[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01R 33/44 (2006.01)

[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03149035.2

[45] 授权公告日 2008 年 8 月 6 日

[11] 授权公告号 CN 100409024C

[22] 申请日 2003.6.19 [21] 申请号 03149035.2

[30] 优先权

[32] 2002.6.19 [33] US [31] 10/175287

[73] 专利权人 施卢默格海外有限公司

地址 巴拿马巴拿马城

[72] 发明人 K·加尼桑

[56] 参考文献

JP5-31089A 1993.2.9

US5757188A 1998.5.26

CN1249436A 2000.4.5

US5345173A 1994.9.6

US6166543A 2000.12.26

US6111408A 2000.8.29

JP7-313485A 1995.12.5

US5796252A 1998.8.18

JP3-45245A 1991.2.26

审查员 隋 欣

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 吴立明 梁 永

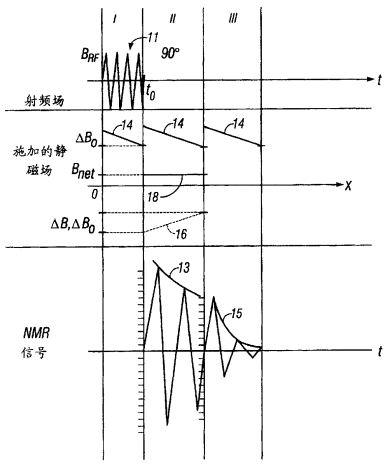
权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 8 页

[54] 发明名称

利用梯度场 NMR 手段进行 NMR 频谱分析

[57] 摘要

本发明涉及核磁共振测量方法；所述方法包括的步骤为：施加一个第一静态磁场，对试样进行极化；向试样上发射一个射频的脉冲。 随后，施加一个第二磁场，以便当与第一静态磁场共同作用时，产生一个第三静态磁场。 最后，在第二静态磁场作用期间或撤除之后，测量由试样发出的 NMR 信号。 最后，这些方法可以用于矿井中的核磁共振测量。



1. 一种核磁共振测量方法，包括;

施加一个静态磁场，以对有待分析区域的原子核进行极化，该静态磁场具有一个第一梯度;

向该区域施加一个射频磁场脉冲，使其中的原子核重新取向;

向所关注的区域施加一个梯度磁场，该梯度磁场具有一个第二梯度，与第一梯度符号相反，大小相等；和

检测该区域的核磁共振信号。

2. 依照权利要求 1 的方法，其中所述射频磁场脉冲的频率是处于该区域中原子核的拉莫频率。

3. 依照权利要求 1 的方法，其中所述射频磁场脉冲具有一个选定的持续时间和幅值，使原子核在约 90 度内重新取向。

4. 依照权利要求 1 的方法，其中所述射频磁场脉冲具有一个选定的持续时间和幅值，使该区域中的原子核在小于 90 度内重新取向。

5. 依照权利要求 4 的方法,其中所述射频磁场脉冲至少重复一次。

6. 依照权利要求 5 的方法，其中所述射频磁场脉冲之间的时间间隔被选择使得可以获得较高的信噪比。

7. 依照权利要求 1 的方法，其中所述梯度磁场由至少一个水平方位线圈产生。

8. 依照权利要求 7 的方法，其中该水平方位线圈在至少一个选定区域中进行辐照。

9. 依照权利要求 1 的方法，进一步包括对核磁共振信号进行频谱分析。

10. 依照权利要求 1 的方法，进一步包括将一个核磁共振测井装置下放到井中。

11. 依照权利要求 10 的方法，其中将核磁共振测井装置下放到电缆上。

12. 依照权利要求 10 的方法，其中在钻井时进行核磁共振测量。

13. 一种核磁共振测量方法，包括;

施加一个静态磁场，以对有待分析区域中的原子核进行极化，该静态磁场具有一个第一梯度;

向该区域施加一个射频磁场，以使其中的原子核重新取向;

向该所关注区域施加一个梯度磁场，该梯度磁场具有一个第二梯度，该第二梯度与第一静态磁场的梯度的符号相反，选定其幅值以使静态磁场的梯度变换符号；

撤去该梯度磁场，和

检测该区域的核磁共振信号。

14. 依照权利要求 13 的方法，其中所述射频磁场的脉冲的频率是处于该区域中原子核的拉莫频率。

15. 依照权利要求 13 的方法，其中所述射频磁场的脉冲具有一个选定的持续时间和幅值，使原子核在约 90 度内重新取向。

16. 依照权利要求 13 的方法，其中所述射频磁场的脉冲具有一个选定的持续时间和幅值，使该区域内的原子核在约小于 90 度内重新取向。

17. 依照权利要求 16 的方法，其中所述射频磁场的脉冲至少重复一次。

18. 依照权利要求 17 的方法，其中所述射频磁场的脉冲之间的时间间隔被选择使得可以获得较高的信噪比。

19. 依照权利要求 13 的方法，其中由至少一个水平方位线圈产生梯度磁场。

20. 依照权利要求 19 的方法，其中该水平方位线圈在至少一个选定区域中进行辐照。

21. 依照权利要求 13 的方法，进一步包括对核磁共振信号进行频谱分析。

22. 依照权利要求 13 的方法，其中施加梯度磁场；撤掉该梯度磁场并检测该区域的核磁共振信号，重复这两个步骤直至核磁共振的幅值降到零为止。

23. 依照权利要求 13 的方法，进一步包括将一个核磁共振测井装置下放到井中。

24. 依照权利要求 23 的方法，其中核磁共振测井装置被下放到电缆上。

25. 依照权利要求 23 的方法，其中在钻井时进行核磁共振测量。

利用梯度场 NMR 手段进行 NMR 频谱分析

技术领域

总体而言，本发明涉及用于核磁共振（NMR）频谱分析的方法和装置。

背景技术

用于测量物质特性或识别其成分的基于电磁的装置是众所周知的。核磁共振（NMR）技术已被用于形成生物组织的图象或确定诸如土壤构成的成分。

在该技术领域中，核磁共振测量装置是众所周知的。通常，核磁共振测量装置包括形成一个静态磁场的磁体和用于发射和接收射频磁场的天线。天线通常是位于靠近所分析区域位置的螺线管线圈。Jackson 等人的美国专利 4，350，955 和 Taicher 等人的美国专利 4，717，877 中公开了核磁共振的例子。

核磁共振现象是由质子和中子总数为奇数的原子核表现出来的。当被放置在一个外部施加的静态磁场 B_0 中时，原子核趋于和所施加的磁场对齐，产生一个沿所加磁场方向的净磁化强度 M。原子核以一个特征 NMR 频率 ω（称为拉莫频率）围绕所加磁场的进动，该频率由下式给出：

$$\omega = \gamma B_0 \quad (1)$$

其中 γ 为旋磁比。

具有与特定的原子核拉莫频率相等的频率分量并沿着垂直于静态磁场 B_0 的方向施加的时间相关（RF）磁场将使原子核吸收能量并章动而偏离静态磁场 B_0 的轴线。如果章动角达到 90° 时恰好关掉 RF 脉冲，则磁化强度落入垂直于 B_0 方向的平面（x－y 平面）中，净磁化强度在该垂直平面内以拉莫频率围绕静态磁场 B_0 进动。这样的一个脉冲称为 90° 脉冲。180° 脉冲是使磁化强度 180° 章动的脉冲，即使其反转的脉冲。这两种类型的 RF 脉冲形成了 NMR 频谱分析的基本手段。

图 2a 和 2b 显示了通常用于 NMR 频谱分析的脉冲序列。图 2a 的上部图象显示的是上述的 90° 脉冲，以及下部图象显示的是检测的信号。图 2b 显示的是自旋回波脉冲序列。一个 90° 脉冲首先施加到原子核系统。该 90° 脉冲将相应的磁化强度旋转到 x-y 平面中。该横向磁化强度开始

相移。在该 90° 脉冲之后的某一时刻，施加一个 180° 脉冲。该脉冲使磁化强度围绕 x 轴旋转 180° 。该 180° 脉冲使磁化强度的至少部分地相移形成一个称为回波的信号。因此，该 180° 脉冲被称为是重新聚焦脉冲。图 2b 中的下部图形显示的是检测的信号。

不仅可采用 90° 脉冲。也可采用重复几个小自旋翻转角（<90° ）的 RF 脉冲，以产生较高的信噪比（S/N）。使用几个小的自旋翻转角的 RF 脉冲的优势是在 RF 脉冲之后，仍有沿 z 轴方向的剩余磁化强度。该剩余磁化强度可用于观测下一个 NMR 信号。因此，可以重复施加另一个小翻转角的 RF 脉冲，而无需等待沿 z 轴返回磁化强度。在 RF 脉冲之后磁化强度返回到 z 轴的时间常数被称为是自旋－点阵驰豫时间（T_1）。小的自旋翻转角 RF 脉冲的应用可以无需等待磁化矢量到达其平衡值而重复后续的 RF 脉冲。对于一个固定的时间，可以利用小翻转角和小重复时间替代一个单一的 90° RF 脉冲，来获得一系列的 NMR 信号。因此，利用一系列小翻转角与利用一个单一的 90° RF 脉冲相比，可得到更大的信噪比（S/N）。

最佳的小翻转角 α 和小翻转角脉冲间隔 τ 与驰豫时间 T_1 的关系如下式表示：

$$\cos\alpha = \exp(-\tau / T_1)$$

众所周知，观测的 NMR 信号强度取决于翻转角、重复时间和 T_1。FID 信号的初始幅值由下式给出：

$$M = M_0[(1-E_1)/(1-E_1\cos\beta)]\sin\beta$$

其中

$$E_1 = \exp(-T / T_1)$$

T_1 = 自旋点阵驰豫时间

T = 重复时间

β = 翻转角

图 9 显示的是归一化的 FID 幅度峰值的曲线，对于不同的 T/T_1 值，与自旋翻转角 β 的函数关系。

例如，当重复时间为 50% 的 T_1 时，采用 50° 的翻转角，信号幅值为全幅值的 50%。重复时间为 $5T_1$，自旋翻转角为 90° 时重复时间为 $5T_1$，FID 的幅值最大。在一个 $5T_1$ 的时间内，50° 的翻转角可以重复 10 次，信噪比增加 58%。

实验中，利用一个轴线与静态磁场 B_0 垂直的调谐 RF 线圈来检测 NMR 信号。同样的用于励磁的线圈也适于用来进行检测，或者采用一个独立的与上述线圈垂直的线圈。振荡的 NMR 磁化强度在线圈中感应一个电压。可以检测这些 NMR 信号或对其进行傅立叶变换，以导出受激原子核的 NMR 信号特性的频率分量。

信号幅值随时间的衰减是由于自旋－自旋驰豫现象和每个原子核都经受一个略有不同的磁场所引起的。在信号最大值处，所有原子核一致进动。随着时间的消逝，原子核之间的相位差越来越大，必然会出现各个原子核的磁化矢量的总体作用之和为零。

原子核彼此之间经受不同的磁场强度值通常是由于静态磁场 B_0 的不均匀性、化学位移所导致的，或由于内部（试样感应的）磁场的不均匀性导致的。

静态磁场 B_0 的不均匀可能是由于相应的磁场源的缺陷所导致。而且，随着测量点远离静态磁场源，静态磁场 B_0 的强度经受一个跌落，如图 3 所示。这称为磁场梯度。该梯度具有一个由磁场强度的改变量除以距磁场源的距离所定义的斜率。磁场强度随着测量点远离磁场源而减小的梯度被规定为具有一个负斜率（$dB/dx<0$）。磁场强度随着测量点远离磁场源而增加的磁场被规定为具有正斜率（$dB/dx>0$）。

当一个原子被放置在一个磁场中时，会产生化学位移现象。原子的电子围绕所施加的磁场的方向旋转，在原子核处产生一个磁场，将对作用于原子核的磁场的总值产生影响。

内部（试样感应）的磁场的不均匀的例子是具有不同磁化率的媒质之间的交界面，如土壤构造中的颗粒孔隙流体界面。

可测量的信号（自由感应衰减 FID）仅和原子核进动持续一样长的时间。信号衰减到零的时间长度被称为自由感应衰减时间。

可以注意到，信号随时间按指数规律衰减，因此：

$$M(t)=M_0e^{(-t/T_2^*)} \qquad (1)$$

其中 M_0 为初始磁化矢量的模数，T_2^* 被称为衰减时间常数，为 M_0 衰减到 M_0/e 所需的时间。T_2^* 的倒数（$1/T_2^*$）为 M_0 的值在一个时间 t 内衰减的比率。

如前所述，信号幅值的衰减可能是由于施加到受激区域的净磁场的不均匀性所导致的。这些不均匀性可能是静态磁场的梯度、化学位移和

试样感应的不均匀所产生的。上述每种现象均会产生各自的减少净磁化矢量的比率。因此，

$$1/T_2^* = 1/T_2 + 1/T_2' + \gamma\Delta B_0$$

其中，例如，$1/T_2$ 是由自旋－自旋驰豫引起的，$1/T_2'$ 是试样感应不均匀的比例，$\gamma\Delta B_0$ 对应于静态磁场的不均匀的影响。公式 1 可重写为：

$$M(t) = M0[e^{-t(1/T_2 + 1/T_2' + \gamma\Delta B_0)}] \qquad (2)$$

因此，90° RF 脉冲的（FID）衰减时间可能是由静态磁场 B_0 的磁场不均匀、自旋－自旋驰豫时间（T_2）和试样感应不均匀时间（T_2'）导致的，如公式 2 所示。

从位于 RF 信号辐照的试样中的区域将会发射 NMR 信号。该区域被称为受激区域。图 3 显示的是厚度为 Δx 的受激区域（12）。众所周知，RF 信号越强，Δx 的值越大。Δx 的值越大，意味着在受激区域上静态磁场强度值下降得越多，静态磁场（ΔB_0）的不均匀性越大，由公式 2 可以看出，信号的衰减越快。因此，随着 RF 场强度的增加，信号的持续时间将显著减小。

然而，例如较厚的（Δx 较大）受激区域将导致较高的可检测信号，如 CPMG 序列（Carll-Purcell-Meiboom-Gill）回波信号。CPMG 序列在每个回波产生之间包括一个 90° 脉冲，随后有一个 180° 脉冲。

因此，在 NMR 检测时，希望能够进行修正或均匀消除一个特定的对 FID 衰减时间的影响，诸如静态磁场 B_0 的磁场的不均匀性。

而且，还希望修正施加到受激区域的净静态磁场的梯度，以便一旦恢复所加的静态磁场 B_0 的初始梯度，便可感应回波信号。

发明内容

本发明的一个特征是提供一种用于核磁共振测量的方法。该方法包括施加一个静态磁场对有待分析区域中的原子核进行极化的步骤。该静态磁场具有一个梯度。而且，向该区域施加一个射频的磁场，将其中的原子核重新定向，还向所关注的区域施加一个梯度磁场。该梯度磁场具有一个和静态磁场的梯度大小相等、符号基本相反的第二梯度。最后，检测该区域的核磁共振信号。

本发明的另一个特征是提供一种用于核磁共振测量的方法。该方法包括施加一个静态磁场对有待分析区域中的原子核进行极化的步骤。该

静态磁场具有一个第一梯度。而且，向该区域施加一个射频的磁场，使其中的原子核重新取向，还向所关注的区域施加一个梯度磁场。该梯度磁场具有一个和静态磁场的梯度符号相反的第二梯度，其幅度选择为使静态磁场的梯度反号。最后，撤掉该梯度磁场，并检测该区域的核磁共振信号。

另外，本发明的其它方面是提供在其中进行核磁共振测量的方法。本发明的其它方面和优点从下面的说明中可明显看出。

本发明的第一方面涉及一种核磁共振测量方法，包括；施加一个静态磁场，以对有待分析区域的原子核进行极化，该静态磁场具有一个第一梯度；向该区域施加一个射频磁场脉冲，使其中的原子核重新取向；向所关注的区域施加一个梯度磁场，该梯度磁场具有一个第二梯度，与第一梯度符号相反，大小相等；和检测该区域的核磁共振信号。

对上述方法的一个改进在于：所述射频磁场脉冲的频率是处于该区域中原子核的拉莫频率。

对上述方法的另一个改进在于：所述射频磁场脉冲具有一个选定的持续时间和幅值，使原子核在约 90 度内重新取向。

对上述方法的又一个改进在于：所述射频磁场脉冲具有一个选定的持续时间和幅值，使该区域中的原子核在小于 90 度内重新取向。

对上述方法的再一个改进在于：所述射频磁场脉冲至少重复一次。

对上述方法的另一个改进在于：所述射频磁场脉冲之间的时间间隔被选择使得可以获得较高的信噪比。

对上述方法的另一个改进在于：其中所述梯度磁场由至少一个水平方位线圈产生。

对上述方法的另一个改进在于：其中该水平方位线圈在至少一个选定区域中进行辐照。

对上述方法的另一个改进在于：进一步包括对核磁共振信号进行频谱分析。

对上述方法的另一个改进在于：进一步包括将一个核磁共振测井装置下放到井中。

对上述方法的另一个改进在于：其中将核磁共振测井装置下放到电缆上。

对上述方法的另一个改进在于：其中在钻井时进行核磁共振测量。

本发明的第二方面涉及一种核磁共振测量方法，包括；施加一个静态磁场，以对有待分析区域中的原子核进行极化，该静态磁场具有一个第一梯度；向该区域施加一个射频磁场，以使其中的原子核重新取向；向该所关注区域施加一个梯度磁场，该梯度磁场具有一个第二梯度，该第二梯度与第一静态磁场的梯度的符号相反，选定其幅值以使静态磁场的梯度变换符号；撤去该梯度磁场，和检测该区域的核磁共振信号。

对本发明第二方面的方法的改进在于：所述射频磁场的脉冲的频率是处于该区域中原子核的拉莫频率。

对本发明第二方面的方法的另一个改进在于：其中所述射频磁场的脉冲具有一个选定的持续时间和幅值，使原子核在约90度内重新取向。

对本发明第二方面的方法的再一个改进在于：所述射频磁场的脉冲具有一个选定的持续时间和幅值，使该区域内的原子核在约小于90度内重新取向。

对本发明第二方面的方法的又一个改进在于：所述射频磁场的脉冲至少重复一次。

对本发明第二方面的方法的另一个改进在于：其中所述射频磁场的脉冲之间的时间间隔被选择使得可以获得较高的信噪比。

对本发明第二方面的方法的再一个改进在于：其中由至少一个水平方位线圈产生梯度磁场。

对本发明第二方面的方法的又一个改进在于：该水平方位线圈在至少一个选定区域中进行辐照。

对本发明第二方面的方法的再一个改进在于：该方法进一步包括对核磁共振信号进行频谱分析。

对本发明第二方面的方法的另一个改进在于：施加梯度磁场；撤掉该梯度磁场并检测该区域的核磁共振信号，重复这两个步骤直至核磁共振的幅值降到零为止。

对本发明第二方面的方法的又一个改进在于：该方法进一步包括将一个核磁共振测井装置下放到井中。

对本发明第二方面的方法的再一个改进在于：其中核磁共振测井装置被下放到电缆上。

对本发明第二方面的方法的另一个改进在于：在钻井时进行核磁共振测量。

附图说明

图 1 说明的是一个核磁共振装置。

图 2 说明的是施加和测得的信号。

图 3 是施加的静态磁场值的图表。

图 4 是依照本发明的一个实施方案施加的磁场和测得的信号的图表。

图 5 是依照本发明的一个实施方案施加的磁场和测得的信号的图表。

图 6 是依照本发明的一个实施方案施加的磁场和测得的信号的图表。

图 7 是依照本发明的一个实施方案的测井工具的概要图。

图 8 是依照本发明的一个实施方案的测井工具的概要图。

图 9 显示的是不同 T/T_1 值时归一化 FID 幅度峰值随自旋翻转角（β）变化的函数关系。

具体实施方式

可以通过诸如图 1 所示的 NMR 装置来实施本发明。

图 1 显示了一个在有待研究的材料（3）附近进行核磁共振（NMR）（1）测量的装置。NMR 装置（1）可以包含一对配置在一个纵轴（z）上的磁体（6）。磁体（6）的磁化矢量与纵轴 z 平行。螺线管线圈（8）在该区域中位于磁体（6）之间。磁体（6）产生一个静态磁场 B_0，其感应磁力线从中心向外。此外，梯度线圈（9）适于产生梯度磁场 B_g。采用一个时变电流对螺线管线圈（8）进行充电，以产生一个射频（RF）磁场。例如，可以由该螺线管线圈对包含材料（3）的原子核所产生的感应信号进行测量。记录之后，感应信号数据即被转换为一个 NMR 频谱。该 NMR 频谱提供有关材料（3）的成分的有价值信息。所参考的 Poitzsch 等人的美国专利 6,246,236 中介绍了如上所述的进行核磁共振测量的装置。

依照本发明的一个实施方案，梯度线圈（9）可以是一个水平方位梯度线圈，这样可以利用梯度磁场仅辐射选定的区域，以便获得一个水平方位成像。例如，仅在线圈的前部检测相应的信号，可以抑制其余区域的信号。

本发明的某些实施方案包括将一个梯度磁场施加到承受静态磁场 B_0 的试样上，以便消除或修正该静态磁场导致的试样响应。在这些情况下，如图 4 所示，FID 信号（13）不是由静态磁场 B_0 的梯度导致的。因此，

在梯度磁场作用期间，由于其它磁场源的不均匀性，如在具有不同磁导率的不同媒质的分界面（颗粒孔隙流体界面）处产生的化学位移、试样感应的不均匀，使原子核发生相移。如前所述，该现象的衰减时间(T_2和T_2')很长，因此FID信号将持续较长时间。

FID信号检测具有许多应用，其中例如具有较低翻转角（<90°）RF脉冲和小重复时间的RF脉冲可用于获得相当高的信噪比（S/N）。而且还可检测具有相当短的衰减时间（T_2）的FID信号。通过抑制其它区域的NMR信号，使用水平梯度线圈能够对选定的区域进行分析。利用低翻转角和水平梯度线圈获得高S/N的水平方位NMR成像。

图4是依照本发明的一个实施方案的在NMR信号中施加的磁场和测得的梯度的图表。第一行和第二行显示的是所施加的磁场。第三行是感应的NMR信号。列I和III显示的是依照本发明的一个实施方案的该方法的不同阶段。图4中图示的方法包括：首先向承受静态磁场（14）B_0的试样施加一个90°持续时间为t_0的RF磁场脉冲（11）（参见图4中的第1行第1列）。随后，向该试样施加一个梯度磁场（16）B_g。该梯度磁场（16）B_g的值为：当与静态磁场（14）B_0合并时，所施加的净磁场（18）B_{net}具有一个在整个受激区域中恒定的幅值（参见图4中第2行第2列）。由此，B_{net}的梯度实际上为零。因此，原子核进动的相移仅由化学位移和/或内部（试样感应的）磁场不均匀所产生。图4的第3行第3列显示了发出的FID信号（图4中13）。在存在梯度磁场B_g时，原子核将以一个新的频率$\gamma(B_0-B_g)$进动。在没有梯度磁场B_g时，原子核将以频率γB_0进动。因此，为了在梯度脉冲期间检测NMR信号，必须将线圈（图1中9）调谐到该新的频率$\gamma(B_0-B_g)$。图4中的第3行第3列显示了撤掉梯度磁场，因此施加于受激区域的净磁场再次仅对应于静态磁场B_0时的NMR信号。如图4中第2行第4列所示。

利用FID信号进行频谱分析具有许多应用，其中，例如包括散装液体。散装液体是不产生内部试样感应的不均匀性的液体。

可以通过将获取的衰减与利用CPMG信号产生的衰减相比较来得到更多的信息。CPMG的特征是自旋-自旋驰豫时间（T2），而FID衰减的特征是除了T2还有T2'（试样感应的不均匀）。因此，将FID衰减和CPMG衰减相比较，可以获得试样感应的不均匀信息。

图5是一个依照本发明的一个实施方案所加的磁场和测量的信号的

示意图。类似于图 4，第一行和第二行显示的是所施加的磁场。第三行显示的是感应的 NMR 信号。第一列和第三列显示的依照本发明的该实施方案的方法的不同阶段。图 5 中图示的该方法包括首先向承受静态磁场(20) B_0的试样施加一个 90° 的持续时间为 t_0的 RF 磁场脉冲（11）（参见图 5 中的第 1 行－2 行，第 1 列）。随后，向该试样施加一个梯度磁场（24）B_g'。该梯度磁场（24）B_g'的值为：当与静态磁场（20）B_0合并时，所施加的净磁场（22）B_{net}具有一个符号与静态磁场（20）的 B_0相反，而绝对值比 B_0大的梯度（参见图 5 中第 2 行第 2 列）。由此，当仅施加静态磁场（20）B_0时，原子核进动的相移与仅施加静态磁场（20）B_0时的方向相反。

最后，撤掉梯度磁场 B_g'（参见图 5 中第二行第二列），迫使原子核相位后移。因此，形成一个梯度回波信号。

图 5 中第三列第三行显示了发出的梯度回波信号（19）。在没有施加梯度磁场 B_g'时，检测该梯度回波信号（19）。因此，在测量该该梯度回波信号（19）期间，原子核将按频率 γB_0进动。因此必须将线圈（9）调谐到等于 γB_0的频率。

可以利用下面的公式来计算形成梯度回波信号(19)的时间(t_e)（参见图 5 中第三行第三列）：

$$te = |(G_0 - G_g)| t_g / |G_0| \qquad (3)$$

其中 G_0和 G_g分别是静态磁场 B_0的梯度和梯度磁场 B_g的梯度。t_g是梯度磁场 B_g的施加时间。例如，当梯度磁场 B_g的梯度为磁场 B_0的梯度的两倍时，形成梯度回波信号（19） 的时间 t_e等于梯度磁场 B_g的作用时间 t_g。

梯度回波信号（19） 的衰减仅由于自旋－自旋驰豫时间（T2）和试样产生的内部磁场不均匀（T2'）产生的。

梯度回波信号检测具有多种应用，其中，例如可以利用具有较低翻转角（<90° ）RF 脉冲来获得相当高的信噪比（S/N）。而且，也可以检测具有相当短的衰减时间（T2 和 T2'）的 FID 信号。使用水平方位梯度线圈能够通过抑制其它区域中的 NMR 信号，对选定的区域进行分析。利用低翻转角和水平方位梯度线圈获得高 S/N 的水平方位 NMR 成像。对于 FID 检测，梯度回波信号提供了一个较高的信噪比 S/N。

在梯度磁场 Bg 作用期间，受激区域的自旋相移正比于（$G_0 - G_g$）t_g，

由此可获得公式 3。梯度磁场 Bg 作用之后的相移正比于 G_0t_e。这两个相移值应当相互抵消，以使信号重新聚焦（回波）。即:

$$(G_0 - G_g)t_g + G_0t_e = 0 \qquad (4)$$

图 6 中显示了本发明的另一个实施方案。在该实施方案中，重复上述的梯度回波信号若干次，直至梯度回波信号（23，27，...）消逝。最初，当静态磁场 B_0（28）对分析区域中的原子核进行极化时，施加一个 90° 的 RF 磁场脉冲（26）（参见图 6 中的第一行第一列）。随后，向该区域施加一个梯度磁场（30）B_g'。该梯度磁场（30）B_g'的幅值使得：当与静态磁场（28）B_0合并时，所施加的净磁场（32）B_{net}'将与静态磁场（28）B_0的梯度方向相反（参见图 6 中第 2 行第 2 列）。因此，原子核进动的相移方向将与施加静态磁场 B_0时相反。重复进行几次该步骤（参见图 6 中第二行第 N—N + 1 列）。如图中所见，发出的梯度回波信号（23，27）的幅度将减小，直至降为零。

可以利用发出的梯度回波信号（23，27）进行 NMR 频谱分析。刚好在施加相应的梯度磁场（32）B_g'之前对梯度回波信号进行检测。对检测的梯度回波信号（23，27，...）进行傅立叶变换可以得到 NMR 频谱。

利用梯度回波信号检测进行 NMR 频谱分析具有多种应用，例如对散装液体进行频谱分析。而且如前所述，可以通过将获取的衰减与利用 CPMG 信号和在 MDT 模块中进行的 NMR 频谱分析产生的衰减相比较来得到更多的信息。对于 FID NMR 频谱分析检测，利用梯度回波信号检测进行 NMR 频谱分析可以得到更高的信噪比。

例如，应用置于被所分析的试样包围之中的 NMR 仪器适于本发明的实施。测井技术就是这种应用。

图 7 显示的依照本发明的一个实施方案的测井工具（29），安置在井（31）中的一个测井电缆（33）上。在测井工具中，如图 1 中所示磁体是纵向放置的。电子电路（41）为螺线管（38 和 39）提供相应的电流，分别产生一个梯度磁场和以特定频率发出所需的 RF 磁场。而且，电子电路（41）设计用来调谐螺线管线圈（39），以便接收形成土壤结构的原子核所发出的 NMR 信号。电源系统（43）提供时变电流，来激励线圈（39）和检测 NMR 信号。图 7 中的工具适于在一个测井电缆上传送。

图 8 显示了一个依照本发明的另一个实施方案的置于矿井（47）中的钻井工具。如图 1 中所示磁体是纵向放置的。电子电路（57）为螺线

管线圈（56 和 55）提供相应的电流，分别产生一个梯度磁场和以特定频率发出所需的 RF 磁场。而且，电子电路（57）设计用来调谐螺线管（55），以便接收形成土壤结构的原子核所发出的 NMR 信号。电源系统（59）提供时变电流，来激励线圈（55）和检测 NMR 信号。本领域的熟练人员将会意识到，图 8 所示的实施方案是随钻测量（MWD）的装置。

参照有限数量的实施方案对本发明进行了描述，但本领域的熟练人员将会意识到，在不超出所述的本发明的范围的前提下，可利用这里所公开的内容设计出其它的实施方案。

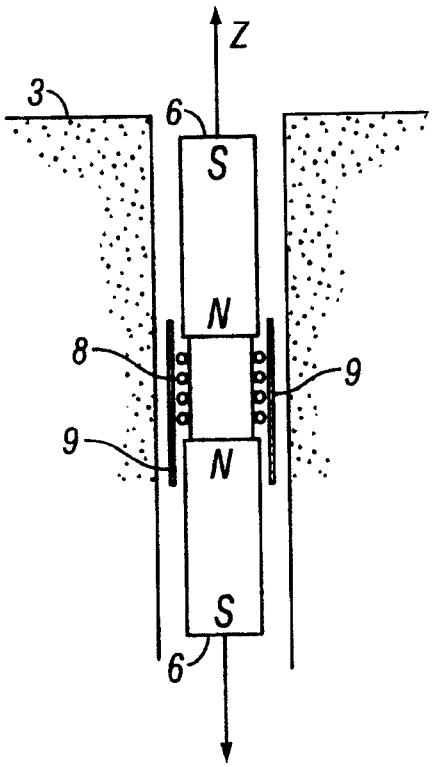


图 1

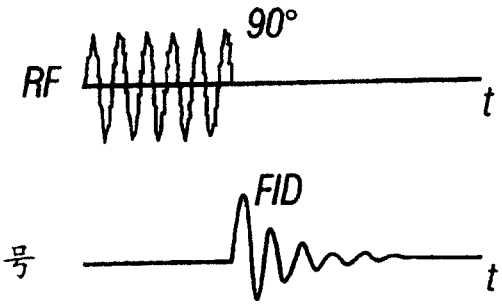
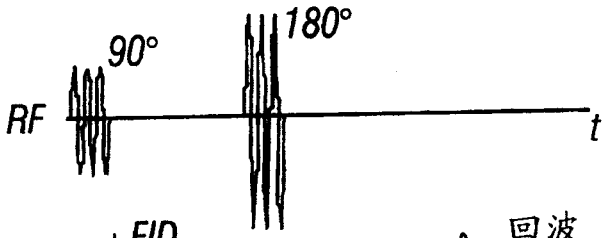


图 2A



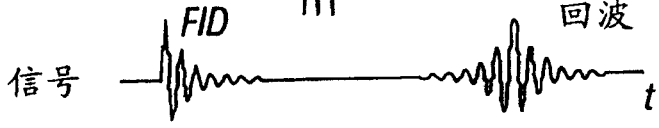


图 2B

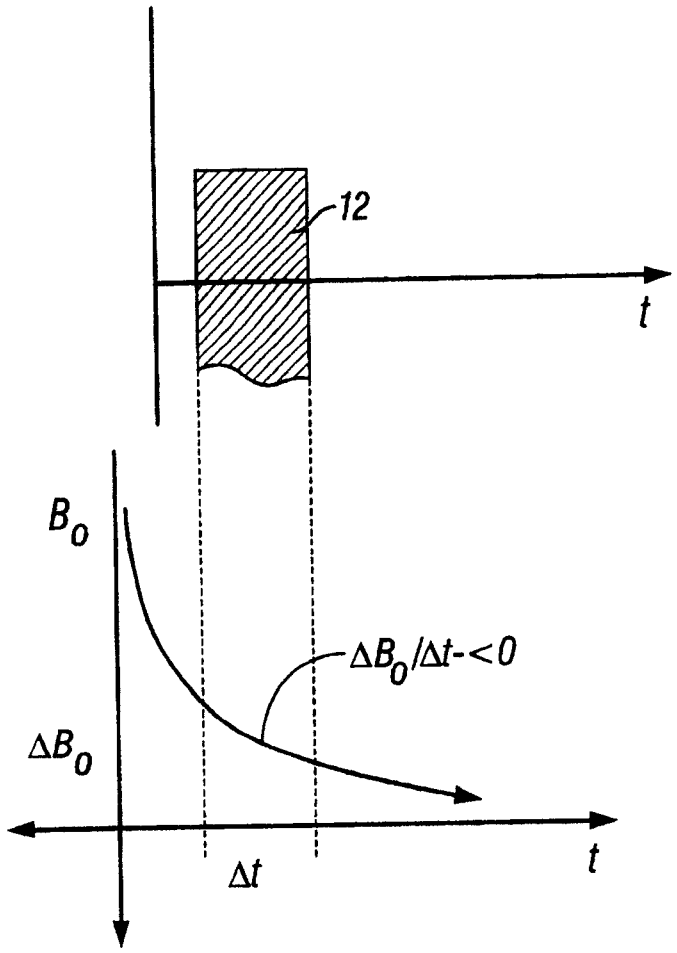


图 3

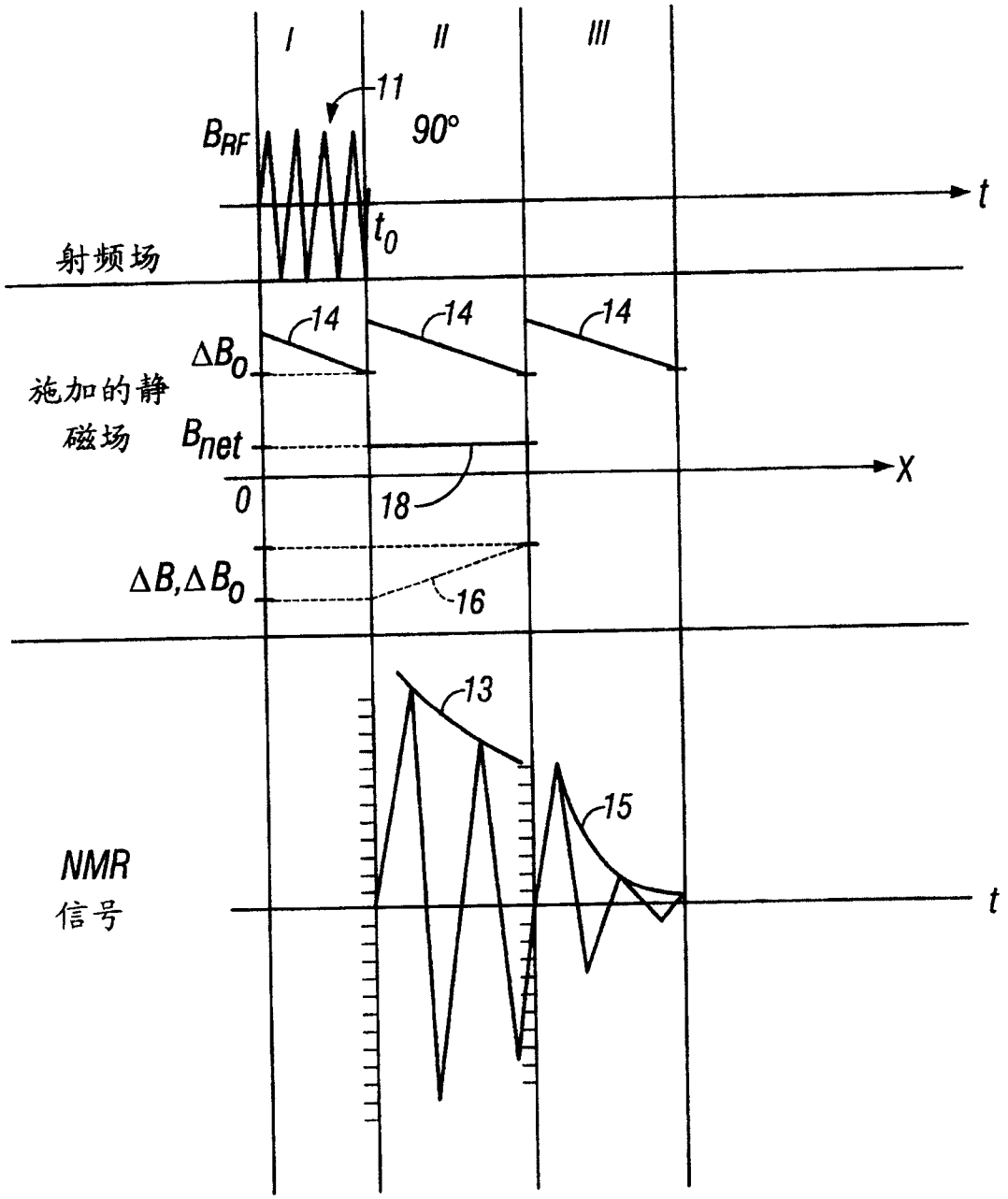

I
II
III
11
90°
B_{RF}
t
t_0
射频场
14
14
14
ΔB_0
施加的静
磁场
B_{net}
X
0
18
$\Delta B, \Delta B_0$
16
13
15
NMR
信号
t

图 4

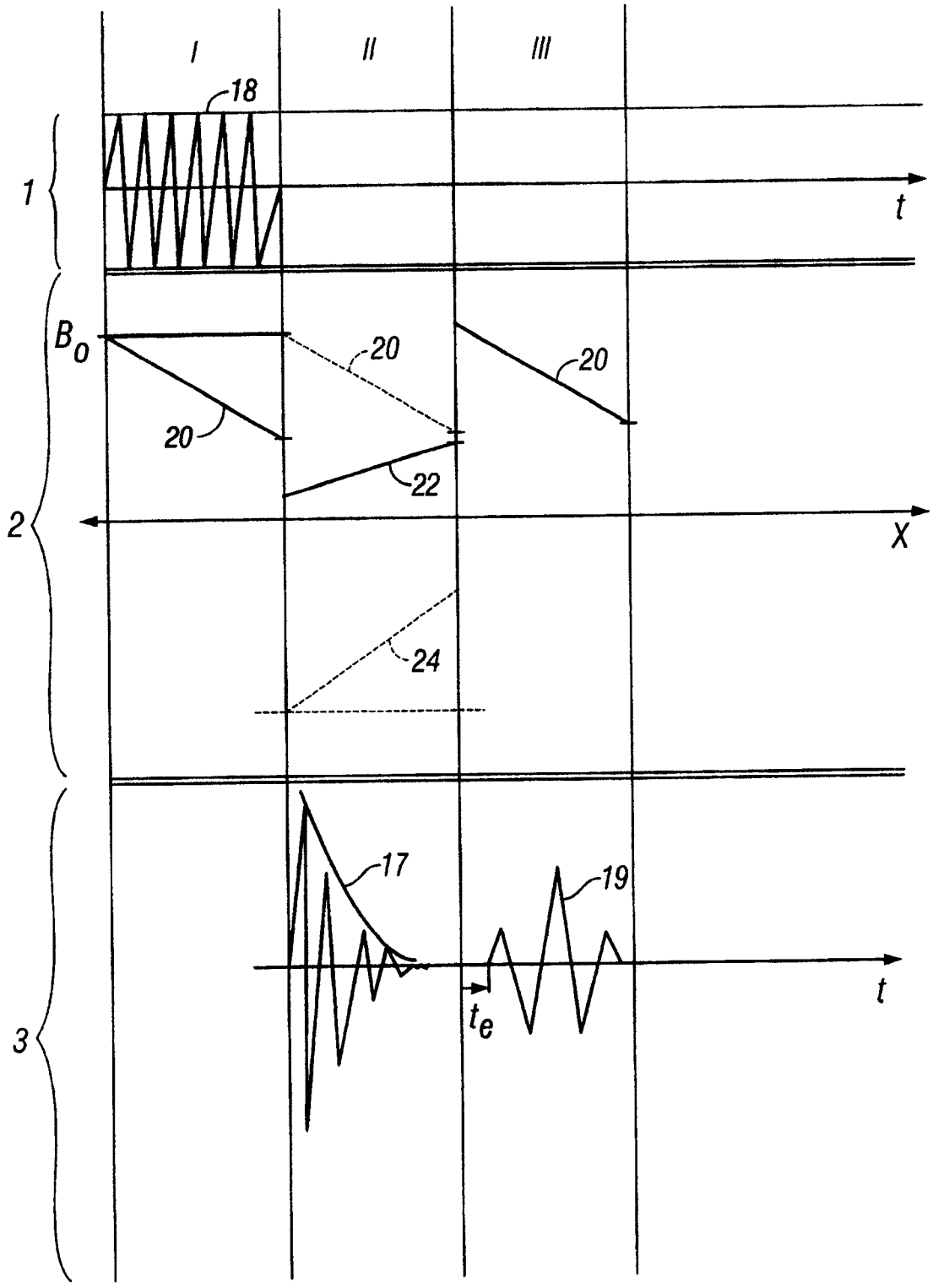


图 5

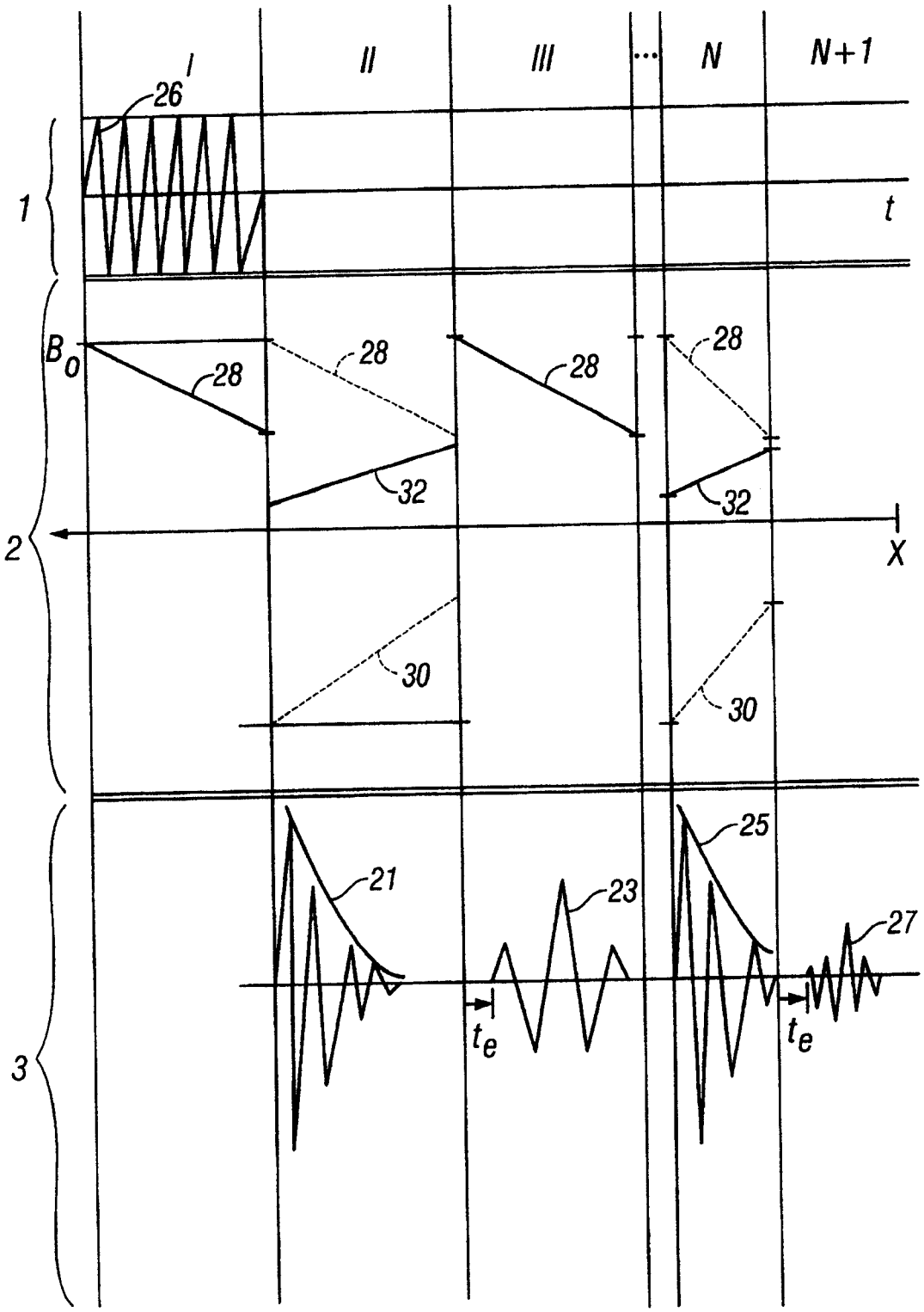


图 6

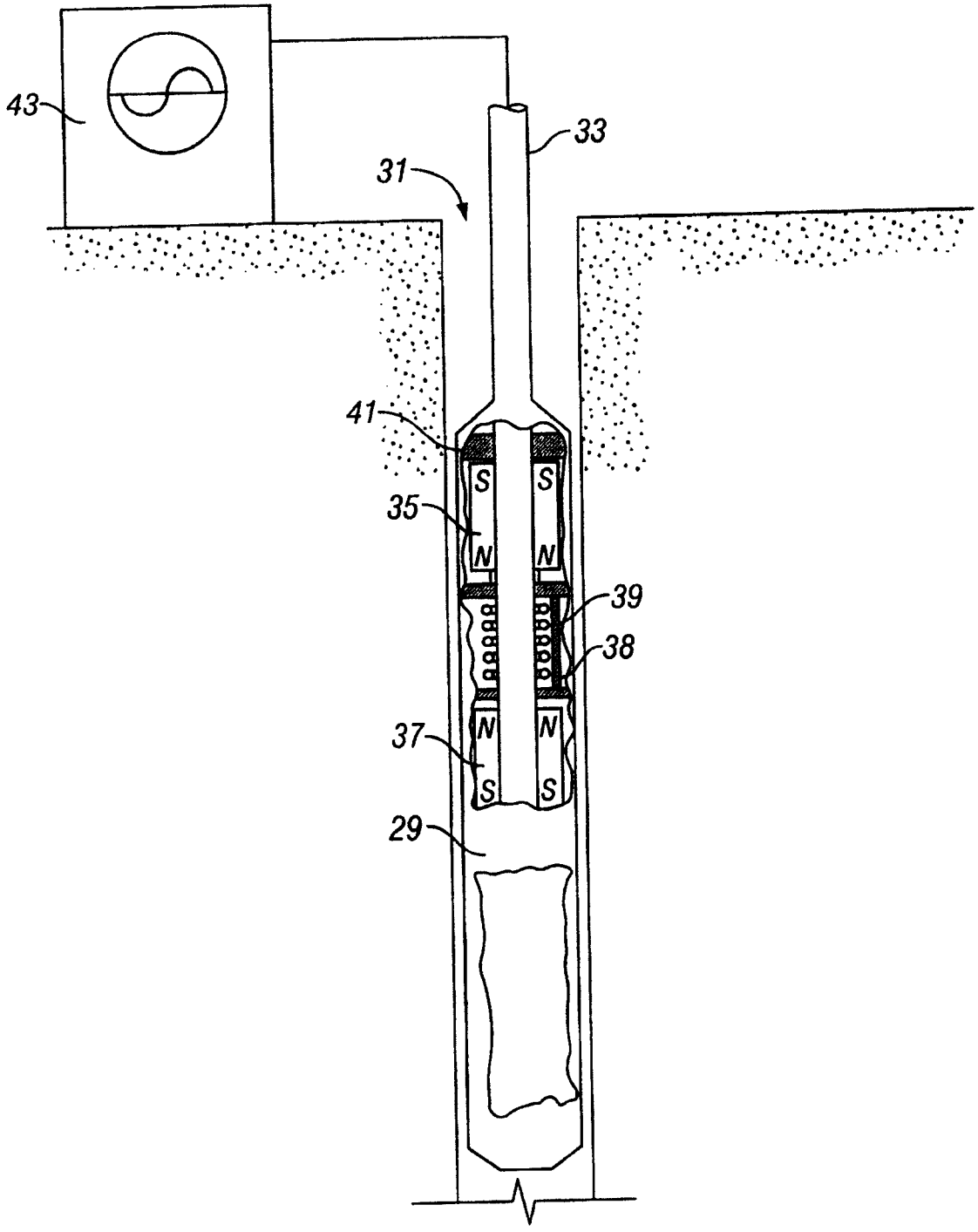


图 7

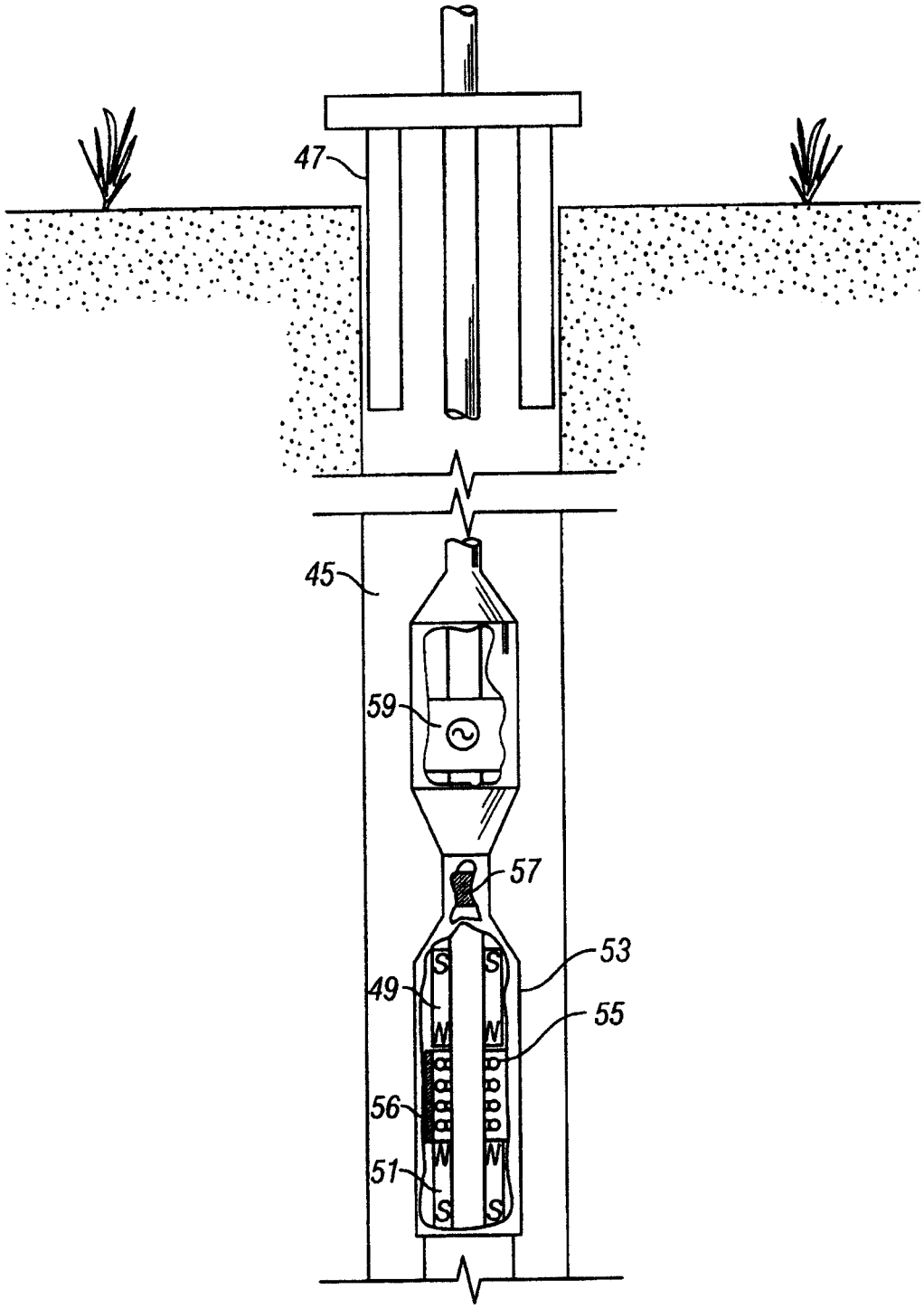


图 8

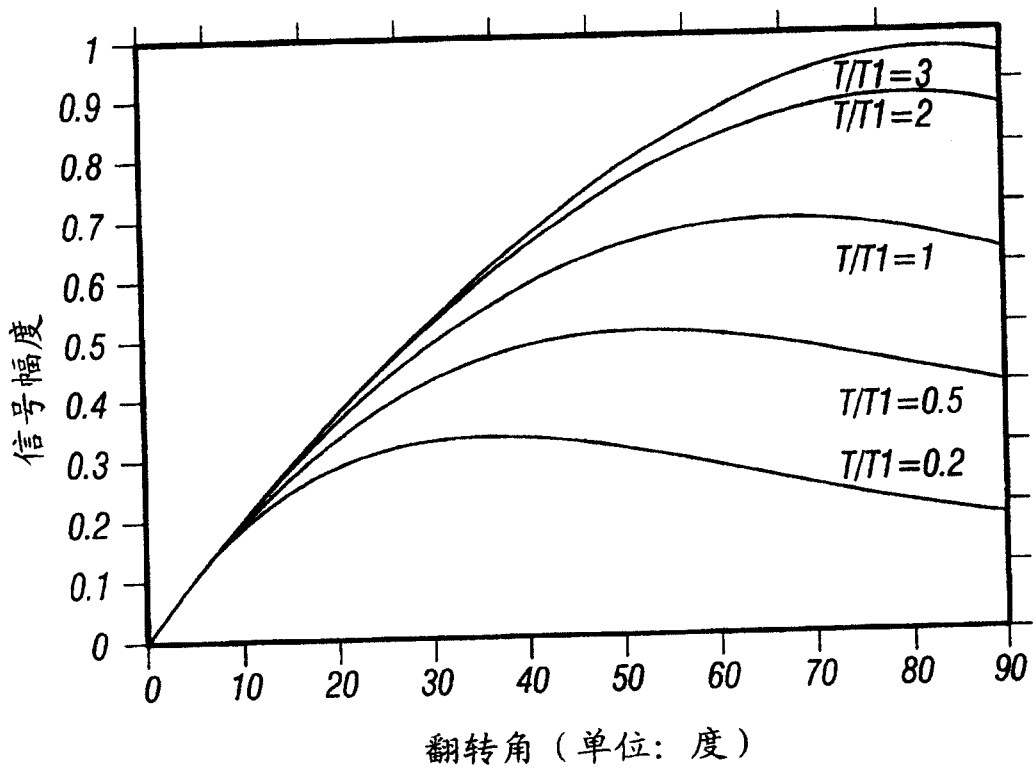

1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
信号幅度
T/T1=3
T/T1=2
T/T1=1
T/T1=0.5
T/T1=0.2
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
翻转角（单位：度）

图 9