



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110199201 B

(45) 授权公告日 2022.04.01

(21) 申请号 201780084807.X

(22) 申请日 2017.02.01

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110199201 A

(43) 申请公布日 2019.09.03

(30) 优先权数据  
15/421038 2017.01.31 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2019.07.26

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/US2017/015966 2017.02.01

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02018/143973 EN 2018.08.09

(73) 专利权人 威斯克航空有限责任公司  
地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 G.A.隆 B.R.维勒

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

代理人 张健 刘春元

(51) Int.Cl.  
G01R 33/07 (2006.01)  
H02K 29/08 (2006.01)

(56) 对比文件  
CN 201133933 Y, 2008.10.15  
DE 102004061405 A1, 2006.07.06  
CN 201133933 Y, 2008.10.15  
CN 102192803 A, 2011.09.21  
WO 2014037273 A1, 2014.03.13  
US 5241267 A, 1993.08.31  
US 2015022186 A1, 2015.01.22  
US 2015022186 A1, 2015.01.22  
US 7477052 B2, 2009.01.13  
US 2014347040 A1, 2014.11.27

审查员 倪秀敏

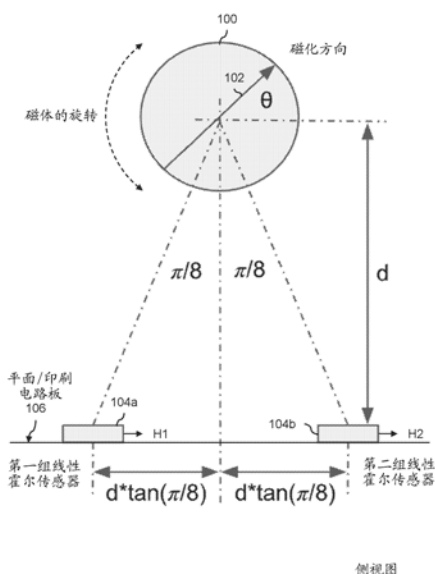
权利要求书4页 说明书11页 附图16页

(54) 发明名称

具有线性霍尔传感器和分立霍尔传感器的容错伺服传感器

(57) 摘要

从第一组件中的第一组霍尔传感器接收旋转的磁体的第一测量值。从第二组件中的第二组霍尔传感器接收第二测量值,其中第一组件和第二组件处于平行于与磁体相关联的旋转轴线的平面中。至少部分地基于第一测量值和第二测量值来确定与磁体相关联的角度。



1. 一种用于确定与磁体相关联的角度的系统,其包括:  
旋转的所述磁体;  
处理器,其被配置成:  
从第一组件中的第一组一个或多个霍尔传感器接收所述磁体的第一测量值;  
从第二组件中的第二组一个或多个霍尔传感器接收与所述磁体相关联的第二测量值,其中所述第一组件和所述第二组件处于平行于与所述磁体相关联的旋转轴线的平面中;  
从第三组件中的第三组一个或多个霍尔传感器接收与所述磁体相关联的第三测量值,其中所述第三组件与所述第一组件和所述第二组件处于相同平面中;  
使用克拉克变换、所述第一测量值、所述第二测量值和所述第三测量值来生成阿尔法值、贝塔值和伽马值;以及  
至少部分地基于所述阿尔法值和所述贝塔值来确定与所述磁体相关联的所述角度;  
所述第一组件,其包括所述第一组霍尔传感器;以及  
所述第二组件,其包括所述第二组霍尔传感器。
2. 如权利要求1所述的系统,其中确定所述角度包括:使用非三角学方法。
3. 如权利要求1所述的系统,其中确定所述角度包括使用以下各项中的一个或多个:一个或多个简单查找表、一个或多个3D表、卡尔曼滤波器或协方差调度。
4. 如权利要求1所述的系统,其中:  
确定所述角度包括:  
确定与所述磁体相关联的角度,包括通过对所述阿尔法值和所述贝塔值实行atan2函数来确定所述角度。
5. 如权利要求1所述的系统,其中,  
确定所述角度包括:  
确定与所述磁体相关联的角度,包括对所述阿尔法值和所述贝塔值实行atan2函数来确定所述角度;以及  
所述第一组件、所述第二组件和所述第三组件中的一个与其他组件相比更靠近所述磁体,并且该组件具有与其他组件不同的类型。
6. 如权利要求1所述的系统,其中所述处理器被进一步配置成:  
生成健康状态信号,包括通过使用最大幅值偏离、针对与固定值的变化来监测与所述阿尔法值和所述贝塔值相关联的阿尔法-贝塔矢量的幅值而生成所述健康状态信号。
7. 如权利要求1所述的系统,其中所述处理器被进一步配置成:  
生成健康状态信号,包括使用最大伽马偏离、针对与零值的变化来监测所述伽马值而生成所述健康状态信号。
8. 如权利要求1所述的系统,其中所述处理器被进一步配置成:  
生成健康状态信号,包括通过如下操作来生成所述健康状态信号:  
使用最大幅值偏离、针对与固定值的变化来监测与所述阿尔法值和所述贝塔值相关联的阿尔法-贝塔矢量的幅值;以及  
使用最大伽马偏离、针对与零值的变化来监测所述伽马值。
9. 如权利要求1所述的系统,其中所述处理器被进一步配置成:  
将与输出轴相关联的至少输出轴角度初始化成已知值,其中所述输出轴经由一组一个

或多个齿轮耦合到电机的电机轴；

使用所述电机中的多个分立霍尔传感器来确定与所述电机轴相关联的旋转的方向；以及

使用增量值和所述旋转的方向来更新所述输出轴角度。

10. 如权利要求1所述的系统,其中所述处理器被进一步配置成:

生成健康状态信号,包括通过使用最大幅值偏离、针对与固定值的变化来监测与所述阿尔法值和所述贝塔值相关联的阿尔法-贝塔矢量的幅值而生成所述健康状态信号;

将与输出轴相关联的至少输出轴角度初始化成已知值,其中所述输出轴经由一组一个或多个齿轮耦合到电机轴;

使用所述电机中的多个分立霍尔传感器来确定与所述电机轴相关联的旋转的方向;以及

使用增量值和所述旋转的方向来更新所述输出轴角度。

11. 如权利要求1所述的系统,其中所述处理器被进一步配置成:

生成健康状态信号,包括通过使用最大伽马偏离、针对与零值的变化来监测所述伽马值而生成所述健康状态信号;

将与输出轴相关联的至少输出轴角度初始化成已知值,其中所述输出轴经由一组一个或多个齿轮耦合到电机轴;

使用所述电机中的多个分立霍尔传感器来确定与所述电机轴相关联的旋转的方向;以及

使用增量值和所述旋转的方向来更新所述输出轴角度。

12. 如权利要求1所述的系统,其中所述处理器被进一步配置成:

生成健康状态信号,包括通过如下操作来生成所述健康状态信号:

使用最大幅值偏离、针对与固定值的变化来监测与所述阿尔法值和所述贝塔值相关联的阿尔法-贝塔矢量的幅值;以及

使用最大伽马偏离、针对与零值的变化来监测所述伽马值;

将与输出轴相关联的至少输出轴角度初始化成已知值,其中所述输出轴经由一组一个或多个齿轮耦合到电机轴;

使用所述电机中的多个分立霍尔传感器来确定与所述电机轴相关联的旋转的方向;以及

使用增量值和所述旋转的方向来更新所述输出轴角度。

13. 一种用于输出轴角度确定的系统,其包括:

无刷电机,包括多个分立霍尔传感器;

处理器,其被配置成:

将与输出轴相关联的至少输出轴角度初始化成已知值,其中所述输出轴经由一组一个或多个齿轮耦合到电机轴,所述齿轮具有预定齿轮比,其中所述电机轴的旋转导致所述输出轴的输出轴角度基于所述预定齿轮比的变化;

使用所述无刷电机中的所述多个分立霍尔传感器来确定与所述电机轴相关联的旋转的方向;以及

使用增量值和所述旋转的方向来更新所述输出轴角度;

所述输出轴,经由所述一组一个或多个齿轮耦合到所述电机轴;  
所述电机轴,耦合到所述无刷电机;以及  
所述一组齿轮。

14. 如权利要求13所述的系统,其中确定所述旋转的方向包括:

从所述多个分立霍尔传感器接收当前转子位置,其中所述当前转子范围是多个扇形中的一个;以及

将所述当前转子位置与先前的转子位置进行比较以便确定所述旋转的方向,其中所述先前的转子位置是所述多个扇形中与所述当前转子位置相邻的扇形。

15. 如权利要求13所述的系统,其中更新所述输出轴角度包括:

在所述旋转的方向是第一方向的情况下,以所述增量值使先前的输出轴角度递增,以便获得当前输出轴角度;以及

在所述旋转的方向是第二方向的情况下,以所述增量值使所述先前的输出轴角度递减,以便获得所述当前输出轴角度。

16. 如权利要求13所述的系统,其中,

确定所述旋转的方向包括:

从所述多个分立霍尔传感器接收当前转子位置,其中所述当前转子位置是多个扇形中的一个;以及

将所述当前转子位置与先前的转子位置进行比较以便确定所述旋转的方向,其中所述先前的转子位置是所述多个扇形中与所述当前转子位置相邻的扇形;以及

更新所述输出轴角度包括:

在所述旋转的方向是第一方向的情况下,以所述增量值使先前的输出轴角度递增,以便获得当前输出轴角度;以及

在所述旋转的方向是第二方向的情况下,以所述增量值使所述先前的输出轴角度递减,以便获得所述当前输出轴角度。

17. 一种用于确定与磁体相关联的角度方法,其包括:

从第一组件中的第一组一个或多个霍尔传感器接收旋转的所述磁体的第一测量值;

从第二组件中的第二组一个或多个霍尔传感器接收与所述磁体相关联的第二测量值,其中所述第一组件和所述第二组件处于平行于与所述磁体相关联的旋转轴线的平面中;

从第三组件中的第三组一个或多个霍尔传感器接收与所述磁体相关联的第三测量值,其中所述第三组件与所述第一组件和所述第二组件处于相同平面中;

使用克拉克变换、所述第一测量值、所述第二测量值和所述第三测量值来生成阿尔法值、贝塔值和伽马值;以及

至少部分地基于阿尔法值和所述贝塔值来确定与所述磁体相关联的所述角度。

18. 一种用于输出轴角度确定的方法,其包括:

将与输出轴相关联的至少输出轴角度初始化成已知值,其中所述输出轴经由一组一个或多个齿轮耦合到电机轴,所述齿轮具有预定齿轮比,其中所述电机轴的旋转导致所述输出轴的输出轴角度基于所述预定齿轮比的变化,其中所述电机轴耦合到无刷电机,所述无刷电机包括多个分立霍尔传感器;

使用所述无刷电机中的所述多个分立霍尔传感器来确定与所述电机轴相关联的旋转

的方向;以及

使用增量值和所述旋转的方向来更新所述输出轴角度。

## 具有线性霍尔传感器和分立霍尔传感器的容错伺服传感器

### 技术领域

[0001] 本公开涉及传感器的技术领域,并且具体地涉及具有线性霍尔传感器和分立霍尔传感器的容错伺服传感器。

### 背景技术

[0002] 用于(例如,在飞行器或汽车中)测量输出轴的角度的一种类型的传感器使用封装在单个集成电路(IC)中的四个线性霍尔传感器和定向在包含霍尔传感器的IC上方的直径方向磁化盘(即,磁体)。磁体通常安装到伺服机构的输出轴,并且IC通常安装在垂直于输出轴轴线的印刷电路板(PCB)上。为了提供冗余度,一些IC制造商生产具有两组四个霍尔传感器(例如,总共八个传感器)的IC。然而,由于这两组传感器都封装在相同IC中,因此这种传感器易受共模故障的影响(例如,如果IC断电,则这两组霍尔传感器都不可用)。用于(例如,在较不易受共模故障影响的情况下)测量轴的角度的新技术将是合期望的。

### 发明内容

[0003] 根据本发明的一个方面,提供了一种系统,其包括:旋转的磁体;和处理器,其被配置成:从第一组件中的第一组一个或多个霍尔传感器接收所述磁体的第一测量值;从第二组件中的第二组一个或多个霍尔传感器接收与所述磁体相关联的第二测量值,其中所述第一组件和所述第二组件处于平行于与所述磁体相关联的旋转轴线的平面中;从第三组件中的第三组一个或多个霍尔传感器接收与所述磁体相关联的第三测量值,其中所述第三组件与所述第一组件和所述第二组件处于相同平面中;使用克拉克变换、所述第一测量值、所述第二测量值和所述第三测量值来生成阿尔法值、贝塔值和伽马值;以及至少部分地基于所述阿尔法值和所述贝塔值来确定与所述磁体相关联的角度;所述第一组件,其包括所述第一组霍尔传感器;以及所述第二组件,其包括所述第二组霍尔传感器。

[0004] 根据本发明的另一个方面,提供了一种系统,其包括:处理器,其被配置成:将与输出轴相关联的至少输出轴角度初始化成已知值,其中所述输出轴经由一组一个或多个齿轮耦合到电机轴;使用所述电机中的多个分立霍尔传感器来确定与所述电机轴相关联的旋转的方向;以及使用增量值和所述旋转的方向来更新所述输出轴角度;所述输出轴;所述电机轴;以及所述一组齿轮。

[0005] 根据本发明的另一个方面,提供了一种方法,其包括:从第一组件中的第一组一个或多个霍尔传感器接收旋转的磁体的第一测量值;从第二组件中的第二组一个或多个霍尔传感器接收与所述磁体相关联的第二测量值,其中所述第一组件和所述第二组件处于平行于与所述磁体相关联的旋转轴线的平面中;从第三组件中的第三组一个或多个霍尔传感器接收与所述磁体相关联的第三测量值,其中所述第三组件与所述第一组件和所述第二组件处于相同平面中;使用克拉克变换、所述第一测量值、所述第二测量值和所述第三测量值来生成阿尔法值、贝塔值和伽马值;以及至少部分地基于所述第一测量值和所述第二测量值、阿尔法值和所述伽马值来确定与所述磁体相关联的角度。

[0006] 根据本发明的另一个方面,提供了一种方法,其包括:将与输出轴相关联的至少输出轴角度初始化成已知值,其中所述输出轴经由一组一个或多个齿轮耦合到电机轴;使用所述电机中的多个分立霍尔传感器来确定与所述电机轴相关联的旋转的方向;以及使用增量值和所述旋转的方向来更新所述输出轴角度。

### 附图说明

[0007] 在以下详细描述和附图中公开了本发明的各种实施例。

[0008] 图1A是从侧视图图示了具有两组线性霍尔传感器的伺服传感器的实施例的示图。

[0009] 图1B是从顶视图图示了具有两组线性霍尔传感器的伺服传感器的实施例的示图。

[0010] 图2是图示了另一种类型的伺服传感器的示图,该伺服传感器更易受共模故障的影响。

[0011] 图3是图示了使用两组或更多组线性霍尔传感器来估计角度的过程的实施例的流程图。

[0012] 图4是图示了具有三组线性霍尔传感器的伺服传感器的实施例的示图。

[0013] 图5是图示了具有带有线性霍尔传感器的三个IC的PCB的实施例的示图。

[0014] 图6是图示了由三组线性霍尔传感器测量的值作为角度的函数的实施例的曲线图。

[0015] 图7是使用三组线性霍尔传感器来测量角度并监测系统健康状况的系统的框图。

[0016] 图8是图示了使用三组或更多组线性霍尔传感器来估计角度的过程的实施例的流程图。

[0017] 图9是图示了用以生成健康状态信号的过程的实施例的流程图。

[0018] 图10是图示了具有四组线性霍尔传感器的伺服传感器的实施例的示图。

[0019] 图11是图示了具有分立霍尔传感器的电机的实施例的示图,这些霍尔传感器被用来测量输出轴的角度。

[0020] 图12是图示了电机轴中的转子的相关位置和输出轴的角度实施例的示图。

[0021] 图13是图示了使用多个分立霍尔传感器来估计角度的过程的实施例的流程图。

[0022] 图14是图示了确定与电机轴相关联的旋转的方向的过程的实施例的流程图。

[0023] 图15是图示了使用增量值以及与电机轴相关联的旋转的方向来更新输出轴角度的过程的实施例的流程图。

### 具体实施方式

[0024] 本发明可以用众多方式来实现,这些方式包括作为过程;装置;系统;物质的组成;计算机程序产品,其被体现在计算机可读存储介质上;和/或处理器,诸如被配置成执行存储在耦合到处理器的存储器上和/或由耦合到处理器的存储器提供的指令的处理器。在本说明书中,可以将这些实现方式或本发明可以采取的任何其它形式称为技术。一般而言,可以在本发明的范围内更改所公开过程的步骤的次序。除非以其他方式陈述,可以将被描述为配置成实行任务的诸如处理器或存储器之类的组件实现为被暂时配置成在给定时间处实行该任务的通用组件、或实现为被制造成实行该任务的专用组件。如本文中使用的,术语“处理器”指代被配置成处理数据(诸如,计算机程序指令)的一个或多个设备、电路和/或处

理核心。

[0025] 下面连同图示了本发明原理的附图一起提供对本发明的一个或多个实施例的详细描述。结合这种实施例描述了本发明,但是本发明并不限于任何实施例。本发明的范围仅受权利要求限制,并且本发明涵盖众多替换方案、修改和等同物。在以下描述中阐述了众多具体细节,以便提供对本发明的透彻理解。出于示例的目的提供了这些细节,并且可以根据权利要求在没有这些具体细节中的一些或全部的情况下实践本发明。出于清楚的目的,未详细描述在与本发明相关的技术领域中的已知的技术材料,以免不必要地使本发明晦涩难懂。

[0026] 本文中描述了用于实现容错伺服传感器的两种技术(其中伺服传感器在伺服系统中测量输出轴的角度)。在一种技术中,位于不同组件(例如,不同集成电路)上的多组线性霍尔传感器被用来测量或以其他方式估计角度。在一些这种实施例中(例如,当使用三组或更多组线性霍尔传感器时),系统的健康状况被监测(例如,以检测线性霍尔传感器中的一个是否变坏)。如果健康状况信号指示角度估计不能被信任,则在一些实施例中,伺服传感器切换到用以估计角度的不同技术,诸如本文中所描述的第二技术,其使用被包括在电机(例如,轴)中的分立霍尔传感器来测量输出轴的角度。在一些实施例中,两种技术一起使用(例如,使用线性霍尔传感器作为主要或初始技术来测量输出轴的角度,并且使用分立霍尔传感器作为辅助或备用技术)。在一些实施例中,在系统中仅使用一种技术(例如,没有分立霍尔传感器的线性霍尔传感器,或反之亦然)。下面描述了两种技术的各种实施例。

#### [0027] 线性霍尔传感器的示例

[0028] 图1A是从侧视图图示了具有两组线性霍尔传感器的伺服传感器的实施例的示图。在所示的示例中,磁体(100)具有由箭头102所示的磁化方向。磁体附着到输出轴,并且当输出轴旋转时,磁体也旋转,从而使磁化方向关于旋转轴线移动,该旋转轴线穿过磁体100的中心并且垂直于附图的平面。磁体的角度(以及因此,耦合到磁体的输出轴的角度)在该图中被表示为 $\theta$ 。

[0029] 为了测量磁体的角度(以及相应地,输出轴的角度),在该示例中使用两组线性霍尔传感器:第一IC(或更一般地,组件)(104a)上的第一组线性霍尔传感器和第二IC(104b)上的第二组线性霍尔传感器。线性霍尔传感器生成与正交于IC平面的磁场成线性关系的电压输出(例如,与输出0或1的分立霍尔传感器相反)。在一些实施例中,每个IC或每组线性霍尔传感器具有四个传感器。描述IC与磁体之间的位置关系的一种方式:IC处于平面(106)中(例如,该平面从页面出来),该平面平行于磁体的旋转轴线(例如,该轴线从磁体100的中心处的页面出来)。平面(106)也是印刷电路板(例如,IC安装到其上)将所处的地方。

[0030] 在所示的布置中,两个IC测量磁场的垂直分量(即,在该附图的垂直方向上)。由第一组线性霍尔传感器和第二组线性霍尔传感器测量的值分别被称为H1和H2。当磁体旋转时,由两组传感器测量的场分别与 $\sin(\theta + \phi)$ 和 $\cos(\theta + \phi)$ 近似成比例,其中 $\phi$ 是角度偏移,其取决于磁体如何被安装到轴。可以对值 $\phi$ 进行校准,或者可以精确地组装磁体以使其成为可忽略的值,因此随后假设其为零。而且,两组传感器的比例常数(例如,上述 $\sin(\theta + \phi)$ 和 $\cos(\theta + \phi)$ 与其相乘)是相同的。在该示例中,所估计的角度(即, $\theta_{estimate}$ )从所测量的传感器值导出,如下:

[0031]  $\theta_{estimate} = \text{atan2}(H1, H2)$ 。

[0032] 通过使用 $\text{atan2}$ 函数,上述等式输出范围为 $(-\pi, \pi]$ (通过向负值增加 $2\pi$ 可以将其转换成 $(0, 2\pi]$ )的角度。换言之,由上述等式生成的 $\theta_{\text{estimate}}$ 能够跨越磁体的完整旋转(即,0到 $2\pi$ )。如果在实际角度 $\theta$ 与所估计的角度 $\theta_{\text{estimate}}$ 之间存在任何小的残留误差,则可以通过使用一维查找表来对这些误差进行补偿。

[0033] 下面的图从顶视图示出了相同的系统。

[0034] 图1B是从顶视图图示了具有两组线性霍尔传感器的伺服传感器的实施例的示图。在该视图中,在磁体更靠近观看者的情况下,观看者向下看磁体和线性霍尔传感器。如该视图中所示,任一组线性霍尔传感器(102a和102b)都不位于磁体的旋转轴线(110)中。

[0035] 图1A和图1B示出了两组线性霍尔传感器位于分离的IC中,并且因此示例性伺服传感器不易受共模故障的影响。例如,如果具有第一组线性霍尔传感器的第一IC断电,则第二IC不会也自动地或必然地断电。这提供了对其中所有的线性霍尔传感器都处于相同组件中的测量技术的改进。

[0036] 在其他类型的伺服传感器的情况下,简单地将各种线性霍尔传感器划分成多个IC是不容易或不直接的。这是因为其他技术依赖于线性霍尔传感器处于磁体的旋转轴线中(与图1A和图1B中所示的布置不同)。下面的图示出了这种情况的示例。

[0037] 图2是图示了另一种类型的伺服传感器的示图,该伺服传感器更易受共模故障的影响。如前所述,磁体(200)连接到输出轴(未示出)。包括一个或多个线性霍尔传感器的IC(202)被用来测量磁体的角度。为了这么做,预期所有的线性霍尔传感器都位于磁体的旋转轴线(204)中并且距磁体具有相同的距离。磁体上方(未示出)是输出轴,磁体连接到该输出轴。因此,具有线性霍尔传感器的第二假设的IC(未示出)不能被放置在磁体上方。第二IC也不能如所示的IC那样以相同距离被放置在磁体下方,因为那样的话两个IC将在空间中占据相同点,而这是不可能的。因此,利用其他角度测量技术来将线性霍尔传感器分离成多个封装或组件并不容易。

[0038] 图2中所示的设计还对组件的放置或布局施加了更多限制,这可能使整体设计更大。相反地,图1A和图1B中所示的布置使系统的布局或设计更容易,和/或可以更好地优化布局或设计,使得伺服传感器的整体体积或大小更小。

[0039] 下面的图以流程图的形式更正式地和/或更一般地描述了上面描述的(一个或多个)技术。

[0040] 图3是图示了使用两组或更多组线性霍尔传感器来估计角度的过程的实施例的流程图。在一个示例性应用中,该方法由飞行器(例如,电传操纵的飞行器)实行,该飞行器使用伺服机构来移动飞机的空气动力学控制表面。该方法可以被用来测量这种伺服机构的角度,使得可以将所测量的角度与某个期望角度进行比较(例如,在伺服系统中的反馈回路中)。在一些实施例中,使用图1A和图1B中所示的系统来实行该过程。

[0041] 在300处,从第一组件中的第一组一个或多个线性霍尔传感器接收旋转的磁体的第一测量值。来自图1A的测量值H1是可以在步骤300处接收到的第一测量值的一个示例,并且保持第一组线性霍尔传感器(104a)的第一IC是第一组一个或多个线性霍尔传感器和/或从其中接收这种测量值的第一组件的一个示例。

[0042] 在302处,从第二组件中的第二组一个或多个线性霍尔传感器接收与磁体相关联的第二测量值,其中第一组件和第二组件处于平行于与磁体相关联的旋转轴线的平面中。

在图1A中,例如,从第二IC接收H2,该第二IC包括第二组线性霍尔传感器(104b)。图1A还示出了两个IC(或更一般地,组件)处于平行于磁体的旋转轴线的平面106中。

[0043] 在304处,至少部分地基于第一测量值和第二测量值来估计与磁体相关联的角度。例如,在上述等式中,H1和H2值被输入到atan2函数,并且atan2函数的输出是所估计或所测量的角度。

[0044] 在一些实施例中,来自三个或更多个组件(其中每个组件具有其自己的一组线性霍尔传感器)的测量值被用来确定与磁体相关联的角度。下面的图示出了一个这种示例。

[0045] 图4是图示了具有三组线性霍尔传感器的伺服传感器的实施例的示图。在该示例中,第一组线性霍尔传感器处于第一IC(402a)中,第二组线性霍尔传感器处于第二IC(402b)中,并且第三组线性霍尔传感器处于第三IC(402c)中。三个IC分别输出测量值H1、H2和H3。要注意的是,在该图中由第一IC(402a)、磁体(400)和第三IC(402c)形成的角度是 $\pi/3$ ,而在图1A中,该角度是 $\pi/4$ 。如前所述,IC(402a-402c)处于平面(406)中,该平面(406)平行于磁体的旋转轴线(例如,该轴线从磁体400的中心处的页面出来)。

[0046] 对于上下文,下面的图示出了PCB的一个示例,其中三个IC(包含三组线性霍尔传感器)安装到该PCB。

[0047] 图5是图示了具有带有线性霍尔传感器的三个IC的PCB的实施例的示图。在所示的示例中,示图500示出了PCB(502)的顶视图,其中具有线性霍尔传感器(504)的三个IC安装到该PCB。在该示图中,未示出磁体和输出轴,该输出轴的角度被测量。

[0048] 示图510示出了相同PCB(502)的侧视图,该PCB(502)具有未在示图500中示出的附加组件。输出轴(512)根据伺服机构的指令而旋转,并且输出轴的旋转使得附着到输出轴的磁体(514)也类似地旋转。在磁体正下方的是具有线性霍尔传感器(504)的附着到PCB 502的三个IC。要注意的是,在示图510中,IC是不可见的,这是因为它们被螺钉或螺栓挡住了。

[0049] 在一些实施例中,本文中描述的线性霍尔传感器的布置允许更便宜的封装。例如,如示图510所示,输出轴(512)平行于PCB 502,并且这可以允许伺服系统的整体大小更小,而这使得该系统更便宜。

[0050] 回到图4,要注意的是,与第一IC(402a)和第三IC(402c)相比,第二IC(402b)更靠近磁体(400)而定位。这使得H2信号与H1信号和H3信号相比具有更大的幅值。下面的图示出了H1、H2和H3信号作为磁体角度的函数的示例。

[0051] 图6是图示了由三组线性霍尔传感器测量的值作为角度的函数的实施例的曲线图。在所示的示例中,该曲线图的x轴是以度为单位的磁体角度(例如,图4中的 $\theta$ ),并且y轴是由特定IC或特定一组线性霍尔传感器(例如,图4中的402a-402c)输出的测量值(与磁场B成比例)。信号600示出了由第一IC(例如,图4中的402a)输出的H1测量值,信号602示出了由第二IC(例如,图4中的402b)输出的H2测量值,并且信号604示出了由第三IC(例如,图4中的402c)输出的H3测量值。如此处所示,信号具有 $\sim 120^\circ$ 的相位差。相比之下,在图1A和图1B中所示的两个IC布置的情况下,那里的H1和H2信号将是 $\sim 90^\circ$ 异相的(out of phase)。

[0052] 在图1A和图1B中所示的两种传感器配置中,任一个IC的故障都将使得所测量的角度有很大的错误。不幸的是,在仅有两组线性霍尔传感器时,可能难以检测该估计是何时错误的。第三组线性霍尔传感器(如此处所示)的添加使得知道包含一组线性霍尔传感器的IC之一或某个其他组件何时发生了故障是可能的。下面的图示出了使用三组线性霍尔传感器

来测量角度并监测系统的健康状况的系统的示例。

[0053] 图7是使用三组线性霍尔传感器来测量角度并监测系统的健康状况的系统的框图。在所示的示例中,克拉克变换(700)在进行缩放以计及不同幅值之后输入三个测量值H1、H2和H3。如图5中所示,如果所有的线性霍尔传感器都正常工作,那么由克拉克变换输入的H1-H3信号(暂时忽略任何幅值差异)应当分别是 $\sin(\theta + \frac{2\pi}{3})$ 、 $\sin(\theta)$ 和 $\sin(\theta + \frac{4\pi}{3})$ 。可以在将H1-H3信号输入到克拉克变换之前处理图6中所示的幅值方面的差异,例如通过针对中间的IC(例如,图4中的402b)使用与外边的IC(例如,图4中的402a和402c)相比不同的部件号,使得IC的输出幅值大部分或基本上相匹配(使用不同的部件号还有助于信噪比)。在已经利用模数转换器(ADC)对信号进行数字化之后,可以在软件中利用校准因子来计及任何残余的缩放因子(scale factor)不平衡。

[0054] 克拉克变换(也被称为阿尔法-贝塔变换)是一种矩阵运算,其输入H1-H3值并且输出三个值:阿尔法( $\alpha$ )值、贝塔( $\beta$ )值和伽马( $\gamma$ )值。通过该变换输出的阿尔法和贝塔值是正交的,并且类似于在上面的两个传感器等式中使用的 $\sin(\theta + \phi)$ 和 $\cos(\theta + \phi)$ 值。因此,与上面的类似,所估计的角度通过以下等式来计算:

$$[0055] \quad \theta_{estimate} = \text{atan2}(\alpha, \beta)。$$

[0056] 这由atan2函数(702)反映,该函数输入来自克拉克变换(700)的阿尔法和贝塔值。 $\theta_{estimate}$ 被输出,并且可以根据需要由该系统使用(例如,在其中将所估计或所测量的角度与某个期望角度进行比较的反馈回路中)。在一些实施例中,周期性地实行校准和/或校正以支持对(上面的)缩放因子的校正的三角学解决方案(trigonometric solution)。例如,这种校正可以被用来计及传感器的放置方面的可变性、对磁体和/或传感器的热效应、局部磁场/偏移等。

[0057] 除了生成角度的估计或测量值之外,该系统还监测系统的健康状况。在该示例中,监测两个度量以生成健康状态信号。在该示例中监测的第一度量是由克拉克变换(700)输出的伽马值。如果所有的H1-H3值被适当地缩放并且适当地间隔开~120度,则伽马值将为零。如果伽马变为(例如,显著地或有意义地)非零,则这指示关于H1-H3信号中的一个或多个的幅值和/或相位的问题。为了检查这一点,将伽马值输入到第一比较器(704),在该第一比较器中,将该伽马值与最大伽马偏离进行比较(例如,在被标记为问题之前,大量的伽马可以偏离于零)。如果伽马值大于最大伽马偏离,则这指示至少一个IC可能有问题,并且比较器704的输出变为1(即,0意味着伽马值未超过最大伽马偏离)。

[0058] 在该示例中监测的第二度量是阿尔法-贝塔矢量的幅值。阿尔法-贝塔矢量是由克拉克变换输出的阿尔法和贝塔值形成的矢量。由于阿尔法和贝塔彼此正交,因此阿尔法-贝塔矢量的幅值为 $\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ 。如果系统正常工作,则阿尔法-贝塔矢量的幅值应当是恒定的。为了检查这一点,由克拉克变换输出的阿尔法和贝塔值被输入到函数(706),该函数确定了阿尔法-贝塔矢量的幅值。从函数706输出的幅值中减去(708)标称幅值,并且将该差异传递到绝对值函数(710)。由函数710输出的绝对值被输入到第二比较器(712),在第二比较器中,将该绝对值与最大幅值偏离进行比较。如果该绝对值超过最大幅值偏离,则第二比较器的输出变为1(使得0意味着阿尔法-贝塔矢量的幅值尚未变化超出固定和/或标称的幅值至可接受的程度)。

[0059] 第一比较器(704)和第二比较器(712)的输出被传递到或(OR)门(714)。如果比较器的任一个输出都是1(即,被监测的对应度量指示系统中的问题),则或门的输出(其是健康状态信号)也将是1。如果健康状态信号是0,则系统的健康状况良好;如果健康状态信号是1,则系统的健康状况不好。在后一种情况下,系统可以决定停止使用利用线性霍尔传感器的 $\theta_{estimate}$ 生成,并且切换到某个其他测量技术(例如,下面描述的使用分立霍尔传感器的技术)。

[0060] 与其他系统相比,因为实行了健康监测,所以该示例系统可能是合期望的。某些其他系统可能不实行健康监测。

[0061] 在上面的示例中,使用了基于三角学和/或克拉克变换的方法。这仅仅是一种解决方案,并且在各种实施例中,使用了某个其他技术或方法。在第一个示例性非三角学方法中,使用了简单查找表(例如,每个传感器一个简单查找表)、连同描述或以其他方式指定何时使用每个传感器的区域约束。例如,在给定上面的示例性 $270^\circ$ 间隔(例如,参见图6和区域610、612和614)的情况下,利用该方法可以覆盖大约 $270^\circ$ 的范围。对于健康监测,可以利用对每个传感器的简单边界检查(bound checking)来对当前未使用的两个传感器进行反向查找,以确定是否存在一致(agreement)。如果存在不一致,则系统的健康状况被标记(例如,被标记为不健康或可疑的)。初始化例程对每个传感器运行健康监测过程,并且通过选择报告为“健康”的解决方案(即,区域)来确定该位置当前处于哪个区域中。

[0062] 在第二个示例性非三角学方法中,在经校准的三霍尔传感器数据上的每个点处使用3D查找表。对于健康监测,查找表的构造在有效的解决方案点附近给出浅梯度,并且在无效的位置处分叉成无效值(例如,因为传感器之一不一致)。

[0063] 在第三个示例性非三角学方法中,卡尔曼滤波器或其他高级估计器基于当前估计状态对每个传感器使用某种形式的协方差调度。系统的健康状况也是估计器的产物。

[0064] 辅助位置测量如何计入(factor into)健康解决方案中取决于解决方案或方法而变化。对于卡尔曼滤波器方法,辅助位置测量是用于估计器的附加状态(例如,限制其误差)。对于其他两个解决方案(例如,简单查找表或3D查找表),将以类似于三角学方法的方式来使用辅助位置测量(例如,作为与附加的“投票的”传感器的总比较,以允许在霍尔传感器发生故障的情况下继续操作)。

[0065] 下面的图以流程图的形式更正式地和/或更一般地描述了这些技术。

[0066] 图8是图示了使用三组或更多组线性霍尔传感器来估计角度的过程的实施例的流程图。在一些实施例中,此处所示的过程与图3的过程组合地实行。例如,步骤800是附加步骤(例如,除了步骤300、302和304之外),并且步骤802和804是步骤304的部分。

[0067] 在800处,从第三组件中的第三组一个或多个线性霍尔传感器接收与磁体相关联的第三测量值,其中第三组件与第一组件和第二组件处于相同平面中。例如,参见图4,其中存在具有三组线性霍尔传感器的三个IC(402a-402c)。如上所描述,在一些实施例中,IC中的一个(例如,最靠近磁体的IC)可以使用与其他两个IC不同的部件号,使得尽管与磁体的距离不同,由IC输出的信号的幅值基本相同。

[0068] 在802处,使用克拉克变换、第一测量值、第二测量值和第三测量值来生成阿尔法值、贝塔值和伽马值。例如,参见图7,其中克拉克变换700输入H1-H3值,并且输出阿尔法、贝塔和伽马值。在一些实施例中,在实行克拉克变换之前,对H1-H3信号中的一个或多个进行

缩放(如果需要的话或根据需要),使得信号具有相同的幅值。在一些实施例中,使用不同的部件号或组件类型,使得更靠近磁体的IC输出的信号具有与更远的IC输出的信号相同的幅值。

[0069] 在804处,确定与磁体相关联的角度,包括通过对阿尔法值和贝塔值实行atan2函数。例如,参见图7中的atan2函数(702),从该函数中获得 $\theta_{estimate}$ 。

[0070] 图9是图示了用以生成健康状态信号的过程的实施例的流程图。在一些实施例中,该示例过程与图3的过程组合地实行。

[0071] 在900处,从第三组件中的第三组一个或多个线性霍尔传感器接收与磁体相关联的第三测量值,其中第三组件与第一组件和第二组件处于相同平面中。例如,具有至少三组线性霍尔传感器可能是必要的,以便检测系统的健康状况在何时是差的。

[0072] 在902处,使用克拉克变换、第一测量值、第二测量值和第三测量值来生成阿尔法值、贝塔值和伽马值。如上所描述,在一些实施例中,采取步骤以确保第一测量值、第二测量值和第三测量值在它们被输入到克拉克变换之前具有样本幅值。

[0073] 在904处,生成健康状态信号,包括通过使用最大幅值偏离、针对与固定值的变化来监测与阿尔法值和贝塔值相关联的阿尔法-贝塔矢量的幅值。如上所描述,阿尔法-贝塔矢量的幅值应当保持恒定,并且幅值中的变化(例如,超出某个允许或可接受的量)指示系统中的问题。

[0074] 在906处,生成健康状态信号,包括通过使用最大伽马偏离、针对与零值的变化来监测伽马值。如上所描述,伽马值应当是零,并且如果伽马偏离于零值(例如,超出某个允许或可接受的量),则这指示系统中的问题。

[0075] 为了方便和简洁,在该图中一起示出了步骤904和906,但是这两者不必都被用在相同系统中。例如,一些实施例可以选择监测阿尔法-贝塔矢量的幅值而不是监测伽马值,或反之亦然。在一些实施例中,这两者都被用在相同系统中(例如,参见图7,其中健康状态信号取决于阿尔法-贝塔矢量的幅值以及伽马值两者)。

[0076] 图10是图示了具有四组线性霍尔传感器的伺服传感器的实施例的示图。在所示的示例中,四组线性霍尔传感器(1002a-1002b)被用来测量磁体(1000)的角度并且监测系统的健康状况。在一个示例中,比较了 $\theta_{13}$ 和 $\theta_{24}$ ,并且角度估计基于分立的霍尔传感器。如果它们全部都落在彼此的某个公差带内,则角度估计是 $\theta_{13}$ 和 $\theta_{24}$ 的平均值(例如,因为 $\theta_{13}$ 和 $\theta_{24}$ 比分立估计更准确,并且平均值应当比其自身的任一个更好)。如果三个估计彼此不同达多于某个阈值,则使用中值投票。也就是说,选择处于中间的无论什么值来作为角度估计。

[0077] 下面的图描述了使用分立霍尔传感器来测量输出轴的角度技术的各种示例。如上所描述,该技术(其使用分立霍尔传感器)可以被单独地使用或者与上面描述的线性霍尔传感器技术组合地使用。

#### [0078] 分立霍尔传感器的示例

[0079] 图11是图示了具有分立霍尔传感器的电机的实施例的示图,这些霍尔传感器被用来测量输出轴的角度。示图1100示出了系统的侧视图。在所示的示例中,电机轴(1104)与无刷三相电机相关联。无刷电机具有固定绕组,其针对电机的旋转部分中的永磁体而起作用。电机具有三个分立霍尔传感器,它们被用来测量电机轴中的转子到六个扇形(例如,其中每个扇形的形状像一片馅饼,并且在该示例中扇形具有60度的角度)中的一个内的角度。在有

刷电机的情况下,将不使用分立霍尔传感器(例如,因为代替地使用了刷)。

[0080] 示图1110示出了一表格,该表格具有每个分立霍尔传感器的输出和电机轴中的转子的对应位置,其由分立霍尔传感器输出值的特定组合所指示。自然地,分立霍尔传感器的数量(在该示例中为三个)和每个扇形的角度(在该示例中为60度)仅仅是示例性的,并且该技术对其他值起作用。

[0081] 要注意的是,该技术的一个益处是:分立霍尔传感器无论如何都被包括在系统中(例如,它们是无刷电机的部分),并且因此不需要使用附加的传感器以便测量输出轴的角度。通过重新使用现有组件,可以降低系统的大小、重量和成本。

[0082] 如示图1100中所示,输出轴(1102)经由一组齿轮(1106)耦合到电机轴(1104)。在本文中描述的示例中,齿轮具有180:1的齿轮比。这意味着,电机轴的每个(完整)旋转导致输出轴中的(完整)旋转的 $1/180$ 。所以,如果电机轴在扇形1中开始,并且输出轴以0度的角度开始,则电机轴的一个旋转将使得输出轴角度增加到 $(60\text{度})/180=1/3\text{度}$ 。电机轴在相同方向上的另一个旋转将使得输出轴角度上升另一 $1/3\text{度}$ 至 $2/3\text{度}$ ,等等。下面的图示出了转子在电机轴中的位置和输出轴的对应角度的其他列举的示例。

[0083] 图12是图示了电机轴中的转子的相关位置和输出轴的角度实施例的示图。在所示的示例中,左边的列示出了转子的位置,并且右边的列示出了输出轴的角度。如上所描述,齿轮具有180:1的齿轮比,并且电机轴的每次旋转使得输出轴以 $(60\text{度})/180=1/3\text{度}$ 而增加。如此处所示,单独地知道当前转子位置不足以确定当前输出轴角度。例如,即使知道当前转子位置是扇形2,也不知道当前输出轴角度是否应当为 $1/3\text{度}$ (参见行1202)、 $2/3\text{度}$ (参见行1204)、 $4/3\text{度}$ (参见行1206)等。

[0084] 代替地,该角度测量技术依赖于基于转子是以什么方向移动的来使先前的输出轴角度递增或递减(即,这是增量技术)。例如,要注意的是,右边的列中的所有输出轴角度都具有 $1/3\text{度}$ 的差异。如果转子向下移位一个扇形(例如,从扇形2到扇形1、从扇形3到扇形2等),则输出轴角度以 $1/3\text{度}$ 下降。如果转子向上移位一个扇形(例如,从扇形1到扇形2、从扇形2到扇形3等),则输出轴角度以 $1/3\text{度}$ 增加。

[0085] 保持先前的状态信息,该信息包括先前的转子位置和先前的输出轴角度。保持先前的转子位置,使得系统知道转子是否在相比于另一个方向(例如,向下移位一扇形)的一个方向(例如,向上移位一扇形)上旋转、以及因此通过增量使先前的输出轴角度递增还是递减。例如,如果系统仅知道当前转子位置(例如,扇形2)而不知道先前的扇形位置(例如,它不知道转子先前是在扇形1还是扇形3中),则转子的移动方向将不是已知的,并且系统将不知道通过增量使先前的输出轴角度递增还是递减。

[0086] 跟踪先前的输出轴角度,这是因为诸如此类的增量技术依赖于先前值是已知的。例如,为了使 $x_{i+1} = x_i \pm \Delta$ 起作用, $x_i$ 的值必须是已知的。因此,跟踪或保持先前的输出轴角度。

[0087] 而且,输出轴角度被初始化成某个已知值。一旦初始值(例如, $x_0$ )是已知的,就可以确定随后的值(例如, $x_1, x_2, x_3, \dots$ )。在该示例中,如果输出轴角度是已知的,则转子位置也是已知的(参见此处所示的表格),并且因此在该示例中,输出轴角度不必(例如,分离地或附加地)被初始化成已知值。自然地,在其中不能从输出轴角度(例如,单独地)确定转子

位置的实施例中,转子位置也可以被初始化成某个已知值。

[0088] 在一个示例中,通过使用机械挡块将伺服机构驱动或移动到已知位置来实行对已知值的初始化。替换地,如果该角度测量过程是备用过程,则可以使用来自主要或初始测量技术的测量值(例如,使用如上所描述的线性霍尔传感器)将转子的位置和/或输出轴的角度初始化成已知值。在一些应用(例如,飞行器应用)中,后一种技术是合期望的,这是因为它允许输出轴的角度被初始化成已知值而不需要输出轴进行移动。例如,飞行器的空气动力学控制表面由伺服机构的输出轴控制,并且输出轴不能始终改变到任意位置,因为这可能使得飞行器在飞行期间坠毁。

[0089] 回到图11,由于与齿轮(1106)相关联的两个特性,该角度测量技术产生了可接受的分辨率。首先,齿轮具有高齿轮减速比(在该示例中为180:1)。也就是说,不仅齿轮减少了从电机轴(1104)转移到输出轴(1102)的旋转的数量,而且该比率还相对高。其次,齿轮具有低反冲(在该示例中为 $\frac{1}{4}$ 度)。齿轮比和反冲(backlash)两者都影响该角度估计技术的分辨率。在该示例中,使用该技术来估计或测量的输出轴角度的分辨率为:

$$[0090] \quad \text{分辨率} = \frac{\text{扇形的角度}}{\text{齿轮减速比}} + \text{反冲} = \frac{60^\circ}{180} + \frac{1}{4}^\circ \approx 0.58^\circ。$$

[0091] 这对于对角度进行估计(至少对于感兴趣的应用)来说是可接受的分辨率,但是具有更低齿轮比和/或具有更大反冲的其他系统可能不能够以可接受的分辨率产生输出轴的角度测量值。

[0092] 下面的图以流程图的形式更正式地和/或更一般地描述了这些过程。

[0093] 图13是图示了使用多个分立霍尔传感器来估计角度的过程的实施例的流程图。在一些实施例中,该技术被用作备用角度测量技术(例如,如果上面描述的基于线性霍尔传感器的技术失败)。要注意的是,出于可靠性原因,具有与主要的角度测量技术相比依赖于不同的一组传感器的备用角度测量技术是具有吸引力的(例如,即使线性霍尔传感器不工作,分立霍尔传感器仍然可以工作)。替换地,该技术可以被用作主要的角度测量技术(例如,不与上面描述的基于线性霍尔传感器的技术进行组合)。

[0094] 在1300处,与输出轴相关联的至少输出轴角度被初始化成已知值,其中输出轴经由一组一个或多个齿轮耦合到电机轴。在图12中,例如,输出轴角度被初始化成0度的值(对应于行1200)。在一些实施例中,某个其他角度测量技术提供其对输出轴角度的估计或测量值,作为初始化期间的已知值。如上所描述,如果需要的话,转子位置也被初始化成已知值。

[0095] 在1302处,使用电机中的多个分立霍尔传感器来确定与电机轴相关联的旋转的方向。出于一般性,旋转的方向可以是第一方向(例如,电机轴中的转子上升一扇形或顺时针旋转)或者第二方向(例如,电机轴中的转子下降一扇形或逆时针旋转)。

[0096] 在1304处,使用增量值和旋转的方向来更新输出轴角度。例如,在图12中,增量值是 $\frac{1}{8}$ 度。如果该示例中的转子向上移动一扇形,则通过增加 $\frac{1}{8}$ 度来更新输出轴角度;如果转子下降一扇形,则通过减去 $\frac{1}{8}$ 度来更新输出轴角度。

[0097] 图14是图示了确定与电机轴相关联的旋转的方向的过程的实施例的流程图。在一些实施例中,图13中的步骤1302包括所示的过程。

[0098] 在1400处,从多个分立霍尔传感器接收当前转子位置,其中当前转子位置是多个扇形中的一个。例如,参见图11中的表格1110,其示出了分立霍尔传感器输出的什么组合对

应于什么扇形。

[0099] 在1402处,将当前转子位置与先前的转子位置进行比较以便确定旋转方向,其中先前的转子位置是多个扇形中与当前转子位置相邻的扇形。如上所描述,转子不可以跳过扇形,并且因此先前的转子位置(即,先前的扇形)和当前转子位置(即,当前扇形)彼此相邻。旋转的两个方向一般可以被称为第一方向和第二方向。

[0100] 图15是图示了使用增量值和与电机轴相关联的旋转的方向来更新输出轴角度的过程的实施例的流程图。在一些实施例中,图13中的步骤1304包括所示的过程。

[0101] 在1500处,评估旋转的方向。在与电机轴相关联的旋转的方向是第一方向的情况下,在1502处,以增量值使先前的输出轴角度递增,以便获得当前输出轴角度。例如,在图12中,增量值是 $\frac{1}{2}$ 度,并且向上移动一扇形使得向先前的输出轴角度增加该增量值。

[0102] 否则,如果与电机轴相关联的旋转的方向是第二方向,则在1504处,以增量值使先前的输出轴角度递减,以便获得当前输出轴角度。例如,在图12中,当转子下降一扇形时,使(先前)输出轴角度递减。

[0103] 虽然出于理解清楚的目的而比较详细地描述了前述实施例,但是本发明不限于所提供的细节。存在实现本发明的许多替换方式。所公开的实施例是说明性的而非限制性的。

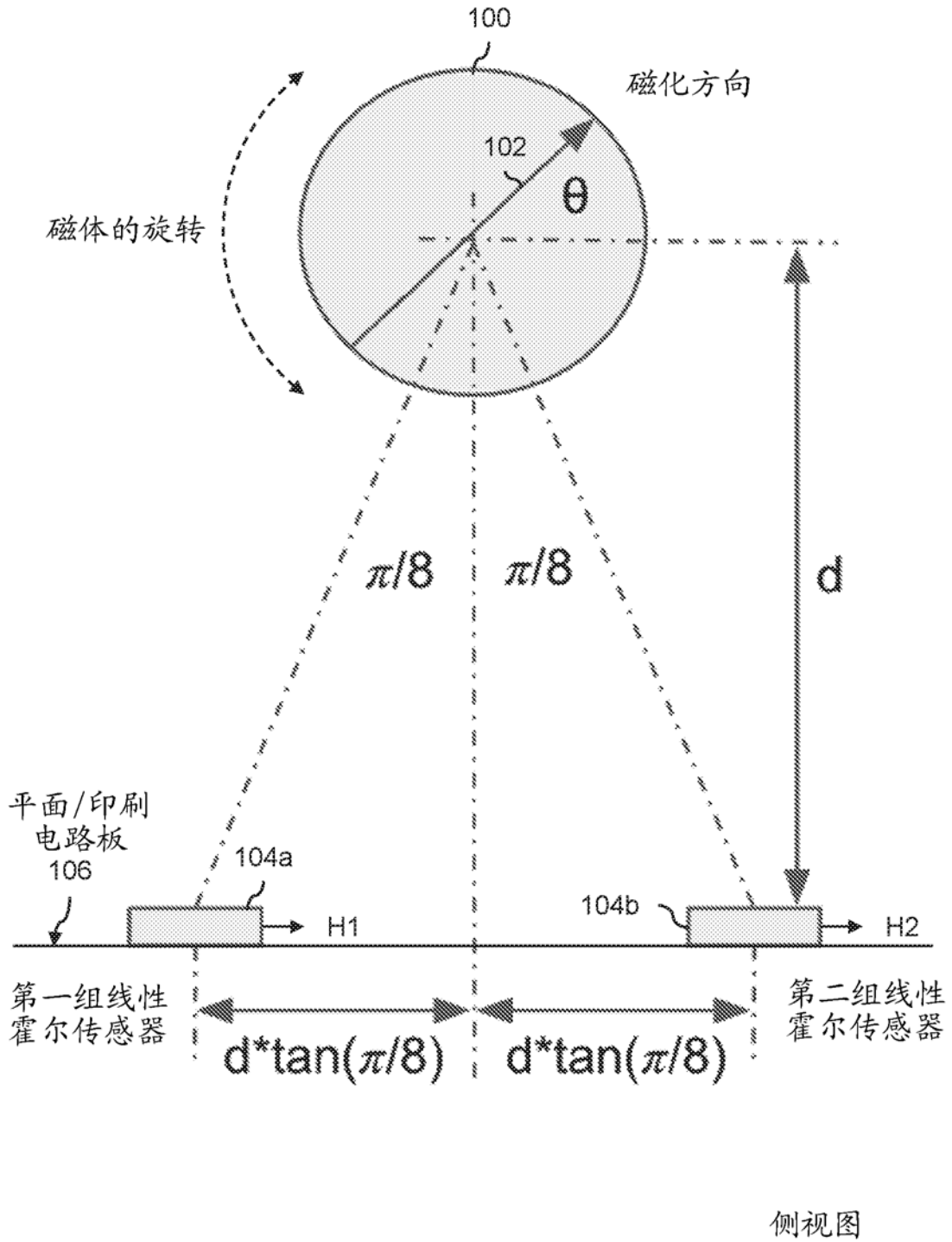


图 1A

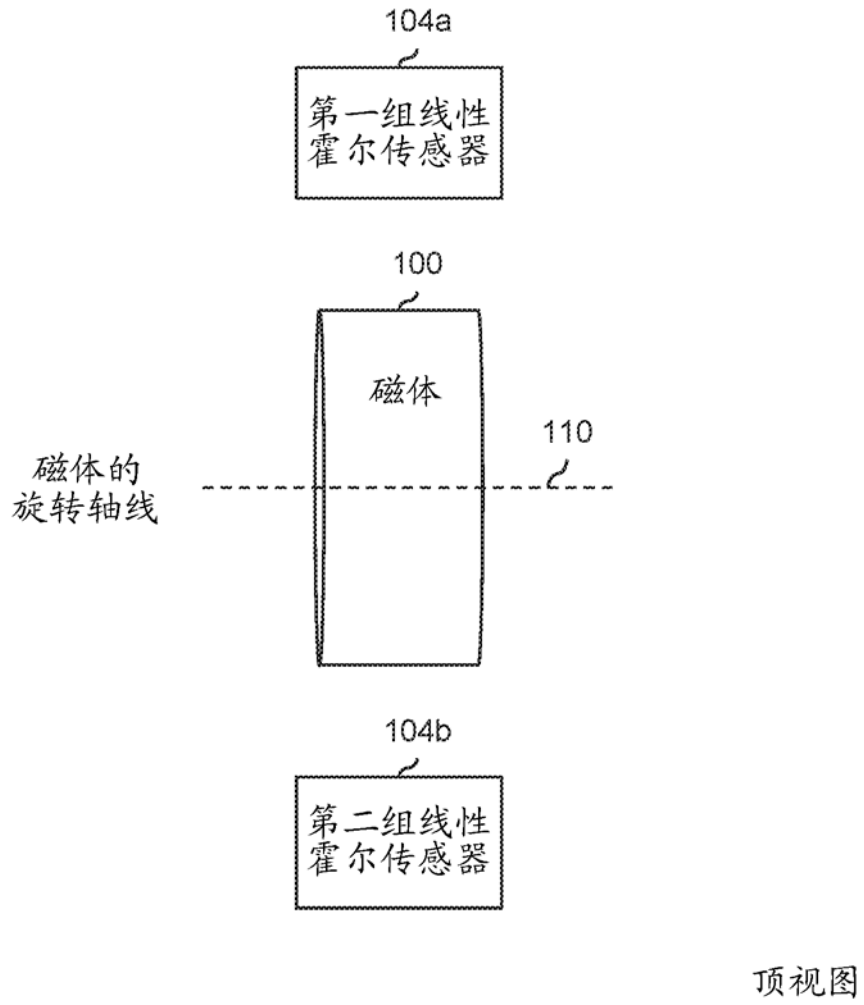
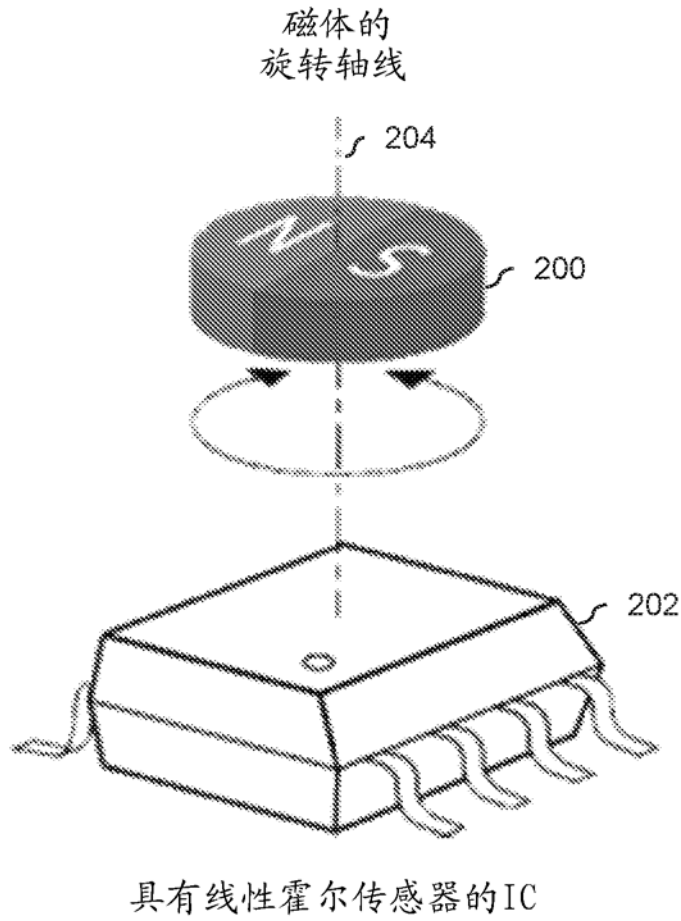


图 1B



现有技术

图 2

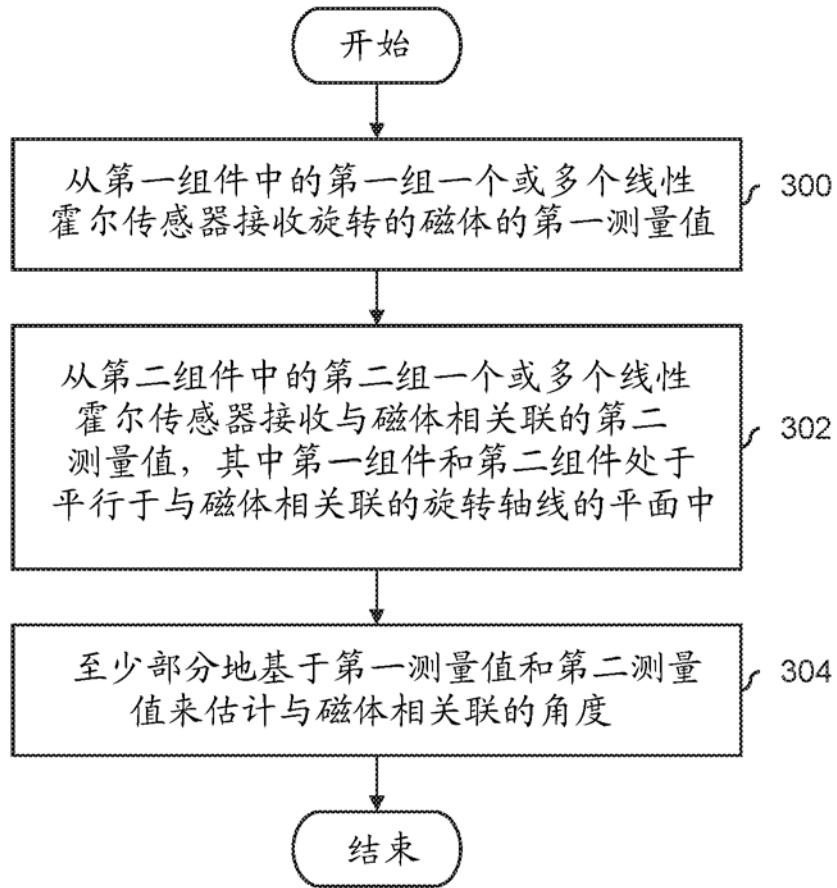


图 3

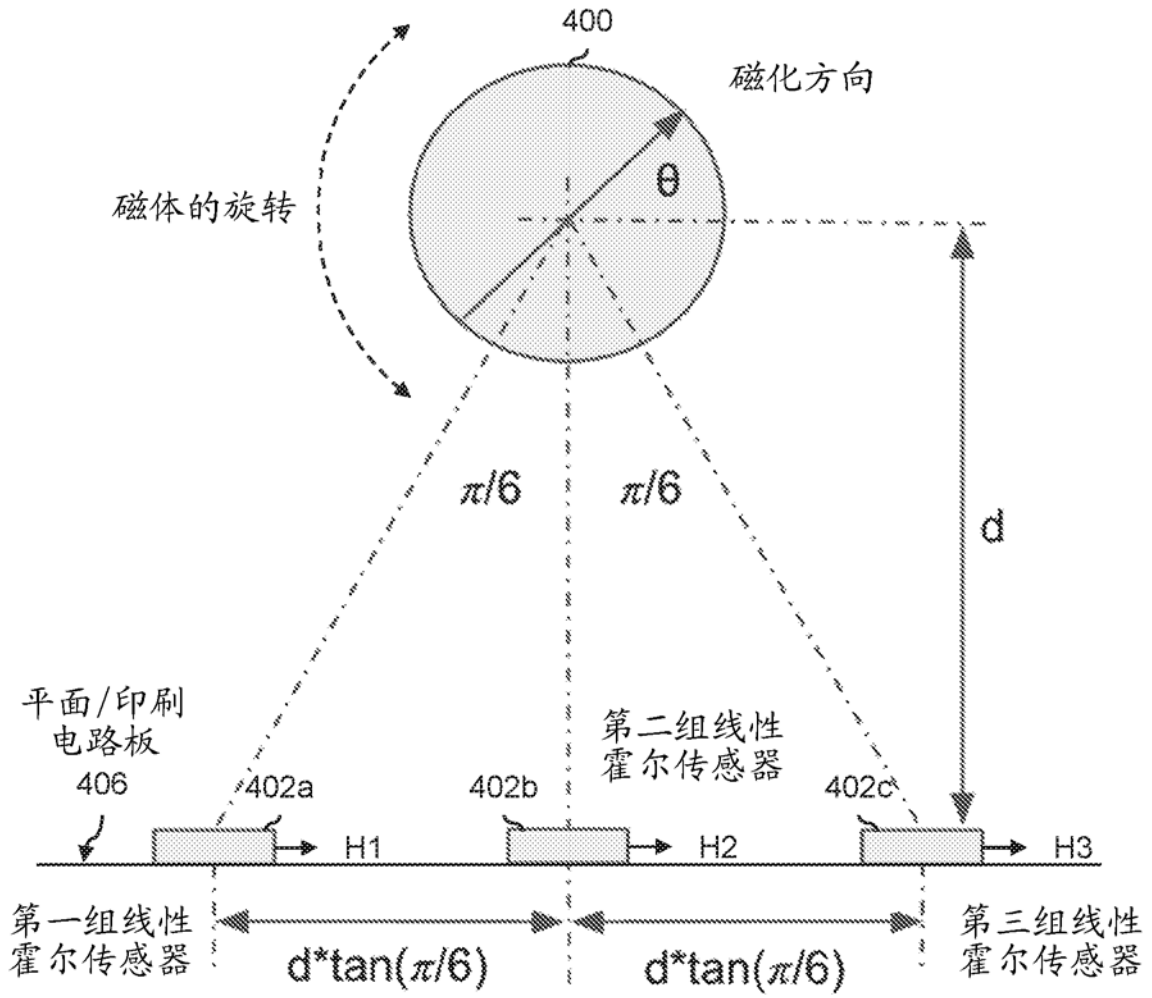


图 4

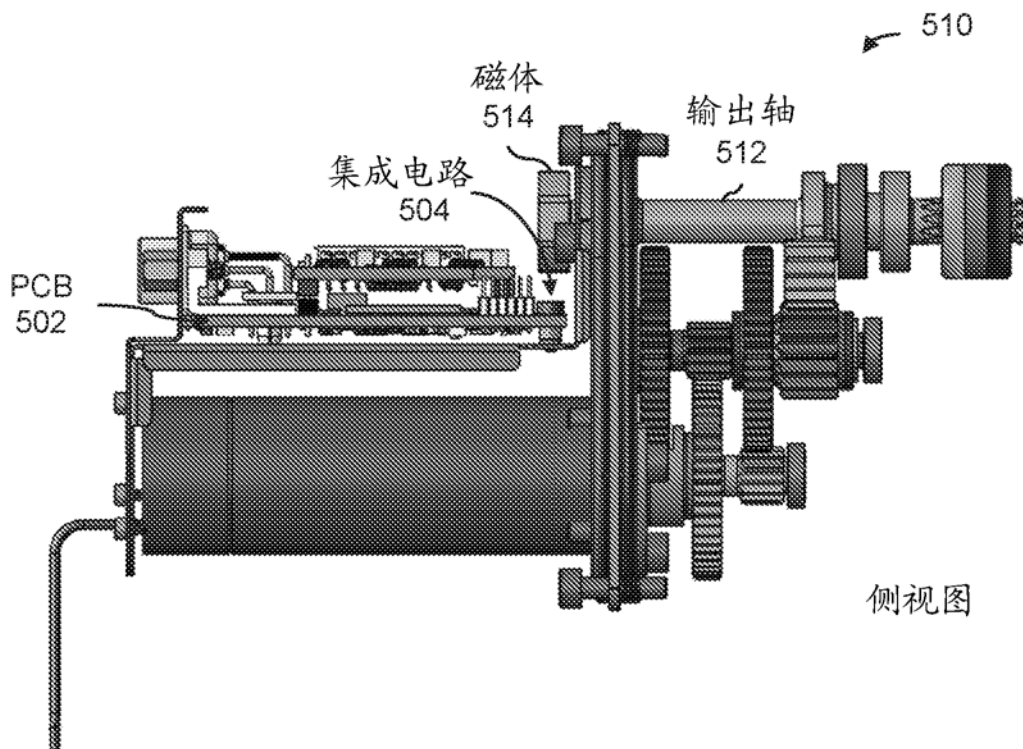
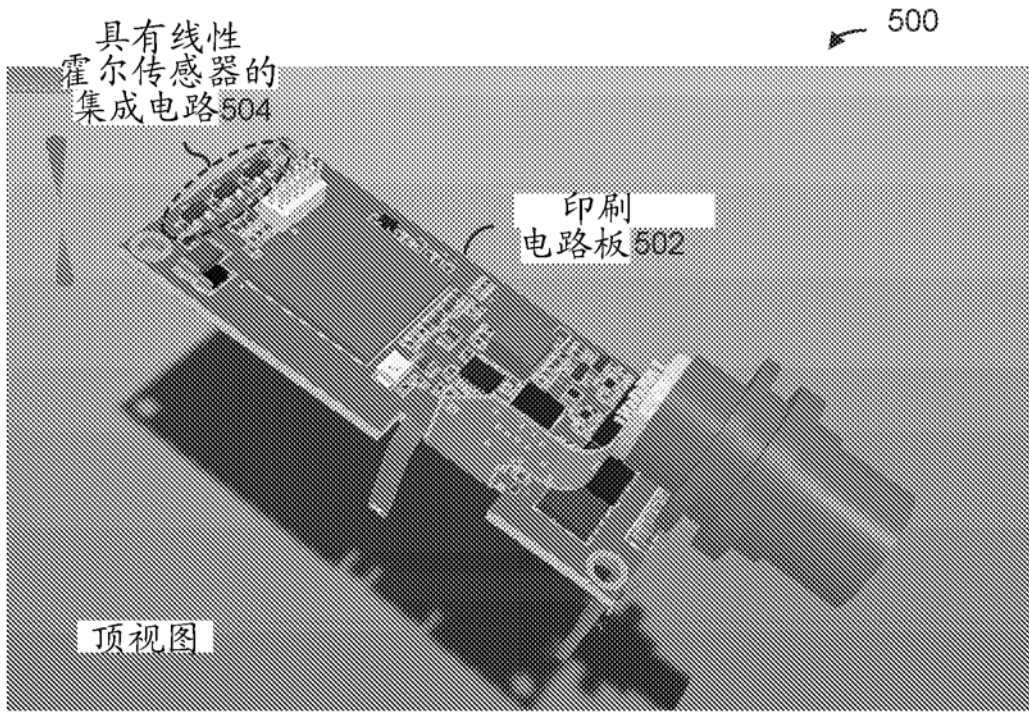


图 5

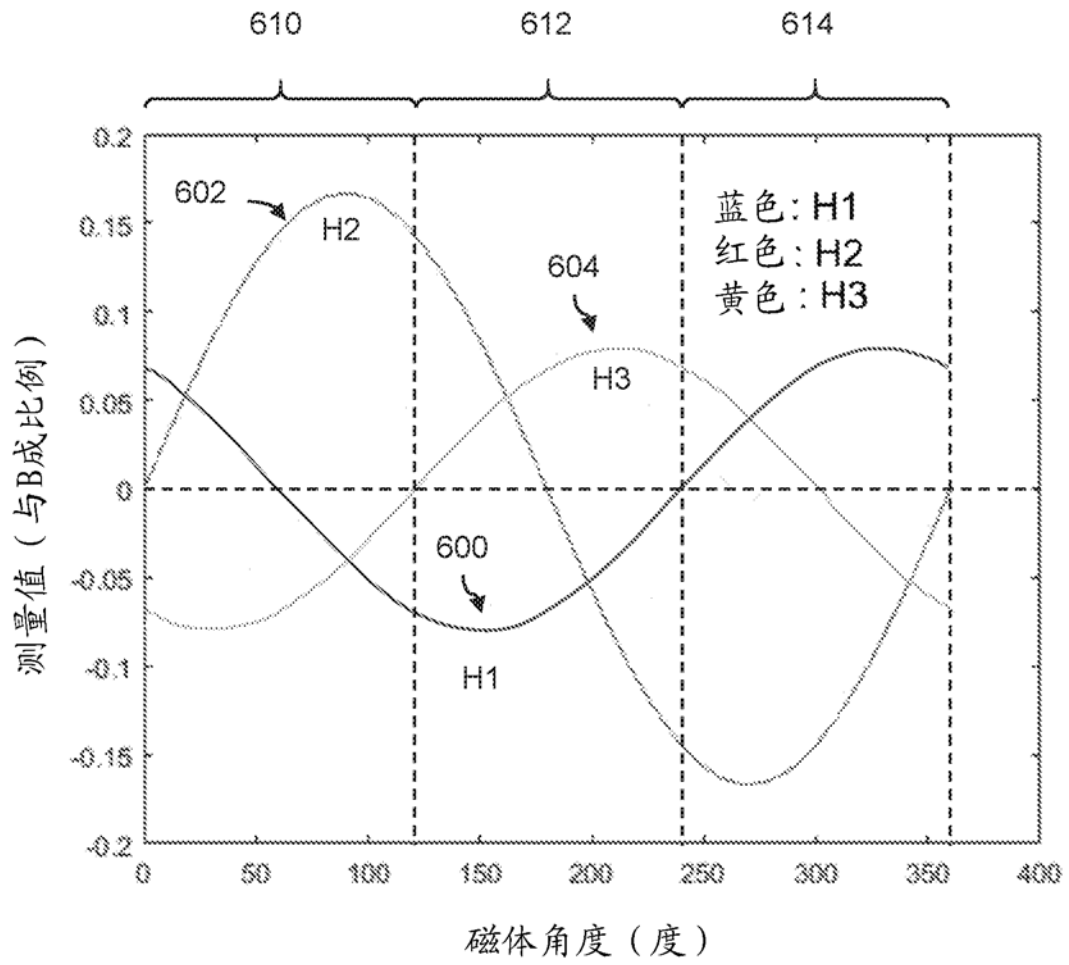


图 6

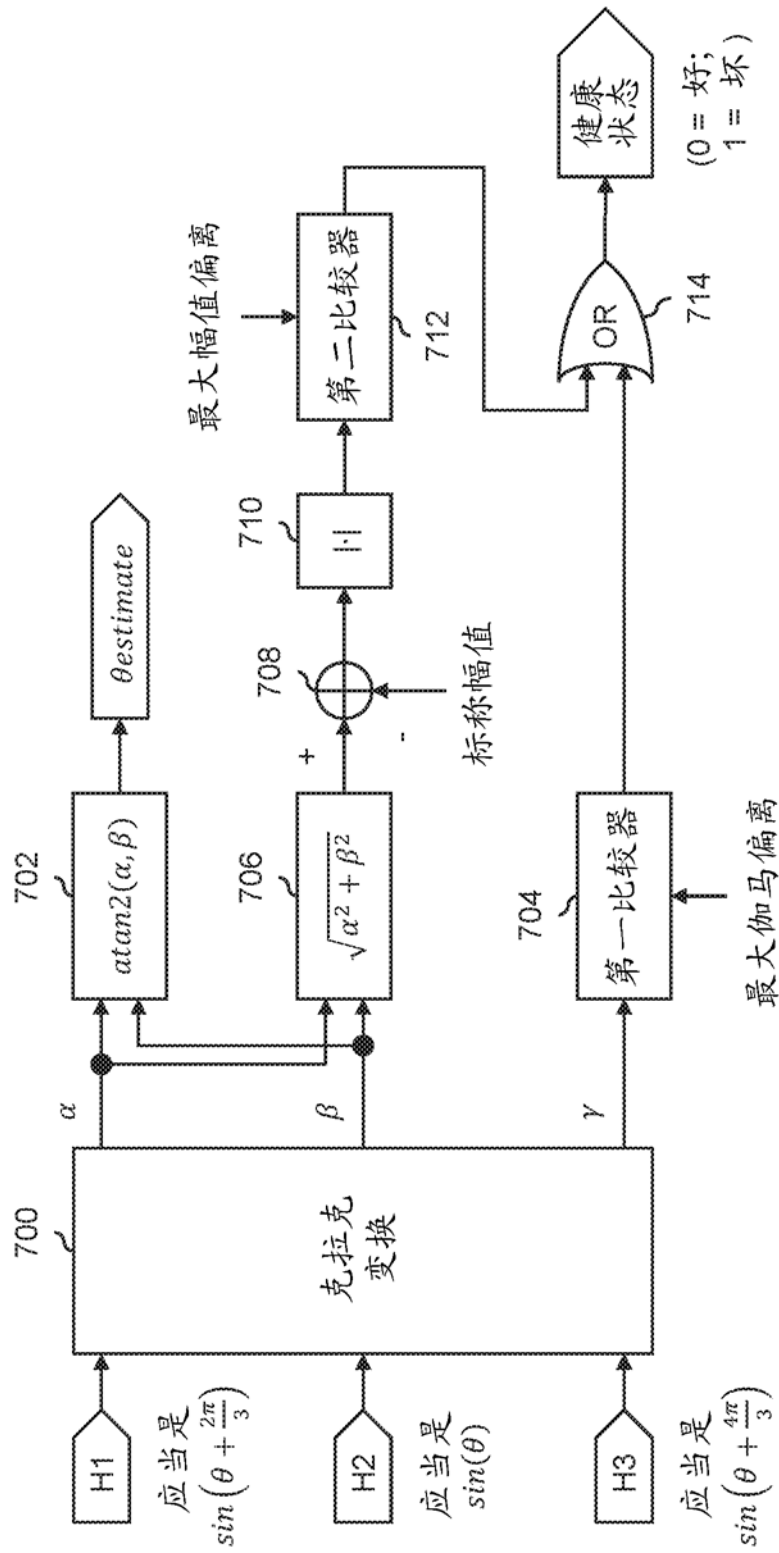


图 7

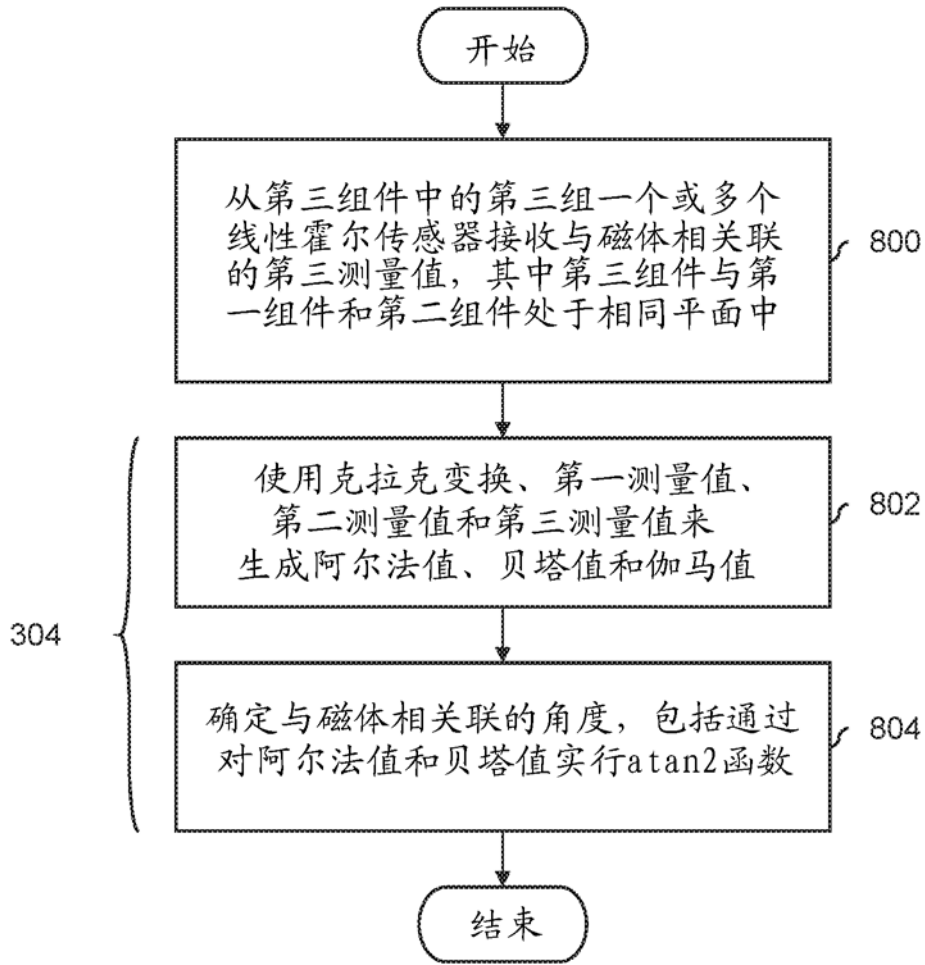


图 8

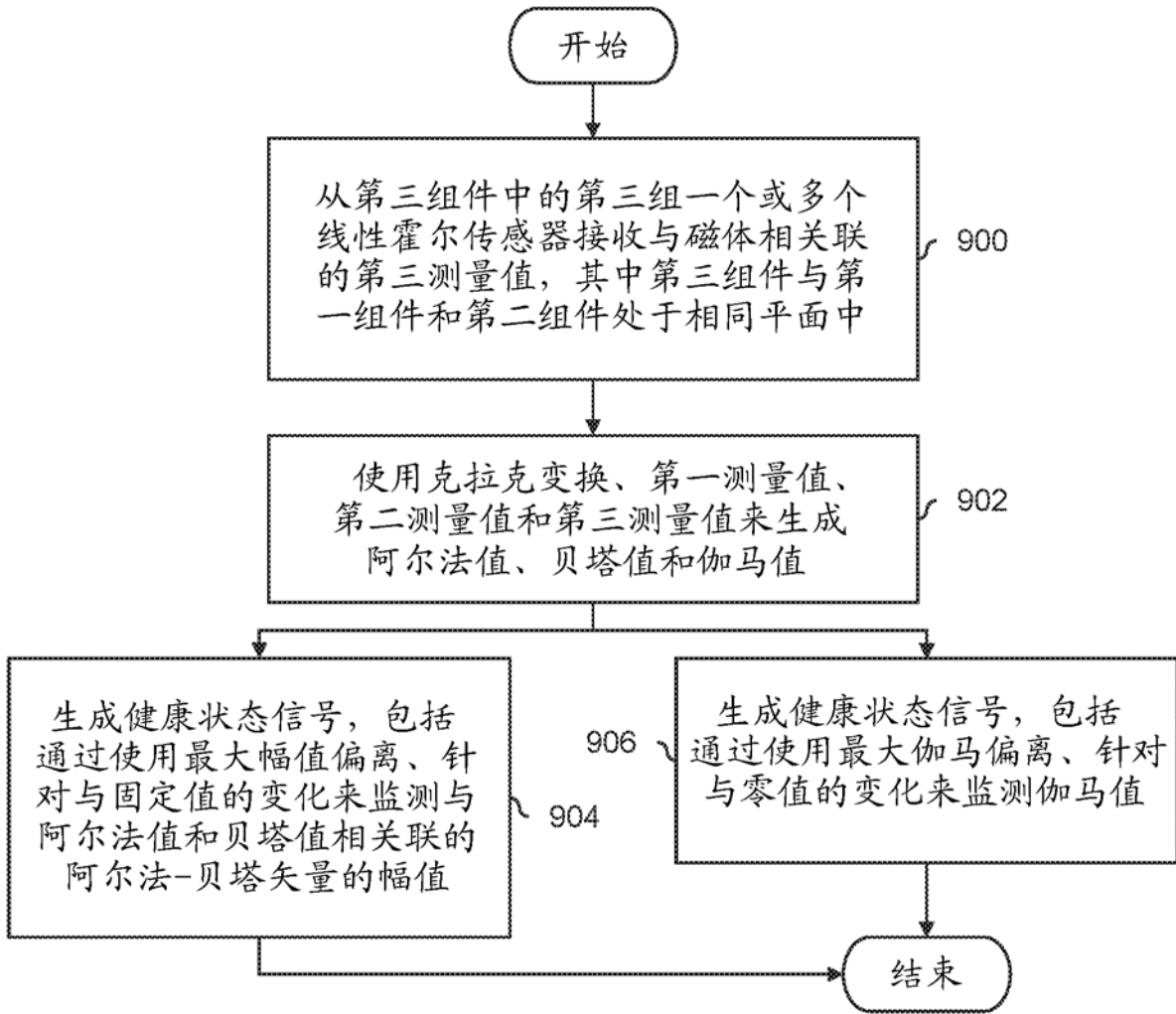


图 9

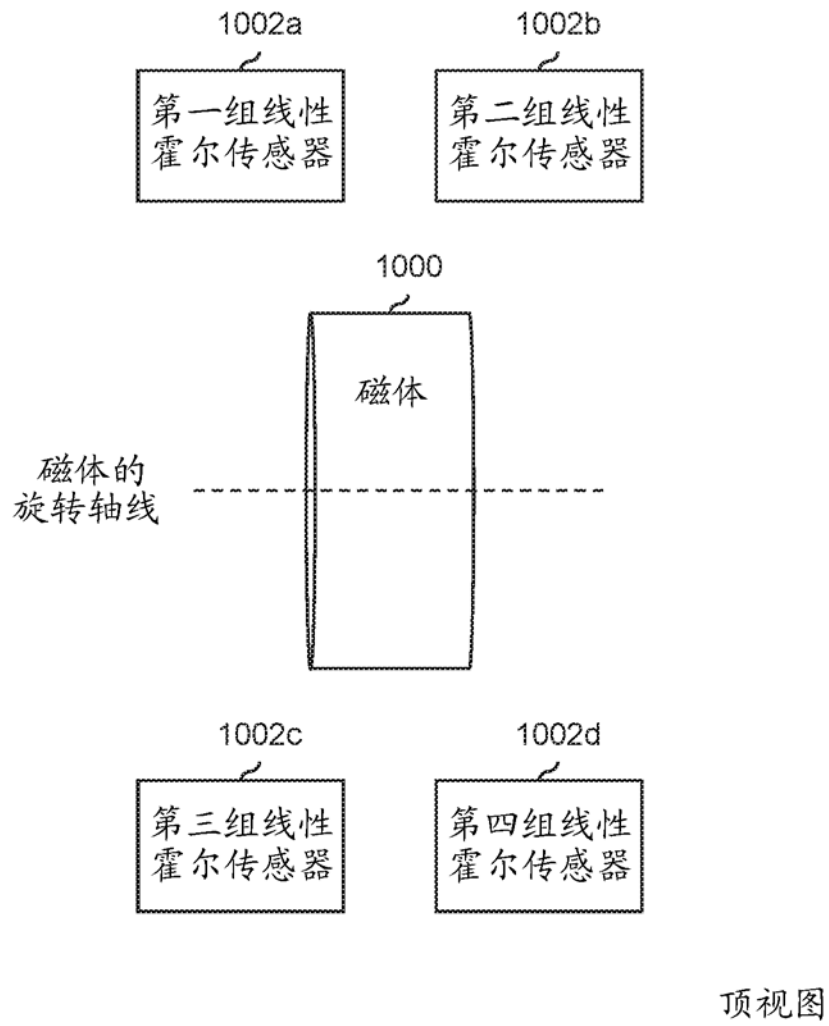
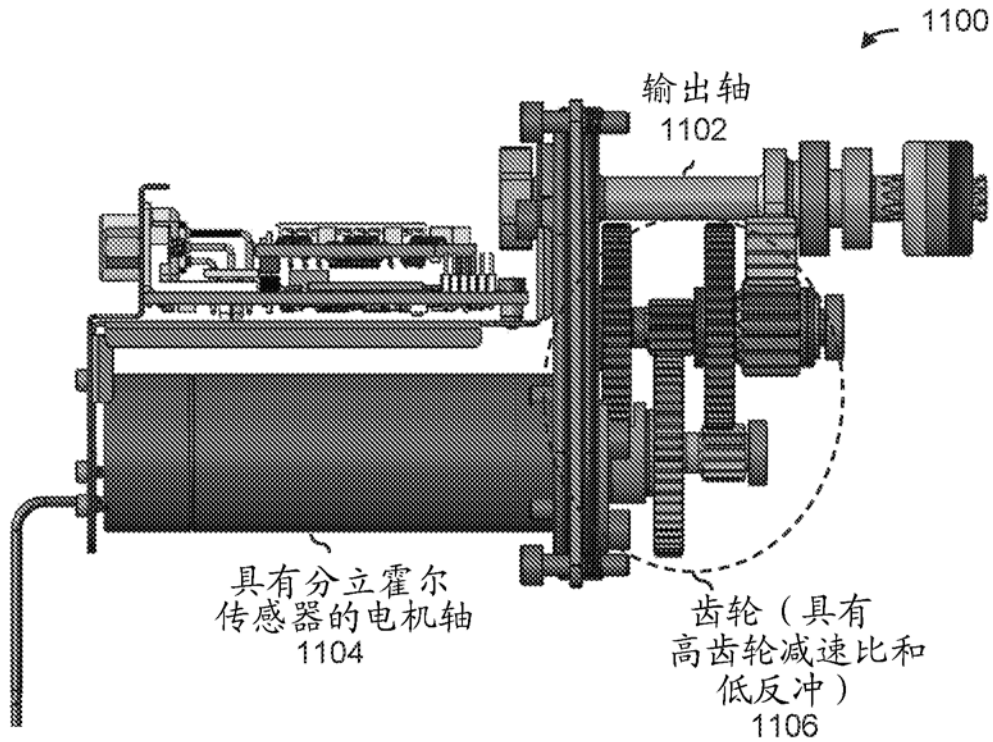


图 10



1110

第一分立霍尔传感器	第二分立霍尔传感器	第三分立霍尔传感器	转子位置 (在电机轴中)
1	0	1	扇形 1 (0° - 60°)
1	0	0	扇形 2 (60° - 120°)
1	1	0	扇形 3 (120° - 180°)
0	1	0	扇形 4 (180° - 240°)
0	1	1	扇形 5 (240° - 300°)
0	0	1	扇形 6 (300° - 360°)

图 11

180:1 齿轮比

	转子位置	输出轴角度	
1200	扇形 1 (0° - 60°)	0°	← 初始化
1202	扇形 2 (60° - 120°)	$\frac{1}{3}^\circ$	
	扇形 3 (120° - 180°)	$\frac{2}{3}^\circ$	
	扇形 4 (180° - 240°)	1°	
	扇形 5 (240° - 300°)	$1\frac{1}{3}^\circ$	
	扇形 6 (300° - 360°)	$1\frac{2}{3}^\circ$	
1204	扇形 1 (0° - 60°)	2°	
	扇形 2 (60° - 120°)	$2\frac{1}{3}^\circ$	
	扇形 3 (120° - 180°)	$2\frac{2}{3}^\circ$	
	扇形 4 (180° - 240°)	3°	
	扇形 5 (240° - 300°)	$3\frac{1}{3}^\circ$	
	扇形 6 (300° - 360°)	$3\frac{2}{3}^\circ$	
1206	扇形 1 (0° - 60°)	4°	
	扇形 2 (60° - 120°)	$4\frac{1}{3}^\circ$	
	扇形 3 (120° - 180°)	$4\frac{2}{3}^\circ$	
	扇形 4 (180° - 240°)	5°	
	扇形 5 (240° - 300°)	$5\frac{1}{3}^\circ$	
	扇形 6 (300° - 360°)	$5\frac{2}{3}^\circ$	
	⋮	⋮	
	扇形 4 (180° - 240°)	359°	
	扇形 5 (240° - 300°)	$359\frac{1}{3}^\circ$	
	扇形 6 (300° - 360°)	$359\frac{2}{3}^\circ$	

图 12

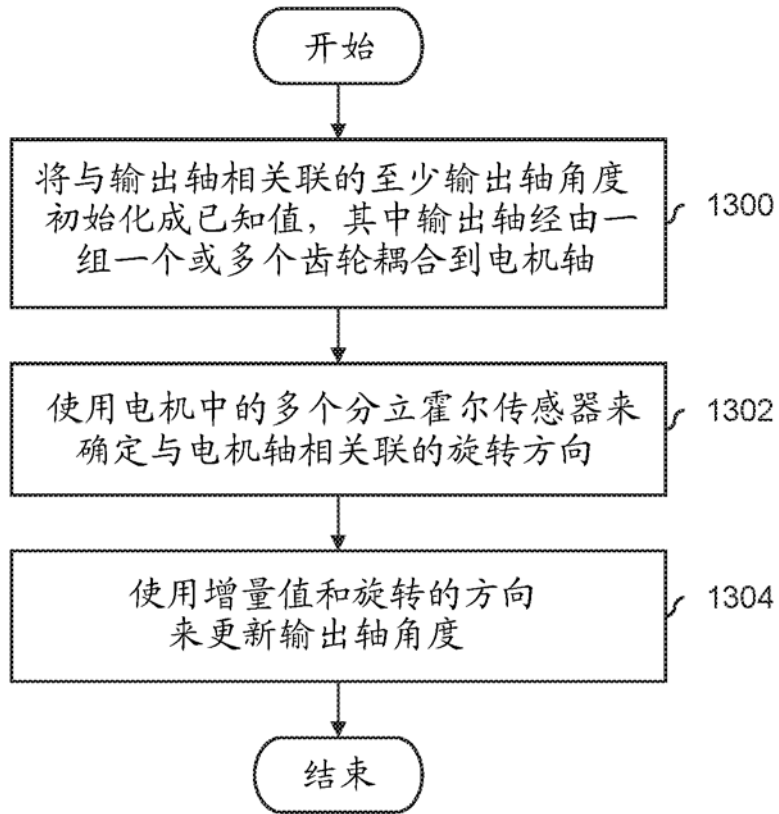


图 13

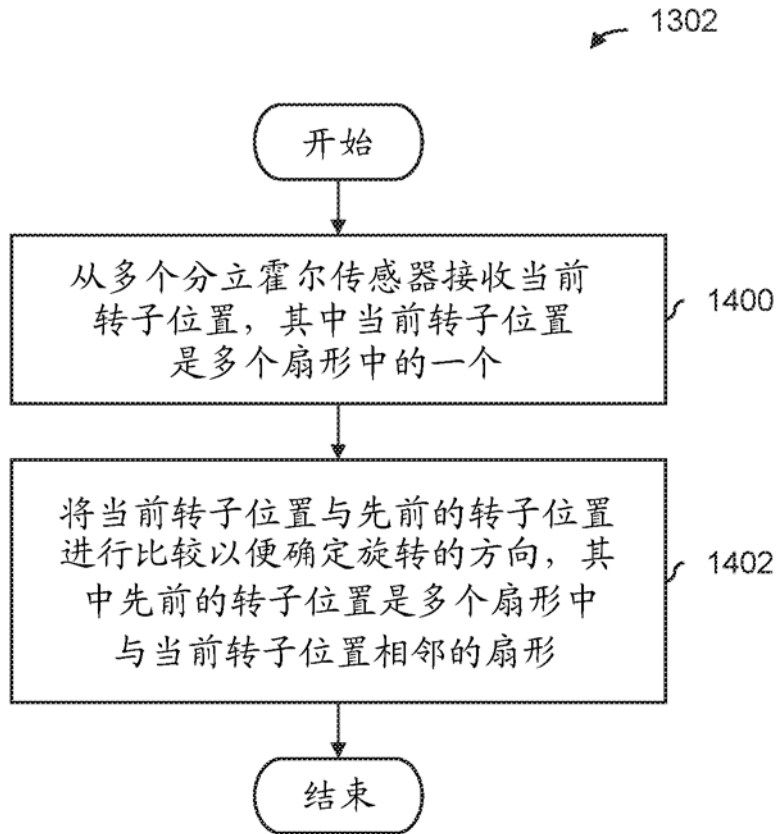


图 14

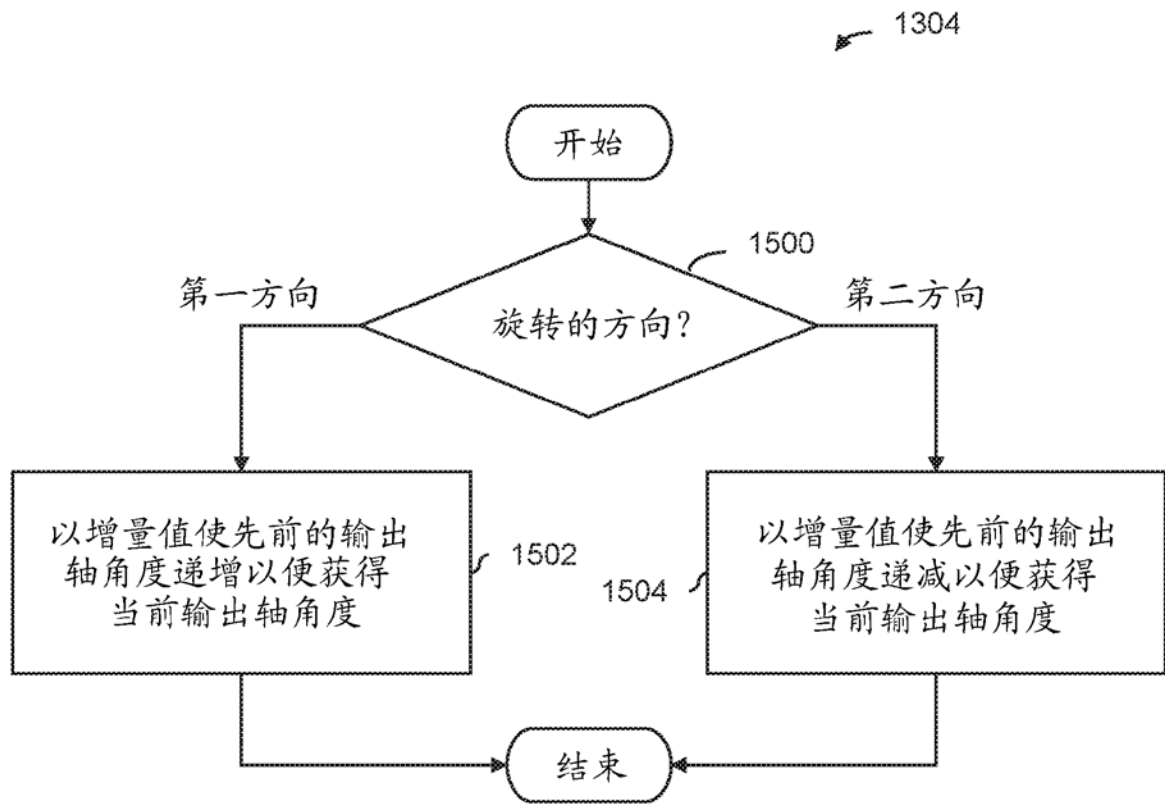


图 15