



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112964491 B

(45) 授权公告日 2021.12.24

(21) 申请号 202110269133.9

(22) 申请日 2021.03.12

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112964491 A

(43) 申请公布日 2021.06.15

(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

专利权人 中国科学院力学研究所广东空天科技研究院

(72) 发明人 冯冠华 李文皓 肖歆昕 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

代理人 胡剑辉

(51) Int.Cl.

G01M 99/00 (2011.01)

(56) 对比文件

CN 110481815 A, 2019.11.22

CN 101979277 A, 2011.02.23

CN 102862687 A, 2013.01.09

CN 103224038 A, 2013.07.31

CN 102991731 A, 2013.03.27

US 2017/0010124 A1, 2017.01.12

US 2016/0026185 A1, 2016.01.28

刘开磊等. 低轨航天器磁推进方法. 《宇航学报》. 2012,

H.-L. Lam. Enhancement of solar wind low-energy energetic particles as precursor of geomagnetic disturbance in operational geomagnetic forecast. 《ScienceDirect》. 2013,

审查员 冯玮

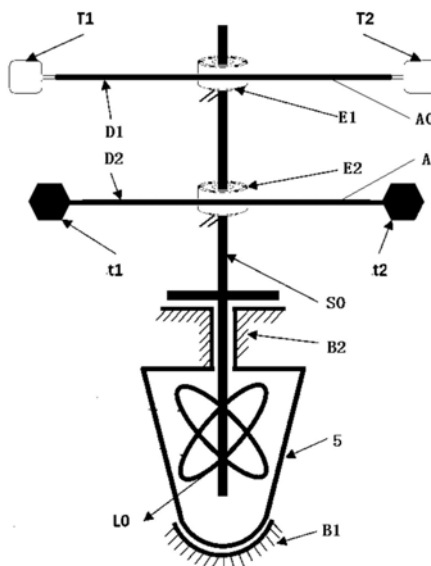
权利要求书4页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统与方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统,包括支撑通轴磁矩生成装置,姿态控制模块,支撑通轴位于双轴承装置顶部的轴身上同轴转动安装有第一目标投送组件和第二目标投送组件,第一目标投送组件和第二目标投送组件均用于投送目标的安装和释放,其投送方法为,磁矩生成装置被配置成通入工作电流后在地磁场作用下受到磁力矩作用开始转动;双轴承装置用于提供支撑通轴的随动状态;第一目标投送组件和第二目标投送组件被配置成接收磁矩生成装置的开始转动的信号后以支撑通轴为转动轴进行对向转动,并在投送目标处的线速度到达系统设定的线速度时,投送目标被释放,实现了在微重力环境下的地磁储能释能投送系统的原理验证。



1. 一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统,其特征在于,包括:

支撑通轴(S0),通过双轴承装置竖直安装在实验场地的固定平台上,且在竖直安装的初始状态时被配置成与实验场地的水平面法线平行;

磁矩生成装置(L0),与所述双轴承装置内部的所述支撑通轴(S0)的轴身连接,所述磁矩生成装置(L0)被配置成通入工作电流后在地磁场作用下受到磁力矩作用开始转动;

所述支撑通轴(S0)位于所述双轴承装置顶部的轴身上同轴转动安装有第一目标投送组件(A0)和第二目标投送组件(A1),所述第一目标投送组件(A0)和第二目标投送组件(A1)均用于投送目标的安装和释放;

姿态控制模块,用于调节所述磁矩生成装置(L0)的姿态角,并产生控制所述第一目标投送组件(A0)和第二目标投送组件(A1)的输出力矩和方向的控制参量;

其中,所述双轴承装置用于提供所述姿态控制模块在调节磁矩生成装置(L0)的姿态角时的所述支撑通轴(S0)的随动状态;

所述第一目标投送组件(A0)和第二目标投送组件(A1)被配置成接收磁矩生成装置(L0)的开始转动的信号后以所述支撑通轴(S0)为转动轴进行对向转动,并在所述投送目标处的线速度到达系统设定的线速度时,所述第一目标投送组件(A0)或第二目标投送组件(A1)进行所述投送目标的释放;

所述双轴承装置包括套装在所述支撑通轴(S0)的轴身上的第二空气轴承(B2)和安装在所述支撑通轴(S0)底部的第一空气轴承(B1),以及用于连接第一空气轴承(B1)和第二空气轴承(B2)的多个轴承连接架,且所述支撑通轴(S0)与第一空气轴承(B1)和第二空气轴承(B2)的内圈固定连接。

2. 根据权利要求1所述的一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统,其特征在于,其中,多个所述轴承连接架均匀分布在所述支撑通轴(S0)的周向上,多个所述轴承连接架用于保持所述第一空气轴承(B1)和所述第二空气轴承(B2)在转动时形成的惯量主轴与所述支撑通轴(S0)共线;

所述第一空气轴承(B1)通过盘形轴承座安装在所述实验场地的固定平台上,所述第二空气轴承(B2)通过窝状轴承座安装在实验场地的固定平台上,且所述第二空气轴承(B2)被配置成与所述窝状轴承座之间能够产生相对的万向转动,来实现所述支撑通轴(S0)在轴向上的转动自由度;

所述磁矩生成装置(L0)位于所述第一空气轴承(B1)和所述第二空气轴承(B2)之间的所述支撑通轴(S0)的轴身上。

3. 根据权利要求1所述的一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统,其特征在于,所述系统中的磁矩生成装置(L0)、所述第一目标投送组件(A0)和第二目标投送组件(A1)在转动时形成的惯量轴与所述支撑通轴(S0)的轴线共线。

4. 根据权利要求3所述的一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统,其特征在于,所述第一目标投送组件(A0)和所述第二目标投送组件(A1)均包括通过动量交换结构安装在所述支撑通轴(S0)上的投送连接结构,所述投送目标安装在所述投送连接结构的端部;

其中,所述第一目标投送组件(A0)的动量交换结构和所述第二目标投送组件(A1)的动量交换结构在接收磁矩生成装置(L0)的开始转动的信号后驱动对应所述投送连接结构以

所述支撑通轴(S0)为转动轴转动。

5. 根据权利要求4所述的一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统,其特征在于,还包括供电配电模块、释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、投送目标速度检测模块和地磁场强度测量模块;

所述供电配电模块,用于为空气轴承、动量交换结构、磁矩生成装置(L0)供电、释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、投送目标速度检测模块和地磁场强度测量模块供电;

所述动量交换主动控制模块,用于根据所述姿态控制模块的监测数据控制所述动量交换结构的输出力矩和方向;

所述地磁场强度测量模块,用于测量所述磁矩生成装置(L0)所处位置在地磁坐标系下的X轴,Y轴和Z轴上地磁场分量强度;

所述投送目标速度检测模块,用于实时监测所述投送目标的线速度,并在所述投送目标达到设定线速度后向所述释放投送主动控制模块发送工作信号,所述释放投送主动控制模块控制投送连接结构上的所述投送目标的分时/同时的释放。

6. 一种根据权利要求1-5任意一项所述的基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统的投送方法,其特征在于,包括具体步骤:

S100、调整系统平台和系统惯量主轴:调整系统的固定平台,保持支撑通轴方向为竖直向下,与所处实验场地的水平面法线平行,并同时调节磁矩生成装置、第一目标投送组件和第二目标投送组件的惯量主轴与支撑通轴的轴线共线;

S200、测量地磁场强度:通过地磁场强度测量模块测量所述磁矩生成装置所处位置在地磁坐标系下的X轴、Y轴和Z轴上地磁场分量的强度;

S300、标定系统摩擦力矩:通过依次给第一空气轴承和第二空气轴承通电,使支撑通轴、磁矩生成装置、第一目标投送组件和第二目标投送组件构成的地面系统处于气浮状态下,对磁矩生成装置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地面系统惯量主轴的垂直距离计算本次系统气浮状态的摩擦力矩标定值;

S400、地面系统姿态确定和调整:给第一空气轴承和第二空气轴承同时上电,并确定当前整个地面系统的初始姿态角,并控制磁矩生成装置生成磁矩与地磁场之间产生磁力矩作用,将整个地面系统的初始姿态角调节为基于当前地磁场的最优姿态角,后供电配电模块停止磁矩生成装置的供电;

S500、地面系统姿态保持和地磁储能:供电配电模块再次给磁矩生成装置通电,同时为第一目标投送组件和第二目标投送组件的动量交换结构,释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、姿态控制模块、投送目标速度检测模块同时上电,控制磁矩生成装置产生稳定磁矩,磁矩生成装置转动检测模块检测到磁矩生成装置有转动,则发送信号给两个动量交换主动控制模块,对应的主动控制第一目标投送组件和第二目标投送组件的动量交换结构的输出力矩和方向;

S600、地磁释能投送:投送目标速度检测模块实时检测投送目标的线速度,并在达到设定的线速度时,发送信号给释放投送主动控制模块控制多个投送目标实现分时/同时的释放投送;

S700、终止或进行新一轮地磁储能释能投送:待所有的投送目标完成投送动作后,控制

磁矩生成装置产生稳定磁矩,同时动量交换主动控制模块控制两个动量交换结构的输出力矩值和方向,并使整个地面系统再次处于最优姿态角,后整个地面系统处于静止状态;

在不进行下一轮次的系统的地磁储能释放投送时,终止系统动作;如果进行下一轮的地磁储能释能投送,则在第一投送目标组件和第二投送目标组件加装新的投送目标后,重复S500至S800。

7. 根据权利要求6所述的一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统的投送方法,其特征在于,在S400中,整个地面系统的初始姿态角定义为: $\theta = [\alpha, \beta, \gamma]$ ,则最优姿态角 $\theta_{opt}$ 为: $\theta_{opt} = [\alpha_{opt}, \beta_{opt}, \gamma_{opt}]$ ,最优姿态角 $\theta_{opt}$ 的取值公式为:

$$\begin{cases} \beta_{opt} = \operatorname{argmax} L_y^s(B, m(\theta)) \\ -\frac{\pi}{36} \leq \alpha_{opt}, \gamma_{opt} \leq \frac{\pi}{36} \end{cases},$$

其中,

$$L^s(B, m(\theta)) = [L_x^s(B, m(\theta)), L_y^s(B, m(\theta)), L_z^s(B, m(\theta))] = {}^m_s R L^m(B, m(\theta));$$

$${}^m_s R = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix};$$

$$L^m(B, m(\theta)) = (m_y B_z - m_z B_y) i + (m_z B_x - m_x B_z) j + (m_x B_y - m_y B_x) k;$$

其中, $L^s(B, m(\theta))$ 表示为双轴承装置用于提供所述姿态控制模块在调节磁矩生成装置的姿态角时的所述支撑通的随动状态时,以支撑通轴为z轴的随体坐标系 $\{s\}$ , $L^m(B, m(\theta))$ 表示地磁坐标系下的磁力矩矢量, ${}^m_s R$ 为随体坐标系 $\{s\}$ 到地磁坐标系的转换矩阵, $i, j, k$ 分别为地磁坐标系的坐标轴单位向量;

随体坐标系 $\{s\}$ 的y轴在磁矩生成装置的平面内,且垂直于z轴,x轴由右手定则确定。

8. 根据权利要求6所述的一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统的投送方法,其特征在于,第一投送目标组件和第二投送目标组件的动量交换结构的输出力矩值及其方向主动控制方法具体为,姿态控制模块实时测量确定磁矩生成装置的角位移 $\varphi_1$ 、角速度 $\varphi_2$ 和角加速度 $\varphi_3$ 三个参量,所述动量交换主动控制模块根据三个参量实时控制动量交换结构的输出力矩和转动方向;

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

$$f(k) = \min G_k(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) + \lambda G_{k-1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3), \quad k = 1, 2, L; \text{且},$$

$$G_k(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = \|\varphi_1(k) - \varphi_1(0)\| + \mu_1 \varphi_2(k) + \mu_2 \varphi_3(k), \quad k = 1, 2, L;$$

其中, $\varphi_1(0)$ 为磁矩生成装置的初始角位移;输出力矩初始最优值 $T_{opt}(0) = 0$ ,  $\lambda \in [0, 1]$ 为遗忘因子; $\mu_1, \mu_2$ 为权重系数。

9. 根据权利要求6所述的一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统的投送方法,其特征在于,在S300中,标定系统摩擦力矩获得的摩擦力矩标定值具体包括只给第二空气轴承上电的第一摩擦力矩标定值 $T_{f1}$ ,和在只给只给第二空气轴承上电的状态下,给第一空气轴承上电获得第二摩擦力矩标定值 $T_{f2}$ ,并利用第一摩擦力矩标定值 $T_{f1}$ 和第二摩擦力

矩标定值 $T_{f2}$ 获取动量交换结构的输出力矩的实时最优值记为 $T_{opt}(k+1)$  ( $k=0,1,L$ )。

## 一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统与amp;方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及物料码垛分离技术领域,具体涉及一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统与amp;方法。

### 背景技术

[0002] 直径10cm大小的空间碎片可给航天器和宇航员带来严重威胁,哈勃望远镜、航天飞机以及国际空间站均受到过空间碎片的撞击。随着人类空间活动的日益活跃,同时考虑到碰撞级联效应(Kessler效应),空间碎片的数量迅速增加,对空间活动造成威胁的概率快速增加。如果不能主动地有效清除现有空间碎片,或减缓空间碎片增加速度,未来将严重影响人类的amp;空间开发进程。目前在轨的近20000余个尺度大于10cm的空间碎片,有近70%分布在高度500km~1000km不同倾角的低地球轨道上,这些碎片如仅靠自身的大气阻力衰减轨道高度,在数十年内都无法进入地球大气层。相比于地球同步轨道(高度36000km,轨道唯一,资源稀缺),低轨空间碎片分布散、数量多兼具高威胁和低价值特点,尽管可以主动清除,但清除低轨道太空碎片的效率性和经济性问题却难以解决。

[0003] 现有问题:主动降低空间碎片的轨道高度是清除空间碎片的较优方式,将其轨道的近地点高度降低至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。目前提出的各种空间碎片主动清除方法中,使用化学/电推力的主动拖拽离轨方法最为成熟,但耗费极高;在碎片上安装气囊阻力帆/涂抹泡沫等增加面质比的被动降轨方式,虽然省去了离轨推进工质消耗,但需要消耗安装材料,且碎片降轨所需的时间也数以年计,这无疑极大增加了二次碰撞的概率。此外,各国均积极的发展无工质消耗型碎片清除方法,一些方法虽然设想很好,但难以实现,比如使用地面/天基高能激光清理碎片,其基本原理是通过高能激光灼烧,使灼烧产物急剧膨胀离开碎片,碎片获得反冲量而降轨,这种方法虽有理论实现的可能性,但如何产生预期的反冲量,如何有效灼烧而非破坏产生新的碎片群等问题均难以解决,因此目前只能用于清除直径10cm以下的微碎片。在无工质消耗型变轨/离轨方法中,空间电动绳系是目前认为可行性和可实现性最高的一种方式。电动绳系通过收集空间的带电粒子,在低轨空间的地球磁场中通过通电绳所受到的安培力进行轨道调整,仅有电力消耗,没有工质消耗。然而,空间电动绳系效能依赖于绳系尺度,数千米至数十千米的巨大尺度使绳系系统在空间稳定运行的可靠性问题非常突出。尽管有多个理论研究和空间试验表明绳系系统具有相当的安全系数,但是也有惨痛经历,美国的SED-2(1994年发射,绳系展开19.7km)绳系在轨展开仅4天便被空间碎片/微流星切断,说明绳系的amp;空间安全问题还需要慎重和细致地考虑和设计。因此,现有无工质消耗型空间碎片主动清除方法均是原理可行,但都存在各自的技术问题。

[0004] 而,由于地磁场能可无限获取,采用简单、空间尺度小的储能投送机构,可实现地磁场能的获取和储存,实现碎片快速离轨,理论可行且技术可实现(例如:专利申请号为CN201910774236.3的一种地磁蓄能低轨道空间碎片离轨投送轨姿耦合调整方法),但在现有的理论技术手段中为实现投送目标的储能和线速度之间的理论关系、储能投送系统姿态

动力学特性缺乏具体的验证过程,限制了他们的发展与实际在轨应用。

[0005] 综上,克服地面空气阻力获取理论无上限的线速度、同时演示储能投送系统姿态动力学特性是现有的地面实验验证系统要突破的难点,因此研究解决该难点的地磁储能-释能投送地面系统与方法对于推动该离轨方法的进一步发展至关重要,而现有的验证系统中,系统的转动惯量大多固定,而对于在进行时刻变化的地磁场作用时的空间环境重力工装下,则现有的验证系统无法适用和进行验证实验。

## 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统与方法,以解决现有技术中系统的转动惯量大多固定,而对于在进行时刻变化的地磁场作用时的空间环境重力工装下,则现有的验证系统无法适用的技术问题。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明具体提供下述技术方案:

[0008] 一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统,包括:

[0009] 支撑通轴,通过双轴承装置竖直安装在实验场地的固定平台上,且在竖直安装的初始状态时被配置成与实验场地的水平面法线平行;

[0010] 磁矩生成装置,与所述双轴承装置内部的所述支撑通轴的轴身连接,所述磁矩生成装置被配置成通入工作电流后在地磁场作用下受到磁力矩作用开始转动;

[0011] 所述支撑通轴位于所述双轴承装置顶部的轴身上同轴转动安装有第一目标投送组件和第二目标投送组件,所述第一目标投送组件和第二目标投送组件均用于投送目标的安装和释放;

[0012] 姿态控制模块,用于调节所述磁矩生成装置的姿态角,并产生控制所述第一目标投送组件和第二目标投送组件的输出力矩和方向的控制参量;

[0013] 其中,所述双轴承装置用于提供所述姿态控制模块在调节磁矩生成装置的姿态角时的所述支撑通轴的随动状态;

[0014] 所述第一目标投送组件和第二目标投送组件被配置成接收磁矩生成装置的开始转动的信号后以所述支撑通轴为转动轴进行对向转动,并在所述投送目标处的线速度到达系统设定的线速度时,所述第一目标投送组件或第二目标投送组件进行所述投送目标的释放。

[0015] 作为本发明的一种优选方案,所述双轴承装置包括套装在所述支撑通轴的轴身上的第二空气轴承和安装在所述支撑通轴底部的第一空气轴承,以及用于连接第一空气轴承和第二空气轴承的多个轴承连接架,且所述支撑通轴与第一空气轴承和第二空气轴承的内圈固定连接。

[0016] 作为本发明的一种优选方案,其中,多个所述轴承连接架均匀分布在所述支撑通轴的周向上,多个所述轴承连接架用于保持所述第一空气轴承和所述第二空气轴承在转动时形成的惯量主轴与所述支撑通轴共线;

[0017] 所述第一空气轴承通过盘形轴承座安装在所述实验场地的固定平台上,所述第二空气轴承通过窝状轴承座安装在实验场地的固定平台上,且所述第二空气轴承被配置成与所述窝状轴承座之间能够产生相对的万向转动,来实现所述支撑通轴在轴向上的转动自由度;

[0018] 所述磁矩生成装置位于所述第一空气轴承和所述第二空气轴承之间的所述支撑通轴的轴身上。

[0019] 作为本发明的一种优选方案,所述系统中的磁矩生成装置、所述第一目标投送组件和第二目标投送组件在转动时形成的惯量轴与所述支撑通轴的轴线共线。

[0020] 作为本发明的一种优选方案,所述第一目标投送组件和所述第二目标投送组件均包括通过动量交换结构安装在所述支撑通轴上的投送连接结构,所述投送目标安装在所述投送连接结构的端部;

[0021] 其中,所述第一目标投送组件的动量交换结构和所述第二目标投送组件的动量交换结构在接收磁矩生成装置的开始转动的信号后驱动对应所述投送连接结构以所述支撑通轴为转动轴转动。

[0022] 作为本发明的一种优选方案,还包括供电配电模块、释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、投送目标速度检测模块和地磁场强度测量模块;

[0023] 所述供电配电模块,用于为空气轴承、动量交换结构、磁矩生成装置供电、释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、投送目标速度检测模块和地磁场强度测量模块供电;

[0024] 所述动量交换主动控制模块,用于根据所述姿态控制模块的监测数据控制所述动量交换结构的输出力矩和方向;

[0025] 所述地磁场强度测量模块,用于测量所述磁矩生成装置所处位置在地磁坐标系下的X轴,Y轴和Z轴上地磁场分量强度;

[0026] 所述投送目标速度检测模块,用于实时监测所述投送目标的线速度,并在所述投送目标达到设定线速度后向所述释放投送主动控制模块发送工作信号,所述释放投送主动控制模块控制投送连接结构上的所述投送目标的分时/同时的释放。

[0027] 本发明提供了一种根据所述的基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统的投送方法,包括具体步骤:

[0028] S100、调整系统平台和系统惯量主轴:调整系统的固定平台,保持支撑通轴方向为竖直向下,与所处实验场地的水平面法线平行,并同时调节磁矩生成装置、第一目标投送组件和第二目标投送组件的惯量主轴与支撑通轴的轴线共线;

[0029] S200、测量地磁场强度:通过地磁场强度测量模块测量所述磁矩生成装置所处位置在地磁坐标系下的X轴、Y轴和Z轴上地磁场分量的强度;

[0030] S300、标定系统摩擦力矩:通过依次给第一空气轴承和第二空气轴承通电,使支撑通轴、磁矩生成装置、第一目标投送组件和第二目标投送组件构成的地面系统处于气浮状态下,对磁矩生成装置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地面系统惯量主轴的垂直距离计算本次系统气浮状态的摩擦力矩标定值;

[0031] S400、地面系统姿态确定和调整:给第一空气轴承和第二空气轴承同时上电,并确定当前整个地面系统的初始姿态角,并控制磁矩生成装置生成磁矩与地磁场之间产生磁力矩作用,将整个地面系统的初始姿态角调节为基于当前地磁场的最优姿态角,后供电配电模块停止磁矩生成装置的供电;

[0032] S500、地面系统姿态保持和地磁储能:供电配电模块再次给磁矩生成装置通电,同时为第一目标投送组件和第二目标投送组件的动量交换结构,释放投送主动控制模块、动



量交换主动控制模块、姿态控制模块、投送目标速度检测模块同时上电,控制磁矩生成装置产生稳定磁矩,磁矩生成装置转动检测模块检测到磁矩生成装置有转动,则发送信号给两个动量交换主动控制模块,对应的主动控制第一目标投送组件和第二目标投送组件的动量交换结构的输出力矩和方向;

[0033] S600、地磁释能投送:投送目标速度检测模块实时检测投送目标的线速度,并在达到设定的线速度时,发送信号给释放投送主动控制模块控制多个投送目标实现分时/同时的释放投送;

[0034] S700、终止或进行新一轮地磁储能释能投送:待所有的投送目标完成投送动作后,控制磁矩生成装置产生稳定磁矩,同时动量交换主动控制模块控制两个动量交换结构的输出力矩值和方向,并使整个地面系统再次处于最优姿态角,后整个地面系统处于静止状态;

[0035] 在不进行下一轮次的系统的地磁储能释放投送时,终止系统动作;如果进行下一轮的地磁储能释能投送,则在第一投送目标组件和第二投送目标组件加装新的投送目标后,重复S500至S800。

[0036] 作为本发明的一种优选方案,在S400中,整个地面系统的初始姿态角定义为: $\theta = [\alpha, \beta, \gamma]$ ,则最优姿态角 $\theta_{opt}$ 为: $\theta_{opt} = [\alpha_{opt}, \beta_{opt}, \gamma_{opt}]$ ,最优姿态角 $\theta_{opt}$ 的取值公式为:

$$\begin{cases} \beta_{opt} = \operatorname{argmax} L_y^s(B, m(\theta)) \\ -\frac{\pi}{36} \leq \alpha_{opt}, \gamma_{opt} \leq \frac{\pi}{36} \end{cases},$$

[0037] 其中,

[0038]  $L^s(B, m(\theta)) = [L_x^s(B, m(\theta)), L_y^s(B, m(\theta)), L_z^s(B, m(\theta))] = {}^m_s R L^m(B, m(\theta));$

$$[0039] \quad {}^m_s R = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix};$$

[0040]  $L^m(B, m(\theta)) = (m_y B_z - m_z B_y) i + (m_z B_x - m_x B_z) j + (m_x B_y - m_y B_x) k;$

[0041] 其中, $L^s(B, m(\theta))$ 表示为双轴承装置用于提供所述姿态控制模块在调节磁矩生成装置的姿态角时的所述支撑通的随动状态时,以支撑通轴为z轴的随体坐标系{s}, $L^m(B, m(\theta))$ 表示地磁坐标系下的磁力矩矢量, ${}^m_s R$ 为随体坐标系{s}到地磁坐标系的转换矩阵, $i, j, k$ 分别为地磁坐标系的坐标轴单位向量;

[0042] 随体坐标系{s}的y轴在磁矩生成装置的平面内,且垂直于z轴,x轴由右手定则确定。

[0043] 作为本发明的一种优选方案,第一投送目标组件和第二投送目标组件的动量交换结构的输出力矩值及其方向主动控制方法具体为,姿态控制模块实时测量确定磁矩生成装置的角位移 $\varphi_1$ 、角速度 $\varphi_2$ 和角加速度 $\varphi_3$ 三个参量,所述动量交换主动控制模块根据三个参量实时控制动量交换结构的输出力矩和转动方向;

[0044] 动量交换结构的输出力矩的实时最优值记为 $T_{opt}(k+1)$  ( $k=0, 1, L$ ),且具体的取值公式为:

$$[0045] \quad f(k) = \min G_k(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) + \lambda G_{k-1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3), k=1, 2, L; \text{且},$$

[0046]  $G_k(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = \|\varphi_1(k) - \varphi_1(0)\| + \mu_1\varphi_2(k) + \mu_2\varphi_3(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, L$ ;

[0047] 其中,  $\varphi_1(0)$  为磁矩生成装置的初始角位移; 输出力矩初始最优值  $T_{opt}(0) = 0$ ,  $\lambda \in [0, 1]$  为遗忘因子;  $\mu_1, \mu_2$  为权重系数。

[0048] 作为本发明的一种优选方案, 在 S300 中, 标定系统摩擦力矩获得的摩擦力矩标定值具体包括只给第二空气轴承上电的第一摩擦力矩标定值  $T_{f1}$ , 和在只给只给第二空气轴承上电的状态下, 给第一空气轴承上电获得第二摩擦力矩标定值  $T_{f2}$ , 并利用第一摩擦力矩标定值  $T_{f1}$  和第二摩擦力矩标定值  $T_{f2}$  获取动量交换结构的输出力矩的实时最优值记为  $T_{opt}(k+1)$  ( $k=0, 1, L$ )。

[0049] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0050] 本发明在实验系统上极大地减小磁矩生成装置尺寸、减轻磁矩生成装置重量, 便于系统安装与维护, 同时, 降低磁矩生成装置功耗, 减少发热, 保证安全可靠地进行长时间实验; 动量交换结构易于维护、拆卸更换, 缩短维护/更换时间, 保证实验进度并提高效率; 无需考虑保证系统上部硬件部分的支撑通轴的同轴度, 多自由度空气轴承组合保证了系统具有多自由度, 减少系统干扰力矩的引入的同时, 增加了系统实验的多样性, 可以进一步进行多自由度的地磁储能和释能投送相关实验。

## 附图说明

[0051] 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伸获得其它的实施附图。

[0052] 图1为本发明实施例提供基于双轴承装置的地面系统安装结构示意图;

[0053] 图2为本发明实施例提供双轴承装置的结构示意图;

[0054] 图3为本发明实施例提供动量交换结构E1的结构示意图;

[0055] 图4为本发明实施例提供动量交换结构E2的结构示意图;

[0056] 图5为本发明实施例提供动量交换结构的纵剖面结构示意图。

## 具体实施方式

[0057] 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。

[0058] 如图1至图5所示, 本发明提供了一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统, 包括:

[0059] 支撑通轴S0, 通过双轴承装置竖直安装在实验场地的固定平台上, 且在竖直安装的初始状态时被配置成与实验场地的水平面法线平行;

[0060] 磁矩生成装置L0, 两个的正交螺线圈组成, 可以产生空间任意方向的磁矩, 与双轴

承装置内部的支撑通轴S0的轴身连接,磁矩生成装置L0被配置成通入工作电流后在地磁场作用下受到磁力矩作用开始转动;

[0061] 支撑通轴S0位于双轴承装置顶部的轴身上同轴转动安装有第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1,第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1均用于投送目标的安装和释放;

[0062] 姿态控制模块,用于调节磁矩生成装置L0的姿态角,并产生控制第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1的输出力矩和方向的控制参量;

[0063] 其中,双轴承装置用于提供姿态控制模块在调节磁矩生成装置L0的姿态角时的支撑通轴S0的随动状态;

[0064] 第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1被配置成接收磁矩生成装置L0的开始转动的信号后以支撑通轴S0为转动轴进行对向转动,并在投送目标处的线速度到达系统设定的线速度时,第一目标投送组件A0或第二目标投送组件A1进行投送目标的释放。

[0065] 而在理论验证的过程中,地球空间某点的真实地磁场B的方向是随该点地理经纬度在变化的,不固定。

[0066] 为此,本发明双轴承装置包括套装在支撑通轴S0的轴身上的第二空气轴承B2和安装在支撑通轴S0底部的第一空气轴承B1,以及用于连接第一空气轴承B1和第二空气轴承B2的多个轴承连接架5,轴承连接架5的主体通过螺栓7进行连接,且支撑通轴S0与第一空气轴承B1和第二空气轴承的B2的内圈2固定连接。

[0067] 其中,多个轴承连接架均匀分布在支撑通轴S0的周向上,多个轴承连接架5用于保持第一空气轴承B1和第二空气轴承B2在转动时形成的惯量主轴与支撑通轴S0共线;在整个储能加速过程中,第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1所旋绕的支撑通轴S0通过双轴承装置在空间固定,即整个地面系统的姿态角不发生变化,支撑通轴S0不出现进动/章动运动。

[0068] 其中,第一空气轴承B1采用的是三轴球形空气轴承,包括空气轴承主体6和窝状轴承座8,两者是万向的连接,该窝状轴承座8支撑起整个系统,可等效模拟空间环境的微重力工况,即整个地面系统的姿态不受限制。

[0069] 第二空气轴承B2为普通空气轴承。

[0070] 第一空气轴承B1通过盘形轴承座4安装在实验场地的固定平台上,第二空气轴承B2通过窝状轴承座8安装在实验场地的固定平台上,且第二空气轴承B2被配置成与窝状轴承座8之间能够产生相对的万向转动,来实现支撑通轴S0在轴向上的转动自由度;

[0071] 磁矩生成装置L0位于第一空气轴承B1和第二空气轴承B2之间的支撑通轴S0的轴身上。

[0072] 系统中的磁矩生成装置L0、第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1在转动时形成的惯量轴与支撑通轴S0的轴线共线。

[0073] 而为了尽可能的降低系统整体的摩擦力矩,采用支撑通轴S0通过空气轴承与实验场地的固定平台进行安装,按照现有普通机械止推轴承的轴向载荷-起动摩擦力矩关系(例如日本NSK的止推轴承)来看,通常轴向载荷约20kg时,启动摩擦力矩已经达到0.01Nm量级,随着轴向载荷的进一步增大,启动摩擦力矩会更大。

[0074] 而现有技术可做到空气轴承的启动和工作摩擦力矩均在0.0005Nm量级,甚至更

低。因此相比于普通机械止推轴承,采用空气轴承的地面系统的整体摩擦力矩能减少至少2个量级。

[0075] 采用空气轴承可减小系统转动的启动摩擦力矩(10<sup>-4</sup>Nm量级),同时采用第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1同轴对转使系统空气阻力矩相互抵消,第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1外形及长度一致,在多个投送目标外形一致时,系统空气阻力矩可完全抵消为0,因此仅考虑空气轴承的启动阻力矩(10<sup>-4</sup>Nm量级),磁矩生成装置L0的磁力矩量级达到10<sup>-3</sup>Nm时,即可实现地磁储能和释能投送。

[0076] 而磁矩生成装置L0的主要实现方式是借助导电线圈,越小的磁力矩量级要求,意味着所需的导电线圈的重量和尺度越小,也意味着更小的功耗和更少的发热,同时能使系统便于安装与维护。

[0077] 第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1均包括通过动量交换结构安装在支撑通轴S0上的投送连接结构,其中动量交换结构如图5所示,投送目标安装在投送连接结构的端部,其中,第一目标投送组件A0的动量交换结构和第二目标投送组件A1的动量交换结构在接收磁矩生成装置L0的开始转动的信号后驱动对应投送连接结构以支撑通轴S0为转动轴转动;

[0078] 投送目标与投送连接结构如可以采用电磁装置吸附连接,即投送目标吸附在连接结构的末端,要释放时,由释放投送主动控制模块控制电磁装置,释放目标。

[0079] 每个目标采用独立的电磁装置吸附固定,因此可以实现单独或同时控制任何一个投送目标的释放。

[0080] 进一步地约定,第一目标投送组件A0的动量交换结构为E1,投送连接结构为D1,位于投送连接结构D1两端的投送目标为T1,T2;

[0081] 第二目标投送组件A1的动量交换结构为E2,投送连接结构为D2,位于投送连接结构D1两端的投送目标为t1,t2;

[0082] 动量交换结构E1和动量交换结构E2均为内圈2和外圈3可相对旋转的且旋转输出力矩及方向可主动控制的空心结构,支撑通轴S0穿过动量交换结构E1和E2的内圈2,并与动量交换结构E1和动量交换结构E2的内圈2固定连接。

[0083] 投送连接结构D1与动量交换结构E1的外圈3固定连接,投送连接结构D2分别和动量交换结构E2的外圈3固定连接。

[0084] 进一步优选的是,动量交换结构E1的外圈3端部表面均匀阵列有螺纹孔1,而动量交换结构E2的螺纹孔1设置在内圈2的内部柱形机构的端面上。

[0085] 投送目标T1和投送目标T2对称固定于投送连接结构D1的两端,投送目标t1和投送目标t2固定于投送连接结构D2的两端,且固定位置可微调,投送目标和投送连接结构可随时多个投送目标同时/分时可控分离。

[0086] 第一目标投送组件A0的投送连接结构和第二目标投送组件A1的投送连接结构的转动方向相反。

[0087] 由于支撑通轴S0都受到空气轴承的向心约束,在系统部件的机械强度满足倾覆力矩的要求下,均可以实现单次单个/多个目标投送,也可以实现同时或分时投送,保证地面实验更符合实际在轨目标离轨工况。

[0088] 具体地,如选择单次只投送四个目标的一个,然后再顺序选择投送剩下的任意一

个目标。

[0089] 多目标同时/分时最优投送选择时,可采用单次多个目标对称投送,以保证惯量主轴与支撑通轴S0轴线重合,即可选择同时投送第一目标投送组件A0上的投送目标(T1,T2),然后再同时投送第二目标投送组件A1上的投送目标(t1,t2);也可以先选择同时投送T1和t2,然后再同时投送t1和T2;当然也可以选择同时投送四个目标

[0090] 还包括供电配电模块、释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、投送目标速度检测模块和地磁场强度测量模块;

[0091] 供电配电模块,用于为空气轴承、动量交换结构、磁矩生成装置(L0)供电、释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、投送目标速度检测模块和地磁场强度测量模块供电;

[0092] 动量交换主动控制模块,用于根据姿态控制模块的监测数据控制动量交换结构的输出力矩和方向;

[0093] 地磁场强度测量模块,用于测量磁矩生成装置(L0)所处位置在地磁坐标系下的X轴,Y轴和Z轴上地磁场分量强度;

[0094] 投送目标速度检测模块,用于实时监测投送目标的线速度,并在投送目标达到设定线速度后向释放投送主动控制模块发送工作信号,释放投送主动控制模块控制投送连接结构上的投送目标的分时/同时的释放。

[0095] 本发明提供了一种根据上述的基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统的投送方法,包括具体步骤:

[0096] S100、调整系统平台和系统惯量主轴:调整系统的固定平台,保持支撑通轴方向为竖直向下,与所处实验场地的水平面法线平行,并同时调节磁矩生成装置、第一目标投送组件和第二目标投送组件的惯量主轴与支撑通轴的轴线共线;

[0097] S200、测量地磁场强度:通过地磁场强度测量模块测量所述磁矩生成装置所处位置在地磁坐标系下的X轴、Y轴和Z轴上地磁场分量的强度;

[0098] S300、标定系统摩擦力矩:通过依次给第一空气轴承和第二空气轴承通电,使支撑通轴、磁矩生成装置、第一目标投送组件和第二目标投送组件构成的地面系统处于气浮状态下,对磁矩生成装置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地面系统惯量主轴的垂直距离计算本次系统气浮状态的摩擦力矩标定值;

[0099] S400、地面系统姿态确定和调整:给第一空气轴承和第二空气轴承同时上电,并确定当前整个地面系统的初始姿态角,并控制磁矩生成装置生成磁矩与地磁场之间产生磁力矩作用,将整个地面系统的初始姿态角调节为基于当前地磁场的最优姿态角,后供电配电模块停止磁矩生成装置的供电;

[0100] S500、地面系统姿态保持和地磁储能:供电配电模块再次给磁矩生成装置通电,同时为第一目标投送组件和第二目标投送组件的动量交换结构,释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、姿态控制模块、投送目标速度检测模块同时上电,控制磁矩生成装置产生稳定磁矩,磁矩生成装置转动检测模块检测到磁矩生成装置有转动,则发送信号给两个动量交换主动控制模块,对应的主动控制第一目标投送组件和第二目标投送组件的动量交换结构的输出力矩和方向;

[0101] S600、地磁释能投送:投送目标速度检测模块实时检测投送目标的线速度,并在达

到设定的线速度时,发送信号给释放投送主动控制模块控制多个投送目标实现分时/同时的释放投送;

[0102] S700、终止或进行新一轮地磁储能释能投送:待所有的投送目标完成投送动作后,控制磁矩生成装置产生稳定磁矩,同时动量交换主动控制模块控制两个动量交换结构的输出力矩值和方向,并使整个地面系统再次处于最优姿态角,后整个地面系统处于静止状态;

[0103] 在不进行下一轮次的系统的地磁储能释放投送时,终止系统动作;如果进行下一轮的地磁储能释能投送,则在第一投送目标组件和第二投送目标组件加装新的投送目标后,重复S500至S800。

[0104] 在S400中,整个地面系统的初始姿态角定义为: $\theta = [\alpha, \beta, \gamma]$ ,则最优姿态角 $\theta_{opt}$ 为: $\theta_{opt} = [\alpha_{opt}, \beta_{opt}, \gamma_{opt}]$ ,最优姿态角 $\theta_{opt}$ 的取值公式为:

$$[0105] \quad \begin{cases} \beta_{opt} = \operatorname{argmax} L_y^s(B, m(\theta)) \\ -\frac{\pi}{36} \leq \alpha_{opt}, \gamma_{opt} \leq \frac{\pi}{36} \end{cases},$$

[0106] 其中,

$$[0107] \quad L^s(B, m(\theta)) = [L_x^s(B, m(\theta)), L_y^s(B, m(\theta)), L_z^s(B, m(\theta))] = {}^m_s R L^m(B, m(\theta));$$

$$[0108] \quad {}^m_s R = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix};$$

$$[0109] \quad L^m(B, m(\theta)) = (m_y B_z - m_z B_y) i + (m_z B_x - m_x B_z) j + (m_x B_y - m_y B_x) k;$$

[0110] 其中, $L^s(B, m(\theta))$ 表示为双轴承装置用于提供所述姿态控制模块在调节磁矩生成装置的姿态角时的所述支撑通的随动状态时,以支撑通轴为z轴的随体坐标系 $\{s\}$ , $L^m(B, m(\theta))$ 表示地磁坐标系下的磁力矩矢量, ${}^m_s R$ 为随体坐标系 $\{s\}$ 到地磁坐标系的转换矩阵, $i, j, k$ 分别为地磁坐标系的坐标轴单位向量;

[0111] 随体坐标系 $\{s\}$ 的y轴在磁矩生成装置的平面内,且垂直于z轴,x轴由右手定则确定。

[0112] 第一投送目标组件和第二投送目标组件的动量交换结构的输出力矩值及其方向主动控制方法具体为,姿态控制模块实时测量确定磁矩生成装置的角位移 $\varphi_1$ 、角速度 $\varphi_2$ 和角加速度 $\varphi_3$ 三个参量,所述动量交换主动控制模块根据三个参量实时控制动量交换结构的输出力矩和转动方向;

[0113] 动量交换结构的输出力矩的实时最优值记为 $T_{opt}(k+1)$  ( $k=0, 1, L$ ),且具体的取值公式为:

$$[0114] \quad f(k) = \min G_k(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) + \lambda G_{k-1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3), k=1, 2, L; \text{且},$$

$$[0115] \quad G_k(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = \|\varphi_1(k) - \varphi_1(0)\| + \mu_1 \varphi_2(k) + \mu_2 \varphi_3(k), k=1, 2, L;$$

[0116] 其中, $\varphi_1(0)$ 为磁矩生成装置的初始角位移;输出力矩初始最优值 $T_{opt}(0) = 0, \lambda \in [0, 1]$ 为遗忘因子; $\mu_1, \mu_2$ 为权重系数。

[0117] 在S300中,标定系统摩擦力矩获得的摩擦力矩标定值具体包括只给第二空气轴承

上电的第一摩擦力矩标定值 $T_{f1}$ ,和在只给只给第二空气轴承上电的状态下,给第一空气轴承上电获得第二摩擦力矩标定值 $T_{f2}$ ,并利用第一摩擦力矩标定值 $T_{f1}$ 和第二摩擦力矩标定值 $T_{f2}$ 获取动量交换结构的输出力矩的实时最优值记为 $T_{opt}(k+1)$  ( $k=0,1,L$ )。

[0118] 进一步地,标定摩擦力矩的目的是确保系统的摩擦力矩远小于磁力矩,在后续储能实验中,可以将摩擦力矩忽略,确保整个系统中磁力矩为唯一外力矩,以驱动系统储能加速完成地面实验。

[0119] 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。

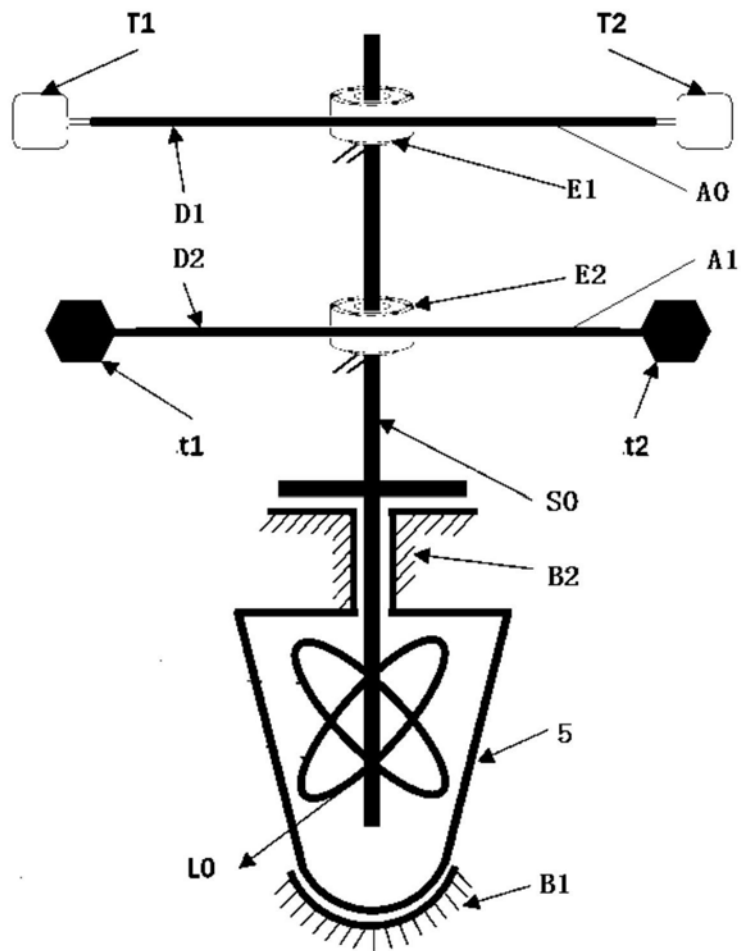


图1



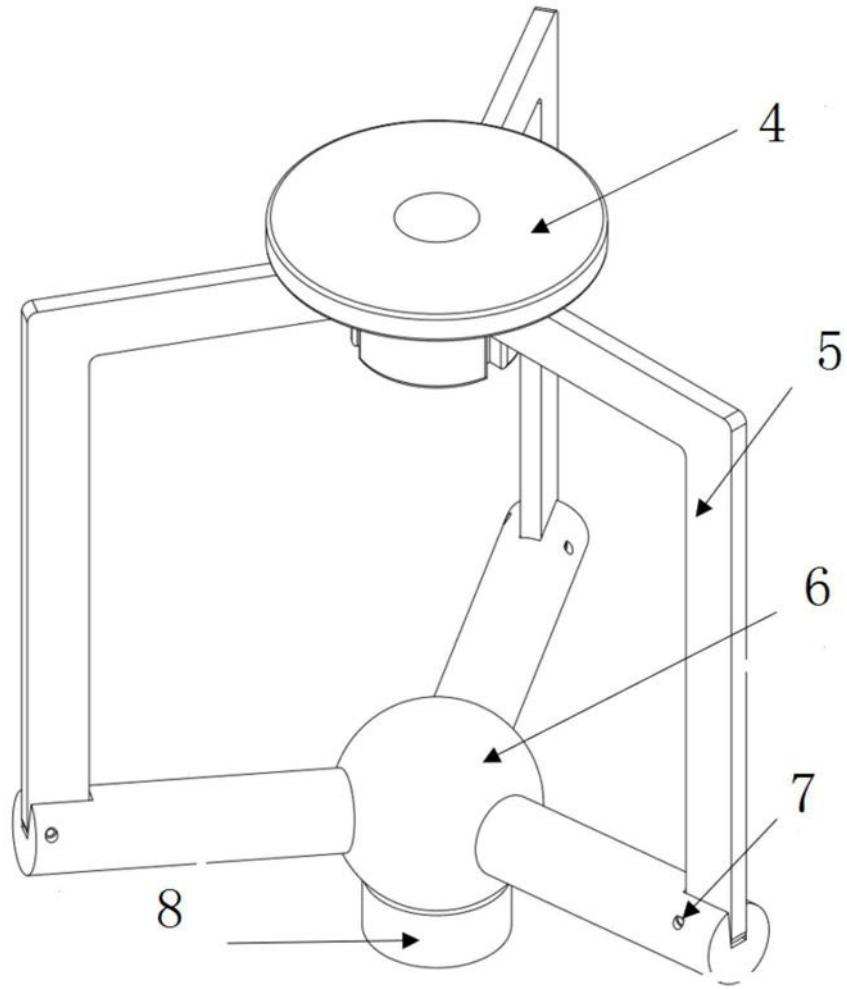


图2

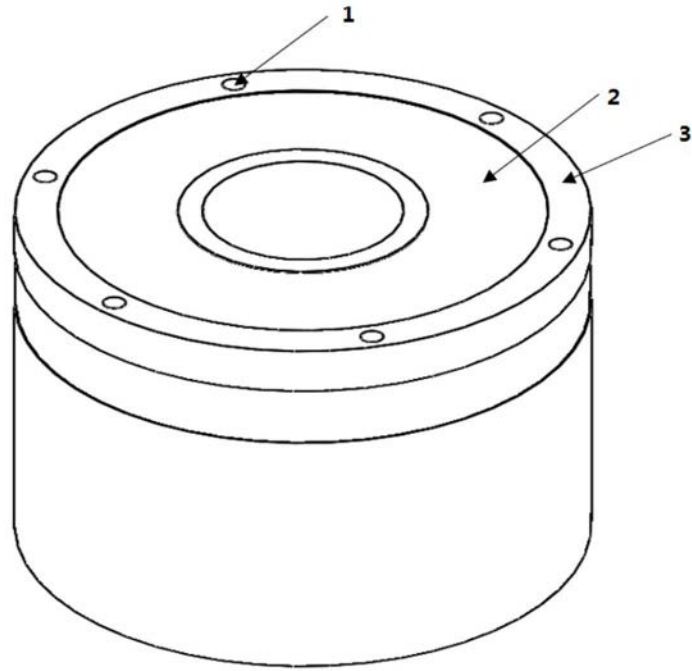


图3

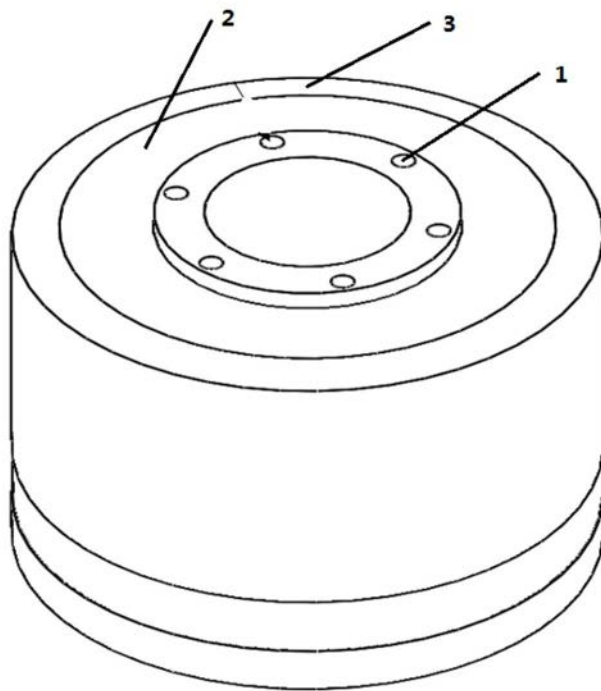


图4

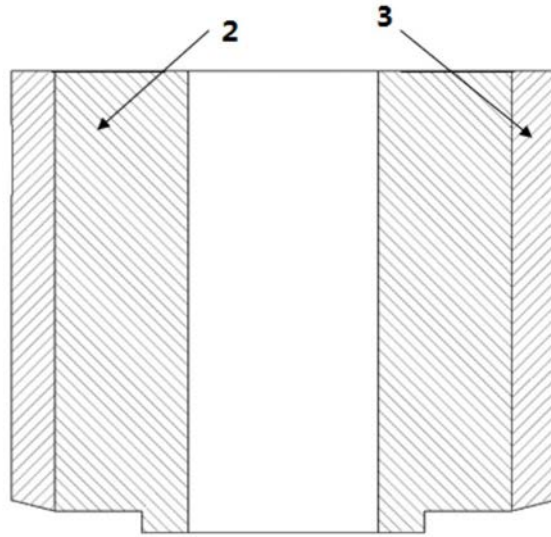


图5