



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113075592 A

(43) 申请公布日 2021.07.06

(21) 申请号 202110269136.2

(22) 申请日 2021.03.12

(71) 申请人 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

申请人 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 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.

G01R 33/02 (2006.01)

B64G 7/00 (2006.01)

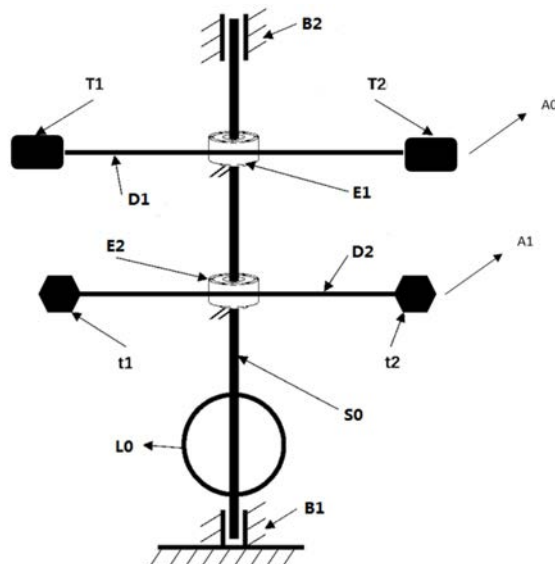
权利要求书3页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

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

(57) 摘要

本发明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,包括支撑通轴,磁矩生成装置,支撑通轴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;其工作方法为,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,第一目标投送组件或第二目标投送组件进行投送目标的释放。本发明采用两套投送装置同轴对转的方式,可克服地面实验中空气阻力矩,解除目标线速度有上限的制约,从而更好地用于地磁储能方法地面原理验证。



1. 一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统,其特征在于,包括:

支撑通轴(S0),通过空气轴承垂直安装在实验场地的固定平台上,且被配置成与实验场地的水平面法线平行;

磁矩生成装置(L0),与所述支撑通轴(S0)连接,且磁矩生成装置(L0)通入工作电流后在地磁场作用下受到磁力矩开始转动;

所述支撑通轴(S0)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;

其中,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。

2. 根据权利要求1所述的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统,其特征在于,所述空气轴承包括安装在所述支撑通轴(S0)顶端部的第一空气轴承(B1)和安装在所述支撑通轴(S0)的底端部的第二空气轴承(B2);

所述第一空气轴承(B1)和所述第二空气轴承(B2)的外圈与固定平台连接,所述第一空气轴承(B1)和所述第二空气轴承(B2)的内圈与所述支撑通轴(S0)固定连接。

3. 根据权利要求1所述的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统,其特征在于,所述空气轴承安装在所述支撑通轴(S0)的轴身上,且所述空气轴承的外圈与所述固定平台连接,所述空气轴承的内圈与所述支撑通轴(S0)连接。

4. 根据权利要求1所述的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统,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。

5. 根据权利要求4所述的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统,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;

所述第一目标投送组件(A0)的投送连接结构和所述第二目标投送组件(A1)的投送连接结构的转动方向相反。

6. 根据权利要求5所述的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统,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、磁矩生成装置检测模块、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、动量交换结构和磁矩生成装置(L0)供电;

所述磁矩生成装置检测模块,连接所述磁矩生成装置,用于监测所述磁矩生成装置(L0)的角位移、角速度和角加速度。

所述动量交换主动控制模块,用于根据所述磁矩生成装置检测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轴和Y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。

7.一种根据权利要求1-6任意一项所述的同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统的工作方法,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轴和Y轴上地磁场分量的强度；

S300、标定系统摩擦力矩:给空气轴承通电,在支撑通轴、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、产生稳定磁矩:通过供电配电模块给磁矩生成装置通入恒流电,产生稳定磁矩；

S500、获取磁矩生成装置的初始最优角度:测量磁矩生成装置的当前角度,并根据磁矩生成装置产生的稳定磁矩和磁矩生成装置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计算磁矩生成装置相对于支撑通轴的初始最优角度,随后供电配电模块停止向磁矩生成装置进行供电,并使整个系统处于静止状态,将磁矩生成装置转动至相对于支撑通轴的初始最优角度的位置；

S600、地磁储能:供电配电模块给磁矩生成装置、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、磁矩生成装置转动检测模块、投送目标速度检测模块同时上电；

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进行对转动作；

S700、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；

S800、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,供电配电模块停止向磁矩生成装置供电并固定磁矩生成装置,同时动量交换主动控制模块控制两个动量交换结构减速,直至完全静止；

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；

如果进行同等磁矩生成装置的稳定磁矩下的投送,则加装新的投送目标后,返回S600进行下一轮次的地磁储能和释能投送；

如果进行不同磁矩生成装置的稳定磁矩下的投送,则加装新的投送目标后,返回S400进行下一轮次的地磁储能和释能投送。

8. 根据权利要求7所述的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统的工作方法,其特征在于,在步骤S200中,记地磁坐标系下的X轴和Y轴上地磁场分量的强度分别为 $B_x$ 和 $B_y$ ,其中,X轴表示正北方向,Y轴表示正东方向;

在步骤S400中,约定供电配电模块给所述磁矩生成装置通入的恒流电为I,产生的稳定磁矩 $m$ , $m = [m_x, m_y, 0]$ ,其中 $m_x$ 和 $m_y$ 分别对应于地磁坐标系下的X轴和Y轴上的分量,产生稳定磁矩的计算公式如:

$$\begin{cases} m_x = NIa \cos \alpha \\ m_y = NIa \sin \alpha \\ m_z = 0 \\ |m| = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{cases}$$

其中,N为线圈匝数;I为恒流电流值; $\alpha$ 为线圈横截面积; $\alpha \in [0, \pi]$ 为磁矩 $m$ 与地磁坐标系的X轴正方向之间的夹角。

9. 根据权利要求7所述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,其特征在于,在S500中,磁矩生成装置的初始最优角度为 $\alpha_{opt}$ :

$$\alpha_{opt} = \operatorname{argmax} (m_x B_x - m_y B_y)。$$

10. 根据权利要求7所述的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统的工作方法,其特征在于,在S600中,磁矩生成装置转动检测模块实时检测磁矩生成装置的角位移 $\beta_1$ 、角速度 $\beta_2$ 和角加速度 $\beta_3$ 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:

$$f(k) = \min G_k(\beta_1, \beta_2, \beta_3) + \lambda G_{k-1}(\beta_1, \beta_2, \beta_3), k=1, 2, L; \text{且},$$

$$G_k(\beta_1, \beta_2, \beta_3) = \|\beta_1(k) - \beta_1(0)\| + \mu_1 \beta_2(k) + \mu_2 \beta_3(k), k=1, 2, L;$$

其中, $\beta_1(0)$ 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。

## 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

### 技术领域

[0001] 本发明涉及航天技术领域,具体涉及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。

### 背景技术

[0002] 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。

[0003] 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。

[0004] 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。

[0005] 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投送目和线速度之间的理论关系缺乏具体的验证过程,限制了他们的发展与实际在轨应用。

[0006] 综上,克服地面空气阻力获取理论来无上限的线速度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。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的在于提供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,解决获得克服地面空气阻力获取理论无上限的线速度的地磁储能和释能投送地面验证系统的技术问题。

[0008] 为解决上述技术问题,本发明具体提供下述技术方案:

[0009] 一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统,包括:

[0010] 支撑通轴,通过空气轴承垂直安装在实验场地的固定平台上,且被配置成与实验场地的水平面法线平行;

[0011] 磁矩生成装置,与所述支撑通轴连接,且磁矩生成装置通入工作电流后在地磁场作用下受到磁力矩开始转动;

[0012] 所述支撑通轴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;

[0013] 其中,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。

[0014] 作为本发明的一种优选方案,所述空气轴承包括安装在所述支撑通轴顶端部的第一空气轴承和安装在所述支撑通轴的底端部的第二空气轴承;

[0015] 所述第一空气轴承和所述第二空气轴承的外圈与固定平台连接,所述第一空气轴承和所述第二空气轴承的内圈与所述支撑通轴固定连接。

[0016] 作为本发明的一种优选方案,所述空气轴承安装在所述支撑通轴的轴身上,且所述空气轴承的外圈与所述固定平台连接,所述空气轴承的内圈与所述支撑通轴连接。

[0017] 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。

[0018] 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;

[0019] 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;

[0020] 所述第一目标投送组件的投送连接结构和所述第二目标投送组件的投送连接结构的转动方向相反。

[0021] 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、磁矩生成装置检测模块、投送目标速度检测模块和地磁场强度测量模块;

[0022] 所述供电配电模块,用于为空气轴承、动量交换结构和磁矩生成装置供电;

[0023] 所述磁矩生成装置检测模块,连接所述磁矩生成装置,用于监测所述磁矩生成装置的角位移、角速度和角加速度。

[0024] 所述动量交换主动控制模块,用于根据所述磁矩生成装置检测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轴和Y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] 本发明提供了一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统的工作方法,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轴和Y轴上地磁场分量的强度;

[0030] S300、标定系统摩擦力矩:给空气轴承通电,在支撑通轴、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、产生稳定磁矩:通过供电配电模块给磁矩生成装置通入恒流电,产生稳定磁矩;

[0032] S500、获取磁矩生成装置的初始最优角度:测量磁矩生成装置的当前角度,并根据磁矩生成装置产生的稳定磁矩和磁矩生成装置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计算磁矩生成装置相对于支撑通轴的初始最优角度,随后供电配电模块停止向磁矩生成装置进行供电,并使整个系统处于静止状态,将磁矩生成装置转动至相对于支撑通轴的初始最优角度的位置;

[0033] S600、地磁储能:供电配电模块给磁矩生成装置、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、磁矩生成装置转动检测模块、投送目标速度检测模块同时上电;

[0034] 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进行对转动作;

[0035] S700、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;

[0036] S800、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,供电配电模块停止向磁矩生成装置供电并固定磁矩生成装置,同时动量交换主动控制模块控制两个动量交换结构减速,直至完全静止;

[0037] 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;

[0038] 如果进行同等磁矩生成装置的稳定磁矩下的投送,则加装新的投送目标后,返回S600进行下一轮次的地磁储能和释能投送;

[0039] 如果进行不同磁矩生成装置的稳定磁矩下的投送,则加装新的投送目标后,返回S400进行下一轮次的地磁储能和释能投送。

[0040] 作为本发明的一种优选方案,在步骤S200中,记地磁坐标系下的X轴和Y轴上地磁场分量的强度分别为 $B_x$ 和 $B_y$ ,其中,X轴表示正北方向,Y轴表示正东方向;

[0041] 在步骤S400中,约定供电配电模块给所述磁矩生成装置通入的恒电流为 $I$ ,产生的稳定磁矩 $m$ , $m=[m_x, m_y, 0]$ ,其中 $m_x$ 和 $m_y$ 分别对应于地磁坐标系下的X轴和Y轴上的分量,产生稳定磁矩的计算公式如:

$$[0042] \quad \begin{cases} m_x = NIa \cos \alpha \\ m_y = NIa \sin \alpha \\ m_z = 0 \\ |m| = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{cases}$$

[0043] 其中, $N$ 为线圈匝数; $I$ 为恒流电流值; $a$ 为线圈横截面积; $\alpha \in [0, \pi]$ 为磁矩 $m$ 与地磁坐标系的X轴正方向之间的夹角。

[0044] 作为本发明的一种优选方案,在S500中,磁矩生成装置的初始最优角度为 $\alpha_{opt}$ :

[0045]  $\alpha_{opt} = \operatorname{argmax} (m_x B_x - m_y B_y)$ 。

[0046] 作为本发明的一种优选方案,在S600中,磁矩生成装置转动检测模块实时检测磁矩生成装置的角位移 $\beta_1$ 、角速度 $\beta_2$ 和角加速度 $\beta_3$ 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;

[0047] 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:

[0048]  $f(k) = \min G_k(\beta_1, \beta_2, \beta_3) + \lambda G_{k-1}(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ ,  $k=1, 2, L$ ;且,

[0049]  $G_k(\beta_1, \beta_2, \beta_3) = \|\beta_1(k) - \beta_1(0)\| + \mu_1 \beta_2(k) + \mu_2 \beta_3(k)$ ,  $k=1, 2, L$ ;

[0050] 其中, $\beta_1(0)$ 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。

[0051] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0052] 本发明采用两套投送装置同轴对转的方式,可克服地面实验中空气阻力矩,解除目标线速度有上限的制约,基于空气轴承的地面系统能很大程度上降低系统整体摩擦力矩;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;容易保证系统通轴的同轴度,保证系统整体摩擦力矩为恒值,同时,减少系统干扰力矩的引入,实现多投送目标的同时/分时可控投送,从而更好地用于地磁储能方法地面原理验证。

## 附图说明

[0053] 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。

[0054] 图1为本发明实施例提供两个空气轴承安装支撑通轴的实验系统的结构示意图;

[0055] 图2为本发明实施例提供单个空气轴承安装支撑通轴的实验系统的结构示意图;



- [0056] 图3为本发明实施例提供动量交换结构E1的结构示意图；  
[0057] 图4为本发明实施例提供动量交换结构E2的结构示意图；  
[0058] 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

[0059] 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。

[0060] 如图1和图2所示,本发明提供了一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统,包括:

[0061] 支撑通轴S0,通过空气轴承竖直安装在实验场地的固定平台上,且被配置成与实验场地的水平面法线平行;

[0062] 磁矩生成装置L0,与支撑通轴S0连接,且磁矩生成装置L0通入工作电流后在地磁场作用下受到磁力矩开始转动;

[0063] 支撑通轴S0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;

[0064] 其中,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] 通过第一目标投送组件A0和第二目标投送组件A1的同轴转动来克服地面实验中空气阻力矩,解除投送目标线速度有上限的制约,更好地用于地磁储能方法地面原理进行系统的功能验证。

[0066] 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-启动摩擦力矩关系(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。

[0067] 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。

[0068] 采用空气轴承可减小系统转动的启动摩擦力矩( $10^{-4}$ 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( $10^{-4}$ Nm量级),磁矩生成装置L0的磁力矩量级达到 $10^{-3}$ Nm时,即可实现地磁储能和释能投送。

[0069] 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。

[0070] 为此本发明提供了两种支撑通轴S0通过空气轴承的安装方式:

[0071] 如图1所示的方案一：

[0072] 空气轴承包括安装在支撑通轴S0顶端部的第一空气轴承B1和安装在支撑通轴S0的底端部的第二空气轴承B2；

[0073] 第一空气轴承B1和第二空气轴承B2的外圈与固定平台连接，第一空气轴承B1和第二空气轴承B2的内圈与支撑通轴S0固定连接。来保证整个系统稳定，第一空气轴承B1为止推和向心约束的空气轴承，第二空气轴承B2为向心约束的空气轴承，第一空气轴承B1和第二空气轴承B2通过调整保证绝对同轴，保证支撑通轴S0的方向竖直向下。

[0074] 如图2所示的方案二：

[0075] 采用单个空气轴承B0来安装支撑通轴S0，空气轴承B0安装在支撑通轴S0的轴身上，且空气轴承B0的外圈3与固定平台连接，空气轴承B0的内圈2与支撑通轴S0连接，空气轴承B0为止推和向心约束的空气轴承，保证支撑通轴S0的方向竖直向下。

[0076] 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。

[0077] 支撑通轴S0仅由单个空气轴承气浮，且地面系统中所有的部件结构均由图示的一根支撑通轴S0上下贯穿直接连接，支撑通轴S0是整个系统的旋转轴，只要保证装置加工制造时通轴S0的加工精度，则很容易保证两套投送装置之间的同轴度。

[0078] 而方案一采用两个空气轴承，当两个空气轴承存在有同轴度安装误差时，由于空气轴承对支撑通轴S0有向心约束，无论使用加工精度多高的通轴S0，均会给地面系统引入附加摩擦力矩或其他干扰力矩，而方案二只有一个空气轴承，可很好地避免该问题。

[0079] 在方案一和方案二中：

[0080] 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；

[0081] 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。

[0082] 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。

[0083] 进一步地约定，第一目标投送组件A0的动量交换结构为E1，如图3所示，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；

[0084] 第二目标投送组件A1的动量交换结构为E2，如图4所示，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；

[0085] 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。

[0086] 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。

[0087] 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。

[0088] 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。

[0089] 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。

[0090] 两种方案,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。

[0091] 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。

[0092] 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。

[0093] 进一步地,本发明的软件控制部分包括供电配电模块、释放投送主动控制模块、动量交换主动控制模块、磁矩生成装置检测模块、投送目标速度检测模块和地磁场强度测量模块;

[0094] 供电配电模块,用于为空气轴承、动量交换结构和磁矩生成装置L0供电;

[0095] 磁矩生成装置检测模块,连接磁矩生成装置,用于监测磁矩生成装置L0的角位移、角速度和角加速度。

[0096] 动量交换主动控制模块,用于根据磁矩生成装置检测模块的监测数据控制动量交换结构的输出力矩和方向;

[0097] 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轴和Y轴上地磁场分量强度;

[0098] 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。

[0099] 磁矩生成装置转动检测模块检测到磁矩生成装置L0有转动,则发送信号给动量交换主动控制模块,由其去主动控制动量交换结构E1和动量交换结构E2对转。

[0100] 投送目标速度检测模块实时检测动量交换结构E1和动量交换结构E2两端的投送目标线速度,当达到设定的线速度时,发送信号给释放投送主动控制模块,由其控制投送目标释放。

[0101] 本发明提供了一种根据上述的同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统的工作方法,包括具体步骤:

[0102] 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;

[0103] 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轴和Y轴上地磁场分量的强度；

[0104] S300、标定系统摩擦力矩：给空气轴承通电，在支撑通轴、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，摩擦力矩标定值为 $T_f$ ：

$$[0105] \quad T_f = \frac{\sum_{i=1}^n F_i l_i}{n}$$

[0106] 其中， $F_i$  ( $i=1, 2, L, n$ ) 和 $l_i$ 为单次拉力计示数及其对应力臂值， $n$ 为测试次数；

[0107] S400、产生稳定磁矩：通过供电配电模块给磁矩生成装置通入恒流电，产生稳定磁矩；

[0108] S500、获取磁矩生成装置的初始最优角度：测量磁矩生成装置的当前角度，并根据磁矩生成装置产生的稳定磁矩和磁矩生成装置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计算磁矩生成装置相对于支撑通轴的初始最优角度，随后供电配电模块停止向磁矩生成装置进行供电，并使整个系统处于静止状态，将磁矩生成装置转动至相对于支撑通轴的初始最优角度的位置；

[0109] S600、地磁储能：供电配电模块给磁矩生成装置、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、磁矩生成装置转动检测模块、投送目标速度检测模块同时上电；

[0110] 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进行对转动作；

[0111] S700、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；

[0112] S800、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，供电配电模块停止向磁矩生成装置供电并固定磁矩生成装置，同时动量交换主动控制模块控制两个动量交换结构减速，直至完全静止；

[0113] 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；

[0114] 如果进行同等磁矩生成装置的稳定磁矩下的投送，则加装新的投送目标后，返回S600进行下一轮次的地磁储能和释能投送；

[0115] 如果进行不同磁矩生成装置的稳定磁矩下的投送，则加装新的投送目标后，返回S400进行下一轮次的地磁储能和释能投送。

[0116] 在步骤S200中，记地磁坐标系下的X轴和Y轴上地磁场分量的强度分别为 $B_x$ 和 $B_y$ ，其中，X轴表示正北方向，Y轴表示正东方向；

[0117] 在步骤S400中，约定供电配电模块给所述磁矩生成装置通入的恒流电为 $I$ ，产生的稳定磁矩 $m$ ， $m = [m_x, m_y, 0]$ ，其中 $m_x$ 和 $m_y$ 分别对应于地磁坐标系下的X轴和Y轴上的分量，产生稳定磁矩的计算公式如：

$$[0118] \quad \begin{cases} m_x = NIa \cos \alpha \\ m_y = NIa \sin \alpha \\ m_z = 0 \\ |\mathbf{m}| = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{cases}$$

[0119] 其中,  $N$ 为线圈匝数;  $I$ 为恒流电流值;  $a$ 为线圈横截面积;  $\alpha \in [0, \pi]$ 为磁矩 $\mathbf{m}$ 与地磁坐标系的 $X$ 轴正方向之间的夹角。

[0120] 在S500中,磁矩生成装置的初始最优角度为 $\alpha_{opt}$ :

$$[0121] \quad \alpha_{opt} = \operatorname{argmax} (m_x B_x - m_y B_y)。$$

[0122] 在S600中,磁矩生成装置转动检测模块实时检测磁矩生成装置的角位移 $\beta_1$ 、角速度 $\beta_2$ 和角加速度 $\beta_3$ 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;

[0123] 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:

$$[0124] \quad f(k) = \min G_k(\beta_1, \beta_2, \beta_3) + \lambda G_{k-1}(\beta_1, \beta_2, \beta_3), k=1, 2, L; \text{且},$$

$$[0125] \quad G_k(\beta_1, \beta_2, \beta_3) = \|\beta_1(k) - \beta_1(0)\| + \mu_1 \beta_2(k) + \mu_2 \beta_3(k), k=1, 2, L;$$

[0126] 其中,  $\beta_1(0)$ 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。

[0127] 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。

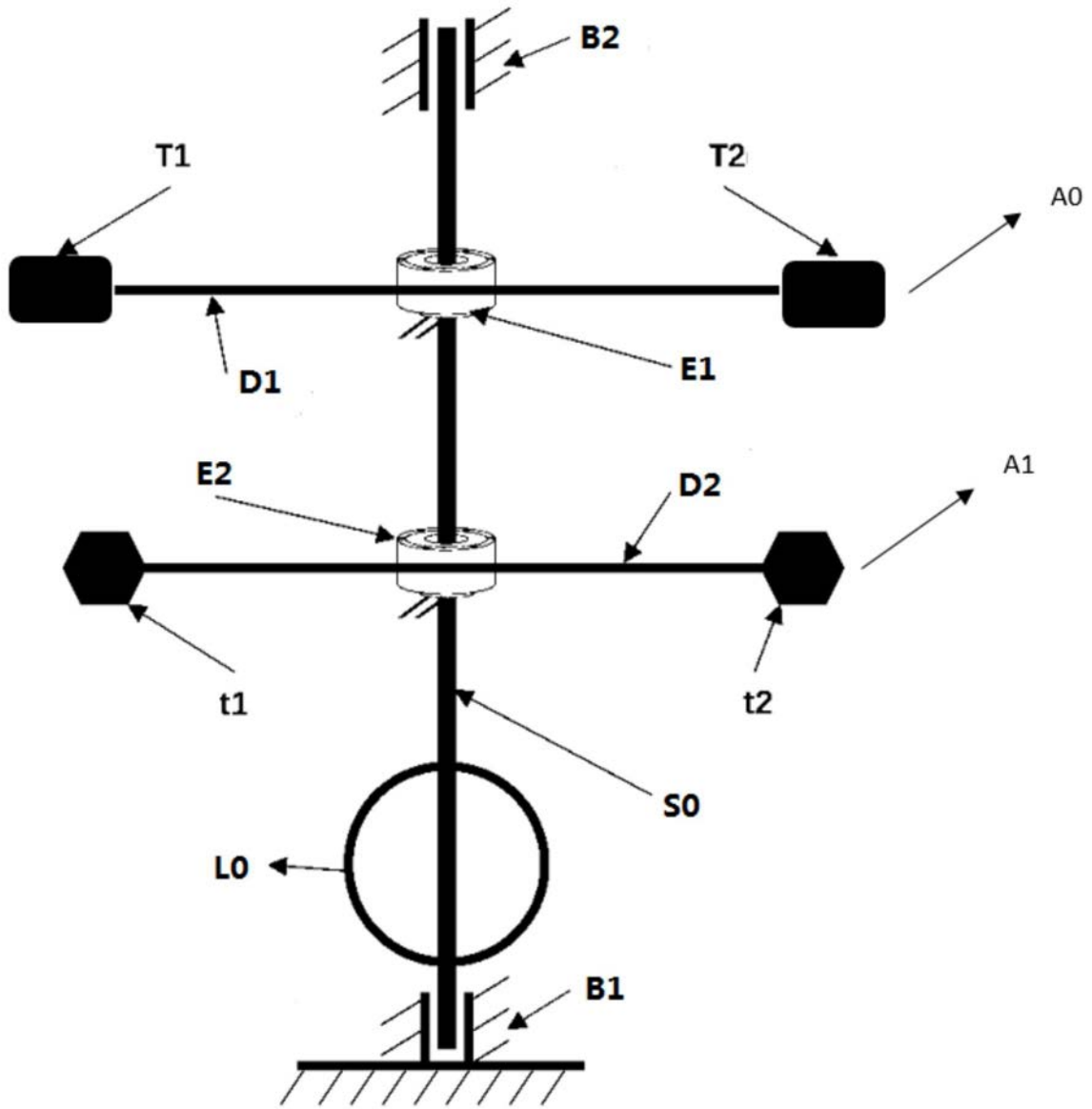


图1

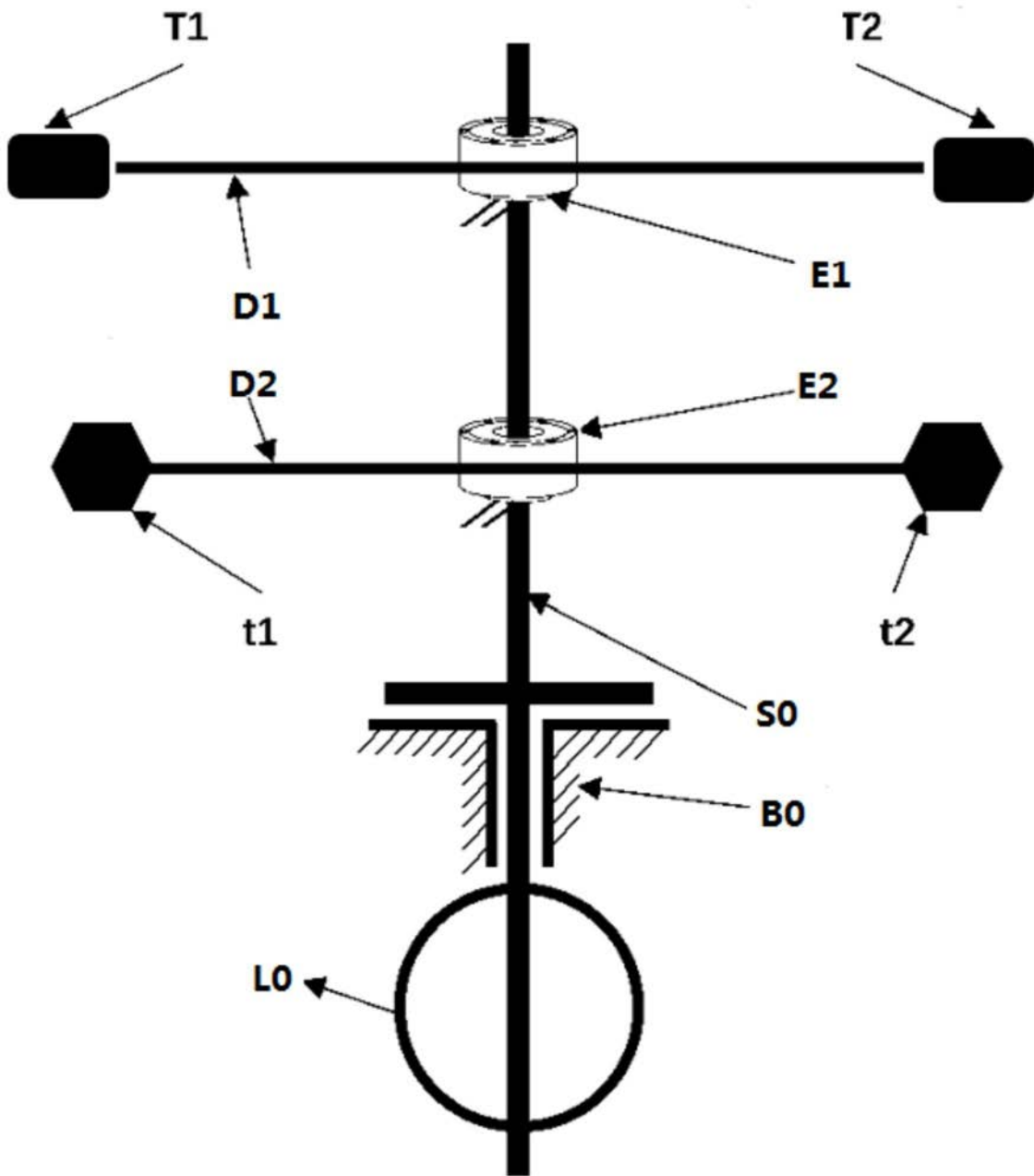


图2

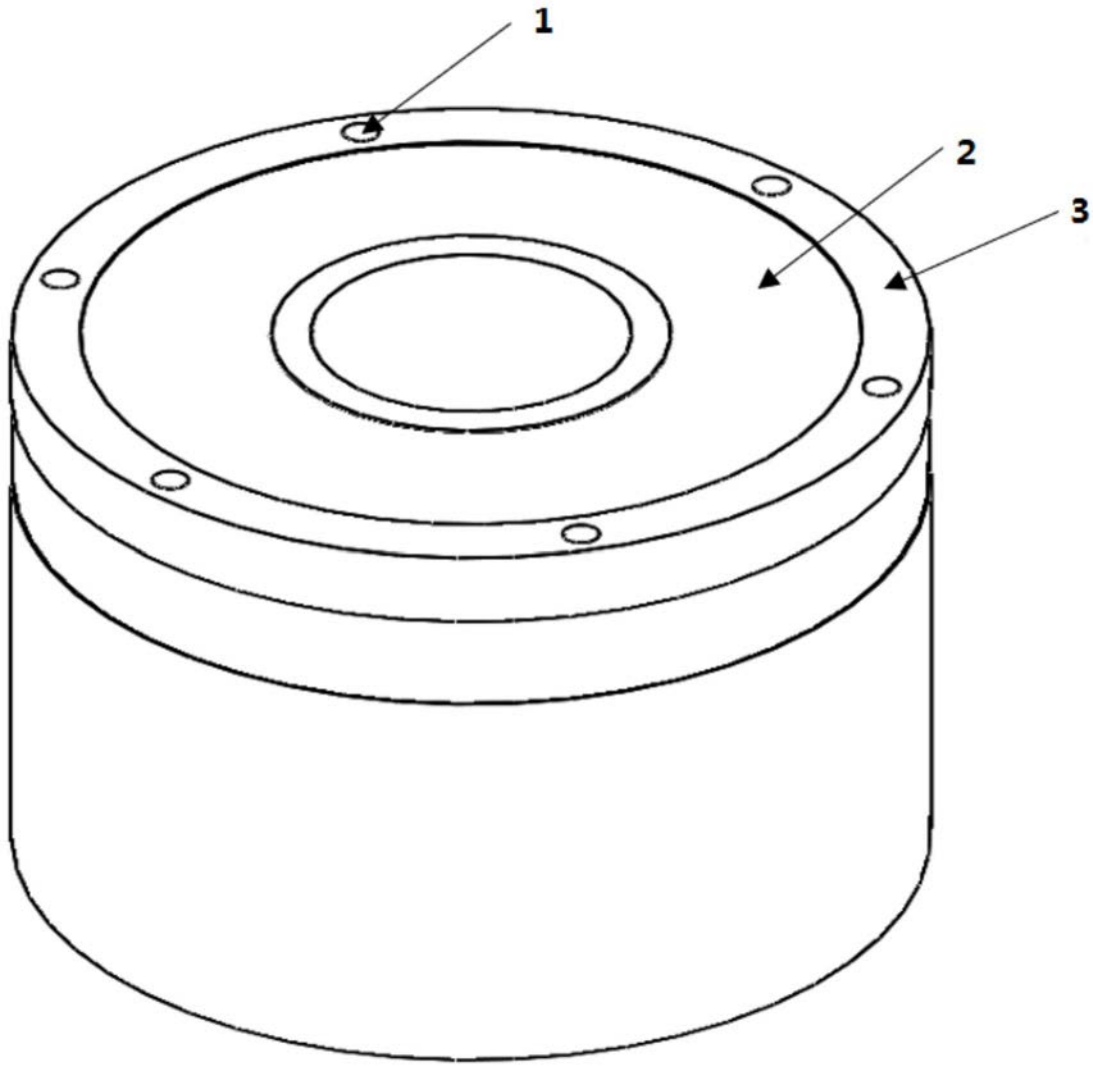


图3



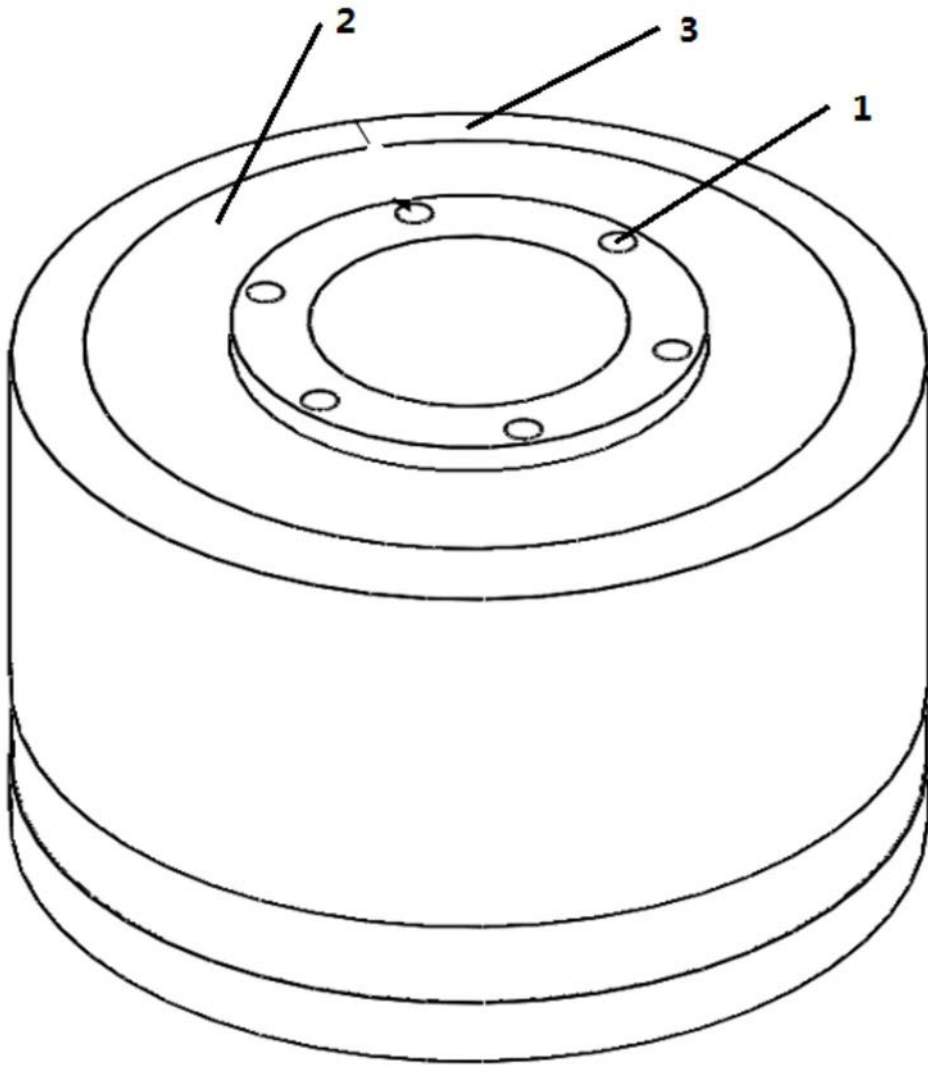


图4

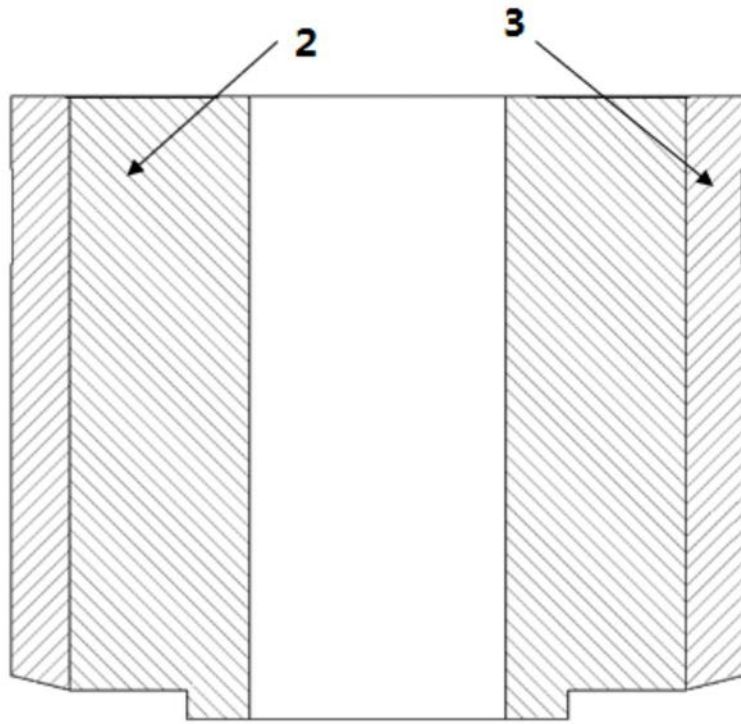


图5