



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116443282 B

(45) 授权公告日 2023. 12. 26

(21) 申请号 202310371574.9

(22) 申请日 2023.04.10

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 116443282 A

(43) 申请公布日 2023.07.18

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 冯冠华 李文皓 张珩

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390
专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.
B64G 7/00 (2006.01)
G01V 3/40 (2006.01)

(56) 对比文件

- CN 112964491 A, 2021.06.15
- CN 103836070 A, 2014.06.04
- CN 110510157 A, 2019.11.29
- CN 112945601 A, 2021.06.11
- US 2016163218 A1, 2016.06.09

审查员 李春洋

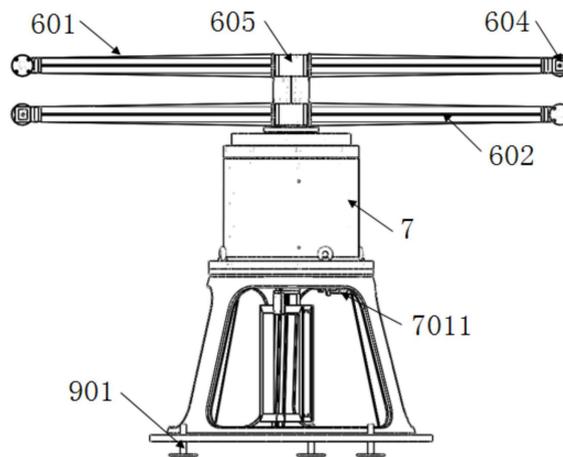
权利要求书3页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于空气轴承的地面投送实验装置及方法

(57) 摘要

本发明提出了一种基于空气轴承的地面投送实验装置及方法,轴向垂直于水平面安装的空气轴承,底座内设有连接空气轴承的磁力矩线圈,投送组件分别通过动量交换结构的导电环相互平行地安装在通轴上,投送组件的两端分别设有用于固定待投送模拟目标的释放器;通轴内置有走线孔,动量交换结构的线缆通过通轴的走线孔进入空气轴承的空腔连接磁力矩线圈,释放器的控制线缆及供电线缆经导电环过渡连接;磁力矩线圈通电后获得地磁场能,通过空气轴承传递至动量交换结构中使得第一投送组件和第二投送组件绕通轴对转,达到设定分离参数后释放模拟目标;本发明还提供了上述装置的实验方法,解决了现有技术中缺少具体可行的地面投送实验装置的问题。



1. 一种基于空气轴承的地面投送实验装置,其特征在于,包括:

轴向垂直于水平面安装的空气轴承,在所述空气轴承的下方固定有底座,所述底座内设有连接所述空气轴承的磁力矩线圈,在所述空气轴承的上方设有通轴,第一投送组件和第二投送组件分别通过动量交换结构的导电环相互平行地安装在所述通轴上,在所述第一投送组件和所述第二投送组件的两端分别设有用于固定待投送模拟目标的释放器;

所述通轴内置有走线孔,所述动量交换结构的线缆通过所述通轴的走线孔进入所述空气轴承的空腔连接所述磁力矩线圈,所述释放器的控制线缆及供电线缆经所述导电环过渡连接;

所述磁力矩线圈通电后获得地磁场能,通过所述空气轴承传递至所述动量交换结构中使得第一投送组件和第二投送组件绕所述通轴对转,达到设定分离参数后释放所述模拟目标;

所述空气轴承包括气浮轴主体,所述气浮轴主体位于轴承外框内,在所述气浮轴主体和所述轴承外框之间设有气浮套,所述气浮轴主体和所述气浮套之间形成气膜间隙,以确定所述地面投送实验装置的径向承载能力;

在所述气浮轴主体的顶部设有止推端,所述止推端上安装有上气浮板,在所述上气浮板和所述轴承外框之间的所述气浮轴主体上安装有下气浮板,所述止推端的直径小于所述气浮轴主体的直径,所述上气浮板和所述下气浮板之间充满空气形成气膜,能够相对转动以确定所述地面投送实验装置的轴向承载能力。

2. 根据权利要求1所述的一种基于空气轴承的地面投送实验装置,其特征在于,

在所述气浮轴主体的底部设有检测端和制动端,在所述检测端上安装有检测所述气浮轴主体转动参数的光栅测速传感器,在所述制动端上安装有紧急制动所述空气轴承的制动板;

其中,所述制动端的直径小于所述检测端的直径,所述检测端的直径小于所述气浮轴主体的直径,所述止推端、所述检测端和所述制动端与所述气浮轴主体一体成形。

3. 根据权利要求2所述的一种基于空气轴承的地面投送实验装置,其特征在于,

所述磁力矩线圈采用正方形形状,槽型绕线;

所述磁力矩线圈的旋转方向为垂直水平面的方向,其旋转中心与所述通轴和所述气浮轴同轴,所述通轴和所述气浮轴为中空结构。

4. 根据权利要求3所述的一种基于空气轴承的地面投送实验装置,其特征在于,

所述第一投送组件和所述第二投送组件的长度相同,其投送旋转半径为R,其范围为:

$$R \leq \sqrt{\frac{12J_{max}}{m_1 + 24m_2}}$$

式中, J_{max} 为所述动量交换结构内旋转驱动电机的最大许用转动惯量, m_1 为投送组件中一个投送杆和位于其端部释放器的质量, m_2 为端部模拟目标的质量。

5. 根据权利要求4所述的一种基于空气轴承的地面投送实验装置,其特征在于,

所述空气轴承的轴向承载能力和止推轴承的半径有关,其表达式为:

$$W_b = \Delta C_w P_s \pi (R_1^2 - R_2^2)$$

式中, W_b 为空气轴承的实际轴向承载能力; ΔC_w 为上下止推空气轴承面的承载能力系数; P_s 为供气压力; R_1 和 R_2 分别为上气浮板的最大圈半径和下气浮板的内孔半径;

所述空气轴承的径向承载能力, 其表达式为:

$$W = 2F_w C_w \Delta P_s L r$$

式中, W 为所述空气轴承的实际径向承载能力; F_w 为绕流修正系数; L 和 r 分别为所述气浮轴的轴径轴承长度和半径;

其中, 所述空气轴承的实际轴向承载能力和所述空气轴承的实际径向承载能力需要同时满足分别大于期望轴向承载能力和期望径向承载能力。

6. 根据权利要求1所述的一种基于空气轴承的地面投送实验装置, 其特征在于, 所述底座固定在所述轴承外框的底部, 所述底座为镂空形式。

7. 根据权利要求1所述的一种基于空气轴承的地面投送实验装置, 其特征在于, 所述基于空气轴承的地面投送实验装置整体采用不导磁材料。

8. 一种基于空气轴承的地面投送实验方法, 其特征在于, 所述方法采用权利要求1-7任一项所述的基于空气轴承的地面投送实验装置实现, 包括:

S100、调整系统平台和系统惯量主轴: 采用调平仪器调整空气轴承的上气浮板的板面与所处实验场地的水平面平行, 第一投送组件和第二投送组件的惯量主轴与所处实验场地的水平面法线平行;

S200、测量地磁场强: 测量磁力矩线圈所处位置在地磁坐标系下的X轴和Y轴上地磁场分量的强度;

S300、标定系统摩擦力矩: 摩擦力矩标定值 T_f 需满足如下条件:

$$T_f = \frac{\sum_{i=1}^n F_i l_i}{n} < 0.1 \bar{T}_f \sim 0.001 \bar{T}_f$$

式中, T_f 和 \bar{T}_f 分别为标定的系统摩擦力矩和磁力矩线圈可提供的最大驱动磁力矩; F_i 和 l_i 为单次拉力计示数及其对应力臂值, 其中 $i=1, 2, \dots, n$, n 为测试次数;

S400、产生稳定磁矩: 给磁力矩线圈通入恒流电, 产生稳定磁矩;

S500、获取磁力矩线圈的初始最优角度;

S600、地磁储能: 光栅测速传感器实时检测磁力矩线圈的角位移 β_k , $k=0, 1, \dots$, 根据角位移 β_k 参量实时控制动量交换结构的输出力矩和转动方向, 使得第一投送组件和第二投送组件对转;

S700、地磁储能投送: 实时检测待投送的模拟目标的线速度, 在达到设定的分离参数时, 发送信号给释放器, 控制多个模拟目标分时/同时的释放投送;

S800、终止或进行新一轮地磁储能释能投送。

9. 根据权利要求8所述的一种基于空气轴承的地面投送实验方法, 其特征在于, 所述动量交换结构的输出力矩的实时最优值记为 $T_{opt}(k+1)$, 其中, $k=0, 1, \dots$, 具体的取值公式为:

$$T_{opt}(k+1) = k_f f(k+1), k=0, 1, \dots$$

$$T_{opt}(0) = 0$$

$$f(k+1) = \mu_1 G_{k+1}(\beta_{k+1}) + \mu_2 \dot{G}_{k+1}(\beta_{k+1}), k = 0, 1, \dots$$

$$G_{k+1}(\beta_{k+1}) = \|\beta_{k+1} - \beta_0(0)\| + \lambda G_k(\beta_k), k = 0, 1, \dots$$

$$\dot{G}_{k+1}(\beta_{k+1}) = \frac{\|\beta_{k+1} - \beta_k\|}{\Delta t}, k = 0, 1, \dots$$

$$G_0(\beta_0) = 0; \dot{G}_0(\beta_0) = 0$$

式中, k_r 为旋转驱动电机的力矩输出系数, 取值与旋转驱动电机的硬件相关; μ_1, μ_2 为控制权重系数; Δt 为光栅测速传感器的硬件采样时间; β_0 为单次实验时的磁力矩线圈的初始角位移; $\lambda \in [0, 1]$ 为遗忘因子; $f(k)$ 、 $G_k(\beta_k)$ 和 $\dot{G}_k(\beta_k)$ 均为控制中间过程量。

一种基于空气轴承的地面投送实验装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及航天技术领域,具体涉及一种基于空气轴承的地面投送实验装置及方法。

背景技术

[0002] 当前,以美国星链等为代表的低轨道巨型星座井喷式发展,并在轨快速部署,2022年10月星链在轨部署超3000颗卫星,未来巨型星座将占用近地轨道70%以上的轨道资源,其提供全球互联网服务造福人类的同时,也会加剧“太空拥堵”,造成更多“太空垃圾”,尤其是低轨空间,将成为“重灾区”,国际上已公认主动碎片清除是解决该问题的最直接最有效手段。主动碎片清除即是主动降低低轨空间碎片的轨道高度,借助空间推进技术将碎片的近地点高度降低至约200km以下,受地球大气阻力的影响,它的轨道半长轴迅速减小并最终坠入大气层烧毁。当前空间交会对接、空间目标捕获(如空间机械臂、飞网、飞爪和飞矛等)及常规推进方式拖拽变轨(如化学推进、电推进等)等技术已不存在技术瓶颈,但在面向具备分布散、数量多特点的低轨空间碎片清除任务时,为实现捕获后组合体的降轨再入,不可避免地消耗大量在轨燃料,主动清除低轨道空间碎片的效率性和经济性尚难以解决。

[0003] 为此,专利号ZL201910773631.X公开了一种低轨道地磁蓄能-释放投送系统和专利号ZL201910774222.1公开了一种传递式对转地磁蓄能-释放投送系统及方法,提出了一种基于低轨原位地磁场能和太阳能的蓄能无工质在轨投送新方法,面向捕获后的组合体变轨再入,无需消耗燃料工质,可有效解决低轨主动清除现有技术经济性和效率性不兼顾的问题。同时,专利号ZL202110269136.2公开了一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统及方法和专利号ZL202110269133.9公开了一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统与方法,提出了相应的该技术及其投送技术的地面验证系统与方法,克服了地面空气阻力限制线速度上限的难题。

[0004] 但是,上述已授权专利仅针对蓄能加速旋转及其超高线速度获取的地面验证提出了相应的系统与方法,仅提供了地面装置系统设计原理,并未给出具体可行的地面实验装置的设计及研制方法,同时也未提出对应的地面实验方法及其控制算法的验证方法。

发明内容

[0005] 本发明提出了一种基于空气轴承的地面投送实验装置及方法,以解决现有技术中缺少具体可行的地面投送实验装置的问题。

[0006] 在本发明的第一个方面,提供了一种基于空气轴承的地面投送实验装置,包括:

[0007] 轴向垂直于水平面安装的空气轴承,在所述空气轴承的下方固定有底座,所述底座内设有连接所述空气轴承的磁力矩线圈,在所述空气轴承的上方设有通轴,第一投送组件和第二投送组件分别通过动量交换结构的导电环相互平行地安装在所述通轴上,在所述第一投送组件和所述第二投送组件的两端分别设有用于固定待投送模拟目标的释放器;

[0008] 所述通轴内置有走线孔,所述动量交换结构的线缆通过所述通轴的走线孔进入所

述空气轴承的空腔连接所述磁力矩线圈,所述释放器的控制线缆及供电线缆经所述导电环过渡连接;

[0009] 所述磁力矩线圈通电后获得地磁场能,通过所述空气轴承传递至所述动量交换结构中使得第一投送组件和第二投送组件绕所述通轴对转,达到设定分离参数后释放所述模拟目标。

[0010] 进一步地,所述空气轴承包括气浮轴主体,所述气浮轴主体位于轴承外框内,在所述气浮轴主体和所述轴承外框之间设有气浮套,所述气浮轴主体和所述气浮套之间形成气膜间隙,以确定所述地面投送实验装置的径向承载能力;

[0011] 在所述气浮轴主体的顶部设有止推端,所述止推端上安装有上气浮板,在所述上气浮板和所述轴承外框之间的所述气浮轴主体上安装有下气浮板,所述止推端的直径小于所述气浮轴主体的直径,所述上气浮板和所述下气浮板之间充满空气形成气膜,能够相对转动以确定所述地面投送实验装置的轴向承载能力。

[0012] 进一步地,在所述气浮轴主体的底部设有检测端和制动端,在所述检测端上安装有检测所述气浮轴主体转动参数的光栅测速传感器,在所述制动端上安装有紧急制动所述空气轴承的制动板;

[0013] 其中,所述制动端的直径小于所述检测端的直径,所述检测端的直径小于所述气浮轴主体的直径,所述止推端、所述检测端和所述制动端与所述气浮轴主体一体成形。

[0014] 进一步地,所述磁力矩线圈采用正方形形状,槽型绕线;

[0015] 所述磁力矩线圈的旋转方向为垂直水平面的方向,其旋转中心与所述通轴和所述气浮轴同轴,所述通轴和所述气浮轴为中空结构。进一步地,所述第一投送组件和所述第二投送组件的长度相同,其投送旋转半径为R,其范围为:

$$[0016] \quad R \leq \sqrt{\frac{12J_{max}}{m_1 + 24m_2}}$$

[0017] 式中, J_{max} 为所述动量交换结构内旋转驱动电机的最大许用转动惯量, m_1 为投送组件中一个投送杆和位于其端部释放器的质量, m_2 为端部模拟目标的质量。

[0018] 进一步地,所述空气轴承的轴向承载能力和止推轴承的半径有关,其表达式为:

$$[0019] \quad W_b = \Delta C_w P_s \pi (R_1^2 - R_2^2)$$

[0020] 式中, W_b 为空气轴承的实际轴向承载能力; ΔC_w 为上下止推空气轴承面的承载能力系数; P_s 为供气压力; R_1 和 R_2 分别为上气浮板的最大圈半径和下气浮板的内孔半径;

[0021] 所述空气轴承的径向承载能力,其表达式为:

$$[0022] \quad W = 2F_w C_w \Delta P_s L r$$

[0023] 式中, W 为所述空气轴承的实际径向承载能力; F_w 为绕流修正系数; L 和 r 分别为所述气浮轴主体的轴径轴承长度和半径,mm;

[0024] 其中,所述空气轴承的实际轴向承载能力和所述空气轴承的实际径向承载能力需要同时满足分别大于期望轴向承载能力和期望径向承载能力。

[0025] 进一步地,所述底座固定在所述轴承外框的底部,所述底座为镂空形式。

[0026] 进一步地,所述基于空气轴承的地面投送实验装置整体采用不导磁材料。

[0027] 在本发明的第二个方面,提供一种基于空气轴承的地面投送实验方法,包括:

[0028] S100、调整系统平台和系统惯量主轴:采用调平仪器调整空气轴承的上气浮板的板面与所处实验场地的水平面平行,第一投送组件和第二投送组件的惯量主轴与所处实验场地的水平面法线平行;

[0029] S200、测量地磁场强:测量磁力矩线圈所处位置在地磁坐标系下的X轴和Y轴上地磁场分量的强度;

[0030] S300、标定系统摩擦力矩:摩擦力矩标定值 T_f 需满足如下条件:

$$[0031] \quad T_f = \frac{\sum_{i=1}^n F_i l_i}{n} < 0.1 \bar{T}_f \sim 0.001 \bar{T}_f$$

[0032] 式中, T_f 和 \bar{T}_f 分别为标定的系统摩擦力矩和磁力矩线圈可提供的最大驱动磁力矩; F_i ($i=1,2,\dots,n$)和 l_i 为单次拉力计示数及其对应力臂值, n 为测试次数;

[0033] S400、产生稳定磁矩:给磁力矩线圈通入恒电流,产生稳定磁矩;

[0034] S500、获取磁力矩线圈的初始最优角度;

[0035] S600、地磁储能:光栅测速传感器实时检测磁力矩线圈的角位移 β_k ($k=0,1,\dots$),根据角位移 β_k 参量实时控制动量交换结构的输出力矩和转动方向,使得第一投送组件和第二投送组件对转;

[0036] S700、地磁储能投送:实时检测待投送的模拟目标的线速度,在达到设定的分离参数时,发送信号给释放器,控制多个模拟目标分时/同时的释放投送;

[0037] S800、终止或进行新一轮地磁储能释能投送。

[0038] 进一步地,所述动量交换结构的输出力矩的实时最优值记为 $T_{opt}(k+1)$ ($k=0,1,\dots$),具体的取值公式为:

$$[0039] \quad T_{opt}(k+1) = k_r f(k+1), k=0,1,\dots$$

$$[0040] \quad T_{opt}(0) = 0$$

$$[0041] \quad f(k+1) = \mu_1 G_{k+1}(\beta_{k+1}) + \mu_2 \dot{G}_{k+1}(\beta_{k+1}), k=0,1,\dots$$

$$[0042] \quad G_{k+1}(\beta_{k+1}) = \|\beta_{k+1} - \beta_0(0)\| + \lambda G_k(\beta_k), k=0,1,\dots$$

$$[0043] \quad \dot{G}_{k+1}(\beta_{k+1}) = \frac{\|\beta_{k+1} - \beta_k\|}{\Delta t}, k=0,1,\dots$$

$$[0044] \quad G_0(\beta_0) = 0; \dot{G}_0(\beta_0) = 0$$

[0045] 式中, k_r 为旋转驱动电机的力矩输出系数,取值与旋转驱动电机的硬件相关; μ_1, μ_2 为控制权重系数; Δt 为光栅测速传感器的硬件采样时间,s; β_0 为单次实验时的磁力矩线圈的初始角位移; $\lambda \in [0,1]$ 为遗忘因子; $f(k)$ 、 $G_k(\beta_k)$ 和 $\dot{G}_k(\beta_k)$ 均为控制中间过程量。

[0046] 本发明和现有技术相比具有如下有益效果:

[0047] 1.本发明公开的一种基于空气轴承的地面投送实验装置及方法,可用于指导研制可行的地面装置,用于模拟目标的动态、瞬间高响应投送释放控制等的地面验证实验。

[0048] 2.本发明公开的基于空气轴承的地面投送实验装置,具备可拆卸、重复使用及多用途等优势。如提出的支撑空气轴承的底座,不仅可以用于本地磁验证实验,还可用于其他

单轴气浮实验的地面验证。

[0049] 3.本发明提出的实验装置及方法不仅可以用于单个目标的精准投送验证实验装置研制,还可以用于多个目标的针对同一目标点的精准投送验证实验装置研制,具有普适性。

附图说明

[0050] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引申获得其它的实施附图。

[0051] 图1为本发明实施例中基于空气轴承的地面投送实验装置的立体示意图(未包含配气系统、供电和控制系统);

[0052] 图2为本发明实施例中基于空气轴承的地面投送实验装置的结构示意图(未包含配气系统、供电和控制系统);

[0053] 图3为本发明实施例中动量交换结构的立体示意图;

[0054] 图4为本发明实施例中空气轴承及其底座的结构示意图;

[0055] 图5为本发明实施例中空气轴承的结构示意图;

[0056] 图6为本发明实施例中止推轴承的参数示意图;

[0057] 图中标号:

[0058] 1-止推轴承的内径,2-止推轴承的外径,3-气浮轴主体的轴承长度减去轴向空气气膜间隙的厚度,4-气浮轴主体的半径减去径向空气气膜间隙的厚度;

[0059] 6-投送系统,7-空气轴承,8-磁力矩线圈,9-底座;

[0060] 601-投送组件,602-投送杆,603-通轴,604-释放器,605-动量交换结构,606-旋转驱动电机,607-电机外转子输出法兰,608-内置走线孔,609-电机安装法兰,6010-导电环,701-上气浮板,702-下气浮板,703-止推端,704-气浮轴主体,705-检测端,706-制动端,707-上气浮套,708-下气浮套,709-轴承外框,7010-圆光栅,7011-制动板,901-支撑脚杯。

具体实施方式

[0061] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0062] 如图1-2所示,本发明提供了一种基于空气轴承的地面投送实验装置,包括:轴向垂直于水平面安装的空气轴承7,在空气轴承7的下方固定有底座9,底座9内设有连接空气轴承7的磁力矩线圈8,在空气轴承7的上方设有通轴603,第一投送组件和第二投送组件分别通过动量交换结构605的导电环6010相互平行地安装在通轴603上,在第一投送组件和第二投送组件的两端分别设有用于固定待投送模拟目标的释放器604;通轴603内置有走线孔608,动量交换结构605的线缆通过通轴603的走线孔608进入空气轴承7的空腔连接磁力矩线圈8,释放器604的控制线缆和供电线缆经导电环6010过渡连接;磁力矩线圈8通电后获得

地磁场能,通过空气轴承7传递至动量交换结构605中使得第一投送组件和第二投送组件绕通轴603对转,达到设定分离参数后释放模拟目标。

[0063] 本发明中,通过磁力矩线圈8上电后,产生磁场与当地地磁场作用,产生磁力矩效应,基于该效应,持续获取地磁场能,并实时地将地磁场能通过下述的动量交换装置转换走,并最终存储为旋转投送杆602末端的模拟目标的线动能,保证磁力矩装置在整个储能过程中的姿态不动或姿态角稳定在预设可接受的小范围内。

[0064] 本发明中,实验装置的整体尺寸主要关注四个尺寸:底座9高度、气浮台面高度(下图5所示的上气浮板701面到地面的高度)、投送组件601高度和投送旋转半径,底座9高度由磁力矩线圈8的尺寸上限来决定;气浮台面高度由整个空气轴承7在竖直方向的承载能力来决定;投送组件601高度和旋转半径由需要验证的投送线速度或旋转角速度量级、旋转驱动电机606的转动惯量上限来决定。具体地,

[0065] 磁力矩线圈8中,磁力矩线圈8主要用于在通电后,获取当地地磁场能,验证地磁场能的获取原理可行性。为便于加工及绕线,磁力矩线圈8可采用正方形形状,槽型绕线,其单边长度为L。

[0066] 所以,底座9高度 h_1 :考虑到磁力矩线圈8的可扩展性,可按如下设计底座9高度 h_1 :

[0067] $h_1 = 1.5L \sim 2L$

[0068] 其中,底座9的底部均匀安装有多个支撑脚杯901,可以通过调整支撑脚杯901的高度,调整底座9的高度。

[0069] 气浮台面高度 h_2 :

[0070] $h_2 = h_1 + h_b$

[0071] 上式中, h_b 为空气轴承7的高度(为空气轴承基座、下气浮板702和上气浮板701的三者高度之和)。

[0072] 投送组件601高度 h_3 :

[0073] $h_3 = h_1 + h_2 + h_m$

[0074] 上式中, $h_m = 2h_m \sim 3h_m$, h_m 为旋转驱动电机606的高度。气浮台面高度将决定投送组件601的高度,投送组件601高度值的大小将决定实验装置可以用于实验的最大投送距离的远近,高度越高可模式实验投送的距离越远,本发明给出的投送装置高度制约计算公式,可以明确实验装置的极限距离实验模拟条件。

[0075] 投送旋转半径R:

$$[0076] \quad R \leq \sqrt{\frac{12J_{max}}{m_1 + 24m_2}}$$

[0077] 上式中, J_{max} 为旋转驱动电机606的最大许用转动惯量,每个投送组件601包括两个投送杆602, m_1 和 m_2 分别为一个投送杆602和位于其末端释放器604+模拟目标的质量。

[0078] 在限制电机选型且约束投送杆602质量 m_1 和模拟目标质量 m_2 的情况下,本发明中给出了投送旋转半径的极限设计公式,在现有装置硬件允许下,明确半径上限,即可以知道地面高速投送试验装置的极限模拟速度。

[0079] 而且,还可以根据投送旋转半径公式,结合优化降低投送杆602的质量 m_1 来获得更大的模拟速度,或者在同样的投送旋转半径下,通过优化降低 m_1 质量来提高可实验的模拟

目标 m_2 的投送实验质量。

[0080] 包括有第一投送组件和第二投送组件的投送系统6中,投送系统6用于地磁场能的转换、储存与释放,完成模拟目标的投送验证实验。投送系统6包括安装在通轴603上的双动量交换结构605,和位于动量交换结构605两侧的投送杆602组成的投送组件601,两组投送组件601之间的距离固定且相互平行。

[0081] 磁力矩线圈8的旋转方向为垂直水平面的方向,其旋转中心与通轴603和空气轴承7的气浮轴同轴,通轴603和气浮轴均为中空结构。

[0082] 动量交换结构605包括电机外转子输出法兰607、旋转驱动电机606、电机安装法兰609、导电环6010和通轴603等,电机外转子输出法兰607固定在电机外转子上,端部连接投送杆602,由于电机为中空式,故将其面对面布置在通轴603上,通轴603上端通过过渡法兰与电机内定子连接,通轴603下端直接通过安装孔与电机内定子连接并开走线槽。通轴603内置有走线孔608,电机线缆由通轴603走线孔进入气浮轴空腔内,投送杆602末端的释放器604的控制及供电线缆经导电环6010过渡连接,使投送系统6在高速旋转过程中不会出现绕线的情况。

[0083] 投送实验中,投送杆602末端的释放器604和模拟目标需要供电与投送释放控制,所以动量交换结构605中的电机需要在高速相对旋转时保证供电和控制信号的正常传输,以完整完成投送实验,本发明中通过将线缆内置到轴的腔体内,结合导电环6010,不会出现绕线的情况。

[0084] 在一个具体实施例中,以力矩电机选用NSK的PS系列力矩,电机型号为NSK M-PS1006KN002、配套的驱动器型号为NSK M-PS1006AB502-03和连接线型号为NSK M-C004SCP03为例,设计的动量交换结构605如图3所示。

[0085] 空气轴承7中,空气轴承7主要用于支撑投送系统6,连接投送系统和磁力矩线圈8,实现地磁场能的传递。

[0086] 气浮轴承是利用气体作为润滑剂的滑动摩擦主轴,通过向气浮主轴的轴腔内注入压缩空气,利用气模压力作为支承,以分离相对运动的两个表面。

[0087] 如图4-5所示,空气轴承7包括气浮轴主体704,气浮轴主体704位于轴承外框7010内,在气浮轴主体704和轴承外框7010之间设有上气浮套707和下气浮套708,气浮轴主体704和上、下气浮套之间形成气膜间隙,起到径向轴承的作用,使得气浮轴主体704能够在气浮套内高速旋转,以确定地面投送实验装置的径向承载能力,防止设备倾覆。

[0088] 在气浮轴主体704的顶部设有止推端703,止推端703上安装有上气浮板701,止推端703的高度小于上气浮板701的厚度,在上气浮板701和轴承外框7010之间的气浮轴主体704上安装有下气浮板702,止推端703的直径小于气浮轴主体704的直径,上气浮板701和下气浮板702之间充满空气形成气膜,上气浮板701和下气浮板702能够相对转动,上气浮板701和下气浮板702相互结合起到止推轴承的作用,以确定地面投送实验装置的轴向承载能力。

[0089] 在气浮轴主体704的底部设有检测端705和制动端705,在检测端705上安装有检测气浮轴主体704转动参数的光栅测速传感器,在制动端705上安装有紧急制动空气轴承7的制动板7012。其中,制动端705的直径小于检测端705的直径,检测端705的直径小于气浮轴主体704的直径,止推端703、检测端705和制动端705与气浮轴主体704一体成形。

[0090] 本实施例中的光栅测速传感器选择圆光栅7011安装在气浮轴主体704底端的检测端705处,由于磁力矩线圈8和通轴603安装固定在空气轴承7的上下两端,所以测速传感器能够高精度测量磁力矩线圈8、通轴603和气浮轴的转动角速度和角位移。同时,本实施例中设置了制动板7012,即可以在出现高转速不可控的时候,进行紧急制动,确保设备不被损坏,也保证实验人员的安全。

[0091] 底座9固定在轴承外框7010的底部,为镂空形式,以便于磁力矩线圈8的安装和不屏蔽地磁场。

[0092] 此外,为了不影响磁力矩线圈8的地磁能获取,整个装置采用不导磁材料。此处,以采用不导磁材料外框架和底座9为铸铝114A,上气浮板701、下气浮板702、气浮轴和气浮套采用7075为例,一种空气轴承7的外形如图4所示。

[0093] 空气轴承7的尺寸需要按照下述参数进行校核确定,分为空气轴承7的轴向承载和径向承载两方面。

[0094] (1) 轴向承载校核

[0095] 轴向承载能力 W_b :

$$[0096] \quad W_b = \Delta C_w P_s \pi (R_1^2 - R_2^2) \geq \overline{W}_b$$

[0097] 上式中, W_b 和 \overline{W}_b 分别为实际轴向承载能力和期望轴向承载能力; ΔC_w 为上下止推空气轴承7面的承载能力系数,上止推空气轴承7面为上气浮板701的下表面,下止推空气轴承7面为下气浮板702的上表面; P_s 为供气压力(绝对压力); R_1 和 R_2 分别为止推轴承外径和止推轴承内径,m。止推轴承的内径、外径分别为下气浮板702的内孔半径(图6中的1)、上气浮板701的最大圈半径(图6中的2)。轴向止推刚度 K :

$$[0098] \quad K = \frac{\Delta W}{\Delta h} \geq \overline{K}$$

[0099] 上式中, K 和 \overline{K} 分别为实际轴向止推刚度和期望轴向止推刚度, $N/\mu\text{m}$; ΔW 和 Δh 分别为承载能力变化量, N 和气膜厚度变化量, μm 。

[0100] 轴向角刚度 K_α :

$$[0101] \quad K_\alpha = K R_0^2 \geq \overline{K}_\alpha$$

[0102] 上式中, K_α 和 \overline{K}_α 分别为实际轴向角刚度和期望轴向角刚度, Nm/arcsec ; R_0 为节流器节圆直径,mm。

[0103] 轴向摩擦力矩 T_f :

$$[0104] \quad T_f = \frac{\mu \omega}{h} (R_1^4 - R_2^4) \geq \overline{T}_f$$

[0105] 上式中, T_f 和 \overline{T}_f 分别为实际轴向摩擦力矩和期望轴向摩擦力矩; μ 为气体动力粘度; ω 为角速度, rad/s ; R_1 和 R_2 分别为止推轴承外径和止推轴承内径,m。止推轴承的内径、外径分别为下气浮板702的内孔半径(图6中的1)、上气浮板701的最大圈半径(图6中的2)。

[0106] (2) 径向承载校核

[0107] 径向承载能力 W :

$$[0108] \quad W = 2F_w C_w \Delta P_s L r \geq \bar{W}$$

[0109] 上式中, W 和 \bar{W} 分别为实际径向承载能力和期望径向承载能力; F_w 为绕流修正系数; P_s 为供气压力(绝对压力); L 为气浮轴主体704的轴承长度(图6中的3), 即上气浮板701的下端面与下气浮套708的下端面之间的长度减去上气浮板701与下气浮板702之间的空气气膜间隙的厚度; r 为气浮轴主体704的半径(图6中的4, 不等于图6中的1), 即上气浮套707(或下气浮套708)的内圈半径减去上气浮套707(或下气浮套708)与气浮轴主体704之间的空气气膜间隙厚度, mm。

[0110] 径向刚度 K :

$$[0111] \quad K_r = \frac{2F}{\epsilon \Delta h} \geq \bar{K}_r$$

[0112] 上式中, K_r 和 \bar{K}_r 分别为实际径向刚度和期望径向刚度, N/ μm ; F 为径向承载能力; $\epsilon < 0.5$ 为偏心率。

[0113] 倾覆力矩 T_q :

$$[0114] \quad T_q = WL \geq \bar{T}_q$$

[0115] 上式中, T_q 和 \bar{T}_q 分别为实际倾覆力矩和期望倾覆力矩, Nm。

[0116] 径向摩擦力矩 T_f :

$$[0117] \quad T_{fr} = \frac{4\mu\omega}{h} \pi R^2 L \geq \bar{T}_{fr}$$

[0118] 上式中, T_{fr} 和 \bar{T}_{fr} 分别为实际径向摩擦力矩和期望径向摩擦力矩。

[0119] 本发明中, 只需要使用一个空气轴承7即可完成实验装置的搭建, 采用止推承载和径向承载两者二者结合的形式, 给出了轴向承载参数、径向承载参数的详细校核方法及公式, 可以根据空气轴承7的承载极限值与其尺寸的关系, 进行最优化设计并选取空气轴承7的尺寸参数, 以支持地面高速投送模拟实验的开展。

[0120] 结合上述参数公式, 可以明确气浮轴和通轴603所承受的轴向和径向载荷不同、轴表面粗糙度不同、轴的材质不同, 所以二者的磨损程度不同。本发明提供的实验装置可以拆为通轴603(如图3)和气浮轴(如图5)两部分, 从而可以按照不同的需求设计不同的尺寸, 即气浮轴为了保证空气膜完全充满, 气浮套与气浮轴间的间隙, 其表面粗糙度要求比通轴603的要更小。而实际生成中, 表面粗糙度越小, 表面越光滑, 加工成本越高。因此, 在面向实际加工时, 可以根据需求分别加工气浮轴和通轴603, 降低成本的同时, 提高了装置的可替换性和维护/维修效率。例如, 如果通轴603因为高速投送出现了变形, 只需要重新加工更换通轴603, 而不需要一并废弃并更换更高成本更高加工工艺要求的气浮轴, 使得整个过程的效率比更高。

[0121] 地面投送实验装置还包括配气系统设计、供电和控制系统, 配气系统为空气轴承提供气源, 为满足空气轴承使用的低压稳定气源, 安装气罐或稳压器, 配气压力为 P_0 , 含除水、除油等过滤器, 具备干燥净化过滤装置, 能够提供洁净、干燥的空气。

$$[0122] \quad P_0 > \overline{P_0}$$

[0123] 上式中, P_0 和 $\overline{P_0}$ 分别为实际配气压力和承载能力所需的配气压力, Mpa。

[0124] 控制系统及其方法可借鉴参考专利申请号为202110269131.X的一种低轨道地磁储能释能投送地面试验系统和方法中所述的内容或专利申请号为ZL202110269136.2的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统及方法中的控制动量交换装置输出力矩的控制算法内容。

[0125] 本发明中, 基于空气轴承的地面投送实验装置的实验方法可借鉴参考专利申请号为ZL202110269136.2的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统及方法, 包括:

[0126] S100、调整系统平台和系统惯量主轴: 采用调平仪器调整空气轴承的上气浮板的板面与所处实验场地的水平面平行, 第一投送组件和第二投送组件的惯量主轴与所处实验场地的水平面法线平行, 并同时调节磁力矩线圈、第一投送组件和第二投送组件的惯量主轴与通轴的轴线共线。

[0127] S200、测量地磁场强: 测量磁力矩线圈所处位置在地磁坐标系下的X轴和Y轴上地磁场分量的强度。

[0128] S300、标定系统摩擦力矩: 给空气轴承通电, 在通轴、磁力矩线圈、第一投送组件和第二投送组件构成的地面投送实验处于气浮状态下, 对磁力矩线圈施加多次不同状态的拉力, 并利用记录的拉力大小和每次施加的拉力对应的系统惯量通轴的垂直距离计算本次装置气浮状态的摩擦力矩标定值。

[0129] 摩擦力矩标定值 T_f 需满足如下条件:

$$[0130] \quad T_f = \frac{\sum_{i=1}^n F_i l_i}{n} < 0.1\overline{T_f} \sim 0.001\overline{T_f}$$

[0131] 式中, T_f 和 $\overline{T_f}$ 分别为标定的系统摩擦力矩和磁力矩线圈可提供的最大驱动磁力矩; F_i ($i=1, 2, \dots, n$) 和 l_i 为单次拉力计示数及其对应力臂值, n 为测试次数。

[0132] 地面投送实验验证的一条即是磁力矩线圈的力矩获取动量的能力(即地磁储能能力), 而如果系统本身存在的摩擦力矩和磁力矩线圈的力矩在同一个量级, 甚至是摩擦力矩大于磁力矩线圈的力矩, 那开展地面高速投送实验, 就不能验地磁储能效果到底是来自于系统摩擦力矩还是磁力矩线圈的力矩, 甚至是直接由于系统摩擦力矩过大导致实验无法开展。因此系统摩擦力矩远小于磁力矩线圈的力矩, 具有数量级上的差别, 才能证明实验的数据真实性和意义。

[0133] S400、产生稳定磁矩: 给磁力矩线圈通入恒流电, 产生稳定磁矩;

[0134] S500、获取磁力矩线圈的初始最优角度;

[0135] S600、地磁储能: 光栅测速传感器实时检测磁力矩线圈的角位移 β_k ($k=0, 1, \dots$), 根据角位移 β_k 参量实时控制动量交换结构的输出力矩和转动方向, 使得第一投送组件和第二投送组件对转;

[0136] 动量交换结构的输出力矩的实时最优值记为 $T_{opt}(k+1)$ ($k=0, 1, \dots$), 且具体的取值公式为:

$$[0137] \quad T_{opt}(k+1) = k_f f(k+1), k=0, 1, \dots$$

$$[0138] \quad T_{\text{opt}}(0) = 0$$

$$[0139] \quad f(k+1) = \mu_1 G_{k+1}(\beta_{k+1}) + \mu_2 \dot{G}_{k+1}(\beta_{k+1}), k = 0, 1, \dots$$

$$[0140] \quad G_{k+1}(\beta_{k+1}) = \|\beta_{k+1} - \beta_0(0)\| + \lambda G_k(\beta_k), k = 0, 1, \dots$$

$$[0141] \quad \dot{G}_{k+1}(\beta_{k+1}) = \frac{\|\beta_{k+1} - \beta_k\|}{\Delta t}, k = 0, 1, \dots$$

$$[0142] \quad G_0(\beta_0) = 0; \dot{G}_0(\beta_0) = 0$$

[0143] 上式中, k_T 为旋转驱动电机的力矩输出系数, 取值与具体电机的硬件相关; μ_1, μ_2 为控制权重系数; Δt 为圆光栅的硬件采样时间, s; β_0 为单次实验时的磁力矩线圈的初始角位移; $\lambda \in [0, 1]$ 为遗忘因子; $f(k)$ 、 $G_k(\beta_k)$ 和 $\dot{G}_k(\beta_k)$ 均为控制中间过程量。

[0144] 本发明采用的圆光栅能实时测出角位移, 在仅有角位移这一个实时值的情况下, 给出对应的输出力矩的实时最优值, 因此本发明更有普适性。这样的控制策略公式可以用于所有的磁矩生成装置转动检测模块, 还能获得和现有技术相同的控制效果。现有技术中是通过实时测量角位移 β_1 、角速度 β_2 和角加速度 β_3 三个参量获得动量交换结构的输出力矩的实时最优值, 而实时测量 3 个参数的难度很大, 而且同时大多数元件是不能直接测出角速度 β_2 或/和角加速度 β_3 的。本发明提供的一个参数获得动量交换结构的输出力矩的实时最优值的方案, 更简洁具有更大的实用性、同时节省了元器件成本。

[0145] S700、地磁储能投送: 实时检测待投送的模拟目标的线速度, 在达到设定的分离参数时, 发送信号给释放器, 控制多个模拟目标分时/同时的释放投送;

[0146] S800、终止或进行新一轮地磁储能释能投送。

[0147] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例, 不用于限制本申请, 本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内, 对本申请做出各种修改或等同替换, 这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

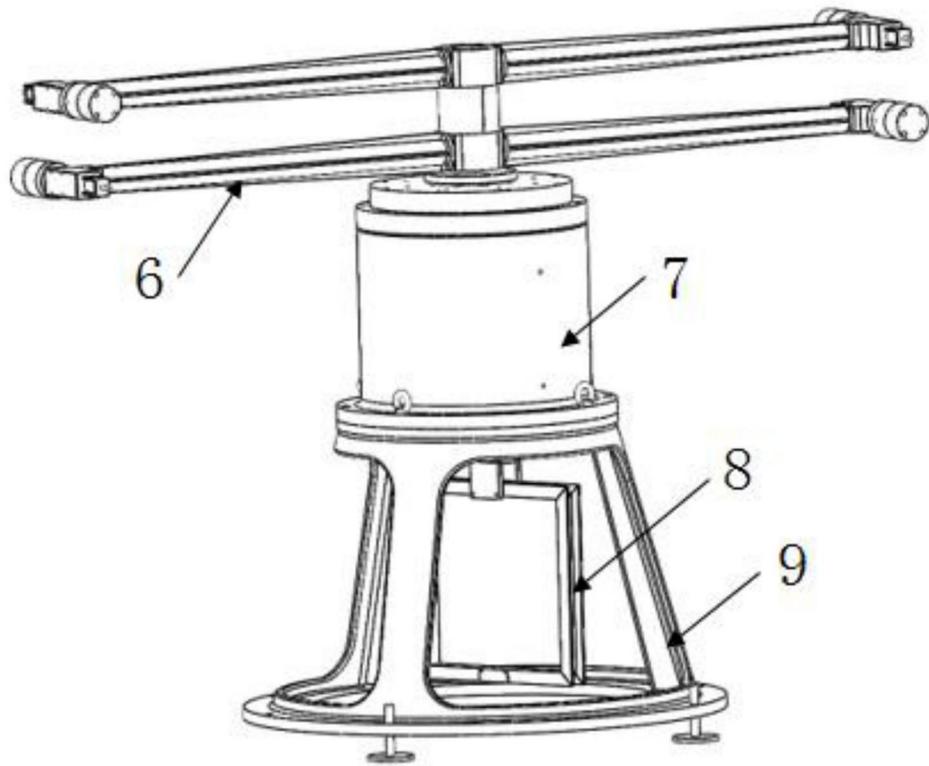


图1

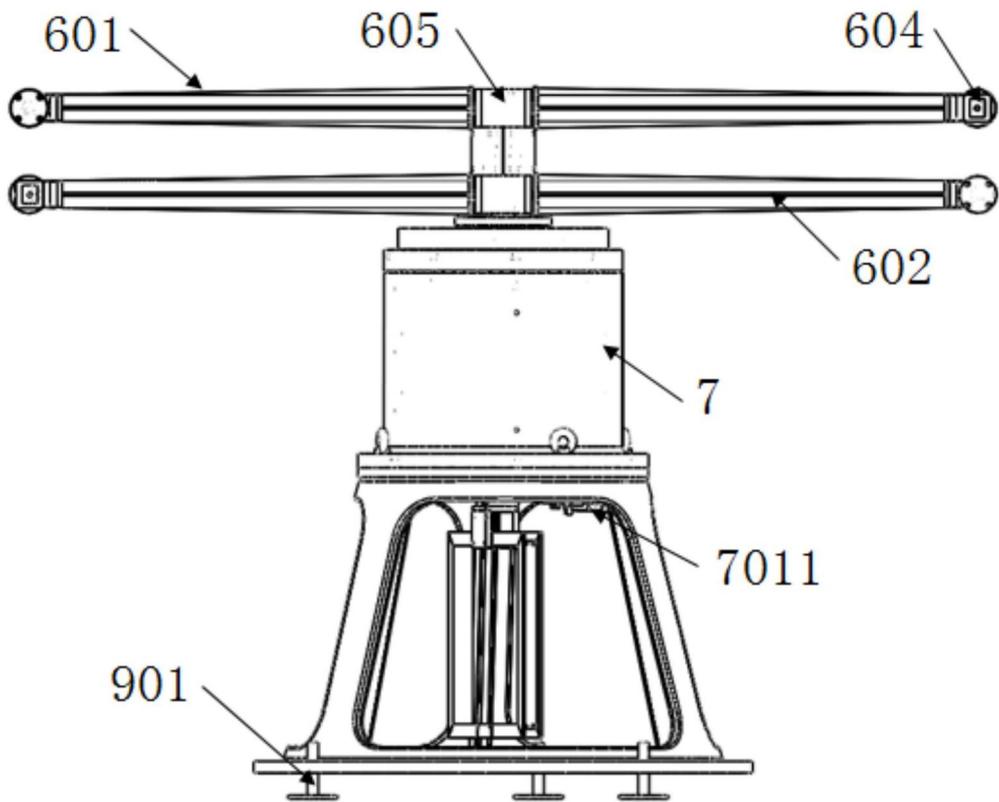


图2

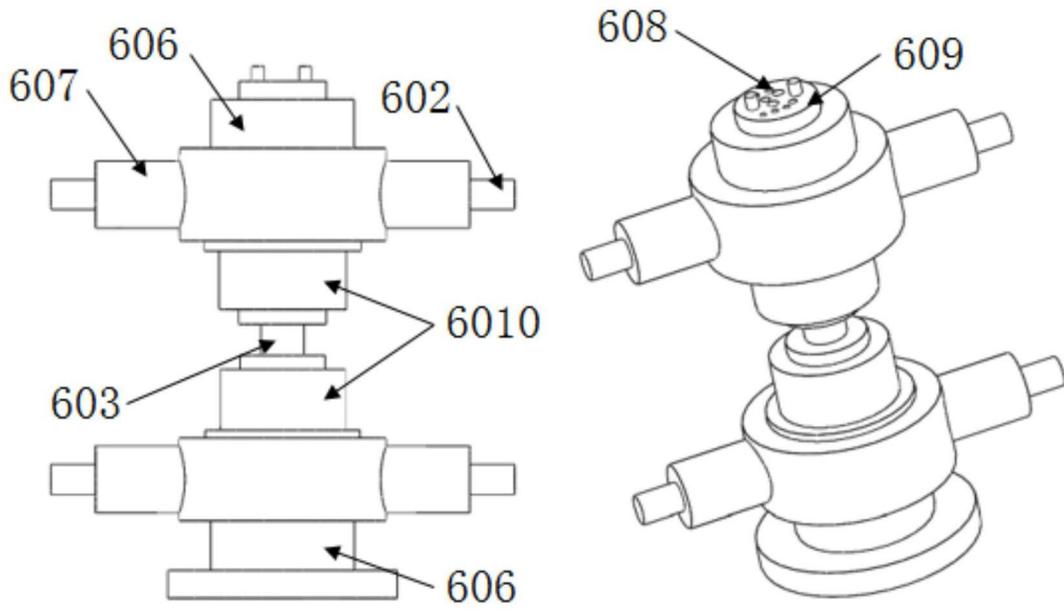


图3

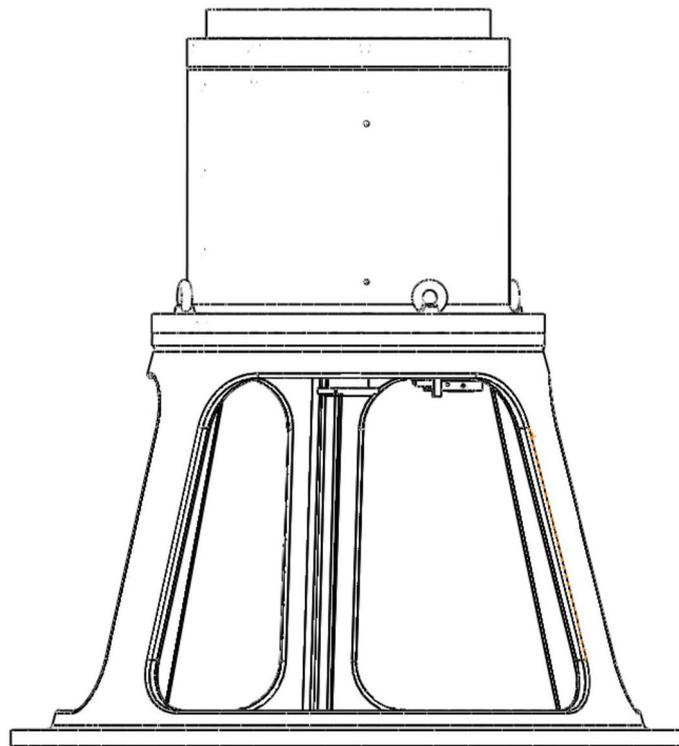


图4

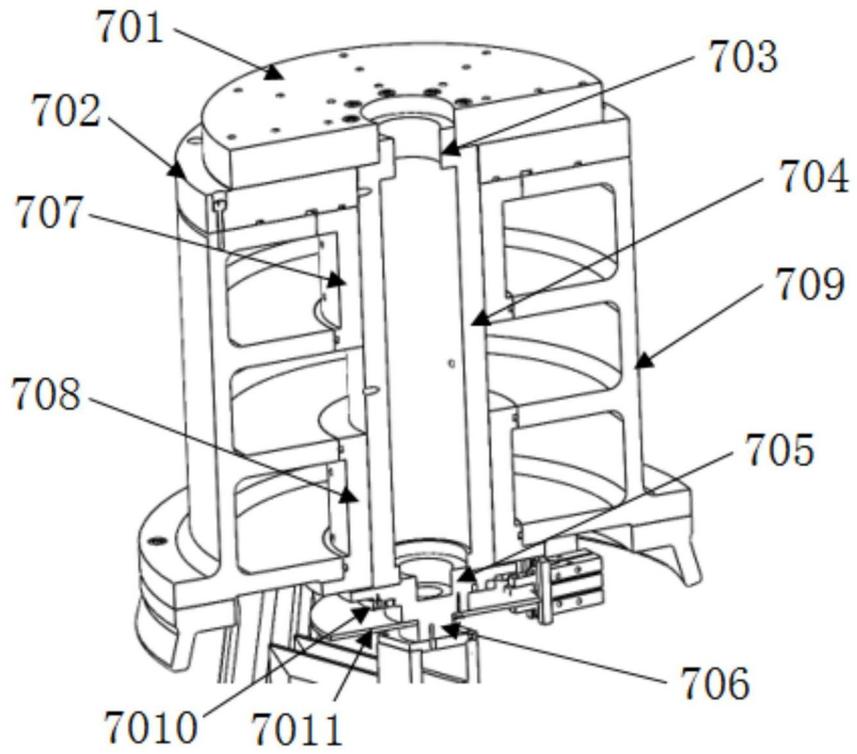


图5

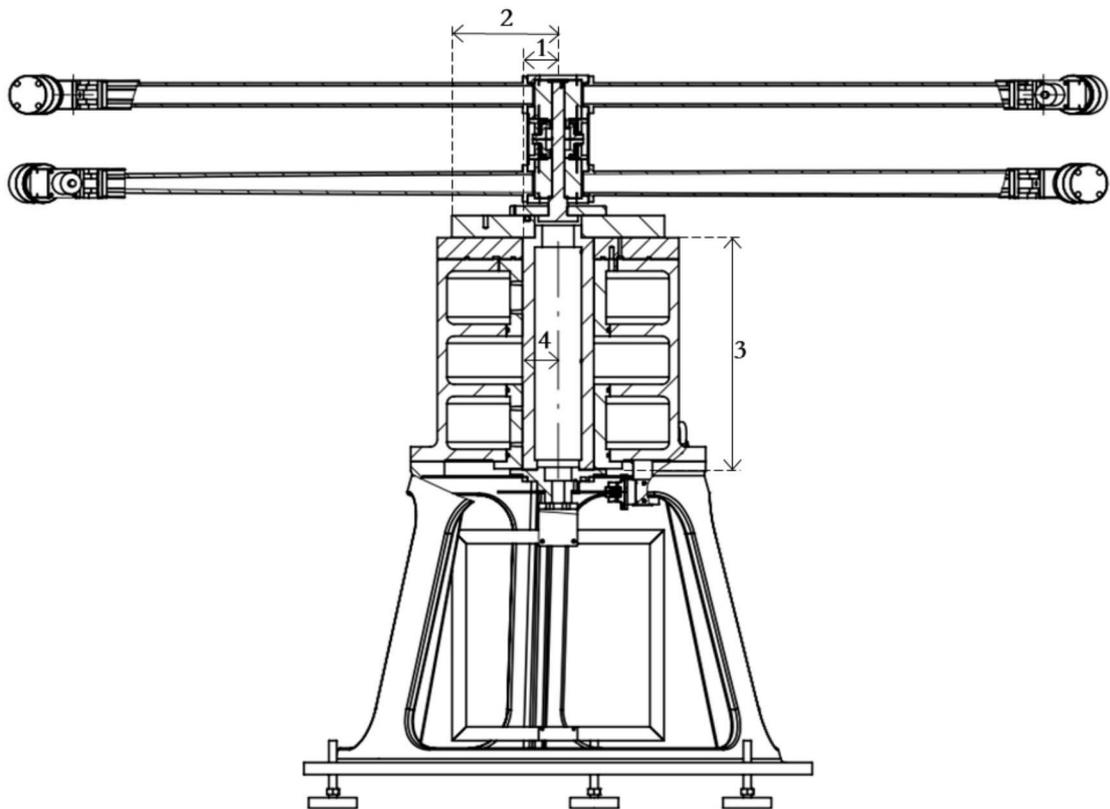


图6