



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116088344 A

(43) 申请公布日 2023. 05. 09

(21) 申请号 202211634783.X

(22) 申请日 2022.12.19

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100089 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 章楚 贺建武 陈明伟 杨超
段俐 康琦

(74) 专利代理机构 北京维正专利代理有限公司
11508
专利代理师 陈翠杰

(51) Int. Cl.
G05B 17/02 (2006.01)

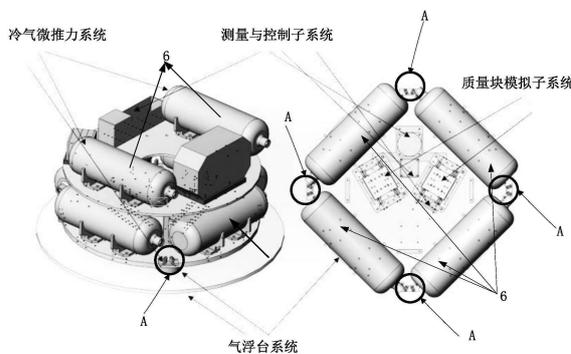
权利要求书2页 说明书6页 附图8页

(54) 发明名称

一种无拖曳控制半物理仿真系统

(57) 摘要

本发明公开了一种无拖曳控制半物理仿真装置,包括质量块模拟子系统、冷气微推力子系统、测量与控制子系统、气浮台子系统;该气浮台子系统整体悬浮布设在大理石平台上方,用于模拟在轨卫星的本体运动;该气浮台子系统设有第一级台面和第二级台面,该第一级台面上布设有两套质量块模拟子系统、用于模拟在轨卫星敏感轴方向的运动;该第一级台面上还布设有冷气微推力子系统;该第二级台面上布设有测量与控制子系统,该测量与控制子系统用于测量气浮台子系统的气浮台运动状态和质量块模拟子系统的质量块运动状态,并输出控制指令给微推力器,控制系统状态。本发明解决了之前的卫星模拟内部都是没有活动部件的,现有技术没有先例可以借鉴的难题。



1. 一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在於:该装置工作在实验室大气环境下,包括质量块模拟子系统、冷气微推力子系统、测量与控制子系统、气浮台子系统;该无拖曳控制半物理仿真装置的最下层为大理石平台、大理石下方放置三个调整垫脚,用于调整大理石平台水平度;该气浮台子系统整体悬浮布设在大理石平台上方且承载重量大于150Kg,该气浮台子系统用于模拟在轨卫星的本身运动;该气浮台子系统设有第一级台面和第二级台面,该第一级台面上布设有两套质量块模拟子系统、该两套质量块模拟子系统的质量块悬浮布设在第一级台面上表面,该两套质量块模拟子系统用于模拟在轨卫星敏感轴方向的运动;该第一级台面上还布设有冷气微推力子系统、该冷气微推力子系统是无拖曳控制半物理仿真装置的主要执行器;该第二级台面上布设有测量与控制子系统,该测量与控制子系统用于测量气浮台子系统的气浮台运动状态和质量块模拟子系统的质量块运动状态,并输出控制指令给微推力器,控制系统状态。

2. 根据权利要求1所述一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在於:所述气浮台子系统下表面安装有四个气足组件,该四个气足组件悬浮于大理石台面上方;该气足组件包括气浮轴承、以及附属调节机构;该气浮轴承用于在大理石台面和气浮轴承之间设形成一层压力气膜,该压力气膜使得气浮轴承和大理石台面两者的接触面之间充满了压缩气体、摩擦系数小,使得启动时所需的力矩小;该附属调节机构和气浮轴承的接触部位通过气浮轴承上表面的球窝和附属调节机构的球头相配合,使得所述气浮轴承能够更好的适应台面的倾斜度。

3. 根据权利要求1所述一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在於:所述冷气微推力子系统包括气浮台子系统第一级台面上的4个储气瓶(6)和第二级台面上的2个储气瓶(6)、以及第一级台面上4组冷气微推力器;该第一级台面上4个储气瓶(6)用于给气浮台子系统的气足组件供气,该第二级台面上的2个储气瓶(6)用于给所述冷气微推力子系统的推力头(9)供气;该4个储气瓶(6)互为90度夹角沿着气浮台子系统第一级台面周向布设;该4组冷气微推力器的每1组布设在相邻2个互为垂直的储气瓶端面构成的90度夹角的空隙中;每组推力器包含2个推力头,该2个推力头的推力方向分别从大半径指向小半径、且2个推力头相互之间成夹角布设:沿着径向小半径方向的2个推力头的距离近、沿着径向大半径方向的2个推力头的距离远,且2个推力头推力指向汇聚在一点。

4. 根据权利要求3所述一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在於:单个推力头推力范围0~50mN,推力分辨力0.1mN,推力噪声 $0.1\text{mN}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

5. 根据权利要求3所述一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在於:所述每一组推力器的2个推力头之间的角度不限、推力大小不限,通过调整每一组推力器的2个推力头相对于气浮台子系统第一级台面的推力大小、推力方向,使得气浮台子系统模拟在轨卫星两个平动和绕垂直于两个平动方向转动三个方向的运动。

6. 根据权利要求3所述一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在於:每个推力头(9)设有与其对应的储气瓶(6)、减压阀(7)、压力控制器(8)、电磁阀、电磁阀控制器(10)、安装支架;该储气瓶(6)布设在所述气浮台子系统的第二级台面上,该第二级台面上的储气瓶(6)通过管道和第一级台面上的推力头(9)相连接;储气瓶(6)中存有1~15Mpa气压的空气或氮气,经过减压阀(7)减压到0.6~0.7Mpa,输入到压力控制器(8),将压力稳定控制到

0.6Mpa, 气体作为推力头(9)的气源;采用电磁阀控制器(10)控制推力头(9),当电磁阀控制器(10)输入电压为0或者5V时,推力头保持常闭或者常开,产生最小或者最大推力;当给推力头(9)输入PWM信号时,推力头(9)按照指令信号占空比产生可调推力。

7. 根据权利要求1所述一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在于:所述第一级台面上布设有两套质量块模拟子系统,该两套质量块模拟子系统沿着运动方向互为夹角 60° 布设。

8. 根据权利要求7所述一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在于:所述质量块模拟子系统包括质量块(1)、气浮导轨(2)、静电梳齿(3)、二轴转动调节机构(4)、限位机构(5);所述气浮导轨(2)用于将质量块(1)悬浮,所述静电梳齿(3)用于控制悬浮的质量块(1)沿着气浮导轨(2)运动;所述气浮导轨四个面均设有多个节流孔,其沿着质量块长度方向从质量块中间穿过,通过其四个面的节流孔向质量块吹气、从而使得质量块(1)相对于气浮导轨悬浮;所述静电梳齿(3)向质量块(1)输出静电力,使得质量块(1)沿着运动方向运动;所述二轴转动调节机构(4)安装在质量块模拟子系统的下端、用于对每套质量块模拟子系统进行水平度调节;所述限位机构(5)用于确保所述质量块(1)运动在位移传感器量程内。

9. 根据权利要求8所述一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特征在于:所述测量与控制子系统包括加速度计(11)、倾角传感器(12)、激光测距传感器(13)、电容式位移传感器(14)、陀螺仪(15)、电子罗盘(16)、控制器(17);所述控制器(17)包括系统状态监测子模块、控制算法子模块;所述加速度计(11)、倾角传感器(12)、陀螺仪(15)、电子罗盘(16)、激光测距传感器(13)用于监测气浮台状态,其中,加速度计(11)、倾角传感器(12)、陀螺仪(15)、电子罗盘(16)将监测结果发送给控制器(17)的系统状态监测子模块,激光测距传感器(13)将测量结果发送给控制器(17)的控制算法子模块;所述电容式位移传感器(14)用于测量质量块模拟子系统的质量块(1)沿气浮导轨的位移、并将位移测量结果发送给控制器(17)的控制算法子模块;所述控制器(17)的控制算法子模块输出无拖曳控制指令到所述冷气微推力子系统、以及质量块模拟子系统的静电梳齿(3)。

一种无拖曳控制半物理仿真系统

技术领域

[0001] 本发明属航天控制技术领域,具体涉及一种无拖曳控制半物理仿真系统。

背景技术

[0002] 无拖曳卫星及其控制技术最早在上世纪60年代即已提出,无拖曳卫星在广义相对论验证、空间引力波探测、卫星导航、对地或者行星观测、地球大气层研究均具有重要应用,并随着科学和技术的进步,这些领域的应用逐步变为现实。目前国内外已有多个无拖曳卫星成功实现在轨飞行,包括NASA验证广义相对论短程线效应和坐标拖曳系效应的GP-B卫星、ESA地球重力场测量的GOCE卫星、NASA验证空间引力波探测技术的LISA Pathfinder卫星、中国的太极一号卫星和天琴一号卫星。

[0003] 无拖曳控制半物理仿真方法能够通过三轴转台或者气浮台进行地面实验验证,地面实验可以充分的对控制方案进行实物验证,减少在轨运行风险。

[0004] 无拖曳控制半物理仿真方法实现的难点在于:模拟卫星平台内部可以自由运动的测试质量块,无拖曳控制是提高航天器微重力水平的重要技术手段。无拖曳航天器内部一般包含一个或者多个测试质量块,航天器本体屏蔽掉作用在测试质量块上的外部扰动,在无拖曳控制的作用下,保持航天器本体和测试质量块之间的间距并且不发生碰撞,或者使航天器本体加速度达到最小。

[0005] 模拟无拖曳系统测试质量块的难点在于:之前的卫星模拟内部都是没有活动部件的,所述的活动部件既是相对于卫星本体的活动部件,现有技术没有先例、没有前人的经验可以借鉴。第一个难点在于该质量块要独立于卫星本体的运动状态、不受卫星本体运动状态的影响,第二个难点在于该质量块是活动部件,不但是运动的,而且要求精确地运动;第三个难点在于还要跟踪活动部件。

发明内容

[0006] 本发明为解决现有技术存在的问题,提出一种无拖曳控制半物理仿真系统,目的在于解决之前的卫星模拟内部没有活动部件的,没有前人的经验可以借鉴的难题。

[0007] 本发明为解决其技术问题,提出以下技术方案:

[0008] 一种无拖曳控制半物理仿真系统,其特点是:该装置工作在实验室大气环境下,包括质量块模拟子系统、冷气微推力子系统、测量与控制子系统、气浮台子系统;该无拖曳控制半物理仿真装置的最下层为大理石平台、大理石下方放置三个调整垫脚,用于调整大理石平台水平度;该气浮台子系统整体悬浮布设在大理石平台上方且承载重量大于150Kg,该气浮台子系统用于模拟在轨卫星的本体运动;该气浮台子系统设有第一级台面和第二级台面,该第一级台面上布设有两套质量块模拟子系统、该两套质量块模拟子系统的质量块悬浮布设在第一级台面上表面,该两套质量块模拟子系统用于模拟在轨卫星敏感轴方向的运动;该第一级台面上还布设有冷气微推力子系统、该冷气微推力子系统是无拖曳控制半物理仿真装置的主要执行器;该第二级台面上布设有测量与控制子系统,该测量与控制子系

统用于测量气浮台子系统的气浮台运动状态和质量块模拟子系统的质量块运动状态,并输出控制指令给微推力器,控制系统状态。

[0009] 进一步地,所述气浮台子系统下表面安装有四个气足组件,该四个气足组件悬浮于大理石台面上方;该气足组件包括气浮轴承、以及附属调节机构;该气浮轴承用于在大理石台面和气浮轴承之间设形成一层压力气膜,该压力气膜使得气浮轴承和大理石台面两者的接触面之间充满了压缩气体、摩擦系数小,使得启动时所需的力矩小;该附属调节机构和气浮轴承的接触部位通过气浮轴承上表面的球窝和附属调节机构的球头相配合,使得所述气浮轴承能够更好的适应台面的倾斜度。

[0010] 进一步地,所述冷气微推力子系统,包括气浮台子系统第一级台面上的4个储气瓶6和二级台面上的2个储气瓶6、以及第一级台面上4组冷气微推力器;该第一级台面上4个储气瓶6用于给气浮台子系统的气足组件供气,该二级台面上的2个储气瓶6用于给所述冷气微推力子系统的推力头9供气;该4个储气瓶6互为90度夹角沿着气浮台子系统第一级台面周向布设;该4组冷气微推力器的每1组布设在相邻2个互为垂直的储气瓶端面构成的90度夹角的空隙中;每组推力器包含2个推力头,该2个推力头的推力方向分别从大半径指向小半径、且2个推力头相互之间成夹角布设;沿着径向小半径方向的2个推力头的距离近、沿着径向大半径方向的2个推力头的距离远,且2推力头推力指向汇聚在一点。

[0011] 进一步地,单个推力头推力范围0~50mN,推力分辨力0.1mN,推力噪声

[0012] $0.1\text{mN}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

[0013] 进一步地,所述每一组推力器的2个推力头之间的角度不限、推力大小不限,通过调整每一组推力器的2个推力头相对于气浮台子系统第一级台面的推力大小、推力方向,使得气浮台子系统模拟在轨卫星两个平动和绕垂直于两个平动方向转动三个方向的运动。

[0014] 进一步地,每个推力头9,设有与其对应的储气瓶6、减压阀7、压力控制器8、电磁阀、电磁阀控制器10、安装支架;该储气瓶6布设在所述气浮台子系统的二级台面上,该二级台面上的储气瓶6通过管道和一级台面上的推力头9相连接;储气瓶6中存有1~15Mpa气压的空气或氮气,经过减压阀7减压到0.6~0.7Mpa,输入到压力控制器8,将压力稳定控制到0.6Mpa,气体作为推力头9的气源;采用电磁阀控制器10控制推力头9,当电磁阀控制器10输入电压为0或者5V时,推力头保持常闭或者常开,产生最小或者最大推力;当给推力头9输入PWM信号时,推力头9按照指令信号占空比产生可调推力;

[0015] 进一步地,所述一级台面上布设有两套质量块模拟子系统,该两套质量块模拟子系统沿着运动方向互为夹角 60° 布设。

[0016] 进一步地,所述质量块模拟子系统,包括质量块1、气浮导轨2、静电梳齿3、二轴转动调节机构4、限位机构5;所述气浮导轨2用于将质量块1悬浮,所述静电梳齿3用于控制悬浮的质量块1沿着气浮导轨2运动;所述气浮导轨四个面均设有多个节流孔,其沿着质量块长度方向从质量块中间穿过,通过其四个面的节流孔向质量块吹气、从而使得质量块1相对于气浮导轨悬浮;所述静电梳齿3向质量块1输出静电力,使得质量块1沿着运动方向运动;所述二轴转动调节机构4安装在质量块模拟子系统的下端、用于对每套质量块模拟子系统进行水平度调节;所述限位机构5用于确保所述质量块1运动在位移传感器量程内。

[0017] 进一步地,所述测量与控制子系统,包括加速度计11、倾角传感器12、激光测距传感器13、电容式位移传感器14、陀螺仪15、电子罗盘16、控制器17;所述控制器17包括系统状

态监测子模块、控制算法子模块；所述加速度计11、倾角传感器12、陀螺仪15、电子罗盘16、激光测距传感器13用于监测气浮台状态，其中，加速度计11、倾角传感器12、陀螺仪15、电子罗盘16将监测结果发送给控制器17的系统状态监测子模块，激光测距传感器13将测量结果发送给控制器17的控制算法子模块；所述电容式位移传感器14用于测量质量块模拟子系统的质量块1沿气浮导轨的位移、并将位移测量结果发送给控制器17的控制算法子模块；所述控制器17的控制算法子模块输出无拖曳控制指令到所述冷气微推力子系统、以及质量块模拟子系统的静电梳齿3。

[0018] 本发明的优点效果

[0019] 1、基于单轴气浮导轨悬浮质量块，模拟无拖曳系统测试质量块敏感轴方向运动；

[0020] 2、实验装置包含两套单轴气浮导轨质量块系统，质量块模拟系统敏感轴方向夹角60°，可以模拟引力波探测卫星无拖曳控制系统质量块敏感轴方向运动；

[0021] 3、平面气浮台模拟卫星平面内三自由度运动，气浮台搭载冷气微推力系统，推动气浮台在平面内对测试质量敏感轴方向跟踪控制。

附图说明

[0022] 图1为本发明无拖曳控制半物理仿真装置系统组成示意图；

[0023] 图2为本发明图1的冷气微推力子系统的A区放大图；

[0024] 图3为本发明气浮台子系统俯视图；

[0025] 图4为本发明气浮台子系统仰视图；

[0026] 图5为本发明质量块模拟子系统立体示意图；

[0027] 图6为本发明质量块模拟子系统的局部放大图；

[0028] 图7为本发明冷气微推力子系统的推力头工作原理图；

[0029] 图8为本发明气浮台子系统悬浮布设原理图；

[0030] 图9为本发明用于气浮台的气足组件工作原理图；

[0031] 图10a为本发明质量块悬浮于气浮导轨原理图之一；

[0032] 图10b为本发明质量块悬浮于气浮导轨原理图之二；

[0033] 图11为本发明模拟在轨模拟卫星的五自由度运动示意图；

[0034] 图12为本发明测量与控制子系统功能框图。

[0035] 图中，1：质量块；2：气浮导轨；3：静电梳齿；4：二轴转动调节机构；5：限位机构；6：储气瓶；7：减压阀；8：压力控制器；9：推力头；10：电磁阀控制器。

具体实施方式

[0036] 本发明设计原理

[0037] 1、质量块模拟子系统设计原理：本发明采用气浮导轨+静电力+静电控制三者结合的方法解决了这一领域的关键难题，实现了双质量块双方向自由运动模拟。所采用的气浮导轨是科研和工业领域常用的设备，本发明将气浮导轨引入到无拖曳控制地面模拟中，该气浮导轨使得质量块能够悬浮于气浮台子系统而不受气浮台运动的影响；还在气浮导轨基础上设计了静电梳齿和二轴转动调节机构，使得质量块不但能够独立于气浮台子系统，还能够相对于气浮台子系统在气浮导轨上运动；还引入了测量与控制子系统，测量与控制子

系统控制器的控制算法子模块通过电容式位移传感器采集质量块的状态,向质量块模拟子系统的静电梳齿发送控制命令,由此实现了对质量块在导轨上运行的控制,解决了这一领域的关键难题,实现了双质量块双方向自由运动模拟。

[0038] 2、本发明专利以实现无拖曳控制半物理仿真为目的,结合平面三自由气浮台和单轴气浮导轨提出一种无拖曳控制半物理仿真方法。该方案包含两套单轴气浮导轨悬浮质量块,质量块可以延单轴气浮导轨无摩擦运动,敏感轴方向包含静电控制系统,完整模拟在轨质量块敏感轴方向动力学和控制。气浮台搭载冷气微推力系统、运动状态传感系统、嵌入式控制系统,完整实物模拟无拖曳控制。气浮台位移控制精度优于1mm,姿态控制精度优于5mrad,质量块控制精度达到 $0.5\mu\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1\text{Hz}$ 。

[0039] 基于以上发明原理,本发明设计了一种无拖曳控制半物理仿真系统。

[0040] 一种无拖曳控制半物理仿真系统如图1、图8、图10a、图10b、图11所示,其特点是:该装置工作在实验室大气环境下,包括质量块模拟子系统、冷气微推力子系统、测量与控制子系统、气浮台子系统;该无拖曳控制半物理仿真装置的最下层为大理石平台、大理石下方放置三个调整垫脚,用于调整大理石平台水平度;该气浮台子系统整体悬浮布设在大理石平台上方且承载重量大于150Kg,该气浮台子系统用于模拟在轨卫星的本体运动;该气浮台子系统设有第一级台面和第二级台面,该第一级台面上布设有两套质量块模拟子系统、该两套质量块模拟子系统的质量块悬浮布设在第一级台面上表面,该两套质量块模拟子系统用于模拟在轨卫星敏感轴方向的运动;该第一级台面上还布设有冷气微推力子系统、该冷气微推力子系统是无拖曳控制半物理仿真装置的主要执行器;该第二级台面上布设有测量与控制子系统,该测量与控制子系统用于测量气浮台子系统的气浮台运动状态和质量块模拟子系统的质量块运动状态,并输出控制指令给微推力器,控制系统状态。

[0041] 补充说明1:

[0042] 本发明仿真系统设有二类悬浮机构,一类悬浮机构用于气浮台相对于大理石台面的悬浮,另一类悬浮机构用于质量块1相对于气浮导轨2的悬浮,由于气浮导轨2连同其下方的二轴转动调节机构4是布设在第一级台面上表面的,因此也可以称作质量块相对于第一级台面上表面是悬浮的。用于气浮台的悬浮机构采用四个气足组件;用于质量块的悬浮机构采用气浮导轨,气浮导轨的原理如图10a、10b所示,气浮导轨为一个长方形的六面体,该长方体沿着质量块长度方向从质量块的中间穿过去,气浮导轨的四个面上均有节流孔,节流孔向外吹气,由于质量块的重量相比气浮导轨气体的压力可以忽略不计,因此气浮导轨的四个面向外吹气时能够把其四周的质量块“撑起来”,使得气浮导轨和质量块之间形成空气压力膜,因此质量块能够悬浮于气浮导轨、无摩擦地沿着气浮导轨运动。

[0043] 气浮导轨结合静电控制,使得两套单轴气浮导轨悬浮质量块能够沿着单轴气浮导轨无摩擦运动。

[0044] 进一步地,如图4、图9所示,所述气浮台子系统下表面安装有四个气足组件,该四个气足组件连同气浮台子系统悬浮于大理石台面上方;该气足组件包括气浮轴承、以及附属调节机构;该气浮轴承用于在大理石台面和气浮轴承之间设形成一层压力气膜,该压力气膜使得气浮轴承和大理石台面两者的接触面之间充满了压缩气体、摩擦系数小,使得启动时所需的力矩小;该附属调节机构和气浮轴承的接触部位通过气浮轴承上表面的球窝和附属调节机构的球头相配合,使得所述气浮轴承能够更好的适应台面的倾斜度。

[0045] 进一步地,所述冷气微推力子系统如图1所示,包括气浮台子系统第一级台面上的4个储气瓶6和二级台面上的2个储气瓶6、以及第一级台面上4组冷气微推力器;该第一级台面上4个储气瓶6用于给气浮台子系统的气足组件供气,该二级台面上的2个储气瓶6用于给所述冷气微推力子系统的推力头9供气;该4个储气瓶6互为90度夹角沿着气浮台子系统第一级台面周向布设;该4组冷气微推力器的每1组布设在相邻2个互为垂直的储气瓶端面构成的90度夹角的空隙中;每组推力器包含2个推力头,该2个推力头的推力方向分别从大半径指向小半径、且2个推力头相互之间成夹角布设:沿着径向小半径方向的2个推力头的距离近、沿着径向大半径方向的2个推力头的距离远,且2个推力头推力指向汇聚在一点。

[0046] 补充说明2

[0047] 1、所述第一级、二级台面按照气浮台子系统从下往上的顺序定义。

[0048] 2、推力头的布设方法如图3所示,F1-F8分别代表8个推力头的力,由图中看出,每组推力头的力的方向都是指向气浮台中心点,每一组的2个推力头八字形布设,假设将推力头长度比作半径的长度,2个推力头靠近大半径方向距离远,靠近小半径方向距离近,通过设计推力头的力的大小不等、2个推力头之间的夹角不等,即可实现推力头推动第一台面做如图11的X、Y、 φ 方向的运动。

[0049] 进一步地,单个推力头推力范围0~50mN,推力分辨率0.1mN,推力噪声

[0050] $0.1\text{mN}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

[0051] 进一步地,如图3所示,所述每一组推力器的2个推力头之间的角度不限、推力大小不限,通过调整每一组推力器的2个推力头相对于气浮台子系统第一级台面的推力大小、推力方向,使得气浮台子系统模拟在轨卫星两个平动和绕垂直于两个平动方向转动三个方向的运动。

[0052] 进一步地,每个推力头9如图7所示,设有与其对应的储气瓶6、减压阀7、压力控制器8、电磁阀、电磁阀控制器10、安装支架;该储气瓶6布设在所述气浮台子系统的二级台面上,该二级台面上的储气瓶6通过管道和一级台面上的推力头9相连接;储气瓶6中存有1~15Mpa气压的空气或氮气,经过减压阀7减压到0.6~0.7Mpa,输入到压力控制器8,将压力稳定控制到0.6Mpa,气体作为推力头9的气源;采用电磁阀控制器10控制推力头9,当电磁阀控制器10输入电压为0或者5V时,推力头保持常闭或者常开,产生最小或者最大推力;当给推力头9输入PWM信号时,推力头9按照指令信号占空比产生可调推力;

[0053] 进一步地,所述一级台面上布设有两套质量块模拟子系统如图3所示,该两套质量块模拟子系统沿着运动方向互为夹角60°布设。

[0054] 补充说明3

[0055] 所述互为夹角60°布设,该60°是和轨无拖曳控制系统对应,敏感轴方向指的是质量块运动方向。

[0056] 进一步地,所述质量块模拟子系统如图5、6、8所示,包括质量块1、气浮导轨2、静电梳齿3、二轴转动调节机构4、限位机构5;所述气浮导轨2用于将质量块1悬浮,所述静电梳齿3用于控制悬浮的质量块1沿着气浮导轨2运动;所述气浮导轨四个面均设有多个节流孔,其沿着质量块长度方向从质量块中间穿过,通过其四个面的节流孔向质量块吹气、从而使得质量块1相对于气浮导轨悬浮;所述静电梳齿3向质量块1输出静电力,使得质量块1沿着运动方向运动;所述二轴转动调节机构4安装在质量块模拟子系统的下端、用于对每套质量块

模拟子系统进行水平度调节;所述限位机构5用于确保所述质量块1运动在位移传感器量程内。

[0057] 补充说明4

[0058] 1、气浮导轨的作用只是使质量块悬浮但不能使质量块运动,因为气浮导轨只是通过四个面向外吹气把其周围的质量块“撑起来”,但不能使得质量块沿着导轨运动。静电梳齿使得质量块沿着气浮导轨运动。

[0059] 2、所述静电梳齿的静电力是指静电吸附力或者拉力,静电梳齿在控制器的控制下,通过静电力带动质量块沿着导轨运动。

[0060] 进一步地,所述测量与控制子系统如图12所示,包括加速度计11、倾角传感器12、激光测距传感器13、电容式位移传感器14、陀螺仪15、电子罗盘16、控制器17;所述控制器17包括系统状态监测子模块、控制算法子模块;所述加速度计11、倾角传感器12、陀螺仪15、电子罗盘16、激光测距传感器13用于监测气浮台状态,其中,加速度计11、倾角传感器12、陀螺仪15、电子罗盘16将监测结果发送给控制器17的系统状态监测子模块,激光测距传感器13将测量结果发送给控制器17的控制算法子模块;所述电容式位移传感器14用于测量质量块模拟子系统的质量块1沿气浮导轨的位移、并将位移测量结果发送给控制器17的控制算法子模块;所述控制器17的控制算法子模块输出无拖曳控制指令到所述冷气微推力子系统、以及质量块模拟子系统的静电梳齿3。

[0061] 需要强调的是,上述具体实施例仅仅是对本发明的解释,其并不是对本发明的限制,本领域技术人员在阅读完本说明书后可以根据需要对上述实施例做出没有创造性贡献的修改,但只要在本发明的权利要求范围内都受到专利法的保护。

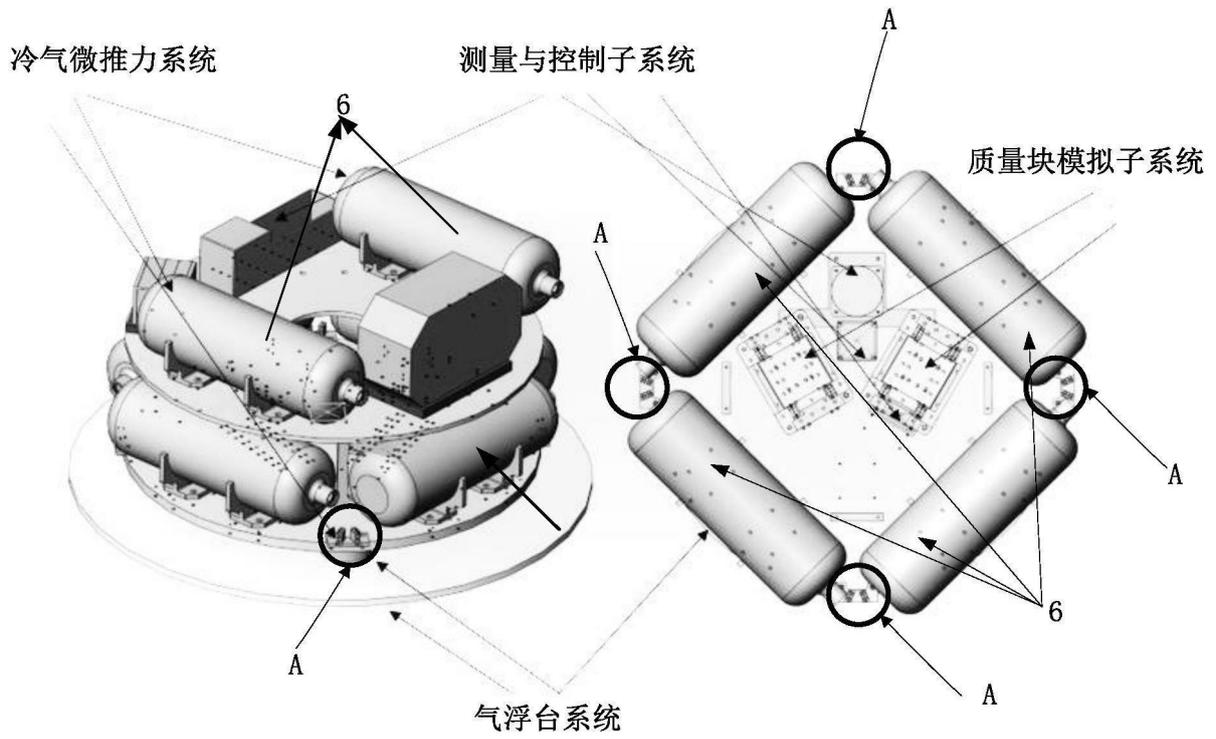


图1

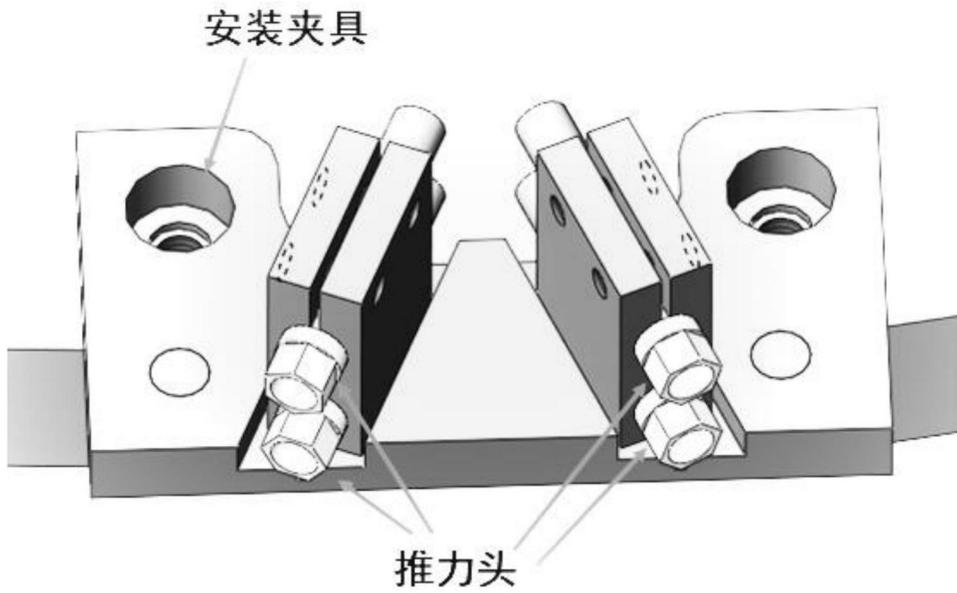


图2

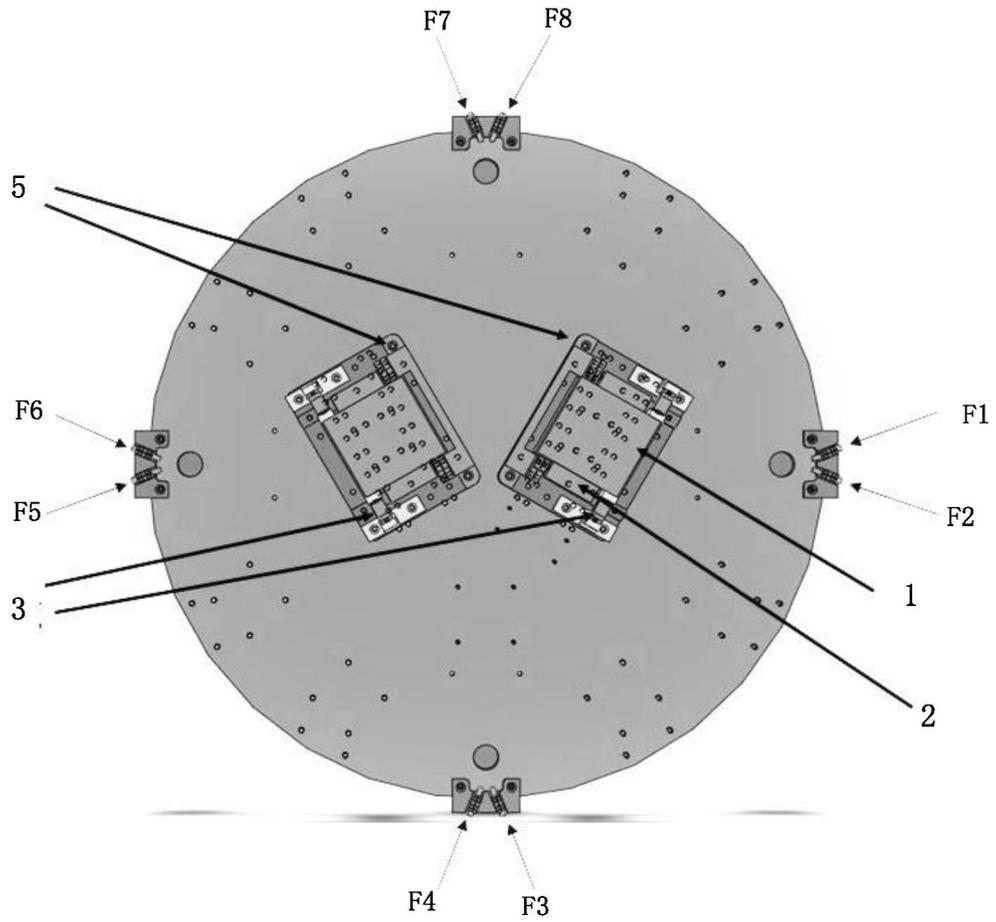


图3

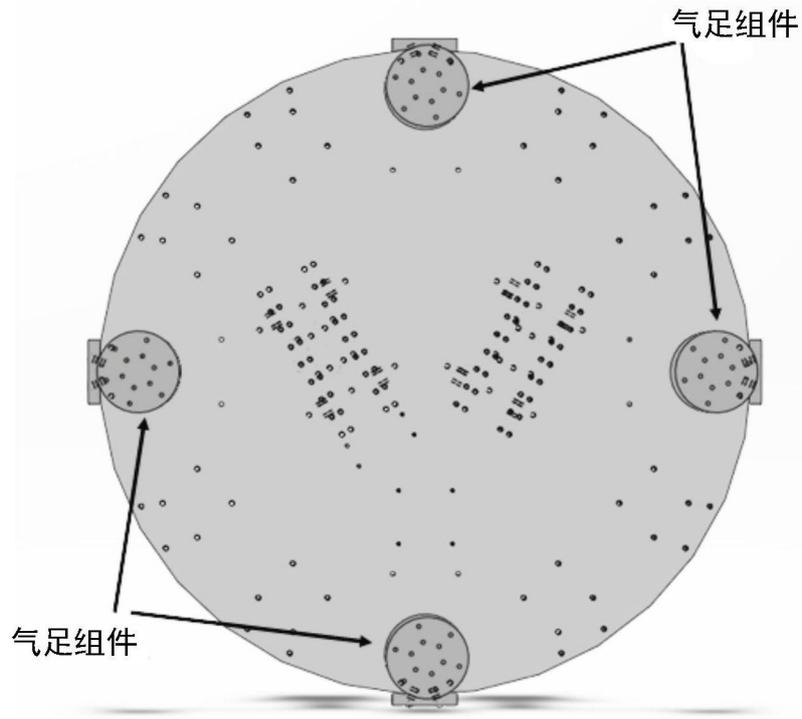


图4

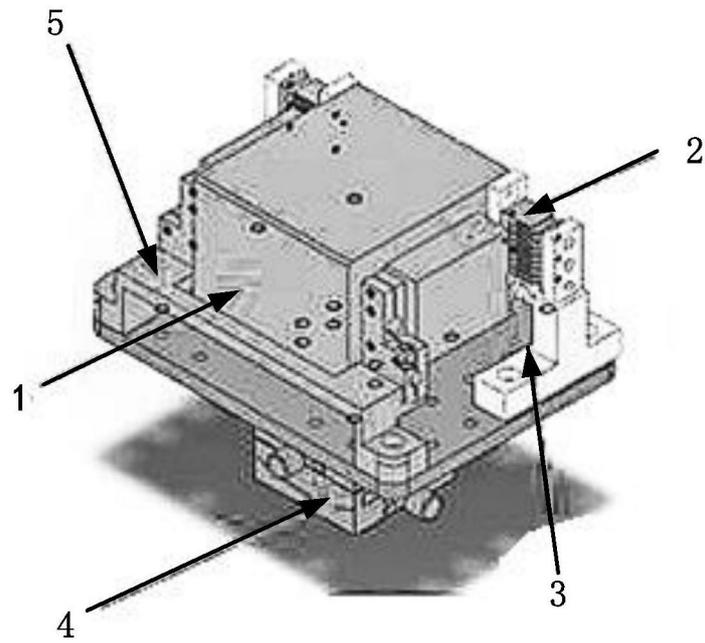


图5

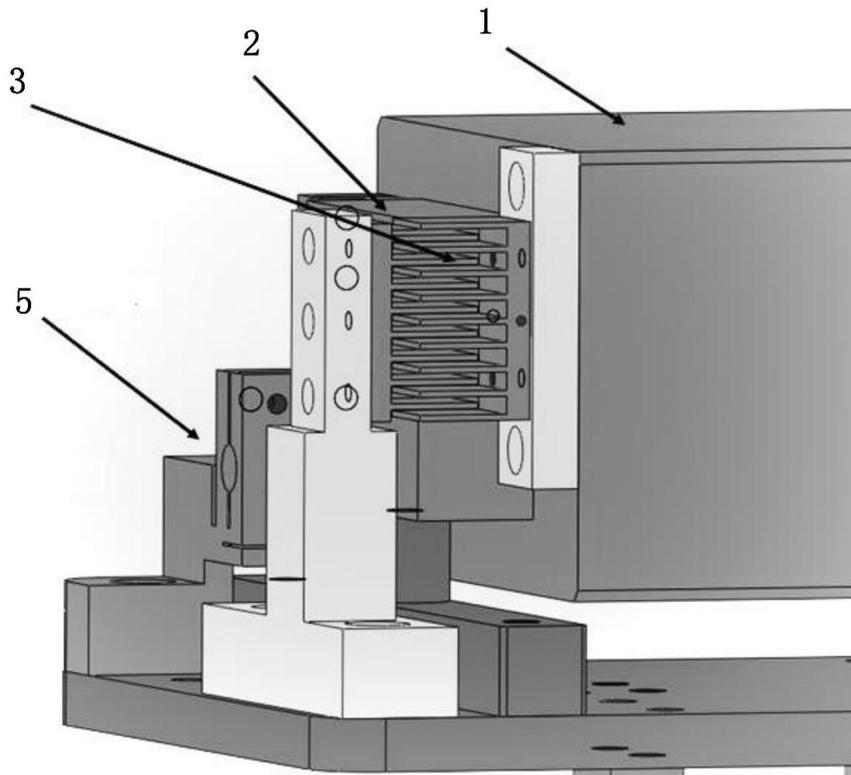


图6

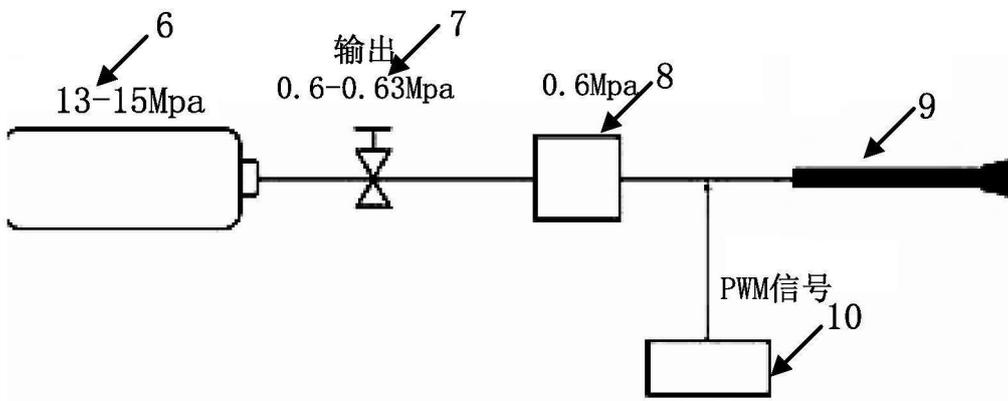


图7

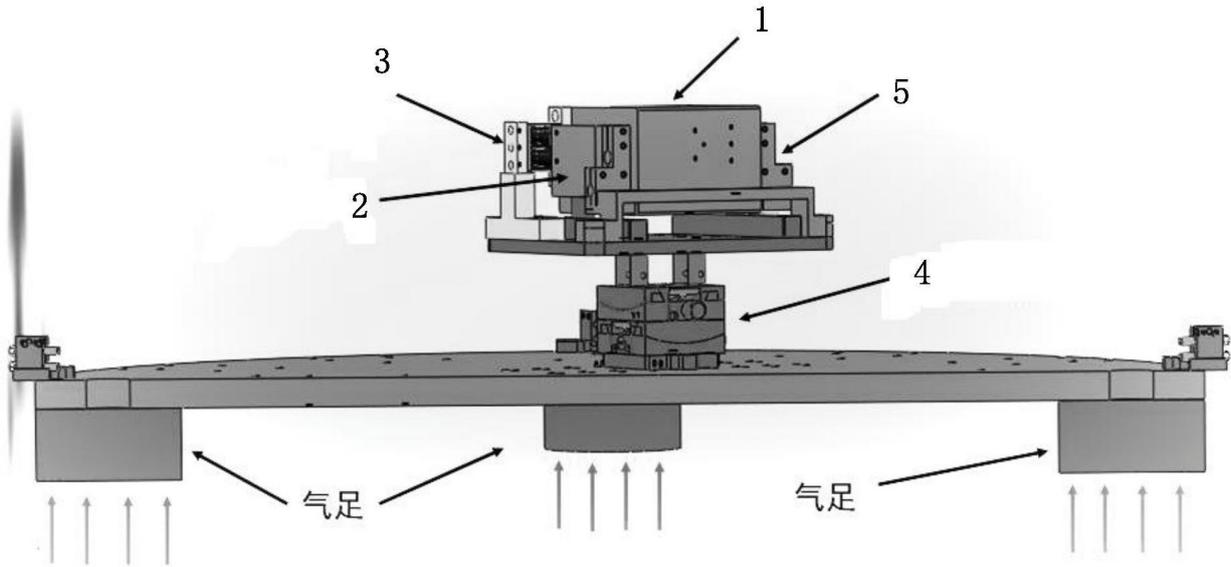


图8

以单孔端面轴承 气浮垫 为例

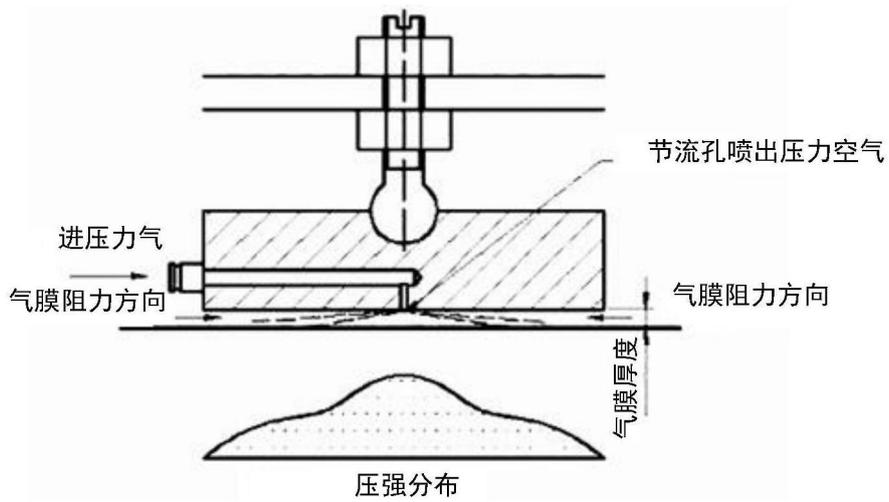


图9

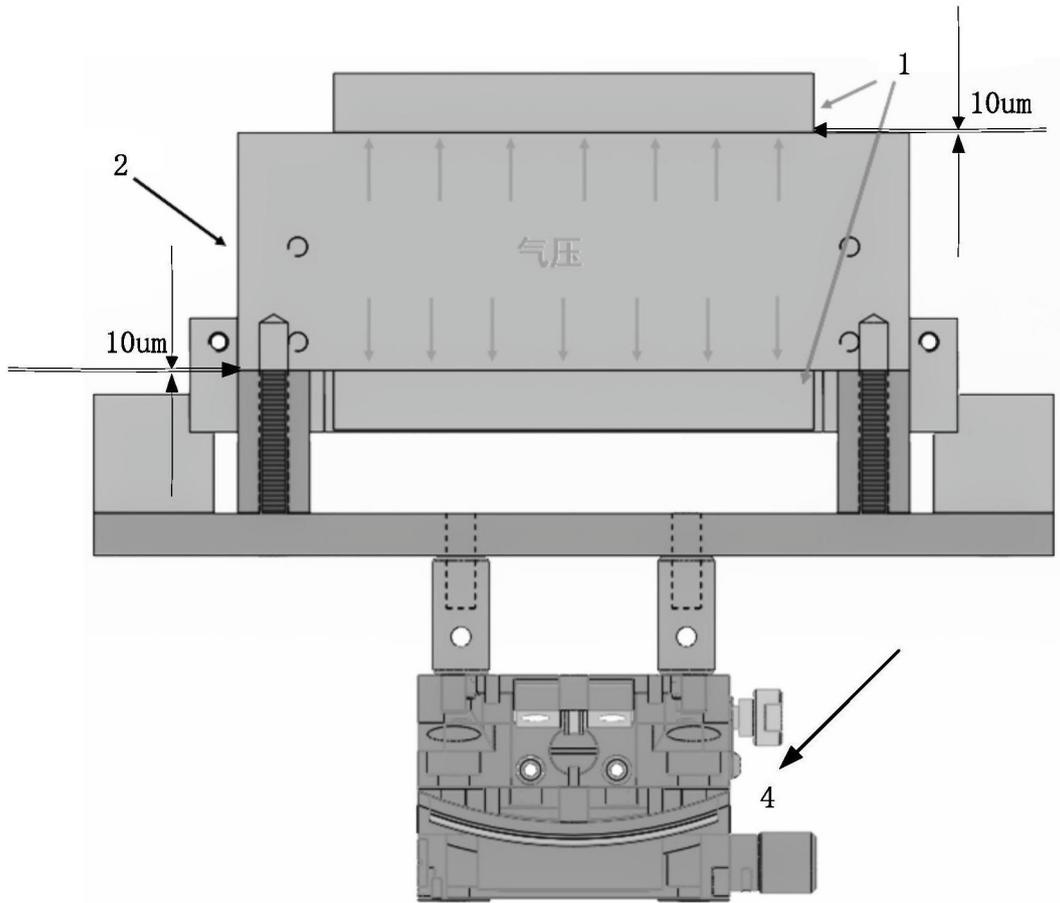


图10a

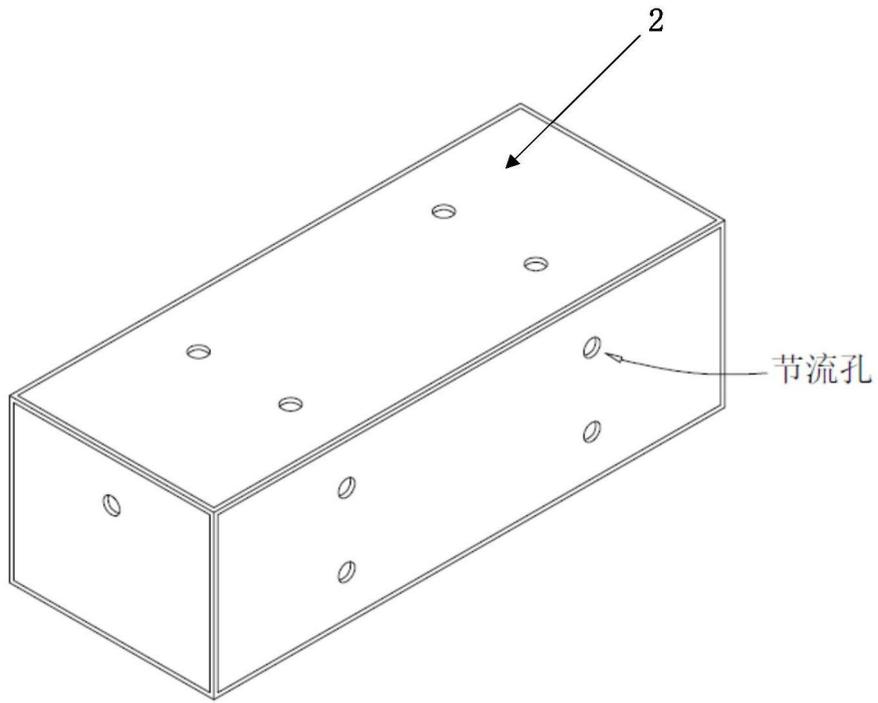


图10b

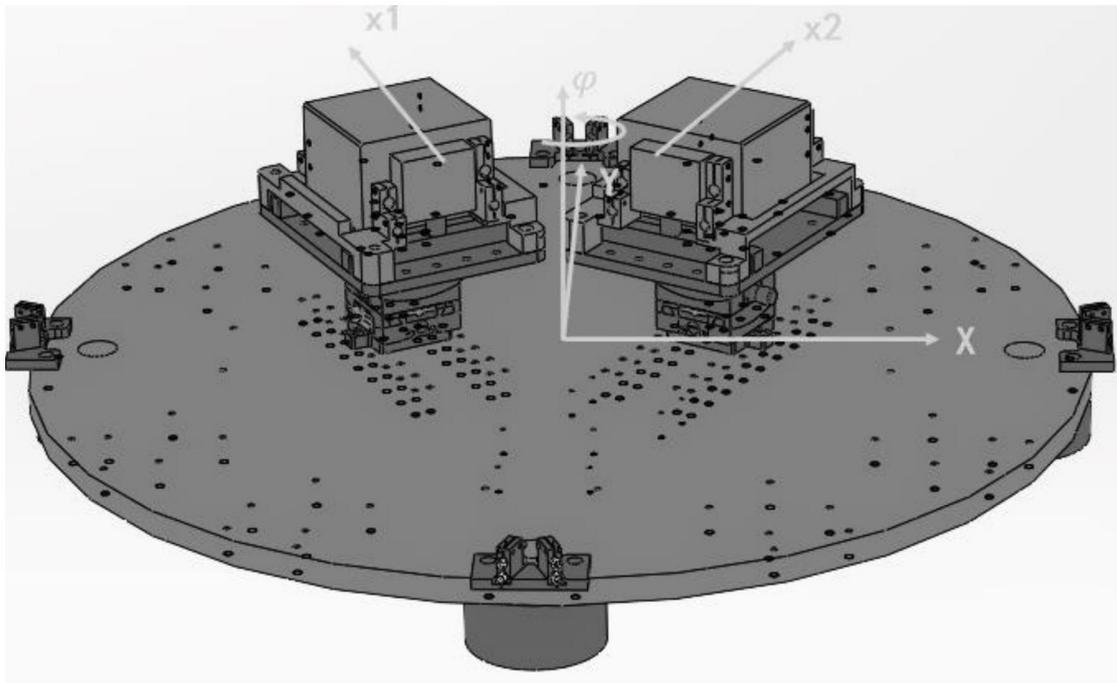


图11

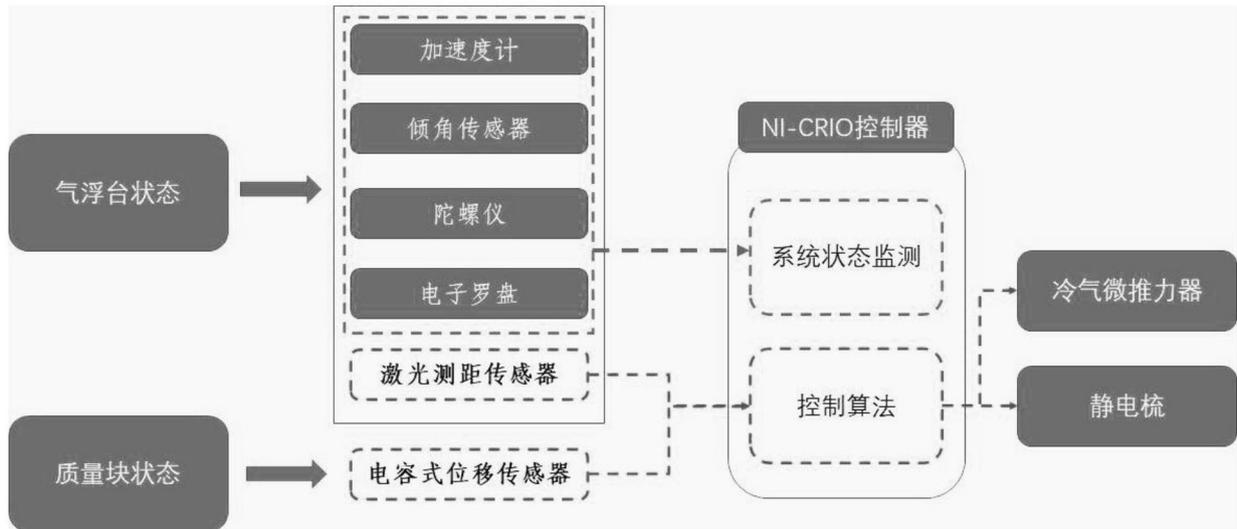


图12