

# 微地震监测技术探究

唐春华<sup>1</sup>, 顾广庆<sup>2</sup>

(1. 北京科若思技术开发股份有限公司, 北京 100082; 2. 华北油田公司井筒设计中心, 河北任丘 062552)

[摘要] 微地震监测是地球物理学中的一个重要研究方向,它在油田勘探开采等众多领域有广泛的应用。从微地震的形成机理出发,介绍了微地震的发展历程。重点讨论了微地震监测系统的重要组成部分、关键技术和微地震监测的具体实施,最后讨论了微地震未来的发展与趋势。

[关键词] 微地震监测;水力压裂;石油天然气;信噪比;事件定位

[中图分类号] TE3;P315 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)04-0095-05

## 1 前言

微地震监测(microseismic monitoring)是利用高频地震仪监测岩石微破坏、微变形现象,从而获得地下裂缝、裂隙分布、流体流动、应力变化趋势的一种技术方法。岩石在变形、破坏的整个过程中几乎都伴随着裂缝或孔隙的产生、扩展、变形及摩擦,积聚能量的一部分以应力波(P波和S波)的形式释放,从而产生微地震事件。由于微地震信号包括了大量的关于岩体受力变形、破坏以及岩体裂缝活动的信息,通过监测、分析微地震事件,可以推测岩体发生破坏、变形的过程、事件位置以及破坏强度。利用地震学方法对岩体微破坏、微变形过程进行监测、检测和预报地下信息,在石油天然气工程、环境与公共安全、矿山工程、土木工程等领域已经取得了重大应用与进展<sup>[1]</sup>。

石油、天然气领域的微震监测是指利用水力压裂、油气采出或常规注水、注气以及热驱等石油工程作业时引起地下应力场变化,导致地下质点位移所产生的微地震,进行天然裂缝、水力压裂裂缝作图,或对储层流体运动趋势进行描述的方法。监测到的地震不是常规地震勘探中人工激发的地震,而是石油工程作业诱生的地震。由于这种地震很微弱,属于微弱信号监测范畴,因此直到20世纪70年代初

国外石油业界才开始了水力压裂微震监测的野外试验;到2000年,微地震监测已经被世界公认为了解地下微破坏过程的一种非常重要的方法;目前,随着仪表化油田技术的提出和发展,微震监测正朝着对油气田开发实行全程实时监测的方向发展,其技术和经济潜力是巨大的<sup>[2]</sup>。

微地震监测系统现如今正在向数字化、智能化和高分辨率方向发展,以实时微地震事件采集、处理、分析和可视化等为特点,可以在主流操作系统下运行。硬件方面主要包括传感器、数据采集器、通信单元、数据控制中心、计算机以及GPS授时器等。软件方面包括系统计时软件、数据采集、处理软件,可视化成果软件,数据实时显示软件等<sup>[3]</sup>。

在国际上,欧美等发达国家在微地震领域发展迅速。硬件方面OYO Geospace, Avalon, Sercel等公司,软件方面ESG, ASC等公司,系统方面Pinnacle, Schlumberger, Microseismic Inc.等公司,都有很强的竞争力。

## 2 施工设计

接收矩阵的布置是得到正确结果的首要前提条件。目前主要有以下3种方式:其一,将接收矩阵放到偏离目标井300m以内监测井中,放置深度与目标层相近。此种方式是最理想的:优点是最大限度

[收稿日期] 2012-02-10

[作者简介] 唐春华(1976—)男,辽宁本溪人,副总工程师,主要从事工业微地震领域的科研工作;E-mail: chunhua.tang@traverse.com.cn

的接近震源 确保信号的质量;缺点是监测成本高,需要具备监测井这个硬件条件。其二 将接收矩阵布置到目标井段在地面投影的附近。此种方式优点是简单经济 缺点是信号衰减严重、信号质量容易受到地表噪声的干扰,只能监测震级相对较大的微地震事件。其三 将接收矩阵布置到目标井段在地面投影地表以下的数百米位置,覆盖层以下。此种方式的优点是避免了近地表噪声的干扰,而又不需要监测井这个硬件条件 缺点是监测成本较高,数据处理比较复杂。

另外,接收矩阵的地震台站数量是一个重要的问题。理论上,微地震信号的信噪比与接收矩阵台站数量的平方根( $\sqrt{n}$ )成正比。也就是说将接收矩阵的台站数量从4增加到16,微地震信号的信噪比值将提高一倍。然而,当接收矩阵的数量达到25时,通过增加接收矩阵的数量来提高信噪比值效果就不是很明显了。但微地震源的定位精度则随台站个数的增加而线性提高<sup>[4]</sup>。

### 3 传感器和采集器

传感器对于微地震信号的采集至关重要,好的

传感器需要具备灵敏度高、噪声低、幅频响应平滑、工作稳定等特点。目前所有先进的系统都将数据采集器与传感器组装到一起,尽量缩短模拟信号的传输距离,以便发挥数字传输的优势,提高整个系统的信噪比。

特低噪声放大器(ULNA)是采集器中的核心器件。检波器输出的地震信号能量微弱,深层有效波的幅值一般为 $0.1 \mu\text{V}$ 级,这样的信号在获取与放大过程中不可避免地会引入各种干扰。如何减少或消除这些干扰,突出所需要的微弱地震信号,以保证勘探精度的要求,是数据采集系统中前置放大器设计时首先要考虑的问题。而低噪声设计的关键是,在最大限度地降低放大器固有噪声的同时,提高放大器的增益。目前,TI 等公司生产的运算放大器,其噪声功率谱密度可达 $0.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{HZ}}$ ,具有良好的噪声性能,为提高特低噪声放大器的品质提供了保障。图1为数据采集器电路原理图。

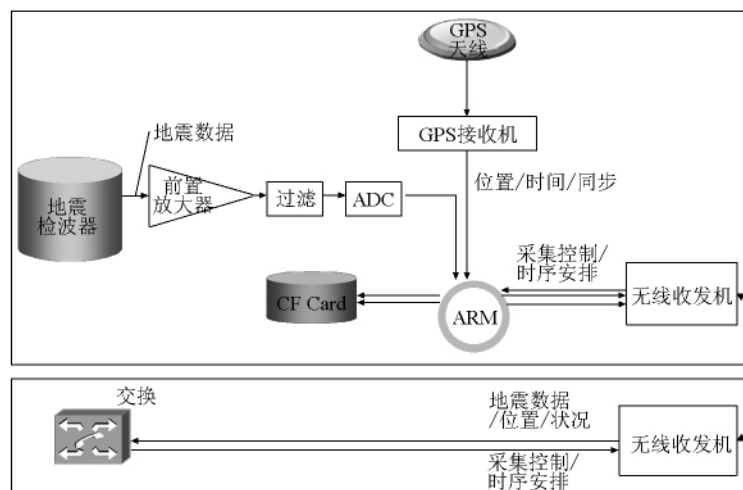


图1 数据采集器电路原理图

Fig.1 Schematic circuit diagram for data acquisition

### 4 数据传输与接口

数据传输一直是微地震仪器中的关键技术之一。在有线传输方面,光纤传输和DSL(digital subscriber line,数字用户环路)以高速率、远距离得到越来越多的应用;在无线传输方面,ViMax(world-

wide Interoperability for microwave access,全球微波互联接入)、McWill(multi-carrier wireless information local loop,多载波无线信息本地环路)和WiFi,应用较广。

在网络层和传输层,除了传统的TCP/IP协议外,RTP/RTCP协议收到更多的关注(尤其在无线传

输条件下)。

实时传输协议 RTP (realtime transport protocol) 是最早针对 Internet 上多媒体数据流的一个传输协议,由 IETF (Internet 工程任务组) 作为 RFC1889 发布。RTP 被定义为在一对一或一对多的传输情况下工作,其目的是提供时间信息和实现流同步。RTP 的典型应用建立在 UDP 上,但也可以在 TCP 或 ATM 等其他协议之上工作。RTP 本身只保证实时数据的传输,并不能为按顺序传送数据包提供可靠的传送机制,也不提供流量控制或拥塞控制,它依靠 RTCP 提供这些服务。

实时传输控制协议 RTCP (realtime transport control protocol) 负责管理传输质量在当前应用进程之间交换控制信息。在 RTP 会话期间,各参与者周期性地传送 RTCP 包,包中含有已发送的数据包的数量、丢失的数据包的数量等统计资料,因此,服务器可以利用这些信息动态地改变传输速率,甚至改变有效载荷类型。RTP 和 RTCP 配合使用,能以有效的反馈和最小的开销使传输效率最佳化,故特别适合传送网上的实时数据。

## 5 噪声

即使采用最好的传感器和采集器,使用最优的施工设计,监测结果也可能会受到噪声的干扰。究其原因,主要是我们能够监测到的微地震信号非常微弱,即使采取了自动增益,其幅度也在毫伏级以下。噪声主要有两种:一种是地面的风吹草动等自然界或人为噪声,另外一种和设备本身引入的噪声。

对于噪声的处理:其一,应尽量避免人为噪声的干扰,如可以将传感器在地表浅埋、避免电缆的晃动等。其二,可以通过采用滤波器,有效降低噪声的能量。其三,提高仪器质量,尽量压低仪器本身的热噪声。

## 6 数据处理

数据处理一般包括相关滤波、初始波识别、速度模型建立、定位算法以及傅里叶变换、频谱分析、聚类分析等。

微地震监测结果通常用微地震源的空间排列分布来描述,微震源定位是监测数据处理的重要方向。利用正演方法、反演方法或二者相结合的方法。

目前,反演方法多采用双残差(double-difference seismic tomography method),而正演方法多采用基于

射线追踪和波束赋形 (beam forming) 的网格快速搜索方法<sup>[5]</sup>。把监测区这个空间体网格化,监测前计算出各网格节点至各台站的走时,网格节点个数可以达到数十万个。监测时,避开精确确定初至波到时这个难点,采用时间偏移技术把各台站记录的波形在各节点叠加。叠加效果最好的节点就是震源位置。

实践证明,采用带通滤波、能量比检测、射线追踪、匹配滤波、相关滤波、信噪分离等综合优化算法,可以明显提高数据处理质量,甚至在 SNR 小于 1.33 的情况下也能够精确定位。

在众多定位方法中,相对定位法由震源位置与台站校正的联合反演发展而来,是选定一震源位置较为精确的主事件,计算发生在其周围的一群事件相对于它的位置,进而计算这群事件的震源位置。相对定位法通过引入到时差,计算“相对位置”而消除了速度模型引起的误差,有着独特的优点。该方法所得相对位置与相对到时的误差比经典方法小 30%,但绝对位置与绝对到时依赖于主事件(见图 2)。

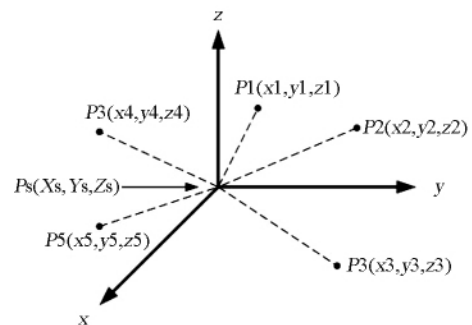


图 2 微地震事件定位示意图

Fig. 2 Microseismic event location illustration

## 7 速度

如果将微地震事件的定位过程和 GPS 定位做类比,到时差和速度是决定定位准确性的两个主要因素。通常人们把地球介质假设成各向同性的,发展了基于各向同性的地震资料处理和解释方法。但是大量理论和实践证实了实际地层中广泛存在着各向异性。在各向异性介质条件下,常规的处理方法不可避免地产生误差,目前微地震中所涉及到的各向异性主要指地层的速度各向异性。所以从某种意义上来说地震各向异性可以理解为地震速度对角度的依赖性<sup>[6]</sup>。

通过时间和空间确定的微地震事件,如射孔,来标定速度模型,降低速度模型不精确引入的误差,是目前国内外普遍采用的做法,图3为GPS定位示意图。

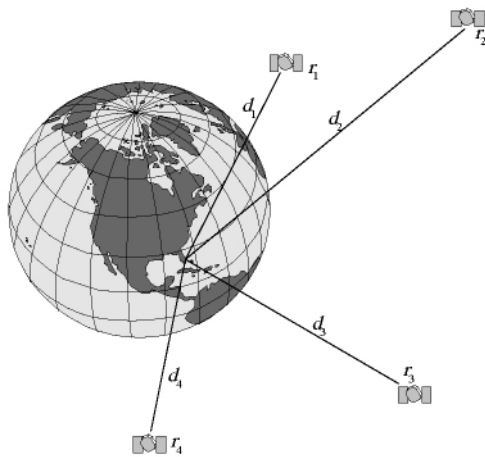


图3 GPS定位示意图

Fig.3 GPS location illustration

## 8 数据格式

众所周知,微地震目前还没有国际标准的数据格式。SEG-2、SED-D Rev 2.0和SEG-Y是最有可能的候选方案。三者之中,SED-D Rev 2.0过于简单,满足不了微地震新的需求;SEG-Y的文件头,可供用户自定义的数据空间太小,也不太适合;SEG-2的文件头相对灵活,用户自定义的数据空间比较大,因此最有可能成为微地震数据格式演化的格式标准。

## 9 不确定性

微地震监测结果的不确定性主要有两个方面原因:其一,数据质量的不确定性;其二,速度模型的不确定性。数据质量的不确定性,有可能是由自然界或电子噪声,接收矩阵的数量,采样频率,传感器的幅频特性,传感器布置等原因引起的,也可能是微地震信号震级小等不可控原因引起的。速度模型的不确定性,主要是对地层的了解知之甚少,无法用有限的模型进行逼近。

目前有两种方法对这种不确定性进行评估,一种是计算残时差和 $Q$ 值,另一种是通过已知震源进行矫正,例如射孔<sup>[7]</sup>。

## 10 解释

获得微地震数据之后,需要知道哪些数据是反映震源属性的。首先应计算出微破坏、微变形区的长、宽、高等基本几何形态,然后通过震源机制解和综合断面解等方法来分析这个区微地震的形成机理。最后,需要结合施工设计来综合分析。例如,前置液的用量和砂比是否合理,注水井的布置是否合适,层数和层间距的设计是否恰到好处,压裂是否达到预期效果等<sup>[8]</sup>。

## 11 应用领域

工业微地震在油田煤层气领域,例如,水力压裂、注水/气前缘监测、油气井稳定性、油气层管理、断层定向等,在矿山安全领域,岩爆、岩塌、边坡、水库稳定性等,以及放射性核废料处理、地下煤炭气化、二氧化碳地下存储、地下热能开采等都有广泛的应用前景。

## 12 展望

尽管微地震在石油天然气领域的应用可以追溯到20世纪70年代,但是它的规模应用却是在2000年以后。未来,在采集方法,传感器优化,矩阵设计,采集信号过程,事件定位,速度校准和裂缝扩展机制等方面,还需要有很大的提高。有理由相信,随着这些方面的进步,人们对微地震将有更深入、更清楚的了解,同时将获得更多的有用信息。

## 13 结语

微地震监测是人们了解井下生产活动的一种重要方法。由于噪声、距离、震级、速度模型等因素的影响,并不是所有的监测结果都是可靠的;即使一次成功的监测,在资料解释方面,由于各种局限性,仍然还有很多需要改进之处<sup>[9]</sup>。微地震在广义上属于地震学范畴,它对于大多数地质学者、油田工作者是陌生的,人们对于这个新鲜事物还不甚了解。未来,微地震监测将成为一项重要的技术手段。因此,人们需要采用积极的态度来了解和学习这项技术,以便更好地认识井下生产活动<sup>[10]</sup>。

## 参考文献

- [1] Norm Warpinski. Microseismic monitoring inside and out [J]. Journal of Petroleum Technology 2009 61(11): 82-83.
- [2] 梁冰,朱广生. 油气田勘探开发中的微震监测方法[M]. 北

- 京:石油工业出版社 2004.
- [3] Shawn Maxwell , Schlumberger. An introduction to this special section microseismic [J]. The Leading Edge 2010( 3) :277.
- [4] Pinnacle. How Big Are These Microseismic Events? Microseismic Events [R/OL]. 2011.
- [5] Zhang Haijiang. University of wisconsin – madison , double – difference seismic tomography method and its applications [J]. Dissertation Abstracts International 2003 64( 11) :189.
- [6] 孙晶波. 方位各向异性介质纵波速度分析方法研究与应用 [D]. 北京: 中国石油大学 2012.
- [7] Julie Shemeta , MEQ Geo ,Paul Anderson. It’ s a matter of size magnitude and moment estimates for microseismic data [J]. The Leading Edge 2010( 3) :296 – 302.
- [8] Doug Doug Bobrosky. Canadian Business Unit Director , Packers Inc Plus Energy Services Inc. , Multi – Stage Fracturing of Horizontal Wells [S]. 2010 January 28/29.
- [9] Shawn Maxwell , Schlumberger. Microseismic growth born from success [J]. The Leading Edge 2010( 3) :338 – 343.
- [10] 于兴河. 油气储层地质学基础 [M]. 北京: 石油工业出版社 , 2009.

## Microseismic monitoring technology

Tang Chunhua<sup>1</sup> ,Gu Guangqing<sup>2</sup>

( 1. Beijing Traverse Technology & Development Co. , Ltd. , Beijing 100082 , China;

2. Center of Shaft Design ,Huabei Oilfield Company ,Renqiu ,Hebei 062552 ,China)

**[Abstract]** Microseismic ( MS) monitoring is a hot topic in the applied geophysics recently. The MS mechanism and histories are introduced firstly in this article , and then the instruction of the MS equipment such as acquisition strategies , optimal sensors , array design , digital-signal processing , event location , velocity calibration , and monitoring deployment , is discussed. MS is a great technology with a long future , and we need to foster the understanding and acceptance of this technology.

**[Key words]** microseismic monitoring ; hydraulic fracturing; oil and natural gas; SNR ( signal to noise ratio) ; event location