



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116557534 A

(43) 申请公布日 2023.08.08

(21) 申请号 202310183540.7

(22) 申请日 2023.03.01

(71) 申请人 兰州理工大学

地址 730000 甘肃省兰州市七里河区兰工  
坪路287号

(72) 发明人 蒋海涛 江安迪 徐洁 俞树荣  
张伟政 王博 丁俊华 丁雪兴  
王旭辉 杜磊

(74) 专利代理机构 成都云纵知识产权代理事务  
所(普通合伙) 51316

专利代理师 伍星

(51) Int. Cl.

F16J 15/40 (2006.01)

H02N 2/00 (2006.01)

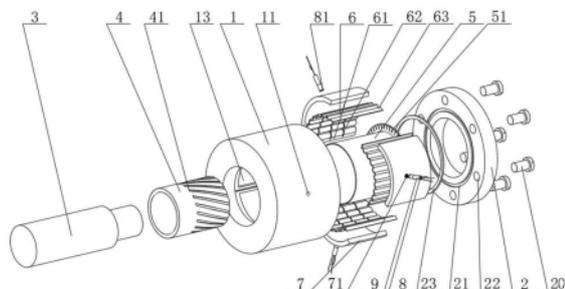
权利要求书2页 说明书10页 附图6页

### (54) 发明名称

基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构

### (57) 摘要

本发明公开了基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,包括定子组件、转子组件,定子组件包括密封腔体,密封腔体的一端连接压紧端盖;还包括位于密封腔体内壁的若干分瓣式密封单元和弹性密封组件;转子组件位于弹性密封组件内部,转子组件上开设动压槽,转子组件与弹性密封组件之间具有间隙;主动控制组件包括位于分瓣式密封单元外壁的第一磁性件、位于分瓣式密封单元外侧的压电晶体、位于压电晶体上的第二磁性件,第一磁性件与第二磁性件磁性相斥且具有间隙。本发明提高了抗碰磨冲击性能以及自适应能力,用以解决现有技术中对柱面密封的主动控制方式存在控制效果不理想的问题,实现提高对柱面密封机组的主动控制精度和准度的目的。



1. 基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,包括定子组件、转子组件,所述定子组件包括密封腔体(1)、可拆卸连接在密封腔体(1)一端的压紧端盖(2),其特征在于,

还包括位于密封腔体(1)内壁侧沿圆周方向均布的若干分瓣式密封单元(7)、位于所述分瓣式密封单元(7)内径侧的弹性密封组件;

所述转子组件偏心安装于弹性密封组件径向内侧,转子组件上开设有沿环形方向均布的若干动压槽(41),且转子组件与弹性密封组件之间具有间隙;

还包括若干主动控制组件,所述主动控制组件包括位于分瓣式密封单元(7)外壁的第一磁性件(71)、位于分瓣式密封单元(7)外侧的压电晶体、位于压电晶体上的第二磁性件(81),所述第一磁性件(71)与第二磁性件(81)磁性相斥且具有间隙。

2. 根据权利要求1所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,所述压电晶体包括金属杆(8)、包覆在金属杆(8)外的压电陶瓷(9),所述第二磁性件(81)安装在金属杆(8)端部。

3. 根据权利要求2所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,所述金属杆(8)包括大径段(801)、小径段(802),所述大径段(801)与小径段(802)同轴;所述压电陶瓷(9)包覆在小径段(802)外,且压电陶瓷(9)的外径等于大径段(801)的外径;所述第二磁性件(81)安装在大径段(801)远离小径段(802)的端部。

4. 根据权利要求2所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,所述密封腔体(1)上沿圆周方向开设若干与第一磁性件(71)相对的安装孔(11),所述压电晶体位于安装孔(11)内,且安装孔(11)孔壁与金属杆(8)和/或压电陶瓷(9)之间通过密封圈密封。

5. 根据权利要求1所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,密封腔体(1)内壁开设若干沿周向分布的凹槽(13),所述分瓣式密封单元(7)安装在凹槽(13)内;相邻两个凹槽(13)之间开设轴向狭槽(14),所述轴向狭槽(14)用于安装弹性密封组件。

6. 根据权利要求1所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,所述弹性密封组件包括整周式平箔片(5)、位于整周式平箔片(5)外的分瓣式波箔片(6);所述整周式平箔片(5)与分瓣式波箔片(6)相互接触。

7. 根据权利要求6所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,所述分瓣式波箔片(6)沿周向的两端分别为固定端(61)、分离边界(63);

所述固定端(61)通过轴向狭槽(14)固定安装在密封腔体(1)上;

所述分瓣式波箔片(6)上自分离边界(63)处开设有若干分离间隙(62),所述分离间隙(62)垂直于分离边界(63)。

8. 根据权利要求6所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,所述整周式平箔片(5)在靠近密封高压侧的一端设置有向外径方向延伸的延伸部(51),所述延伸部(51)夹持固定在密封腔体(1)和压紧端盖(2)之间。

9. 根据权利要求1所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,所述转子组件包括偏心穿过密封腔体(1)的旋转轴(3)、固定套设在旋转轴(3)外的轴套(4);若干动压槽(41)环形均布在轴套(4)外壁,所述动压槽(41)延伸至轴套(4)朝向密封高压侧的端面。

10. 根据权利要求1所述的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,其特征在于,所述压紧端盖(2)内侧设置有环形密封凹槽(21),所述环形密封凹槽(21)内放置密封垫片(23),

所述压紧端盖(2)和密封腔体(1)之间通过紧定螺栓连接。

## 基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构

### 技术领域

[0001] 本发明涉及柱面密封技术领域,具体涉及一种基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构。

### 背景技术

[0002] 柱面气膜密封是一种新型的轴端密封形式,其工作原理类似于气体径向轴承,随着转子带动轴套转动,轴套的动压槽和密封的偏心结构产生作用,外径侧的高压隔离气体在粘性剪切力的作用下泵入密封柱面之间,由于动压效应,使得由压力入口至动压槽根径处气膜压力逐渐抬升,在槽根径处压力达到最大值;随后密封气体自槽根径至压力出口处,由于台阶效应,密封气体流经坝区时产生了能量耗散,从而使气膜压力迅速降低。柱面的膜压增加使得所形成的浮升力增大,迫使两界面始终处于稳定的非接触状态。同时当密封介质被泵吸入动压槽内,在此过程中由于偏心率的作用,密封介质被压缩,依靠轴套外表面开设的动压槽,以及浮动环与轴套之间偏心率形成的楔形间隙,使得密封间隙中气膜呈楔形收敛式分布,二者共同作用产生的流体动压效应导致间隙内气体压力升高,当运转稳定时,在浮动环和轴套之间形成微米级气体润滑薄膜,介质被气体润滑薄膜阻碍于主泄漏通道中从而实现密封效果。

[0003] 柱面气膜密封相比较于端面气膜密封,其主要优势在于具有较好的柔性浮动性,可以允许更大的径向位移,但是当柱面密封应用于高速旋转机械,尤其是航空航天领域中时,现有的密封技术具有明显局限,主要表现在以下几个方面:

[0004] 第一,现有的柱面密封技术多为被动控制设计方法,在机组运行期间无法根据实际工况条件及服役环境的变化来作出反应,这种被动控制的设计方法和运行模式极大的削弱了对密封性能的调控能力,当航空飞行器运行在复杂多变的工况下时变得不适用。

[0005] 第二,由于航空飞行器在高速或变姿态运行条件下,微通道内的流体激振会使得柱面密封系统出现频繁地非线性轴振,且密封气膜的厚度一般情况下只有几微米,即使在气膜刚度很大的情况下也没有办法应对转轴的大幅度径向摆动、以及转子大振动位移所引起的接触摩擦和磨损的威胁。

[0006] 第三,航空飞行器在运行过程中,机体的微小变化都可能诱发失稳,同时密封介质在不同相态共存的情况下更容易受到环境因素和自身结构带来的随机不确定性激励影响,进而产生碰摩,引起接触干摩擦自激摆动振动,从而导致密封失效,降低机械工作效率,影响整机工作。

[0007] 第四,现有柱面密封技术中的密封副大多采用“刚”配“刚”的配合模式,这种模式包容性较低,一定程度上加重了直接碰磨带来的危害。

[0008] 所以,现有的柱面密封技术难以直接应用于高速旋转机械,尤其是航空航天飞行器的轴端密封上,所以有必要探寻一种密封综合性能良好、抗碰磨冲击性能优异且能实现主动控制和状态监测的全新密封技术。针对上述问题,发明人团队已经作了一定的尝试,提出了《一种流致分离的浮动式弹性箔片密封结构》(申请号:CN202210132305.2;公布号:

CN115313730A),该结构通过提出一种可实现流致分离的组合箔片密封结构,以期实现增大气膜浮升力,提高密封性能,解决现有密封技术中包容性较差、应用性不足的问题。随后又提出了《一种适用于飞行器的主动柱面密封结构》(申请号202210816592.9;公布号:CN115046012A),该结构将压电陶瓷创新性的应用于密封领域,实现了密封运行的主动控制,提高了柱面密封技术的适用性。但是,随着研究的进一步深入,本方案的发明人发现上述结构存在适用范围较窄及控制效果不理想等问题,具体的,《一种流致分离的浮动式弹性箔片密封结构》虽通过流致分离的方式实现了密封性能的改善,但其波箔片的流向设置必须与转轴旋转方向一致才能实现气膜浮升力的增大,因此对于安装的要求较高,且在航空飞行器等领域存在转轴异常停车及突然反转的问题,这种结构对于突发工况改变的适用性较差;《一种适用于飞行器的主动柱面密封结构》将压电陶瓷引入到密封领域,实现了密封的主动控制运行,但这种结构的安装方式存在一定的局限性,主要是因为压电陶瓷是在密封腔体上沿圆周方向均布设置,而密封间隙的改变是沿着径向方向改变的,因此压电陶瓷针对具体运行工况所作出的变形反应在一定程度上会受到这种不合理安装方式的影响,即压电陶瓷的变形作用于径向密封间隙时,在圆周方向具有损耗,这对于微小位移的影响是巨大的。

## 发明内容

[0009] 本发明提供基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,以解决现有技术中高速旋转机械的轴端用柱面密封机组,在运行过程中存在被动控制、转子-密封系统大振动位移导致接触摩擦磨损、压电陶瓷的变形作用于径向密封间隙时在圆周方向具有损耗等问题,实现对密封机组的主动控制,使得密封间隙可调,保证密封机组保持在最佳工作状态运行,同时提高抗碰磨冲击性能、提高自适应能力、同时避免周向损耗对径向密封间隙带来巨大干扰等目的。

[0010] 本发明通过下述技术方案实现:

[0011] 基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,包括定子组件、转子组件,所述定子组件包括密封腔体、可拆卸连接在密封腔体一端的压紧端盖;

[0012] 还包括位于密封腔体内壁侧沿圆周方向均布的若干分瓣式密封单元、位于所述分瓣式密封单元内径侧的弹性密封组件;

[0013] 所述转子组件偏心安装于弹性密封组件径向内侧,转子组件上开设有沿环形方向均布的若干动压槽,且转子组件与弹性密封组件之间具有间隙;

[0014] 还包括若干主动控制组件,所述主动控制组件包括位于分瓣式密封单元外壁的第一磁性件、位于分瓣式密封单元外侧的压电晶体、位于压电晶体上的第二磁性件,所述第一磁性件与第二磁性件磁性相斥且具有间隙。

[0015] 针对现有技术中,在先申请的柱面密封主动控制方式,存在控制效果不理想的缺陷,本案发明人在不断深入的研究过程中发现,影响控制效果的因素之一在于:柱面密封的气膜间隙厚度一般为微米级,因此对其主动控制的形变量也只有微米级,现有技术中由支撑件传递压电陶瓷的形变,而支撑件需要同时与压电陶瓷和浮动组件接触,各接触位置之间的摩擦损耗、以及支撑件自身的形变,都会导致压电陶瓷的形变传递至浮动组件的过程中存在大量能量损失,进而导致其对浮动组件的作用力难以精确控制、导致对密封间隙的

调整精度不佳。本申请正是基于上述技术问题的发现而做出的发明创造。

[0016] 具体的,本申请中的定子组件、转子组件、密封腔体和压紧端盖等均为现有技术,在此不做赘述。本申请以密封腔体作为定子组件的主体结构,在密封腔体内壁安装若干分瓣式密封单元,分瓣式密封单元的内侧安装弹性密封组件。高压介质气体从开设动压槽的一端流入密封结构,由于转子组件旋转,在偏心安装带来的收敛楔效应和流体粘性带来的动压楔形效应的双重作用下,形成带压流体薄膜,并在动压槽的槽根径部位达到最大压力,使得转子组件与弹性密封组件之间始终保持一定间隙,从而实现非接触式密封。

[0017] 本申请设置若干主动控制组件,通过主动控制组件来改变分瓣式密封单元的径向位置,由分瓣式密封单元驱动内部的弹性密封组件产生形变,从而改变气膜形状,气膜形状将直接影响密封性能和系统稳定性。所以,本申请实现了对密封机组的主动控制运行,使得密封间隙可调,从而显著增大气体润滑膜的楔形空间,减弱交叉耦合效应,增强动压效应,有利于保证密封机组运行保持在最佳工作状态。并且,本申请能够实时优化和调控密封性能,从而防止在工作过程中由于不确定性激励诱发的异常振动冲击和摩擦磨损,也避免了运行状态突变导致的密封系统的不稳定,极大程度地提高了柱面气密封的抗干扰能力。

[0018] 本申请中的主动控制组件采用非接触式的磁性控制,在分瓣式密封单元外表面设置第一磁性件,并设置与第一磁性件磁性相斥且不直接接触的第二磁性件,由压电晶体控制第二磁性件的动作,进而改变第二磁性件与第一磁性件之间的相对位置,以此调整第一磁性件所受的磁场强度,进而调节分瓣式密封单元所受的作用力,实现对气膜间隙的调节。

[0019] 本申请相较于现有技术而言:(1)不再使用轴向分布的浮动组件,而是以周向分布的分瓣式密封单元作为气膜间隙的调节结构,无需在密封腔体上开设进气孔来中间进气,可实现从轴向端部进气密封,适用工况更广;(2)通过非接触式的方式由外向内朝分瓣式密封单元施加作用力,摒弃了现有技术采用直接接触方式传递形变而导致的损失大、精度低的问题,由于不再有支撑件的自身形变和多个接触位置的摩擦损耗,因此能够显著提高主动控制组件的控制精度,进而提高对柱面密封机组的主动控制精度和准度;(3)使得密封间隙的方向与被控制的形变方向保持一致,避免压电晶体的变形出现不必要的损耗,确保了对密封间隙在微米级上的精确控制;并且,分瓣式密封单元与弹性密封组件组合实现大柔性结构,在摩擦磨损及冲击振动发生时,提供更大的密封间隙改变;压电晶体底端与所述柔性密封单元的实现非接触,且通过电流变化产生的磁场变化,实现电磁转化,促使密封间隙改变;最后这种结构可以针对密封实际运行的变化,通过电信号传递到外界监测系统,一定意义上可以实现主动控制与状态监测相结合的全新密封。

[0020] 进一步的,所述压电晶体包括金属杆、包覆在金属杆外的压电陶瓷,所述第二磁性件安装在金属杆端部。

[0021] 现有技术中,简单的使用压电陶瓷来实现主动控制,但是发明人在研究过程中发现,现有的压电陶瓷在体积比较小的情况下,其运动范围很小,虽可以使用柔性铰链对微位移进行了放大,但其传导损耗依旧制约发展;本申请所需控制的气膜间隙为微米级,但是这也需要相对较大体积的压电陶瓷才能够实现,这于密封设备的小型化和成本都存在制约。基于此,本方案创造性的设计了一种独特的压电晶体,将压电陶瓷包覆在金属杆外,以其内部的金属杆作为一种结构简单、形状规则的微位移放大机构,能对较小的位移进行显著放大并传递位移,具有体积小、无机械摩擦、结构紧凑、运动灵敏度高且运行平稳、免润滑等优

点。本方案中使用金属杆,可以使小体积的压电陶瓷微小的机械变形从几微米放大至几十甚至几百微米,再将该位移传递至第二磁性件上,进而改变第二磁性件与第一磁性件之前的磁场,以达到预期效果。在需要调节弹性密封组件位置时,根据需要对压电陶瓷施加不同电信号即可。

[0022] 在稳定、无外界电信号、机械变形等影响时,第一磁性件与第二磁性件之间保持稳定的非接触状态。在控制过程中,施加在压电陶瓷上的电压,能够同时作用至金属杆上,在金属杆上形成瞬时电流,进而基于电磁感应产生电磁场,该电磁场使得第一磁性件与第二磁性件两者之间的平衡被破坏,迫使两者之间发生相对运动以尽快达到下一个动态平衡。

[0023] 此外,在密封运行的启停阶段,轴向振动会加剧摩擦磨损和振动冲击的影响,使得流场发生变化。流场变化后,弹性密封组件受力发生形变,带动分瓣式密封单元发生振动或位移,使得其上安装的第一磁性件发生振动或位移,此过程中,金属杆切割磁感线、在电磁感应的原理下产生微小的电信号,使用者可根据该电信号来分析内部的振动和位移情况,以此为反馈信号来更加准确的调节施加至压电陶瓷的控制电压。

[0024] 因此,本方案中的压电晶体:(1)可有效放大压电陶瓷的微位移以实现更加精确主动控制;(2)能够利用电磁感应迫使第一磁性件与第二磁性件更快的达到下一个动态平衡,进而提高对分瓣式密封单元主动控制的效率和准度;(3)可以敏感的感知流场的微小变化,并可以将这个微小变化通过电信号传递出来,显著丰富了柱面密封性能的实时监测能力、并提高了可视化的反馈手段,实现“电压-密封性能-电压-密封性能……”主动化的良性反馈和智能调控。

[0025] 进一步的,所述金属杆包括大径段、小径段,所述大径段与小径段同轴;所述压电陶瓷包覆在小径段外,且压电陶瓷的外径等于大径段的外径,所述第二磁性件安装在大径段远离小径段的端部。

[0026] 所述密封腔体上沿圆周方向开设若干与第一磁性件相对的安装孔,所述压电晶体位于安装孔内,且安装孔孔壁与金属杆和/或压电陶瓷之间通过密封圈密封。

[0027] 本方案中的金属杆为变径式结构,其至少包括外径不等的两个部分,分别定义为大径段、小径段。其中,压电陶瓷包覆在小径段外,且压电陶瓷的外径等于大径段的外径,使得整个压电晶体结构规则且稳定,便于装配。同时,此结构使得外界电信号作用于压电陶瓷时,不会在周向及轴向发生变形,只会在径向方向产生运动,不会产生位移损耗,同时避免了多接触状态下位移的偏移现象。

[0028] 进一步的,密封腔体内壁开设若干沿周向分布的凹槽,所述分瓣式密封单元安装在凹槽内;相邻两个凹槽之间开设轴向狭槽,所述轴向狭槽用于安装弹性密封组件。

[0029] 进一步的,所述弹性密封组件包括整周式平箔片、位于整周式平箔片外的分瓣式波箔片;所述整周式平箔片与分瓣式波箔片相互接触。

[0030] 本方案中,沿着径向方向,整周式平箔片的外壁与分瓣式波箔片的内端相互接触,分瓣式波箔片被夹持在整周式平箔片和分瓣式密封单元之间,分瓣式波箔片与整周式平箔片、分瓣式密封单元间均会发生库伦摩擦。由于整周式平箔片表面受到载荷作用以及整周式平箔片和分瓣式波箔片间的库伦摩擦作用,整个弹性密封组件在径向方向和周向方向均可发生微小变形,实现实时控制自适应性调节,从而充分保证密封的稳定性。

[0031] 进一步的,所述分瓣式波箔片沿周向的两端分别为固定端、分离边界;

[0032] 所述固定端通过轴向狭槽固定安装在密封腔体上；

[0033] 所述分瓣式波箔片上自分离边界处开设有若干分离间隙，所述分离间隙垂直于分离边界。

[0034] 本方案中，分离边界即为分瓣式波箔片的自由端。对于每瓣波箔片而言，从分离边界处开设若干分离间隙，使得每条分离间隙均与分离边界垂直，并且分离间隙没有完全贯穿单瓣波箔片，使得每瓣波箔片在固定端依然保持整体结构，可防止箔片在温度大幅度波动下发生不必要的变形。

[0035] 进一步的，所述整周式平箔片在靠近密封高压侧的一端设置有向外径方向延伸的延伸部，所述延伸部夹持固定在密封腔体和压紧端盖之间。

[0036] 本方案中延伸部位于密封高压侧且径向向外延伸，因此可等效理解为一翻边结构，在连接密封腔体和端盖之前使延伸部就位，使得密封腔体和端盖连接后，延伸部被稳定的夹持压紧在两者之间，以此充分保证密封面的完整性。

[0037] 进一步的，所述转子组件包括偏心穿过密封腔体的旋转轴、固定套设在旋转轴外的轴套；若干动压槽环形均布在轴套外壁，所述动压槽延伸至轴套朝向密封高压侧的端面。

[0038] 通过弹性密封组件的柔性支撑设计，可以包容转子组件在径向方向的偏移或跳动，同时对不可避免的加工误差和安装误差起到补偿和平衡作用，保证了弹性密封组件和轴套始终保持非接触状态，极大程度提高了柱面气密封的抗振动干扰能力。

[0039] 进一步的，所述压紧端盖内侧设置有环形密封凹槽，所述环形密封凹槽内放置密封垫片，所述压紧端盖和密封腔体之间通过紧定螺栓连接。在螺栓预紧力的作用下能够压紧密封垫片，从而更好地提升密封性能。

[0040] 本发明与现有技术相比，至少具有如下的优点和有益效果：

[0041] 1、本发明基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构，其中主动控制组件采用非接触式的磁性控制，不再使用轴向分布的浮动组件，而是以周向分布的分瓣式密封单元作为气膜间隙的调节结构，无需在密封腔体上开设进气孔来中间进气，可实现从轴向端部进气密封，适用工况更广。

[0042] 2、本发明基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构，通过非接触式的方式由外向内朝分瓣式密封单元施加作用力，摒弃了现有技术采用直接接触方式传递形变而导致的损失大、精度低的问题，由于不再有支撑件的自身形变和多个接触位置的摩擦损耗，因此能够显著提高主动控制组件的控制精度，进而提高对柱面密封机组的主动控制精度和准度。外界电信号作用于压电陶瓷时，不会在周向及轴向发生变形，只会在径向方向产生运动，不会产生位移损耗，同时避免了多接触状态下位移的偏移现象。

[0043] 3、本发明基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构，采用独特的压电晶体，能对较小的位移进行显著放大并传递位移，可以使小体积的压电陶瓷微小的机械变形从几微米放大至几十甚至几百微米。采用新的组合压电晶体，将其在密封腔体上沿圆周方向径向安装，实现变形和密封间隙调控处于同一个方向，位移改变更明显；在密封腔体内侧开设凹槽并安装密封单元，与弹性密封组件组合实现大柔性结构，在摩擦磨损及冲击振动发生时，提供更大的密封间隙改变；压电晶体底端与所述柔性密封单元的实现非接触，且通过电流变化产生的磁场变化，实现电磁转化，促使密封间隙改变；最后这种结构可以针对密封实际运行的变化，通过电信号传递到外界监测系统，一定意义上可以实现主动控制与状态监测相结

合的全新密封。

[0044] 4、本发明基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构，其中的压电晶体能够利用电磁感应迫使第一磁性件与第二磁性件更快的达到下一个动态平衡，进而提高对分瓣式密封单元主动控制的效率和准度；

[0045] 5、本发明基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构，可以敏感的感知流场的微小变化，并可以将这个微小变化通过电信号传递出来，显著丰富了柱面密封性能的实时监测能力、并提高了可视化的反馈手段，实现“电压-密封性能-电压-密封性能……”主动化的良性反馈和智能调控。

## 附图说明

[0046] 此处所说明的附图用来提供对本发明实施例的进一步理解，构成本申请的一部分，并不构成对本发明实施例的限定。在附图中：

[0047] 图1为本发明具体实施例的爆炸图；

[0048] 图2为本发明具体实施例的剖视图；

[0049] 图3为本发明具体实施例局部剖开的结构示意图；

[0050] 图4为本发明具体实施例中密封腔体的结构示意图；

[0051] 图5为本发明具体实施例中压紧端盖的结构示意图；

[0052] 图6为本发明具体实施例中轴套的结构示意图；

[0053] 图7为本发明具体实施例中整周式平箔片的结构示意图；

[0054] 图8为本发明具体实施例中分瓣式波箔片的结构示意图；

[0055] 图9为本发明具体实施例中分瓣式密封单元的结构示意图；

[0056] 图10为本发明具体实施例中主动控制组件的结构示意图；

[0057] 图11为本发明具体实施例中压电晶体的结构示意图。

[0058] 附图中标记及对应的零部件名称：

[0059] 1-密封腔体,11-安装孔,12-定位槽,13-凹槽,14-轴向狭槽,15-紧定螺栓安装孔；2-压紧端盖,21-环形密封凹槽,22-通孔,23-密封垫片；3-旋转轴；4-轴套,41-动压槽；5-整周式平箔片,51-延伸部；6-分瓣式波箔片,61-固定端,62-分离间隙,63-分离边界；7-分瓣式密封单元；8-金属杆；801-大径段；802-小径段；9-压电陶瓷；71-第一磁性件；81-第二磁性件；200-紧定螺栓。

## 具体实施方式

[0060] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白，下面结合实施例和附图，对本发明作进一步的详细说明，本发明的示意性实施方式及其说明仅用于解释本发明，并不作为对本发明的限定。在本申请的描述中，需要理解的是，术语“前”、“后”、“左”、“右”、“上”、“下”、“竖直”、“水平”、“高”、“低”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本申请保护范围的限制。

[0061] 实施例1：

[0062] 如图1至图3所示的基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,包括定子组件、转子组件,所述定子组件包括密封腔体1,可拆卸连接在密封腔体1一端的压紧端盖2;

[0063] 还包括位于密封腔体1内壁的若干分瓣式密封单元7、位于所述分瓣式密封单元7内径侧的弹性密封组件;

[0064] 所述转子组件偏心安装于弹性密封组件内部,转子组件上开设有沿环形方向均布的若干动压槽41,且转子组件与弹性密封组件之间具有间隙;

[0065] 所述转子组件包括偏心穿过密封腔体1的旋转轴3、固定套设在旋转轴3外的轴套4;若干动压槽41环形均布在轴套4外壁,所述动压槽41延伸至轴套4朝向密封高压侧的端面。

[0066] 还包括若干主动控制组件,所述主动控制组件包括位于分瓣式密封单元7外壁的第一磁性件71、位于分瓣式密封单元7外侧的压电晶体、位于压电晶体上的第二磁性件81,所述第一磁性件71与第二磁性件81磁性相斥且具有间隙。

[0067] 如图10、图11所示,所述压电晶体包括金属杆8、包覆在金属杆8外的压电陶瓷9,所述第二磁性件81安装在金属杆8端部。

[0068] 所述金属杆8包括大径段801、小径段802,所述大径段801与小径段802同轴;所述压电陶瓷9包覆在小径段802外,且压电陶瓷9的外径等于大径段801的外径;所述第二磁性件81安装在大径段801远离小径段802的端部。所述密封腔体1上沿圆周方向开设若干与第一磁性件71相对的安装孔11,所述压电晶体位于安装孔11内,且安装孔11孔壁与金属杆8和/或压电陶瓷9之间通过密封圈密封。

[0069] 本实施例中所述轴套4与旋转轴3采用过盈配合。

[0070] 本实施例中动压槽41可以为螺旋槽、直线槽、T型槽等形式,本实施例对动压槽41的槽型不做限定。

[0071] 优选的,动压槽41槽深为3~10 $\mu\text{m}$ 。

[0072] 本领域技术人员应当理解,本申请的密封结构中沿轴向方向,其一端为高压端、另一端为低压端,在工作时高压介质气体需从高压端流入密封动压槽,因此本方案将动压槽延伸至轴套高压端的端面,即是以轴套的高压端面作为起点开设动压槽,使得动压槽在轴套的高压端面为敞口状态,以便于高压流体的快速进入。

[0073] 本实施例中可通过主动控制组件来调节弹性密封组件与轴套之间的相对位置,而弹性密封组件位置的改变将直接决定流体薄膜的形状,流体薄膜形状也将直接影响密封性能和转子系统的稳定性。本结构可实现密封机组的实时主动控制,进一步改善流场特性,从而防止在工作过程中不确定激励诱发的异常振动冲击和摩擦磨损,避免运行状态突然改变导致的密封系统的不稳定,克服多姿态运行方式所导致的不均匀碰撞和磨损问题,实现主动式的调控密封性能,显著提高了柱面密封技术在该领域的适用性。具体的:

[0074] 本实施例的密封结构在正常工作时,高压介质气体从开设动压槽的一端流入密封结构,由于转子组件旋转,在偏心安装带来的收敛楔效应和流体粘性带来的动压楔形效应的双重作用下,形成带压流体薄膜,并在动压槽的槽根径部位达到最大压力,在楔形效应和动压效应的共同作用下,使得转子组件与弹性密封组件之间始终保持一定间隙,从而实现主泄漏通道的封堵。

[0075] 本实施例中的第一磁性件71、第二磁性件81均为磁片。

[0076] 在稳定、无外界电信号、机械变形等影响时,两块磁片之间保持稳定的非接触状态。当外界输入电流作用在金属杆上时,由于电磁感应影响,在金属杆尾端靠近磁片的区域会产生一个磁场,磁场使得两块磁片之间的平衡被破坏,迫使两者之间发生相对运动以达到下一个动态平衡。

[0077] 由于电信号作用在压电陶瓷时产生的微位移被金属杆放大,并传递作用在两磁片之间,使得其推动密封单元变形移动,进一步影响弹性密封组件,使之产生恰当的形变。弹性密封组件位置的改变将直接决定气膜的形状,气膜形状也将直接影响密封性能和系统稳定性。因而本方案通过这一“电信号-机械变形-力-位移”的传递过程,实时改善流场特性,从而防止工作过程中不确定激励诱发的异常振动冲击和摩擦磨损,也避免了运行状态突变导致的密封系统的不稳定。

[0078] 同时,本方案使用压电陶瓷还具有如下优势:由于压电陶瓷具有敏感的特性,可以将极其微弱的机械振动转换成电信号。在密封运行的启停阶段,轴向振动会加剧摩擦磨损和振动冲击的影响,会使得流场发生变化。压电陶瓷可以敏感的感知流场的微小变化,并可以将这个微小变化通过电信号传递出来,这就丰富了柱面密封性能的实时监测以及可视化手段,实现“电压-密封性能-电压-密封性能……”主动化的良性反馈和智能调控。

[0079] 主动控制组件通过密封腔体外侧的安装孔实现与分瓣式密封单元的相互作用,所述主动控制组件与安装孔通过密封圈实现紧固配合,这就使得在外界电信号作用于压电陶瓷和金属杆产生位移变形时,只会沿着径向方向运动,不会产生位移损耗,同时避免了多接触状态下位移的偏移现象。在需要调节弹性密封组件位置时,根据需要对压电陶瓷施加不同电信号即可。

[0080] 在更为优选的实施方式中,第一磁性件71布满分瓣式密封单元7的外壁侧,且磁性处处相当,这样可以实现对于外界作用发生时,第二磁性件81的磁性变化可以作用在密封单元7的整个外壁侧,从而实现密封变形的整体响应。本方案中的“布满”,可以是指第一磁性件紧密的阵列分布、也可以是指磁场的布满。

[0081] 在更为优选的实施方式中,向压电晶体施加控制电压的导线连接在压电陶瓷9上,用于传递反馈电信号的导线连接在金属杆8上。

[0082] 在更为优选的实施方式中,在金属杆8上小径段802的端部设置有信号接口,该信号接口用于连接相关测试反馈系统及供电系统。

[0083] 实施例2:

[0084] 一种基于电磁感应的主动箔片气膜密封结构,在实施例1的基础上,如图1至图11所示,密封腔体1内壁开设若干沿周向分布的凹槽13,所述分瓣式密封单元7安装在凹槽13内;相邻两个凹槽13之间开设轴向狭槽14,所述轴向狭槽14用于安装弹性密封组件。

[0085] 所述弹性密封组件包括整周式平箔片5、位于整周式平箔片5外的分瓣式波箔片6;所述整周式平箔片5与分瓣式波箔片6相互接触。

[0086] 所述分瓣式波箔片6沿周向的两端分别为固定端61、分离边界63;所述固定端61用于固定安装在密封腔体1上;所述分瓣式波箔片6上自分离边界63处开设有若干分离间隙62,所述分离间隙62垂直于分离边界63。

[0087] 所述整周式平箔片5在靠近密封高压侧的一端设置有向外径方向延伸的延伸部51,所述延伸部51夹持固定在密封腔体1和压紧端盖2之间。

[0088] 所述压紧端盖2内侧设置有环形密封凹槽21,所述环形密封凹槽21内放置密封垫片23,所述压紧端盖2和密封腔体1之间通过紧定螺栓连接。

[0089] 本实施例以分瓣式波箔片6与整周式平箔片5固定连接的一端作为固定端,远离固定端的一侧作为自由端,所述的分瓣式波箔片6在远离固定端的一侧开设有若干分离间隙62,所述分离间隙62一端延伸至自由端的分离边界63且与该侧的分离边界63垂直,另一端封闭。

[0090] 密封腔体1内壁周向两相邻凹槽13之间的凸起部分设置有轴向狭槽14,分瓣式波箔片6卡放置在轴向狭槽14中,采用过盈配合,保证分瓣式波箔片6不会从轴向狭槽14中松动或脱落出来。

[0091] 本实施例中沿着径向方向,整周式平箔片的外壁与分瓣式波箔片的内端相互接触,分瓣式波箔片被夹持在整周式平箔片和分瓣式密封单元之间,分瓣式波箔片与整周式平箔片、分瓣式密封单元间均会发生库伦摩擦。由于整周式平箔片表面受到载荷作用以及整周式平箔片和分瓣式波箔片间的库伦摩擦作用,整个弹性密封组件在径向方向和周向方向均可发生微小变形,实现实时控制自适应性调节,从而充分保证密封的稳定性。

[0092] 优选的,整周式平箔片的厚度取0.25~0.35mm。

[0093] 优选的,分瓣式波箔片的厚度取0.25~0.35mm。

[0094] 优选的,为了便于翻边加工延伸部51,可将其设置为锯齿状结构。

[0095] 优选的,压紧端盖2内侧设置有环形密封凹槽21,在环形密封凹槽21内放置密封垫片23,紧定螺栓200穿过通孔22实现端盖和密封环之间的可拆卸连接。同时通过拧紧紧定螺栓200,实现对延伸部的充分挤压夹持,以保证对平箔片高压端的有效固定,防止轴向和径向移动;同时压紧密封垫片23,也能够提高密封性能。

[0096] 优选的,在密封腔体1的端部还设置定位槽12,用于与环形密封凹槽21相匹配,共同容纳密封垫片23。

[0097] 综上所述,本实施例至少具有如下功能:

[0098] (1) 设计了独特的压电晶体,实现密封系统与转子之间间隙的可调控变化,通过调节压电晶体的供电信号,使其随电压和频率的变化产生机械变形,并将该变形转换为在径向方向上发生的微小位移,使分瓣式密封单元产生变形,进一步影响弹性密封组件,使之产生恰当的形变。这种方式实现了密封机组的主动控制运行,使得密封间隙可调,从而显著增大气体润滑膜的楔形空间,减弱交叉耦合效应,增强动压效应,保证密封机组运行保持在最佳工作状态。

[0099] (2) 提供了一种解决现有技术中密封机组运行被动控制、自主调控能力差等问题的方案,通过专门设计的压电晶体来实现柱面气膜密封“主动式”的工作模式和设计方法。通过这一“电信号-机械变形-力-位移”的传递过程,实现实时优化和调控密封性能的目的,从而防止在工作过程中由不确定性激励诱发的异常振动冲击和摩擦磨损,也避免了运行状态突变导致的密封系统的不稳定,极大程度地提高了柱面气膜密封的抗干扰能力。

[0100] (3) 可以将极其微弱的机械振动转换成电信号,因此可以敏感的感知流场的细微变化,这就丰富了柱面密封性能的监测手段,实现“电压-密封性能-电压-密封性能……”主动化的良性反馈和智能调控。

[0101] (4) 通过对分瓣式波箔片进行周向分离,一端固定一端自由,在实际工作过程中分

瓣式波箔片的自由端易形成较大变形,相反的,在波箔片固定端的变形较小,这使得流场周向楔形程度增加,这种分离方式带来的二次楔形效应可有效提升浮升力,具有更加良好的密封性能。

[0102] (5) 弹性密封组件在面临高转速或变工况的工作状态时,可以作出自适应性的变形,这种自适应性变形又可以传递到主动控制组件,促使其发生限定范围内的位置改变,从而影响流场分布。同时弹性密封组件的形变能力还可以包容转子组件在径向方向的偏移或跳动,对不可避免的加工误差和安装误差起到补偿和平衡作用,显著提高了其适用性。

[0103] 以上所述的具体实施方式,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施方式而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

[0104] 需要说明的是,在本文中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其它变体,意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。此外,在本文中使用的术语“连接”在不进行特别说明的情况下,可以是直接相连,也可以是经由其他部件间接相连。

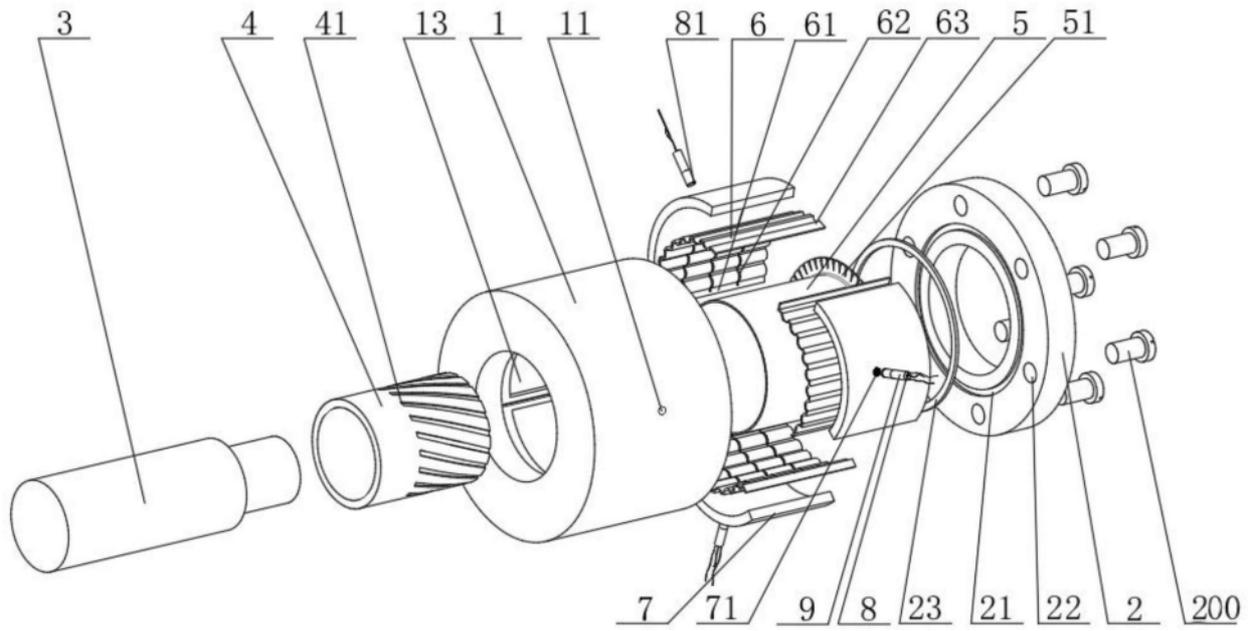


图1

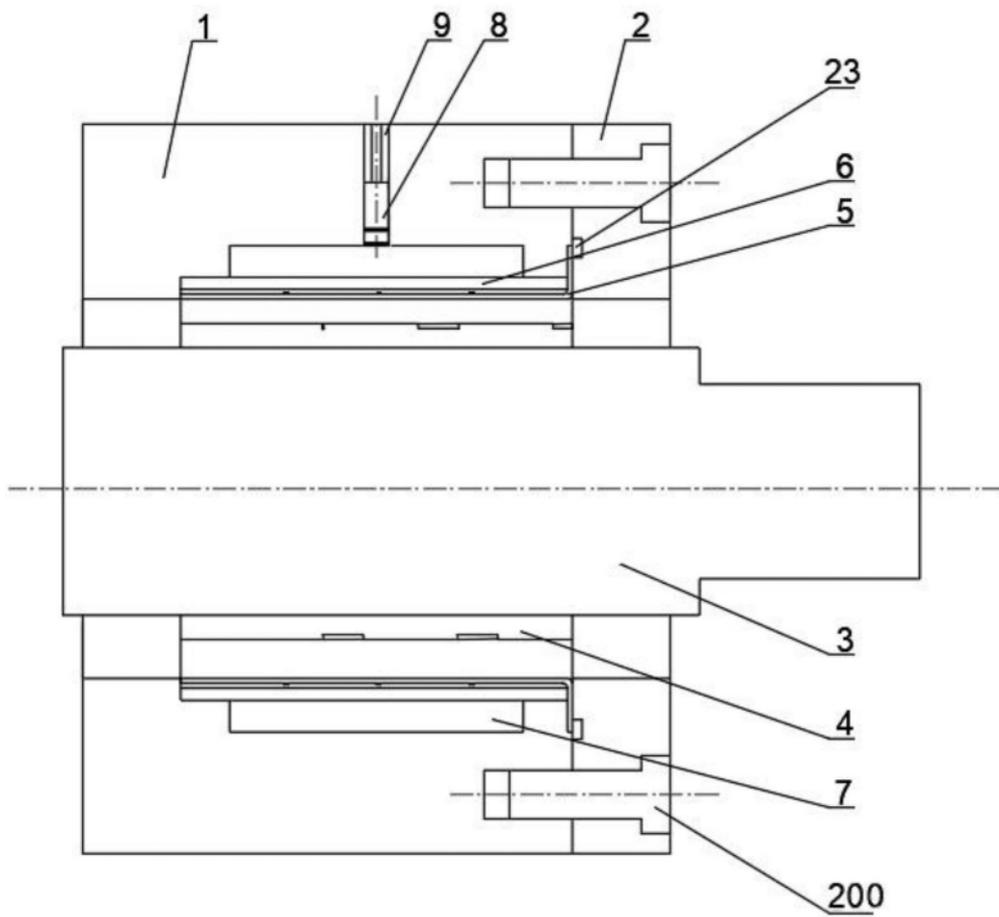


图2

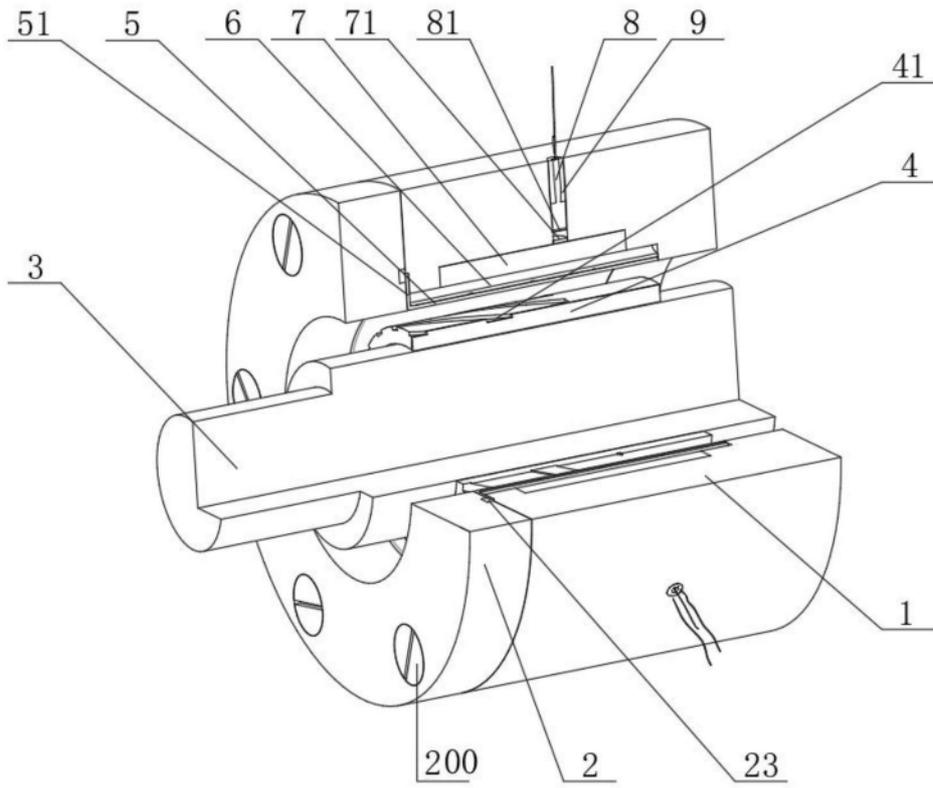


图3

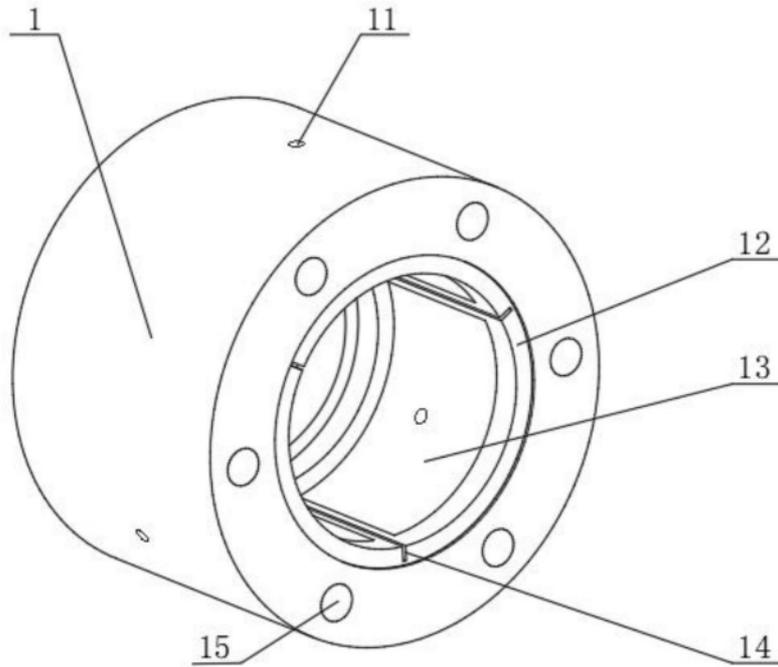


图4

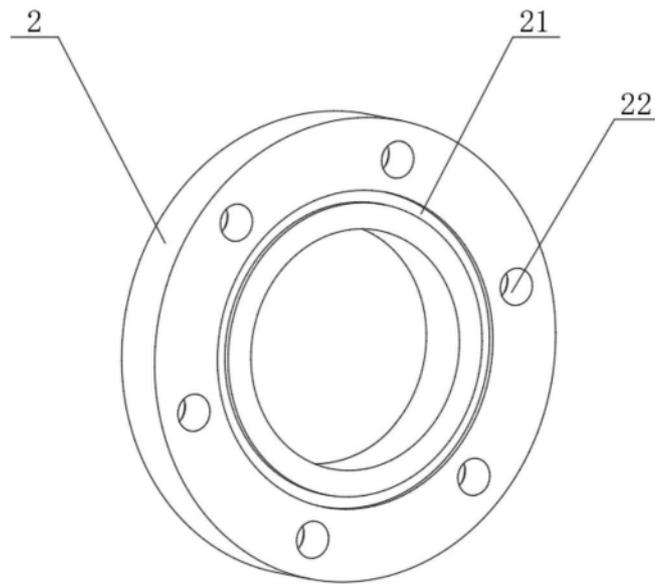


图5

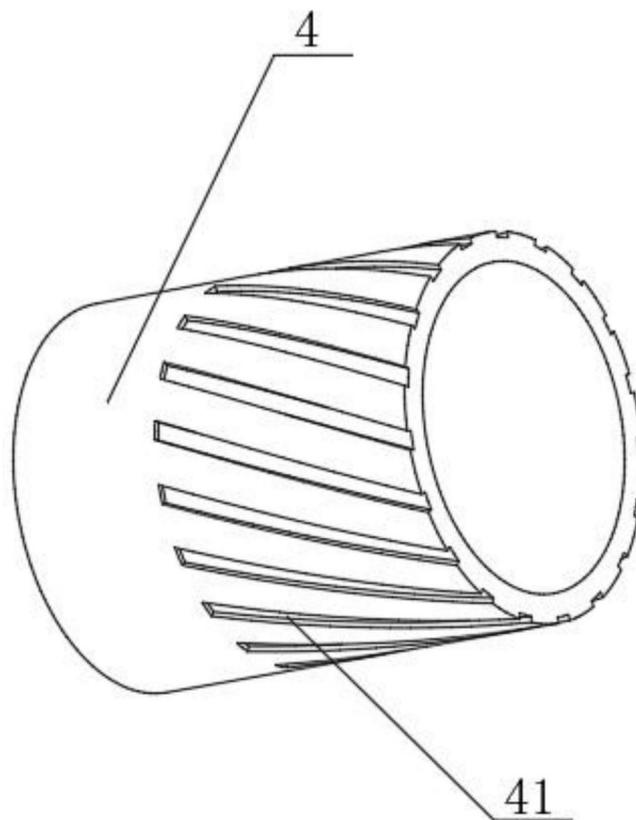


图6

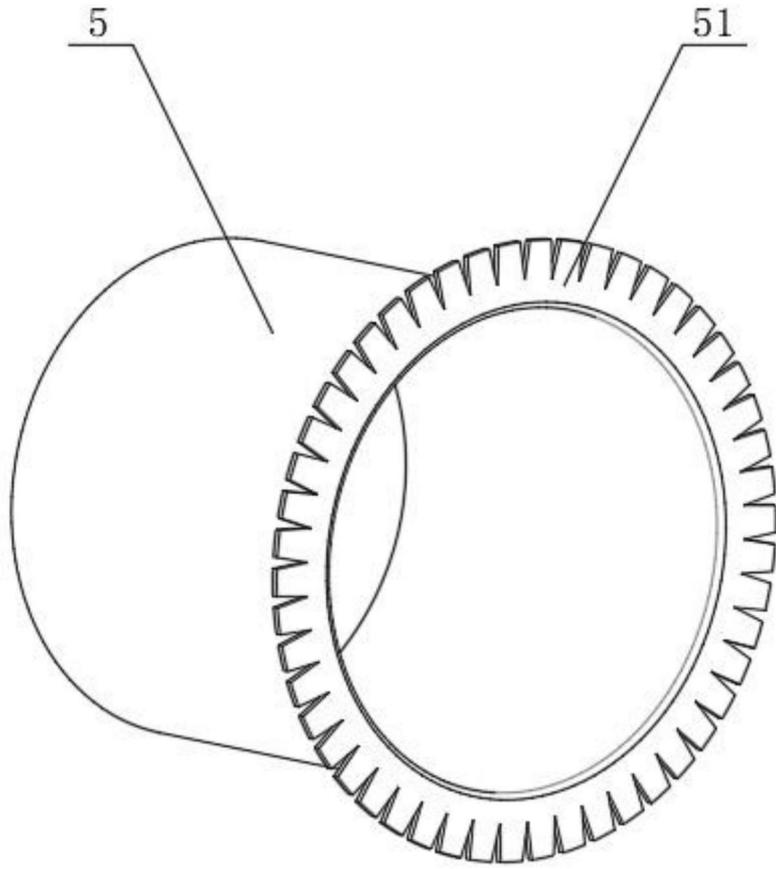


图7

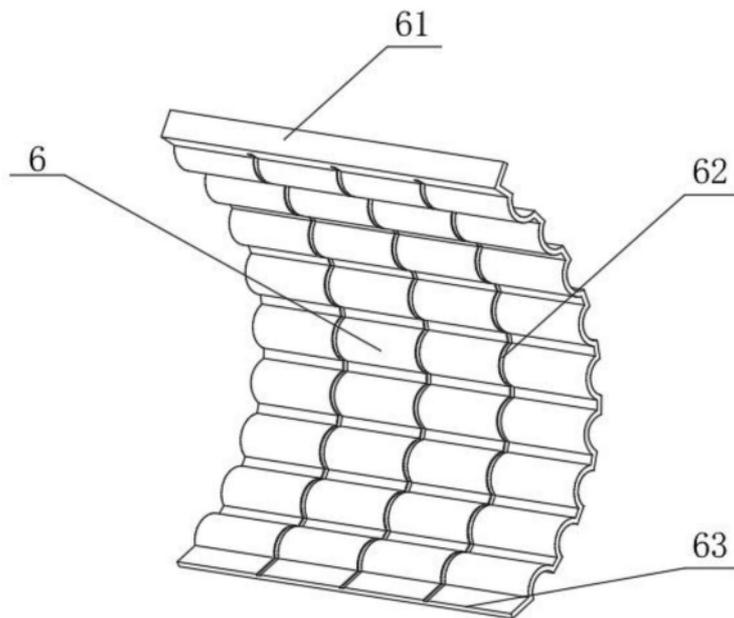


图8

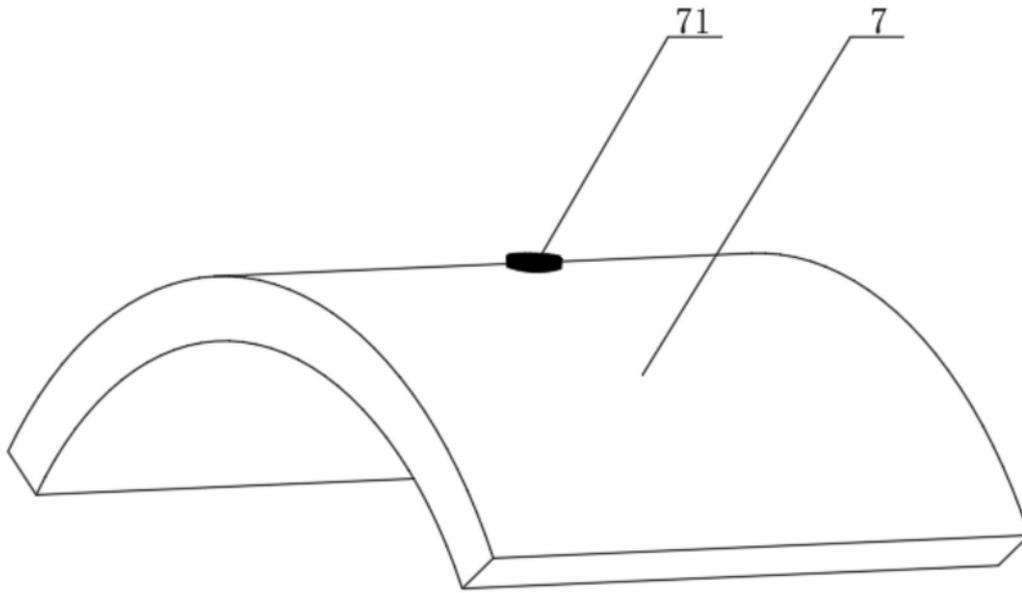


图9

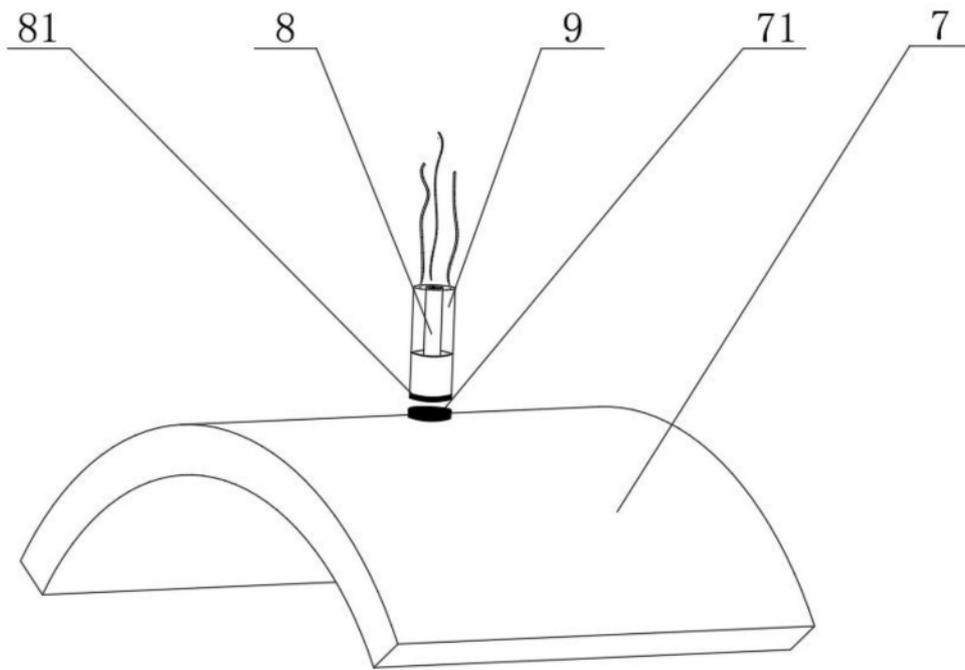


图10

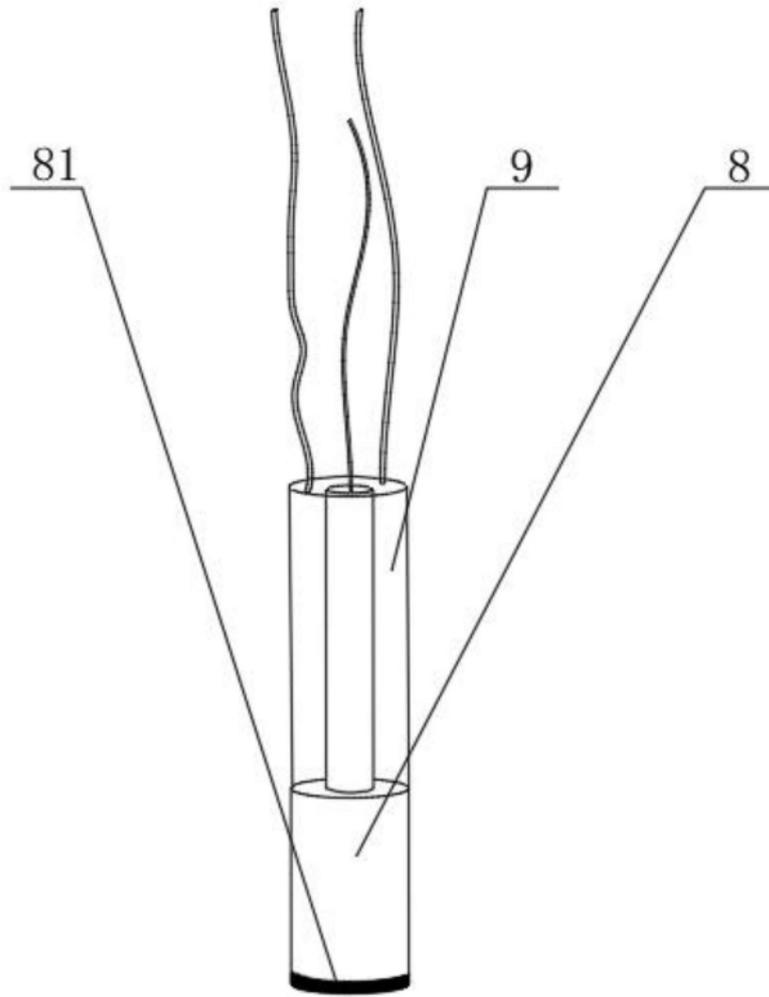


图11