

# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103062317 A

(43) 申请公布日 2013. 04. 24

(21) 申请号 201210575872. 1

(22) 申请日 2012. 12. 19

(71) 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 谭久彬 崔俊宁 王雷

(51) Int. Cl.

F16F 15/027(2006. 01)

G03F 7/20(2006. 01)

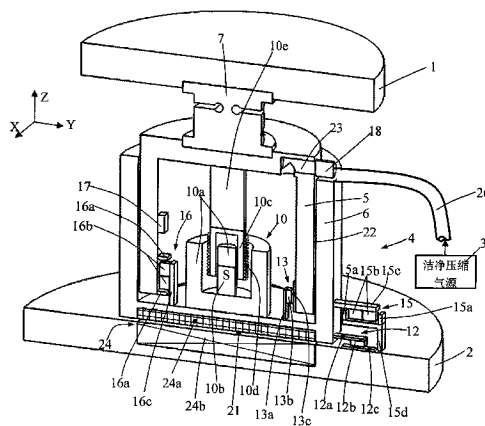
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

## (54) 发明名称

二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器

## (57) 摘要

二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器属于精密隔振技术领域,隔振器主体的套筒与下安装板之间通过磁悬浮平面电机的磁悬浮作用进行承载,活塞筒与套筒之间分别气浮面进行润滑与支撑,上安装板与下安装板之间的角运动自由度通过二维柔性铰链进行解耦,电机、位移传感器、限位开关与控制器、驱动器构成位置闭环反馈控制系统,对上、下安装板的相对位置进行精确控制;本发明具有三维近似零刚度、高定位精度与角度解耦特性,可获得极低的固有频率和突出的低频与超低频隔振性能,从而有效解决超精密测量仪器与加工装备、尤其是步进扫描光刻机中的高性能隔振问题。



1. 一种二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,由上安装板(1)、下安装板(2)、洁净压缩气源(3)、气管(26)和隔振器主体(4)组成,隔振器主体(4)安装在上安装板(1)和下安装板(2)之间,洁净压缩气源(3)通过气管(26)与隔振器主体(4)连接,其特征在于:所述隔振器主体(4)的结构是:套筒(6)的下表面与下安装板(2)通过磁悬浮平面电机(24)的磁悬浮作用形成的磁浮间隙(21)进行承载,活塞筒(5)倒扣安装在套筒(6)内,并与套筒(6)通过径向承载圆柱气浮面(22)润滑与支撑,二维柔性铰链(7)安装在活塞筒(5)和上安装板(1)之间,Z向音圈电机(10)、Z向位移传感器(13)与Z向限位开关(16)安装在活塞筒(5)与套筒(6)之间,X向位移传感器(11)、X向限位开关(14)与Y向位移传感器(12)、Y向限位开关(15)安装在套筒(6)与下安装板(2)之间,Z向音圈电机(10)的驱动力方向和磁悬浮平面电机(24)的X向驱动力、Y向驱动力方向两两互相垂直,Z向位移传感器(13)、Z向限位开关(16)的作用线方向与Z向音圈电机(10)的驱动力方向一致,X向位移传感器(11)、X向限位开关(14)的作用线方向与磁悬浮平面电机(24)的X向驱动力一致,Y向位移传感器(12)、Y向限位开关(15)的作用线方向与磁悬浮平面电机(24)的Y向驱动力方向一致;X、Y、Z向位移传感器(11、12、13)和X、Y、Z向限位开关(14、15、16)分别与控制器(19)的信号输入端连接,控制器(19)的信号输出端与驱动器(20)的信号输入端连接,驱动器(20)的信号输出端分别与磁悬浮平面电机(24)、Z向音圈电机(10)连接。

2. 根据权利要求1所述的二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,其特征在于:所述活塞筒(5)内设有气体压力传感器(17),活塞筒(5)上设有进气口(23)和电磁阀(18),气体压力传感器(17)与控制器(19)的信号输入端连接,驱动器(20)的信号输出端与电磁阀(18)连接。

3. 根据权利要求1所述的二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,其特征在于:所述磁悬浮平面电机(24)的配置方式是在套筒(6)底面侧壁安装无导线连接的磁悬浮平面电机定子(24a),在下安装板上表面侧壁相对配装磁悬浮平面电机动子(24b)。

4. 根据权利要求1所述的二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,其特征在于:所述Z向音圈电机(10)为圆筒型音圈电机或平板型音圈电机。

5. 根据权利要求1所述的二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,其特征在于:所述X、Y、Z向位移传感器(11、12、13)为光栅尺、磁栅尺、容栅尺或直线式电位器。

6. 根据权利要求1所述的二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,其特征在于:所述X、Y、Z向限位开关(14、15、16)为机械式限位开关、霍尔式限位开关或光电式限位开关。

7. 根据权利要求1所述的二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,其特征在于:所述活塞筒(5)内气体压力为0.1MPa~0.8MPa。

8. 根据权利要求3所述的二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,其特征在于:所述磁悬浮平面电机定子(24a)与磁悬浮平面电机动子(24b)之间的磁浮间隙(21)为0.01mm~1mm。

## 二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器

### 技术领域

[0001] 本发明属于精密隔振技术领域,主要涉及一种二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器。

### 背景技术

[0002] 随着超精密加工与测量精度的不断提高,环境振动成为制约超精密加工装备与测量仪器精度和性能提高的重要因素。尤其是步进扫描光刻机为代表的超大规模集成电路加工装备,技术密集度与复杂度极高,关键技术指标均达到了现有技术的极限,代表了超精密加工装备的最高水平,超精密隔振成为此类装备中的核心关键技术;步进扫描光刻机的线宽已达到 22nm 及以下,硅片定位精度与套刻精度均达到几纳米,而工件台运动速度达到 1m/s 以上,工件台加速度达到重力加速度的几十倍,这对现有的隔振技术提出了新的挑战。首先,光刻机需要为计量系统与光刻物镜提供“超静”的工作环境,同时又需要驱动工件台以高速度与高加速度运动,这对隔振系统的隔振性能提出了极其苛刻的要求,其三个方向的固有频率均需要达到 1Hz 以下;其次,光刻机各部件之间的相对位置,例如光刻物镜与硅片表面的距离,均具有非常严格的要求,且处于位置闭环反馈控制系统的控制之下,要求隔振器上、下安装板之间的相对位置精度达到 10  $\mu$ m 量级,传统隔振器的定位精度远远不能满足要求。

[0003] 根据隔振理论,被动式隔振器的固有频率与刚度成正比、与负载质量成反比,因此在负载质量一定的前提下,降低隔振器的刚度是降低固有频率、提高低频与超低频隔振性能的有效途径。传统空气弹簧等形式的隔振器存在静态承载能力与刚度的固有矛盾,同时受材料特性、结构刚度等因素制约,要进一步降低其刚度、尤其是水平向刚度十分困难。针对这一问题,研究人员将“摆”式结构引入到空气弹簧隔振器中,达到降低隔振器水平刚度的目的(1.Nikon Corporation.Vibration Isolator With Low Lateral Stiffness. 美国专利公开号:US20040065517A1;2. U. S. Philips Corporation.Positioning Device with a Force Actuator System for Compensating Center-of-gravity Displacements, and Lithographic Device Provided with Such A Positioning Device. 美国专利号:US005844664A)。该方法能够在一定程度上降低空气弹簧隔振器的水平刚度,提升其低频隔振性能。该方法存在的问题在于:1) 受材料特性与结构刚度制约,隔振器垂向与水平向刚度降低的幅度有限;2) 空气弹簧隔振器的垂向与水平向定位精度均很差,无法满足光刻工艺的要求;3) 要达到较低的水平刚度需要较大的摆长,导致隔振器高度过大,容易发生弦膜共振,稳定性差。

[0004] 通过对现有空气弹簧隔振器技术方案的分析可见,现有空气弹簧隔振器难以满足光刻机对超低刚度与高定位精度的要求。德国 IDE 公司提出了一种摒弃传统橡胶空气弹簧的隔振器技术方案(1.Integrated Dynamics Engineering GmbH.Isolatorgeometrie Eines Schwingungsisolationsystem. 欧洲专利号:EP1803965A2;2.Integrated Dynamics Engineering GmbH.Schwingungsisolationsystem Mit Pneumatischem Tiefpassfilter.

欧洲专利号 :EP1803970A2 ;3. Integrated Dynamics Engineering GmbH. Air Bearing with Consideration of High-Frequency Resonances. 美国专利公开号 :US20080193061A1)。该方案采用垂向与水平向气浮面对各方向的振动进行解耦与隔振,可以达到极低的刚度与固有频率。该方案存在的问题在于 :1) 已公开技术方案中,隔振器无法实现精确定位 ;2) 专利 EP1803965A2 中,上、下安装板之间不存在绕水平轴旋转的角运动自由度,该方向的角刚度与固有频率都很高 ;专利 EP1803970A2 与 US20080193061A1 采用橡胶块为上、下安装板提供绕水平轴旋转的角运动自由度,但由于橡胶块角刚度很大,无法有效地进行角运动自由度解耦,角运动自由度解耦机构部件之间存在摩擦力而引入附加刚度,制约隔振性能。

[0005] 荷兰 ASML 公司也提出了类似的隔振器技术方案 (1. U.S. Philips Corp, ASM Lithography B. V. Pneumatic Support Device with A Controlled Gas Supply, and Lithographic Device Provided with Such A Support Device. 美国专利号 :US006144442A ;2. Koninklijke Philips Electronics N. V., ASM Lithography B. V. Lithographic Pneumatic Support Device with Controlled Gas Supply. 国际专利公开号 :W099/22272 ;3. ASML Netherlands B. V. Support Device, Lithographic Apparatus, and Device Manufacturing Method Employing A Supporting Device, and A Position Control System Arranged for Use in A Supporting Device. 美国专利号 :US007084956B2 ;4. ASML Netherlands B. V. Support Device, Lithographic Apparatus, and Device Manufacturing Method Employing A Supporting Device and A Position Control System Arranged for Use in A Supporting Device. 欧洲专利号 :EP1486825A1)。专利 US006144442A 与 W099/22272 中对气源压力进行闭环反馈控制,达到提高隔振器的稳定性与性能的目的 ;专利 US007084956B2 与 EP1486825A1 中在上安装板上设有振动传感器,同时引入参考振动系统,通过控制算法提升隔振器的隔振性能。但所提出技术方案仍然没有解决隔振器的精确定位与上、下安装板的角运动自由度解耦问题。

## 发明内容

[0006] 本发明的目的是针对超精密测量仪器与加工装备、尤其是步进扫描光刻机等超大规模集成电路加工装备对隔振器低固有频率、高定位精度的迫切要求,提供一种二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,隔振器具有三维近似零刚度与极低的固有频率,上、下安装板之间能够进行精确定位与角度解耦,从而有效解决超精密测量仪器与加工装备、尤其是步进扫描光刻机中的精密隔振问题。

[0007] 本发明的目的是这样实现的 :

[0008] 一种二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器,由上安装板、下安装板、洁净压缩气源、气管和隔振器主体组成,隔振器主体安装在上安装板和下安装板)之间,洁净压缩气源通过气管与隔振器主体连接,所述隔振器主体的结构是 :套筒的下表面与下安装板通过磁悬浮平面电机的磁悬浮作用形成的磁浮间隙进行承载,活塞筒倒扣安装在套筒内,并与套筒通过径向承载圆柱气浮面润滑与支撑,二维柔性铰链安装在活塞筒和上安装板之间,Z 向音圈电机、Z 向位移传感器与 Z 向限位开关安装在活塞筒与套筒之间,X 向音圈电机、X 向位移传感器、X 向限位开关与 Y 向音圈电机、Y 向位移传感器、Y 向限位开关安装在套筒与下安装板之间,Z 向音圈电机的驱动力方向和磁悬浮平面电机的 X 向驱动力、

Y 向驱动力方向两两互相垂直, Z 向位移传感器、Z 向限位开关的作用线方向与 Z 向音圈电机的驱动力方向一致, X 向位移传感器、X 向限位开关的作用线方向与磁悬浮平面电机的 X 向驱动力一致, Y 向位移传感器、Y 向限位开关的作用线方向与磁悬浮平面电机的 Y 向驱动力方向一致; X、Y、Z 向位移传感器和 X、Y、Z 向限位开关分别与控制器的信号输入端连接, 控制器的信号输出端与驱动器的信号输入端连接, 驱动器的信号输出端分别磁悬浮平面电机、Z 向音圈电机连接。

[0009] 所述活塞筒内设有气体压力传感器, 活塞筒上设有进气口和电磁阀, 气体压力传感器与控制器的信号输入端连接, 驱动器的信号输出端与电磁阀连接。

[0010] 所述磁悬浮平面电机的配置方式是在套筒底面侧壁安装无导线连接的磁悬浮平面电机定子, 在下安装板上表面侧壁相对配装磁悬浮平面电机定子。

[0011] 所述 Z 向音圈电机为圆筒型音圈电机或平板型音圈电机。

[0012] 所述 X、Y、Z 向位移传感器为光栅尺、磁栅尺、容栅尺或直线式电位器。

[0013] 所述 X、Y、Z 向限位开关为机械式限位开关、霍尔式限位开关或光电式限位开关。

[0014] 所述活塞筒内气体压力为 0.1MPa ~ 0.8MPa。

[0015] 所述磁悬浮平面电机定子与磁悬浮平面电机定子之间的磁浮间隙为 0.01mm ~ 1mm。

[0016] 本发明的技术创新性及产生的良好效果在于:

[0017] (1) 本发明摒弃了传统基于弹性元件 / 机构的隔振器技术方案, 采用磁悬浮平面电机、径向承载圆柱气浮面分别对水平方向与垂向振动进行解耦与隔振, 磁悬浮承载方式在电机无定位驱动力输出时水平刚度近似为零, 与气浮面一起, 可使隔振器获得近似零刚度特性和突出的超低频隔振性能, 解决了现有技术受结构刚度、材料特性限制, 刚度难以进一步降低, 刚度与稳定性不能兼顾的问题。这是本发明区别于现有技术的创新点之一。

[0018] (2) 本发明采用位移传感器尺、限位开关、控制器、驱动器与电机构成位置闭环反馈控制系统, 对上、下安装板之间的相对位置进行精确控制, 定位精度可达到 10 μm 及以上, 可有效解决现有技术方案定位精度低、定位精度与刚度及隔振性能不能兼顾的问题。这是本发明区别于现有技术的创新点之二。

[0019] (3) 本发明采用二维柔性铰链对上、下安装板之间的角运动进行解耦, 二维柔性铰链无摩擦、无磨损, 引入的附加角刚度可以忽略, 且具有很高的承载能力, 可有效解决现有采用弹性体进行角度解耦的方法存在的摩擦与磨损、引入较大附加刚度等问题。这是本发明区别于现有技术的创新点之三。

[0020] (4) 本发明采用气体压力传感器、电磁阀与控制器、驱动器等构成压力闭环反馈控制系统, 精确控制套筒内的气体压力使之保持恒定, 对隔振器的轴向载荷进行重力平衡与补偿, 在径向承载圆柱气浮面的作用下, 承载负载重力的活塞筒可沿套筒以零刚度自由上下滑动, 从而实现理想的重力平衡与零刚度隔振效果。这是本发明区别于现有技术的创新点之四。

[0021] (5) 本发明采用主动执行器对上、下安装板之间的相对位置和活塞筒内的气体压力进行主动控制, 隔振器参数可根据被隔振对象特点与工作环境变化进行实时调节, 从而适应不同的工况, 具有较好的灵活性、适应性与稳定性。这是本发明区别于现有技术的创新点之五。

## 附图说明

- [0022] 图 1 为二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器的结构示意图；
- [0023] 图 2 为二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器的剖面结构示意图；
- [0024] 图 3 为两个一维柔性铰链正交叠加构成一个二维柔性铰链的结构示意图；
- [0025] 图 4 为圆柱形二维柔性铰链的结构示意图；
- [0026] 图 5 为二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器的控制结构框图；
- [0027] 图 6 为活塞筒上圆柱气浮面节流孔的示意图。
- [0028] 图中件号说明：1 上安装板、2 下安装板、3 洁净压缩气源、4 隔振器主体、5 活塞筒、6 套筒、7 二维柔性铰链、10Z 向音圈电机、10a Z 向电机铁轭、10b Z 向电机磁钢、10c Z 向电机线圈骨架、10d Z 向电机线圈、10e Z 向电机过渡件、11X 向位移传感器、12Y 向位移传感器、12a Y 向光栅读数头过渡件、12b Y 向光栅读数头、12c Y 向玻璃光栅尺、13Z 向位移传感器、13a Z 向光栅读数头过渡件、13b Z 向光栅读数头、13c Z 向玻璃光栅尺、14X 向限位开关、15Y 向限位开关、15aY 向限位块、15b Y 向霍尔开关、15c Y 向限位开关过渡件、15dY 向限位块过渡件、16Z 向限位开关、16a Z 向限位块、16b Z 向霍尔开关、16c Z 向限位开关过渡件、17 气体压力传感器、18 电磁阀、19 控制器、20 驱动器、21 磁浮间隙、22 径向承载圆柱气浮面、23 进气口、24 磁悬浮平面电机、24a 磁悬浮平面电机转子、24b 磁悬浮平面电机定子、25 圆柱气浮面节流孔、26 气管、27 圆柱形二维柔性铰链。

## 具体实施方式

[0029] 下面结合附图给出本发明的具体实施例。

[0030] 一种二维柔性铰链角度解耦与磁悬浮平面驱动定位的隔振器，由上安装板 1、下安装板 2、洁净压缩气源 3、气管 26 和隔振器主体 4 组成，隔振器主体 4 安装在上安装板 1 和下安装板 2 之间，洁净压缩气源 3 通过气管 26 与隔振器主体 4 连接，所述隔振器主体 4 的结构是：套筒 6 的下表面与下安装板 2 通过磁悬浮平面电机 24 的磁悬浮作用形成的磁浮间隙 21 进行承载，活塞筒 5 倒扣安装在套筒 6 内，并与套筒 6 通过径向承载圆柱气浮面 22 润滑与支撑，二维柔性铰链 7 安装在活塞筒 5 和上安装板 1 之间，Z 向音圈电机 10、Z 向位移传感器 13 与 Z 向限位开关 16 安装在活塞筒 5 与套筒 6 之间，X 向位移传感器 11、X 向限位开关 14 与 Y 向位移传感器 12、Y 向限位开关 15 安装在套筒 6 与下安装板 2 之间，Z 向音圈电机 10 的驱动力方向和磁悬浮平面电机 24 的 X 向驱动力、Y 向驱动力方向两两互相垂直，Z 向位移传感器 13、Z 向限位开关 16 的作用线方向与 Z 向音圈电机 10 的驱动力方向一致，X 向位移传感器 11、X 向限位开关 14 的作用线方向与磁悬浮平面电机 24 的 X 向驱动力一致，Y 向位移传感器 12、Y 向限位开关 15 的作用线方向与磁悬浮平面电机 24 的 Y 向驱动力方向一致；X、Y、Z 向位移传感器 11、12、13 和 X、Y、Z 向限位开关 14、15、16 分别与控制器 19 的信号输入端连接，控制器 19 的信号输出端与驱动器 20 的信号输入端连接，驱动器 20 的信号输出端分别与磁悬浮平面电机 24、Z 向音圈电机 10 连接。

[0031] X、Y、Z 向位移传感器 11、12、13 对 X、Y、Z 向音圈电机 8、9、10 输出的位移进行测量，X、Y、Z 向限位开关 14、15、16 对 X、Y、Z 向音圈电机 8、9、10 运动的行程进行限制；控制

器 19 根据 X、Y、Z 向位移传感器 11、12、13 与 X、Y、Z 向限位开关 14、15、16 的反馈信号,控制 X、Y、Z 向音圈电机 8、9、10 对上、下安装板 1、2 之间的相对位置进行精确控制。

[0032] 所述活塞筒 5 内设有气体压力传感器 17,活塞筒 5 上设有进气口 23 和电磁阀 18,气体压力传感器 17 与控制器 19 的信号输入端连接,驱动器 20 的信号输出端与电磁阀 18 连接。

[0033] 所述磁悬浮平面电机 24 的配置方式是在套筒 6 底面侧壁安装无导线连接的磁悬浮平面电机定子 24a,在下安装板上表面侧壁相对配装磁悬浮平面电机转子 24b。

[0034] 所述 Z 向音圈电机 10 为圆筒型音圈电机或平板型音圈电机。

[0035] 所述 X、Y、Z 向位移传感器 11、12、13 为光栅尺、磁栅尺、容栅尺或直线式电位器。

[0036] 所述 X、Y、Z 向限位开关 14、15、16 为机械式限位开关、霍尔式限位开关或光电式限位开关。

[0037] 所述活塞筒 5 内气体压力为 0.1MPa ~ 0.8MPa。

[0038] 所述磁悬浮平面电机定子 24a 与磁悬浮平面电机转子 24b 之间的磁浮间隙 21 为 0.01mm ~ 1mm。

[0039] 下面结合图 1 ~ 图 2、图 5 给出本发明的一个实施例。本实施例中,零刚度隔振器工作时,下安装板 2 安装在地基、仪器的基座或基础框架上,上安装板 1 与被隔振的负载连接。Z 向音圈电机 10 采用圆筒型音圈电机,其主要包括 Z 向电机铁轭 10a、Z 向电机磁钢 10b、Z 向电机线圈骨架 10c、Z 向电机线圈 10d 和 Z 向电机过渡件 10e 等部件。Z 向电机铁轭 10a 和 Z 向电机线圈骨架 10c 为圆筒形,Z 向电机磁钢 10b 为圆柱形,Z 向电机线圈 10d 绕于 Z 向电机线圈骨架 10c 上,Z 向电机过渡件 10e 提供 Z 向电机线圈骨架 10c 的安装结构。Z 向电机铁轭 10a 和 Z 向电机磁钢 10b 构成电机定子,Z 向电机线圈骨架 10c、Z 向电机线圈 10d 构成电机的转子。Z 向电机过渡件 10e 提供 Z 向电机线圈骨架 10c 的安装结构。电机工作时线圈中通以电流,根据电磁理论,通电线圈在磁场中会受到洛伦兹力作用,通过控制电流的大小和方向可以控制电机输出驱动力的大小和方向。

[0040] X、Y、Z 向位移传感器 11、12、13 采用光栅尺。以 Z 向位移传感器 13 为例,其主要包括 Z 向光栅读数头过渡件 13a、Z 向光栅读数头 13b 和 Z 向玻璃光栅尺 13c 等部件,Z 向光栅读数头过渡件 13a 提供 Z 向光栅读数头 13b 的安装结构。光栅尺工作时,Z 向光栅读数头 13b 能够将其与 Z 向玻璃光栅尺 13c 的相对位移检测出来,并通过信号导线送给控制器 19。

[0041] X、Y、Z 向限位开关 14、15、16 采用霍尔式限位开关。以 Z 向限位开关 16 为例,其主要包括 Z 向限位块 16a、Z 向霍尔开关 16b 和 Z 向限位开关过渡件 16c 等部件。两个 Z 向霍尔开关 16b 背靠背安装,两个 Z 向限位块 16a 为金属材料,与 Z 向霍尔开关 16b 的敏感端相对安装。Z 向限位开关过渡件 16c 提供 Z 向霍尔开关 16b 的安装结构。限位开关工作时,当 Z 向霍尔开关 16b 接近 Z 向限位块 16a 时,Z 向霍尔开关 16b 给出限位信号,并通过信号导线送给控制器 19。

[0042] 本实施例中,Z 向音圈电机 10、Z 向位移传感器 13 和 Z 向限位开关 16 均安装在活塞筒 5 和套筒 6 之间,且安装在活塞筒 5 内部。

[0043] 隔振器对负载的承载采用如下方式实现:洁净压缩气源 3 通过气管 26、经电磁阀 18、进气口 23 向活塞筒 5 内输送洁净压缩空气。控制器 19 根据气体压力传感器 17 的反馈

信号,控制电磁阀 18 的开度,调节输入到活塞筒 5 内的气体流量,从而调节活塞筒 5 内洁净压缩空气的压力,使洁净压缩空气对活塞筒 5 向上的作用力与负载、活塞筒 5 及加载于活塞筒 5 上的其它零部件的重力相平衡,实现理想的重力补偿与零刚度隔振效果。

[0044] 本实施例中,活塞筒 5 内洁净压缩空气的压力设为 0.4Mpa,活塞筒 5 下表面的有效半径为 100mm,则单个隔振器承载的质量为  $m = p \times \pi r^2 / g \approx 1282\text{kg}$ ,其中  $p$  为气体压力, $p = 0.4\text{Mpa}$ , $r$  为活塞筒 5 下表面的有效半径, $r = 100\text{mm}$ , $g$  为重力加速度, $g = 9.8\text{N}/\text{m}^2$ 。

[0045] 图 3 给出二维柔性铰链的一个实施例。本实施例中,二维柔性铰链 7 为两个一维柔性铰链正交叠加构成。

[0046] 图 4 给出二维柔性铰链的另一个实施例。本实施例中,圆柱形二维柔性铰链 27 加工成中间细、两端粗的圆柱形式。

[0047] 图 6 给出活塞筒上圆柱气浮面节流孔的一个实施例。本实施例中,活塞筒 5 侧壁上沿圆周方向均布两排圆柱气浮面节流孔 25,每排圆柱气浮面节流孔 25 的数量为 8 个,直径为  $\phi 0.2\text{mm}$ 。



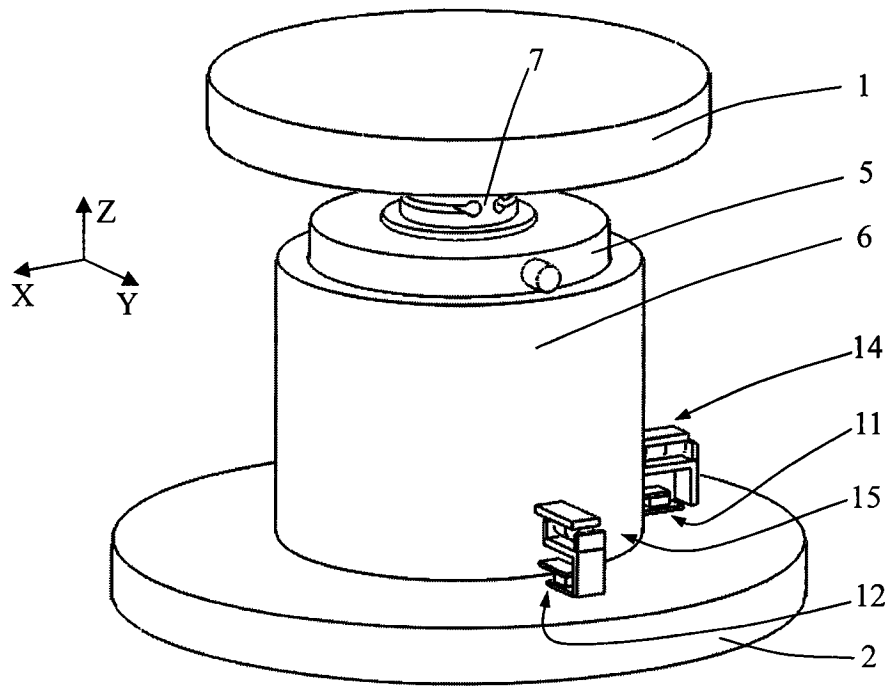


图 1

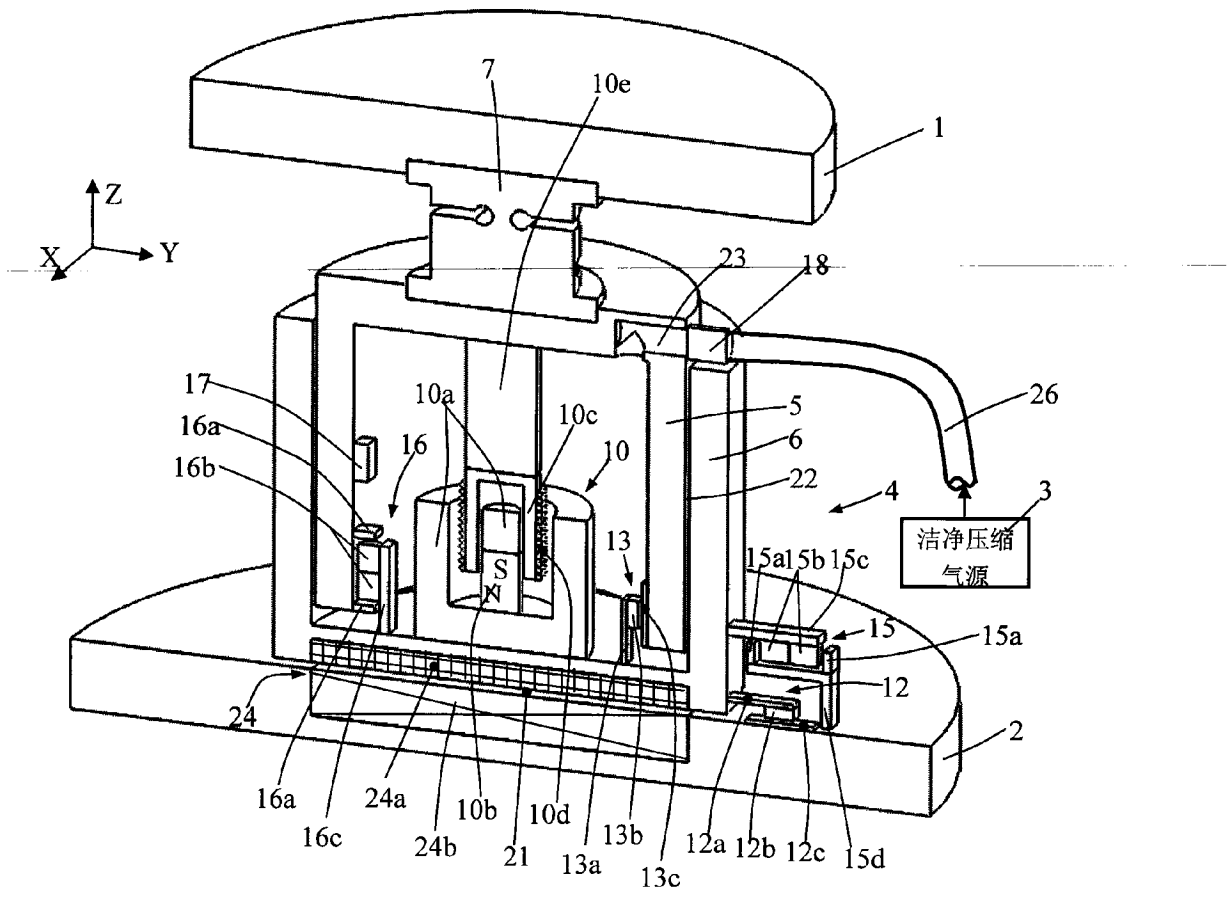


图 2

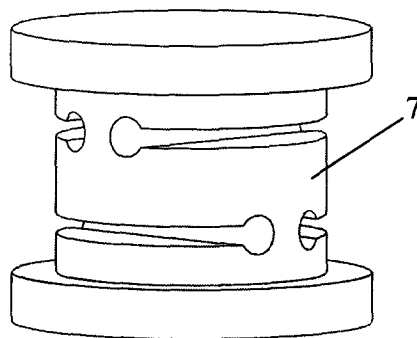


图 3

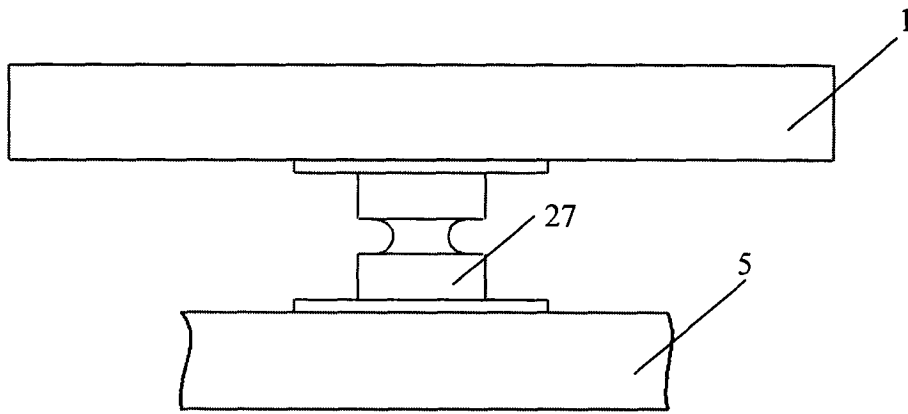


图 4

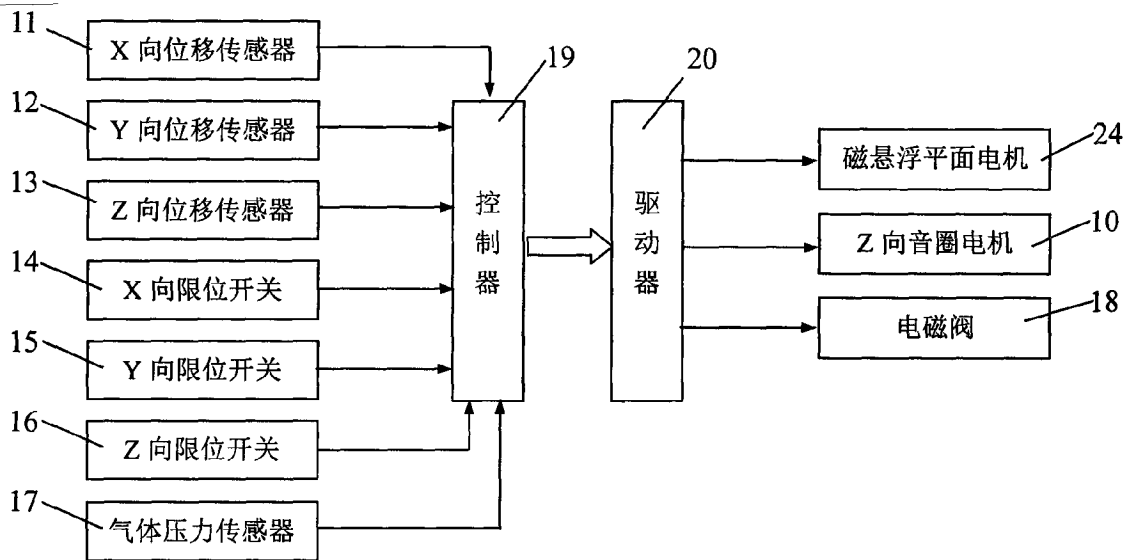


图 5

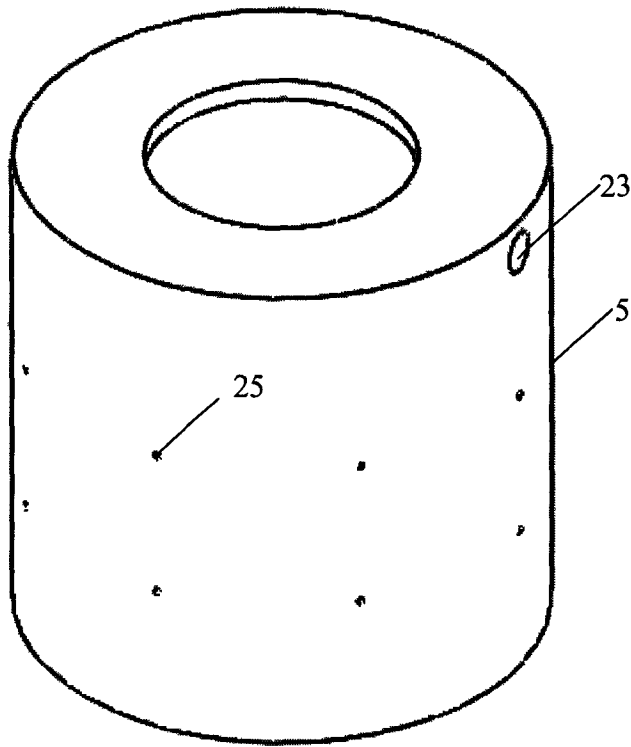


图 6