

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510072931.3

[51] Int. Cl.

G01V 1/28 (2006.01)

G01V 1/44 (2006.01)

G01V 1/52 (2006.01)

[45] 授权公告日 2007 年 4 月 4 日

[11] 授权公告号 CN 1308702C

[22] 申请日 2001.11.13

[21] 申请号 200510072931.3

分案原申请号 01821740.0

[30] 优先权

[32] 2000.11.13 [33] US [31] 60/248,097

[73] 专利权人 贝克休斯公司

地址 美国得克萨斯

[72] 发明人 唐晓明 宾格拉斯·派特森 王自力

杰姆斯·V·雷杰特三世

弗拉迪米尔·杜宾斯基

[56] 参考文献

US6084826 2000.7.4

US6082484 2000.7.4

US4685091 1978.8.4

US5936913 1999.8.10

US4951267 1990.8.21

US4932003 1990.6.5

US5971095 1999.10.26

US5927331 1991.6.25

审查员 杨永康

[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

代理人 董 莘

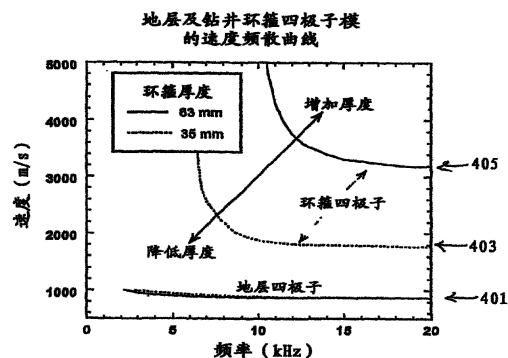
权利要求书 3 页 说明书 21 页 附图 18 页

[54] 发明名称

声学测井装置及在钻井环箍上使用声学测井
装置的方法

[57] 摘要

本发明提供了一种声学测井装置，包括：(a) 在钻井圆管上送进地层内井眼中的钻井环箍，所述钻井环箍具有对于其内的环箍模波的截止频率；(b) 产生信号的环箍上的发射器，所述信号包括地层模式和环箍模；(c) 在环箍上的至少一个信号检测器，用于检测所述信号，所述至少一个信号检测器沿轴向离开发射器设置并接收包括地层模式和环箍模的信号；和(d) 包括滤波器的处理器，所述滤波器对接收信号进行截止频率以下频率分量的低通滤波。



1、一种声学测井装置，包括：

(a) 在钻井圆管上送进地层内井眼中的钻井环箍，所述钻井环箍具有对于其内的环箍模波的截止频率；

(b) 在所述环箍上产生信号的发射器，所述信号包括用于指示地层剪切速度的地层模式和环箍模；

(c) 在所述环箍上的至少一个信号检测器，用于检测所述信号，所述至少一个信号检测器沿轴向离开所述发射器设置，并接收包括地层模式和环箍模的信号；和

(d) 包括滤波器的处理器，所述滤波器对由所述信号检测器检测后的信号进行截止频率以下频率分量的低通滤波，由此确定所述地层剪切速度；

其中所述环箍模是四极子模，并且所述发射器是四极子发射器；
其中所述地层的剪切速度大于所述井眼中液体的压缩速度。

2、按照权利要求 1 的测井装置，其中所述至少一个信号检测器还包括多个检测器单元，这些检测器单元围绕环箍周边设置。

3、按照权利要求 2 的测井装置，其中所述发射器还包括多个发射器单元。

4、按照权利要求 1 的测井装置，其中所述四极子发射器还包括 $2N$ 对沿径向相对的发射器单元，这些发射器单元围绕所述环箍周边设置，其中 N 是整数。

5、按照权利要求 3 的测井装置，其中所述发射器单元还包括选自以下的材料：(i) 压电材料、ii) 电致伸缩材料和 (iii) 磁致伸缩材料。

6、按照权利要求 3 的测井装置，其中所述发射器单元还包括选自以下装置的装置：(i) 弯曲杆、(ii) 机电装置和 (iii) 通道孔。

7、按照权利要求 1 的测井装置，其中所述至少一个检测器还包括多个包含选自以下的材料的检测器单元：(i) 压电材料、(ii) 电致伸缩材料和 (iii) 磁致伸缩材料。

8、按照权利要求 1 的测井装置，其中所述信号还包括第一四极子模和第二四极子模，

所述处理器还包括滤波器，用于对高于与所述第一四极子模相关的艾里相位的信号进行高通滤波。

9、一种在钻井环箍上使用声学测井装置的方法，所述钻井环箍在钻井圆管上送进地层内的井眼中，所述钻井环箍具有对于其内的环箍模波的截止频率，所述方法包括：

利用在所述环箍上的发射器，产生包括用于指示地层剪切速度的地层模式和环箍模的信号；

利用在所述环箍上的至少一个信号检测器，检测所述信号，所述至少一个信号检测器沿轴向离开所述发射器设置，并接收包括地层模式和环箍模的信号；和

利用包括滤波器的处理器，对由所述信号检测器检测后的信号进行截止频率以下频率分量的低通滤波，由此确定所述地层剪切速度；

其中所述环箍模是四极子模，并且所述发射器是四极子发射器；
其中所述地层的剪切速度大于所述井眼中液体的压缩速度。

10、按照权利要求 9 的方法，其中所述发射器包括两对沿径向相对的发射器单元，并且产生所述信号，

所述方法还包括：

启动这些单元，以产生按 $\cos 2\theta$ 方位变化的信号。

11、按照权利要求 9 的方法，其中所述发射器还包括两个偶极子。

12、按照权利要求 9 的方法，其中所述至少一个信号检测器还包括在所述环箍周边设置的多个检测器单元。

13、按照权利要求 9 的方法，其中所述至少一个信号检测器还包括沿轴向分开设置的多个信号检测器。

14、按照权利要求 9 的方法，其中所述至少一个信号检测器包括两个检测器单元，

所述方法还包括：

在第一时间以一种极化方式，在第二时间以第二种极化方式来操作所述发射器。

15、按照权利要求 13 的方法，其中对所述信号的处理还包括：利用所述多个沿轴向分开设置的检测器，进行声束方向操纵。

16、按照权利要求 9 的方法，其中所述信号还包括第一四极子模和第二四极子模，

所述方法还包括：利用所述处理器，对于高于与所述第一四极子模相关的艾里相位的信号进行高通滤波。

声学测井装置及在钻井环箍上 使用声学测井装置的方法

本申请是由贝克休斯公司于 2001 年 11 月 13 日提交的、申请号为 01821740.0、发明名称为“用于 LWD 剪切速度测量的方法和装置”一案的分案申请。

技术领域

本发明一般涉及用于测量并处理并眼穿透的地表下地球地层特征的方法和装置。更具体说，本发明涉及的方法和装置，是用于声波横越毗邻井眼的地球地层，或声波穿过地表下一部分之后，测量并处理诸如地表下声波的地层剪切波速度等声学特征。

背景技术

为获取碳氢化合物如石油和天然气，通过旋转附着在钻井机组末端的钻头，钻该钻井（也称为井眼），该钻井机组一般称为“井底机组”（BHA）或就称“钻井机组”。这种井的井身路线，要在钻这种井身之前，用地球地表下的地震图，和以前钻过的有关油田井身的井数据，仔细计划。由于这种井身非常高昂的钻井费用，以及必须降低实际消耗在钻井和电缆测井的时间，在钻该井身时，获取尽可能多的信息是十分必要的。关于井底条件和资料的信息，可以用电缆井下测井仪或井底机组（BHA）获得。在钻出井身之后，一般都要用电缆井下测井仪，而当该井正在钻时，则用井底机组作为钻具组的一部分。其中，可以利用从 BHA 部件获得的井底井身信息，监控并调整井身的钻井方向，或检测出现的地质地层与碳氢化合物。

在钻通地球地层同时测井中，有必要测量地层剪切波的速度。地球地层剪切波速度提供的信息，对探测并从地层生产石油和天然气至

关重要。剪切波速度剖面图能使地震剪切波的时间剖面转换为深度剖面，并被用于解释地震波振幅变化与检测器偏离的关系曲线。剪切波速度与压缩波速度的比值，与岩石的岩性学紧密相关，也与碳氢化合物的饱和值有关。剪切波速度还用于评价水库工程应用中地层的机械性质。

由于地球地层剪切速度的重要性，已经发展了各种方法来测量它。在常规的用单极子声学井下测井仪的电缆测井，如果地层剪切波速度大于井眼液体声速，那么，剪切速度能够用剪切波沿井眼壁的折射测量。剪切波速度比井眼液体速度快的地层，被称为‘快地层’。但是，在剪切波速度比井眼液体速度慢的地层中，即‘慢地层’中，剪切波不再沿井眼壁折射，从而剪切速度不能用单极子测井直接测量。因为必须在慢地层中测量剪切速度，特别是在深水水库的软沉积物中，所以发展了偶极子声学测井的井下测井仪。偶极子井下测井仪诱发并测量地层中挠曲或弯曲波的运动。在足够低的频率范围（1 - 3kHz），弯曲波以地层的剪切速度传播，不论地球地层是快的或慢的。这样，用偶极子声学井下测井仪，能直接测量地层的剪切速度。现在，偶极子声学测井是一种世界范围的商业应用的成熟技术。

一种有前途的剪切波速度测量技术，是用四极子剪切波。四极子声学井下测井仪诱发并测量地层中四极子剪切波。该波的低频部分按地层剪切波速度传播，能从四极子波直接进行剪切速度测量。虽然四极子剪切波已经在理论上广泛研究，且一种电缆四极子测井的井下测井仪也已提出（Window 等人，1991 年的 US Patent No. 5,027,331），但该技术尚未在商业上用于石油和天然气工业。大部分原因是，偶极子剪切波技术的广泛接受和成功，满足了在慢地层中测量剪切速度的需求。

近年来，由于需要节省安装时间和其中诸如地震方向操纵（geosteering）和孔隙压力确定的实时应用，已经发展了声学测井同时钻井（LWD）技术。LWD 声学技术的目标，是在钻井时测量地球地层的压缩波和剪切波速度。该技术已经成功测量地球地层的压缩波

速度。在慢地层中必须确定剪切波速度，要求进一步发展该技术对剪切波的测量能力。因为偶极子剪切波技术在电缆测井中的知名度和成功，该技术自然推广到 LWD 情况，同时，LWD 偶极子声学井下测井仪已经制造并供商业应用。

如本申请后面所指出，应用于 LWD 的偶极子声学技术，由于钻井环箍与占据井眼大部分的 BHA 同时存在，所以产生严重的缺点。缺点在于，沿井眼传播的地层偶极子剪切波，被环箍中偶极子波的传播严重污染。当存在沿钻井环箍传播的井下测井仪模的波时，需要一种确定地球比较硬的地层剪切波速度的方法。在地层剪切速度小于压缩波在井眼液体中的传播速度时，这种需要特别强烈。本发明满足这种需求，并且，另外还提供一种在剪切速度超过井眼液体压缩速度的“快”地层中，确定剪切速度的方法。

发明内容

本发明是一种装置和方法，用于在钻井同时测井的环境中，确定地层的剪切性质。

根据本发明的一个方面，提供了一种声学测井装置，包括：

(a) 在钻井圆管上送进地层内井眼中的钻井环箍，所述钻井环箍具有对于其内的环箍模波的截止频率；

(b) 产生信号的环箍上的发射器，所述信号包括地层模式和环箍模；

(c) 在环箍上的至少一个信号检测器，用于检测所述信号，所述至少一个信号检测器沿轴向离开发射器设置并接收包括地层模式和环箍模的信号；和

(d) 包括滤波器的处理器，所述滤波器对接收信号进行截止频率以下频率分量的低通滤波。

根据本发明的另一个方面，提供了一种在钻井环箍上使用声学测井装置的方法，所述钻井环箍在钻井圆管上送进地层内的井眼中，所述方法包括：

(a) 利用所述测井装置上的发射器，产生包括地层模式和井下测井仪模的四极子信号；

(b) 利用所述钻井环箍上沿轴向与所述发射器分开的至少一个信号检测器，检测所述信号；和

(d) 利用处理器对所述检测的信号频率分量进行低通滤波，其中所述检测的信号具有低于所述钻井环箍中的井下测井仪模的截止频率的频率。

根据本发明，提供了一种声学测井装置，包括：

(a) 在钻井圆管上送进地层内井眼中的钻井环箍，所述钻井环箍具有对于其内的环箍模波的截止频率；

(b) 在所述环箍上产生信号的发射器，所述信号包括用于指示地层剪切速度的地层模式和环箍模；

(c) 在所述环箍上的至少一个信号检测器，用于检测所述信号，所述至少一个信号检测器沿轴向离开所述发射器设置，并接收包括地层模式和环箍模的信号；和

(d) 包括滤波器的处理器，所述滤波器对由所述信号检测器检测后的信号进行截止频率以下频率分量的低通滤波，由此确定所述地层剪切速度；

其中所述环箍模是四极子模，并且所述发射器是四极子发射器；其中所述地层的剪切速度大于所述井眼中液体的压缩速度。

根据本发明，提供了一种在钻井环箍上使用声学测井装置的方法，所述钻井环箍在钻井圆管上送进地层内的井眼中，所述钻井环箍具有对于其内的环箍模波的截止频率，所述方法包括：

利用在所述环箍上的发射器，产生包括用于指示地层剪切速度的地层模式和环箍模的信号；

利用在所述环箍上的至少一个信号检测器，检测所述信号，所述至少一个信号检测器沿轴向离开所述发射器设置，并接收包括地层模式和环箍模的信号；和

利用包括滤波器的处理器，对由所述信号检测器检测后的信号进

行截止频率以下频率分量的低通滤波，由此确定所述地层剪切速度；

其中所述环箍模是四极子模，并且所述发射器是四极子发射器；

其中所述地层的剪切速度大于所述井眼中液体的压缩速度。

在本发明的一个优选实施例中，发射器的工作频率，在通过钻井环箍传播的信号的截止频率以下，于是，接收器接收的信号，不会被环箍模污染。截止频率由钻井环箍的厚度决定。在本发明的一个优选实施例中，发射器是四极子发射器。环箍中的四极子模的截止频率，高于地层中四极子模的频率，所以，令四极子发射器工作在该截止频率以下，提供的信号大致不被井下测井仪模污染。在地层剪切速度超过井眼液体压缩速度的快地层中，可以分析更高阶的四极子模，以确定该地层的剪切速度。

在本发明的另一个实施例中，发射器的工作不考虑截止频率，而接收的信号则通过低通滤波来抑制井下测井仪模。

在一个优选实施例中，发射器包括八个按方位分段的单元。接收器可以是四极子接收器也可以是偶极子接收器。当使用偶极子接收器时，四极子发射器以不同的极化工作两次，然后，处理该两个接收的信号，给出接收的四极子信号。

接收器最好放在发射器与钻头之间。钻头产生的噪声，传播到接收器被接收的方向，与发射器产生的信号相反。可以按相控阵列操作接收器，以抑制钻头产生的噪声。

附图说明

我们确信，作为本发明特征的新颖特性，涉及组织和操作方法两方面，连同本发明的目的和优点，可以从下面的详细说明更好地了解，并且，本发明中的图解，仅为说明和演示而以举例方式画出，从而不能认为是对本发明范围的限定。

图 1A 画出钻井系统的示意图，该系统采用本发明在钻井同时测井（LWD）实施例中的装置。

图 1B 画出在钻井环箍上的 LWD 井下测井仪。

- 图 2 画出地层及钻井环箍偶极子模的速度频散曲线。
- 图 3 画出有钻井环箍时的偶极子声学波形。
- 图 4A 画出四极子波场的示意图。
- 图 4B 画出地层及钻井环箍四极子模的速度频散曲线。
- 图 5A 画出靠近井眼的声能的波场瞬时图形，图中显示与四极子波运动有关的径向质点速度。
- 图 5B 画出各种偏离的四极子波形。
- 图 6A 画出靠近井眼的声能的波场瞬时图形，图中显示薄环箍管中与四极子波运动有关的径向质点速度。
- 图 6B 画出图 6A 中数据的时域表示。
- 图 7 画出连同钻井环箍一起的声源横截面透视图。
- 图 8 画出声源分段成环的发射装置的详细横截面图。
- 图 9 是声源隔间化分段的发射装置的详细横截面图。
- 图 10 是传感器围绕环箍的布置的透视图。
- 图 11 画出分段成环的接收传感器装置的详细横截面图。
- 图 12 画出隔间化分段的接收传感器装置的详细横截面图。
- 图 13A 和 13B 画出用两个接收器单元来检测四极子信号的本发明。
- 图 14 画出图 12 装置的一部分的侧视图。
- 图 15A 和 15B 画出在快地层中更高阶的四极子模。
- 图 16 画出四极子与一对偶极子的等价性。

具体实施方式

本发明是一种方法、系统、和装置，用于在钻井的同时测量地层剪切波速度。下面的说明，是专门针对特定的实施例或本发明的特定应用，就此而言，下面的说明意在演示而不能认为是对本发明范围的限制。

图 1A 画出有井底机组（BHA）或钻井机组 90 的钻井系统 10 的示意图，该机组 90 包括用于井底井身调节和位置测量的传感器。BHA

90 被送进井眼 26。钻井系统 10 包括常规的立在钻台 12 上的钻井架 11, 钻台支承旋转平台 14, 旋转平台由主推进器如电机 (未画出) 按需要的转速使之旋转。钻具组 20 包括从地面向下伸进井眼 26 的管路 (钻杆或旋管) 22。附于钻具组 20 末端的钻头 50, 当它旋转钻该井眼 26 时, 粉碎地质地层。钻具组 20 经凯氏联轴节 (kalley joint) 21、旋转接头 28、和作业绳 29, 通过滑轮 (未画出) 与提拉机构 30 连结。提拉机构 30 的工作, 是控制钻头上的重量 (“WOB”), 该重量是影响穿透速率 (“ROP”) 的重要参数。当用旋管作为输送单元 22 时, 用插管机 14a 和轮 (未画出) 代替旋转平台 14 把 BHA 插入井身。提拉机构 30 和插管机 14a, 本领域是熟知的, 因此这里不详细说明。

钻井时, 用泥浆泵 34 从泥浆坑 (源) 32 把一种合适的钻井液体 31 泵出, 在压力下通过钻具组 20 循环。钻井液体从泥浆泵 34, 经过消浪涌器 (desurger) 36 和液体管线 38, 进入钻具组 20。钻井液体 31 在井眼底部 51 经钻头 50 中的开孔排出。钻井液体 31 通过钻具组 20 与井眼 26 之间的环形空间 27, 向井上循环, 然后经回流管线 35 与钻井岩屑滤网 85, 返回泥浆坑 32, 钻井岩屑滤网 85 从返回的钻井液体 31b 中除去钻井岩屑 86。管线 38 中的传感器 S_1 提供关于液体流动速率的信息。地面上的力矩传感器 S_2 和伴随钻具组 20 的传感器 S_3 , 分别提供关于力矩和钻具组 20 转速的信息。管路插入速度由传感器 S_5 确定, 同时, 传感器 S_6 提供钻具组 20 的挂钩荷载。

在某些应用中, 只有旋转的钻杆 22 把钻头 50 旋转。但是, 在许多其他的应用中, 在钻井机组 90 中放一井底电机 55 (泥浆电机), 用于旋转钻头 50, 通常还旋转钻杆 22, 以补充旋转功率, 如有必要, 还对钻井方向的变化产生影响。在每一种情况中, 对给定 BHA 的 ROP, 很大程度上依赖于 WOB 或施于钻头 50 的推力及钻头 50 的转速。

泥浆电机 55 通过放在轴承机组 57 中的装置与钻头 50 连结。当钻井液体 31 在压力下通过泥浆电机 55 时, 泥浆电机 55 使钻头 50 旋转。轴承机组 57 支承钻头 50 的径向和轴向力、泥浆电机 55 的下推力、

和由于向钻头施加重量而产生向上的反作用荷载。与轴承机组 57 连结的更靠下的稳定器 58a，用作钻具组 20 最靠下部分的定心夹具。

地面上的控制单元或处理器 40，经过置于液体管线 38 中的传感器 43，从井底传感器及装置接收信号，还从传感器 S_1 - S_6 和系统 10 中使用的其他传感器接收信号，并按照提供给地面上的控制单元 40 的编程指令，处理这些信号。地面上的控制单元 40 在显示/监控器 42 上，显示需要的钻井参数及其他信息，操作员用显示/监控器 42 来控制钻井操作。地面上的控制单元 40 包括计算机、存储数据的存储器、记录数据的记录器、和其他外围设备。地面上的控制单元 40 还包括模拟模型，并按照编程指令处理数据。该控制单元 40 最好能在某种不安全或不需要的操作条件出现时，启动警报器 44。

BHA 还可以包括地层评估传感器或装置，以便确定 BHA 周围地层的电阻率、密度、和孔隙率。测量伽马射线强度的伽马射线装置，和其他核的或非核的装置，作为测量同时钻井的装置，可以适当包括在 BHA 90 中。作为例子，图 1A 画出 BHA 90 中的电阻率测量装置 64 的例子。从该装置提供的信号，可以确定靠近钻头 50 或在钻头 50 前面的地层的电阻率。电阻率装置 64 有发射天线 66a 和 66b，与接收天线 68a 和 68b 隔开。操作时，当发射的电磁波通过围绕电阻率装置 64 的地层时，经受扰动。接收天线 68a 和 68b 检测受扰动的波。从检测信号的相位和振幅中，导出地层的电阻率。检测的信号被井底的计算机 70 处理，以确定电阻率及介电值。

倾角仪 74 和伽马射线装置 76 适当地顺着电阻率测量装置 64 放置，分辨用于确定靠近钻头 50 的钻具组部分的倾角和地层的伽马射线强度。但是，任何合适的倾角仪和伽马射线装置，都可以用于本发明的这一目的。此外，各种位置传感器，如加速度计、磁力仪、或回转装置，可以放进 BHA 内，用于确定钻具组在井身 26 中的方位、真坐标、和方向。该类装置本领域是熟知的，这里不再详细说明。

在上述配置中，泥浆电机 55 经过一个或多个贯穿电阻率测量装置 64 的中空轴，把功率传送至钻头 50。中空轴能使钻井液体从泥浆

电机 55 通至钻头 50。在钻具组 20 的另外实施例中，泥浆电机 55 可以在下面或任何适当的地方与电阻率测量装置 64 连结。上述电阻率测量装置、伽马射线装置、和倾角仪，最好放在能与该电机连结的共用的箱体内部。用于测量地层孔隙率、渗透性、和密度（总的由数字 78 表示）最好放在泥浆电机 55 以上。这类装置本领域是熟知的，因此不再详细说明。

如前面指出的，目前钻井系统的重要部分，特别对钻十分偏斜和水平的井身，是用旋管管路把钻井机组传送到井底。在这种应用中，钻具组 90 中采用顶推器 71 来提供对钻头需要的力。为本发明的目的，钻头上重量一词，用来表示钻井操作时施加于钻头上的钻头上的力，不论是通过调整钻具组的重量或通过顶推器而施加的。同样，当使用旋管管路时，旋转台不旋转管路；代替的是由适当的插管机 14a 把管路插进井身，同时由井底电机 55 旋转钻头 50。

图 1B 是示意图，画出的声学测井同时钻井的井下测井仪系统，是装在包含钻头 50 的 BHA 钻井环箍 90 上的。该系统安装在 BHA 钻井环箍 90 上，以便对地层钻井的同时，进行声学测量。声学测井同时钻井的井下测井仪系统，有一声源 105，发射可以穿越地层 95 且可以沿井眼壁传播的声振动 106，然后由传感器 A 和 B 接收，传感器 A 和 B 可以是阵列形式的。这些传感器在本申请后面讨论。应当指出的一点是，这些传感器放在发射器与接收器之间。这一点的重要好处是，发射器产生需要的信号的传播方向，与钻头 50 产生的噪声方向相反。这样就有可能使用适当的滤波技术，包括相控阵列，来极大地降低钻头的噪声。在本发明的另外的实施例中，发射器 105 可以放在各传感器与钻头 50 之间。

把偶极子声学技术应用于 LWD，由于钻井环箍与占据井眼大部分的 BHA 同时存在，所以产生严重的缺点。缺点在于，沿井眼传播的地层偶极子剪切波，被环箍中传播的偶极子波严重污染。这一点由下面理论上的分析/数字模型的结果表明。

下面对具有钻井环箍的井眼，分析偶极子波的激发和传播特征。

利用已知的分析方法，例如在 Schmitt (1988) 中说明的那种分析方法，能够对地层和环箍的偶极子剪切（弯曲）波计算速度频散曲线。该频散曲线描述波模速度随频率的变化。在该例子中，井眼直径是 23.84cm，而环箍的内直径和外直径分别是 5.4 和 1.8cm。环箍与井眼之间的内环箍柱体与环带柱体用钻井泥浆填充，钻井泥浆的声速和密度分别为 1,470m/s 和 1g/cc。环箍由钢制成（钢的压缩速度、剪切速度、和密度分别为 5,860m/s、3,130m/s、和 7.85g/cc）。地层在声学上是慢的，压缩速度为 2,300m/s，剪切速度为 1,000m/s，而密度为 2g/cc。应当指出，本例仅用于说明，不应认为是对本发明的限制。

计算的钻井环箍和地层对偶极子模的弯曲波频散曲线，示于图 2，频率范围作为水平轴，从 0 至 14kHz。沿垂直轴表示的环箍偶极子波频散曲线 201 表明，环箍偶极子波的速度如何在 0 至 14kHz 范围上随频率而变化。地层偶极子波频散曲线 203 表明，除在该范围的低频外，在速度上的变化相对地小。地层与环箍弯曲波模对整个频率范围几乎同时存在，但在非常低的频率上例外，在非常低的频率上，环箍弯曲模似乎终止在地层的剪切速度上。在环箍模终止的频率以下，地层弯曲模的速度似乎延续环箍弯曲模的行为，该种行为是在没有地层时应当存在的，即在零频率时速度下降至零。这种跨接现象，是在此种偶极子激发状态中，由于环箍与地层之间的强声学互作用而产生的。

在有钻井环箍的井眼中，偶极子声波的传播可以用数字有限差分技术模拟，例如用 Cheng 等人 (1995) 说明的技术。模型参数与上述速度频散计算的例子相同。偶极子声源和接收器阵列放在环箍边缘。声源激发的中心频率是 2kHz。图 3 画出模拟的沿水平时间轴显示的偶极子声波波形。偶极子声波波形，用与图 3 垂直轴上对应的接收器偏离声源的距离表示。接收器位置相隔 0.1524m，从在 1.833m 的最近的记录线波形 301 开始，到偏离声源 2.9m 的 303。偶极子声波波形由环箍弯曲波支配，该环箍弯曲波有较快的速度和频散的特性。频散的环箍弯曲波的开始强脉冲 305，在时间上由频散的能量跟随，该频散的能量比有价值的代表地层 S 波的弯曲波更强。虚线 335 表示地层弯曲波

到达的位置和速度。对准虚线 335 的有价值的地层弯曲波，在振幅上小于环箍的弯曲波，并被环箍弯曲波的互作用严重污染。

上述速度频散的计算及波传播的模拟结果，表明在地层与钻井环箍弯曲波之间，存在强的互作用。基本的原因是，两个波模共同存在于有价值的同一频率范围。LWD 偶极子技术对剪切速度测量有许多缺点。第一个缺点是，由于存在从环箍弯曲波来的严重污染，难以获得高质量的地层弯曲波测量。低频模的环箍波，用诸如在环箍开槽和/或插入吸收材料等衰减技术等等，是很难抑制的。第二个缺点是，地层弯曲波，即使能可靠地测量，但因环箍的互作用，也不能产生精确的地层剪切速度信息。如从图 2 可见，环箍模的高频极限，接近环箍剪切速度并在频率 205 上，在该频率上环箍偶极子模消失，环箍偶极子模速度就是地层剪切速度 207。地层偶极子模速度 203，在所有频率上，都在地层剪切速度 205 以下。不存在环箍的情况下，当激发低频时，地层偶极子模将以等于地层剪切速度的速度传播。从地层偶极子模或环箍偶极子模二者之一的频散曲线，确定地层剪切速度，不是容易的事。此外，在钻井工作期间，存在产生附加噪声的钻头激发的强偶极子模。由于前述理由，如果不是不可能，也难于在 LWD 环境下，用偶极子声学技术测量地层剪切波速度。

现在将说明，例如在图 1A 和 1B 的钻具组 BHA 90 中，采用一定数量的传感器为 LWD 剪切波采集数据的较好方式。在特定应用中使用的实际 BHA，除本发明说明的传感器之外，还可以包括背景技术部分说明的某些或所有的传感器。对于本发明，任何该种 BHA 应包含一个或多个震源和接收器(图中总的以数字 88 表示)，放在 BHA 90 中适当位置。

本发明对 LWD 剪切速度测量，采用四极子声学技术。图 4a 画出四极子场的图例。图上画出特征的四波瓣图，该图基本上以 $\cos 2\theta$ 的方位变化为特征。在本例中，该场可以与质点的运动或压力有关。使用四极子波的最大好处是，环箍的四极子波只在某一频率以上存在，该频率称为截止频率。该频率与钻井环箍的厚度和井眼大小有关。因

此, 通过确定该环箍及该井眼尺寸的截止频率, 我们可以选择某一频带, 在该频带中只激发地层的四极子剪切波。确定地层四极子波的速度, 将满足在 LWD 环境中测量剪切波速度的需要。这一点与电缆测井的情况不同: 虽然 *Winbow* 确曾讨论在电缆装置上使用四极子测井, 但没有讨论四极子波的截止频率。Winbow 教导一种电缆测井装置。本领域熟练人员熟知, 电缆装置中井下测井仪的直径, 通常比井眼直径小很多。*Chen* 还讨论了使用四极子声源进行剪切波测井, 并对井眼内的 Stoneley 波, 出示了实验结果与理论频散曲线的比较。*Chen* 模型的测井仪直径, 小于井眼直径的一半。本领域熟练人员熟知, Stoneley 波是沿井眼壁传播的边界波。相反, 本发明涉及的 MWD 装置, 其中钻井环箍的直径几乎与井眼直径相同。在这样的情况下, 环箍模变得重要。该环箍模不同于 *Chen* 讨论的 Stoneley 波。

用四极子波的测量来确定地层剪切速度的可行性, 可用理论上的/数值分析的例子证明。图 4-b 画出地层 401 与环箍四极子波 403 及 405 的速度频散曲线。速度以米每秒 (m/s) 为单位, 画在垂直轴, 频率以千赫 (kHz) 为单位, 沿水平轴画出。对一示例性厚度 35mm 的环箍, 其速度频散曲线以曲线 403 表示。对一示例性厚度 63mm 的环箍, 其速度频散曲线以曲线 405 表示。地层四极子波略有频散, 并在低的截止频率上 (在本例中约为 2kHz) 达到地层的剪切波速度。这一点表明, 地层剪切波速度, 能够作为地层四极子波速度的低频极限而确定。环箍四极子波速度曲线, 由于钻井环箍高的剪切刚性 (钢) 和厚的壁 (63mm), 表现出十分高的值。但是, 对 63mm 厚的环箍 405 的环箍波, 仅存在于约 10kHz 以上的频率范围中, 然而, 对地层剪切速度测量要求的频率, 约为 2kHz, 因此与环箍波的频率范围 (>10kHz) 分得很开。利用这一频率分隔, 能够设计一种方法和装置, 只在预定的频带内 (在本例中是 0-10kHz) 产生四极子波。在该频带中, 只产生地层的四极子波。该波的激发/产生方案, 可以用有限差分模拟来演示。

在一有限差分模型中, 四极子声源和按 0.1524m 间隔的接收器阵

列，放在环箍边缘。该声源子波的中心频率选为 2kHz，声源子波的幅频谱在约 5kHz 时减少至零，该频率在环箍四极子波的截止频率 10kHz 以下。图 5a 画出四极子声源产生的三个波场强度在时间上的瞬时图形。每一瞬时图形，501、503、和 505 是截面图，表示在钻井环箍内的液体 521、钻井环箍 90、在钻井环箍外的液体 523、和地层 95 的截面。与四极子波运动有关的径向质点速度，以阴影 507、509 表示。图 5a 的这些瞬时图形，表明在若干瞬时（分别是，对 501 是 0.24 毫秒，对 503 是 1.22 毫秒，和对 505 是 2.21 毫秒）的波场强度位置。在井眼的液体环带内，可以看见高的波场强度 507，在地层内，也可以看见高的波场强度 509。在液体环带内波的运动，和在地层内的运动是同相的，以地层剪切速度传播，如对所有三个瞬时图形 501、503、和 505 的液体与地层中高波场强度 507 和 509 的同时并列所示。这就是与图 4 相关的讨论中的地层四极子波。在声源周围，除开始时（0.24 毫秒的瞬时图形 501）例外，环箍内任何位置几乎不存在可看见的波强度，这一点证明了，对该环箍厚度（2.48 英寸），该频带没有激发环箍四极子波。

接收器阵列的时域四极子波形画在图 5B，图上，时间以水平轴表示。四极子声学波形，用与图 5 垂直轴上对应的接收器偏离声源的距离表示。接收器位置相隔 0.1524m，从在 1.833m 的最近的记录线波形 531 开始，到偏离声源 2.9m 的 533。图 5B 只画出一种波，即地层四极子波，以地层的剪切速度在该阵列上传播。虚线 535 标明该地层四极子波首次到达。该时域波的模拟结果，与图 4 的频域频散分析结果是一致的。这些例子表明，选择合适的波激发频带，能够消除环箍四极子波。

激发频带应根据钻井环箍与井眼尺寸选择。在钻井实践中，井眼大小是变化的，以适应勘探/生产的需要和/或将要钻的井的地质环境。因此，钻井环箍的大小也要变化。环箍与井眼尺寸的改变，特别是前者的改变，将明显改变环箍四极子波的特征。这一点能够再次用理论上的/数值上的分析例子演示。图 4 画出厚度 35mm 的钻井环箍（虚的

曲线)的四极子频散曲线。用较薄的环箍,地层四极子频散曲线(虚线 403)也改变。地层模式的截止频率升至约 3kHz,且整个曲线比厚环箍情况(实曲线 405)显示出更高的值。该曲线在低频时,接近地层剪切波速度。另一方面,环箍四极子波速度,比厚的环箍情况(实曲线 405)大大降低,而且表现出低得多的截止频率(约 6kHz)。图 4 表现的一般趋势是,增加环箍厚度,将把环箍四极子波频带,移离地层四极子波频带。当环箍四极子波频带接近地层四极子波频带时,地层四极子波的测量将受到严重损害,如下面的波模拟例子所示。

要举的例子是,环箍管比较薄(厚度仅 16mm 或 0.63 英寸)。环箍四极子波的截止频率,现在约 3.5kHz。其他参数如图 5B 所使用的一样,保持不变。用 2kHz 中心激发频率,激发地层与环箍四极子波。图 6A 与图 5A 对应,画出 16mm 厚的环箍的波场瞬时图形。图 6A 画出四极子声源产生的三个波场强度在时间上的瞬时图形。每一瞬时图形,601、603、和 605 是截面图,表示在钻井环箍内的液体 621、钻井环箍 90、在钻井环箍外的液体 625、和地层 95 的截面。与四极子波运动有关的径向质点速度,以阴影 611、613 表示。图 6A 的这些瞬时图形,表明在若干瞬时(分别是,对 601 是 0.24 毫秒,对 603 是 1.22 毫秒,和对 605 是 2.21 毫秒)的波场强度位置。在井眼液体 625 的环带内,可以看见高的波场强度 611,在环箍内,也可以看见高的波场强度 613。对所有三个瞬时图形 601、603、和 605,在包含环箍的整个井眼中的波场强度,由环箍四极子波支配。地层四极子波是弱激发的,与环箍波反相。

时域的阵列波形画在图 6B。接收器阵列的时域四极子波形,画在图 6B,图上,时间以水平轴表示。四极子声学波形,用与图 6B 垂直轴上对应的接收器偏离声源的距离表示。接收器位置相隔 0.1524m,从在 1.833m 的最近的记录线波形 631 开始,到偏离声源 2.9m 的 633。时域波形由环箍四极子波支配,该波向外移动的速度约 1,300m/s。虚线 635 表示地层四极子波的到达时间。在此情况中,由于存在强的环箍波,难以测量地层四极子波。对于 LWD 四极子波的产生和测量装

置，该例表明频带选择的重要性。

上述例子表明，在 LWD 环境中四极子剪切波的优点，以及促进 LWD 四极子波测量的要求。因此，可以构建四极子 LWD 剪切波系统。在 LWD 环境中的四极子剪切波，能够用安装在钻井环箍 90 上的四极子声源产生。图 7 是简化的透视图，画出该声源与钻井环箍一起的横截面。如图 7 所示，四极子声源包括钻井环箍 90 和等尺寸的八个单元。这些截面编号 701 - 708。这些编号是声源柱体的八个相等的扇形区。这些柱体部分，或者由电致伸缩材料（或压电材料），或者由磁致伸缩材料制成，这些材料能够从输入的电脉冲产生应力/压力波信号。在本发明另外的一个实施例中（未画出），这些部分包括一种机电装置，该种机电装置在颁发给 *Gill* 的美国专利 US Patent 5,852,262 中说明，本文引用该专利的内容，供参考。包括在 *Gill* 教导中的，是一种产生压力脉冲的致动器。通过利用适当配置的通道孔，可以产生偶极子或四极子脉冲。也可以用弯曲杆（bender bar）。虽然把声源柱体分为四个相等扇形区，就足以产生四极子声源，但声源用八个（或任何四的倍数）扇形区，降低了每一扇形区的质量，使它们更易于抵抗钻井时的振动。虽然这里说明的声源是以八段声源分段为例，但本领域熟练人员应当知道，如何激发四个声源的任何倍数，使之产生四极子信号。

图 7 的下面部分，是四极子剪切波声源在垂直于钻井环箍轴的平面上的剖面图。在一个实施例中，声源装置的单元是标记 701、702、703、704、705、706、707、和 708 的扇形区。当电脉冲加在该声源上时，每一扇形区将沿径向向外或向内膨胀或收缩。具体说，可以这样施加电脉冲，使扇形区（701、702）与沿直径相对的扇形区（705、706）膨胀，同时使扇形区（703、704）与扇形区（707、708）收缩，如图 7 所示。于是，在围绕井眼的液体/地层中，同时在钻井环箍中，产生四个应力/压力波。还应指出，当使用诸如 *Gill* 教导的装置时，可能只用单个致动器，从适当的通道孔产生四极子信号。

当所有八个扇形区都用相同材料制成，且加在它们上的电脉冲有

基本相同的振幅，那么，钻井环箍内和围绕井眼/地层内的四个应力/压力波的互作用，将产生四极子剪切波。更具体说，如果电脉冲的调制，能使产生应力/压力波的频带，在钻井环箍四极子剪切波的截止频率以下，那么，四个应力波在环箍内的互作用将彼此抵消。应力/压力波在井眼和地层内的互作用，将产生沿井眼纵向传播的地层四极子剪切波。声源脉冲的这一频带调制，是本发明一个实施例的一部分。

现在来详细说明四极子剪切波声源的一个实际装置。图 8 画出分段成环的发射器装置的详细截面图。该装置在围绕环箍 90 连续的容器 803 中，有分段的环，安装在弹性上隔离的部件 801 上。该隔离部件用于降低钻具组诱发的声信号。传感器组件如图所示，可以用有盖套筒充油 807，或者，它可以是不需要油的装在罐里的组件。电子驱动电路 809 与发射器单元 811 耦合，用于激发送进井眼和地层的声信号。有盖的套筒 815 覆盖发射器单元 811。电子驱动电路 809 可以放在内心轴 813 内。发射单元 811 可以用多种形式实现，包括环、柱、板、和活塞或螺线管单元。如有必要，可以沿周边或轴向增加分段的数目。

图 9 画出隔间化分段的发射装置的详细截面图，各分段在围绕环箍 90 的隔间化的容器 903 中，安装在各个弹性隔离部件 901 上。在发射单元 911 与有盖的套筒 915 间，可以用油填料 907。发射的电子电路 909，可以放进内心轴 813 内。

由上述四极子声源在地球地层中产生的四极子剪切波，可以在沿井眼纵向隔开的位置上检测，如在图 1B 中大略所示。图 1B 是示意图，画出的声学测井同时钻井的井下测井仪系统，是装在包含钻头 50 的 BHA 钻井环箍 90 上的。该系统安装在 BHA 钻井环箍 90 上，用于在钻地层的同时，进行声学测量。声学测井同时钻井的井下测井仪系统，可以有声源 105，发射可以穿越地层 95 的声振动 106，然后由可以排成阵列的传感器 A 和 B 接收。如图 1B 所示，使用沿轴向分开的单元阵列，有可能利用熟知的相控阵列滤波技术，以便衰减指定速度范围的沿特定方向传播的信号。在本发明的一个优选实施例中，该相控阵列滤波用于衰减井眼产生的噪声。还可以通过规定要衰减的速度范围，

用相控阵列滤波衰减环箍模。在本发明一个另外的实施例中，使用多个轴向分开的发射器单元，并用相控阵列滤波，以降低环箍模信号的产生。

如图 10 所示的本发明的一个实施例，各声检测器可以安装在钻井环箍边缘。每一检测器包括四个相同的传感器，围绕环箍周边分开放置，例如按顺序称为 A、B、C 和 D。图 10 是传感器围绕环箍相对于图 7 所示声源单元的布局的透视图。每一传感器的中心，沿纵向与两个同时膨胀/收缩的声源扇形区的连线排成直线。例如，传感器 A 与声源扇形区 701 和 702 间的连线排成直线，传感器 B 与声源扇形区 703 和 704 间连线排成直线，等等。四个传感器检测器的作用，是增强四极子声源的效率，同时除去来自波信号单极子分量的可能的污染。

现在更详细地说明，一种实际的作为四极子检测器阵列的四极子剪切波接收器装置。图 11 画出分段的环境接收器传感器装置的详细截面图，该装置在围绕环箍 90 的连续容器 1103 中，有分段的环，安装在弹性隔离部件 1101 上。该隔离部件用于降低钻具组诱发的信号。传感器组件如图所示，可以用有盖套筒 1115 充油 1107，或者，它可以是不需要油的装在罐里的组件。电子信号调节电路 1109 与接收器单元 1111 耦合，用于检测井眼和地层中的声信号。接收器电路 1109 可以放进内心轴 813 内。接收单元可以用多种形式实现，包括环、柱、板、和活塞或螺线管单元。如有必要，可以沿周边或轴向增加分段的数目。接收器单元的材料可以从压电材料、电致伸缩材料、及磁致伸缩材料中选择。

图 12 画出隔间化分段的接收传感器装置的详细截面图，该装置在围绕环箍 90 的隔间化的容器 1203 中，有接收器分段 1211，安装在各个弹性隔离部件 1201 上。内心轴 813 内装与接收器单元 1211 耦合的接收器电路 1209。接收器单元 1211 有一有盖的套筒 1215，其中有油填充的空间 1207。

共同待决的美国专利申请，序号 No.09/590,906，其内容这里全文收入，供参考，该专利教导如何用一个四极子发射器两种不同的激发，

通过适当组合两个接收单元接收的信号，从而获得四极子模。

前面的教导画在图 13a 中，图中画出本发明的另一个实施例，其中，由发射器的四个分段 1401a-1401d 提供四极子激发。另外，该四极子信号也可以由上述八单元发射器配对的相邻分段提供。此后，当谈及四个单元的发射器和接收器时，应当理解为同样包括八个单元的发射器和接收器。该信号经过地层传播之后，由偶极子接收器 1410 检测，该偶极子接收器包括接收器单元 1403a 和 1403c。接着，如同图 13b 所示，由发射器 1400 激发四极子模，并由相同的接收器单元 1403a 和 1403c 接收。接收器单元 1403a 和 1403b 为图 13a 中发射器触发而接收的记以 A 和 C 的信号，与由图 13b 中接收器单元 1403a 及 1403b 接收的记以 A* 和 C* 的信号，执行运算 $S = (A + C) - (A^* + C^*)$ ，该信号 S 将是具有所有公共模的四极子信号，包括被衰减的 BHA/钻头信号。这些公共模包括通过井下测井仪的体波、通过地层的单极子信号（P 和 S）、和井眼内的 Stoneley 波。由于井下测井仪与井眼壁之间较小的环带，使该 Stoneley 波与 MWD 井下测井仪比与电缆井下测井仪更难对付：因此，公共模的去除比电缆测井更为重要。

图 14 画出接收传感器分段的侧视图。环箍 90 包括换能器单元 1211，换能器单元又有多个有源单元 1251。图 14 的其他部件如在图 12 中的相同，不再讨论。

从例如图 10 传感器 A、B、C、和 D 接收的信号，可以组合成 $(A + C) - (B + D)$ 。对图 7 所示的声源配置和触发方案产生到达传感器 A、B、C、和 D 的四极子波，可以描述如下。传感器 A 和 C 将分别看到相同极化和振幅的压力波，而传感器 B 和 D 则看到相同振幅但相反极化的压力波。因此，把 A 和 C 的信号相加，然后减去 B 和 D 的信号，即 $(A + C) - (B + D)$ ，将产生比一个传感器独自的信号强四倍的信号。此外，LWD 四极子声源，当位置偏离井眼轴时，如在钻井时常常发生的那样，也将产生沿井眼传播的单极子分量。在低的频率上，单极子波将作为管波传播，污染地层的四极子剪切波。该低频管波的运动，基本上在井眼内是均匀的，于是，每一个别的传感

器将测量到基本上相同的管波信号。该单极子管波通过组合 $(A + C) - (B + D)$ 能够消除。

本发明另外的一个实施例，是对每一传感器记录的信号，进行环箍四极子波截止频率以下的低通滤波。如果声源脉冲有高的频率，且没有被调制，或者，如果钻井噪声的四极子分量有环箍四极子波截止频率以上的频率分量，那么，将激发环箍四极子波并被各传感器记录。因为环箍四极子波只存在于它的截止频率以上，所以能够通过对传感器信号，进行截止频率以下的低通滤波，除去该环箍四极子模。如上所述，该截止频率能够从井眼和钻井环箍尺寸确定。因此，能够设计并安装该低通滤波器，作为传感器数据采集和处理系统的一部分。

为了信号相干增强和处理的目的是，把上述检测器/接收器阵列沿钻井环箍的纵向放置。相邻检测器的间隔，通常在 0.5 到 1 英尺(0.1524 至 0.3048m) 的范围。地层剪切波速度可以把越过接收器阵列的四极子剪切波，用任何标准的阵列处理方法进行相关操作而确定，标准的阵列处理方法，在颁发给 *Tang* 的美国专利 5,441,890 中有教导。

上面已经针对地层剪切速度的确定进行了讨论，本领域熟练人员应当明白，使用的是第一阶模。在“快”地层中，剪切速度超过井眼中的液体压缩速度，可能存在更高阶的模。这一点在图 15a 中说明。横轴是频率，纵轴是速度。1301a 和 1301b 画出第一阶四极子模的相速度和群速度的例子，而 1303a 和 1303b 画出第二阶模的相速度和群速度。地层剪切和压缩波速度分别是 4,500 和 2,500m/s；钻井环箍和井眼尺寸及其他有关参数，与图 5B 相同。波形模拟使用 5kHz 的中心频率声源。在 21kHz 以下的频率范围，存在两种四极子模。它们分别称为第一和第二四极子模，更高阶模存在于更高的频率范围。对图 15A 中的例子，第一和第二模分别从约 3 和 8kHz 开始出现。第一模表现出陡下降的相速度频散曲线 1301a，有十分确定的群速度 1301b 的极小。群速度极小的存在，产生称为艾里相位 (Airy phase) 的现象。有关的波形画在图 15B。与艾里相位有关的波能量支配该波形并显著滞后于地层剪切到达时间 1311，如在图 15B 中所示。在这种情况下，

如果不是不可能，也是难以从第一模的波形数据测量快地层剪切波速度的。

测量第二四极子波模的波形，能够直接确定快地层剪切速度。如在图 15A 中所示，在截止频率以上的宽频率范围，第二模的相速度曲线，十分接近地层剪切速度（本例中是 2,500m/s）。第二模的相速度和群速度曲线，两者都很平坦，表明小的频散效应。事实上，在该更高频率范围中激发的与第二模有关四极子波，以地层剪切波速度传播，如图 15B 所示。因为地层的第二四极子模，在环箍四极子频率范围以下，能够有效激发，所以来自后一种模的干扰，仍能避免或使之最小。如图 15B 所示，没有可看见的与环箍四极子有关的波能量。图 15A、15B 中举出的例子表明，通过激发并测量与快地层有关的第二四极子波模，我们能够可靠地确定地层剪切波速度。

上面各例使用单一的钻井环箍，说明在 LWD 环境中，用四极子模激发来确定地层剪切性质的原理。为实际的理由，本发明的测井井下测井仪，可以包括钻井环箍的多个分段，在钻井环箍的不同分段上有发射器和接收器。上面说明的原理，同样可应用于该种分段的钻井环箍，并且包括在本发明的范围之内。截止频率和频散曲线，对钻井环箍的每一分段，可能有所不同。这一点不影响测井的井下测井仪的工作原理。

上述各例还进一步说明，四极子的实现，可以用至少两对匹配的“单极子”单元，其中每一对内各单元的运动是完全协调的。一种用于激发四极子信号或接收四极子信号可能的另外的方法，是用两个偶极子，如弯曲杆。这一方法示于图 16。单元 1401-1403 包括一个偶极子，如第一弯曲杆，而单元 1405-1407 包括第二偶极子，如第二弯曲杆。弯曲杆的运动不是沿径向的：它垂直于从井下测井仪中心到弯曲杆中点的径向连线；然而，一种有意义的四极子信号可以由图 16 所示的配置激发或接收。该种装置理应包含在本发明的范围之内。

上面已经对本发明对 LWD 的应用作了说明。本发明也可以在换钻头（Tripping）的同时测井中使用。本领域熟练人员都知道，钻头

通常都会磨损，为了更换钻头而换钻头钻具组的过程，称为“换钻头（tripping）”。在换钻头的同时进行测量还有另外的优点，就是钻井没有完成，所以现在测井的井下测井仪不会被钻头产生的噪声污染。

虽然前面公开的内容是针对本发明的优选实施例的，但是，各种变化对本领域熟练人员是显而易见的。我们认为，所有在后面权利要求书的范围和精神内的变化，都应被前面公开的内容覆盖。

图 1A

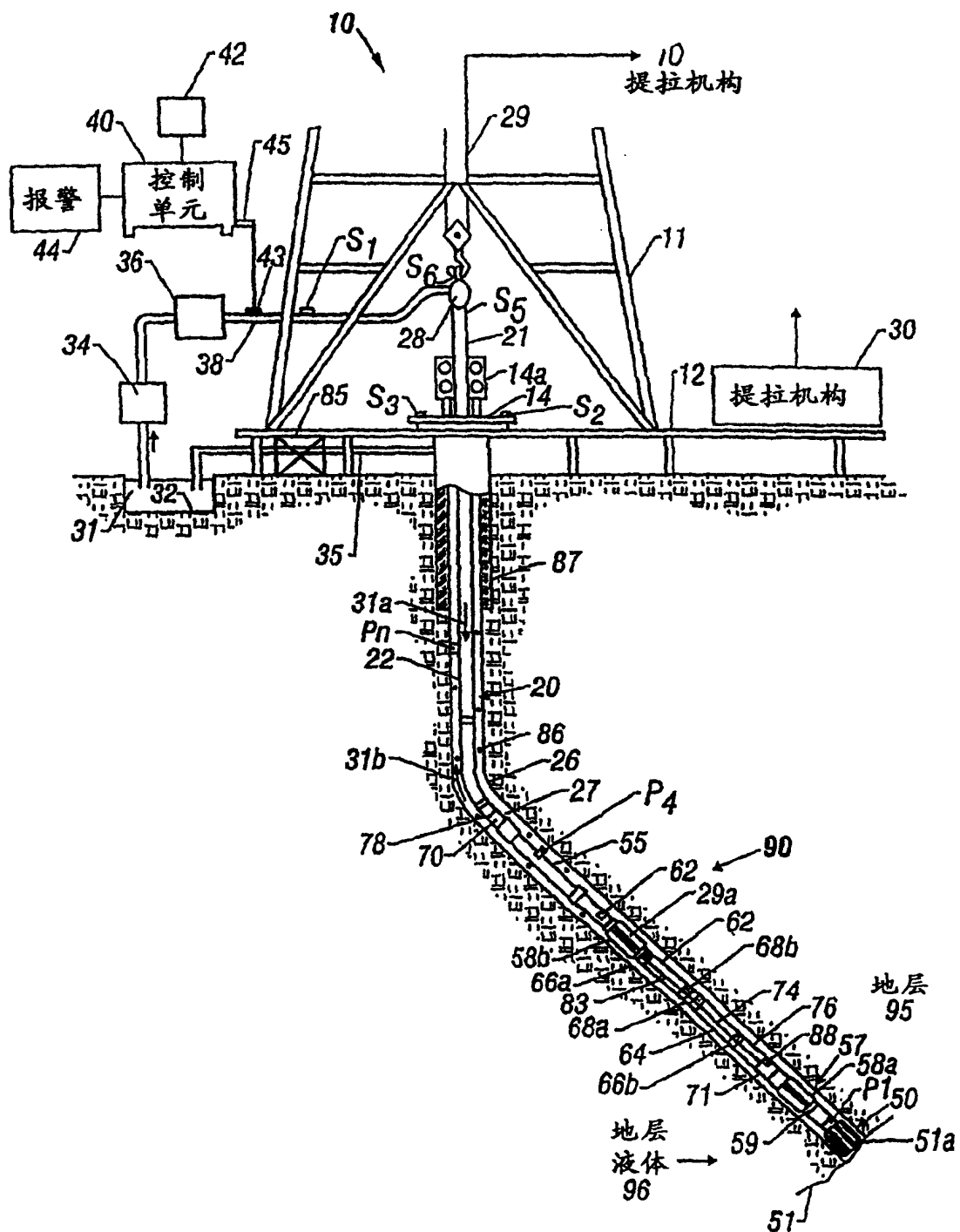


图1B

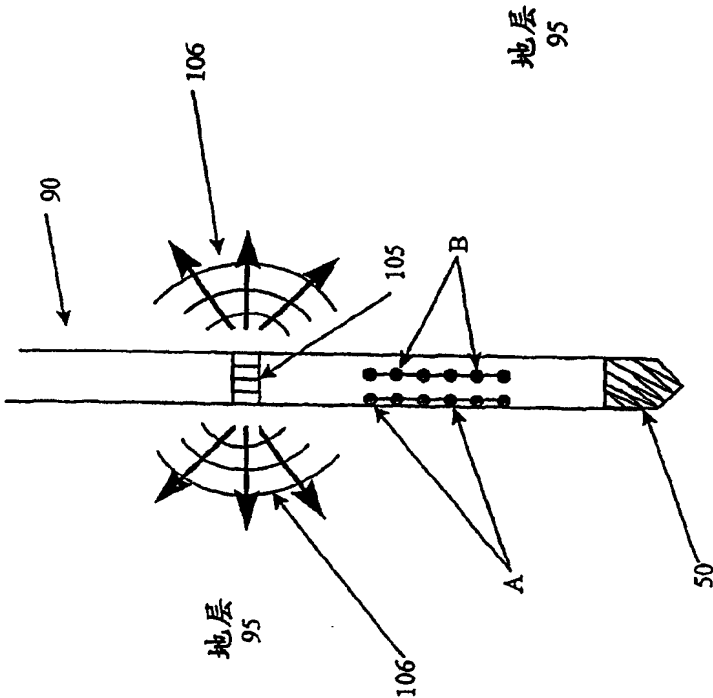


图2

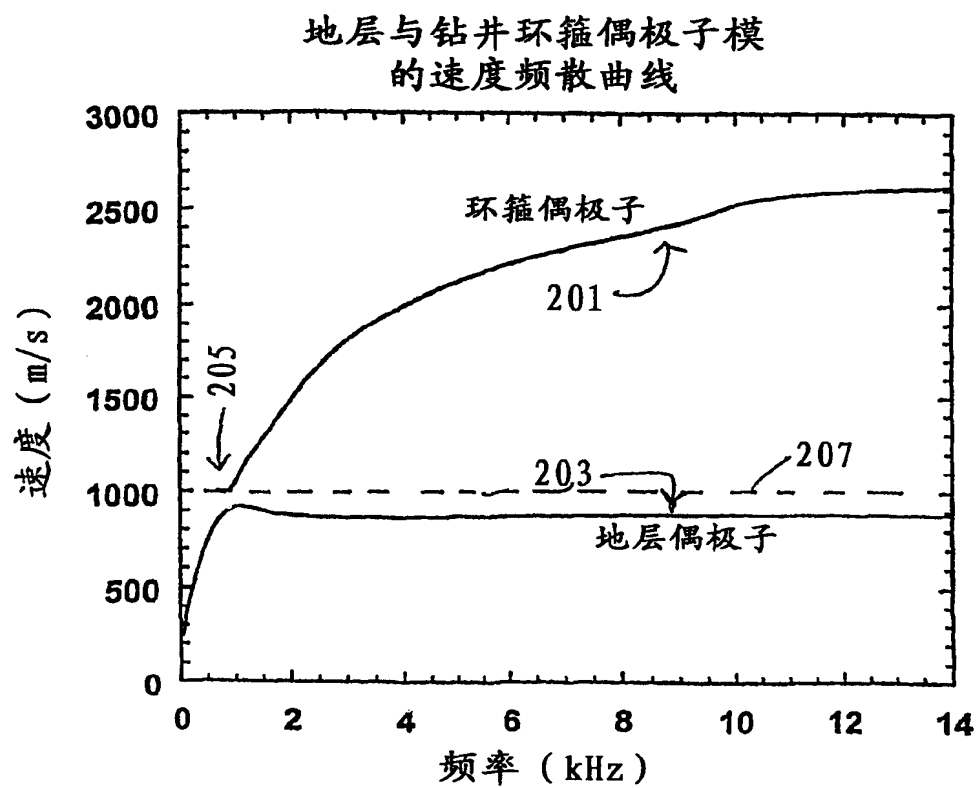
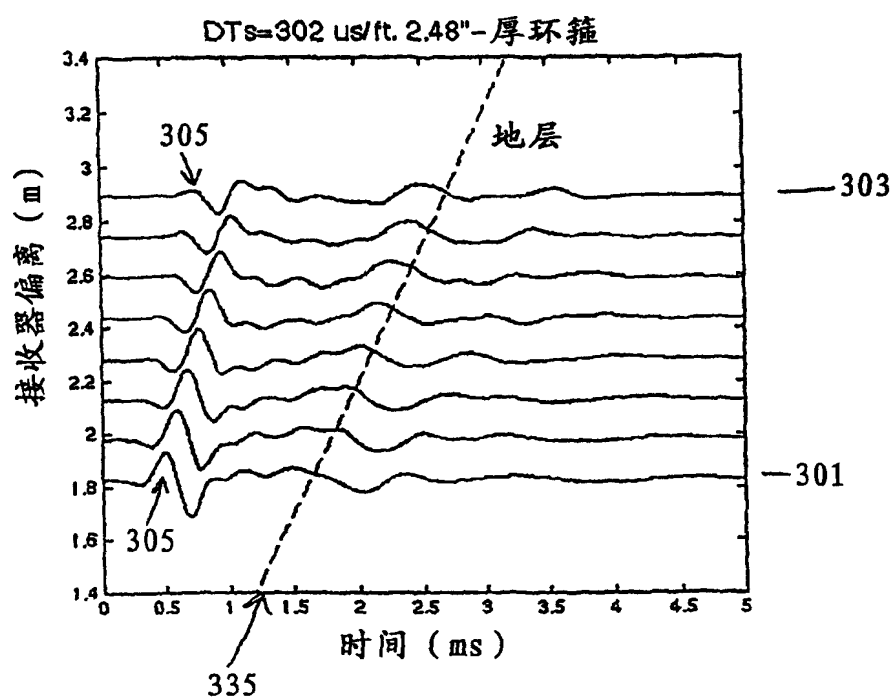


图 3



有钻井环箍时的偶极子波形

图4a

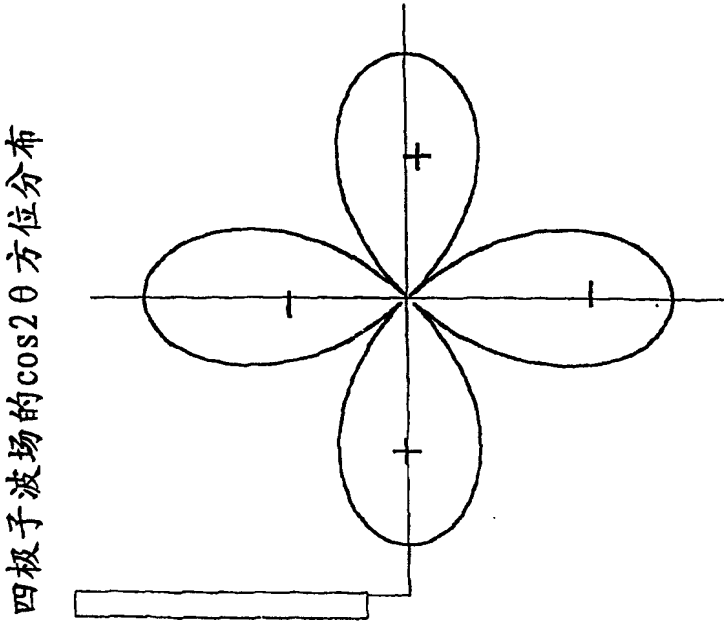


图 4B

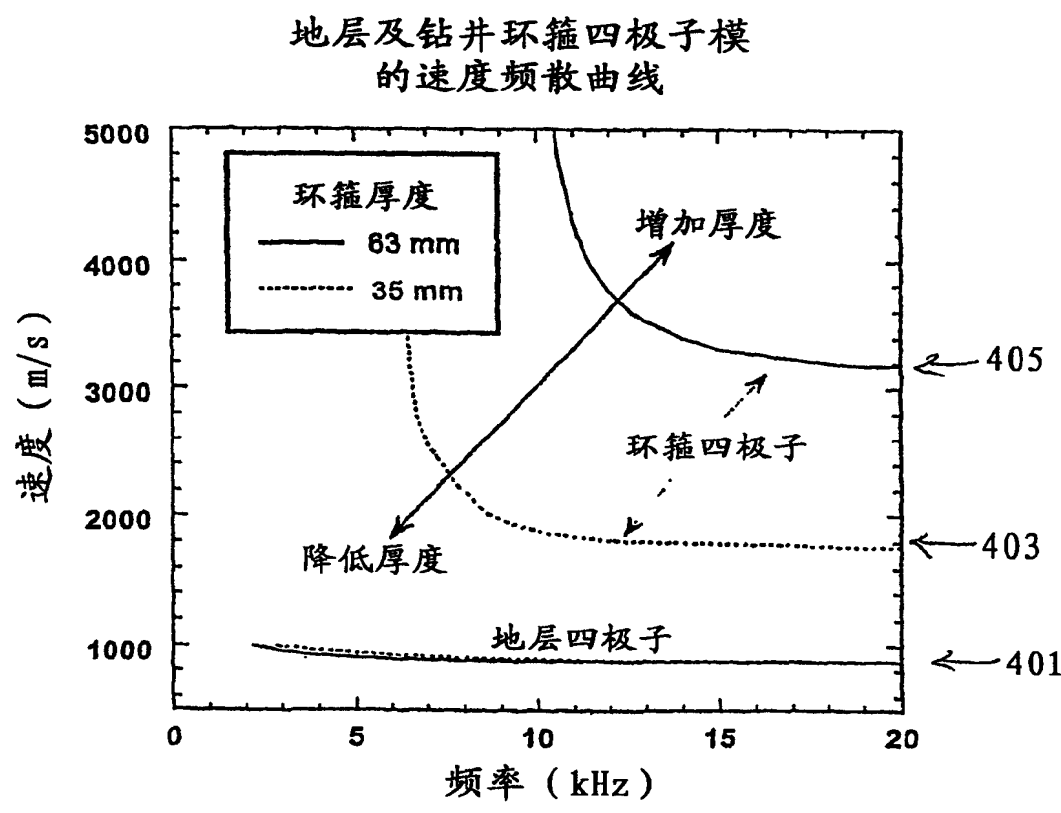


图 5A

波场瞬时图形

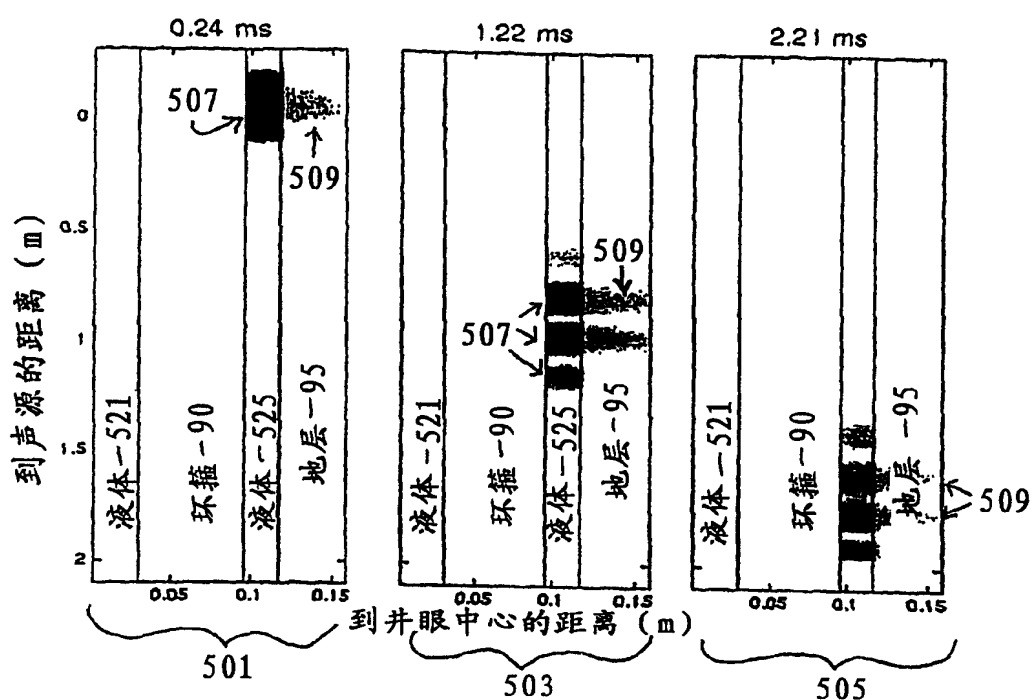
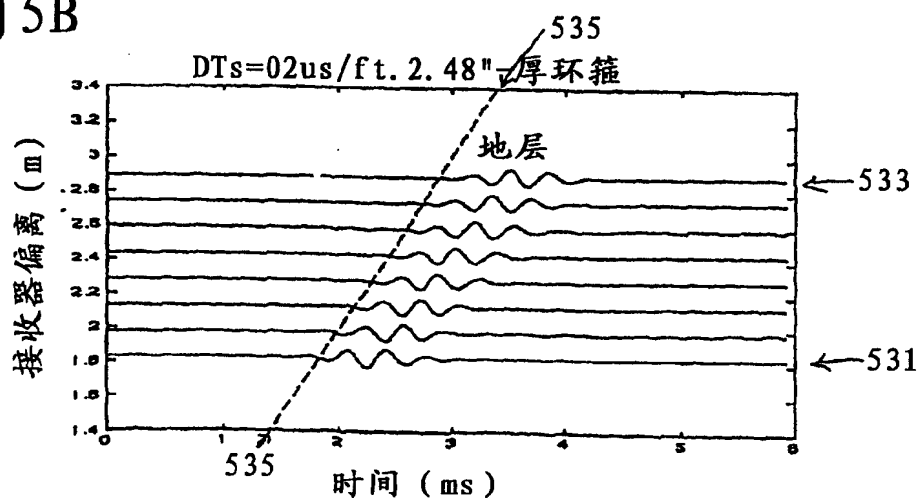


图 5B



各种偏离的四极子波形

图 6A

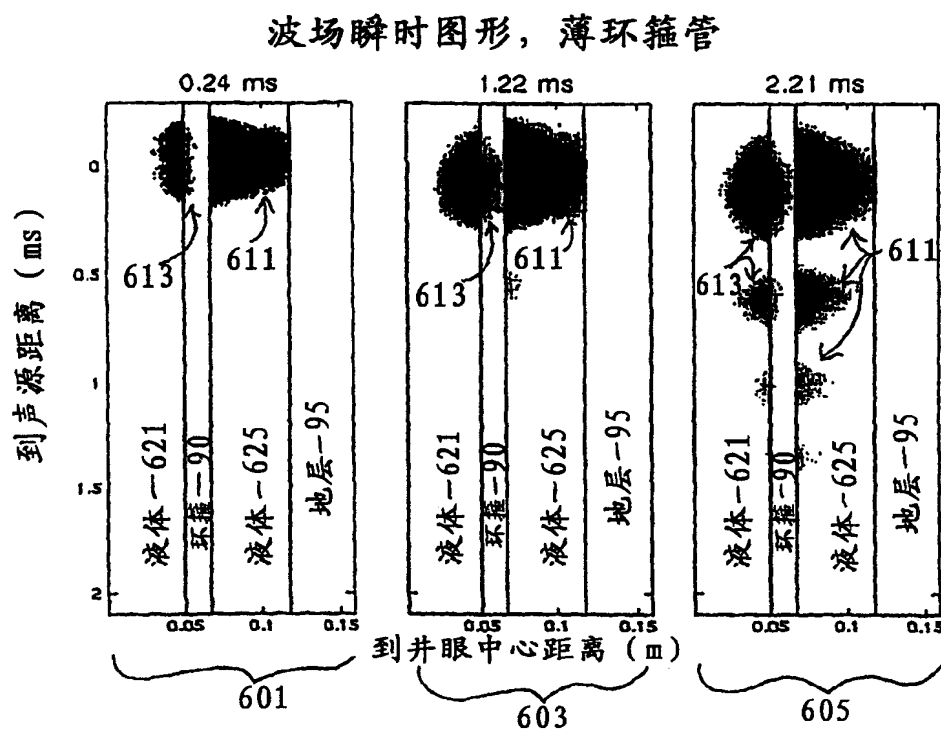
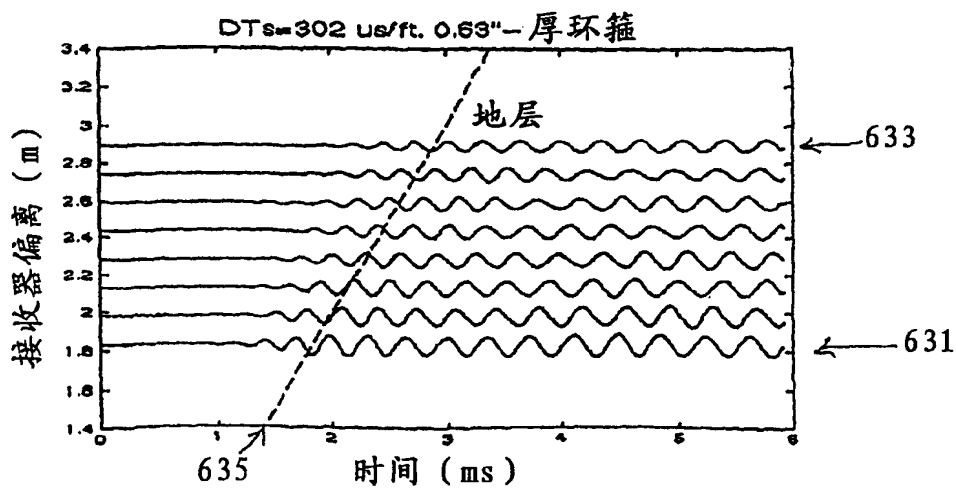


图 6B



四极子波形，薄环箍

图 7

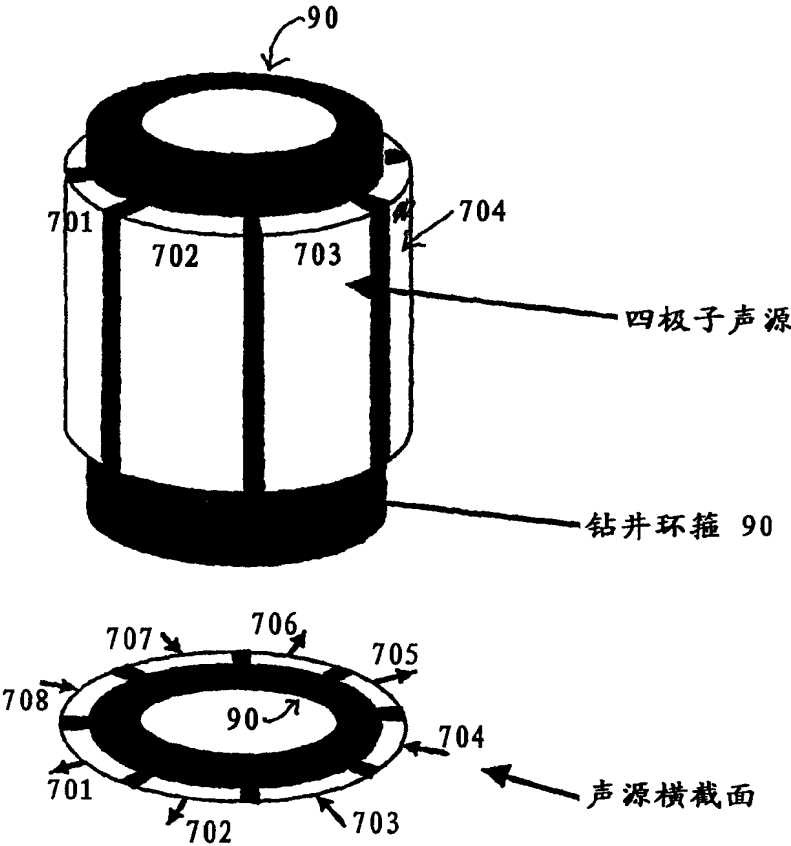
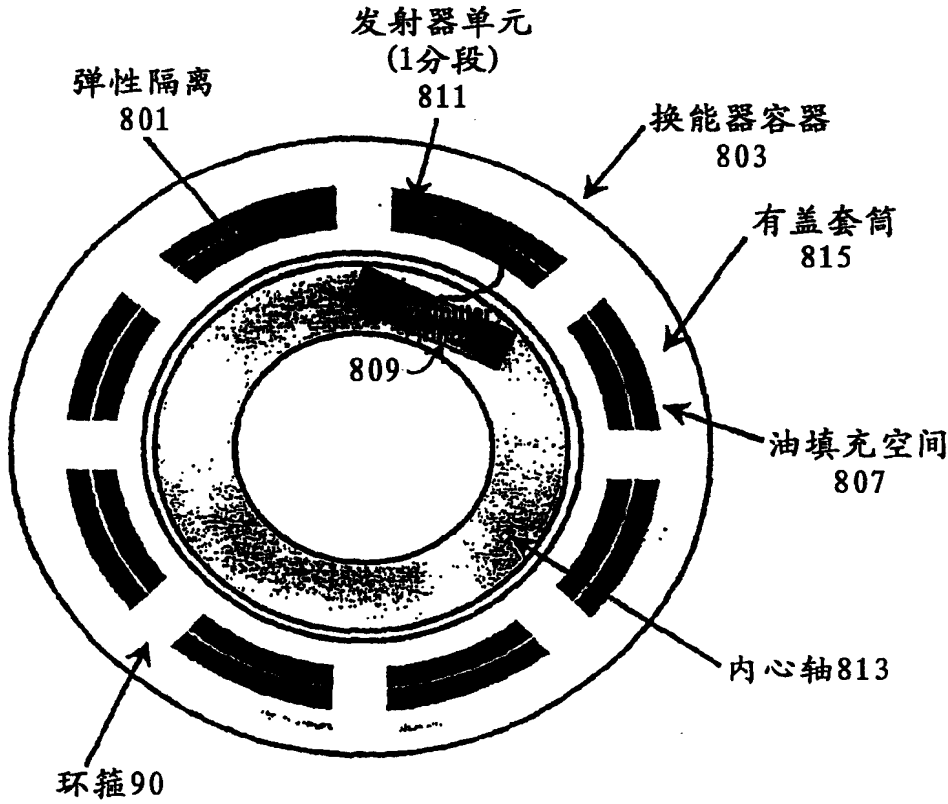
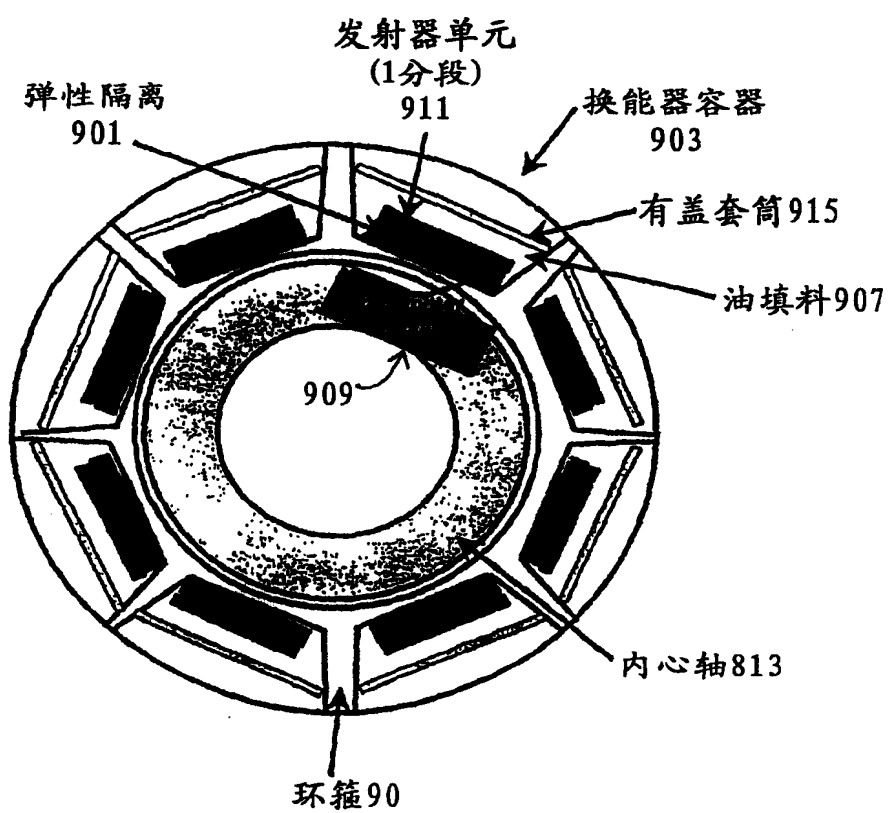


图8



分段的环发射器例子

图9



各个分段的发射器例子

图10

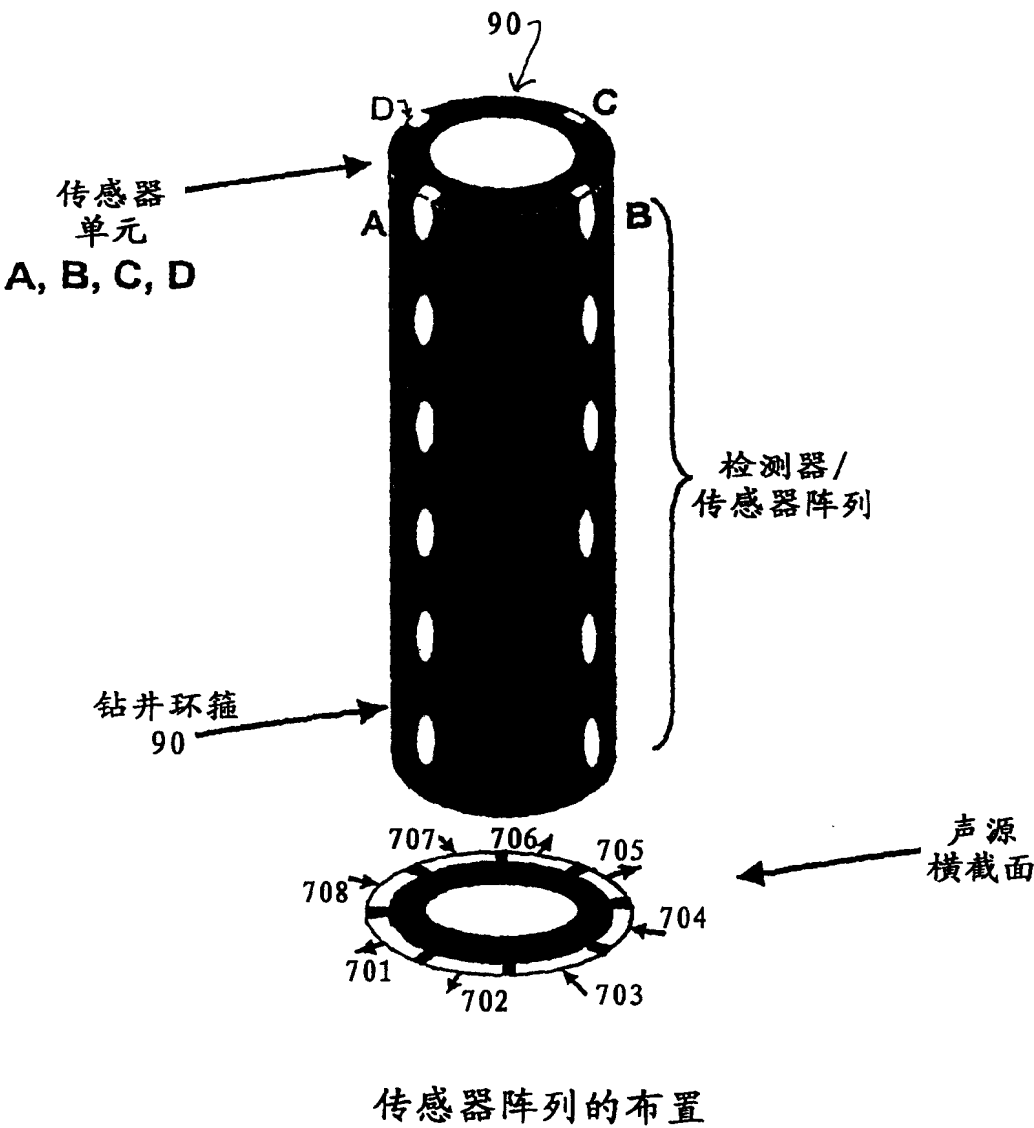
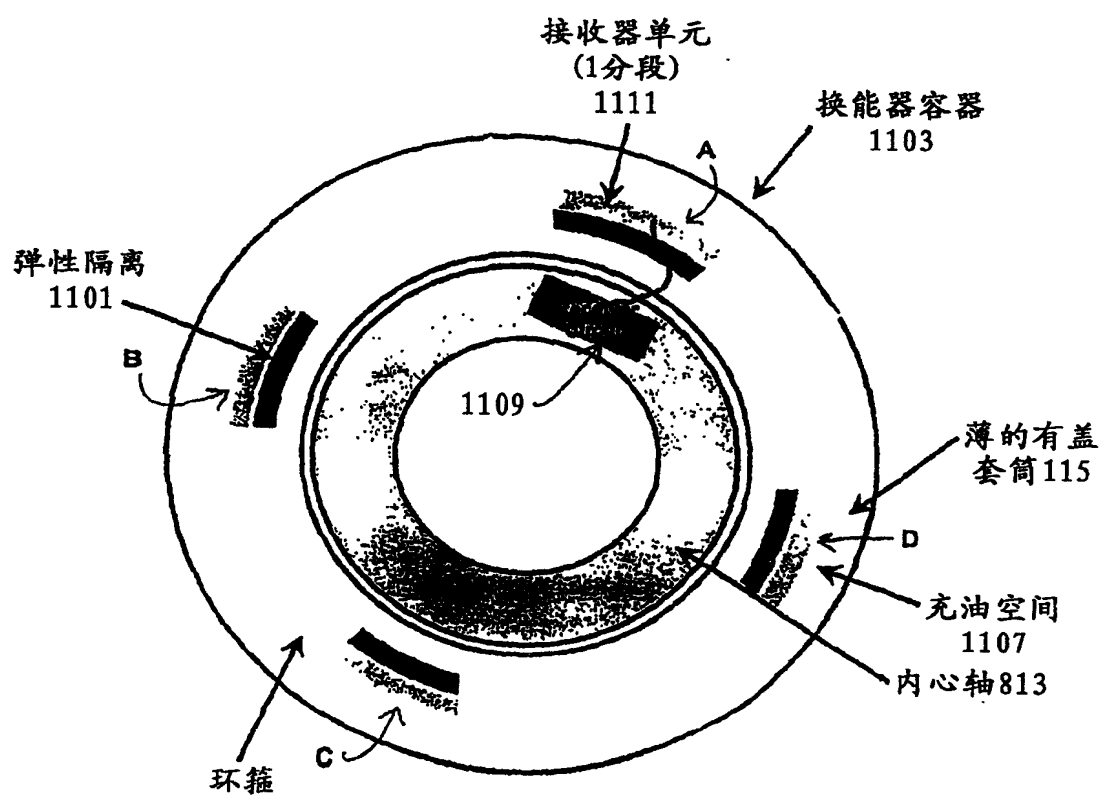
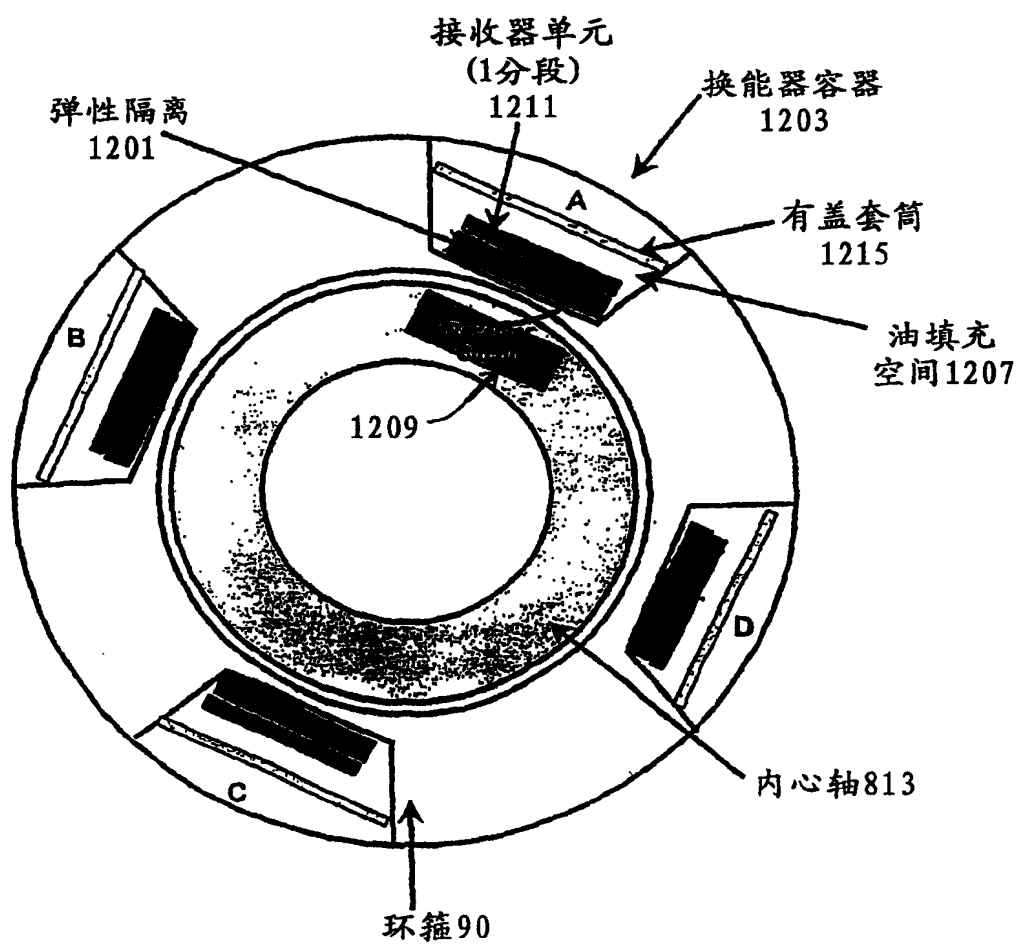


图11



分段的环境接收器例子

图12



各个分段的接收器例子

图13a

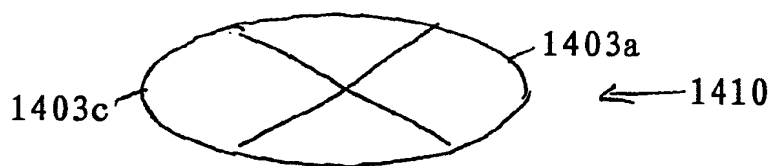
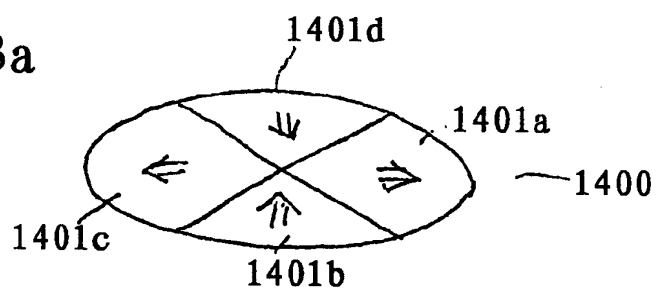


图13b

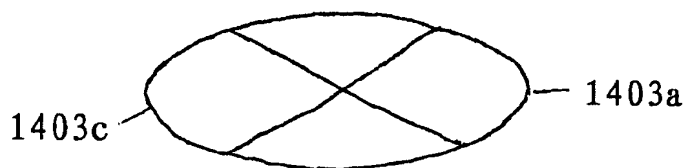
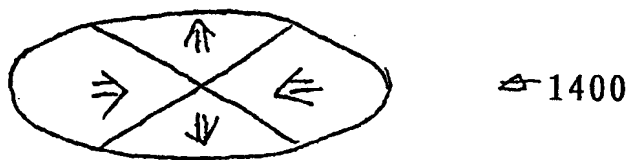


图14

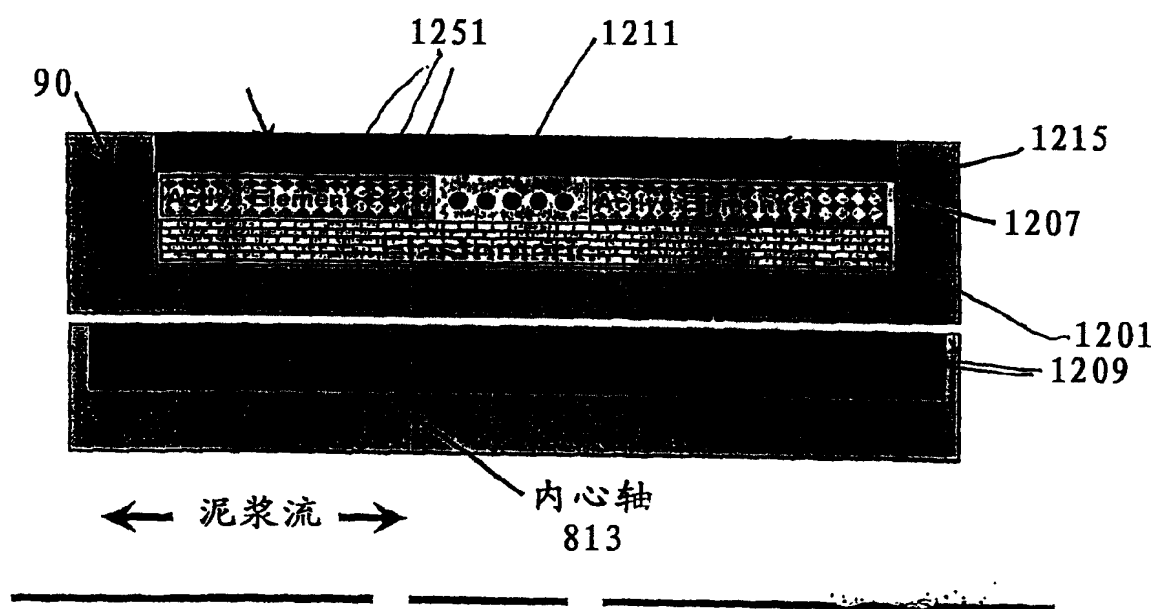


图15a

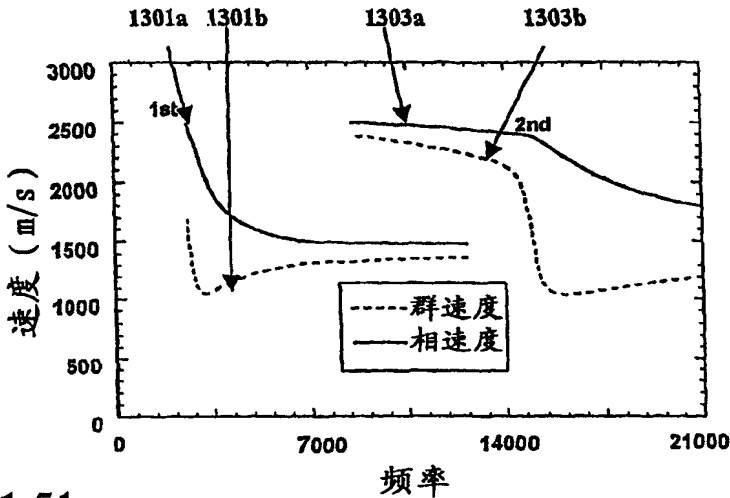


图15b

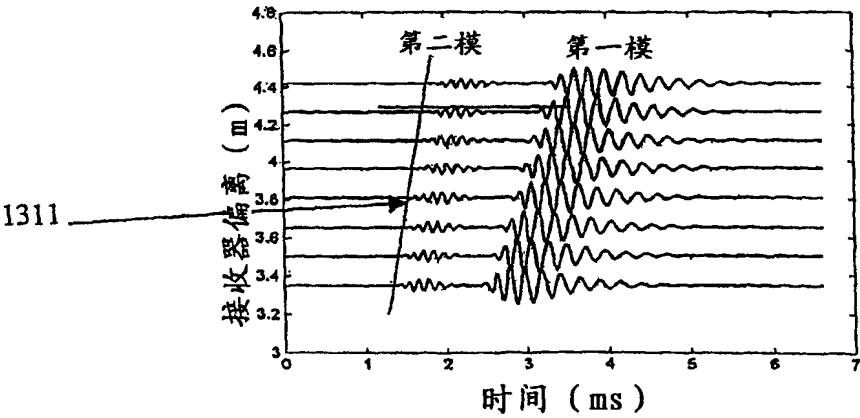


图16

