



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102089497 B

(45) 授权公告日 2014. 12. 10

(21) 申请号 200980110075. 2

(22) 申请日 2009. 03. 02

(30) 优先权数据

61/032, 794 2008. 02. 29 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2010. 09. 20

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2009/001379 2009. 03. 02

(87) PCT国际申请的公布数据

W02009/108394 EN 2009. 09. 03

(73) 专利权人 沙特阿拉伯石油公司

地址 沙特阿拉伯达兰

(72) 发明人 S·N·达斯古普塔

S·阿尔-鲁瓦利

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 魏小薇

(51) Int. Cl.

E21B 49/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 6644402 B1, 2003. 11. 11,

US 2007286023 A1, 2007. 12. 13,

US 2007255545 A1, 2007. 11. 01,

CN 1969199 A, 2007. 05. 23,

SHAWN C. MAXWELL et al.. The role of passive microseismic monitoring in the instrumented oil field. 《The Leading Edge》. 2001, 636-639.

Qiuchun Feng et al.. Microseismicity, stress, and fracture in the Coso geothermal field, California.

《Tectonophysics》. 1998, 221-238.

B. C. Dyer et al.. Microseismic survey of a North Sea reservoir. 《World Oil》. 1999, 74-78.

审查员 文涛

权利要求书2页 说明书12页 附图12页

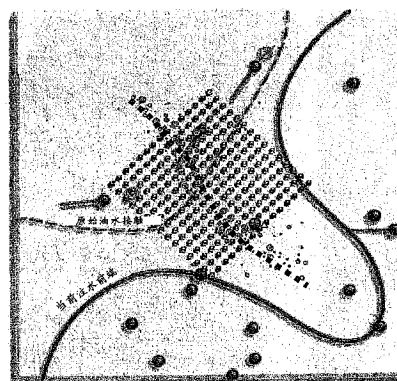
(54) 发明名称

使用被动地震发射监视生产油田中沿着流动通路移动的储层流体

(57) 摘要

本发明提供了用于确定在含油储集岩层中移动的液体是水还是油的方法和系统。含油岩层包括至少一个生产井和至少一个正常产油期间的注入水源。识别优先流动通路。建立被动微震事件的基线数量。监视正常产油期间在优先流动通路中的被动微震事件以感测微震事件的数量，感测的微震事件的数量与被动微震事件的基线数量进行比较。如果感测的微震事件的数量接近每预定单位的被动微震事件的基线数量，并且如果被动微震事件的基线数量被在注水大于正常产油期间的注水速率时的时间段期间测量，则确定导致微震事件的流体是水。

微震触发的事件



CN 102089497 B

1. 一种确定在含油储集岩层中移动的未知流体是水还是油的方法,所述含油储集岩层具有至少一个生产井和至少一个在正常产油期间以预定速率供给的注入水源,所述方法包含:

a. 在含油储集岩层中识别优先流体通路,与油移动和水移动相关联的微震是被从该优先流体通路感测到的;

b. 建立每预定单位基线时间的被动微震事件的至少一个基线值,其中所述至少一个基线值是以下中的一个或多个:

(i) 在低于所述预定速率的注水速率期间在优先流体通路中发生的微震事件的数量;

(ii) 在低于所述预定速率的注水速率期间在优先流体通路中发生的微震事件的震级;

(iii) 在高于所述预定速率的注水速率期间在优先流体通路中发生的微震事件的数量;以及

(iv) 在高于所述预定速率的注水速率期间在优先流体通路中发生的微震事件的震级;

c. 监视正常产油期间在优先流体通路中的被动微震事件,以感测在预定单位时段的监视时间期间的微震事件的对应数量或震级,

d. 把预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量或震级与每预定单位基线时间的被动微震事件的基线数量或震级进行比较;

e. 如果预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量或震级接近每预定单位基线时间的被动微震事件的基线数量或震级,并且如果每预定单位基线时间的被动微震事件的基线数量或震级是在注水大于正常产油期间的注水速率时的时间段期间被测量的,则确定导致微震事件的流体是水;以及

f. 如果预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量或震级接近每预定单位基线时间的被动微震事件的基线数量或震级,并且如果每预定单位基线时间的被动微震事件的基线数量或震级是在注水小于正常产油期间的注水速率时的时间段期间被测量的,则确定导致微震事件的流体是油。

2. 如权利要求 1 所述的方法,其中

建立基线值的步骤 (b) 包括为注水速率小于正常产油期间的注入速率时的时间段建立第一基线值,以及当注水速率大于正常产油期间的注水速率时建立第二基线值;

步骤 (d) 包括把预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量或震级与第一基线值以及第二基线值进行比较;

步骤 (e) 包括如果预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量或震级更靠近第一基线值而不是第二基线值,则确定导致微震事件的流体是油;以及

步骤 (f) 包括如果预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量或震级更靠近第二基线值而不是第一基线值,则确定导致微震事件的流体是水。

3. 如权利要求 1 所述的方法,其中

建立基线值的步骤 (b) 还包含:

感测第一预定时间段期间的被动微震事件的第一数量以确定第一比率,当注水速率小于正常产油期间的注入速率时感测被动微震事件的所述第一数量;

映像被动微震事件的所述第一数量；

增加注水速率以超过正常产油注入速率；

感测第二单位时间段期间的被动微震事件的第二数量以确定第二比率，第二单位时间段出现在注水速率大于正常产油期间的注水速率时；和

映像被动微震事件的所述第二数量；

识别优先流体通路的步骤 (a) 基于被动微震事件的第一数量和被动微震事件的第二数量的映像；

步骤 (c) 包含在正常产油期间监视优先流体通路中的被动微震事件，以感测第三预定单位时间段期间的微震事件的第三数量来确定第三比率，

步骤 (d) 包含把第三比率与第一比率及第二比率进行比较；

步骤 (e) 包含如果第三比率更靠近第一比率而不是第二比率，则确定导致微震事件的流体是油；以及

步骤 (f) 包含如果第三比率更靠近第二比率而不是第一比率，则确定导致微震事件的流体是水。

4. 如权利要求 1 所述的方法，其中，感测采用位于与地下含油储层对应的区域上的分布式传感器网络。

5. 如权利要求 4 所述的方法，其中，分布式传感器网络包含多个在地表的传感器和多个在地下位置的传感器。

6. 如权利要求 4 所述的方法，其中，每一个传感器的每一个感测时间由相关联的 GPS 接收器确定。

## 使用被动地震发射监视生产油田中沿着流动通路移动的储层流体

[0001] 相关申请

[0002] 本申请要求 2008 年 2 月 29 日递交的 No. 61/032, 794 号美国临时专利申请的优先权, 其公开内容通过引用被包含于此。

### 技术领域

[0003] 本发明涉及监视包含烃类的储集岩 (reservoir rock) 的方法, 并特别涉及用于使用被动地震发射识别沿着生产油田的流动通路 (flow pathway) 移动的液体的类型的方法和系统。

### 背景技术

[0004] 生产油田中储集岩基质中的微震 (microseism) 一般是由于储层流体被产生和 / 或注入时的液体移动所致的孔隙压力扰动和地质力学应力场松弛的结果。因为储层和流体流中的应力场是各向异性的所以产生了微震或微地震。各向异性一般因储集岩中的异质性所致。在沉积岩中常见节理、层面、断层和裂缝的存在。在大多数储层中, 由于上覆层压力所致的原位应力状况保持这些特征对流体流封闭。在油气储层的生产寿命期间, 流体压力上的变化导致原位应力的扰动。在 Taylor 等的 " Dilatant Stabilization of Subduction Earthquake Rupture into the Shallow Thrust Interface " <http://esag.harvard.edu/taylor/Dilatancv.html> 中更详细地讨论了这些效应。

[0005] 对于产生和传播, 微震遵循与自然地震相同的物理定律。微震从储集岩基质的弹性岩石断层产生。微地震是由于沿着岩层中的薄弱区域的剪切应力释放所致。应力释放是由于储层生产和注入操作导致的扰动所致。水注入产生了增大的储层孔隙压力, 其导致储集岩中剪切应力的增加。这影响了沿着存在于储集岩中的薄弱平面, 例如节理、层面、断层和裂缝的稳定性。类似地, 储层产油操作或者流体回收造成了孔隙压力下陷, 这也影响了沿着薄弱区域的稳定性。来自微震事件的地震波从源位置 (或震源) 传播到远程传感器 (或地震仪)。微震事件的震源对应于形成流体管道的弹性岩石断层的位置。

[0006] 在 KTB (德国大陆钻探, Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland) 工地上进行的实验结果中观察到了从流体注入产生的微震事件。S. A. Shapiro 等在 " Fluid induced seismicity guided by a continental fault: Injection experiment of 2004/2005 at the German Deep Drilling Site (KTB) ", *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L01309, 2006 (doi:10.1029/2005GL024659) 中发表了这些结果。观察到了流动各向异性及其水力特性的非线性。如在发表中所描述的那样, 微震被来自流体注入的压力扰动触发。这与孔隙压力扩散的能量输送过程相关。在注入期间增加流体压力导致有效的法向应力降低, 并导致沿着预先存在的亚临界缝隙和裂缝滑动。微地震震源的云斑 (cloud) 的几何形状指示了压力扩散是由流体注入触发的地震活动的主导机制。一种用于使用微震活动性估计岩石的水力扩散性的方法使用流体注入引发

事件的黑斑的时空分析。最简单的版本使用利用在时间  $t$  的标量水力扩散性  $D$  描述在等效的各向同性同质多孔弹性介质中所谓的触发前端的空间位置——即在储层中引发的微震事件的位置  $r$  的方程：

$$[0007] \quad r = \sqrt{4\pi Dt}$$

[0008] 因为原位应力被储层生产和注入活动扰动,作为结果的流体压力上的变化在岩石中造成弹性断层,并导致微震事件。从储层发出的具有低到里氏值  $< -1$  或更低的本地震级的微震被检测。里氏值  $-3$  以下的事件经常被分类为背景噪声。这些微震被在 1 公里或者更大的距离上在具有宽带宽的多分量地震传感器中检测。常规上,包括随着生产时间的储层特性上变化的评估的流体流监视被利用在选择的井中以选择的生产时间间隔使用井下仪器的测量实现。

[0009] 在 6,049,508 和 6,920,083 号美国专利中公开了用于定位微震源的方法。被记录的微震波由叫做 P 波的压缩波和叫做 S 波的剪切波的记录组成。所记录的 P 波和 S 波的初次到达时间,以及岩石层的速度,被用来计算出出现岩石断层的源位置或者震源微震。对于每一个微震事件,在查探源参数之前首先有必要确定断层平面和滑动方向(源机制)。通过识别和分类初次到达时间中断和测量 P 波和 S 波到达时间来实施这些源定位技术。检测这些 P 波和 S 波的幅度,并记录地震图。而且,利用在三分量传感器中记录的波的质点运动的移动矢量的矢端图或者终点执行极性分析,所述三分量传感器在传感器包中正交取向。极性分析包括使用协方差矩阵测量时间窗口上三分量(右正交基础)信号的空间分布。大多数时间使用的结果是由向量定义的分主方向的“方位角”和倾角。这个分析确定了接近三分量传感器或以已知取向精确布置的检测器的波的方向。

[0010] 美国专利 7,127,353 描述了用于监视从储层发射的地震能量的方法。监视响应于活动井中压力变化的地震能量发射上的变化并改变处理参数的值允许测量渗透性张量的分量。改变流体压力导致地震活动性快速地从流体压力变化点向外迁移,并且将改变地震能量发射的特性。

[0011] 美国专利 5,377,104 描述了检测在储层中由水压致裂引发的被动微震事件的地震传感器的结构。该公开提供了监视和验证水力引发的用于处置有害废物以避免与水源的交叉污染的断层的地质容量的方法和系统。

[0012] Lee 等在 *Advances in Geophysics, Supp. 2, Principles and Applications of Microearthquake Networks*, (Academic Press, 1981) 以及 Raymer 等在 "Genetic Algorithm Design of Microseismic Injection-Monitoring Networks in the Tengiz Field", *SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000, PP. 562-565* 描述了引发的微震事件从源到接收机的传播时间涉及求解一组一阶微分方程。空间上分布于表面上以及处于钻孔中不同水平的传感器网络记录了来自具有震源参数  $(x, y, z, t)$  的微震事件的 P 波和 S 波的到达时间的数量  $n$ 。在矩阵表示法中：

$$[0013] \quad AX = B$$

[0014] 其中  $A$  是偏微分的  $n \times 4$  设计矩阵,  $X$  是 4 个未知震源参数  $(x, y, z, t)$  的向量, 并且  $B$  代表在计算的和观察的传播到达时间之间的向量差。设计矩阵确定了网络的效率。对于给定的矩阵  $A$  和一组观测量  $B$ , 该方程将求解未知的向量  $X$ 。偏微分定义了震源参数针对传播时间将改变多少。当传播时间上的小变化导致震源上的大变化时, 不确定性将较大。这

提供了对定位微震事件源的网络性能的定量测量。通过用试探位置填充关注的储层体积来评估网络的性能。在这个体积上,在试探位置和指定的传感器位置之间执行 3D 地震射线追踪建模以产生完整的偏微分集合。每一个偏微分将形成设计矩阵的一行。通过求解这些方程找到网络中传感器位置的最优组合。

[0015] 在共同受让的名为“Continuous Reservoir Monitoring for Fluid Pathways Using 3D Microseismic Data”的 PCT 公开号 W02007/0562278 中公开了对这些方法的改进。这个申请具体实施了映像油气储层中的流体管道的技术。这个系统利用了储层中由流体移动引发产生的微小震动,或者微地震。这些微地震被记录在在测试区域中部署在地面上和钻孔中的灵敏地震检波器上。当流体在储层中移动时检测到这些微震。参考图 3,永久网络 70 被用来记录微震 76,永久网络 70 包括在空间上部署在地面上的注水泥的地震检波器 72 和安装在钻孔监视井 80 中的地震检波器 64。该系统连续地检测和记录当在位置 78 从注入井 82 产生和注入流体时从储层发出的被动微地震或者微震事件。

[0016] 微震源的位置计算是公知技术,并且计算机软件可用于这种分析。被表面和钻孔传感器检测到的每一个微震事件在  $(x, y, z)$  坐标中的位置被导出,并且从来自记录系统的全球定位系统 (GPS) 时间标记获取其发生时间  $T_0$ 。高密度网络中的多个传感器提供了被记录的数据上的冗余性,并改善了所检测事件的源位置上的准确性。

[0017] 监视流体通路并描绘储层流体流动各向异性有助于优化储层管理计划并改善整体油采收。虽然上面描述的参考文献公开了用于确定一个或更多个震源的位置的各种方法和系统,但是没有一个是公开了对通过缝隙和 / 或裂缝的流体的类型的描绘。

[0018] 转让给壳牌石油公司的美国专利 7,242,637 描述了用于查探地下储层区域的时间推移地震勘探过程。该公开识别地震表示中的水接触线,并且也讨论了包括海水层的模型。但是,这些模型不检测基于流体运动的被动微震发射。

[0019] 转让给 Nonlinear Seismic Imaging, Inc 公司的美国专利 6,614,717 也描述了一种时间推移地震成像方法。该参考文献公开了油和水之间的粘度差,并指明地震频率上的滞后与孔隙流体的粘度相关。但是,该参考文献涉及包括主动地震源和接收器的系统中的地震成像。该文献中没有与被动微震发射的测量或者监视有关的公开。

[0020] 全都被转让给 Trans Seismic International Inc. 公司的美国专利 6,498,989 及相关美国专利 6,028,820 和 5,796,678 描述了基于离散动态模型的波动方程,所述模型使用应力条件作为目标参数,这些参数被用来发现油气藏以及储水。来自该方程的生产数据集能够以初始等时线图、压力梯度图、校正等时线图、相对压力可变性图和校正等时线图的叠加的形式输出,这些图是用于识别油、气和水的最可能位置的基础。在这些参考文献中提出的过程用于从地下区域的地震成像定位流体积聚,并推测地震反射勘测。从反射勘测间接地导出流体流的方向。未公开对被动微震活动的监视。

[0021] 转让给 Schlumberger Technology Corporation 公司的专利申请 US2008/0151691 公开了被动地监视微震事件的方法,其可以被施加于油气储层和地下含水层。但是,该公开涉及使用被动微震记录监视水压致裂或者储层激励,并且丝毫不曾尝试辨别在储层中沿着某个通路移动的液体的类型。

[0022] 转让给 University of California 的 Regent 的美国专利 6,941,227 描述了用于处理地震数据的频率相关方法。该公开的一个方面涉及识别油水接触。但是,该公开依赖

于反射勘测,并且频谱被从所获取的来自流体填充的储层的反射数据分析,并与已知积聚进行相关。在该参考文献中没有与基于油气储层中的流体动力学记录或者处理被动地震发射数据相关的讨论。

[0023] 以上参考文献中没有一个公开了检测和监视被动微震发射以确定沿着储油层的特定区域移动的流体的类型。因此,需要用于确定在储油层中通过各向异性流动通路移动的流体前端的位置和流体类型的方法和系统。

[0024] 因此,本发明的目的是基于被动微震数据的收集和分析来确定通过储油层中的流动通路移动的流体的类型。

[0025] 本发明的另一目的是确定通过储油层中的流动通路移动的特定类型流体的位置。

[0026] 如这里所使用的,术语流体指主要是油或者主要是水的液体,其中任何一种均可能包含少量的另一种和溶解气体。出于描述本发明的方法和系统的目的,假设大体积的烃气不存在和/或者没有移动为了表征微震事件而正被分析的储集岩的体积。

## 发明内容

[0027] 上述目的和进一步优点由用于确定在含油储集岩层中移动的液体是水还是油的系统和方法提供。含油岩层包括至少一个生产井和至少一个正常产油期间的注入水源。识别优先流动通路。建立每预定单位基线时间的被动微震事件的基线数量。监视正常产油期间在优先流体通路中的被动微震事件以感测预定单位时段的监视时间期间的微震事件的数量,在预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量与每预定单位基线时间的被动微震事件的基线数量进行比较。如果预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量接近每预定单位的被动微震事件的基线数量,并且如果每预定单位基线时间的被动微震事件的基线数量被在注水大于正常产油期间的注水速率时的时间段期间测量,则确定导致微震事件的流体是水。

[0028] 在本发明的系统和方法的额外实施例中,如果预定单位时段的监视时间期间所感测的微震事件的数量接近每预定单位的被动微震事件的基线数量,并且如果基线时间被在注水小于正常产油期间的注水速率时的时间段期间测量,则确定导致微震事件的流体是油。

[0029] 在某些实施例中,基线是安静时段,在斜坡向上注水时段之后,或者在次级采收周期中以与储层中正常的产油相关联的速率注水之后。安静时段可被用来建立对于控制监视操作和解读监视时段期间的地震数据很重要的基线。

[0030] 本发明涉及改善的储层监视方法和系统,包括识别沿着储层中的烃排出和水移动流动通路移动的流体相(油或者水)。这些流动通路一般沿着储集岩中的裂缝群或其他薄弱区域。当流体在储集岩中移动时,沿着这些机械薄弱区域检测微震事件。流体被注入具有异常流动各向异性的生产储层中,或者被从其提取。水或者盐水被注入储集岩的孔隙体积空间中以增强来自储层的产油。

[0031] 本发明的方法对于主要是油和水(盐水)组成的黑油储层系统中的注水前端映像有用。假设在系统中不存在自由气体。包含油和水具有低气油比(GOR)的储层在大型碳酸盐油田中很丰富。这些碳酸盐岩极为异质,并且很多被钻的井沿着窄的裂缝群遭遇到异常的流体流管道或通路。这些特征造成了不能单从钻孔数据确定的流动各向异性。通常,

在这种大型油田中的井空间很稀疏。井之间和偏离井的注水前端监视对于最优储层管理和提高总体采收是势在必行的。在生产储层中,映像烃流体通路和识别沿着这些流动通路的相应液相(油或者水)对于改善和提高油采收很关键。

[0032] 在应用共同转让的PCT公开WO 2007/0562278中描述的用于监视储层流体移动和确定微震事件的位置的系统和方法以后,根据本发明的方法和系统能够意想不到地确定和区分沿着通路移动的液体的类型的识别。这种识别给储层工程师提供了在计划和部署生产和/或注入操作时有用的信息。

#### 附图说明

[0033] 下面将更详细地并参考附图描述本发明,在附图中,相同或相似的元件用相同的数字指示,其中:

[0034] 图1A和图1B是用来确定沿着流动通路移动的流体类型的微震数据分析的示意过程流程图;

[0035] 图2是用来确定沿着流动通路移动的流体类型的微震数据分析的过程流程的另一个实施例的示意图示;

[0036] 图3是在本发明的实施例中采用的传感器网络的示意图示;

[0037] 图4A是来自油田中的表面传感器的数据的示意图示;

[0038] 图4B是来自油田中的井下传感器的数据的示意图示;

[0039] 图4C是储层特性数据的图形表示;

[0040] 图4D是绘出地震数据的二维矢端图的地震数据的x分量和y分量的数据处理的示意图示;

[0041] 图5是根据本发明过程的在一段时间上的注入速率的图;

[0042] 图6到图9示出了图5中所绘过程的各种阶段期间感测的震源的映像(mapping);

[0043] 图10A到图10C分别示意性示出了包括压力等压线的储层图、叠加在包括压力等压线的储层图上的被动微震事件的震源、以及从震源模式确定的推测流动通路;和

[0044] 图11是在本发明中使用的数据处理计算机的部件的示意图示。

#### 具体实施方式

[0045] 本发明对于在生产储层中连续限定优先流体移动方向(通路)的图以及识别沿着这些优先通路移动的流体的类型特别有用。在钻井中使用常规测量不能很容易地测量流动通路和沿着井之间的这些通路移动的流体相。本发明的方法和系统提供了优先流体通路的取向和分布,并识别流体相,在沿着通路移动的油或水之间进行区分。流体通路的映像和流体类型的识别对优化流体注入和生产操作以及改善总体油采收是有用的。在监视期间,检测到的被动微震发射,在某些实施例中被实时记录和分析,能够限定生产油田中的井之间的流体流动通路。注水前端(water flood front)移动经常更复杂、不均匀并且不可预测。流体流动仿真使用仅在井控制点的数据提供了注水前端的随机模型。当通过注水生产油时,从流体引发的微震数据推断的水力参数可被用作流体监视信息。这个数据用于优化储层管理和开发。

[0046] 水通过储油层中的这些储层管道的移动性远高于油。这主要是因为油比水具有更



高的粘度。在含油储集岩层中,利用本领域技术人员公知的叫做“SCAL”的适当特殊核分析能够获取移动性比率。例如,源自侏罗纪碳酸盐地层的油具有比水高大约三(3)倍的粘度。在处于注水采油中间阶段的储层中,水和油的相对渗透性接近相等。这意味着水的移动性在这种储层中是油的大约三(3)倍。因此,预期水比油移动得快,特别是在例如裂缝群的高渗透性通路中。

[0047] 通过储油层中的多孔岩石的流体流动势能用渗透性来度量。通过多孔介质的流的特性一般由 Darcy 方程定义:

$$[0048] \quad Q_{ph} = \frac{K \cdot k_{r,ph} \cdot A}{\mu_{ph}} \left\{ \frac{\Delta P}{\Delta X_i} \right\}$$

[0049] 其中  $Q_{ph}$  是当压力降  $\Delta P$  在垂直于具有岩石绝对渗透性  $K$  的储层内的区域  $A$  的距离  $\Delta X_i$  上被施加在例如油或者水的具有粘度  $\mu_{ph}$  和相对渗透性  $k_{r,ph}$  的相  $ph$  上时,所述相  $ph$  跨过区域  $A$  流动的速率(体积/时间)。Darcy 方程把流动速率  $Q_{ph}$  等同于压力梯度  $\Delta P / \Delta X_i$  乘以传递性  $(K \cdot k_{r,ph}) / \mu_{ph}$ 。因子  $(k \cdot k_{r,ph})$  是储集岩相对于相  $ph$  的有效渗透性。因子  $(K \cdot k_{r,ph}) / \mu_{ph}$  是相  $ph$ (油或者水)在储集岩中的移动性。因子  $K \cdot k_{r,ph}$  是相  $ph$  在储集岩中的有效渗透性,并且可以被缩写为  $k_{ph}$ 。

[0050] 具有较低粘度的流体具有更高的通过异质岩石中的较高渗透性区域的移动性。沿着这些高渗透性区域,例如通过连接节理系统或者沿着裂缝群的微震事件的跟踪模式更快速。一般来说,每单位时间单位长度中水的移动性,或者水力传导率  $M_w$  可以表示为:

$$[0051] \quad M_w = (K \cdot k_{r,w}) / \mu_w$$

[0052] 其中  $K$  是按面积单位的水的绝对渗透性, $k_{r,w}$  是水的相对渗透性(无单位), $\mu_w$  是按(力)(时间)/(面积)单位或者(压力)(时间)单位的水的粘度。类似地,油的移动性被表示为

$$[0053] \quad M_o = K \cdot k_{r,o} / \mu_o$$

[0054] 其中  $K$  是油的绝对渗透性, $k_{r,o}$  是油的相对渗透性,并且  $\mu_o$  是油的粘度。

[0055] 在具有高绝对渗透性  $K$  的优先流动通路中, $M_w$  大于  $M_o$ 。换句话说,在高渗透性管道中,水比油移动得快得多,在很多情况下导致某些生产井中过早的水突破(water breakthrough)。在例如裂缝群、管道和通道的优先储层通路中的快速水移动将与剪切弹性断裂(即微震事件)相关联,其可以在关注的特定时间段  $\Delta t$  中被检测以监视储层。

[0056] 当储油层处于初级采收阶段时,即油在储层压力驱动下自然流动时,不存在注水,并且油具有比水更高的饱和度和相对渗透性。相比之下,当储油层处于次级采收阶段,即油被注入的水推动以引发流动和生产时,在储层中存在注水以便把油朝着产油器(即,井)移动,因而水和油具有相对来说相等的饱和度和相对渗透性。当储层处于注入的水不能把剩余的油推动或者驱动到产油器的第三采收阶段时,继续从注入器向产油器注水,在生产井处具有最小产油或者没有产油,因而水比油具有更高的相对渗透性。

[0057] 此外,与水移动  $M_w$  相关联的微震将比与在这些储层通路中移动的油  $M_o$  相关联的那些具有更高的震级。在下面更详细地描述的替换实施例中可以利用这种性质。

[0058] 因此,与储层通路中的注水移动相关联的微震事件的频率  $(N_{\text{microseisms}})_w / \Delta t$  可被表征。类似地,能够表征与储层通路中的油移动相关联的微震事件的频率  $(N_{\text{microseisms}})_o /$

$\Delta t$ 。

[0059] 因此,如果  $N_w \equiv (N_{\text{microseisms}})_w / \Delta t$  并且  $N_o \equiv (N_{\text{microseisms}})_o / \Delta t$ ,则在具有比油移动性更高的水移动性的储层中:

[0060]  $N_w > N_o$ 。

[0061] 因此,比起与在相同储层通路中的油移动相关联的微震,与沿着储层通路的水移动相关联的微震事件将处于更高的频率,即每时间段微震的数量。

[0062] 在通过使用沿着相同储层通路检测到的微震的频率和相对震级诊断沿着储层通路流动的流体相时应用这些标准。

[0063] 图 1A 和图 1B 示意性示出了识别在储集岩中移动的液体是水或 / 或油的方法的过程流程。在含油储集岩层中的稳态活动期间,被动微震事件一般不可归因于水或者油通过储集岩中的各向异性流体通路的移动。为了设置用于比较目的的基线以便有效地监视储集岩区域中的流体通路,执行步骤 30 到步骤 40 以确定和映像可归因于小于稳态产油期间的注水速率的注水速率期间的水流动的被动微震事件的数量,并确定和映像可归因于大于正常产油周期期间的注水速率的注水速率期间的水流动的被动微震事件的数量。从传感器传送的微震事件数据被接收和记录在地震服务器中,以便进行处理并存储在例如数据或盘存储设备中,或者,本地存储在每一个传感器中并在预定时间传送到地震服务器以便进行处理。

[0064] 具体来说,在步骤 30,当注水 22 被减少或者斜坡下降 26 时,与含油储集岩区域中的感测的被动微震事件相关的数据被从传感器 20 输入 30。在预定单位时间段期间的微震事件的数量比率  $N_o$  被识别 32,并且这些事件被映像 34 以示出优先流动通路。当注水 22 被增加,斜坡上升 28 时,与含油储集岩区域中的感测的被动微震事件相关的数据被从传感器 20 输入 36。在预定单位时间段期间的微震事件的数量比率  $N_w$  被识别 38,并且这些事件被映像 40。这些比率  $N_w$  和  $N_o$  中的一个或者两者可被用作基线值,用于与下面进一步描述连续监视期间每预定单位时间的事件数量相比较。

[0065] 在注水 22 期间,当正常产油操作 24 正在进行中时,与感测的微震事件相关的数据从传感器 20 输入 42。预定单位时间段期间的微震事件的数量比率  $N_m$  被识别 44。预定单位时间段可以是一个或更多个小时或者一天或更多天的量级,并且对于比率  $N_m$ 、 $N_w$  和  $N_o$  可以相同或者不同。比率  $N_m$  与比率  $N_w$  和  $N_o$  进行比较 46。在稳态生产和注入期间,不应该发生可归因于流体通路中的油或水的流动的微震事件。但是,在异常事件期间,例如当注入速率和正常生产活动相关联并且系统不再处于稳态中时,将发生微震事件。如果确定 48 比率  $N_m$  更接近比率  $N_o$  而不是比率  $N_w$ ,则微震事件可以被识别 50 为可归因于沿着优先流动通路的油移动。相反,如果确定 52 比率  $N_m$  更接近比率  $N_w$  而不是比率  $N_o$ ,则微震事件可以被识别 54 为可归因于沿着优先流动通路的水移动。

[0066] 在替换实施例中,并参考图 1A 和图 1B 中以虚线示出的步骤 55、56 和 58 和连接块 C,并且也参考图 2,感测的微震事件的相对震级在确定沿着流动通路移动的流体的身份时可用来提供进一步的置信度。具体来说,在斜坡下降 26 注水 22 期间,震级水平  $R_o$  被确定 55 并映像 34。在斜坡上升 28 注水 22 期间,震级水平  $R_w$  被确定 56 并映像 40。在正常产油操作 24 进行时的注水 22 期间,震级水平  $R_m$  被确定 58。

[0067] 震级水平  $R_m$  被与震级水平  $R_w$  和  $R_o$  比较 60。如果确定 62 震级水平  $R_m$  更接近震

级水平  $R_o$  而不是震级水平  $R_w$ , 则微震事件可以被识别 64 为可归因于沿着优先流动通路的油移动。相反, 如果确定 66 震级水平  $R_m$  更接近震级水平  $R_w$  而不是震级水平  $R_o$ , 则微震事件可以被识别 68 为可归因于沿着优先流动通路的水移动。注意, 这些确定 62、66 可被用来补充在图 1A 和图 1B 中所示的过程中所做的确定 48、52。

[0068] 最好利用位于表面上、在钻孔内, 或者在表面上以及在钻孔内的多个微震传感器确定微震事件的位置。例如, 可有益地采用在共同转让的 PCT 公开 W0 2007/0562278 中描述的系统和方法来监视储层流体移动和确定微震事件的位置。在额外的实施例中, 如美国专利 6049508、6920083、7127353 和 Lee 等人和 Raymer 等人的出版物中公开的用于定位微震源的方法可被用来确定源, 假如这些方法包括微震事件的频率和震级的确定。

[0069] 在一个优选实施例中, 使用在共同转让的 PCT 公开 W02007/0562278 中描述的用于感测油气储层中的微震事件和映像流体管道的方法和系统。如图 3 中所示, 如通过引用包含于此的共同转让的 PCT 公开 W0 2007/0562278 中描述的那样, 网络 70 包括等间隔的地震传感器 72 和额外的传感器 74 的网格, 传感器 72 被永久性浇注水泥并在空间上部署在地面上, 传感器 74 被以水泥浇注在一个或更多个钻孔或者监视井 80 中。在这种系统中, 当流体被产生并在位置 78 例如通过注入井 82 注入井下时, 被动微地震或者微震事件 76 被从储层连续地检测和记录。这些微震颤来自注入脉冲 88 在储层中引发的应力变化的结果, 和 / 或来自产油活动。

[0070] 系统利用因流体移动在岩石中引发的剪切滑动所致而在储集层中产生的微振动或者微地震 76。这些微地震被记录在部署在测试区域中的地面和钻孔中的地震传感器 72、74 或者地震检波器上。当流体在储层中移动时检测到这些微震 76。系统连续地检测和记录当流体被产生和注入 78 时从储层发出的被动微震事件 76。因此, 当流体被从储层产生并注入储层时, 提供了三维连续和实时储层监视。使用永久表面传感器 72 和钻孔中的永久多级传感器 74 的分布式网络来获取同步的 GPS 时间标记微震数据。从连接到记录器的 GPS 卫星接收器获取国际标准时间或 GMT。数据被在每一个传感器收集, 并被记录在中央记录系统中。考察网络中的每一个传感器的位置, 例如在笛卡儿坐标系中作为  $x, y, z$  值, 并且在球坐标系中分别作为径向距离  $r$ , 顶点  $\theta$  和方位角  $\phi$ 。传感器在浇注水泥就位之前被精确地按相同配置取向。在完成安装以后, 通过围绕井在测量的方位角方向产生受控地震源, 确定钻孔传感器的取向。在每一个传感器分析所检测的来自已知的地震方位角源的第一到达以便准确地确定其取向。

[0071] 从 3 分量钻孔传感器, 通过从记录的震动图选择 P 波和 S 波事件的第一到达时间 (或第一中断), 估计微震源或者震源位置。如图 4D 中所示的矢端图分析提供了波的极化方向, 并且从区域中其他测量获取的储集岩的速度被用于提取的传播时间的层析成像反演以获取微震事件或者震源的源点的范围。

[0072] 高密度微震网络利用能够在 10-500Hz 频率范围上测量无伪影的响应的三轴或 3 分量地震检波器。传感器元件取向彼此相互正交, 以确保检测具有沿所有取向的质点运动的微震波。传感器检测从岩石破裂表面辐射以及从储层内发出的微震源事件。

[0073] 为了确定从源位置辐射的微震事件, 采用本领域技术人员公知的微震分析技术把表面的高密度测量与在钻孔中所做的那些进行整合。对于每一个微震事件, 在针对源参数分析之前, 首先有必要确定滑动方向或者源机制。

[0074] 通过激励储层以便引发微震事件可以校准传感器网络。在某些方法中,通过执行注入器脉冲测试实现校准,其中在附近的注入井注入的水被以预先定义的间隔脉冲化。可以在附近井中在储层中预先定义的深度水平引爆炸药。作为结果的冲击波在表面和钻孔传感器处作为微震事件被检测,具有对应于传感器到源位置的延迟时间。

[0075] 现在参考图 10A 到图 10C,当注入的水置换储油时,储集岩中的薄弱区域,例如节理和断层被扰动,并且在储层体积中产生了局部微震事件。在某些实施例中,储层体积被理想化为多个网格块,例如等大小的立方体,其代表储层矩阵。这种蜂窝模型中的这些网格块或者可以具有带有作为结果的微震活动的剪切滑动,或者可以不具有活动。当邻近网格块包含从内部发出的微震事件时,它们可能是由于已经暂时或者永久性地被来自注水或者产油的流体流置换的断裂系统。邻近小区中的事件组成了可被推断为互连流动通路的趋势。因此具有微震活动的这些网格块将被互连到水力流,并且将构成沿着这些优先方向的流体通路。不具有微震活动的网格块是不具有优先流体流动方向或者具有各向同性流动的储层区。

[0076] 通过针对部署在钻孔中的传感器和在空间上部署在地面上的传感器中记录的地震活动连续地查询储层体积中的所有小区,可以经验地估计流动各向异性和高渗透性通路。微震事件网络形成了传导网络,其形成了用于计算通过这种网络的流体流的储层仿真的输入。

[0077] 通过与储层中引发的活动相关,校准来自储层的微震发射。储层中的流体注入和生产速率在多个井位置被改变或者‘脉冲化’,并且其对监视井和表面传感器中的微震的检测和记录的影响被检查。所检测的由于储层的这种受控脉冲所致的环境噪声阈值以上的微震提供了与储层压力和流速的相关。经过处理的微震属性也需要与表面传感器和监视井中的垂直天线的空间分布相关。

[0078] 微震系统的处理架构由所记录的来自表面和钻孔传感器的震动图的信号处理和整合整个系统的结果组成。表面数据在时间窗口上被求和,使用研究区域中的速度模型迁移数据中记录的地震能量,并且微震事件的震中位置和它们被记录的发生时间被校正。微震事件的这些震中被与从处理钻孔传感器中的微震记录导出的事件的震源关联。两个传感器系统(表面和井孔传感器)的位于各种储层深度的震源的时间同步事件被匹配,用于解读储集岩中薄弱区域中的切变滑动。假设这种剪切滑动是由于注入和生产操作引起的储层流体的扰动所致。切变滑动沿着储集岩矩阵中的现有薄弱区域。来自注入和生产速率上的变化的储层压力上的变化在储层中产生了应力梯度。储层压力靠近注入器较高,在产油器处较低。

[0079] 图 4A 和图 4B 分别示出了在表面传感器和钻孔传感器测量的来自源的压缩波或 P 波,以及切变波或 S 波。P 波和 S 波的到达时间之间的差提供了源和接收器位置之间的距离。P 波和 S 波的从源到传感器的地震波速度模型被用于使用层析成像技术求解源位置。

[0080] 图 4D 示出了作为在三分量传感器中记录的质点运动的运动矢量的末端的地震波矢端图。针对矢端图分析记录的数据来计算到达传感器的地震波的方位角和倾角。从记录的被动微震数据计算的矢端图提供了到达传感器的地震波的方位角和倾角,并被用来计算微震事件源点或者震源位置。从 P 波质点运动矢端图推断微震源到接收器的方向。使用信号的谱频率来估计岩石破裂的半径,并且地震信号分量的极性矢端图和相对幅度指示了弹

性形变表面的取向。

[0081] 图 5 是随着时间变化的注水图,并且图 6 到 9 示出了在根据本发明的过程中对应于图 5 的图的时间段上的数据。图 10A 到图 10C 示出了注水之前的压力等压线、叠加在包括压力等压线的储层图上的斜坡上升注水之后的被动微震事件的震源,以及从震源模式确定的推测流体通路。

[0082] 在碳酸盐储集岩中收集微震数据。该数据被如图 6 到 9 中所示那样绘出,其中,较大尺寸的形状指示较大震级事件,并且从暗到亮的色差代表了降低深度。使用商业上可获得的地震分析软件绘出图 6 到 9 中绘出的数据。适当软件的例子包括在商业上可从 Pasadena, California, USA 的 Kinemetrics Inc 公司获得的 AntelopeEnvironment Monitoring 软件;在商业上可从 Ontario, Canada 的 Nanometrics Seismological Instruments Inc 公司获得的 Atlas DataProcessing 软件;在商业上可从 Stuttgart, Germany 的斯图加特大学图形研究所获得的 SonoDet;和在商业上可从 Norwegian SeismicArray (NORSAR) 获得的 Seisan Earthquake 分析软件。

[0083] 使用安装的微震传感器网络 70 在侏罗纪碳酸盐储集岩中进行根据这里描述的方法和系统的勘查,微震传感器网络 70 类似于在图 3 中示意性示出的,包括 225 个表面传感器 72 和监视井 80 中的总共 33 个井下传感器(9 个在浅井中,24 个在更深的井中)。每一个表面传感器和井下传感器包括 x, y 和 z 传感器分量以确定由微震图定义的切变滑动的位置和方向。网络包含 3 公里乘 3 公里的区域。如图中取向,该区域包括西边的注入井和东边的生产井。注入井位于背斜层结构的侧翼。

[0084] 从每天 20000 桶的正常注入速率,把通过注入井引入海水暂停 24 天,以便建立在地震上安静的区域,如图 5 中所示。在此时间期间,注入器东边的生产井正以正常速率产油。从由表面传感器 72 和钻孔传感器 74 的网络 70 检测的被动地震数据,在注入器被关闭时,即对应于图 1A 和图 1B 中所示的过程流程中的斜坡下降时段,计算震源。如图 6 中所示,从储层深度发出的这些震源沿西南到东北 (SW-NE) 方向取向。如这里进一步描述的,流体通路中的事件数量可忽略。在 6 小时时段上示出的 SW-NE 方向上的事件可归因于图 6 到图 9 中所示区域西边的区域中的生产活动,其持续贯穿了图 5 中绘出的时间段。这些事件由因停止注水所致的对稳态平衡的干扰引起。注意,由于地震分析软件为了减小噪声的影响对显示的归一化所致,在图 7 到图 9 中未示出这些事件。

[0085] 再次参考图 5,注水关闭以后跟着是通过注入井的 14 小时的每天 115000 桶的高注水速率。图 7 示出传感器网络检测到大量事件,在从高注水时段之后立刻开始的 6 小时时段上被示出。这些事件通过西北到东南 (NW-SE) 方向的区域沿着特定模式聚集。很清楚,注水期间的微震事件揭示了与注入关闭期间的事件截然不同的趋势。由于只有水相围绕注水器流动,这使得能够把这种大量的 NW-SE 微震事件与水相的流动相关联。这些事件沿着狭窄的 NW-SE 通路发生,水相通过所述狭窄的 NW-SE 通路流动。当注入脉冲继续,并且额外的水被以比正常速率高得多的速率注入时,震源群中的事件的数量在强度上增大,一般是由于优先液体通路中水的累积增加所致。震源的取向方向继续沿 NW-SE 趋势,如图 8 中所示,其代表以每天 40000 桶注水 15 天以后在 6 小时时段上的微震事件。该管道看起来位于高渗透性通路的区域中,注入的水优先地沿着所述高渗透性通路通过储层前进。

[0086] 图 9 示出了从以环境注入和生产速率注入 20 天以后记录的震动图计算的事件。

注意只有几个事件,并且取向不一致。当较靠近注入井时,它们某种程度上按 NW-SE 趋势取向,这与浪涌注入 (surgeinjection) 一致。

[0087] 在停止注水期间这些 NE-SW 事件的相对震级与浪涌注入期间检测到的那些相比较小。稳态平衡被停止注入轻微地干扰。随着储层中注入速率上的浪涌,平衡条件被实质上改变。这导致了大得多的 NW-SE 趋势微震事件密度。这可以归因于储层中水相相对于油相更大的移动性。水流沿着其找到最小阻力的狭窄通路被微震事件群填充。储集岩基质和沿着这个 NW-SE 趋势的薄弱区域中的这种异质性是对于注入的水的优先通路的原由。在产油的储层中,重要的是能够限定水前进的通路并预测生产井中的“水突破”。使用本发明的方法和系统,可以预测储层中的这种水通路。储层中的油基本上是连续的,并且将持续从井筒生产,直到水到达为止。水在储层中具有更高的移动性,因而更容易产生。油不与水混和,所以一旦碰上水,则油将不在井中流动。

[0088] 图 10A 示出了压力等压线和随着时间的压力传输方向,由储层图上的箭头代表。图 10B 示出了叠加在图 10A 的储层图上的被动微震事件的震源。储层压力等高线被与震源分布比较。左侧示出了如所预期的靠近注入器的较高压力。箭头指示压力前端随着时间前进。很清楚,震源看起来与压力趋势平行。

[0089] 图 10C 中示出的注入脉冲期间的微震事件的趋势遵循与储层中的压力传输相同的方向。事件沿着狭窄通路(沿着所述狭窄通路,压力前端的移动更迅速)。储层注水前端通过储集岩的这个可能因流体传导裂缝所致的薄弱区域前进。

[0090] 参考图 5 到图 10C 描述的这些结果确认了本发明的方法和系统能够识别沿着储层通路流动的流体相(水或者油)。通过被动记录微震,确定和映像注水速率低于正常稳态产油的注水速率的第一时间段中的微震事件的数量,并确定和映像第二时间段中的微震事件的数量(在第二时间段期间,注水速率超过正常稳态产油的注水速率),优先流体通路可被识别,并且针对该流体通路,每单位时间的事件的基线数量可被确定。此后,通过连续地或周期性地监视先前识别的流体通路,当一个时间段上的事件数量接近每单位时间的事件的基线数量时,与水流相关联的活动可被识别。

[0091] 在替换的实施例中,可以执行几个斜坡上升注水脉冲来设置供在监视期间使用的基线。例如,循环注水操作可以包括以高速率注水,跟着是一段时间内的关闭,并且把这些步骤重复期望数量的循环。微震事件的数量可被确定并用作基线值,例如与被监视的微震事件比较,并且如果监视的事件数量接近基线事件的数量,则确定沿着识别的优先通路移动的液体是水。

[0092] 例如,如图 11 中所示,微震数据被收集,以便由计算机 122 处理,计算机 122 可以实现地震服务器。通信接口 124 连接到传感器,并且由处理器 126 获取微震数据以便存储在存储器 128 中。处理器 126 和存储器 128 可由任何已知的计算系统实施,例如基于微处理器的服务器或者个人计算机。数据分析程序 130 在存储器 128 中提供,并由处理器 126 执行,用于执行在图 1A 和 1B 中描述的或者在图 1A、1B 和图 2 中示出的过程流程的操作、步骤和特征。例如,处理器 126 可以包括本领域已知的作为硬件和/或软件的层析成像分析装置 132,用于产生对应于获取的微震数据的断层照片,并执行监视的事件和基线事件的比较。计算机 122 可以包括或连接到 GPS 系统 134,GPS 系统 134 可以包含或连接到与传感器相关联的 GPS 系统,用于根据其获取时间管理接收的微震数据。

[0093] 计算机 122 可以包括和 / 或连接到输出设备 136, 输出设备 136 可以包括显示器 138 和 / 或打印机 140, 或者其他已知的输出设备, 例如绘图仪。随着微震数据已通过通信接口 124 在处理器 126 被接收, 一旦系统 10 已经使用数据分析程序 130 和 / 或层析成像分析装置 132 处理过这些微震数据, 处理器 126 能够产生和输出如图 6 到 9 和图 10A 到图 10C 中所示的所检测的震源 98 和所确定的流动通路 102 的图形映像。输出的映像可以被在显示器 138 上显示给用户和 / 或可以在打印机 140 上打印或使用绘图设备绘图。使用计算机 122 来实施本发明的系统和方法, 通过从记录的震动图提取 P 波和 S 波事件的第一到达时间或第一中断可以估计微震源或者震源位置。例如图 4D 中示出的矢端图提供了 P 波和 S 波的极化方向, 并且从区域中的其他测量获取的岩石的速度特性被用于提取的传播时间的层析成像反演, 以获取相应的微震事件的源点或者震源的范围。

[0094] 虽然参考陆基传感器和传感器网络描述了本发明的方法和系统, 但是本领域技术人员将会理解, 利用适当的修改, 可以在水下含油储层中实施用于确定沿着流动通路移动的液体的类型的方法和系统。

[0095] 本发明有益地提供了用于连续地检测这些被动微震数据或者微地震来监视油气储层中的流体通路的方法和系统。各向异性流体流或者不均匀的方向流速通常与储层生产和注入操作相关联。当流体从储层产生和被注入储层中时, 由于流动各向异性产生了微震事件。因此, 根据本发明, 流体流各向异性或者通路可被映像, 并且沿着储层体积中的这些通路移动的流体的储层相 (油或者水) 可在井之间以及偏离井被识别。时间窗口内微震震源的映像提供了微震发射发生的频率, 即, 每单位时间的微震震源的数量。发生频率上的差别被用于把通过储层流动通路的水输送与油输送相区别。结果增强了储层模型准确性、储层管理和改善的油采收。

[0096] 用于使用被动地震发射识别沿着流动通路移动的储层流体的类型的方法和系统有益地允许生产油田的操作者优化储层管理和改善总体油采收。具体来说, 储层工程师能够计划适当的生产和 / 或注入井的开发。例如, 当本发明的方法和系统确定在某个位置沿着通路移动的流体的类型是水时, 可以避免在该位置布置生产和注入井。如果现有井已经被钻在那些区域中, 则可以禁止生产和 / 或注入操作的尝试。此外, 当确定在某个位置沿着通路移动的流体的类型是油时, 储层工程师可以计划在该通路的区域中开发生产井, 或者, 如果现有生产井已经被钻在那些区域中, 则可以保持或者重新开始抽取操作。此外, 储层工程师可以计划注入井的位置, 一般避免存在任一类型的流体通路的区域。有益地, 就抽取效率来说, 使用本发明的系统和方法导出的信息提供了显著的经济效益。此外, 通过避免在优先流体通路包含水的区域中钻出或者重新打开生产井, 消除了去除水的成本。此外, 在盐水的情况下, 禁止抽取提供了减少设备和管道暴露给盐水的腐蚀效果的额外益处。

[0097] 上面和附图中已经描述了本发明的方法和系统, 但是, 修改对于本领域技术人员将是清楚的, 并且本发明的保护范围由后附的权利要求限定。

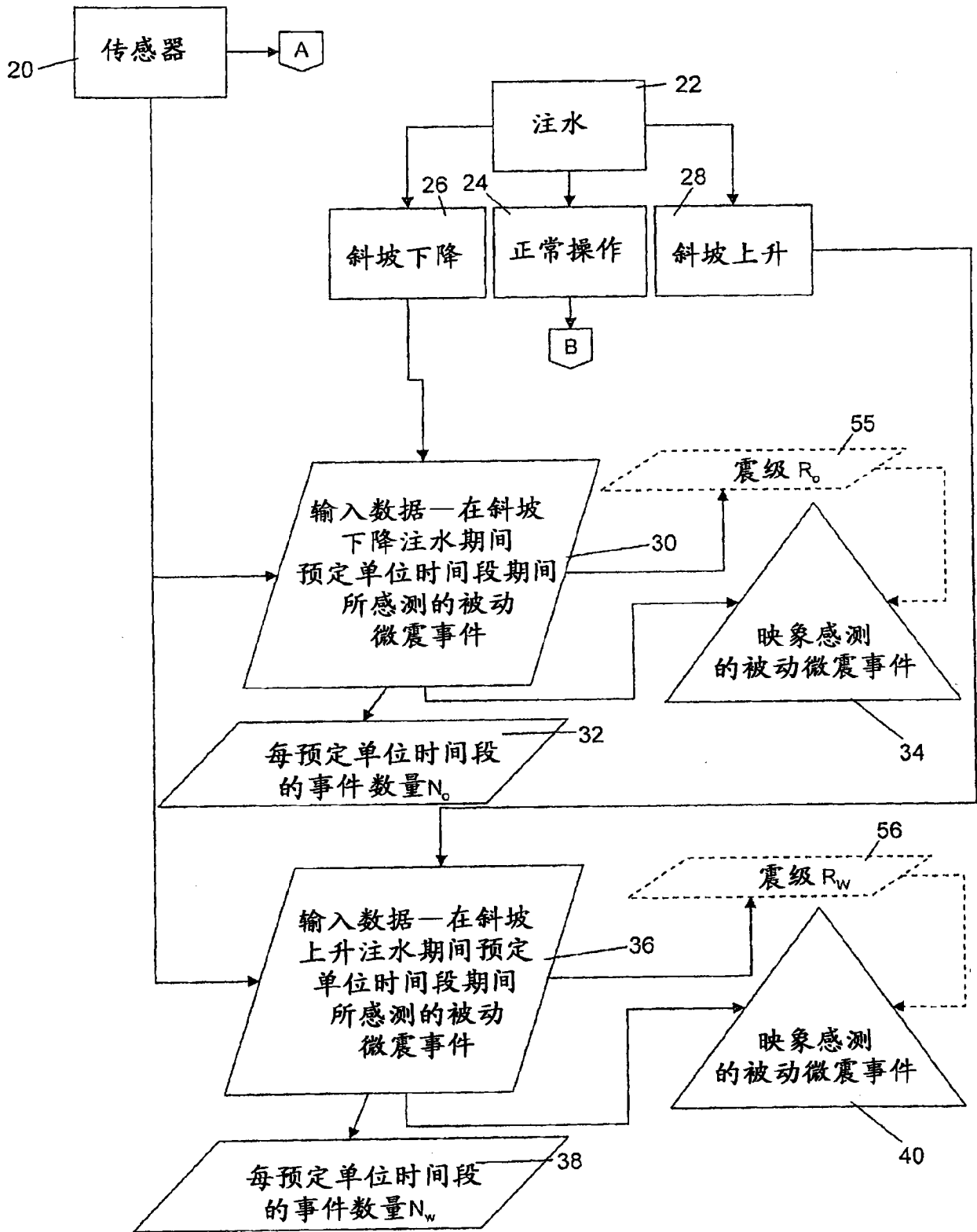


图 1A



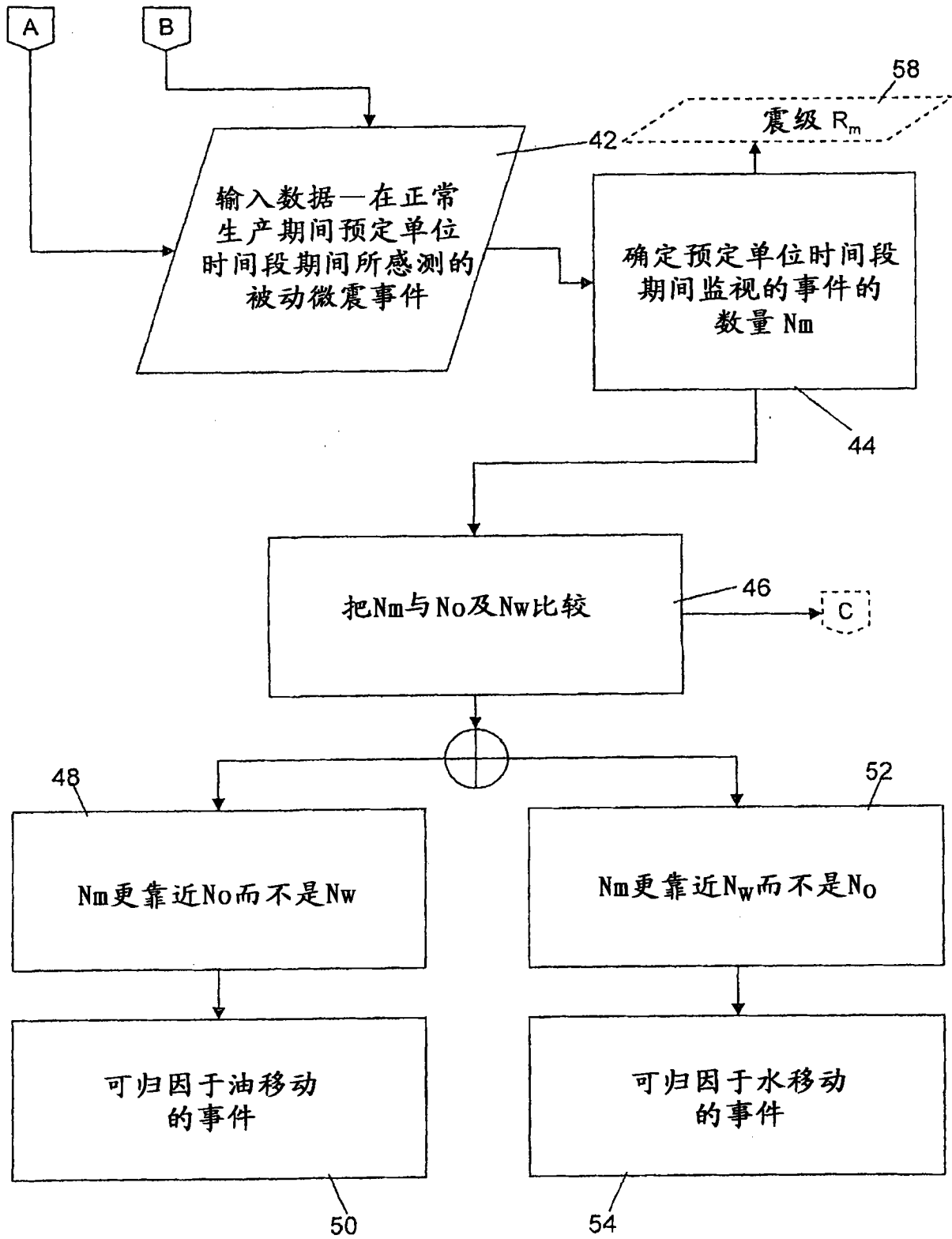


图 1B

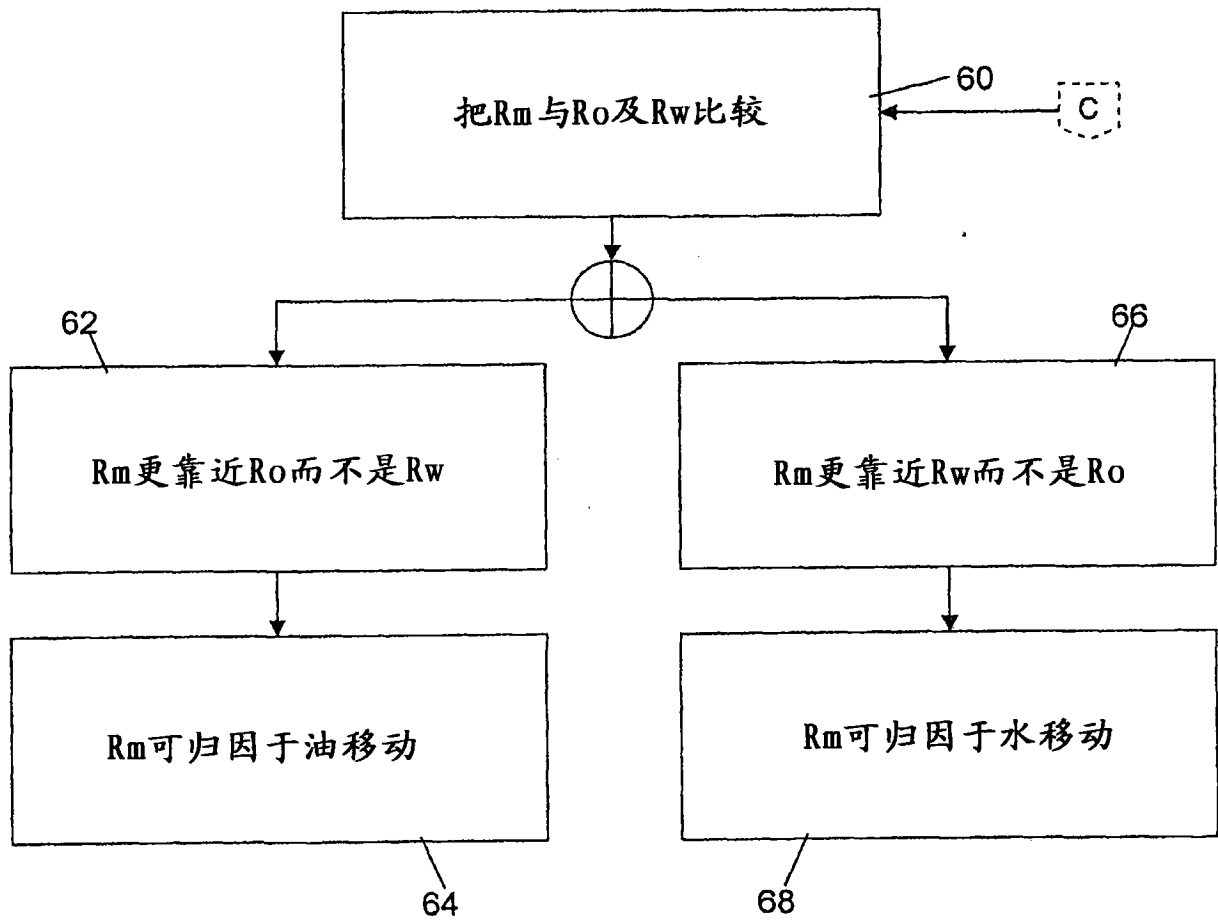


图 2

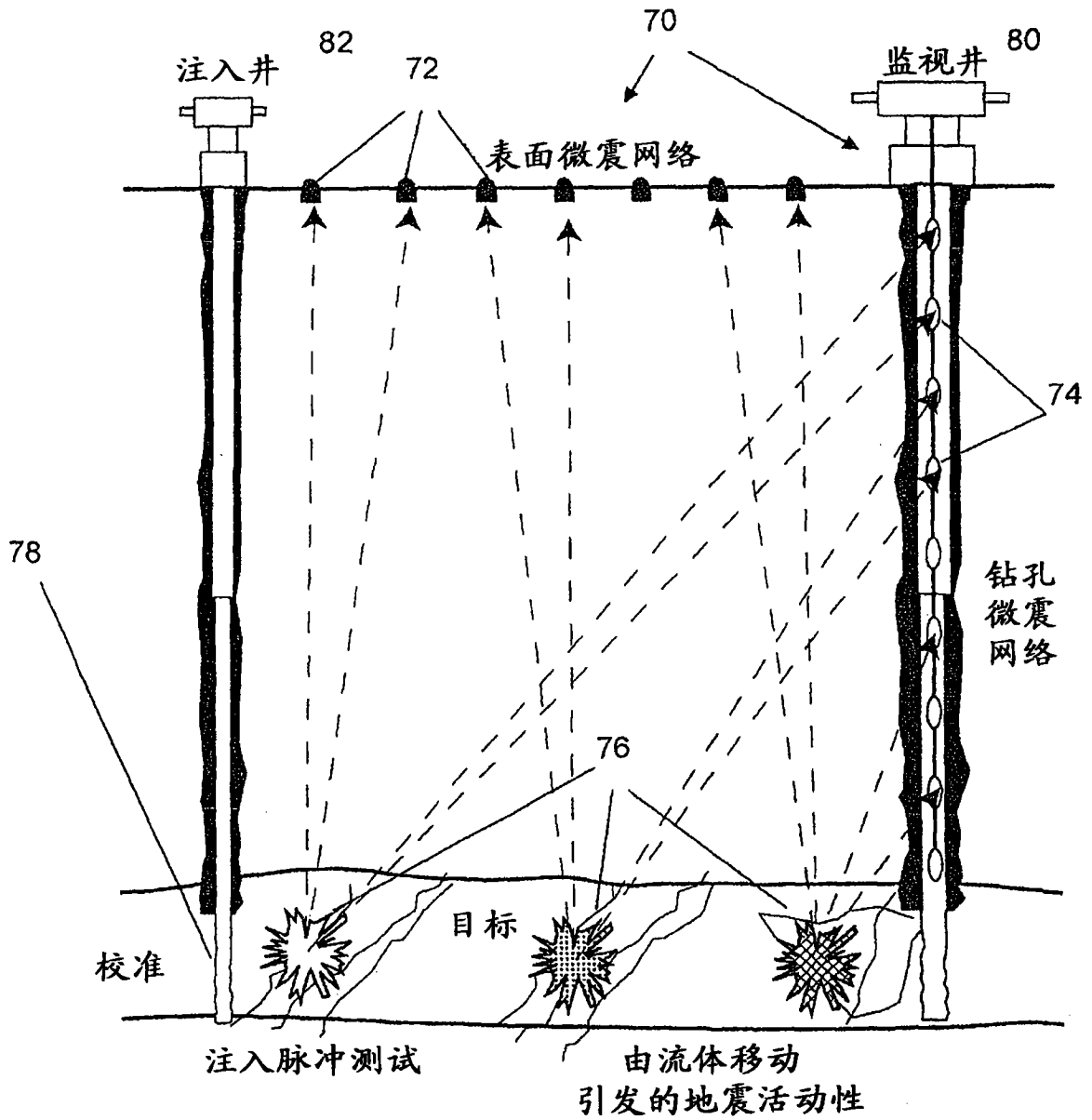


图 3

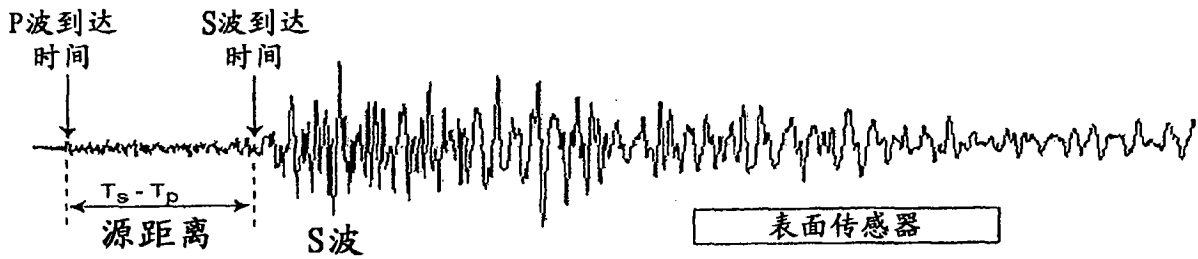


图 4A

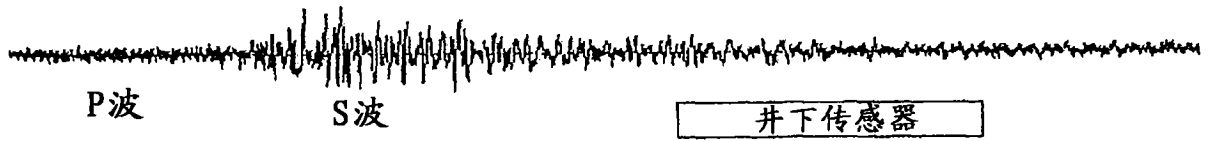


图 4B

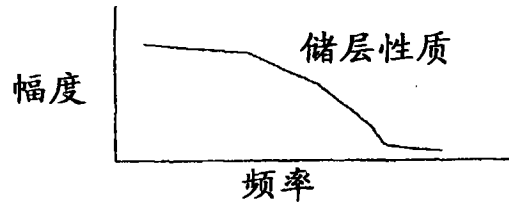


图 4C

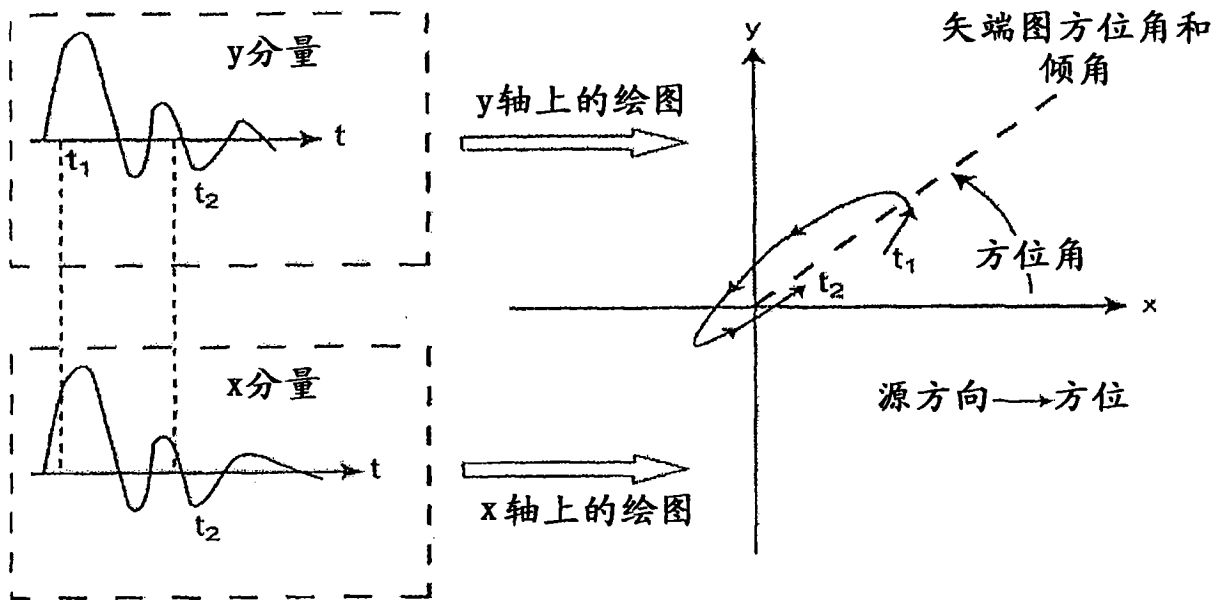


图 4D

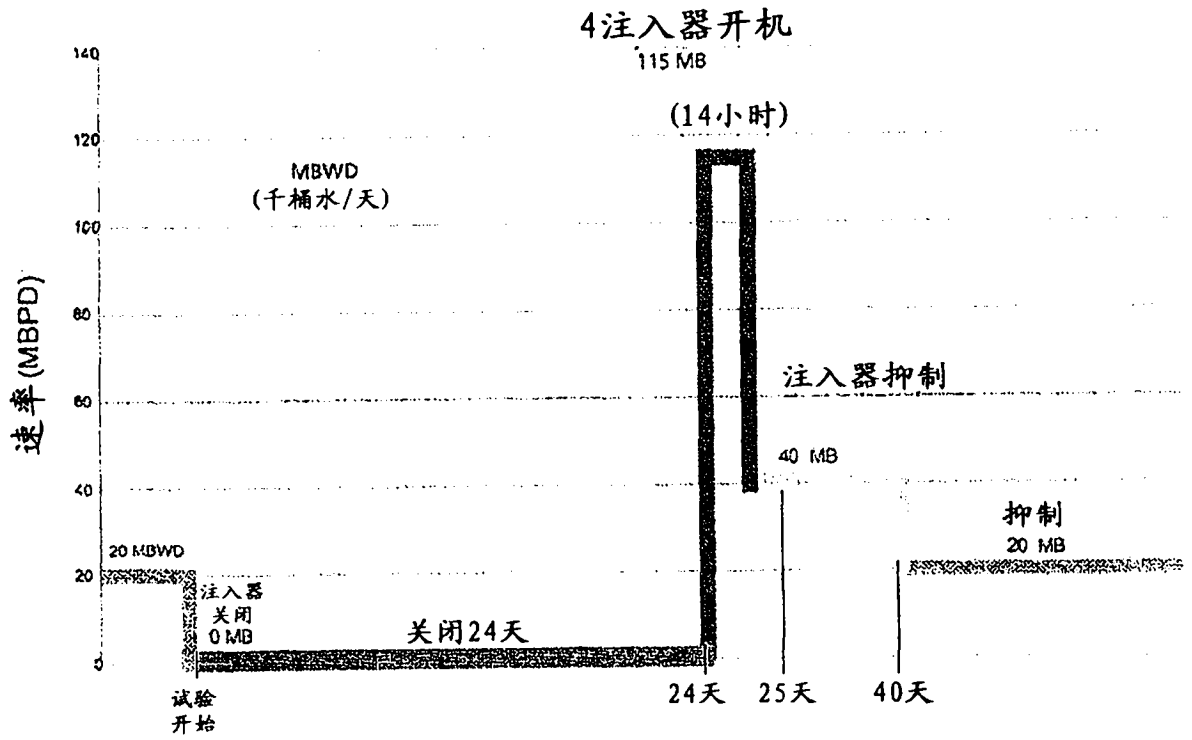


图 5

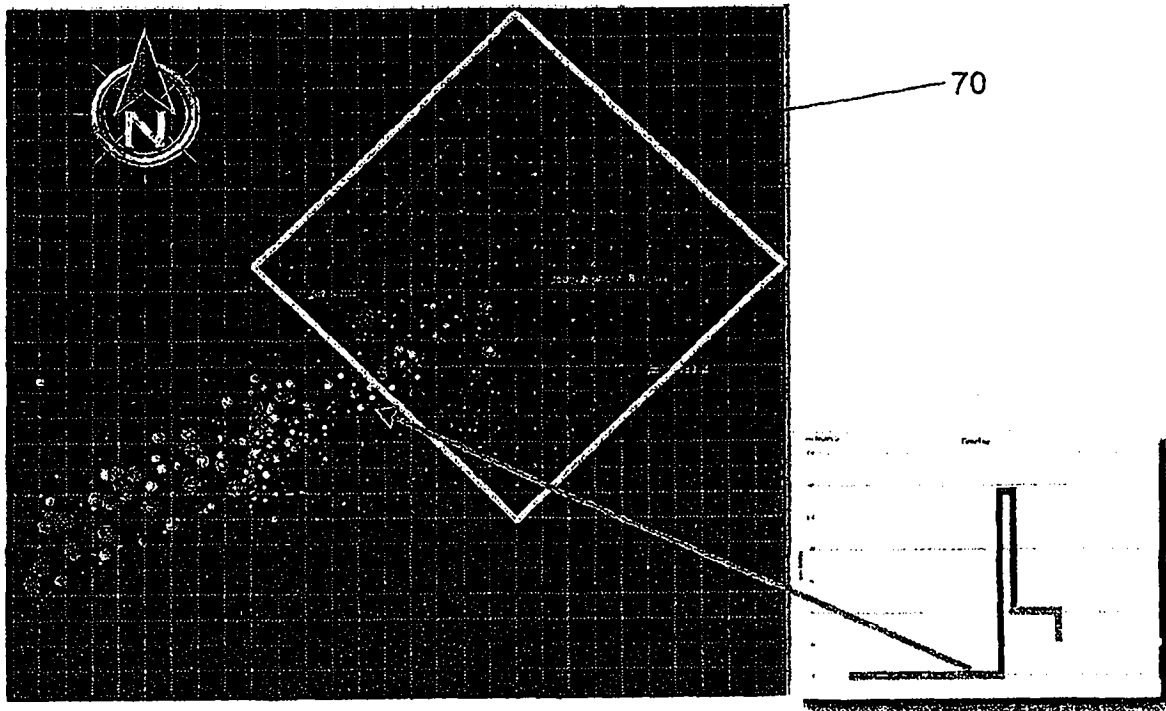


图 6

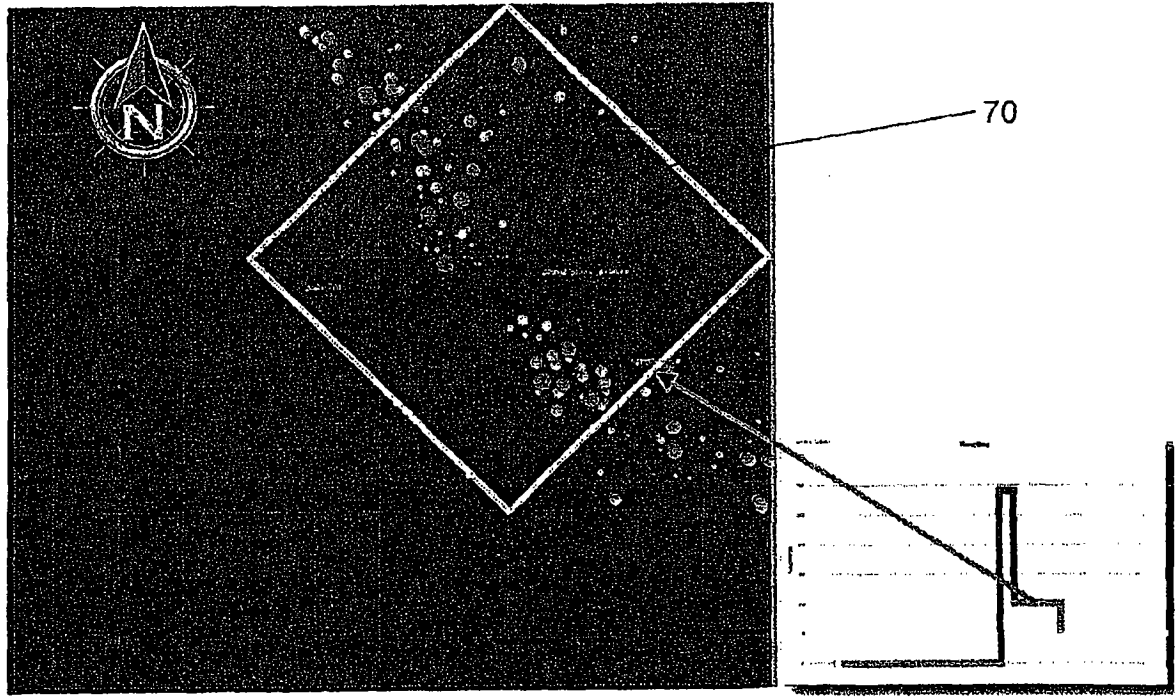


图 7

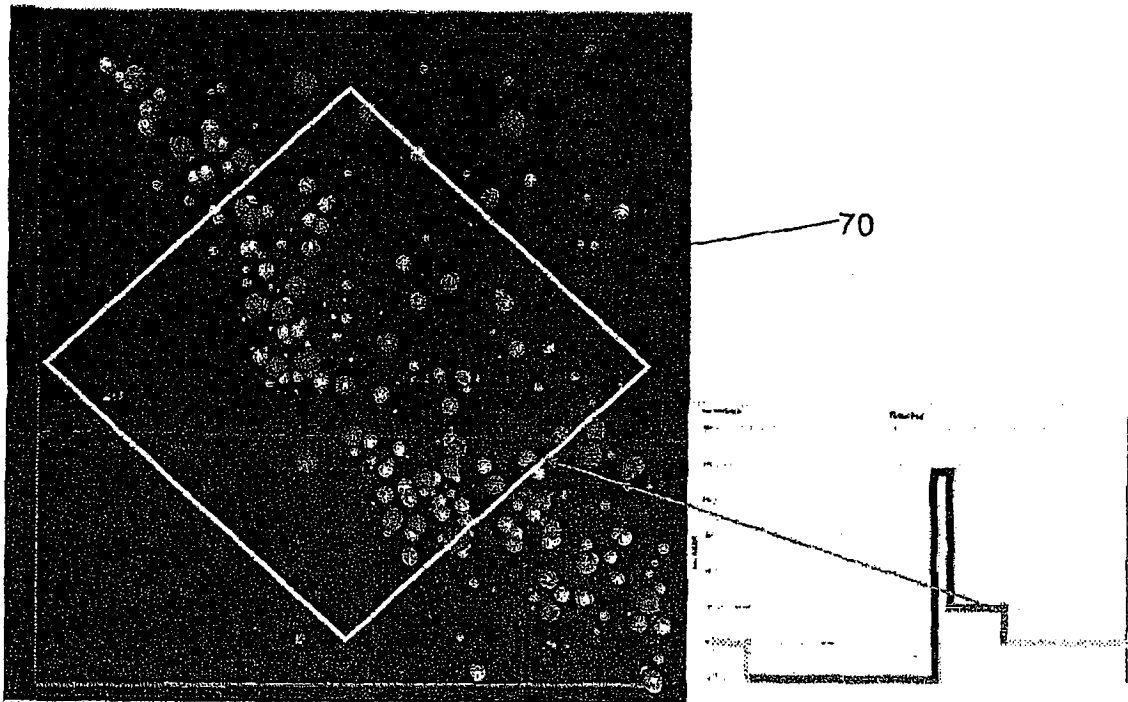


图 8

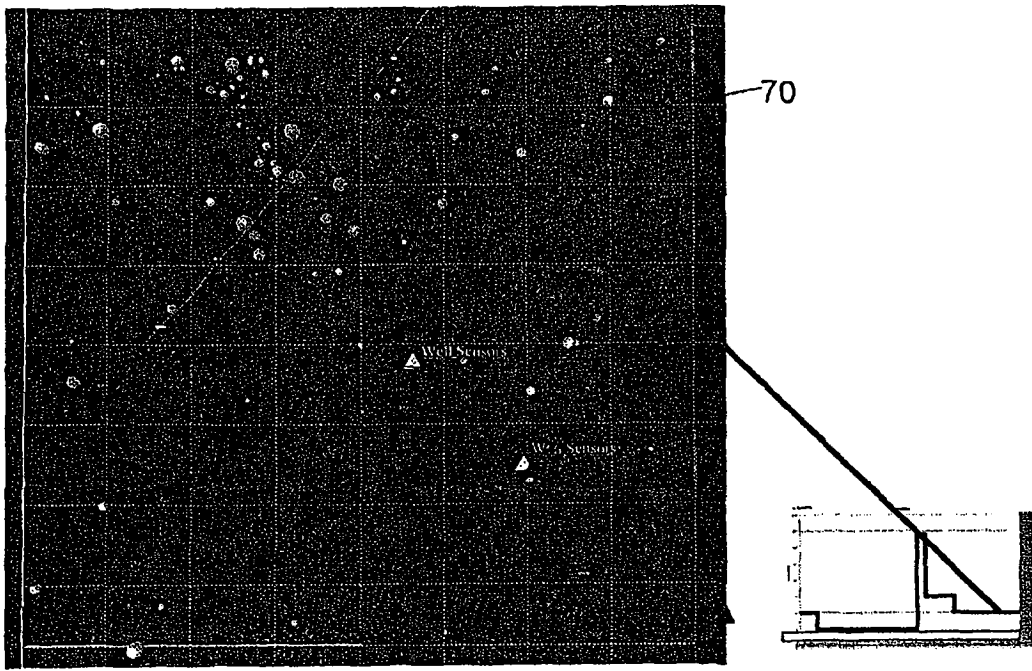


图 9

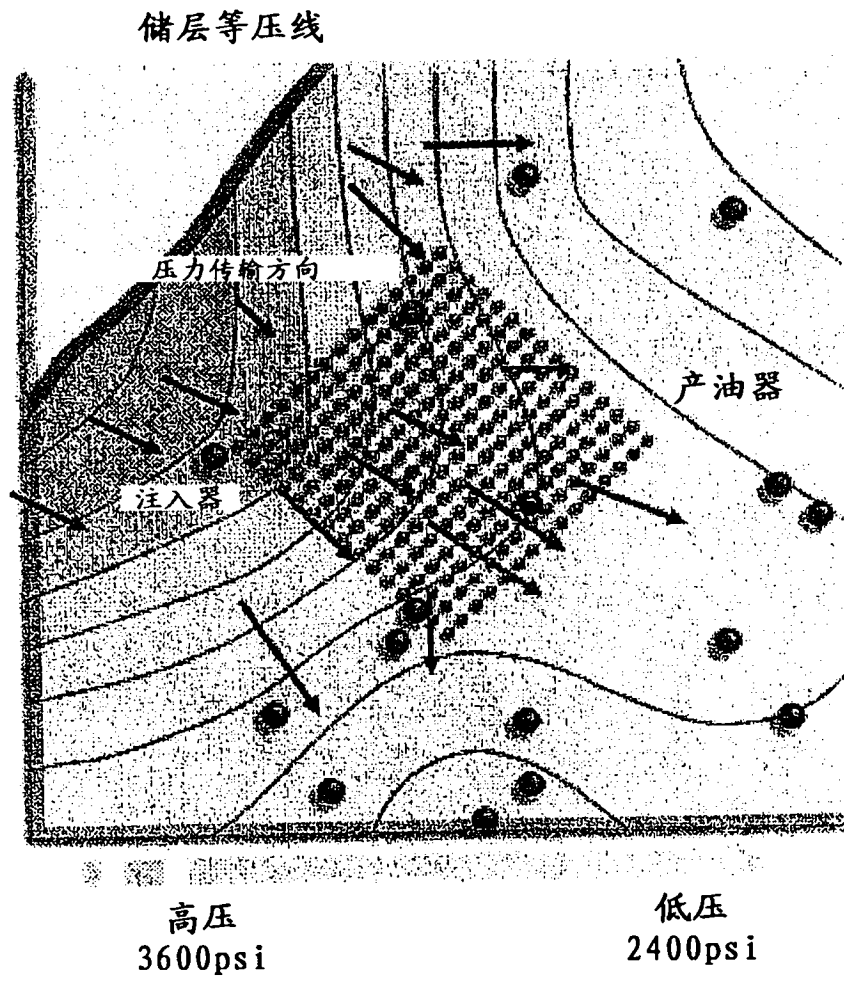


图 10A



微震触发的事件

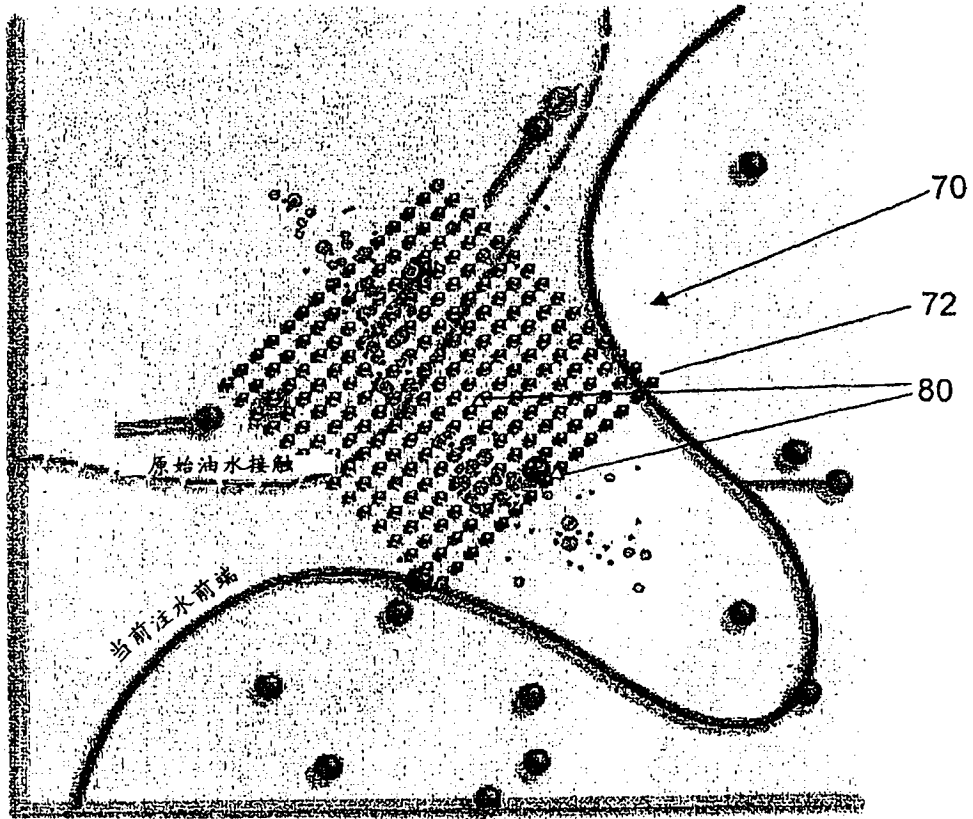


图 10B

微震触发的事件

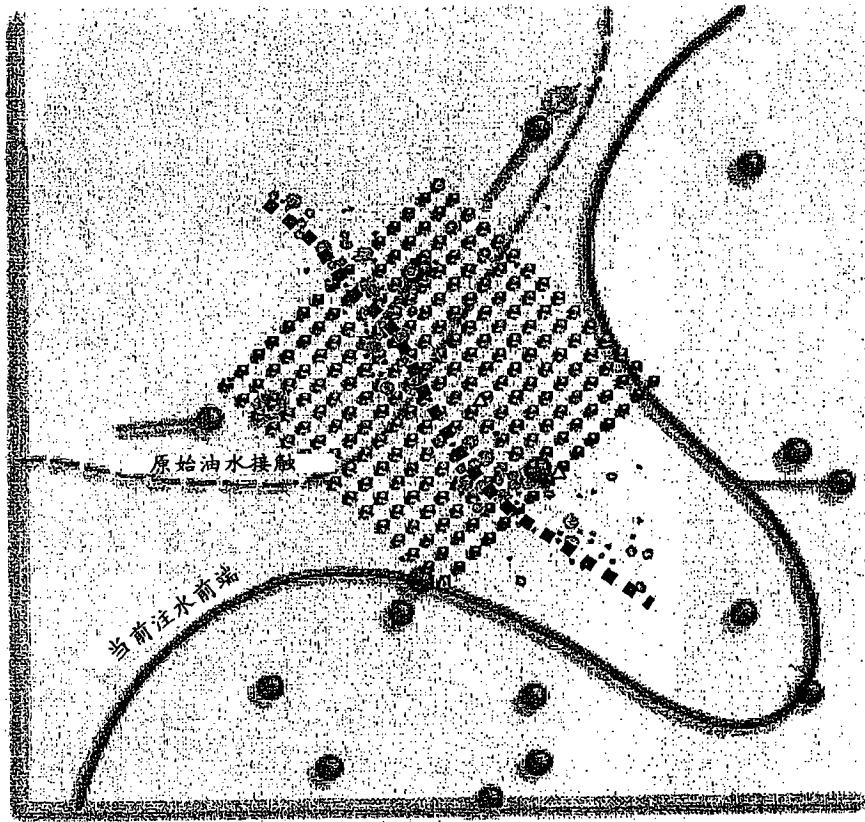


图 10C

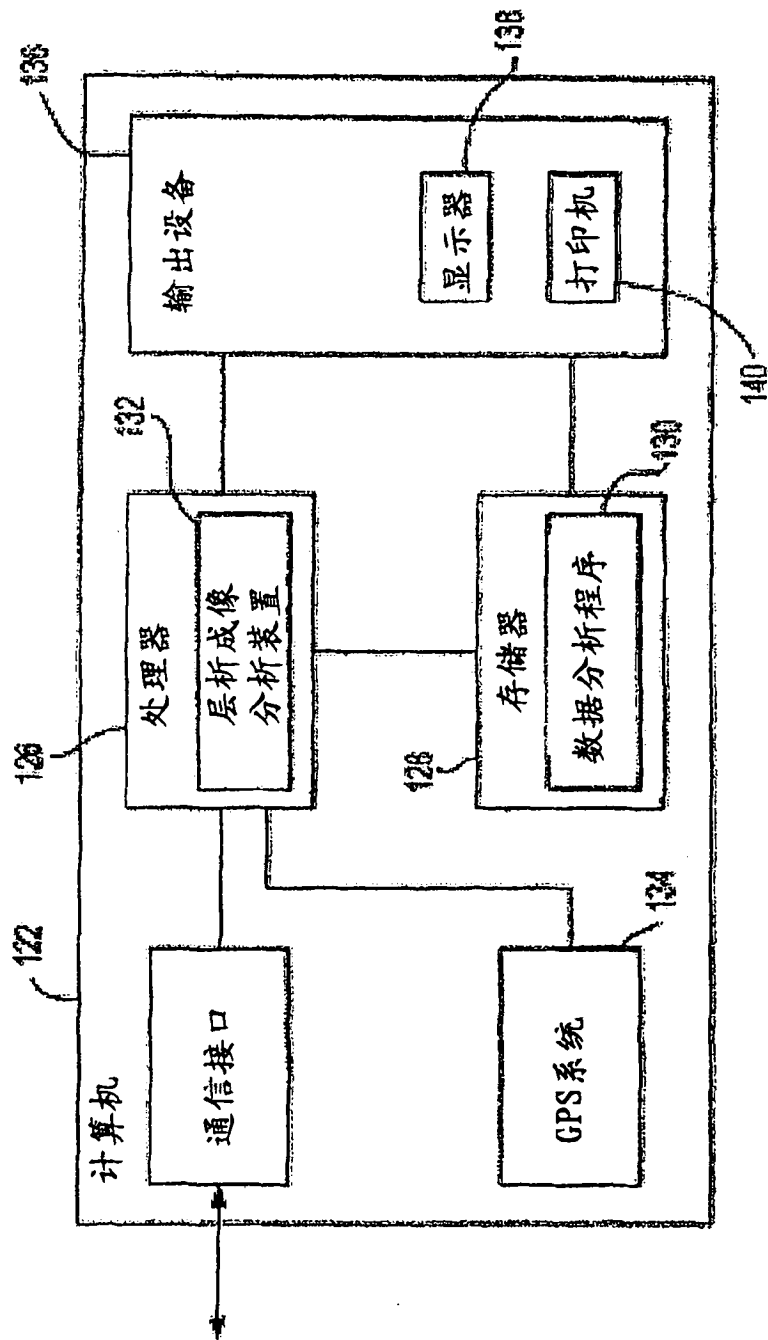


图 11