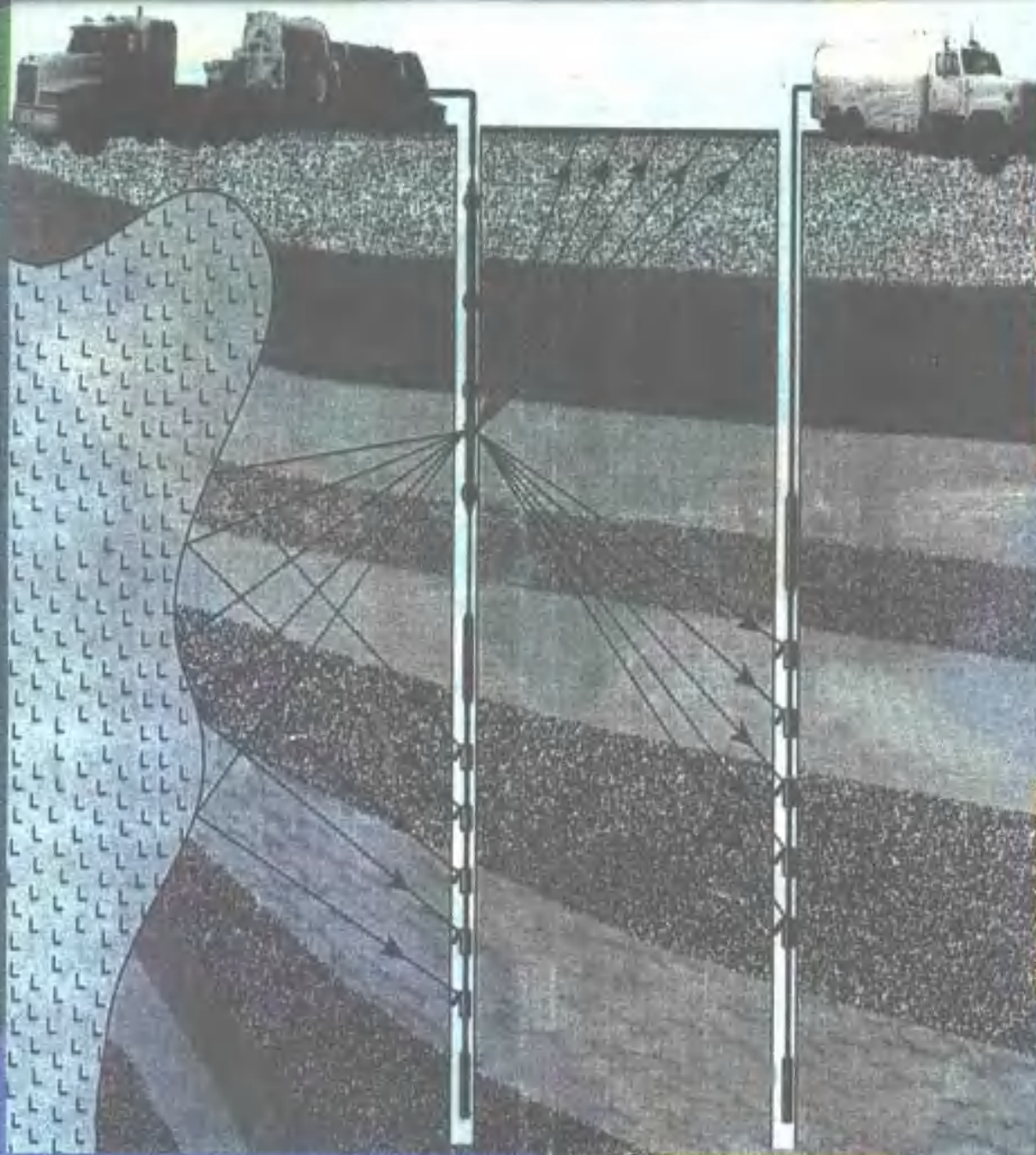




刘 合 王玉普 隋 军 薛家峰 刘 兵 编写

国外井间地震技术

石油工业出版社

登录号	126135
分类号	P631.4
种次号	065

国外井间地震技术

刘合 王玉普 隋军 薛家峰 刘兵 编写

5071/21



石油0121428

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对国外井间地震技术的发展动态、关键技术和实践经验进行了分析研究。重点总结了国外井间地震野外数据采集方法、井下震源和井下信号接收系统的研制现状,以及井间地震数据的处理方法和应用领域;其后介绍了井间地震技术用于油藏描述、确定剩余油分布和了解蒸汽驱油效果等典型实例。

本书可供从事油田开发的工程技术人员,以及面向油田开发的地球物理勘探人员学习;也可供石油院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

国外井间地震技术/刘合等编写.

北京:石油工业出版社,1998.7

ISBN 7-5021-2321-0

I. 国…

II. 刘

III. 地震勘探

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 16023 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里一区一号楼)

石油工业出版社印刷(排版印刷)

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 6 $\frac{3}{4}$ 印张 162 千字 印 1—1000

1998 年 7 月北京第 1 版 1998 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2321-0/TE·1936

定价:15.00 元

前 言

井间地震技术是油气田勘探开发领域的一项新技术，它将发射系统和接收系统分别下入井中，在目的层进行地震波的激发和接收，通过记录波的走时、振幅、频率等参数重新勾出井间介质的幅度分布图，再利用测井或地面地震资料，经过反复模拟，可以了解地下介质的结构特征和物性变化情况。

利用井间地震成像技术，可以圈定矿体的位置、形态和范围，并在矿产探查和工程探测井中得到应用。也可以进行油气储集层空间分布研究和油气开采中储集层参数动态监测，促进了开发地震学的发展。

井间地震测量原理于 1917 年首次提出，最初的应用目的是确定矿体的位置与分布范围，随后又在建筑工程领域作为检测方法使用，用于测量大型工程项目的基础质量。早在 60 年代末这种方法就已移植到油气勘探领域，1972 年美国《地球物理》杂志报道了首次井间地震方法在油田上试验情况，由于那次试验使用的设备简陋，成像结果粗糙，虽然试验产生了一定效果，也显示出这种方法良好的应用潜力，但未能引起人们的广泛重视，也未能在这一领域中推广使用。在沉寂了若干年之后，到 80 年代，地学领域的计算机技术取得了突破性进展，医学上应用效果良好的计算机层析成像（CT）技术得到成功的移植，形成了大家熟悉的地震层析成像（ST）技术，这使得人们重视起井间地震技术，并投入了相当大的力量，从事井下地震设备和数据处理、成像与解释方面的研究。到 90 年代初，研究工作取得了可喜的进展，经大量的现场试验证实，井间地震技术因其作业方式的特殊性而能够使获得的资料具有其它地震资料无法比拟的分辨能力，是解决油藏特性描述、生产动态监测和确定剩余油分布等问题的理想方法。因此，国外许多专家曾预言，在今后 10~20 年里，井间地震技术将作为开发地震的一个重要手段，广泛用于解决油气田开发与开采阶段中的地质与工程问题。

象其它地震技术一样，井间地震技术也包括野外数据采集、数据处理和资料分析与解释等内容的具体方法，同时由于它的特殊作业方式，因而对地震设备有着特殊的要求。因此，本文将井间地震技术划分为 4 个部分：

- (1) 井间地震野外数据采集方法
- (2) 井下震源与信号接收系统的研制现状
- (3) 井间地震数据处理的方法
- (4) 井间地震资料的应用领域与应用方法

在井间地震野外数据采集部分中，我们将着重介绍目前国外使用的主要数据采集方法，提供一种野外数据采集设计标准供参考，同时就地震设备的选择问题谈谈我们的看法。在井下地震设备研制部分，我们将系统介绍国外现阶段井下震源系统和地震信号接收系统的研制状况，并提供一些设备样图供参考，同时介绍井间地震技术对井下设备的具体要求，以及今后这类设备研制工作的发展方向。在井间地震数据处理部分，我们将系统介绍国外目前使用的常规处理阶段和成像方法，重点强调层析成像法、反射波成像法和井间地震连续测井诊断

法。在井间地震资料的应用部分，我们将介绍根据井间地震资料推导储层特性参数分布的方法，以及井间地震资料和推导的参数分布图在油藏特性描述、建模和生产动态监测等过程中的应用方法。最后，我们挑选出一些国外应用实例供读者参考，以便读者能够更好地了解这项技术及其应用潜力。

目 录

第一章 井间地震野外数据采集方法	(1)
第一节 井间地震数据采集方法.....	(1)
第二节 野外数据采集设计.....	(3)
第三节 井间地震观测设备的选择.....	(4)
第二章 井下震源系统研制现状	(6)
第一节 井下震源系统的发展历程.....	(6)
第二节 现阶段井下震源类型与研制特点.....	(8)
第三节 部分井下震源系统的结构配置及原理.....	(10)
第四节 井下震源的特性分析与理想化指标.....	(25)
第三章 井下信号接收系统研制现状	(30)
第一节 井下信号接收系统类型与研制特点.....	(30)
第二节 部分新型井下信号接收系统的结构配置与性能指标.....	(37)
第四章 井间地震数据处理方法	(47)
第一节 井间地震数据的常规处理方法.....	(47)
第二节 井间地震数据的非层析成像方法.....	(48)
第三节 井间地震数据层析成像方法.....	(52)
第五章 井间地震资料的应用领域与应用方法	(56)
第一节 井间地震资料在油藏特性描述中的应用.....	(56)
第二节 井间地震资料在油藏开采动态监测中的应用.....	(61)
第六章 实例	(67)
第一节 实例 1: 利用延时井间地震层析成像法描述储层的流通结构	(67)
第二节 实例 2: 井间地震层析成像确定老油田剩余油分布的实用方法	(70)
第三节 实例 3: Midway Sunset 油田利用井间地震层析成像法了解井间储层 非均质性和蒸汽驱效果	(75)
第四节 实例 4: Mc Elroy 油田的高分辨率井间地震成像结果	(80)
第五节 实例 5: 井下推靠式液压可控震源的野外测试	(87)
第六节 实例 6: 井间地震设备使用实例	(90)
参考文献	(100)

第一章 井间地震野外数据采集方法

井间地震数据采集方式与众不同，采用井下激发、相邻井井下接收的排列形式，记录井间地层传播的波场。主要特点在于地震设备能够靠近目的层，避开地面噪声和强衰减风化层，从而获得高频记录，加上记录中有效成分丰富和目的层覆盖效果好等特点，可以使井间地震资料有很高的空间分辨率，基本满足油藏工程的需要。基于这些特点，使它成为储层静态描述、油藏动态监测和确定剩余油分布的理想方法。

在井间地震数据采集集中，有单井激发、相邻单井接收和单井激发、相邻多井接收两种排列部署形式，可以产生一条或多条地震剖面，进行二维或三维地震解释。目前，在实际井间地震数据采集作业中，采用的井间距多为 50~500m，震源和信号接收系统的下井深度多为 300~2000m，目的层覆盖角度能够达到 270°和 360°（图 1—1）。最常使用的数据采集排列形式包括共激发点道集、井接收点道集、YO-YO 道集和连续地震测井等四种形式。使用的井下地震设备有震源和信号接收系统，其中震源系统包括爆炸、径向辐射脉冲器、电火花、机械脉冲发生器、压电式机电换能器和控频扫描振动器等类型，信号接收系统包括单级、多级三分量检波器和多道水听器电缆等类型。使用的井上地震设备有记录系统和一些辅助装备。

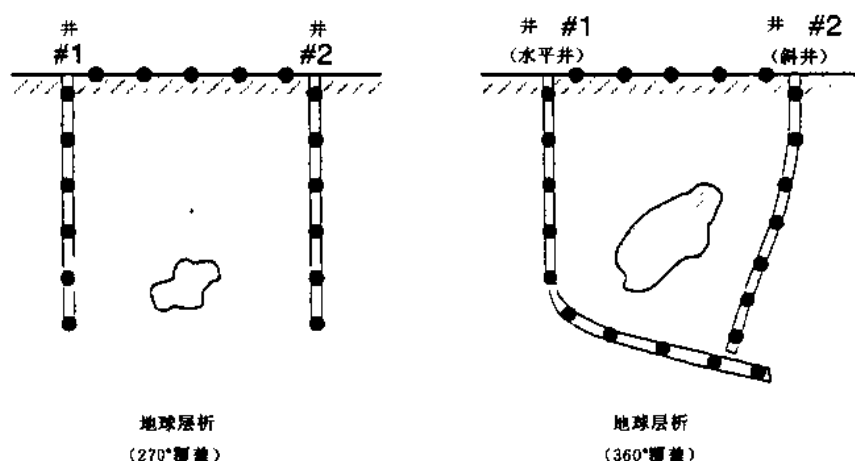


图 1—1 井间观测排列对目的层的覆盖角度

第一节 井间地震数据采集方法

无论是双井或多井采集排列的井间地震作业，如果没有特殊目的，地震观测排列均布置在风化层以下，以便提高成像分辨率。地震观测排列的形式因选用的采集方法不同略有差异，而选择采集方法需要考虑成像目的和成像方法的要求，以及兼故现场条件，设备性能和施工效率要求等多种因素的影响。目前国外最常见的采集方法及对应的观测方式有四种。

1. 共激发点道集数据采集方法

这种方法以单点激发、多点接收的观测方式采集地震数据，如图 1—2 所示，比较适合在震源连续激发性能较差且接收器为多级（道）检波系统情况下使用，具有采集速度快、效率高的特点。获得的共激发点道集可用于透射与衍射层析成像和反射波成像，其中在为进行透射层析成像处理采集数据时，要求至少有一口作业井的井深超过目的层，且满足目的层覆盖要求。

2. 共接收点道集数据采集方法

这种方法以移动式多点激发、单点接收的观测方式采集地震数据，如图 1—3 所示，适合在震源连续激发性能较好且接收器为单级检波系统情况下使用，但普遍施工效率不高（最近推出的悬空移动激发方式使施工效率明显改善）。获得的共接收点道集可用于透射与衍射层析成像和反射波成像，在采集透射层析成像数据时也有井深要求。

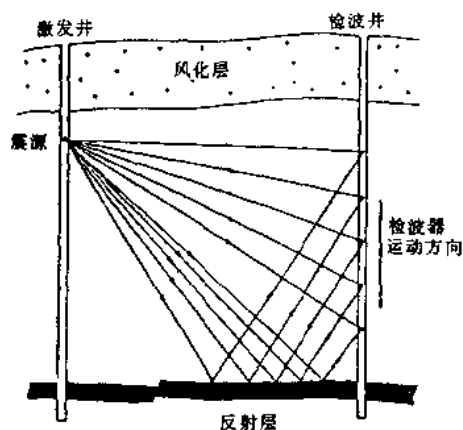


图 1—2 共激发点道集数据采集方法的观测形式

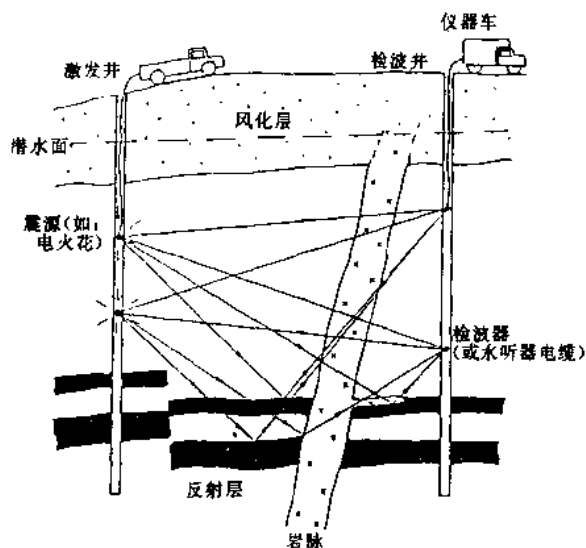


图 1—3 共接收点道集数据采集方法的观测形式

3. YO—YO 道集数据采集方法

这种方法采用激发点和接收点反向移动的观测方式采集地震数据（图 1—4），要求震源系统具有良好的连续激发性能。获得的道集多用于反射波成像，适合解决井深不符合透射层析成像要求时的目的层成像问题。

4. 井间地震连续测井方法

这种方法采用激发点和接收点等间距同向移动的观测方式采集地震数据（图 1—5），适合在震源连续激发性能较好且接收器为单级检波系统情况下使用。采集的道集既可以进行透射与衍射层析成像和反射波成像，但此时的施工效率不高，且有同样的井深要求，又可以进行简正波成像，这种资料主要用来解决地层连续性诊断问题。

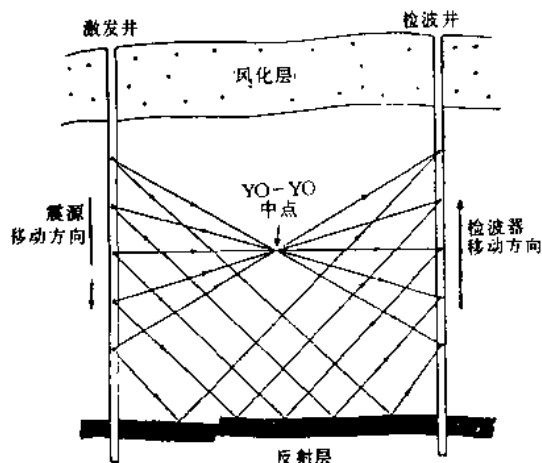


图 1—4 YO—YO 道集数据采集方法的观测形式

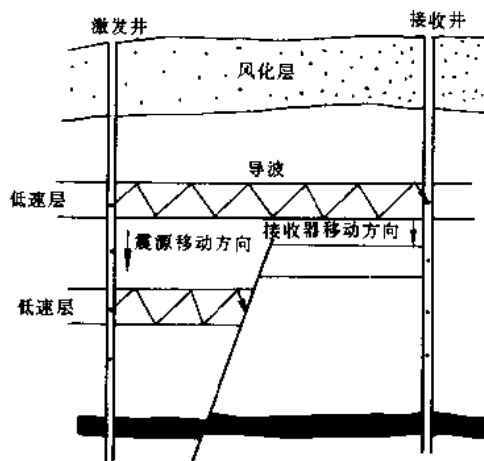


图 1—5 井间地震连续测井方法的观测形式

第二节 野外数据采集设计

在确认数据采集方法之后，设计野外具体采集方案也会受到多种相关因素的影响，而且很难为此提出一个具体的、有规范意义的设计程序和参数选择标准。从原则上说，这种方案设计将取决于作业区地质条件、成像目的和成像方法，在此基础上依据数据处理人员为采集提出的具体要求，并兼故设备性能、井眼条件、施工效率和成本等诸多因素的影响，选择具体采集参数。

德国鲁尔大学地球物理研究所曾经就进行透射层析成像处理的采集排列设计问题，利用模拟研究方法进行了讨论。由于透射层析成像是目前应用最广泛的井间地震数据成像方法，所以他们的研究结论有很高的参考价值。

1. 成像目标与采集排列形式之间的关系

按照正常的井间地震层析成像观测排列模式，人们无法观测到平行井眼方向的射线，直射线 SIRT 法的研究表明，只有当射线路径穿过成像目标和毗连时，才能准确地识别它的位置和形态。因此，在均质地区，采用有限视角的射线覆盖不会影响整个成像结果，但在速度异常地区，缺失的射线视角会在有关方向上使异常构造变得模糊。

2. 最佳空间分辨率

理论分析表明，层析图上的空间分辨率取决于排列参数（影响射线密度和网络空间）及走时拾取精度，只有当成像目标的速度异常导致穿透射线的走时延迟大于其拾取误差时，才能从层析图上识别这种目标。因此，空间分辨率的理论值应为：

$$\Delta \gamma_{\min} = \frac{\Delta t V_A V_m}{|V_A - V_m|}$$

其中 V_A 是异常速度， V_m 是基岩速度， Δt 是走时拾取误差。该式表明，成像区速度差和走

时数据精度是获得最佳空间分辨率的关键。从这种意义上说,在设计观测排列时,根据先验地质资料和希望达到的数据精度,可以估算 $\Delta\gamma_{\min}$,然后借助模型,为实现其目标选择最佳象元规格及激发点与接收点间隔。模拟结果表明:

(1) 最佳象元规格应该是 $\Delta\gamma_{\min}$ 的 1~1.5 倍;

(2) 由于重建图像的局部分辨率取决于局部射线密度,要保证最高分辨率,合理的最小激发点与接收点间隔应该等于选定的象元规格。

因此,设计高分辨率观测排列形式和选择采集参数的合理程序应该是:

(1) 根据先验地质信息和成像要求,估算可能达到的 $\Delta\gamma_{\min}$,并检验是否能够符合研究目标构造的要求;

(2) 确定相应的象元规格;

(3) 结合射线密度要求,选择必要的激发点和接收点间距,以便获得能够准确反映目标的图像元素。

这个程序可以作为设计的基本原则,尽管在实际设计方案时,会因成像区具体条件及不同成像方法要求上的差别,需要不同的参数,但按照这种原则提出具体要求,会使设计者获得最佳参数。

第三节 井间地震观测设备的选择

在井间地震野外数据采集中,直接使用的地震测量设备包括井下震源/地面控制系统和地震信号采集系统。井下震源主要包括震源主体和电缆(拖缆),由地面控制操作。地面控制系统一般设在车内,由震源升降控制器、激发控制器和操作仪等装置组成,二者构成井间地震排列中的信号激发系统。地震信号采集系统由井下信号接收和地面数据记录两个子系统组成,其中信号接收系统包括检波装置和电缆,数据记录系统通常是车载装置,负责控制井下装置和记录数据,主要以微机为核心,配备记录仪、存储器、输出装置、操作仪和电缆升降控制器。

1. 激发系统的选择方式

井间地震的作业环境与方式不同于其它地震方法,因此对激发系统的技术要求比较特殊。1988年首届井间地震专题讨论上,与会代表一致公认,井间地震使用的激发系统应该是适用不同井眼条件和具备无破坏性、宽频带、激发性能可靠及可快速重复激发纵、横波信号等特殊的移动式震源系统。如果严格按照这一标准,那么目前推出的绝大部分震源系统在许多方面存在着不同程度的差距,因此选择一种合适的震源系统是一项十分重要的工作。

国外现有脉冲型和可控型两大井下震源系列,包括爆炸、径向辐射脉冲、电火花、机械脉冲、压电型机电换能和控频扫描振动等6种形式,它们依据不同的原理激发信号,虽然也能遵循井下作业要求,但在激发特性、可靠程度和适应能力等方面,彼此间存在很大差别,有一定的适用范围,所以在满足使用者要求上有局限性。因此,在选择震源系统时,首先要根据成像目的、成像方法和现场条件,选择适宜的震源形式,然后参照具体震源的各项性能指标,选择符合具体作业要求的系统,其中应该结合这些指标,考虑如下问题:

(1) 安全问题

(2) 输入能量问题

(3) 无破坏性最大输出能量与最大有效能量

- (4) 管波效应强弱
- (5) 输出信号频带宽度
- (6) 辐射模式的一致性
- (7) 连续或重复激发能力
- (8) 对不同井眼环境的适应能力
- (9) 可靠性问题
- (10) 耐温抗压能力

2. 地震信号采集系统的选择方式

在构成井间地震信号采集系统的两个子系统中，地面数据记录系统一般采用常规 VSP 记录系统，而井下信号接收系统虽然也可以用常规 VSP 检波器替代，但还是有它自己的特殊性。首届井间地震专题讨论会上提出，井间地震使用的井下检波系统应该是满足高分辨率成像要求的多级（道）同步接收系统。

选择井间地震信号采集系统的重要工作集中在井下信号接收系统方面。目前井下信号接收系统主要有多道水听器电缆和单级、多级三分量检波器系统等三种类型，单级三分量检波器系统是在常规 VSP 检波器基础上改进而成；水听器电缆以井下自由悬挂方式记录液体的压力扰动，具有记录效率高、响应频带宽等特点，但抑制管波能力不强，因此对续至波干扰较大，而且消除工作的难度很大；多级三分量检波器系统是新型检波系统，它以井下推靠方式，记录井壁粒子运动形成的矢量波场，有抑制管波能力，资料用途广泛，但记录中存在机械谐振干扰，需要带通滤波，此外它的记录效率不及水听器电缆。因此，在挑选时，应该着重结合工区条件、包括用井时间，井眼状况，根据成像要求、目的、解决的问题以及处理能力和成像方法，选择适合工区条件、能够有效解决具体问题的信号接收系统。

第二章 井下震源系统研制现状

井下震源系统是井间地震技术应用时使用的关键设备之一，其研制工作在这项技术整体研究中占有举足轻重的位置。80年代后期以来，出于对井间地震技术的高度重视，国外在研究方面的资金和人、物力投入增大，井下震源研制工作取得了可喜进展，不仅在改进和完善早期震源系统性能方面取得成效，而且相继推出一批现代化高效震源系统样机，至今为止已逐步形成了以爆炸、机械和机电原理为主的脉冲型和控频扫描振动型（可控型）井下震源系统。

第一节 井下震源系统的发展历程

在70年代初井间地震技术刚刚移植到油气勘探领域时期，设计、制造和使用的井下震源系统基本上以爆炸震源为主，多采用普通炸药包、井壁取芯枪和射孔枪等油田上现成设备。虽然这类震源取之容易，操作简单，也能得到实测数据，但存在十分明显的缺陷，主要体现在：

(1) 震源激发产生的破坏性较大，对井眼（包括套管的水泥胶结带）构成严重威胁，而且缺乏有效的控制手段。

(2) 震源输出特性无法预测，因此缺少对震源激发信号质量的控制能力。

(3) 震源缺乏连续激发能力，致使野外地震数据采集时间过长，采集成本过高。

鉴于爆炸震源存在着这些缺陷，一时间也无法有效地解决，因此研制工作的重点转向改装海上地震勘探使用的空气枪、水枪和电火花等震源。这类震源系统采用相似的激发原理，有着相同的输出特性，同属径向辐射脉冲型震源，因此它们的基本特点完全相似。它们的有效地解决了震源连续激发和信号质量控制问题，在实用中收到良好的效果，但震源激发的破坏性未能根除，而且带来了一些新的问题。例如井下空气枪，这种震源采用控制电缆和高压输气软管组成的拖缆，向井下空气枪传递指令和高压气，并负责其升降，使空气枪可以在井下相同或不同位置上重复或连续激发脉冲信号。这种震源在实际应用中出现的主要问题是：

(1) 震源激发时释放的高压气体对井下水泥胶结带产生了明显的破坏作用。

(2) 由控制电缆和高压输气软管组成的拖缆过于笨重，且能量损耗大，严重地限制了空气枪的作业深度。

(3) 震源激发能量的绝大部分形成了管波（ $\geq 99\%$ ），这种波对续至波有严重的屏蔽作用，是井间地震数据中的主要干扰波，也是后期地震数据处理的难点。

(4) 震源激发后产生的“气泡效应”将改变泥浆柱的声波特性，继而影响管波的速度，使地震数据处理更加复杂。

(5) 井下液体静压力对震源激发效果影响很大，随着作业深度加大，震源激发能量的损耗将加大，激发信号的强度也相应减弱。

此后，随着研究经验的积累，以及设计、制造与检测技术水平的提高，研究人员的认识

开始发生转变,到 80 年代初,井下震源系统的研制工作出现了两个发展方向,其中一部分研究人员继续前面的研究内容,针对早期研制的各种脉冲型震源出现的种种弊端,努力寻找改进和完善的途径;另一部分研究人员则另辟新径,开始研制以机械和机电原理为基础的新型脉冲型震源系统,继而又仿照地面地震勘探使用的可控震源工作原理,研制井下控频扫描振动器,亦称井下可控震源。从此,井下震源系统开始多样化,到 80 年代末已开发出数十种新型震源系统,逐步形成了脉冲型和可控型两大系列。表 2—1 列出了现阶段较有代表性的 29 种井下震源系统,在这些系统中,有些尚在研制之中,有些则已经制成产品投放市场,并在井间地震的实际作业中有较好的表现。

表 2—1 国外当前研制的部分井下震源系统

序号	震源系统名称	类型	研制机构
1	井下多点激发炸药震源	脉冲型	埃克森生产研究公司
2	井下水枪震源	脉冲型	埃克森生产研究公司
3	管波—体波转换器	脉冲/可控型	埃克森生产研究公司
4	井下密封式炸药索震源	脉冲型	CGG 公司
5	井下重锤震源	脉冲型	法国石油研究院
6	井下可控爆聚式震源	脉冲型	斯伦贝谢技术公司
7	井下取心枪	脉冲型	斯伦贝谢技术公司
8	井下爆聚式水枪震源	脉冲型	德士古公司
9	井下空气枪震源	脉冲型	Bolt 技术公司
10	井下液压锤震源	脉冲型	Hydroacoustics 公司
11	井下气锤震源	脉冲型	ARCO 公司
12	井下液压可控震源	可控型	ARCO 公司
13	井下液压式三分量可控震源	可控型	雪弗龙油田研究公司
14	井下电磁震源	可控型	雪弗龙油田研究公司
15	井下液压可控震源	可控型	地震仪服务公司
16	井下共振频率扫描振动器	可控型	西方阿特拉斯国际公司
17	井下电动液压可控震源	脉冲/可控型	大陆石油公司
18	井下轨道式可控震源	可控型	大陆石油公司 OYO Geospace 公司
19	井下充气式横波可控震源	可控型	美国能源部、桑迪国家实验室
20	井下共振频率扫描式横波振动器	可控型	劳伦斯—伯克利实验室
21	井下压电可控震源	可控型	美国标准石油公司
22	井下压电陶瓷加速式可控震源	可控型	多伦多大学
23	井下电火花震源	脉冲型	英国地质调查局
24	井下电弧放电式声波发生器	脉冲型	美国西南研究所
25	井下压电柱形弯棒式换能器	可控型	美国西南研究所
26	井下单级、偶极、四级地震波发生器	可控型	美国西南研究所
27	井下磁致伸缩震源	脉冲型	美国洛斯阿拉莫斯国家实验室
28	井下多盘型重锤震源	脉冲型	日本国家石油公团和 OYO 公司
29	井下压电震源	脉冲/可控型	美国 Stanford 大学

第二节 现阶段井下震源类型与研制特点

从设计角度看,在现阶段研制的脉冲型和可控型井下震源系统中,主要采用了6种不同的信号激发原理与形式,它们各具特色,都展示出较好的实用前景。

1. 爆炸震源

爆炸震源是最早投入井间地震作业的脉冲震源,目前主要包括炸药、射孔枪、取心枪和电解式套筒枪等形式,基本特点是井下环境适应能力强、激发时有效能量大、信号频带宽和操作简单。目前,这类震源系统研制工作的重点集中在减小它们激发时的破坏作用、扩大连续激发能力和加强信号质量控制等方面。这些努力现已在炸药震源上取得一些成绩。最新研制的炸药震源采用PENT和RDX炸药制成的压缩炸药和导爆索,可以预定输出特性,并在控制电路中加入旋转开关或二极管元件,解决了连续激发问题,如表2—1中列出的井下多点激发炸药震源和井下密封式炸药索震源。

2. 径向辐射脉冲震源

井下空气枪和水枪是现有井下震源家族中最典型的径向辐射脉冲震源系统,它们有相似的激发原理和输出特性,都以自由悬挂的方式在井下液体中激发压力脉冲,由于没有耦合器,只能借助液体与井壁的耦合使用,向地层传递脉冲信号,因此只能在充液井中使用。这类震源没有十分突出的特点,但存在的问题较多,目前研制工作只在改善激发深度方面取得一些成效,而在抑制管波效应、消除对水泥胶结带的破坏作用等主要问题上收效不大。

3. 电火花震源

这类震源是在海上电火花震源基础上发展形成的,两者激发脉冲信号的原理与形式完全相同。现有井下电火花震源使用的电容器有放在井上和井下之分,虽然都能保证震源具有连续激发能力,但相比之下,使用井下电容器的系统输入能量损耗小,激发深度大。最新研制的井下电火花震源摒弃了早期裸露式电极,转而采用密封式电极放电,避免了裸露式电极因腐蚀降低激发性能的现象,同时在震源上加入推靠器,负责在井中固定震源和向地层传递脉冲信号,从而有效地抑制了管波效应,增大了有效能量,也扩大了震源对井眼环境的适应能力,如表2—1列出的井下电弧放电式声波发生器。

4. 机械脉冲发生器

采用机械原理激发脉冲地震信号的井下震源系统是国外80年代初研制的新型井下脉冲震源,现已推出多种形式的样机。它们的设计简单合理,便于操作、维修和搬运,具有良好的连续激发能力和稳定的输出特性。目前从原理、设计和试用效果等方面看,这类震源有3种形式有比较好的发展前景:

(1) 由地面控制系统提升锤体,用推靠器固定震源和传递信号能量的重锤震源,它们利用自由下落的锤体撞击连接推靠器的砧座,在井壁上产生垂向和径向应力,形成纵、横波脉冲地震信号,如表2—1列出的井下重锤震源。

(2) 自备动力系统或由地面提供动力的液压锤或气锤震源,它们利用液压或高压气驱动锤体撞击砧座,产生脉冲地震信号,如表2—1列出的井下液压锤震源和井下气锤震源。

(3) 由装在封隔器中或开启真空空腔的压降系统构成的爆聚震源,这种震源可以在充液井中形成局部瞬时真空带,利用液体静压力迫使周围液体迅速充填真空带,形成局部压降产生脉冲信号,它的特点是变井下液体静压力这一不利因素为有利因素,在一定程度上解决了

井下震源面临的一大难题,如表 2—1 列出的井下爆聚式水枪和井下可控爆聚式震源。

5. 压电式机电换能器

采用压电陶瓷材料制成的机电换能器是井下可控震源系列中的重要成员,也是当前振动扫描频率最高的震源系统。现有压电式机电换能器采用两种压电晶体结构(图 2—1),常规结构为双层板状形式,分别由压电陶瓷和金属材料制成,压电陶瓷层可以根据激励电压膨胀或收缩,引起整个复合结构弯曲,形成能量转换;新型结构为多层空心圆柱体形式,外层多为金属层,与内层配合严密,里面至少有一层是在厚度方向上极化的压电陶瓷层,它的内外各有一层金属电极,因此整个复合结构可以根据电信号产生机械振动或根据机械振动产生电信号,从而使换能器兼有信号发射器和接收器两种功能。目前采用新型压电晶体结构的换能器已由美国西南研究所研制成功,在作为震源使用时,它可以径向辐射对称分布的连续振动能量,经液体耦合作用在地层中形成控频连续振动信号,也可以激发脉冲地震信号。

6. 控频扫描振动器

井下控频扫描振动器是国外仿照地面可控震源工作原理研制的新型震源系统,亦称井下可控震源,最早出现于 80 年代中期,现已推出多种形式的系统。这类震源主要采用机电原理控制扫描振动频率,多数系统利用自身携带的推靠器与井壁耦合,将振动能量传入地层,形成连续控频振动信号。它们具有对井眼无破坏作用、有效能量大、激发信号频带宽和输出特性稳定等特点。目前这类震源有以下几种形式:

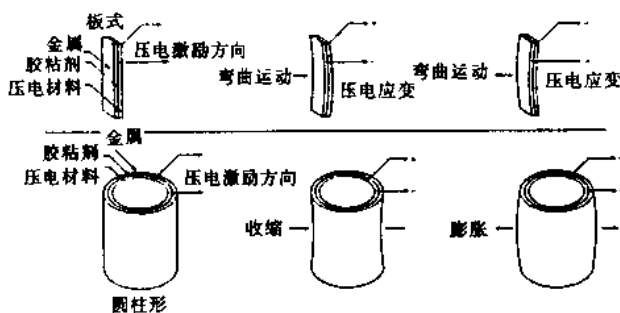


图 2—1 压电式机电换能器使用的两种压电晶体结构

(1) 通过标准 7 芯电缆、特殊电缆或软管与地面控制系统保持联系的液压式可控震源。这种震源依靠伺服液压控制装置形成控频扫描振动,借助推靠(耦合)器在地层中形成纵、横波地震信号。这是目前井下可控震源普遍采用的形式,如表 2—1 列出的井下液压式三分量可控震源。

(2) 自备气箱或由地面提供高压气动力的充气式可控震源,如表 2—1 列出的井下充气可控震源,它利用震源携带的小型电机带动球阀,使自备气箱向振荡活塞提供高压气动力,通过改变电机转速控制阀速与活塞振荡频率,达到控频扫描振动的效果。

(3) 采用共振原理的控频谐振器,如表 2—1 列出的井下共振频率扫描振动器,它以诱使井下液体发生共振现象的方式,产生特定频率的扫描振动信号。

(4) 其它采用特殊激发原理的井下可控震源,如管波—体波转换器,它利用控制地面管波发生器中电机速度和加速度方式,产生控频扫描压力波列,传入井下后遇到管波转换器产生体波信号;又如井下轨道式可控震源,它利用自身携带的高速电机旋转后产生的离心力,使震源整体发生径向位移,压迫井下液体产生控频扫描振动。

以上 6 种形式代表了当今从事井间地震作业的主要井下震源系统形式,基本反映出国外研制人员的设计思路。除此以外,最近国外研究人员还提出一种钻头震源系统,它用钻井时钻头钻进过程中的振动激发地震信号,由于这种信号频率较低,不适合井间地震作业,一般只用于反垂直地震剖面(RVSP)作业,所以这里不作介绍。

第三节 部分井下震源系统的结构配置及原理

为了更好地了解震源系统的设计思路,下面选出几种有代表性的井下震源系统,介绍它们的结构配置、原理及技术指标,以便于读者参考和借鉴。

1. 井下密封式炸药索震源

图 2—2 是法国 CGG 公司研制的井下密封式炸药索震源的结构配置图, 它有两种结构, 主体是一个外径接近井眼内径的空心钢筒, 钢筒外侧有若干几 cm 深的槽 (普通槽或螺旋槽), 充当放置炸药的密封室, 内侧是合成材料制成的空心衬筒, 以便钢筒能够在井中移动。炸药索由低密度 RDX 炸药制成, 与震源上的起爆器连接, 起爆器直接由地面控制系统通过 7 芯电缆控制。

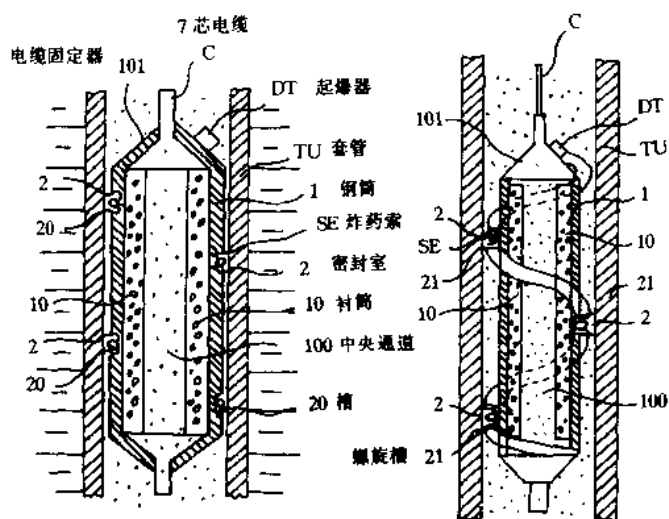


图 2-2 井下密封式炸药索震源结构配置

该公司已推出采用螺旋槽形式的震源系统, 它的主体由两节 3m 长的钢筒组成, 每节钢筒有 7 个螺旋槽, 携带 7 根 RDX 炸药索。地面激发控制系统用一种二极管电路控制起爆器, 可以分别引爆全部炸药索, 使震源一次下井可激发 14 次脉冲信号。这种震源有以下特点:

- (1) 激发时对井眼无明显的破坏作用;
- (2) 整体结构设计合理, 可使密封炸药索引爆后的冲击波径向传播, 机械能损失极小, 能明显地加强信号振动幅 (图 2—3A 区);

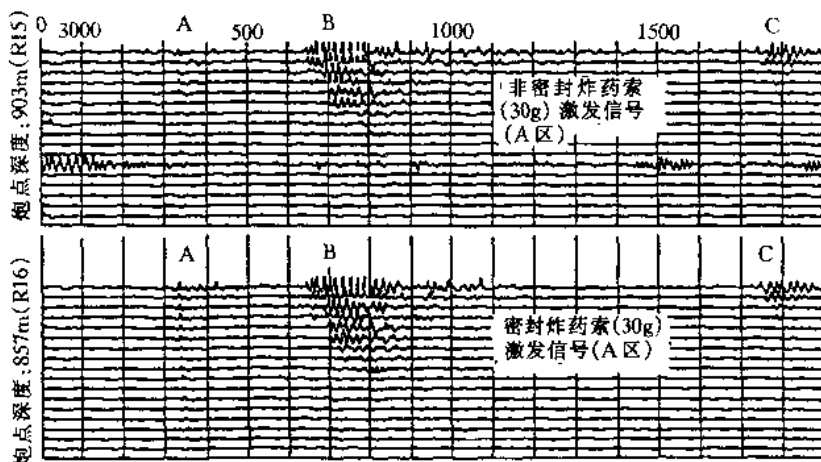


图 2—3 密封措施对炸药式激发效果的影响

(3) 螺旋槽密封室能防止震源因爆炸的反作用力撞击井壁, 加大单位长度的炸药密度, 且保证激发时对水泥胶结带影响较小;

(4) 震源配备了一组外径与常见井眼内径相差不大的钢筒, 可使震源在不同井眼中使用。

CGG 公司已用这种震源在固结程度较差的沉积岩环境中, 进行了井间和 RVSP 透射波地震数据采集, 记录信号的上限频率分别为 650Hz 和 300Hz (图 2—4)。该公司认为, 该震源能在油田内适合射孔的所有裸眼和套管井中使用。

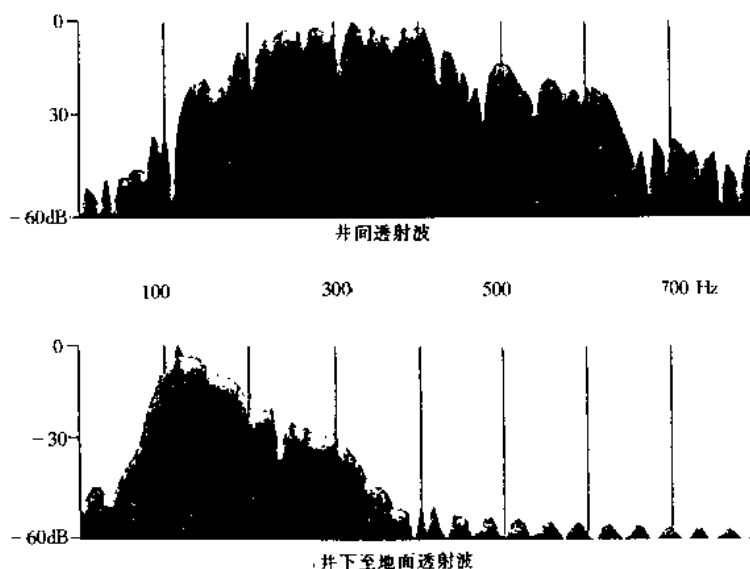


图 2—4 井下和地面透射波记录的振幅谱

2. 井下可控爆聚式震源

图 2—5 是斯伦贝谢技术公司研制的井下可控爆聚式震源结构配置与控制电路图。震源主要由爆聚空腔, 承载器和控制系统组成, 其中控制系统可以有选择地引发承载器上的一组爆聚空腔, 形成重复或连续激发能力。作为震源主体的爆聚空腔有 4 种形式, 主要由一个密封的空心圆柱体形成的真空空腔构成, 它的一端是密封端, 另一端带有击穿装置的击破端。击穿装置由控制系统控制, 采用炸药和机电或液压控制的弹簧或落锤等形式, 能击穿击破端而不损坏其余部分, 在井下液体中形成局部瞬时真空带, 借助液体静压力使周围液体迅速充填, 形成爆聚效果产生脉冲信号。

目前该公司已推出震源系统的样机, 震源一次下井可携带 40~50 个爆聚空腔, 作业深度达 1000m。井间地震记录信号的频率达 300Hz。

3. 井下空气枪

井下空气枪是典型的径向辐射脉冲震源, 它的信号激发原理和形式如图 2—6 所示。最新研制的井下空气枪系统在改善激发深度和组成多枪组合激发系统方面取得一些成效。

图 2—7 是 Bolt 技术公司研制的 Wellseis 空气枪系统井下部分结构示意图。整个系统由地面控制车、特制电缆和井下装置组成, 其中特制电缆中包括控制线和供气软管, 负责传递