



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104781582 B

(45)授权公告日 2017.03.08

(21)申请号 201380055618.1

(22)申请日 2013.08.22

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104781582 A

(43)申请公布日 2015.07.15

(30)优先权数据  
61/692,631 2012.08.23 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2015.04.23

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/US2013/056283 2013.08.22

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02014/031905 EN 2014.02.27

(73)专利权人 安珀动力能源公司  
地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 S·R·桑德斯

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公  
司 31100

代理人 姬利永

(51)Int.Cl.

F16F 15/30(2006.01)

F03G 3/08(2006.01)

F16C 32/04(2006.01)

F16C 19/02(2006.01)

(56)对比文件

US 6794776 B1,2004.09.21,

JP S5919714 A,1984.02.01,

US 6794776 B1,2004.09.21,

CN 101127465 A,2008.02.20,

CN 201570937 U,2010.09.01,

CN 202167937 U,2012.03.14,

US 5760510 A,1998.06.02,

US 2010156219 A1,2010.06.24,

US 6710489 B1,2004.03.23,

WO 2008156836 A2,2008.12.24,

审查员 石振鹏

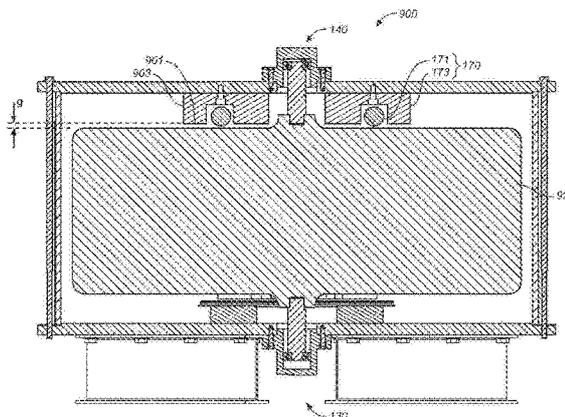
权利要求书2页 说明书10页 附图12页

(54)发明名称

用于磁性地卸载转子轴承的装置和方法

(57)摘要

描述了用于卸载转子轴承的装置和方法。该装置包括用于使转子升起的电磁体。在一个实施例中,在电磁体附近的磁场的传感器被用于控制电流以使转子升起。在另一实施例中,提供一种方法,该方法包括:使转子旋转;增大电流以使转子升起并减小电磁体和转子之间的间隙;以及随后减少电流以利用至电磁体的最小量的电功率使转子升起。



1. 一种操作飞轮组件的方法,其中所述飞轮组件包括具有垂直的旋转轴和磁性材料的转子、连接至外壳的轴承组件以及定位成使所述外壳中的所述转子升起的磁体,其中所述轴承组件限制所述转子在下部位置和上部位置之间轴向运动,其中当所述转子处于所述下部位置时所述磁体与所述转子之间的间隙大于当所述转子处于所述上部位置时所述磁体与所述转子之间的间隙,所述轴承组件包括连接至所述外壳的轴承和挡块,其中当所述轴承与所述挡块接触时,所述转子处于所述上部位置,所述方法包括:

响应于所述轴承不与所述挡块接触,向所述磁体提供足以将所述转子从所述下部位置提升到所述上部位置以使所述轴承与所述挡块接触的上临界电流;以及

响应于所述轴承与所述挡块接触,向所述磁体提供足以使所述轴承保持与所述挡块接触的下临界电流,其中所述上电流等于或大于所述下临界电流。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,进一步包括:

通过使所述转子升起至所述上部位置并且接着减小所述电流直到所述转子返回到所述下部位置来确定所述下临界电流。

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述上临界电流和所述下临界电流是预定的,并且其中所述方法进一步包括:

使用开环控制来控制至所述磁体的电流。

4. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,进一步包括:

测量所述转子的力或位移;以及

使用来自所述测量的反馈来控制至所述磁体的电流。

5. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,进一步包括:

测量所述磁体的磁性质或电性质;以及

使用来自所述测量的反馈来控制至所述磁体的电流。

6. 一种操作飞轮组件的方法,其中所述飞轮组件包括具有垂直的旋转轴和磁性材料的转子、连接至外壳的轴承组件以及定位成使所述外壳中的所述转子升起的磁体,其中所述轴承组件限制所述转子在下部位置和上部位置之间轴向运动,其中当所述转子处于所述下部位置时所述磁体与所述转子之间的间隙大于当所述转子处于所述上部位置时所述磁体与所述转子之间的间隙,所述轴承组件包括连接至所述外壳的轴承和挡块,其中当所述轴承与所述挡块接触时,所述转子处于所述上部位置,并且其中,大于上临界电流的施加至所述磁体的电流足以将所述转子从所述下部位置提升到所述上部位置,并且其中,大于下临界电流的施加至所述磁体的电流足以将所述转子维持在所述上部位置处,所述方法包括:

在所述轴承不与所述挡块接触的情况下,将至所述磁体的电流增加到足以使所述转子从所述下部位置升起至或靠近所述上部位置的所述上临界电流;

在所述轴承与所述挡块接触的情况下,将至磁体的电流减少到所述下临界电流;以及利用等于或大于所述下临界电流的至所述磁体的电流来操作所述转子。

7. 如权利要求6所述的方法,其特征在于,进一步包括:在所述转子在所述上部位置处或附近的情况下,通过减小施加到所述磁体的所述电流直到所述转子返回到所述下部位置,来确定所述下临界电流。

8. 如权利要求6所述的方法,其特征在于,所述上临界电流和所述下临界电流是预定的

并且其中所述操作转子包括施加到所述磁体的所述电流的开环控制。

9. 如权利要求6所述的方法,其特征在于,所述操作转子包括测量所述转子上的力或所述转子的位移,并且其中所述操作包括将所述测量用在所述至磁体的电流的闭环控制中。

10. 如权利要求6所述的方法,其特征在于,所述操作转子包括测量所述磁体的电性质或磁性质,并且其中所述操作包括将所述测量用在至磁体的电流的闭环控制中。

11. 如权利要求10所述的方法,其特征在于,所述测量包括从磁通量的测量和磁体绕组中的电流的测量中测量磁体电感。

12. 如权利要求10所述的方法,其特征在于,所述测量包括从磁体绕组中所施加的电压和电流的测量中确定磁体电感。

13. 一种飞轮装置,包括:

外壳;

具有转子重量和与重力对齐的旋转轴的转子,其中所述转子包括磁性材料;

磁体,所述磁体被定位成在沿着所述旋转轴的方向上对所述磁性材料施加吸引力并且抵消重力;

轴承组件,其中所述轴承组件限制所述转子在下部位置和上部位置之间轴向运动,所述下部位置在所述转子和所述磁体之间具有最大间隙,而所述上部位置在所述转子和所述磁体之间具有最小间隙,所述轴承组件包括:

耦合所述外壳和所述转子的轴承,其中所述轴承允许所述转子绕所述旋转轴旋转,以及;

连接至所述外壳的挡块,其中当所述轴承与所述挡块接触时,所述转子处于所述上部位置;

一个或多个传感器,适配成测量包括以下各项的组中的至少一个:所述磁体和所述转子之间的磁通量、所述转子的位置、以及所述转子上的力;以及

控制系统,适配成响应于所述一个或多个传感器的测量来将电流提供至所述磁体,其中所述电流大于施加足以支撑所述转子的重量的吸引力的临界电流。

14. 如权利要求13所述的飞轮装置,其特征在于,所述磁体包括永磁体。

## 用于磁性地卸载转子轴承的装置和方法

### 技术领域

[0001] 本发明一般涉及由机械轴承所支撑的转子,并且尤其涉及用于从转子的轴承卸载转子的重量的方法和装置。

### 背景技术

[0002] 转子(诸如用于存储旋转动能的这些)具有沿着它们的旋转轴线的轴,这些轴通常由滚动轴承来支撑。因此,例如,垂直取向的转子可具有下滚动轴承和上滚动轴承。对于这样的配置,下轴承通常必须被设计成支撑转子的重量。

[0003] 虽然使用滚动轴承来支撑转子是有效的,但这种轴承的典型用途需要很大的轴承。因此,例如用于能量存储的转子可具有超过1,000磅(500kg)的重量。能够支撑大重量的滚子轴承必定是大的且昂贵的。另外,如本领域已知的,滚珠轴承寿命受限于滚道疲劳,并且随着轴承负荷的立方幂反比例地缩放。

[0004] 需要可减少支撑转子的滚子轴承上的轴向负荷的装置和方法。该装置和方法应当与现有的转子设计兼容并且易于实现。该装置和方法还应当提供较长的轴承寿命。

[0005] 公开内容

[0006] 本发明通过卸载由垂直安装的转子的轴承所支撑的重量的大部分来克服现有技术转子支撑装置和方法的缺点。在一个实施例中,底部轴承上的负荷被磁性地卸载至如由与底部轴承组件串联的轴向弹簧所确定的最小的预负荷。底部轴承上的预加荷载可被设置为期望的并且实际的最小值,因此避免几乎空载的底部轴承的球滑移和任何其它缺点。在一个实施例中,通过施加超过转子的引力重量小的裕度的磁性提升力来完成预加荷载的此量。磁性提升力和转子重量之间的此小的差别构成了置于上轴承上的预负荷。本发明还包括机械系统布局以及准确地规定上轴承上的残余轴向预负荷所需的控制。

[0007] 此级别的磁力的施加具有三个重要的影响。第一,可利用轴向弹簧完全地并精确地设置底部轴承上的加载。第二,对于上和下轴承外部环(或滚道)在它们相应的孔中具有滑动配合安装的情况下,转子被提升通过小的轴向间隙距离。提供此间隙以允许在不匹配的热状况下或在归因于向心加载的泊松效应引起的转子轴向长度变化下转子和外壳的有差别的膨胀。在转子被完全地提升至由上轴承组件所限定的停止位置的情况下,定义磁性致动力的间隙被精确地设置。由此,规定的绕组电流的磁性提升力是非常准确的和可重复的。进一步,由于磁间隙处于其最小的可能设置,因而由磁性提升绕组所需的功率是最小的。第三,轴向预紧力被给予上轴承上。此预紧力由磁性提升力和转子的引力重量之间的差别所确定。

[0008] 某些实施例提供操作飞轮组件的方法,其中该飞轮组件包括具有垂直的旋转轴和磁性材料的转子、连接至外壳的机械轴承组件以及定位成使外壳中的转子升起的电磁体,其中该轴承组件允许转子在下部位置和上部位置之间轴向运动,该下部位置在转子和电磁体之间具有最大间隙,该上部位置在转子和电磁体之间具有最小间隙。该方法包括向电磁体提供足以在转子处于上部位置处的情况下操作飞轮的电流。

[0009] 某些其它实施例提供操作飞轮组件的方法,其中该飞轮组件包括具有垂直的旋转轴和磁性材料的转子、连接至外壳的机械轴承组件以及定位成使外壳中的转子升起的电磁体,其中该轴承组件允许转子在下部位置和上部位置之间轴向运动,该下部位置在转子和电磁体之间具有最大间隙,该上部位置在转子和电磁体之间具有最小间隙,并且其中大于上临界电流的施加至电磁体的电流足以将转子从下部位置提升到上部位置,并且其中大于下临界电流的施加至电磁体的电流足以将转子维持在上部位置处。该方法包括:在转子在下部位置处的情况下,将至电磁体的电流增加到足以使转子升起至或靠近上部位置的第一临界电流;在转子上部位置处或附近的情况下,将至电磁体的电流减少到足以使转子上部位置处或附近升起的第二临界电流;以及利用等于或大于第二临界电流的至电磁体的电流来操作转子。

[0010] 某些实施例提供飞轮装置,包括:外壳;转子;轴承;磁体。该转子具有转子重量和与重力对齐的旋转轴,并且包括磁性材料。该磁体包括电磁体,并且被定位成在沿着旋转轴的方向上对磁性材料施加吸引力并且抵消重力。耦合外壳和转子的轴承允许转子绕旋转轴进行旋转以及允许转子相对于磁体进行轴向位移。飞轮装置还包括:磁通量传感器,适配成测量磁体和转子之间的磁通量;以及控制系统,适配成响应于所测得的磁通量来将电流提供至电磁体,其中该电流大于施加足以支撑转子的重量的吸引力的临界电流。

[0011] 一个实施例通过磁性地提升转子一预定的轴向位移来卸载下转子轴承。此位移由两个轴承外部滚道(环)中的每一个在它们相应的轴承座中的轴隙的范围所设置,其中滑动配合被用于这些轴承中的每一个。此提升位移将底部轴承上的轴向加载减少到允许适当的滚子轴承功能的最小的预负荷。作为示例,轴向预负荷是轴承额定动态负载能力的最小部分(例如,0.001到0.10)。

[0012] 另一实施例提供用于卸载下转子轴承的装置。该装置包括外壳、包括磁性材料并具有上轴和下轴的转子、附连至下轴和外壳的下滚子轴承、以及附连至外壳的提升绕组。当电流被提供至提升绕组时,逆着重力提升转子从而使得下滚子轴承上的负荷被减小为小于转子的重量的值。

[0013] 又一实施例包括与下轴承的外部滚道串联的轴向弹簧,当利用超过转子的重量的力磁性地提升转子时,该轴向弹簧精确地设置底部轴承上的轴向预负荷。

[0014] 一个实施例包括与上外部滚道和下外部滚道中的一者或两者串联的力感测元件(例如,应变仪)以被用于通过对磁性提升绕组电流的校准或反馈控制来精确地设置轴承预负荷。

[0015] 另一实施例包括磁场感测元件(诸如霍尔效应感测器)以感测卸载电磁体通量密度。如将要描述的,磁力随着间隙磁通密度的平方非常准确地缩放。由此,可通过对间隙磁通密度的测量来精确地评估卸载器电磁体力。此所测得的磁场量可被方便地用在卸载器控制中以精确地设置上轴承上的轴向预紧力(preload force)。

[0016] 又一实施例在控制系统中结合所测得的间隙磁场和绕组电流的使用以精确地设置上轴承轴向预紧力而不使用任何直接力传感器。

[0017] 这些特征连同从下面的详细描述中对于本领域技术人员而言将变得显而易见的各种辅助规定和特征一起由本发明的装置和方法、仅以示例的方式参照附图所示的其优选的实施例来获得,其中:

[0018] 附图简述

[0019] 图1是本发明的第一实施例飞轮装置的示意性截面图；

[0020] 图2A和2B是第一实施例上轴承组件的示意性截面图，其中图2A示出了在最低位置中的转子并且图2B示出了在最高位置中的转子；

[0021] 图3是第一实施例下轴承组件的示意性截面图；

[0022] 图4是示出了对于间隙的两个值作为电磁体电流的函数的提升力的曲线图；

[0023] 图5是示出了当电流在飞轮装置的操作期间被改变时的提升力的曲线图；

[0024] 图6是第二实施例上轴承组件的示意性截面图；

[0025] 图7是第二实施例下轴承组件的示意性截面图；

[0026] 图8是示出了本发明的控制算法的一个实施例的控制系统示图；

[0027] 图9是本发明的第二实施例飞轮装置的示意性截面图；

[0028] 图10是示出了对于间隙的两个值作为磁通匝连数(flux linkage)的函数的电流的曲线图；

[0029] 图11是示出了本发明的控制算法的第二实施例的控制系统示图；

[0030] 图12是具有第二实施例磁体的本发明的飞轮装置的示意性截面图；以及

[0031] 图13是具有第三实施例磁体的本发明的飞轮装置的示意性截面图。

[0032] 附图标记或标签在附图中用来指示其中所示的某些部件、方面或特征，并且不止一个附图所通用的附图标记和标签指示其中所示的相同的部件、方面或特征。

### 具体实施方式

[0033] 下面的描述详细地描述了提供支撑转子的常规滚子轴承的磁性卸载的装置和方法的特定实施例。转子轴承的卸载减少了运转摩擦并且还增加了轴承寿命。因此，对于在飞轮能量存储系统中使用转子的示例，创造性的卸载可将运转摩擦减少到可以忽略的级别并且延长轴承寿命若干数量级。另外，创造性的结构和方法为处于其最小的可能设置的转子提供磁性支撑从而使得由磁性提升绕组所需的功率是最小的。

[0034] 图1是第一实施例飞轮装置100的示意性截面图，该飞轮装置100包括外壳110、具有旋转轴CL的转子120以及用于支撑转子和允许旋转的轴承，并且该轴承可包括下轴承组件130和上轴承组件140。飞轮装置100还包括磁体170；用于从转子120添加或移除电能的电能部件150；以及控制系统160。飞轮装置100和轴承组件130和140通常关于中心线CL对称。如随后所讨论的，轴承组件130和140支撑转子120同时允许由箭头A所指示的该转子的某种轴向运动，并且其中轴向运动的全范围被指示为 $\delta$ 。

[0035] 如随后所讨论的，磁体170包括电磁体，该电磁体在本文中非限制性地也被称为“卸载器”或“卸载器电磁体”，其可被操作以在转子120上提供力，该力与万有引力相反。当诸如通过由控制系统160所施加的电流来致动磁体170的电磁体时，转子可向上移动例如指示的距离 $\delta$ 。在一个实施例中，最小的距离 $\delta$ 可以是例如，从0.25mm(0.01英寸)到1.0mm(0.04英寸)以允许预期的有差别的膨胀。

[0036] 转子120的支撑的一部分因此被转移至磁体170，并因此减少轴承组件130上的向下力的量。相对于必须支撑整个转子重量的轴承，减少的轴承加载在可使用较小、较轻的轴承和/或可增加轴承寿命方面是有益的。

[0037] 外壳110包括外壳主体111,该外壳主体111围绕转子120并且可例如被排空空气以减少来自自旋转子的摩擦损失。外壳110还包括磁体170的部件,包括但不限于由磁性材料形成或包括磁性材料的上部外壳构件173以及提升绕组171。上部外壳构件173的磁性材料可以是(例如而非限制)钢。在替代性实施例中,磁体170位于转子120之上并且与外壳110分开。磁体170因此被布置成在转子120上提供提升力。

[0038] 如随后所讨论的,外壳110和/或磁体170的各实施例可包括(例如而非限制)感测元件以确定磁体170和/或转子120的操作的状态。

[0039] 转子120具有由磁性材料形成或包括磁性材料的转子主体121、下轴123和上轴125。在一个实施例中,例如而非限制,转子120由磁性材料(诸如钢)形成并且具有从45kg(100lbs.)到27,000kg(60,000lbs.)的重量W。

[0040] 电能部件150包括但不限于电动发电机,该电动发电机包括附连至下轴123的转子151和附连至外壳111的定子153。电能部件150在本领域中是众所周知的并且被用于将电能转换成转子120中的旋转能。

[0041] 一般而言,轴承组件130、140为外壳110内的转子120提供旋转支撑。图1中所示的组件130和140是通用的,并且更具体地,如随后所讨论的,下轴承组件130包括连接下轴123和外壳110的滚子轴承,并且上轴承组件140包括连接上轴125和外壳的滚子轴承。此外,轴承组件130和/或140的各实施例可包括,例如而非限制,允许轴承上的轴向运动和力的弹簧、限制轴承的轴向运动的挡块(stop)和/或用于测量轴承上的轴向力或位移的传感器。转子的轴向增长(或衰减)和转子120的小的轴向位移可由弹簧、挡块和磁体的组合来提供或减轻以在飞轮组件100的操作期间提供多达约1毫米的 $\delta$ 的范围。

[0042] 一般而言,对于轴承组件130、140的最低要求是它们包括至少一组轴承并且允许转子120的某种轴向运动。图2A和2B是第一实施例上轴承组件240的示意性截面图,其中图2A示出了在最低位置中的转子120并且图2B示出了在最高位置中的转子。上轴承组件240一般类似于轴承组件130和140,除了如下面所明确讨论的。

[0043] 如图2A中所示,上轴承组件240支撑外壳110中的上轴125。更具体地,上轴承组件240包括轴承241,该轴承241包括轴承内部部分243、球轴承245和轴承外部部分247。轴承241的内部部分例如使得轴承内部部分243被压配合到上轴125并且轴承外部部分247被连接到外壳110而被连接至转子120。上轴承组件240还包括连接外壳110和轴承外部部分241的上部轴向弹簧244以及被指示为挡块201的刚性块,该挡块201被连接至外壳110并且限制弹簧运动。弹簧244可以是,例如而非限制,波形或Bellville垫圈并且可被配置成在转子120上提供向下力。

[0044] 在图2A的最低转子位置中,在轴承外部部分241和位于外壳110中的挡块之间存在尺寸 $\delta$ 的间隙。在图2B的最高转子位置中,轴承241被迫向上直到轴承外部部分241接触挡块201。上轴承组件240因此允许转子120旋转并且提供受挡块201的尺寸限制的轴向位移。

[0045] 图3是第一实施例下轴承组件330的示意性截面图。下轴承组件330一般类似于轴承组件130、140和240,除了如下面所明确讨论的。

[0046] 如图3中所示,下轴承组件330支撑外壳110中的下轴123。更具体地,下轴承组件330包括轴承341,该轴承341包括轴承内部部分333、球轴承335和轴承外部部分337。轴承331的内部部分例如使得内部轴承部分333被压配合到下轴123并且轴承外部部分337被连

接到外壳110而被连接至转子120。下轴承组件330还包括连接外壳110和轴承外部部分331的下部轴向弹簧332以及被连接至外壳110并且限制弹簧运动的可选的刚性挡块301。弹簧332可以是,例如而非限制,波形或Bellville垫圈并且可被配置成在转子120上提供向上的力。下轴承331可类似于上轴承341,或在构造或承载能力方面可以是不同的。

[0047] 由磁体170施加在转子120上的提升力由间隙 $g$ 所确定,该间隙 $g$ 是磁体的磁极和转子之间的距离。从图1中显而易见,取决于转子和磁体几何结构,间隙 $g$ 随着轴向位移 $\delta$ 而变化。因此,当转子移动到最朝上的位置时, $g$ 是最小的,并且当转子向下移动距离 $\delta$ 时, $g$ 处于最大距离。另外,取决于弹簧设计,随着间隙 $g$ 改变,来自弹簧(诸如下部轴向弹簧332和上部轴向弹簧244)的运动的转子120上的力同样可改变。

[0048] 轴承241和331的外部部分被安装有滑动配合,该滑动配合具有 $2.5\mu\text{m}$ (0.0001英寸)到 $25\mu\text{m}$ (0.001英寸)的径向间隙。轴隙 $\delta$ 仅被提供至允许例如归因于不匹配的热状况或归因于由于向心加载产生的泊松效应引起的转子轴向长度变化的,转子相对于外壳的必要的有差别的长度扩展。

[0049] 当磁体170被致动时,这按规定仅在一端即底部处是需要的。在一个实施例中,滑动配合被提供给轴承241和331两者以能够在磁体170是活跃的(利用底部弹簧331和滑动配合)或不活跃的(需要顶部弹簧和滑动配合)时利用轴向弹簧244和332设置轴承力。

[0050] 控制系统160可被用于将电流 $I$ 提供至提升绕组171。具体地,当电流 $I$ 被施加至提升绕组171时,所得的磁场产生对转子主体121中的磁性材料的吸引,该吸引与转子主体的重力相反。因此,例如,在提升绕组171中没有任何电流的情况下,在轴承组件130和140上的组合的轴承力是转子的重量。在电流施加至提升绕组171的情况下,在轴承组件130和140上的组合轴承力是转子重量减去转子120对提升绕组的吸引力。

[0051] 下面简化的分析提供对在飞轮组件100中并且尤其在轴承组件130和140上所涉及的力的一些理解。

[0052] 转子120上的力包括转子的向下的重量 $W$ 、由上轴承141所施加的向下的力 $f_{UB}$ 、由下轴承弹簧141所施加的向上的力 $f_{LB}$ 、以及由磁体170所引起的向上的提升力(其可被写为 $F$ )的组合。

[0053] 在轴承241和331上的力因此是 $W$ 和 $F$ 、以及由轴向弹簧244和332和由轴承的运动所遇到的任何挡块(诸如挡块201和/或挡块301)所强加的力的组合。通常,轴向弹簧244和332两者都可被提供有少量的轴向预加荷载,诸如转子重量 $W$ 的最小部分(例如,0.001到0.10)。尤其重要的是转子120不接触任何固定部件。另外,如下所讨论的,当转子120接近磁体170时,在固定的磁体电流下,吸引力增加,且期望某种方法来固定最小的磁体-转子间距。

[0054] 由于下轴承力通过提升力 $F$ 的增加而减少,因而看出提升力的施加可极大地减小在下轴承组件130的轴承上的力。在某些实施例中,如下所讨论的,调节力 $F$ 以平衡或几乎平衡重量 $W$ ,并且上轴承力和下轴承力变得几乎相同,并且可具有等于上面所提到的少量的预加荷载的值。

[0055] 基于使用高磁导率线性磁性材料的简化分析示出了 $F$ 的值随着电流 $I$ 的平方而增大并且随着间隙 $g$ 的平方而减小。因此,例如而非限制,图1的磁体170的电磁体部件的理想化模型在图4中被示为曲线图400,该曲线图400示出了对于间隙 $g$ 的两个值,作为电磁体电流 $I$ 的函数的提升力 $F$ 。第一曲线401是针对 $g$ 的最大值( $g = g_{\text{最大}}$ )而计算的,即,其中转子120

处于最低位置,如例如在图2A中所示,并且第二曲线403是针对 $g$ 的最小值( $g = g_{\text{最小}}$ )而计算的,即其中转子处于最高位置,如例如在图2B中所示。在转子120上的磁体170的提升力 $F$ 通过 $F = k(g) * I^2$ 来近似,其中 $F$ 的方向在图1中是向上, $I$ 是提供至提升绕组171的电流,并且 $k(g)$ 是取决于间隙 $g$ 的常数。更具体地, $g$ 的减小将增大 $k(g)$ ,即,随着转子120接近电磁体170,吸引变得更大。利用具有无限高的磁导率的理想化磁性材料, $k(g)$ 将呈现平方反比依赖性。

[0056] 在没有电流( $I = 0$ )的情况下,转子120处于最低位置,并且曲线401提供了作为 $I$ 的函数的提升力 $F$ 的值。当电流足以将转子提升到最高位置时,提升力的值增加到由曲线403所提供的值。转子120因此具有取决于电流的两个稳定的机械位置。

[0057] 分析飞轮装置100的动力学的一种方式如图5中进一步被示为曲线图410,该曲线图410示出了当电流 $I$ 在飞轮装置100的操作期间被改变时的提升力 $F$ 。从静止开始,间隙是最大值( $g = g_{\text{最大}}$ )并且对磁体170的电流施加沿着曲线401增加提升力 $F$ ,示为曲线部分411和412。在某个第一或上临界电流,被指示为 $I_1$ 处,提升力 $F$ 克服转子120上的重量 $W$ 和其它力,诸如弹簧预加荷载,如由曲线401的点413所指示的。在此点处,转子120的轴向位置是不稳定的且电流中的任何轻微增加或转子的轻微向上轴向运动将导致转子上升,将 $g$ 减小到 $g_{\text{最小}}$ 的值,如由终止于曲线403上的点415处的曲线部分414所指示。注意在此较小的间隙 $g$ 处,提升力 $F$ 已增加到远大于重量 $W$ 的值,迫使转子到图2A的最高位置。在临界点处的不稳定性是由于吸引的磁体组件的大的负刚度所造成的。

[0058] 在转子沿着曲线403操作的情况下,可减小电流 $I$ ,如由曲线部分416所示。在某个第二、下临界电流(被指示为 $I_2$ )处,提升力在曲线403上的点417处再次平衡在转子120上的力,并且转子的位置下降到 $g_{\text{最小}}$ 的间隙并且转子的操作沿着曲线401。提升力现在不足以使转子升起,并且电流的增加沿着部分412移动回到点413。电流力示图因此证明了随着电流变化的滞后。

[0059] 特定实施例操作创造性的飞轮组件以减小轴承上的负荷,并且特别是下轴承组件130中的轴承上的负荷。减小的操作负载导致减小的轴承尺寸和成本以及增加的寿命。

[0060] 通常,由此看出磁性提升力因此伴随有实质的负刚度。当此提升力大致匹配转子重量,并因此远超过被动机械弹簧预负荷时,伴随的负刚度同样远超过预加荷载弹簧的被动正刚度。结果,转子将在两个极端轴向位置之一中发现稳定平衡。这些位置对应于:1)在其座位(由机械挡块所设置)中位于其极端轴向位置中的下轴承外部滚道,或2)位于其相应的极端轴向位置中的上轴承外部滚道。由于所产生的相对高的轴向刚度,期望极端轴向位置处的此操作策略。剩余的轴向顺应性是由于轴承轴向刚度本身。

[0061] 期望的是,其中磁性提升力足够大以保证上轴承外部滚道对着(against)其挡块进行定位的操作是优选的位置和设计。这需要附加提升力超过仅仅卸载轴承所需的力。

[0062] 出于下列两个原因,将转子定位在其上部轴向极端位置处是战略性的:(i)提升结构的磁间隙被保持在其最小值处。此最小值(例如,1-3mm)由制造公差所设置。此最小的间隙导致最小的提升电流和功率耗散来获得规定的提升力;以及(ii)磁间隙在转子和外壳之间的有差别的膨胀发生时相对于操作条件保持不变。在底部轴承座处占去(take up)这些有差别的膨胀。

[0063] 因此,用于平衡的提升功率耗散被保持到其实际最小值,用于影响此提升力的磁

体电流在操作期间是几乎不变的。

[0064] 在某些实施例中,优选操作飞轮装置100以使得提升力 $F$ 紧密地且稳定地平衡该重量 $W$ 。曲线部分419示出了具有 $g_{\text{最小}}$ 的间隙值的飞轮装置100的稳定的操作范围以使得转子120更接近于磁体170,并且提升力紧密地匹配转子的重量。具体地,在这样的条件下,利用磁体170支撑转子的重量,转子重量被提起,并且轴承组件130的轴承上的轴向力是在轴承组件130中的任何弹簧的预加荷载的量的量级上,其可以是转子的重量的小部分,诸如在轴承额定动态负载能力的1%的范围内。

[0065] 在转子120因此被提升的情况下,在下轴承331上的负载由轴向弹簧332精确地设置,并且在上轴承241上的负载由磁力和转子重量之差设置。在某些情况下,在磁力和转子重量之间的差将等于上部组件中的弹簧弹力。在其它情况下,特别地其中负磁体刚度超过正弹簧刚度,上轴承241将接触挡块210,并且在上轴承241上的负载将超过弹簧244的预加荷载。在轴承上的减小的操作负载导致减小的轴承尺寸和成本以及增加的使用寿命。

[0066] 在一个实施例中,控制系统160在 $I_1$ 和 $I_2$ 之间循环电流并且然后在曲线部分419上提供比 $I_2$ 略高的电流。在另一实施例中,控制系统160通过在飞轮系统100的操作之前确定电流 $I_1$ 和 $I_2$ 并将这些值存储在查找表中而提供开环控制,并且随后通过将电流增大到 $I_1$ ,并且接着将电流减小到略高于值 $I_2$ 的值以在曲线部分419上操作来操作飞轮。

[0067] 通常,可能难以用简单的开环设定点在卸载磁体设备中设置电流(或规定磁体强度)。此困难起因于提升磁体参数不确定性。不确定性起因于在制造(公差)和操作两者中出现的磁间隙和磁区中的几何变化。操作中的参数变化与响应于(i)转子和外壳之间的有差别的的热膨胀和(ii)所施加的磁性提升力的磁间隙变化一起出现。具体地,磁性提升力可直接地影响转子对着被动的轴向弹簧加载元件的平衡位置。

[0068] 下面的讨论描述了用于通过使用传感器和反馈控制来更直接地控制转子120的提升的两个实施例。第一个利用机械传感器或测量来确定转子120的位置或转子120上的力。第二个利用电(非机械的)传感器或测量来确定磁通量并因此确定飞轮装置100的操作条件。

[0069] 机械感测和操作方法

[0070] 特定实施例包括传感器和/或转子位移的测量。在特定实施例中,控制系统160可接收来自飞轮组件100的传感器的输入,该输入可被用于通过反馈控制调节电流 $I$ 以利用尽实际可能地接近最小电流 $I_2$ 的电流在最高位置处操作转子120。

[0071] 作为利用机械感测来控制飞轮组件100的示例,一个或多个力传感器可被提供至飞轮组件以测量力并将输出提供至控制系统160。因此,例如,图6是第二实施例上轴承组件730的示意性截面图并且图7是第二实施例下轴承组件730的示意性截面图。轴承组件640和730一般类似于本文中所描述的其它轴承组件130、140、240、330,除了如随后所明确讨论的。

[0072] 如图6中所示,上轴承组件640包括上轴承组件240的部件和应变仪601。应变仪601附连至外壳110,并且挡块201和轴向弹簧244均附连至应变仪。上轴承组件640的操作因此一般类似于轴承组件240的操作,并且使用应变仪601来测量从转子120传送到上轴承组件的力并且将该测量值提供至控制系统160。

[0073] 如图7中所示,下轴承组件730包括下轴承组件330的部件和应变仪701。应变仪701

附连至外壳110,并且挡块301和轴向弹簧332均附连至应变仪。下轴承组件640的操作因此一般类似于轴承组件330的操作,并且使用应变仪701来测量从转子120传送到下轴承组件的力并且将该测量值提供至控制系统160。

[0074] 在一个实施例中,控制系统160接受并使用上部应变仪601的信号作为上轴承241上的轴向负荷的指示。输出应变仪601随后可经由常规的信号反馈或校准被用在低带宽控制环中以准确地设置上轴承201上的预负荷。下轴承331的轴向预负荷由下部轴向弹簧332设置。

[0075] 在另一实施例中,力F被用于对着挡块201保持转子120,并且仅在上轴承中需要一个应变仪测量,如例如由应变仪601进行的测量,而在下轴承组件130上未提供应变仪。在下轴承331上的轴向负荷由在底部轴承底座中的预负荷弹簧设置。

[0076] 图8是示出了本发明的控制算法800的一个实施例的控制系统示图,其可被实现为模拟或数字控制系统160。通常,控制算法800在感测例如可以是例如应变仪601的力传感器时接受上轴承241上的力的测量,并且将电流I提供至提升绕组171以在图5的曲线部分419上操作飞轮装置。

[0077] 算法800具有指示上轴承231上的期望的轴向力的一存储的参考信号 $f^*$ 并且计算残余力,该残余力可被写为 $f_{\text{残余}}=k(g_{\text{最小}})*I^2-W$ 。残余力通过应变仪601来感测,该应变仪601产生输出模拟信号 $f_{\text{测得的}}$ 。算法800从 $f^*$ 中减去 $f_{\text{测得的}}$ 以产生误差信号 $f_e$ ,该误差信号 $f_e$ 然后被放大以产生至提升绕组171的期望量的电流I。

[0078] 非机械感测和操作方法

[0079] 下面的讨论提供了用于基于与产生力F的磁通量有关的测量来控制飞轮组件100的替代性实施例。图9是第二实施例飞轮装置900的示意性截面图。飞轮装置900一般类似于飞轮装置100,除了如随后所明确讨论的。

[0080] 飞轮装置包括转子920,该转子920比转子120更圆柱地成形的,而在其它方面是大致类似的。转子920可被用在先前实施例的任何一个中,例如而非限制,其可以是图1、2、3、6或7中的任何一个的实施例。替代地,此部分的非机械感测和操作方法可被并入到转子120、或其它不同几何结构的转子中。

[0081] 飞轮装置还被提供有一个或多个间隙磁场感测元件。图9示出了第一霍尔(Hall)传感器901和第二霍尔传感器903的布置,该第一霍尔传感器901直接位于转子920和电磁体170之间的间隙中并测量该间隙内的场,该第二霍尔传感器903位于电磁体提升磁极的外边缘上并感测边缘场,该边缘场与直接间隙场成正比。

[0082] 磁性提升力F可被描述为 $F=k_B\lambda^2$ ,其中 $\lambda$ 是绕组磁通匝连数,并且 $k_B$ 本质上独立于磁间隙g。绕组磁通匝连数被定义为与间隙正交的磁通密度乘以绕组项的数量的积分。测得的间隙通量或替代地在物理上与该间隙通量成比例的信号的使用提供了用于磁性卸载力的精确和准确控制的测量信号。图10是示出了对于间隙的两个值作为电磁体的磁通匝连数 $\lambda$ 的函数的电流I的曲线图1000-曲线1001示出了对于最大间隙 $g_{\text{最大}}$ 的电流,并且曲线1003示出了对于最小间隙 $g_{\text{最小}}$ 的电流。

[0083] 具有沿着曲线1001的最大间隙尺寸 $g_{\text{最大}}$ 的情况下,根据逆绕组电感,随着通量从零增加,电流I成比例地增加。这是绕组电感的最小值。随着通量增加,磁力上升直到其平衡了转子重量。在被指示为点1011并且上面参照图5进行讨论的 $I=I_1$ 的此临界值处,转子上升,

如由曲线部分1014所指示的,导致新的磁间隙 $g_{\text{最小}}$ 以及相应的最大绕组电感。绕组电流 $I$ 从 $I = I_1$ 降低到 $I = I_2$ ,因为通量不能瞬时改变。通量的后续增加遵循曲线1003,对应于最大电感以及最小绕组电流。此区域,且尤其在点1013附近的部分1014定义了操作的优选的有效区域。通量和绕组电流的参考值可从此转变的观察中推导出。

[0084] 描绘图4和10的电参数是卸载器绕组电感。因此电流 $I_1$ 和 $I_2$ 以及通量 $\lambda$ 的转变值被反映在瞬时的绕组电感值中。瞬时的绕组电感值可通过计算通量 $\lambda$ 与绕组电流的静态比率来确定。替代地,瞬时的绕组电感值可通过将小振幅纹波信号注入到绕组中并求解纹波通量与纹波电流的比率来确定。纹波通量与纹波电流的比率同样由绕组电感来定义。

[0085] 电流 $I_2$ 的所推导出的参考值可被控制系统160直接地用来驱动电流 $I$ ,提供期望的卸载力。或,基于磁通量的替代性控制器可被用于准确地控制力,如图11的控制系统图中所示,该图11示出了控制算法的第二实施例1100。

[0086] 控制算法1100示出了将绕组电压171用作控制系统160的输入,当通量低于参考值时将该电压调高,且反之亦然。可利用模拟或数字比例积分(P-I)控制器方便地实现此控制。电流 $I$ 可被测量以用在过电流保护电路中,并且还可被用作辅助变量以用在控制器中。然而,直接控制电流作为输入或作为输出是不需要的,因为磁通量被用作基本的物理控制变量。

[0087] 替代性磁体实施例

[0088] 在替代性实施例中,以上所描述的飞轮装置中的任何一个可具有磁体170,该磁体170是包括电磁体和永磁体两者的混合磁体。

[0089] 图12是具有第二实施例磁体1270的本发明的飞轮装置1200的示意性截面图。飞轮装置1200一般类似于以上所描述的飞轮装置中的任何一个。磁体1270包括为电磁体的磁体170和永磁体1201。在此实施例中,磁体1201是轴向磁化环形磁体,并且可以是一个磁体,或可以是几个较小的弧形磁体。磁体170和1201被布置成具有共享的磁通路径。

[0090] 在飞轮装置1200中,转子920由磁体170和1201的组合来提升。此组合降低了磁体170所需的提升电流的量,并且因此磁体170的电磁体的绕组可以成比例地小于飞轮装置100的绕组和/或可降低绕组功率要求。

[0091] 图13是具有第三实施例磁体1370的本发明的飞轮装置1300的示意性截面图。飞轮装置1300一般类似于以上所描述的飞轮装置中的任何一个。磁体1370包括为电磁体的磁体170和永磁体1301。在此实施例中,磁体1301是被配置成与磁体170的磁通路径串联的轴向磁化的、轴对称的环形磁体。

[0092] 如在飞轮装置1200中,飞轮装置1300的转子920由电磁体和永磁体的组合来提升,并且因此磁体1370的电磁体的绕组可以成比例地小于飞轮装置100的绕组。

[0093] 本文中所描述的方法中的每一个的一个实施例是以在处理系统(例如,是控制系统的一部分的一个或多个处理器)上执行的计算机程序的形式。因此,如将由本领域技术人员所理解的那样,本发明的各实施例可被实施为一种方法、诸如专用装置之类的一种装置、诸如数据处理系统之类的一种装置、或一种载体介质,例如,计算机程序产品。该载体介质携带一个或多个计算机可读代码段以用于控制处理系统来实现方法。因此,本发明的各方面可采取方法、完全硬件实施例、完全软件实施例或组合软件和硬件方面的实施例的形式。此外,本发明可采取携带被具体化在介质中的计算机可读程序代码段的载体介质(例如,在

计算机可读存储介质上的计算机程序产品)的形式。可使用任何适当的计算机可读介质,包括诸如磁盘或硬盘之类的磁存储设备或诸如CD-ROM之类的光存储设备。

[0094] 将理解的是所讨论的方法的步骤在一个实施例中通过执行存储在存储器中的指令(代码段)的处理(即,计算机)系统的适当的处理器(或多个处理器)来执行。同样将理解的是本发明不限于任何特定的实现或编程技术并且本发明可利用用于实现本文中所描述的功能的任何适当的技术来实现。本发明不限于任何特定的编程语言或操作系统。

[0095] 在本说明书通篇中对“一个实施例”或“实施例”的引用意味着结合该实施例描述的特定特征、结构或特性包括在本发明的至少一个实施例中。因此,在本说明书通篇中的各个位置中短语“在一个实施例中”或“在实施例中”的出现不一定全都指的是同一实施例。此外,在一个或多个实施例中,如本领域普通技术人员根据本公开内容显而易见的是,特定特征、结构或特性可以任何适当的方式组合。

[0096] 在本说明书通篇中,术语“包括(comprising)”应当与“包括(including)”、“包含(containing)”或“以…表征(characterized by)”同义,为包含性的或开放式的并且不排除附加的、无归属的元素或方法步骤。“包括”为技术术语,其意味着所命名的元素是基本的,但可添加其它元素并且仍然形成该陈述的范围内的构造。“包括”保留开放以用于包含甚至占主要量的未指定成分。

[0097] 类似地,应当理解的是,在本发明的示例性实施例的以上描述中,本发明的各个特征有时在单个实施例、附图及其描述中被组合到一起,以将本公开内容连成整体,并帮助理解各个发明方面的一个或多个方面。然而,本公开的方法不应被解释为反映所要求保护的发明需要比每一个权利要求中显式地记载的特征更多的特征的意图。相反,如所附权利要求书所反映的,各发明性方面在于比以上公开的单个实施例的所有特征要少的特征。因此,说明书之后所附的权利要求因此被明确纳入该说明书中,每一项权利要求独自作为本发明单独的实施例。

[0098] 因此,虽然相信已经描述的内容是本发明的优选实施例,但本领域技术人员将认识到可对其作出其它和进一步的修改而不背离本发明的精神,而且目的是要求保护如落入本发明的范围内的所有这些变化和修改。例如,上面给出的任何分子式仅代表可被使用的步骤。可从框图中增删功能,且可在功能框之间互换操作。在本发明范围内可对所述方法增删步骤。

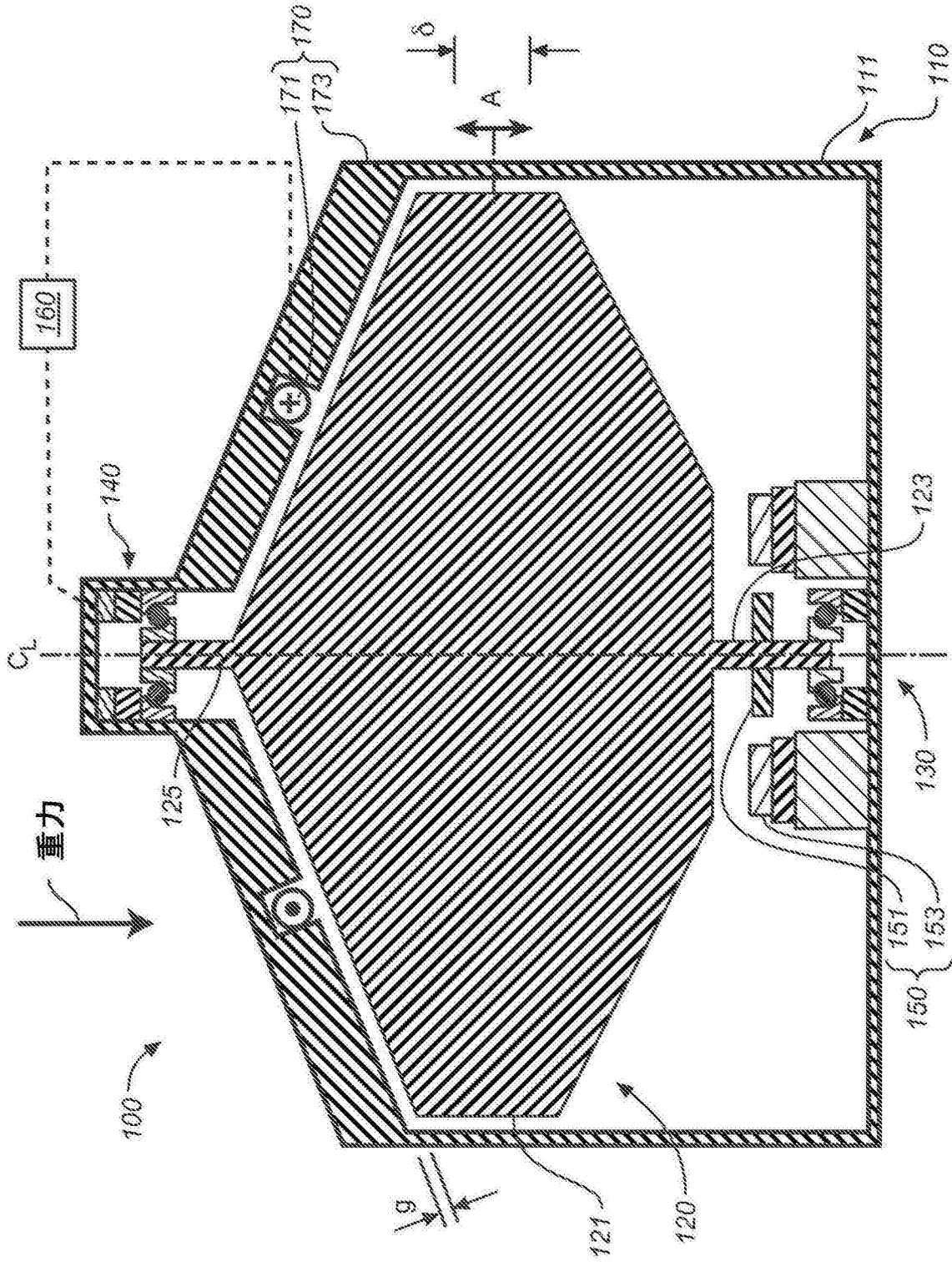


图1

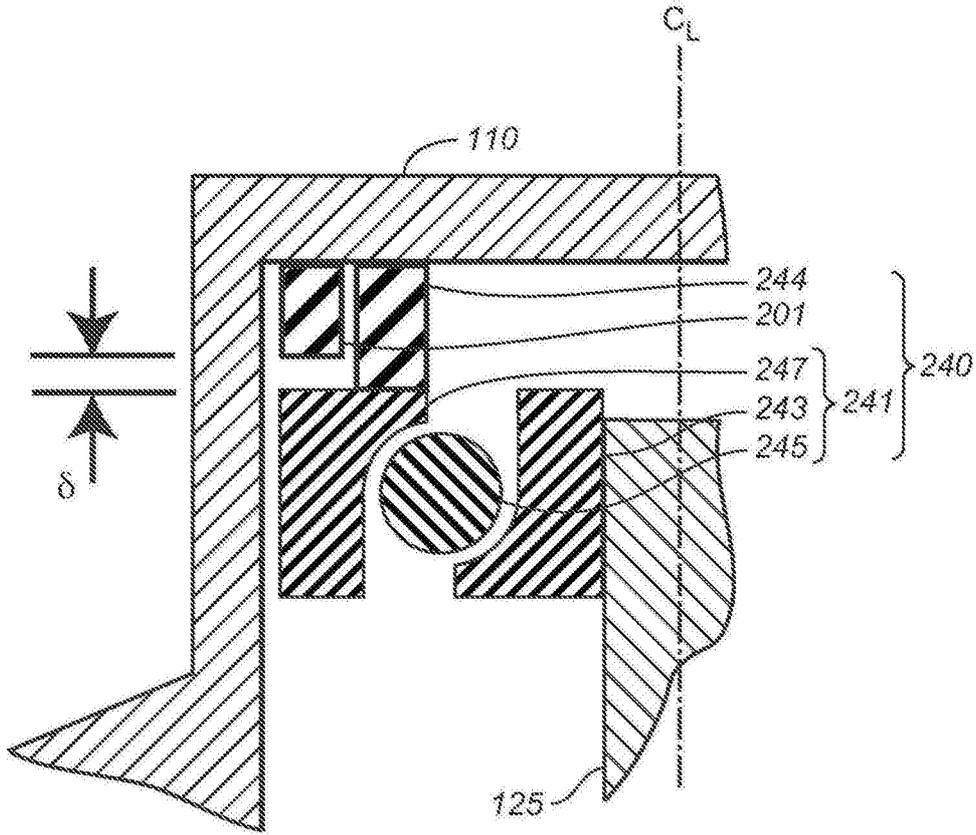


图2A

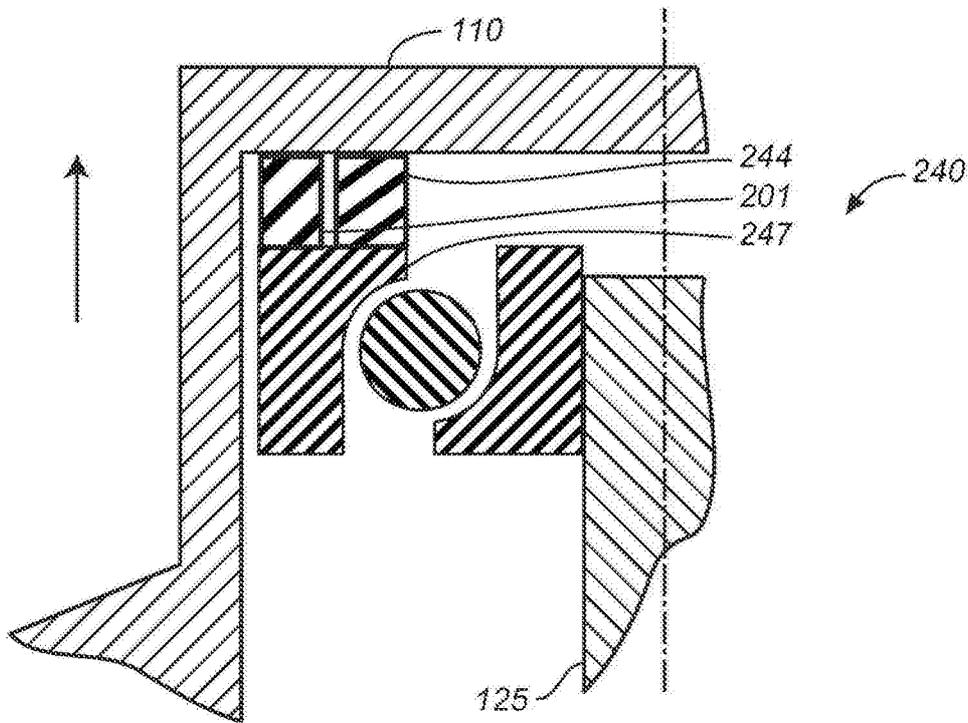


图2B

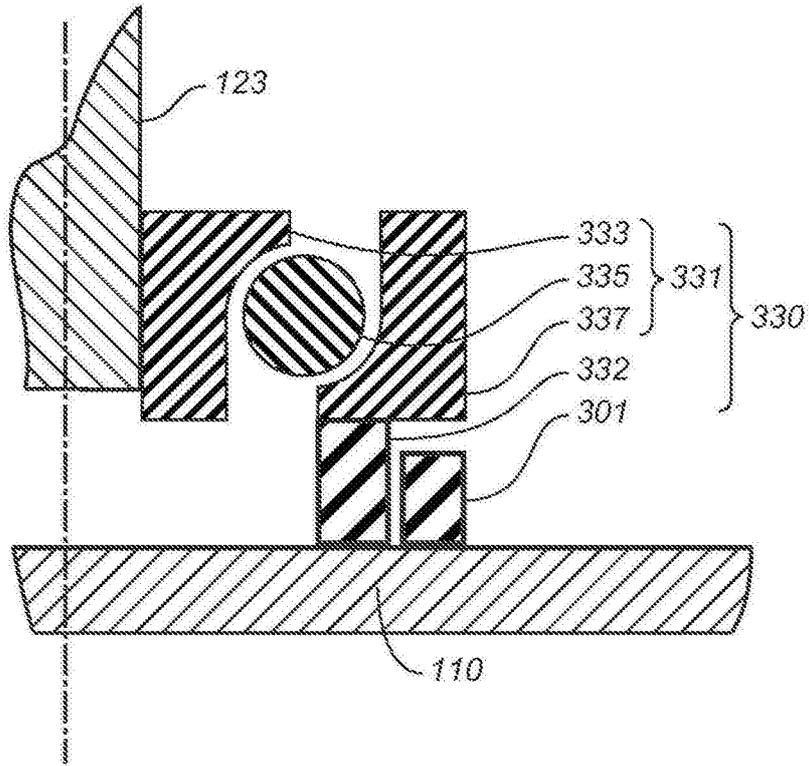


图3

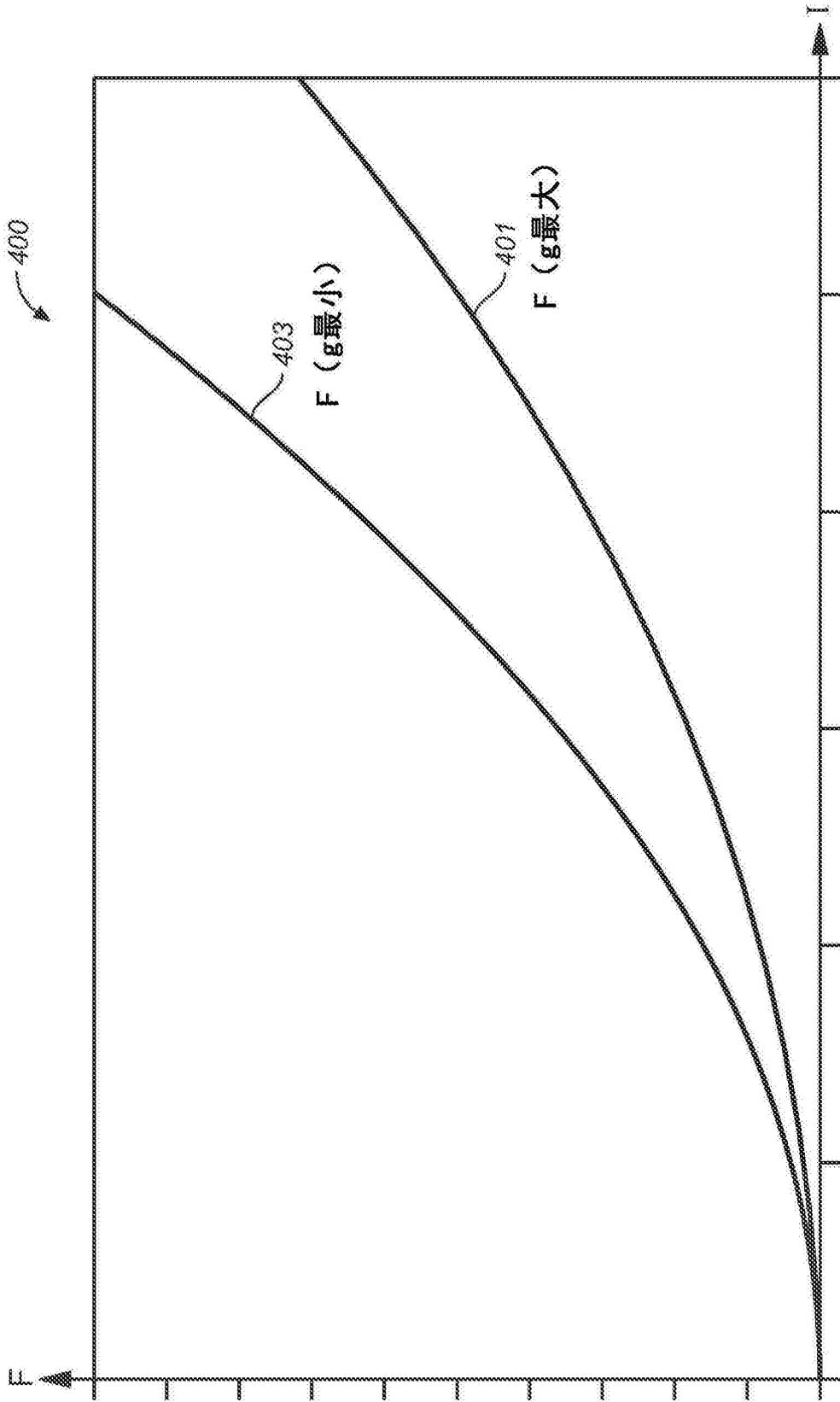


图4

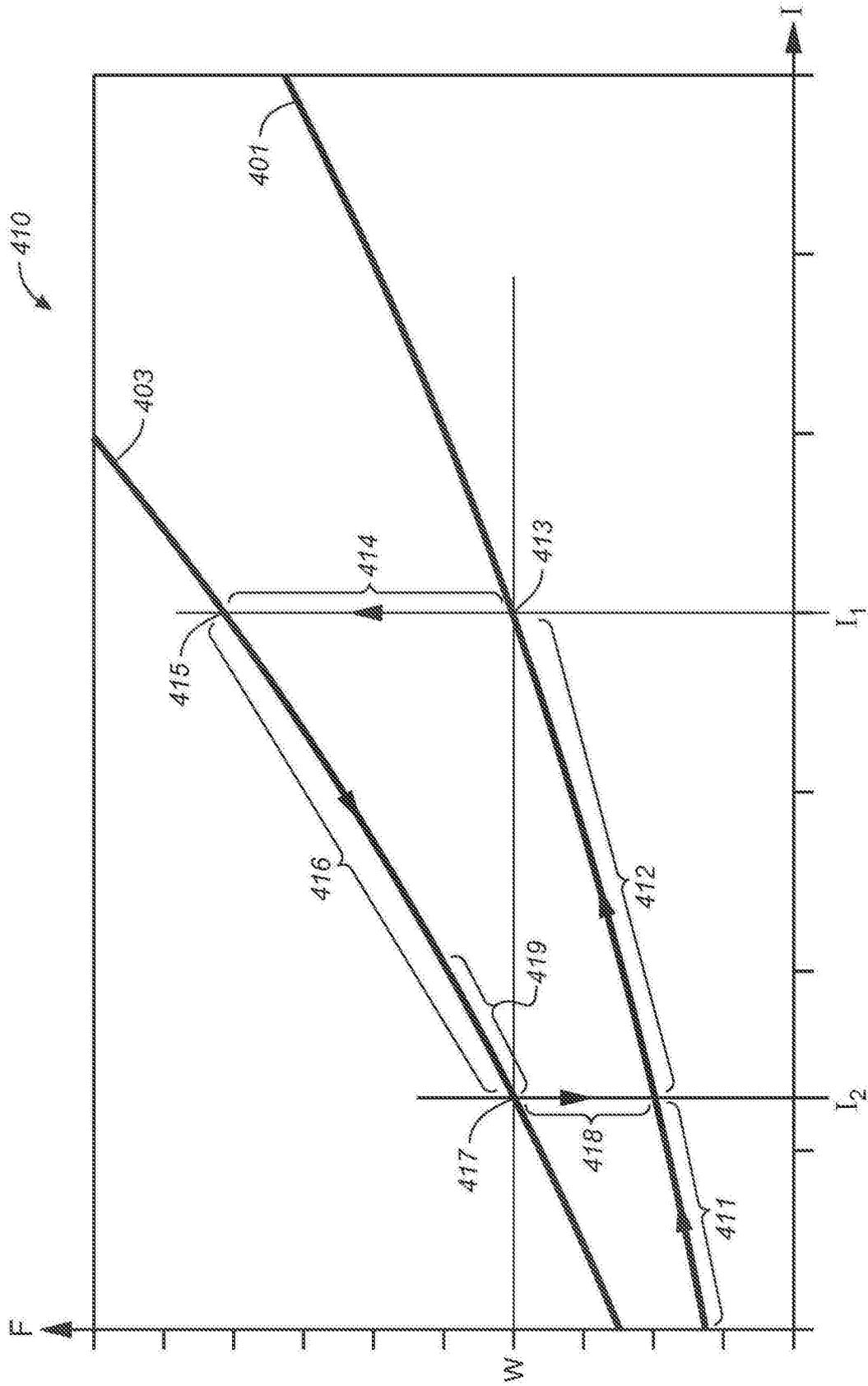


图5

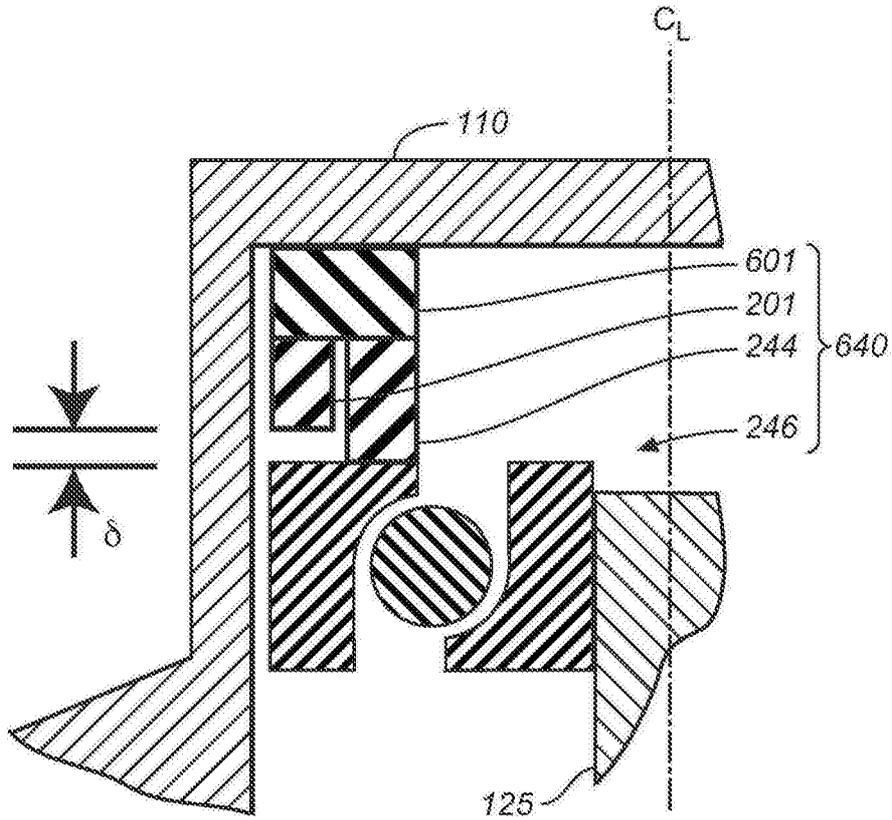


图6

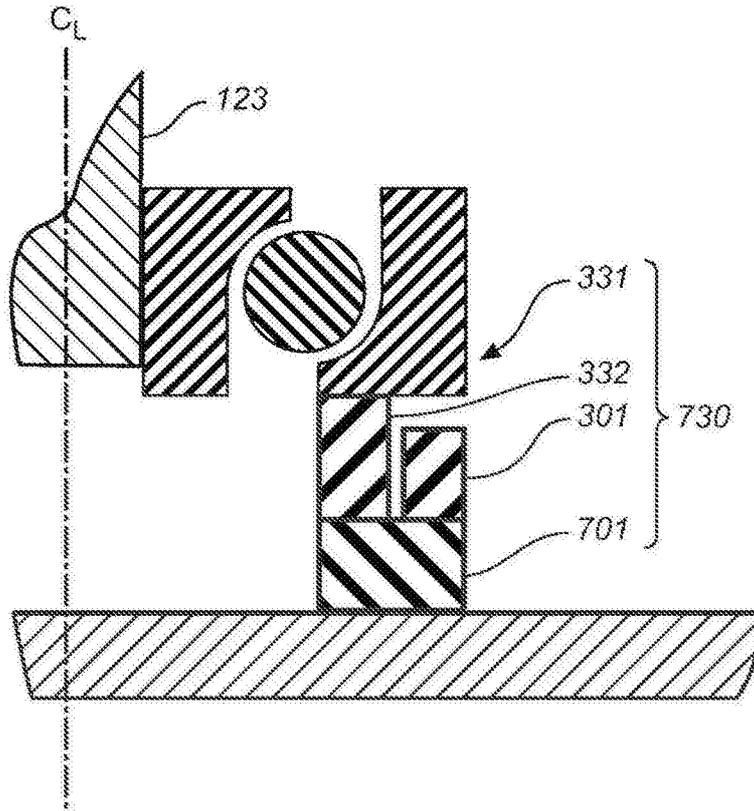


图7

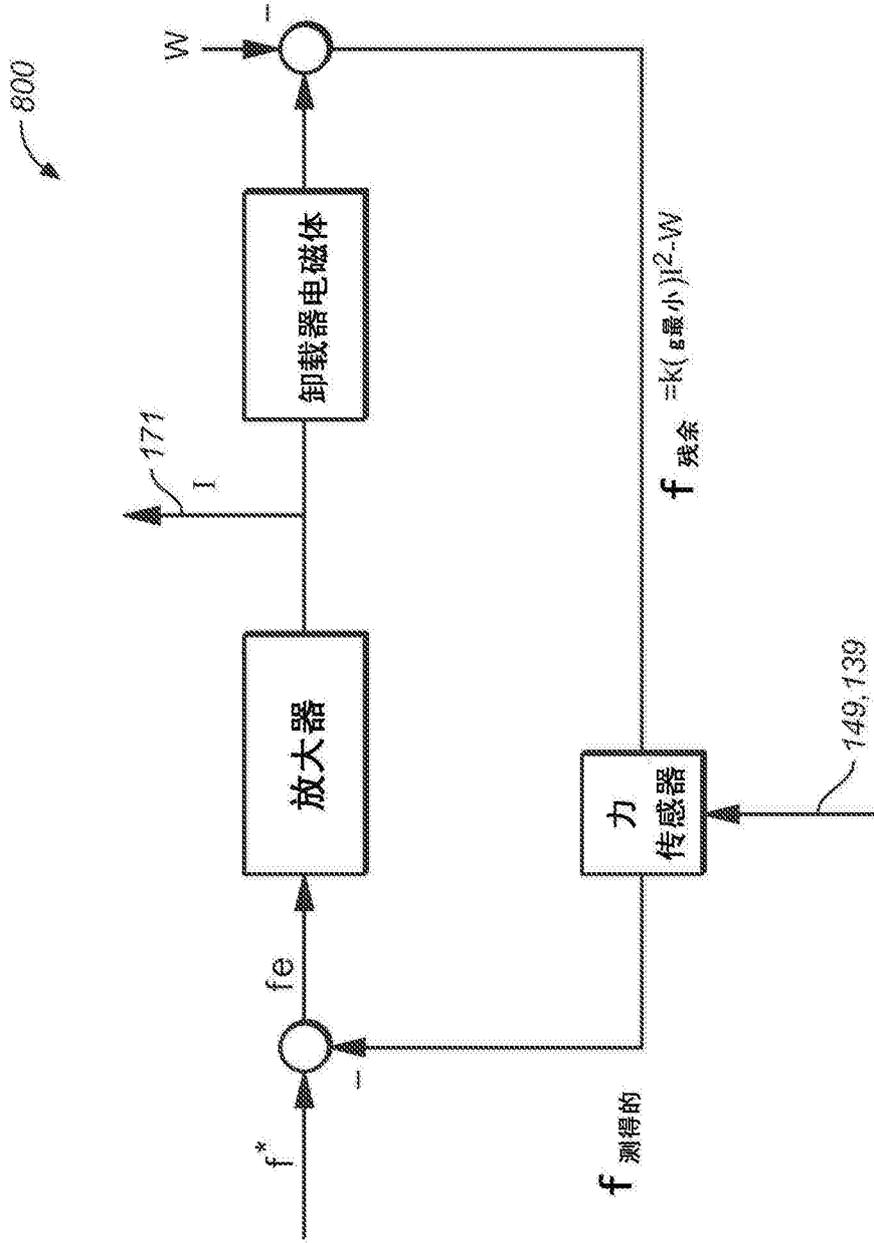


图8

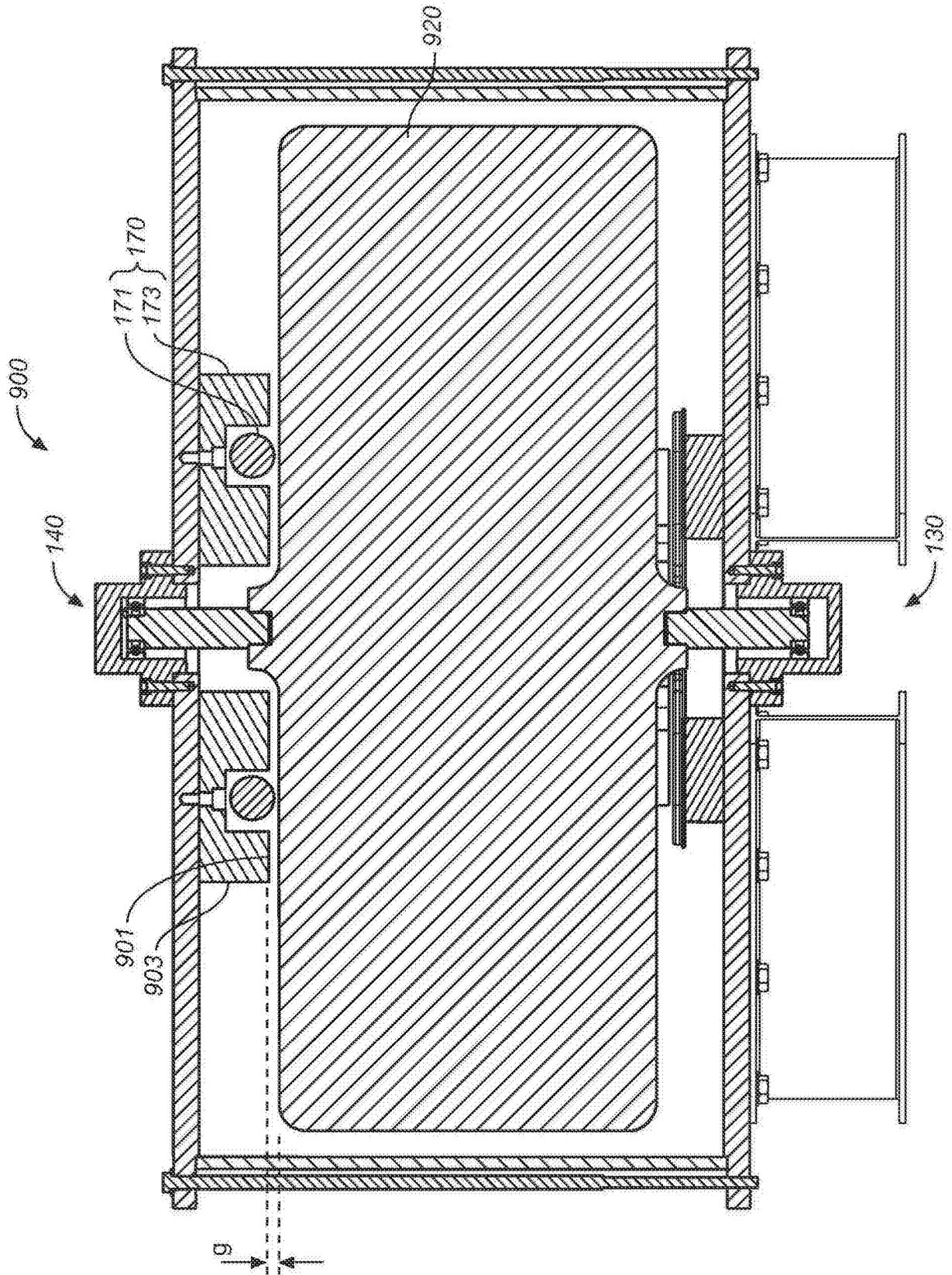


图9

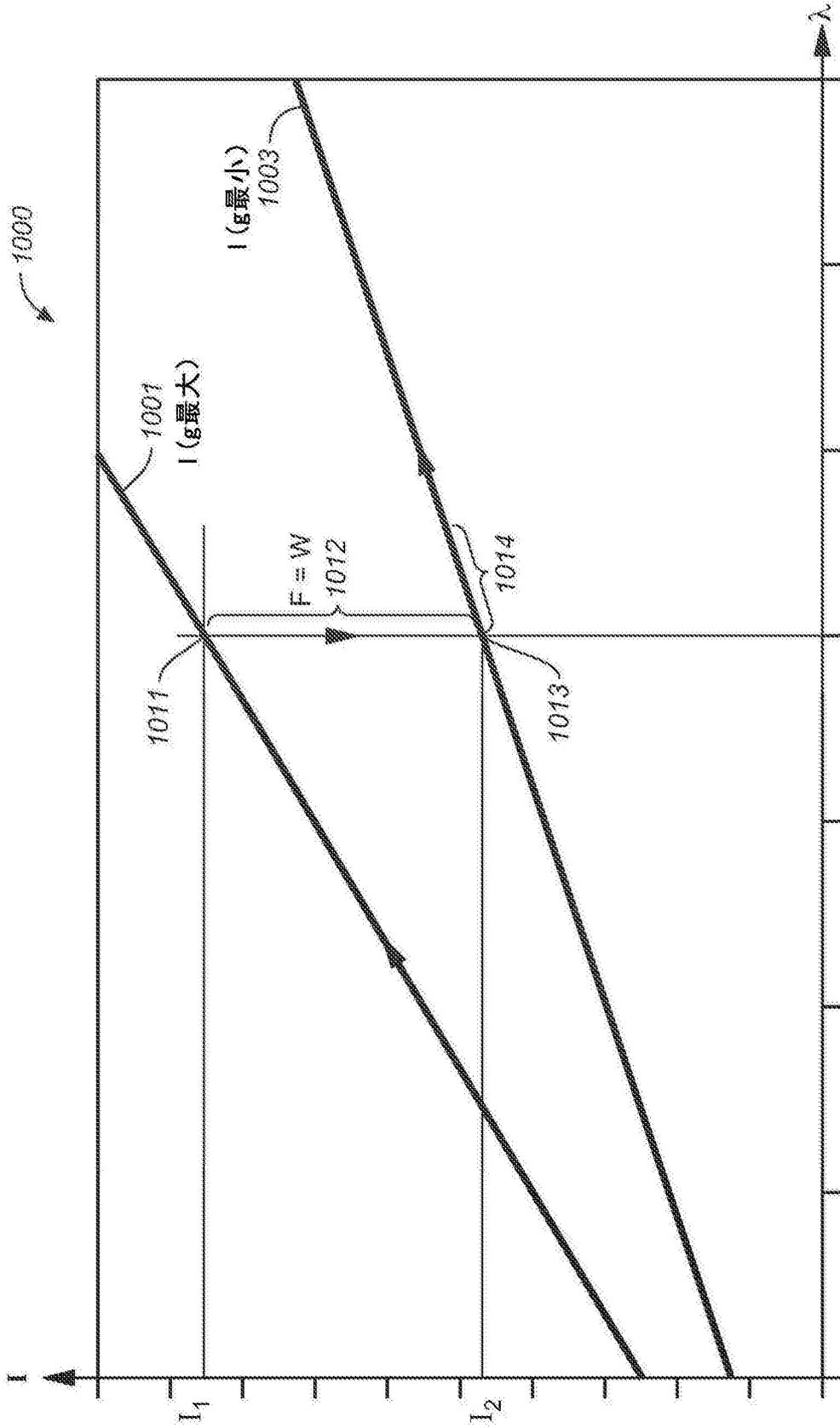


图10

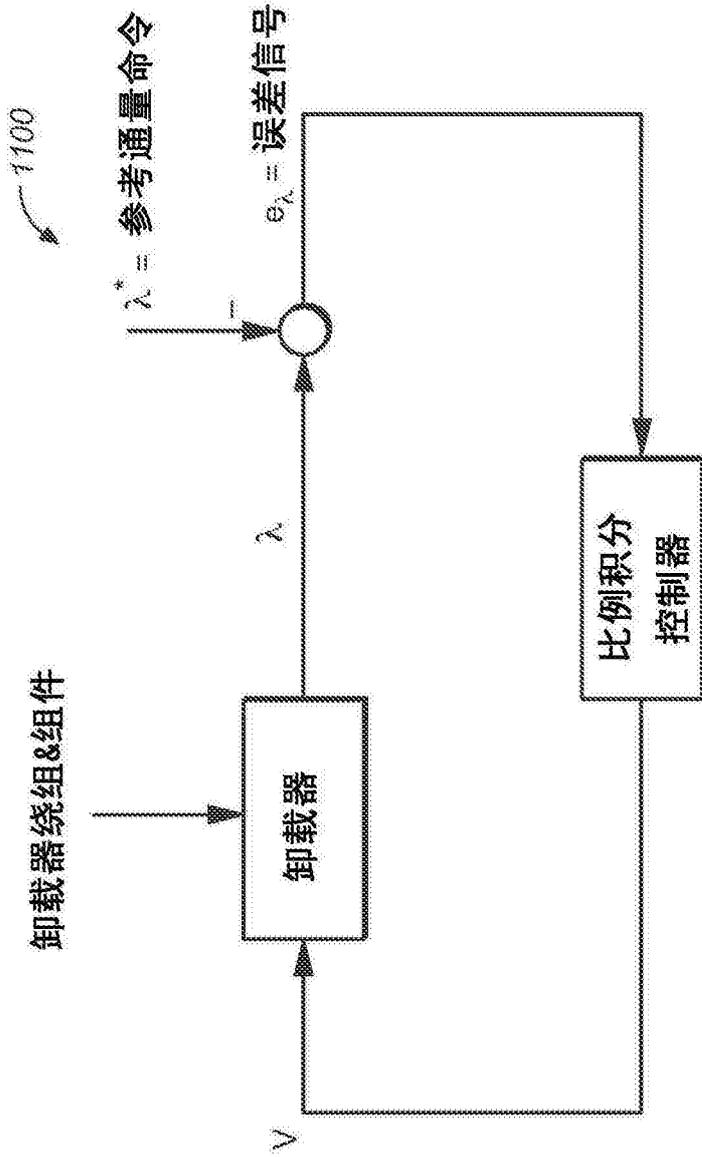


图11

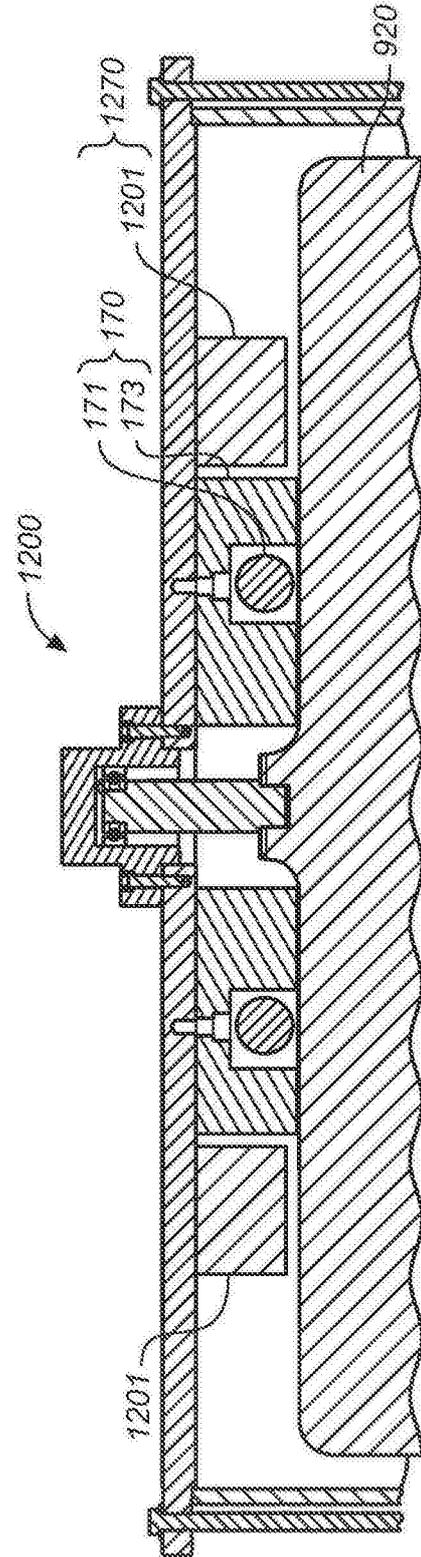


图12

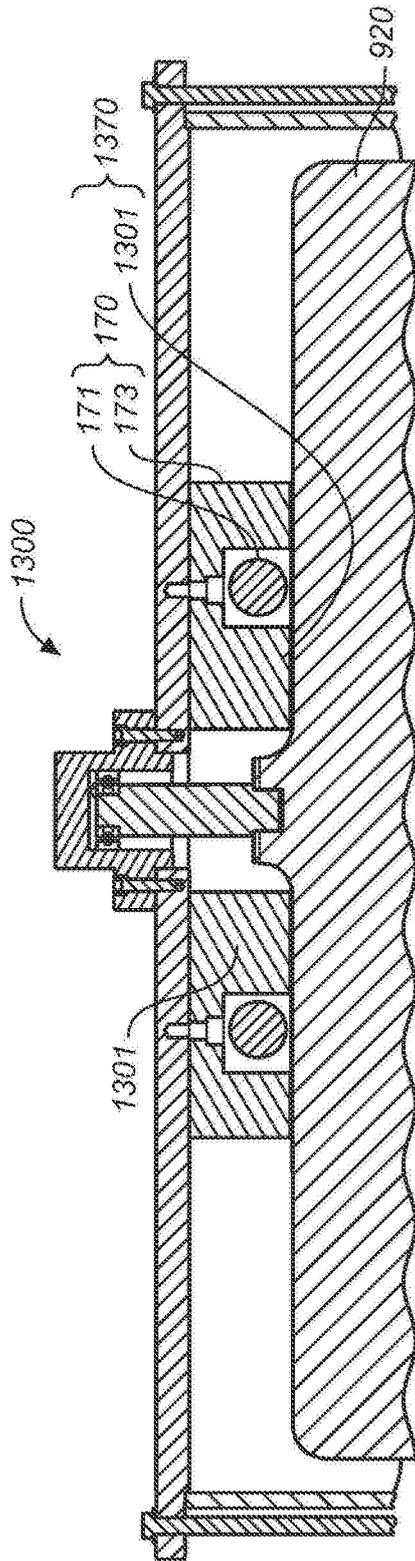


图13