



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104781701 B

(45)授权公告日 2018.01.23

(21)申请号 201280077146.5

(22)申请日 2012.10.12

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104781701 A

(43)申请公布日 2015.07.15

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2015.05.18

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/CA2012/050721 2012.10.12

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02014/056069 EN 2014.04.17

(73)专利权人 吉欧泰科有限公司  
地址 加拿大安大略省

(72)发明人 J·多兹

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公  
司 31100

代理人 胡利鸣

(51)Int.Cl.  
G01V 13/00(2006.01)

(56)对比文件  
US 4613821 ,1986.09.23,  
US 2002/0043976 A1,2002.04.18,  
US 3823364 ,1974.07.09,  
WO 2011/063510 A1,2011.06.03,  
CN 102096113 A,2011.06.15,  
CN 102159962 A,2011.08.17,  
CN 102590869 A,2012.07.18,

审查员 张敏

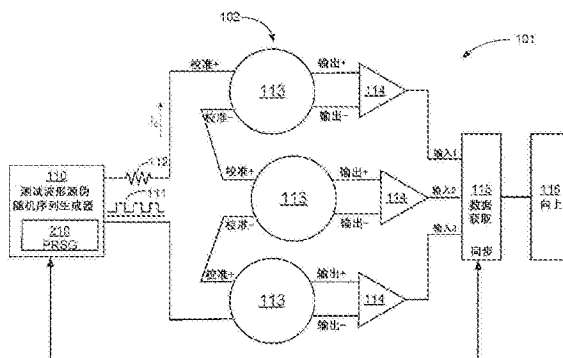
权利要求书3页 说明书7页 附图5页

(54)发明名称

校准的电磁勘探系统

(57)摘要

一种航空电磁勘探系统,其通过将其磁感应传感器的低频率灵敏度与使用校准环路获取的高频率响应的测量值组合,确定其接收器系统的校准因子。



1. 一种用于地球物理勘探的电磁接收器系统,包括:  
用于生成表示感应到的磁场中的变化的信号的磁感应传感器;  
用于生成具有第一频率范围的测试波形的波形源;  
位于至少临时在所述磁感应传感器附近的校准环路,用于在向所述校准环路施加所述测试波形之际在所述磁感应传感器中生成校准响应信号;以及  
被配置成确定用于向来自所述磁感应传感器的信号应用的校准因子的处理系统,所述处理系统根据所述校准响应信号以及低于所述第一频率范围的第二频率范围的所述磁感应传感器的已知灵敏度两者,确定所述校准因子。
2. 如权利要求1所述的系统,其特征在于,所述校准因子包括频域中的传递函数以及时域中的脉冲响应。
3. 如权利要求2所述的系统,其特征在于,所述传递函数和脉冲响应是在所述磁感应传感器的对应于从地质勘探中获取的数据的频率范围内获取的。
4. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,其特征在于,所述校准环路在大小方面相当于所述磁感应传感器。
5. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,其特征在于,所述处理系统被配置成在地质勘探期间对从所述磁感应传感器接收到的信号应用所述校准因子。
6. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,其特征在于,所述波形源生成方形波电流波形。
7. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,其特征在于,所述波形源包括伪随机序列生成器。
8. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,包括:  
用于响应于向其施加的驱动信号来生成原生电磁场的发射器环路,其特征在于,所述波形源被配置为有选择地向所述发射器环路施加所述驱动信号,以及向所述校准环路施加所述测试波形;  
被配置成测量由所述波形源所生成的电流的电流传感器,所述处理系统响应于所述电流传感器。
9. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,其特征在于,所述接收器系统被包含在时域电磁 (TDEM) 勘探系统中。
10. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,其特征在于,所述接收器系统被包含在被动源勘探系统中。
11. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,其特征在于,所述接收器系统被包含在用于通过飞机进行拖曳的拖曳组件中。
12. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,包括用于生成表示磁场中的变化的信号的多个磁感应传感器,所述处理系统被配置成确定用于向来自所述磁感应传感器的信号应用的唯一校准因子。
13. 如权利要求1到3中任一权利要求所述的系统,其特征在于,所述磁感应传感器是空气冷却蛇管传感器环路,基于所述空气冷却蛇管传感器环路的物理尺寸,确定所述第二频率范围的所述传感器环路的所述已知灵敏度。
14. 一种用于校准用于地球物理勘探的电磁接收器系统的方法,其中所述接收器系统

包括用于生成表示感应到的磁场中的变化的信号的磁感应传感器、用于生成测试波形的波形源以及位于至少临时在所述磁感应传感器附近的校准环路,所述方法包括:

测量来自所述磁感应传感器的对由所述波形源应用于所述校准环路的具有第一频率范围的测试波形的校准响应;以及

确定用于未来向来自所述磁感应传感器的勘探信号应用的校准因子,所述校准因子是根据所述校准响应以及低于所述第一频率范围的第二频率范围的所述磁感应传感器的已知灵敏度两者来确定的。

15. 如权利要求14所述的方法,其特征在于,确定所述校准因子包括:

(a) 计算所述校准响应的复傅里叶变换;

(b) 将所述校准响应的所述复傅里叶变换除以所述测试波形的所述复傅里叶变换,以获取第一函数;

(c) 确定所述第一函数在选择的低频率时的大小;

(d) 将所述第一函数除以所述确定的大小,以获取第二函数;

(e) 将所述第二函数乘以所述磁感应传感器的有效面积 $A_e$ ,产生将所述校准响应与磁场的变化速率 $dB/dt$ 关联的复传递函数;以及

(f) 计算所述复传递函数的逆傅里叶变换,以获取脉冲响应。

16. 如权利要求15所述的方法,其特征在于,所述复传递函数和脉冲响应是在所述磁感应传感器的对应于从地质勘探中获取的数据的频率范围内获取的。

17. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,其特征在于,所述校准环路在大小方面相当于所述磁感应传感器。

18. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,进一步包括在地质勘探期间对从所述磁感应传感器接收到的勘探信号应用所述校准因子。

19. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,其特征在于,所述测试波形是方形波电流波形。

20. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,其特征在于,所述电磁接收器系统包括用于响应于向其施加的驱动信号而生成原生电磁场的发射器环路,其中所述波形源被配置为有选择地向所述发射器环路施加所述驱动信号,以及向所述校准环路施加所述测试波形,电流传感器被配置成测量由所述波形源所生成的电流,其中所述校准因子是根据来自所述电流传感器的测量到的电流信息确定的。

21. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,其特征在于,所述接收器系统被包含在时域电磁(TDEM)勘探系统中。

22. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,其特征在于,所述接收器系统被包含在被动源勘探系统中。

23. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,其特征在于,所述接收器系统被包含在用于通过飞机拖曳的拖曳组件中。

24. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,其特征在于,所述接收器系统包括用于生成表示磁场中的变化的信号的多个磁感应传感器,所述方法包括确定用于向来自所述磁感应传感器中的每一个的未来勘探信号施加的唯一校准因子。

25. 如权利要求14到16中任一权利要求所述的方法,其特征在于,所述磁感应传感器是

空气冷却蛇管传感器环路,基于所述空气冷却蛇管传感器环路的物理尺寸,确定所述第二频率范围的所述传感器环路的所述已知灵敏度。

26. 一种用于地球物理勘探的电磁接收器系统,包括:

具有已知低频率灵敏度的磁感应传感器,

测试电流波形生成器,

在大小方面相当于所述传感器的校准环路,以及

处理系统,所述处理系统用于将当对所述校准环路应用测试波形时由所述传感器获取的测量值与所述传感器的所述已知低频率灵敏度组合,以获取所述传感器的有用频率范围内的传递函数和脉冲响应。

27. 如权利要求26所述的电磁接收器系统,其特征在于,所述处理系统被配置成在地质勘探期间对从所述磁感应传感器获取的勘探测量值应用所述传递函数和脉冲响应中的至少一项。

28. 如权利要求26或27所述的系统,其特征在于,所述电流波形生成器生成方形波电流波形。

29. 如权利要求26或27所述的系统,其特征在于,所述磁感应传感器包括空气冷却蛇管。

30. 一种用于校准包括至少一个感应磁传感器的用于地球物理勘探的电磁接收器系统以获取频域中的系统传递函数和时域中的系统脉冲响应的方法,包括:

通过基于所述传感器的尺寸的计算,确定所述传感器的低频率响应,

生成具有跨越所述电磁接收器系统的有用频率范围的频率分量的已知电流波形,

通过在大小方面相当于所述传感器并被定位成在所述传感器中生成磁场的至少一个校准环路,传递所述电流波形,

记录由所述传感器所生成的信号,

分析所述记录的信号,以在多个频率处确定在该频率处的传感器响应与所述低频率响应的比率,

将所述比率与所述传感器的已知低频率灵敏度组合,以获取在所述系统的所述有用频率范围内的所述系统传递函数和系统脉冲响应。

## 校准的电磁勘探系统

[0001] 背景

[0002] 此处所描述的各实施例涉及地质测绘领域。

[0003] 诸如时域电磁 (TDEM) 勘探之类的主动源电磁 (EM) 勘探是地球物理勘探的快速发展的领域。它涵盖以地面为基准的以及航空的应用。TDEM地质测绘涉及测量地球对由勘探系统发射的原生磁场的磁响应。发射的原生磁场以及响应之间的关系用于计算地球的电阻率结构,从该电阻率结构,推断地质信息。

[0004] 在美国专利No.7,157,914、WIPO专利申请PCT/CA2009/001197、PCT/CA2009/000217以及PCT/CA2010/001863中示出了TDEM勘探系统和方法的示例。

[0005] 诸如AFMAG勘探之类的天然源电磁勘探是地球物理勘探的另一正在发展的领域,也用于地面以及航空应用中。它涉及测量地球对天然地发生的电磁场的磁响应。磁场的各种分量(其中一些可以利用移动接收器来测量,其他接收器在固定位置)之间的传递函数被用于计算地球的电阻率结构,从该电阻率结构,推断地质信息。

[0006] 在美国专利No.6,876,202、作为US2011/0115489 A1公开的美国专利申请No.12/910,386,以及作为US2010/0244843 A1公开的美国专利申请No.12/645,915中示出了航空AFMAG勘探系统和方法的示例。

[0007] 在实际的EM勘探系统中,由一个或多个接收器(它们可以互相垂直)感应地球的辅助响应,并由数据获取系统记录。在主动源系统中,原生磁场对接收器的影响可以通过使用补偿线圈来降低,以允许对次生磁场的更准确的记录。特别是,当存在补偿线圈时,还可以通过电流传感器来感应并记录发射的原生磁场。

[0008] 在主动源系统的情况下,记录的发射器电流波形和次生磁场波形受发射的原生磁性波形、补偿线圈波形,以及接收器和记录系统的传递函数的影响。尽管这些影响在长延迟时间(低频率)时倾向于很小,但是,它们在短延迟时间(高频率)时变得更加重要。在天然源系统的情况下,信号的振幅和相位受接收器和记录系统的影响。

[0009] 为了适当地解释记录的波形,降低或消除发射的原生磁性波形、接收器,以及记录系统的影响是理想的。这要求传感器和记录系统的脉冲响应(或传递函数)被准确地已知。由于脉冲响应和传递函数变化(例如由于温度变化),因此,在野外条件下,以适当的间隔测量它们是理想的。

[0010] 以地面为基础的天然源EM系统中的接收器通常是带有螺旋管形状的铁磁芯磁感应传感器。这样的接收器可以方便地配备有螺旋管形式的校准绕组,该校准绕组封闭主绕组,稍微延伸到芯的末端以外,并具有相当于处于校准中的传感器的大小。这利用这样的事实:只知道绕组的间距以及在其中流动的电流,就可以准确地计算螺旋管绕组内部的磁场。

[0011] TDEM系统以及航空天然源EM中的接收器通常是具有多匝线的环路的形式的空气冷却蛇管磁感应传感器。这样的环路可以是直径大约为,例如,1m到8m。较大的空气冷却蛇管接收器具有多个优点,包括更加清洁的时域响应以及用于航空拖曳的更加方便的形状。在野外勘探环境中,难以在足够大以包含这样的接收器的空间内提供准确地已知的波形以及振幅的磁场。

## 发明内容

[0012] 根据示例实施例,提供了一种用于地球物理勘探的电磁接收器系统。电磁接收器系统包括用于生成表示感应到的磁场中的变化的信号的磁感应传感器;用于生成具有第一频率范围的测试波形的波形源;位于至少临时在所述磁感应传感器附近的校准环路,以在向所述校准环路施加所述测试波形之际在所述磁感应传感器中生成校准响应信号;以及,处理系统。处理系统被配置成通过以下来确定用于向来自磁感应传感器的信号应用的校准因子:根据校准响应以及低于第一频率范围的第二频率范围的磁感应传感器的已知灵敏度两者来确定校准因子。

[0013] 根据示例实施例,提供了用于校准用于地球物理勘探的电磁接收器系统的方法,其中所述接收器系统包括用于生成表示感应到的磁场中的变化的信号的磁感应传感器、用于生成测试波形的波形源,以及位于至少临时在所述磁感应传感器附近的校准环路。该方法包括:测量来自所述磁感应传感器的对由所述波形源应用于所述校准环路的具有第一频率范围的测试波形的校准响应;以及,确定用于未来向来自所述磁感应传感器的勘探信号应用的校准因子,所述校准因子是根据所述校准响应以及低于所述第一频率范围的第二频率范围的所述磁感应传感器的已知灵敏度两者来确定的。

[0014] 根据示例实施例,提供了一种用于地球物理勘探的电磁接收器系统,包括:具有已知低频率灵敏度的磁感应传感器,测试电流波形生成器,在大小方面相当于所述传感器的校准环路,以及,用于将当测试波形被应用到所述校准环路时由所述传感器获取的测量值与所述传感器的所述已知低频率灵敏度组合,以获取所述传感器的所述有用频率范围内的传递函数和脉冲响应的处理系统。

[0015] 根据示例实施例,提供了一种用于校准包括至少一个感应磁传感器的用于地球物理勘探的电磁接收器系统,以获取频域中的系统传递函数和时域中的系统脉冲响应的方法。该方法包括:通过基于所述传感器的尺寸的计算,确定所述传感器的低频率响应,生成具有跨越所述电磁接收器系统的有用频率范围的频率分量的已知电流波形,通过在大小方面相当于所述传感器并被定位成在所述传感器中生成磁场的至少一个校准环路,传递所述电流波形,记录由所述传感器所生成的信号,分析所述记录的信号,以在多个频率处确定在该频率处的传感器响应与所述低频率响应的比率,以及,将所述比率与所述传感器的已知低频率灵敏度组合,以获取在所述系统的所述有用频率范围内的所述系统传递函数和系统脉冲响应。

[0016] 附图简述

[0017] 图1是航空时域电磁系统的图示。

[0018] 图2是包括校准系统的带有三个传感器的电磁接收器系统的框图。

[0019] 图3是根据本发明的示例实施例的可以用于图2的接收器系统中的带有校准环路的空心磁感应传感器的平面示意图。

[0020] 图4是根据本发明的另一个示例实施例的带有校准环路的空心磁感应传感器的示意侧视图。

[0021] 图5是根据本发明的另一个示例实施例的带有校准环路的空心磁感应传感器的示意侧视图。

[0022] 图6是包括利用相同电流波形来校准发射器电流传感器和接收器线圈的系统的TDEM系统的另一个示例的示意图。

### 具体实施方式

[0023] 现在将描述用于地质测绘的EM勘探系统的校准的接收器系统的示例实施例。在各实施例中,接收器系统可以用于航空的或以地面为基础的勘探系统以及主动源以及天然源系统中

[0024] 为说明一个示例实施例,图1示出了可以包括校准的接收器系统的主动源航空的TDEM勘探系统100的示意图。TDEM勘探系统100包括发射器环路104以及传感器组件102。TDEM勘探系统100可以由诸如,例如,飞机、直升机、气球或飞艇之类的飞行器28携带。在至少某些示例实施例中,发射器环路104以及接收器线圈组件102是由飞行器28拖曳的拖曳组件12的一部分。在如图1所示的示例实施例中,传感器组件102基本上位于发射器环路104的中心处,发射器环路104由自多个支撑电缆或绳索16悬挂下来的框架20支撑。绳索16每一个都在一端附接到发射器环路框架20的周边上的唯一点,在另一端附接到共同的拖缆15。在一个示例实施例中,发射器环框架20是近似于圆圈的简单多边形框架,并由多个管状的段形成,这些多个管状的段定义连续的内部通路,发射器环路104在该通路中延伸。在某些示例实施例中,绳索16包括至少一个支撑传感器组件102的悬缆或绳索。在某些示例实施例中,传感器组件102可以由延伸到发射器环路框架20的一串径向地延伸的电缆或绳索14居中地定位。在一个示例实施例中,在使用时,发射器环路104与基本上垂直的偶极子轴水平地定位,传感器组件102位于发射器线圈104的中心。

[0025] 如图1所示的拖曳组件配置只是TDEM勘探系统100可以具有的许多可能的物理配置的一个示例——例如,在某些实施例中,传感器组件102可以由发射器环路104上方或下方的拖曳组件在物理上支撑或拖曳在发射器环路104后面。

[0026] 现在参考图2,在一示例实施例中,传感器组件102是已校准的EM接收器系统101的一部分。在图2的所示实施例中,电磁接收器系统101的传感器组件102具有三个磁感应传感器组件113,它们例如可以具有互相垂直的灵敏轴。在替代的配置中,传感器组件102可以只有一个传感器组件113,或三个以上的传感器组件113。除传感器组件102之外,电磁接收器系统101还包括测试波形源110、信号放大器114(每一个都与相应的传感器组件113相关联)、数据获取(DAQ)系统115,以及诸如计算机之类的数据处理系统116。在至少某些示例实施例中,测试波形源110、数据获取(DAQ)系统115以及数据处理系统116可以位于飞行器28中,并通过沿着拖缆15和支撑绳索16铺设的铠装的通信链路来连接到传感器组件102。放大器114可以在物理上位于传感器组件102附近或在其处,以减少前置放大器噪声到由接收器传感器组件113获取的信号的引入。在某些示例实施例中,可以获取数据,并将其存储在数据获取系统115中,用于传输或传递到远离飞行器28的处理系统116。

[0027] 参考图3,每一个传感器组件113都包括具有校准端子(CAL+,CAL-)的校准环路122,以及以具有输出端子127(OUT+,OUT-)的磁感应传感器121的形式的环路或主绕组。下面将比较详细地描述传感器组件113的示例实施例。

[0028] 参考图2和3,在TDEM系统100的地质勘探飞行期间,在接收器系统101的正常操作模式下,测试波形源110被禁用。每一个磁感应传感器组件113的磁感应传感器121感应平行

于其灵敏轴的磁场的变化速率 $dB/dt$ ,在其输出端子OUT+和OUT-之间产生与 $dB/dt$ 成比例的随时间变化的电压信号。每一个这样的信号都由与每一个磁感应传感器组件113相关联的放大器114处理,然后,被转换为数字时间序列,并由数据获取系统(DAQ) 115记录。在多传感器系统中,来自数据获取系统115的所有输入IN1、IN2和IN3的数字时间序列被彼此同步地记录。在某些实施例中,可以省略放大器114。在某些示例实施例中,一个传感器组件113可以被配置成感应发射器环路104中的电流的变化速率 $dI/dt$ ,而不是磁场 $dB/dt$ 。

[0029] 如此,在正常操作模式下,传感器组件113感应地球的辅助响应,所产生的数据由数据获取系统115记录。在一示例实施例中,除正常操作模式之外,接收器系统101被配置成还能够在校准模式下运转。校准模式可以,例如在地球物理勘探的位置处,在设置勘探系统100期间,在地面上执行,所产生的校准读数用于整个勘探数据集。在某些示例实施例中,校准模式可按周期性时间来执行,例如,每周或每天早上。在某些实施例中,校准模式可以在飞行期间在勘探飞行开始时由操作员启动或在整个勘探飞行中周期性地启动。在某些示例实施例中,校准模式可以作为专用的校准飞行的一部分,或作为包括校准时段和正常操作时段两者的飞行的一部分。可另选地,校准模式可以由DAQ 115或处理系统116在勘探飞行开始时自动地激活或在勘探期间在发生预定的事件(诸如一个时段的到期,或诸如温度、压力和冷凝之类的一个或多个感应到的环境条件的阈值变化中的一项或多项)之际周期性地激活。

[0030] 在校准模式下,测试波形源110生成包含多个频率处的分量的已知电压波形111。在某些实施例中,例如,波形111是带有1的开/关比率的方形波,其中包含其基本频率的所有奇数谐波处的分量。在某些实施例中,测试波形111可以从伪随机序列生成器(PRSG) 210中导出。在所示实施例中,在DAQ 115和测试波形源110之间提供同步信号,以便波形111与DAQ 115同步,从而允许由DAQ 115记录的传感器信号和测试信号波形111的相位关系被确定。在某些实施例中,同步信号从诸如GPS接收器之类的外部源导出,并输入到测试波形源110和DAQ 115两者。在某些实施例中,测试波形111被直接输入到DAQ 115的额外的输入,以允许相位关系被确定。

[0031] 在校准模式下,已知电压波形111被电阻器112转换为已知电流波形 $I_c$ 。电阻值被选择为以便它比在最高频率时需要其校准结果的校准环路的电感电抗大得多。已知电流波形 $I_c$ 电流流过在所示实施例中串联的磁感应传感器组件113中的每一个的校准环路122(图3)。每一个校准环路122都产生与电流波形 $I_c$ 成比例的随时间变化的磁场。磁场进而在每一个传感器组件113的输出端子OUT+,OUT-处产生信号。信号由放大器114处理,并由DAQ 115记录。记录的波形由计算机116处理,以确定每一个传感器组件113、其相关联的放大器114以及DAQ 115的其相关联的通道组合的响应。在不同的实施例中,此处理使用时域或者频域技术来执行。其他实施例可以使用不同的类型或配置来提供校准电流波形 $I_c$ 。一些实施例,例如,对于每一个传感器组件113,具有单独的电流源。

[0032] 每一个传感器组件113,DAQ 115的每一个放大器114以及每一个通道IN1、IN2以及IN3形成具有随着频率而变化的响应的唯一传感器系统通道。通过在如上文所描述的校准模式下操作,完整的系统的每一个传感器通道的组合的响应可以由计算机116确定。随后,当在正常操作模式下获取信号时,在校准模式下确定的每一个传感器通道的响应由计算机116用来从该特定传感器通道的信号中移出传感器组件113、放大器114,以及DAQ的效果,如



下文比较详细地描述的。这允许地球的响应被更准确地确定。

[0033] 再次参考图3,现在将比较详细说明接收器组件102的空气冷却蛇管磁感应传感器组件113的示例实施例。传感器组件113包括空气冷却蛇管磁感应传感器121,该传感器121是通过包括中心区域123周围的多匝绝缘的电线的主绕组形成。虽然图3示出了空心传感器121的主绕组中的四个代表性的圆形匝,但是,某些实际的实施例具有,例如,带有共同灵敏轴的100-200匝,每一个匝的直径124是1m到8m。传感器121可以是非圆形的——例如,在某些实施例中,匝是多边形或椭圆形的。

[0034] 如所属领域的技术人员理解的,通过利用准确地已知的振幅和波形,在均匀磁场中校准绕组,可以确定相对于环境磁场 $dB/dt$ 的传感器环路的绕组的输出的灵敏度和相移。然而,这需要与正在被校准的绕组相比更大的校准绕组,这在许多现场情况下难以排列

[0035] 在低频率时,传感器121的绕组对磁场的响应是 $A_e dB/dt$ ,其中, $A_e$ 是传感器121的“有效面积”,这是投射到垂直于磁场矢量的方向的平面上的由绕组的所有匝封闭的面积之和。如此,可以根据绕组的尺寸和匝数来准确地计算绕组的灵敏度,而无需电气测量值。在低频率时,绕组的灵敏度是有效面积 $A_e$ ,并且,在 $dB/dt$ 和传感器121的绕组的输出之间没有相移。此技术对于比绕组的自共振频率和放大器114和DAQ 115的带宽小得多的信号频率而言是准确的。并且信号频率必须是这样的:以便放大器114的输入阻抗比绕组的阻抗大得多。

[0036] 为了确定在传感器121以及其相关联的放大器114和DAQ 115的绕组的高频率处的灵敏度,可以将绕组置于已知振幅和波形的均匀磁场中。可以例如,通过带有显著地大于接受测试的绕组的直径和长度的“亥姆霍兹线圈”形式的校准绕组,或通过带有比接受测试的绕组大几倍的直径或宽度的环路,来生成这样的磁场。如上文所指出的,这样的配置会不切实际,相应地,此处描述了可以使用在大小方面相当于传感器环路的校准环路的示例实施例。

[0037] 在这方面,图3示出了在大小方面相当于传感器121的主绕组的校准环路122。由于其相对较小的大小,校准环路122不在由传感器121的主绕组占据的空间中生成均匀磁场。校准环路122在任何一点生成的磁场将随着环路尺寸或配置的小的变化而显著地变化,如此,不能用于准确地测量传感器121的主绕组的灵敏度。然而,由校准环路122在任何一点所生成的瞬时磁场只取决于环路122中的电流,与频率无关。因此,可以使用对施加于校准环路122的已知电流 $I_c$ 的响应来确定在频域测量的传感器环路主绕组响应的相对振幅和相移,作为相对于在选择的低频率时的其响应的比率。此外,该比率和相移基本上与校准环路绕组的配置或尺寸无关,只要传感器121的主绕组的所有匝都接受基本上相同的磁场。

[0038] 在示例实施例中,校准环路122通常是一匝,或非常少量的匝。使用单个匝或非常少量的匝的一个原因是最小化校准绕组的电感,以便电流波形是通过电阻器112施加的电压波形的副本(即,它基本上由该电阻器的电阻确定,电感的影响可忽略)。在校准绕组只有一个(或非常少)的匝的各实施例中,它生成的磁场可能是弱的,以致于来自文化的或天然源的环境磁噪声可能会影响在校准过程中记录的波形。这可以通过获取许多周期的校准波形的数据并在DAC 115或计算机116中“层叠”(平均)记录的波形来减轻。

[0039] 在某些应用中,如果校准环路122与传感器121的主绕组足够近以至于在穿过主绕组的不同的匝之间的磁通之间有很大的区别,则上文所提及的比率的精度可能被破坏。相

应地,在某些应用中,如果在传感器121的主绕组和校准环路122之间提供间隔距离126,该间隔距离126大于包括传感器121的主绕组的匝的线束的宽度125,可以改善精度。

[0040] 类似地,当在时域中测量时,由校准环路122的绕组中的电流波形 $I_c$ 所生成的传感器环路121的主绕组中的电压波形将与将由产生均匀磁场的大校准绕组(诸如在上文所讨论的亥姆霍兹线圈示例中)所生成的波形仅仅相差振幅比。

[0041] 在图3中,校准环路122被示意地示为与传感器121位于相同平面中,直径比传感器121更大,以便校准环路122与传感器121分隔径向距离126。图4示出了与图3的接收器传感器组件113相同的接收器传感器的替换实施例,例外是,校准环路122的直径152与传感器121的主绕组基本上相同,位于垂直于主绕组的轴的平面中,但是与主绕组分隔轴向距离150。在某些实施例中,诸如在图5中所示出的,在校准模式期间,校准环路122临时附接到包含传感器121的主绕组的外壳154的外部,以便校准环路122大致平行于传感器121的主绕组的匝。

[0042] 如此,可以理解,由于在低频率时传感器121的主绕组的响应可以根据其尺寸来计算,并且相对于在低频率时的响应的在高频率时的振幅比和相移可以使用小的校准环路122来测量,因此,每一个传感器组件113的有用频率范围内的通道响应可以通过组合两种类型的校准来确定,而无需大的校准绕组。相应地,在示例实施例中,在校准模式下,计算机116被配置成确定较高频率的每一个传感器通道的通道响应,然后将那些结果与每一个传感器通道的已知低频率灵敏度组合,以获取特定于传感器通道的校准因子,该校准因子包括每一个传感器组件113的有用频率范围内的传递函数和脉冲响应中的一个或两者。具体而言,在某些实施例中,首先计算对每一个通道中的校准波形的响应的复傅里叶变换,例如,使用已知FFT算法;然后,将它除以校准电流波形111的复傅里叶变换;将所产生的函数除以在选择的低频率(例如,校准波形的基本频率)时该函数的大小;以及,所产生的函数进而乘以传感器的已知有效面积 $A_e$ ;产生将在每一个通道中记录的以电压为单位的信号与磁场的变化速率 $dB/dt$ 关联的复传递函数;然后,计算每一个传递函数的逆傅里叶变换,以获取脉冲响应。然后,使用所确定的传递函数和脉冲响应,校正正在接收器系统101的正常操作模式期间记录的数据,作为在校准模式期间其相关联的传感器通道的校准因子。结果,校准环路122不需要在大小方面相对于传感器121大得多,可以在大小方面相当于传感器。

[0043] 虽然接收器组件102中的磁感应传感器121在上文中被描述为空气冷却蛇管传感器,但是,在某些示例实施例中,磁感应传感器121中的一个或多个可以使用铁磁芯传感器来实现,以便接收器组件102包括全部都是铁磁芯传感器或空心铁磁传感器的混合。所属领域的技术人员可以理解,其他类型的传感器,诸如铁磁芯传感器,在低频率时可以具有稳定的响应,以便使用诸如亥姆霍兹线圈或螺旋管校准管之类的设备,可以以不太频繁的间隔测量有效面积 $A_e$ ,与如上文所描述的使用校准环路在宽的频率范围内的响应的更频繁的测量值相结合。

[0044] 图6示出了包括三轴传感器组件102'的校准的EM接收器系统101'的另一示例实施例(在图6中只示出了三个传感器环路组件的单一接收器环路121)。EM接收器系统101'可以用于TDEM勘探系统100中,类似于系统101,从附图以及下面的描述中显而易见地看出的差异除外。TDEM勘探系统100包括发射原生磁性波形的发射器环路104和生成波形的TDEM脉冲源130。在EM接收器系统101'中,TDEM脉冲源130还用于实现在校准模式中使用的测试波形

源110。

[0045] 具体而言,在正常操作模式下,TDEM脉冲源130的输出穿过电流传感器131。发射器电流波形139由DAQ 115记录,并通过开关或连接器132耦合到发射器环路104(这里示意地示为单匝,尽管,一些实施例使用多匝)。包括辅助地球响应在内的响应由传感器121检测,并由DAQ 140记录。

[0046] 在校准模式下,操作连接器132的开关,以将发射器环路替换为电阻性负载(136, 137)。穿过电流传感器131的相同电流波形139也穿过电阻性负载。电阻器136的值比电阻器137小,以便跨电阻器136的电压波形是通过电流传感器131的电流的按比例缩小的副本。此波形由电阻器138(与图2中的电阻器112执行相同功能)作为穿过校准环路122的低振幅电流波形来复制。在此示例实施例中,三轴传感器组件102'包括单个外部校准环路122,该环路122大致位于传感器环路121周围,以在影响全部三个传感器环路121的方向生成磁场为朝向。在其他实施例中,串联的校准环路被包括在每一个接收器环路121的传感器组件102'内部。

[0047] 在图6的实施例中,输送到校准环路122的电流波形139是穿过电流变压器131的电流波形的副本。(电阻器136可以被选为最小化电阻器136和电阻器138之间的电缆中的寄生电容的影响。)因此,电流波形与理想或希望的校准波形的任何偏离都会影响电流传感器通道校准和接收器传感器校准两者。从发射器电流通道的波形和每一个接收器通道之间的传递函数导出地球响应。当计算此传递函数时,在对两个通道的校准中出现的错误将互相抵消。

[0048] 虽然图2和3的接收器系统101在上文中是在主动源EM系统的上下文中描述的,但是,图2和3的接收器系统101可以可另选地应用于被动源地质勘探系统,包括,例如,在上面标识的专利和专利申请中所描述的系统。此外,接收器系统101和101'还可以用于非航空的地质勘探应用中,并且如以上提到的,可以具有如一个传感器环路那么少的传感器环路以及多于三个的传感器环路。

[0049] 上文所公开的特定实施例只是说明性的,不应该被视为对本发明的限制,因为可以对所属领域的技术人员显而易见的不同的但是等效的方式修改和实施本发明。相应地,前述的描述不旨在将本发明限制到阐述的特定形式,相反地,旨在涵盖这样的替代方案,修改方案和等效方案,因为它们可以被包括在描述的范围,以便所属领域的技术人员应该理解,在不偏离所附权利要求书的范围的情况下,它们可以作出各种变化、替换和改变。另外,可以选择并组合上文所描述的实施例中的一个或多个的特征,以创建包括上文可能没有显式地描述的特征的组合的替换实施例。适用于这样的组合以及子组合的特征在作为整体阅读本申请时将所属技术领域的专业人员显而易见。此处以及在叙述的权利要求书中所描述的主题旨在涵盖并包含所有合适的技术的变化。

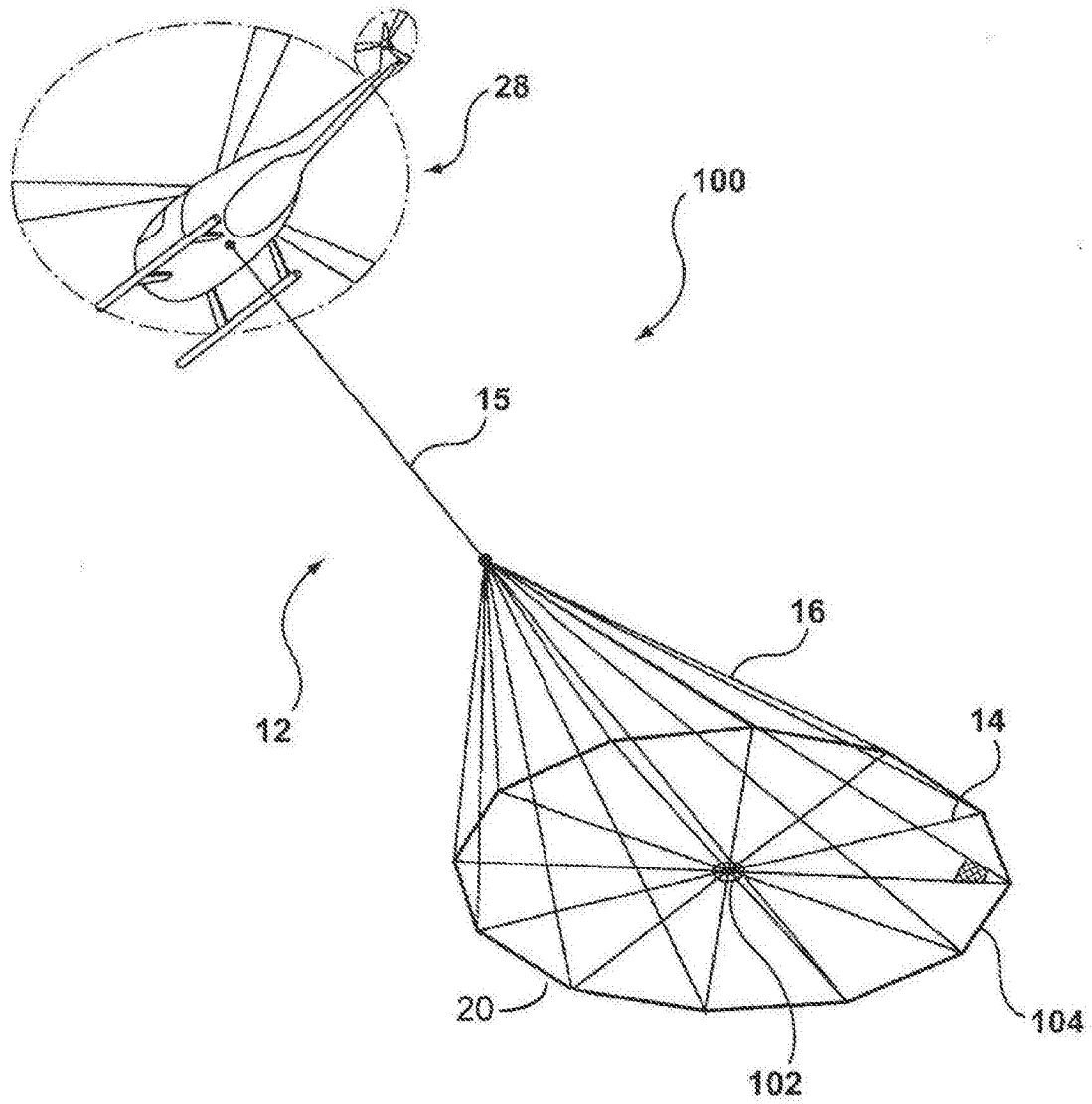


图1

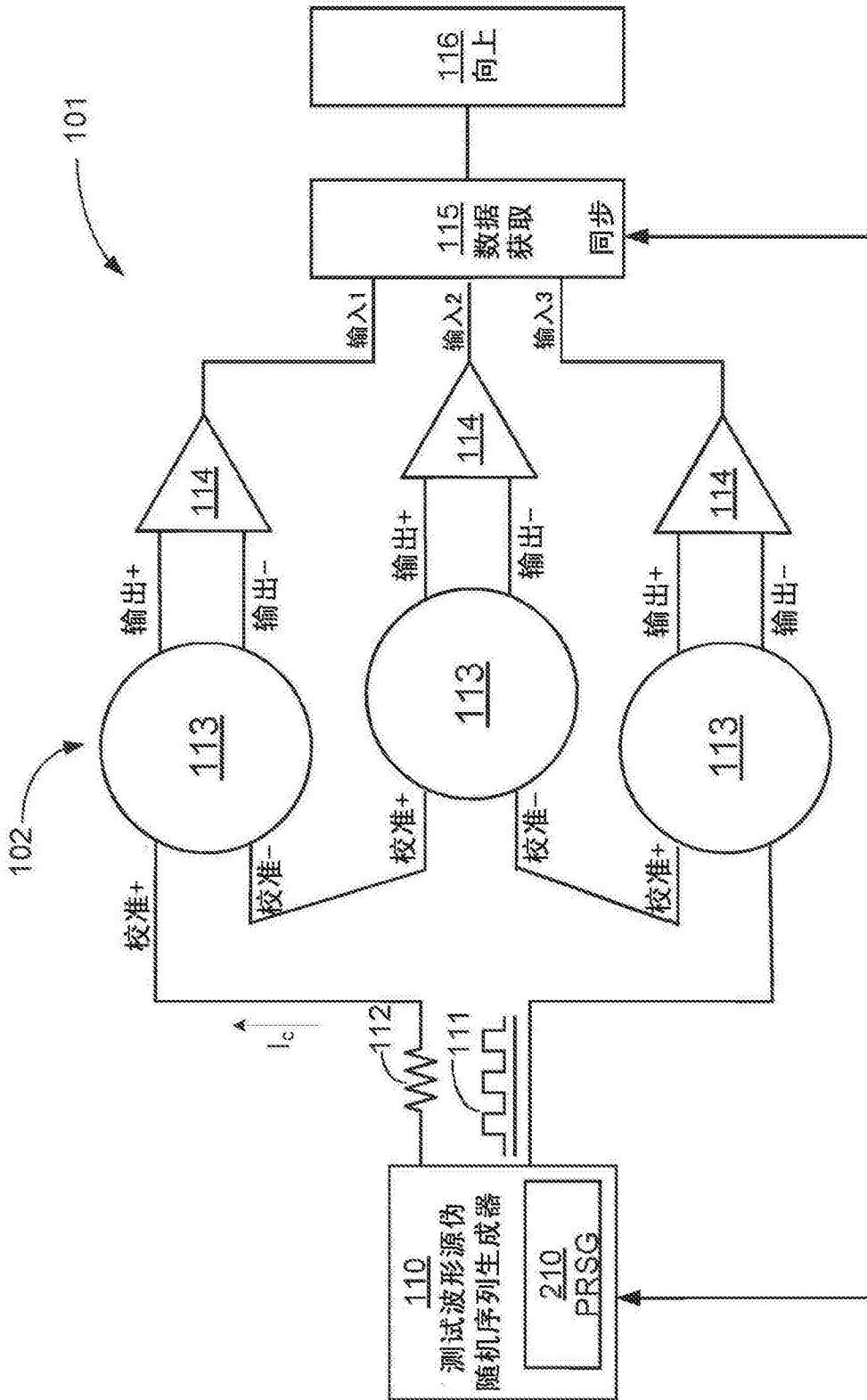


图2

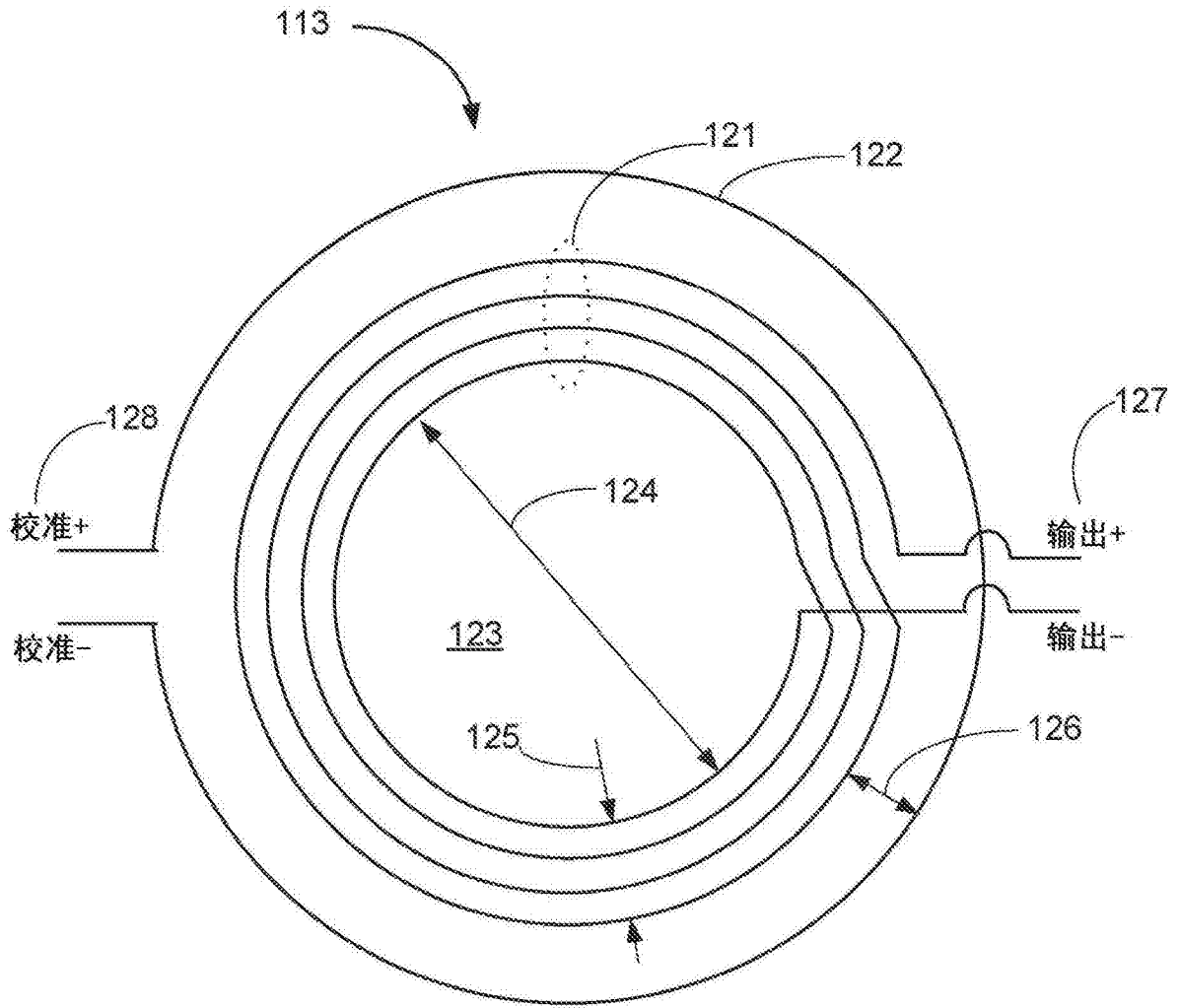


图3

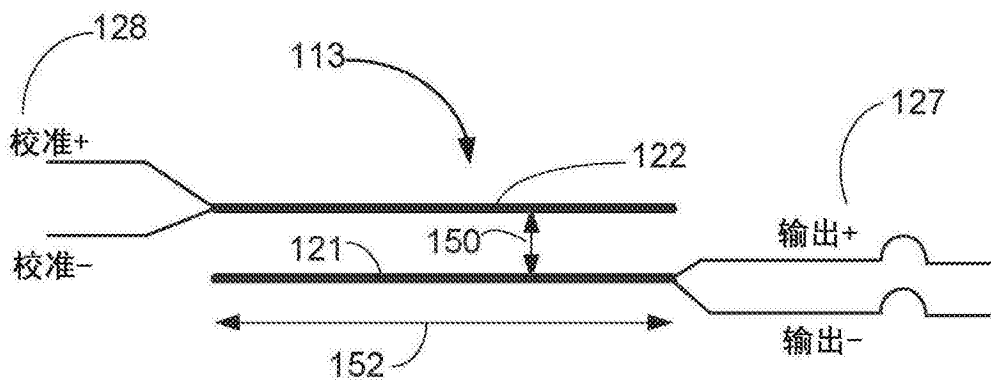


图4

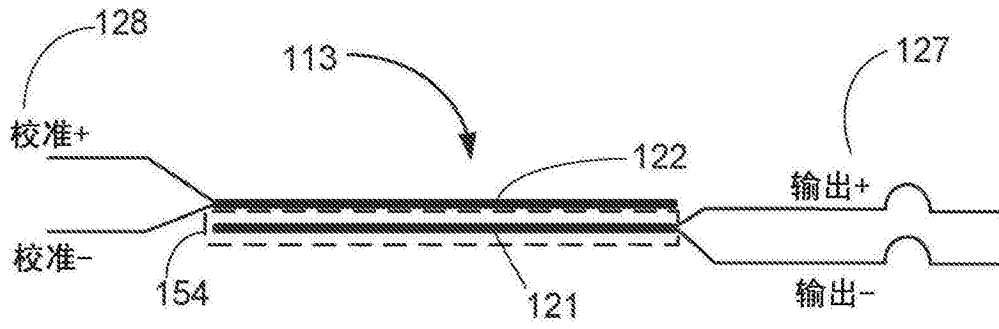


图5

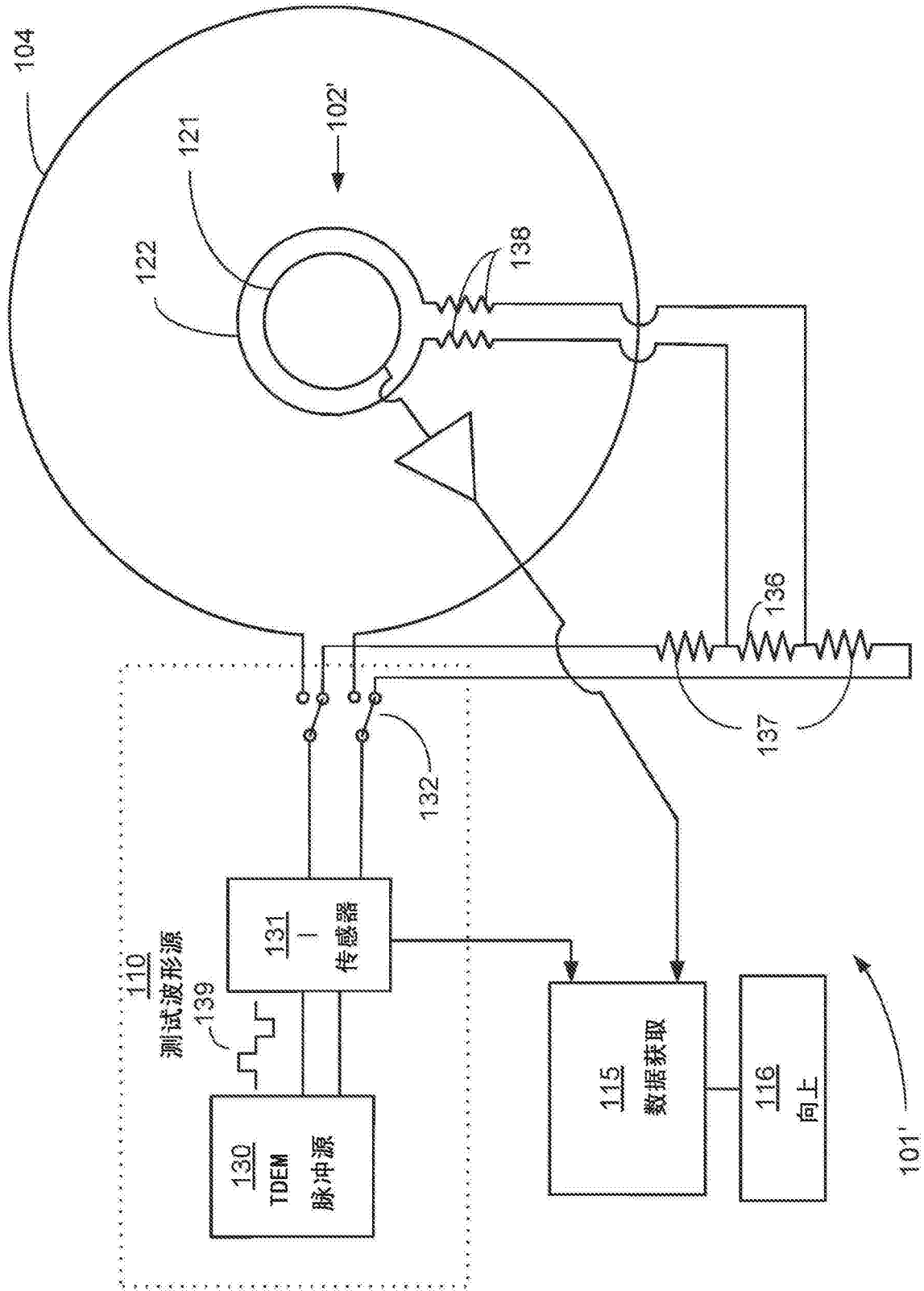


图6