

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.  
B64G 7/00 (2006.01)



## [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610098165.2

[43] 公开日 2007年6月27日

[11] 公开号 CN 1986337A

[22] 申请日 2006.12.2

[21] 申请号 200610098165.2

[71] 申请人 中国科学院合肥物质科学研究院  
地址 230031 安徽省合肥市西郊董铺智能所  
1130 号信箱

[72] 发明人 梅 涛 姚燕生 张卫忠 张 涛

[74] 专利代理机构 安徽省合肥新安专利代理有限责  
任公司  
代理人 赵晓薇

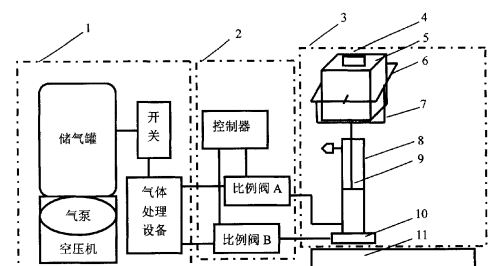
权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 5 页

### [54] 发明名称

三维气浮平台与气压式重力补偿方法

### [57] 摘要

本发明公开了三维气浮平台与气压式重力补偿方法，三维气浮平台包括置于平台基座上相互气管连接的气源部件、气压控制部件和模拟卫星。模拟卫星中采用的气浮活塞侧面置有多个出气孔和多道涡流槽，在气浮活塞和气缸壁间隙中产生气膜支撑，变固体间摩擦为流体摩擦。方法包括两条可控的气动回路，一条由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀 A，通过控制器调整气体压力后送入无摩擦气缸内驱动气浮活塞，使气浮活塞上所支撑的模拟卫星主体得到重力补偿；另一条气路由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀 B，气流进入气浮垫，使气浮垫可以在平台基座上自由运动，另外利用两对转轴实现模拟卫星主体转动，最终达到模拟卫星主体能够在惯性空间做六自由度运动。



1、一种三维气浮平台，其特征在于：其装置包括置于平台基座(11)上相互气管连接的气源部件(1)、气压控制部件(2)和模拟卫星(3)；

所述的气源部件(1)包括空压机和气体处理设备，所述的空压机包括储气罐和气泵，其中空压机通过管道开关和气体处理设备相连接；

所述的气体控制部件(2)包括比例阀A、比例阀B和两者电连接的控制装置，其中比例阀A与比例阀B分别和气源部件(1)用气管相连接；

所述的模拟卫星(3)包括机械连接的捕获接口(4)、模拟卫星主体(5)、方形框(6)、支架(7)、无摩擦气缸(8)、气浮活塞(9)和气浮垫(10)，其中捕获接口(4)在卫星主体(5)上方固定安装，用于宇航员或空间机器或其它飞行器捕获，人卫星主体(5)前后用两根转轴同心联结到方形框(6)上，所述的方形框(6)左右用另外两根转轴联结到支架(7)上，所述的支架(7)通过固定螺母连接在无摩擦气缸(8)的活塞杆上；

所述的摩擦气缸(8)上面置有出气口、下面置有进气口和气浮活塞(9)，进气口用管道和比例阀A相连接，气浮活塞(9)置于无摩擦气缸(8)中，利用气体压力驱动，无摩擦气缸(8)的总体置于气浮垫(10)上；

所述的气浮活塞(9)为圆柱体，将普通活塞去除导向套和活塞上的密封圈保留间隙，气浮活塞(9)中间置有空心导气孔(12)，加长活塞长度使气体由导气孔(12)进入小孔(14)，在无摩擦气缸(8)内壁和气浮活塞(9)周边的缝隙间形成润滑膜，并使气体从无摩擦气缸(8)上面的出气口流入大气，气浮活塞(9)侧面置有的多道涡流槽(13)对气流有一定的阻碍作用，能够减少泄漏使气浮活塞(9)上下运动时所受的摩擦小；

所述的气浮垫(10)置于平台基座(11)上，也有一个进气口和多个出气小孔，气浮垫进气口为一管接口设置在气浮垫(10)的上表面，用气管和比例阀B连接，气流由比例阀B进入进气口后，通过气浮垫(10)

内的通道流到出气小孔，在气浮垫（10）下表面和平台基座（11）之间形成气膜支撑，通过模拟卫星（3）的设计实现模拟卫星主体（5）能够在惯性空间进行六自由度运动。

2、根据权利要求1所述的一种三维气浮平台，其特征在于：所述的气浮活塞（9）上多个出气小孔（14）为20以上，所述的气浮活塞（9）上的多道涡流槽（13）为2~5个。

3、根据权利要求1所述的一种三维气浮平台，其特征在于：所述的气浮垫（10）中的多个出气小孔，为3个以上。

4、根据权利要求1所述的一种三维气浮平台，其特征在于：所述的平台基座（11）由花岗岩制成。

5、根据权利要求1所述的一种三维气浮平台的气压式重力补偿方法，其特征在于：该方法包括用两条可控的气动回路，一条由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀A，通过控制器调整气体压力后送入无摩擦气缸（8）内驱动气浮活塞（9），实现气浮活塞（9）悬浮在无摩擦气缸（8）中处于平衡状态，气浮活塞（9）上所支撑的模拟卫星主体（5）得到重力补偿；

另一条气路由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀B，气流进入气浮垫（10），从气浮垫（10）和平台基座（11）之间的缝隙中的多个出气小孔流入大气中，气浮垫（10）浮在气膜上能够在平面内自由运动；

气浮垫（10）能够在水平面内做x、y向的平动和z向的转动，气浮活塞（9）能够做z向平动；

方形框（6）相对气浮活塞（9）与支架（7）做x向转动，模拟卫星主体相对方形框（6）能够做y向转动，模拟卫星主体（5）在惯性空间能够做六自由度无约束运动，模拟出太空中浮游卫星的真实运动形式。

### 三维气浮平台与气压式重力补偿方法

**所属领域** 本发明涉及空间试验装置技术领域，特别涉及卫星位姿运动模拟的三维气浮平台与气压式重力补偿方法。

**技术背景** 空间技术可使人类了解宇宙、征服太空，获取新资源。对我国来说更具有提高国家综合实力、促进科学技术的发展和保证国家安全的重要意义。当前空间机器人技术正飞速发展，但空间机器人物理仿真试验的技术水平仍然不高，迫切需要进一步研究空间机器人地面功能验证方法，开发微重力试验设备。目的是在地面开发出高精度的微重力实验平台，实现空间机器人对浮游目标即卫星的捕获功能验证。

目前微重力环境模拟的物理装置主要利用重力加速度做自由落体运动，称为释放重力加速度；利用地球吸引力做匀速圆周运动；利用平衡力抵消重力。最为常见设备是以地球为基础的落塔，沿抛物线飞行的失重飞机和地球轨道运动实验室。利用前两种方法可以得到从大约地球重力加速度的百分之一到比百万分之一或更小的微重力环境，该环境为微重力实验提供了良好的场所。但这样的设备成本巨大和技术难度高，实验的安全性和可靠性要求很高，所以这些方法对于一般的研究单位来说是很难办到的，另外微重力实验可以持续的时间一般都不长，因此三维微重力实验和宇航员空间环境适应和训练多用气浮法，但这些实验只能是在二维空间中进行。现有方法中也采用悬挂法和液浮法，但对空间飞行器（卫星）的性能测试和姿态控制最好的实验方法是气浮法。从20世纪50年代末到60年代，美国各研究单位先后建起的各种气浮台不下20个，随后原西德宇航研究院、欧洲空间局荷兰仿真中心和日本也相继建立各种气浮台。我国也自行研究和引进过几套气浮装置，主要以单轴和三轴气浮台为主（哈尔滨工业大学、502所、上海交大、中科院国家天文台、西北工大）。

2005年哈尔滨工业大学张广玉等设计了10自由度全物理对接力学仿真器，该仿真器（试验台）由两个运动台组成，每个运动台都可以模拟追踪

航天器或者目标航天器。每个运动台能实现5个自由度运动,试验台结构由二维转台、气浮滑台、质量惯量模拟器和重力平衡装置等组成。二轴转台实现滚转运动和俯仰运动,气浮台能在试验台基座上滑动,实现沿X向和Z向平动以及偏航运动。质量、惯量模拟件模拟航天器质量、惯量,并且通过调整模拟件,能够模拟不同的航天器的质量、惯量。进行各种航天器之间以及与空间站的对接动力学仿真。由于受结构限制,试验台只能模拟航天器五个自由度运动,为了反映另一个自由度方向上(Y方向)对接作用力对对接机构的影响,通过将模拟件互易 $90^\circ$ ,即把Y轴和Z轴互易 $90^\circ$ ,从而能够反映另一个自由度上对接撞击力对对接机构的影响,重力平衡装置以吊丝配重机构为主体,采用三杠铃式质量、惯量模拟件模拟飞行器的质量和惯量。该平台只有一个方向的移动使用了气浮机构,在平面内只能作线向移动。可用于空间捕获、对接等试验模拟与功能验证。

发明内容:本发明目的是:基于现有的卫星姿态与轨道控制和空间捕获、对接操作地面实物模拟技术与设备的不足,提出一种利用三自由度气浮机构构成的模拟卫星,进行三维空间内卫星捕获过程模拟的三维气浮平台与气压式重力补偿方法。该模拟卫星可做六自由度运动,运动精度误差小。

本发明的技术方案是:一种三维气浮平台,特别是:其装置包括置于平台基座上相互气管连接的气源部件、气压控制部件和模拟卫星。

所述的气源部件包括空压机和气体处理设备,所述的空压机包括储气罐和气泵,其中空压机通过管道开关和气体处理设备相连接。

所述的气体控制部件包括比例阀A、比例阀B和两者电连接的控制器,其中比例阀A与比例阀B分别和气源部件用气管相连接。

所述的模拟卫星包括机械连接的捕获接口、模拟卫星主体、方形框、支架、无摩擦气缸、气浮活塞和气浮垫,其中捕获接口在卫星主体上方固定安装,用于宇航员或空间机器或其它飞行器捕获,人卫星主体前后用两根转轴同心联结到方形框上,所述的方形框左右用另外两根转轴联结到支架上,所述的支架通过固定螺母连接在无摩擦气缸的活塞杆上。

所述的无摩擦气缸上面置有出气口、下面置有进气口和气浮活塞,进

气口用管道和比例阀 A 相连接，气浮活塞置于无摩擦气缸中，利用气体压力驱动，无摩擦气缸的总体置于气浮垫上；

所述的气浮活塞为圆柱体，将普通活塞去除导向套和活塞上的密封圈保留间隙，气浮活塞中间置有空心导气孔，加长活塞长度使气体由导气孔进入小孔，在无摩擦气缸内壁和气浮活塞周边的缝隙间形成润滑膜，并使气体从无摩擦气缸上面的出气口流入大气，气浮活塞侧面置有的多道涡流槽对气流有一定的阻碍作用，能够减少泄漏使气浮活塞上下运动时所受的摩擦小。

所述的气浮垫置于平台基座上，也有一个进气口和多个出气小孔，气浮垫进气口为一管接口设置在气浮垫的上表面，用气管和比例阀 B 连接，气流由比例阀 B 进入进气口后，通过气浮垫内的通道流到出气小孔，在气浮垫下表面和平台基座之间形成气膜支撑，通过模拟卫星的设计实现模拟卫星主体能够在惯性空间进行六自由度运动。

作为一种三维气浮平台的进一步改进：所述的气浮活塞上多个出气小孔为 20 以上，所述的气浮活塞上的多道涡流槽为 2~5 个。所述的气浮垫中的多个出气小孔，为 3 个以上。所述的平台基座由花岗岩制成。

一种三维气浮平台的气压式重力补偿方法，特别是：该方法包括用两条可控的气动回路，一条由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀 A，通过控制器调整气体压力后送入无摩擦气缸内驱动气浮活塞，实现气浮活塞悬浮在无摩擦气缸中处于平衡状态，气浮活塞上所支撑的模拟卫星主体得到重力补偿；

另一条气路由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀 B，气流进入气浮垫，从气浮垫和平台基座之间的缝隙中的多个出气小孔流入大气中，气浮垫浮在气膜上能够在平面内自由运动；气浮垫能够在水平面内做 x、y 向的平动和 z 向的转动，气浮活塞能够做 z 向平动；

方形框相对气浮活塞与支架做 x 向转动，模拟卫星主体相对方形框能够做 y 向转动，模拟卫星主体在惯性空间能够做六自由度无约束运动，模拟出太空中浮游卫星的真实运动形式。

本发明的有益效果 现有技术中，哈尔滨工业大学张广玉等设计的 10

自由度全物理对接力学仿真器由两个运动台组成,每个运动台都可以模拟追踪航天器或者目标航天器。每个运动台能实现5个自由度运动,试验台结构由二维转台、气浮滑台、质量惯量模拟器和重力平衡装置等组成。重力平衡装置在竖直运动方向重力补偿方法上采用的都是吊丝配重法。吊丝配重法的主要不足是随着悬挂部分质量的增加,摩擦力就越大,其重力补偿效果就越差,另外此法在模拟实验时无法保证与原型在质量与惯量的高精度等效。相对于现有技术,本发明中三维气浮平台与气压式重力补偿方法的优点是:

其一,利用了无摩擦气缸与气浮垫结合来实现三维重力补偿,其中气浮活塞采用驱动气体实现其和气缸壁产生气膜支撑,变固体间摩擦为流体摩擦。气浮活塞将普通活塞去除导向套和活塞上的密封圈保留间隙,并加长长度且在侧面置有多出气小孔和多道涡流槽,而不是现有技术的气缸筒上喷气,在侧向承载力上没有范围要求、在行程(可达几百毫米)和驱动力(300牛以上)上有较大提高。通过无摩擦气缸的恒压强控制,分析气体流动特性,利用电气比例阀A、B进行稳压控制,响应快、精度高,有利于提高模拟效果。由此无摩擦气缸中的气浮活塞构成的构件可以精确到0.6N以下,虽然在精度上不如日本产品,但这种气浮活塞构成的无摩擦气缸成本和日本产品相比要小100倍。

其二,模拟卫星能够逼真地模拟出卫星的空间位姿运动。当气浮垫浮起,气浮活塞上部件的重力被气压压力抵消气压式重力补偿后,模拟卫星平台就可以做类似空间失重环境下的六自由运动了。当构件为模拟卫星主体,若它的质量大大超过、无摩擦气缸和气浮垫和平台基座的质量,可以不考虑卫星质量与惯量重新分配达到等效的目的。否则需要适当地进行质量与惯量调整,使模拟卫星质量与惯量和实际卫星等效。该发明既实现了空间6自由度运动的分解,又实现了质量和惯量的等效。

其三,一种三维气浮平台的气压式重力补偿方法,该方法包括用两条可控的气动回路,一条由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀A,通过控制器调整气体压力后送入无摩擦气缸内驱动气浮活塞,实现气浮活塞悬浮在无摩擦气缸中处于平衡状态,气浮活塞上所支撑的模拟卫星主体得到

重力补偿；另一条气路由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀 B，气流进入气浮垫，从气浮垫和平台基座之间的缝隙中的多个出气小孔流入大气中，气浮垫浮在气膜上能够在平面内自由运动；气浮垫能够在水平面内做 x、y 向的平动和 z 向的转动，气浮活塞能够做 z 向平动；方形框相对气浮活塞与支架做 x 向转动，模拟卫星主体相对方形框能够做 y 向转动，模拟卫星主体在惯性空间能够做六自由度无约束运动，能够模拟出太空中浮游卫星的真实运动形式。

本发明相对现有技术采用吊丝配重式重力补偿方法的 5 自由度仿真器，具有精度高、体积小、结构紧凑，质量惯量集中的优点，改变了现有技术中气浮台只能进行二维微重力试验的局限，在自由度上提高一个，在模拟空间上提高一维，避免了绳索柔性所带来的难以控制的不足，在误差上要小一个等级。可以直接模拟出太空中真实的动力学和运动学现象，实现三维运动模拟，为准确地把握空间飞行器的运动特性和功能提供了可靠的验证工具。

#### 附图说明

图 1 是三维气浮平台组成结构图。

图 2 是模拟卫星结构图。

图 3 是气浮活塞图。

图 4 是气压式重力补偿方法示意图。

图 5 是气腔内气流特性图。

图 6 是气膜展开形状和尺寸示意图。

图 7 是三维气浮平台的操作流程图中。

具体实施方式 下面结合附图对本发明的实施方式作进一步的描述

图 1 是三维气浮平台的总体系统图，主要有以下四部分：1、气源部件；2、气压控制部件；3、模拟卫星；11、平台基座。

气源部件 1 是用来提供气体介质和压力的，是气压驱动的发生系统，包括空气压缩机（主要构件为气泵、储气罐、压力表和自我控制器件）和



气体处理设备(一般有干燥器、过滤器)。气压控制部件2主要是由可控制阀门和控制器组成,由程序控制电气比例阀A、B实现对气动系统的压力控制。模拟卫星3放置在平台基座11上,模拟卫星3实质为一个六自由度运动机构,是构成三维气浮平台的主体,平台基座11由花岗岩制成。

图2是模拟卫星结构图。图2中,模拟卫星包括置于平台基座11上相互气管连接的气源部件1、气压控制部件2和模拟卫星3;

气源部件1包括空压机和气体处理设备,空压机包括储气罐和气泵,其中空压机通过管道开关和气体处理设备相连接;

气压控制部件2包括比例阀A、比例阀B和两者电连接的控制器,其中比例阀A与比例阀B分别和气源部件1用气管相连接。

六自由度运动模拟卫星的主要构件有:模拟卫星主体5,是模拟实验的操作对象,即捕获目标模拟卫星3包括机械连接的捕获接口4、模拟卫星主体5、方形框6、支架7、无摩擦气缸8、气浮活塞9和气浮垫10,其中捕获接口4在卫星主体5上方固定安装,用于宇航员或空间机器或其它飞行器捕获,卫星主体5前后用两根转轴同心联结到方形框6上,所述的方形框6左右用另外两根转轴联结到支架7上,所述的支架7通过固定螺母连接在无摩擦气缸8的活塞杆上。

无摩擦气缸8上面置有出气口、下面置有进气口和气浮活塞9,进气口用管道和比例阀A相连接,气浮活塞9置于无摩擦气缸8中,利用气体压力驱动,无摩擦气缸8的总体置于气浮垫10上。

所述的气浮活塞9为圆柱体,将普通活塞去除导向套和活塞上的密封圈保留间隙,气浮活塞9中间置有空心导气孔12,加长活塞长度使气体由导气孔12进入小孔14,在无摩擦气缸8内壁和气浮活塞9周边的缝隙间形成润滑膜,并使气体从无摩擦气缸8上面的出气口流入大气,气浮活塞9侧面置有的多道涡流槽13对气流有一定的阻碍作用,能够减少泄漏使气浮活塞9上下运动时所受的摩擦小。

气浮活塞9上置有20以上出气小孔14,所述的气浮活塞9上的多道涡流槽13为2~5个。

气浮垫10置于花岗岩制成平台基座11上,有一个进气口和3个以上

出气小孔,气浮垫进气口为一管接口设置在气浮垫 10 的上表面,用气管和比例阀 B 连接,气流由比例阀 B 进入进气口后,通过气浮垫 10 内的通道流到出气小孔,在气浮垫 10 下表面和平台基座 11 之间形成气膜支撑,通过模拟卫星 3 的设计实现模拟卫星主体 5 能够在惯性空间进行六自由度运动。

气浮垫 10,用于气膜支撑和提供水平面内移动(X、Y)和转动(Z轴)的机构;无摩擦气缸 8,用于对模拟卫星主体 5 进行重力补偿,利用气压驱动的无摩擦气缸 8 是克服在地面时卫星重力带来对微重力环境模拟的干扰,同时提供竖直方向(Z)的滑动的侧面约束;无摩擦气缸 8 的气浮活塞 9,上端用于支持模拟卫星的方形框 6,采用横向转轴(X轴)和纵向转轴(Y轴)使模拟卫星主体和方形框 6 相连接;把图 2 中构件 5-10 安装在一体,即构成一个完整的机械部件即模拟卫星。

气浮垫 10 能够在水平面内做 x、y 向的平动和 z 向的转动,气浮活塞 9 能够做 z 向平动;方形框 6 相对气浮活塞 9 与支架 7 做 x 向转动,模拟卫星主体相对方形框 6 能够做 y 向转动,模拟卫星主体 5 在惯性空间能够做六自由度无约束运动,模拟出太空中浮游卫星的真实运动形式。

在卫星主体的质量远大于支架 7、无摩擦气缸 8 和气浮垫 10 的质量时,可以不考虑质量与惯量重新分配达到等效的目的。否则需要适当地进行质量与惯量调整,使模拟卫星 3 的质量与惯量和实际卫星等效。

图 3 是气浮活塞图。在图 3 中,12 为导气孔、13 为涡流槽、小孔为 14。气浮活塞 9 是无摩擦气缸 8 进行气压式重力补偿的核心器件,气浮活塞 9 制作方法是:去除导向套和普通活塞上的密封圈留出间隙,加长活塞长度,使活塞周边导气孔 12 有气体流出,形成润滑膜。首先在用途和用法上和现有产品不相同,而且结构上大不相同:在活塞上增加了多侧面小孔 14 和多道涡流槽 13(而不是气缸筒上喷气),气浮活塞 9 上的小孔的个数为 20 以上,气浮活塞 9 上的多道涡流槽为 2~5 个,小孔 14 和涡流槽用于产生气膜润滑来减小活塞运动时的摩擦。

气浮活塞 9 在侧向承载力上没有范围要求、在行程(可达几百毫米)

和驱动力（300牛以上）上有大大提高；在精度上虽然不如LBC，但成本是它们的百分之一。

图4是气压式重力补偿方法示意图；图5是气腔内气流特性图；图6是气膜展开形状和尺寸示意图。在图4和图5中，气压式重力补偿方法是把处理后的洁净空气接入电气比例阀再通入无摩擦气缸8。无摩擦气缸8的下部有一定的体积，气浮活塞9为圆柱体，底面积为 $S$ ，气浮活塞9和重物的总重量为 $G$ 。各管道和元件中的压力和气体流量见图4中相应位置，为分析的需要，各个压力均为和外界大气压的差压， $q_m$ 为低摩擦气缸缝隙中流量，即泄露量。

由于要使重物（空间微重力实验对象）的重力被抵消，若以向上的方向为正，则有

$$\begin{aligned} -G + PS + f &= 0 \\ P = p_g &= \frac{G - f}{S} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $f$ 为气浮活塞9受到的摩擦力。考虑当气浮活塞9处于悬浮时受到的只有气膜的摩擦力，由于气体摩擦非常小，近似认为是0（这是许多人称低摩擦气缸为无摩擦气缸的缘故），由式（1）有： $p_g S \approx G$

$$\text{则该系统的控制目标为} \quad p_g = \frac{G}{S} \quad (2)$$

如式（2）只要保持每一时刻无摩擦气缸8内压强不变，则重力时时刻刻被补偿。该物体在受到其他力（这里限竖直力）作用时将符合牛顿运动定理，如同失重条件下的运动。

针对气浮活塞9三种运动情况，研究无摩擦气缸8内气流特性：

1) 当气浮活塞9静止时，气腔内压强 $P = p_g$ ，按理想条件此时进出口的气压都为 $p_g$ 。为控制气浮活塞9位置，所以气腔内体积质量存在

$$M(t) = M_0 + q_3 t - q_m t = M_0 \quad (3)$$

式中 $M = \rho V = \rho Sx$ ,  $M_0 = Sx_0$ 即初始体积的质量，则 $q_3 = q_m$ 。

2) 当气浮活塞 9 和重物一起向上匀速运动时, 气腔内体积需要增加, 气浮活塞 9 位置是运动时间的函数, 则

$$\text{则此时} \quad q_3 = \rho S \dot{x} + q_m \quad (4)$$

3) 当气浮活塞 9 下降运动时, 如果气浮活塞 9 处的缝隙泄露量不能满足运动速度要求时, 无摩擦气缸 8 内的压力就会升高, 达不到重力补偿效果, 所以通过电气比例阀放气稳压。以负号表示运动向下, 故

$$q_3 = q_1 - q_2 = -\rho S \dot{x} + q_m \quad (5)$$

虽然式 (3、4、5) 不一样, 但都存在  $q_m$  是非控制量, 它的大小主要由泄露口、缝隙形状、压力差等因素决定。

根据理想的气体泄露缝隙为圆筒型来推算,  $q_m$  的数学模型为:

$$\rho_i p_i^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} (p_i^{\frac{n+1}{n}} - p^{\frac{n+1}{n}}) = \frac{q_m^2}{4(n+1)\pi^2 r^2 h^2} \ln \left( \frac{p_i^{\frac{n+1}{n}}}{p^{\frac{n+1}{n}}} \right) + \frac{6\mu q_m}{\pi r h^3} x \quad (6)$$

其中,  $r$  为无摩擦气缸 8 半径,  $h$  为缝隙的宽度,  $\mu$  为粘度,  $p_i$  为高压力点压强,  $\rho_i$  为高压力 (压强为  $p_g$ ) 点密度,  $p$  为低压力点压强;  $n$  为多变指数, 在状态变化过程中是不变常数, 其具体值是根据具体的状态变化性质而定的。当  $n=1$  时就是等温过程;  $n=\infty$  是等容过程。尽管这里的  $n$  取值范围是  $[0, \infty]$ , 但在一般过程中  $n$  的数值介于定温指数和绝热指数 (对空气来说  $k=1.4$ ) 之间, 即  $k > n > 1$ 。这里为气浮活塞 9 运动研究, 可取  $n=1.2 \sim 1.25$ 。由式 (6) 可以解出  $q_m$ , 考虑本气浮活塞 9 处缝隙并非为标准圆筒形, 故需要在式 (6) 流量值上乘系数  $K$ , 求得气体流量关系可以保证控制的实时性和准确性。在保证提供给无摩擦气缸 8 足够气量的前提下, 利用气压反馈使式 (2) 恒成立, 就可以实现竖直方向的重力补偿。采用使模拟卫星主体和方形框 6 相连接。

一种三维气浮平台的气压式重力补偿方法, 其特征在于: 该方法包括

用两条可控的气动回路，一条由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀 A，通过控制器调整气体压力后送入无摩擦气缸 8 内驱动气浮活塞 9，实现气浮活塞 9 悬浮在无摩擦气缸 8 中处于平衡状态，气浮活塞 9 上所支撑的模拟卫星主体 5 得到重力补偿；

另一条气路由空压机把压缩空气经处理后输入比例阀 B，气流进入气浮垫 10，从气浮垫 10 和平台基座 11 之间的缝隙中的多个出气小孔流入大气中，气浮垫 10 浮在气膜上能够在平面内自由运动。

图 7 是三维气浮平台的操作流程。该三维气浮平台需要结合具体实验来进行操作，主要操作流程如图 7。步骤为：先将实验对象即模拟卫星主体 5 固定，用两根转轴即横向转轴和纵向转轴联结在方形框 6 上（步骤 100），调整模拟卫星主体 5 的安装位置以保证其质心在 0 点上，达到静、动平衡（步骤 110）。检查各阀门是否正常且在初始安全位置，给空气压缩机和控制器等上电，启动空压机工作（步骤 120），当压力升到 0.8MPa 吗（步骤 130）？是，则打开总阀门（步骤 140），否，则继续等待。此时处于准备通气工作状态，控制器在输入控制任务后检查软硬件看系统是否正常？（步骤 150），若不正常则不能实验，下电维修；若正常，按任务慢慢开启控制两个比例控制阀，使气浮垫 10 和气浮活塞 9 浮起，处于待命状态（步骤 160）。实施对捕获接口 4 的捕获或对接碰撞实验，开始模拟实验并记录结果（步骤 170），实验正常与否（步骤 180）？否，实验中有不正常现象则需要重新对系统检查，实行故障诊断，若不能调整则下电维修，在此过程中可以有人参与；若是正常，则实验结束，慢慢减压排出无摩擦气缸 8 内气体，最后气浮活塞 9 和气浮垫 10 回落最低点（步骤 190），之后关断空压机和控制器（步骤 200），结束操作（步骤 210）。

显然，本领域的技术人员可以对本发明的三维气浮平台与气压式重力补偿方法进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样，倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内，则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

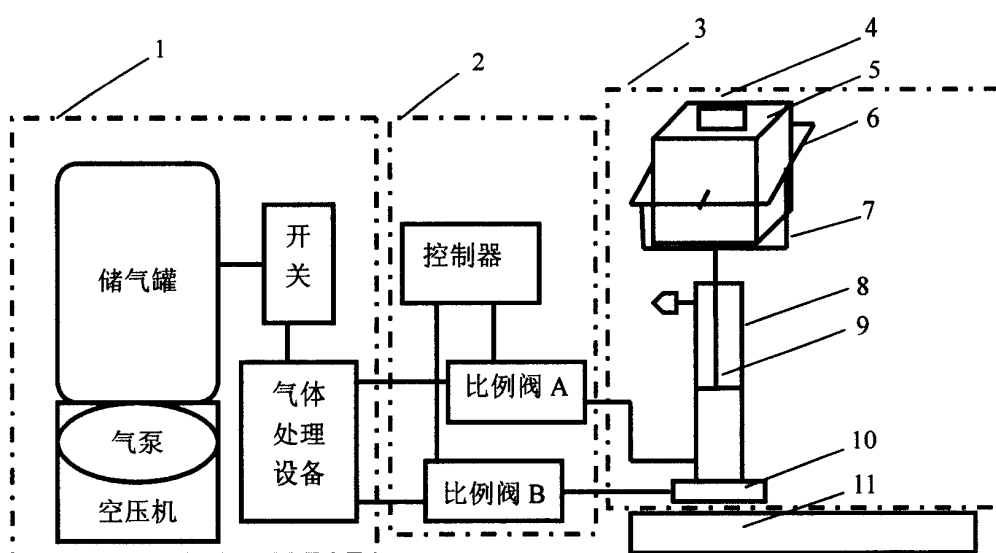


图 1

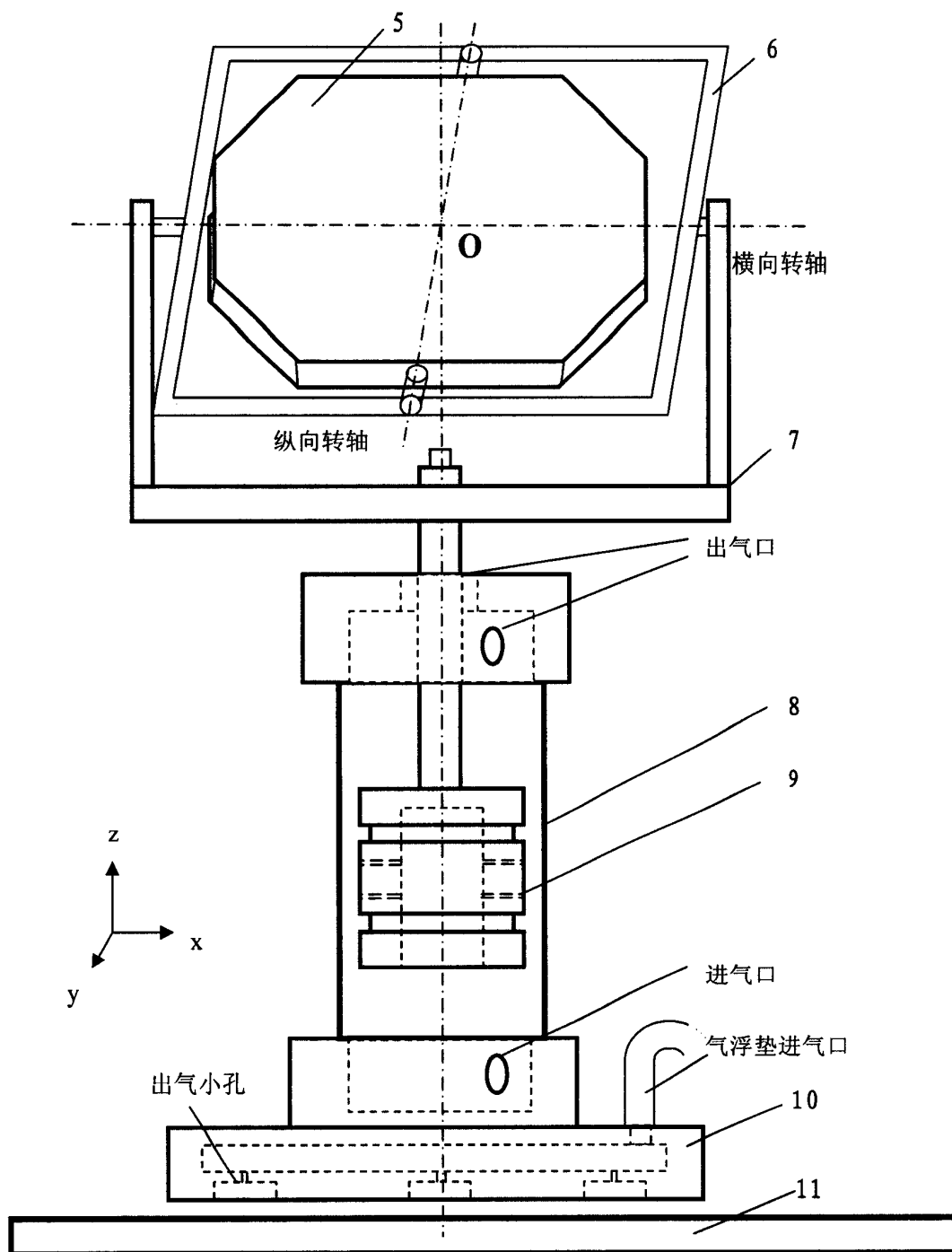


图 2

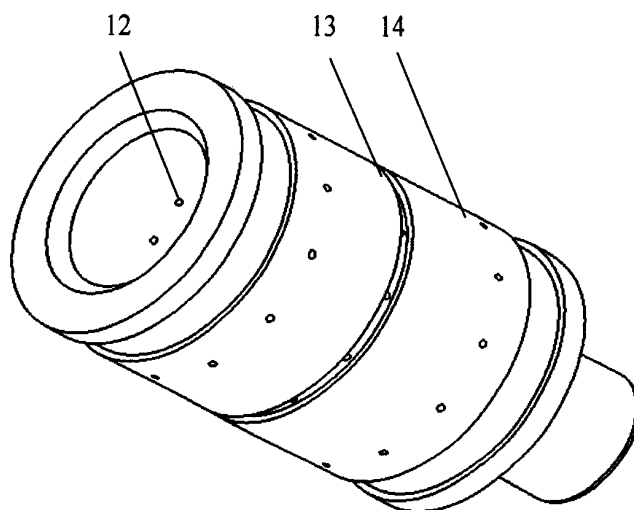


图 3

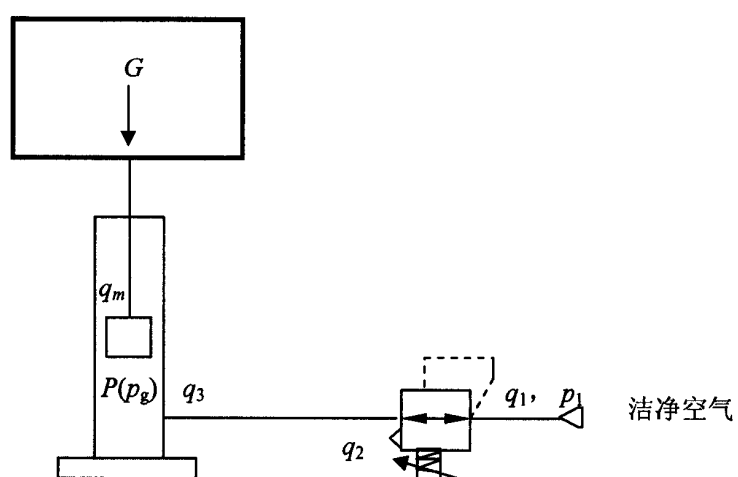


图 4



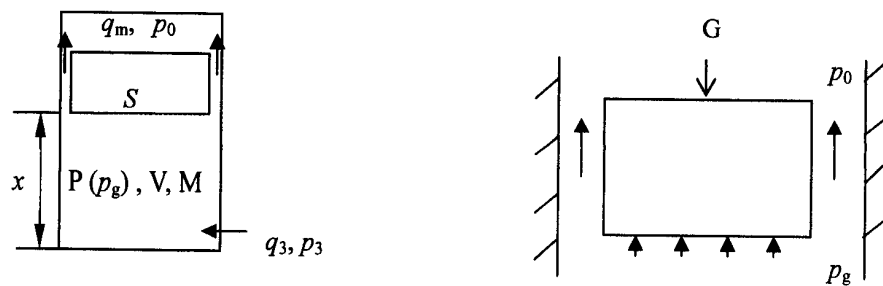


图 5

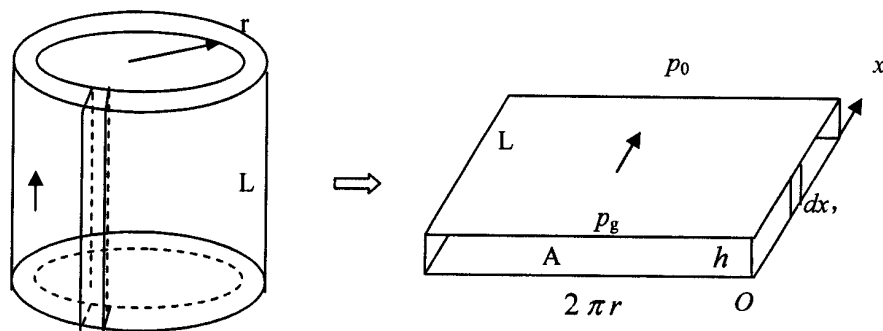


图 6

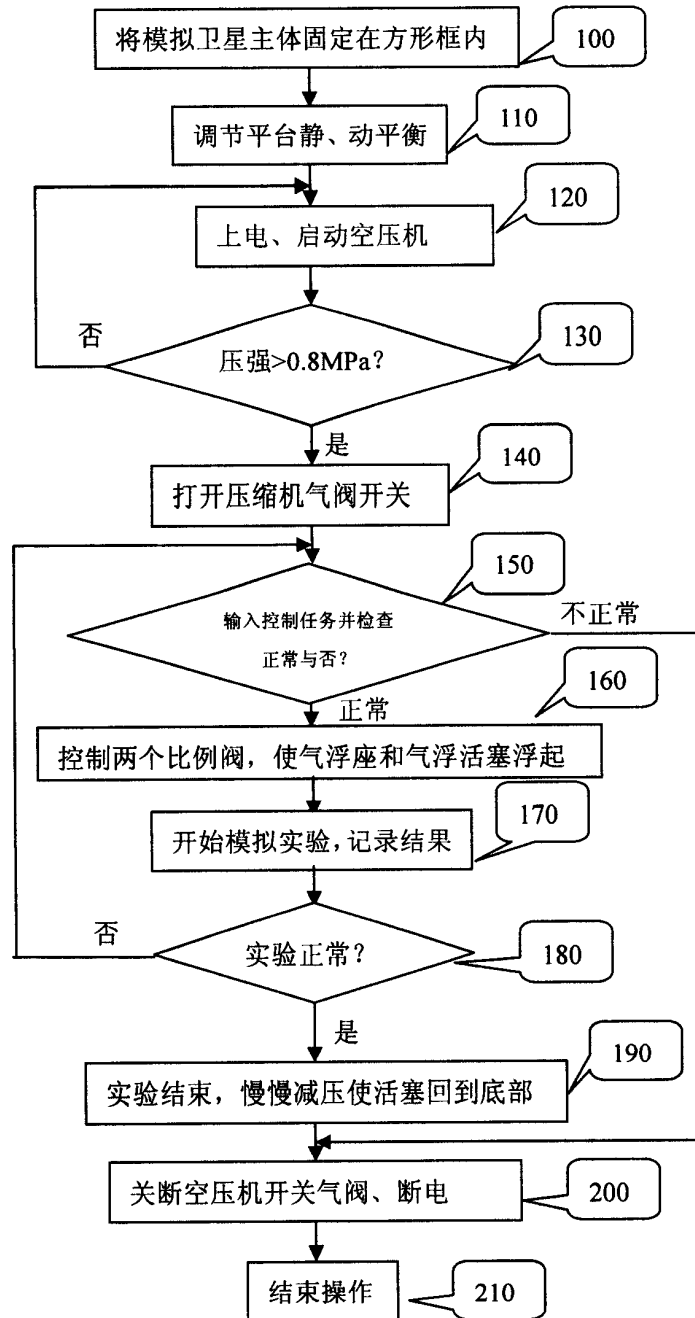


图 7