

三轴气浮台中伞形工作平台的设计 及不平衡力矩研究

解 鹏, 邢利娜, 金 光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 三轴气浮台是空间飞行器全物理仿真的核心设备, 其工作平台的设计及自重下的不平衡力矩研究是采用三轴气浮台进行全物理仿真试验的重要保障。本文根据仿真试验的要求对其伞形工作平台进行了设计, 然后基于运动弹性动力学理论建立了三轴气浮台的工作平台的力学模型, 并推导出自重下在三轴气浮台进行姿态变化时的平台质心变化公式, 从而获得了气浮台伞形工作台不平衡力矩的计算公式。通过公式对所设计的伞形工作平台不平衡力矩进行了计算, 结果表明, 不平衡力矩最大时为 $0.23 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$, 能够很好地满足仿真要求, 为下一步的仿真试验提供了良好的基础。

关键词: 三轴气浮台; 伞形工作平台; 设计; 不平衡力矩

中图分类号: V448.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112811.0075

Design and Research of Unbalance Torque on Umbrella Style Platform of Three Axis Air-bearing Testbed

XIE Peng, XING Li-na, JIN Guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: The three axis air-bearing testbed is the core of the physical simulation equipment, the design and research of unbalance torque on umbrella style platform of three axis air-bearing tested are important guarantee of the physical simulation. Based on the requirements of the simulation, this paper designs the umbrella style platform, then based on the method of kineo-elastodynamic analysis, founds the mechanical model of the umbrella style platform of three axis air-bearing testbed, and the formula for the platform structure mass-center displacement

and for unbalance torque of umbrella style platform arising from self-weight deformation are deduced. By the formula, the unbalance torque of umbrella style platform are calculated. The results show that the max-unbalanced torque is $0.23 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$, it can meet the requirements of simulation well and provide a good foundation for the next simulation.

Keywords: three axis air-bearing testbed, umbrella style platform, design, unbalance torque

1 引言

空间飞行器的全物理仿真平台——三轴气浮台依靠压缩空气在气体球轴承与球轴承座之间形成气膜,使其工作平台浮起,从而实现3个轴向上失重和无摩擦的相对运动条件^[1]。其工作平台是三轴气浮台唯一的负载部件,也是三轴气浮台的核心部件之一。在工作平台的结构设计中,关键是其不平衡力矩的分析计算,它不仅涉及工作平台的制造及配重,也决定了三轴气浮台的主要性能。在工作平台的结构设计中,还要考虑到对台面上试验设备的安装固定、电子元器件之间的走线,因此,更应考虑到其结构设计的稳定性,以及由于工作台弹性变形引起的不平衡力矩^[2]。

目前,国内关于气浮台工作平台方面的研究还比较少,本文根据相关的一些资料,针对全物理仿真需求,对三轴气浮台的伞形工作台进行了详细设计,并对其自重下的不平衡力矩进行了研究,推导出基于运动弹性动力学理论的计算公式。计算结果表明其不平衡力矩能够很好地满足仿真要求,并且在自研的高精度小型三轴气浮台上获得了很好的应用,下一步将深入开展其性能研究。

2 伞形工作台的设计及质心分析

气浮台工作台有桌面型、伞型和双哑铃型结构。本文采用伞形工作台结构设计,工作台分为上下两层,采用铸铝铸造而成。其中在上台面上加工M8螺纹阵列(间距50 mm),用于仿真实验中试验设备在工作台上的安装固定,表面刮研以保证传感

器的安装精度,同时加工了4个 $\Phi 50 \text{ mm}$ 的过线孔,便于转台上下走线;下工作台主要用于调平衡机构的安装,并留有4块陀螺安装板,便于将姿态控制陀螺安装到工作台上。伞形工作台的三维模型如图1所示,根据其三维模型可得其质量约为30 kg。

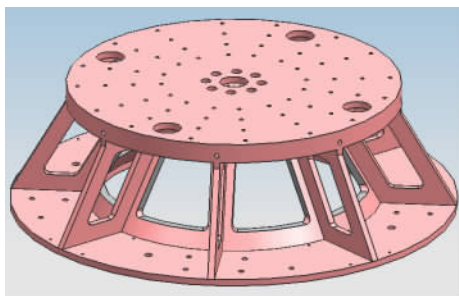


图1 伞形工作台三维模型图

三轴气浮台为模拟空间飞行器在外层空间的环境,要求其工作台的回转中心与质心重合,以消除地面上重力梯度的影响。由图1易得该三维模型是关于中心对称的,因此在材料密度均匀的理想情况下,其质心就在其回转轴上。

质心与回转轴绝对的重合是不存在的。由于太空中也存在重力梯度、太阳光压力和地球磁场等引起的扰动力矩,所以三轴气浮台平台的回转中心与质心某种程度的不重合是允许的。在铸造过程中疏松、气泡不可避免,铸件的材料密度实际是不均匀的,因此,工作台的回转中心和质心必然是不重合的,由此引起的不平衡力矩始终存在。

三轴气浮台平台的回转中心与质心某种程度的不重合是允许的,但这种不重合导致重力产生的不平衡力矩必须小于太空中存在的扰动力矩,通常控制在 $10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$ (即 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}$) 以内^[3-4]。假设三轴气浮

台的工作台为 100 kg, 则其质心与回转中心的偏离只允许在 $0.1 \mu\text{m}$ 范围内。如果平台的刚度不是足够大时, 平台变形产生的质心偏移量远远大于 $0.1 \mu\text{m}$, 这样由于重力作用产生的不平衡力矩会很大, 将导致气浮台不能达到仿真需要的静平衡。

3 伞形工作台的不平衡力矩分析

不平衡力矩是用三轴气浮台进行空间飞行器地面全物理仿真试验过程中最主要的干扰力矩。为了模拟太空的微重力环境, 三轴气浮台起浮部分的质心要与回转中心重合, 以实现气浮台平台在任意位置的静平衡。当气浮台平台为刚体且质心与回转中心重合时, 不平衡力矩为零。但是, 由于绝对的刚体是不存在的, 所以在自重作用下, 气浮台平台在试验过程中将产生微小的弹性变形, 从而产生不平衡力矩。因此, 当平台结构刚体质心与其回转中心不重合时将产生两种不平衡力矩, 即由于平台质心与其回转中心不重合产生的不平衡力矩和由于自重作用平台弹性变形产生的不平衡力矩^[5]。通过配重能够有效消除第一种不平衡力矩, 因此, 以下着重分析第二种情况。

3.1 伞形工作台不平衡力矩的理论计算

当对气浮台要求试验精度很高时, 气浮台弹性变形引起的不平衡力矩将成为干扰力矩中的主要因素。因此, 将气浮台平台结构变形引起的不平衡力矩列为影响气浮台不平衡的主要原因之一。

在气浮平台回转中心建立相对地球静止的惯性坐标系 $(O'x'y'z')$ 和随平台转动的结体坐标系

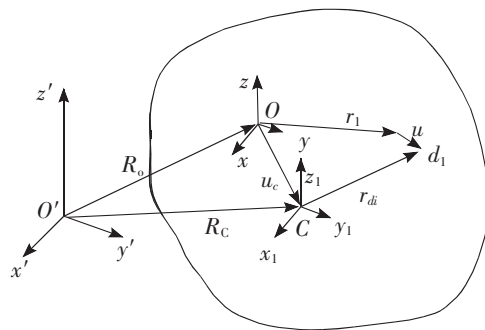


图2 气浮平台坐标系及质心示意图

$(Oxyz)$, 如图 2 所示^[5]。

假设平台是刚体, 当平台在作刚体运动的同时, 平台内各质点单元又由于自重作用存在微小的弹性变形。由图 2 可得 O 点为刚体质心 (将平台视为刚体时的质心), C 点为变形体的质心, u_c 为单元质心弹性变形, 设 m_i 为单元质量, 则有:

$$\sum m_i u_c + \sum m_i r_{di} = \sum m_i r_{oi} + \sum m_i u \quad (1)$$

又由刚体质心定义可知 $\sum m_i r_{di} = 0$, $\sum m_i r_{oi} = 0$, 将上述两式代入 (1) 式可得:

$$u_c = \frac{\sum m_i u}{\sum m_i} \quad (2)$$

初始状态下, 结体坐标系和惯性坐标系应是重合的。当气浮台转动时, 其姿态可由 3 个欧拉角 (偏航角 ψ , 俯仰角 θ , 滚动角 ϕ) 表示。因此, 从惯性坐标系到结体坐标系的变换矩阵 C 可以表示为:

$$C = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

气浮台在结体坐标系上的自重场为:

$$\begin{bmatrix} g'_x \\ g'_y \\ g'_z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \sin\phi\cos\theta \\ \sin\phi\cos\theta \end{bmatrix} g \quad (4)$$

当气浮台偏转时, 由于自重作用平台质心将产

生偏移, 而产生的不平衡力矩为:

$$M = mg \begin{bmatrix} 0 & -\cos\phi\cos\theta & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\cos\theta & 0 & \sin\theta \\ -\sin\phi\cos\theta & -\sin\theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} =$$

$$mg \begin{bmatrix} -y \cos \phi \cos \theta + z \sin \phi \cos \theta \\ x \cos \phi \cos \theta + z \sin \theta \\ -x \sin \phi \cos \theta - y \sin \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 自重作用下伞形工作台的不平衡力矩分析

为了便于进行有限元分析, 现只考虑当气浮台在惯性坐标系下绕水平轴 x' 旋转的情况。简化的三维模型及在有限元分析软件中最终建立的 FEM 模型如图 3 所示。

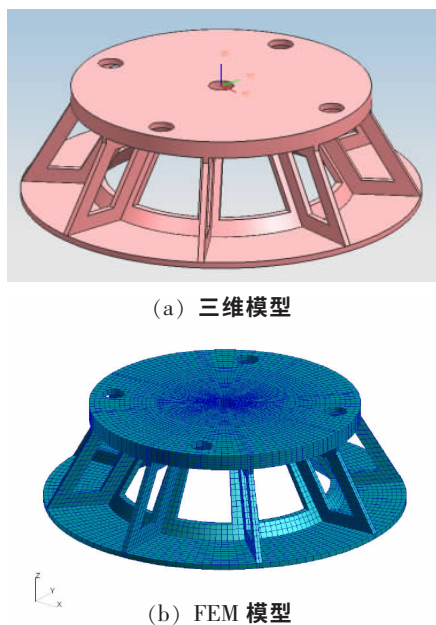


图 3 最终建立的有限元分析模型

由上节中推导的不平衡力矩计算公式可得, 当气浮台在惯性坐标系下绕水平轴 x' 旋转时, 3 个欧拉角中, 偏航角 $\psi=0$, 俯仰角 $\theta=0$, 滚动角 ϕ 作为唯一的变量存在, 且平台质心必定在平面 $y'o'z'$ 内, 因此质心坐标 $x=0$, 则平台的不平衡力矩为:

$$M=mg \begin{bmatrix} -y \cos \phi + z \sin \phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

易得式中 $y=-y_0 \sin \phi$, $z=-z_0 \cos \phi$, 其中 y_0 为重力全部作用于 $Oxyz$ 坐标系 y 轴方向时的质心偏移量, z_0 为重力全部作用于 $Oxyz$ 坐标系 z 轴方向时的质心偏移量。

图 4、图 5 为气浮台在水平位置时自重全部作

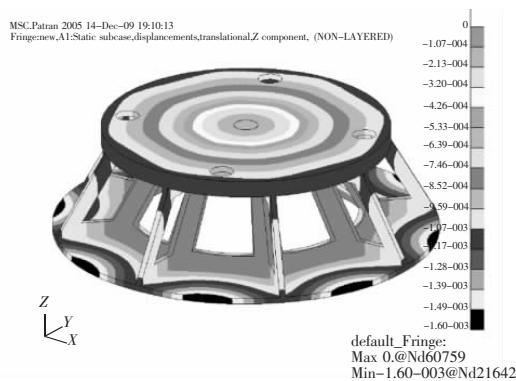


图 4 重力全部作用于 $Oxyz$ 坐标系 z 轴方向时的 z 向应变云图

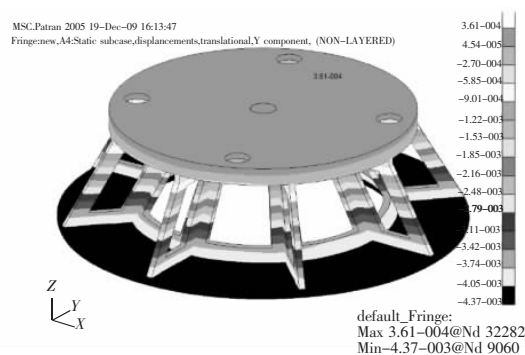


图 5 重力全部作用于 $Oxyz$ 坐标系 y 轴方向时的 y 向应变云图

用于 z 轴及 y 轴时的变形云图, 通过有限元分析可得 $y_0=1.0 \mu\text{m}$, $z_0=0.8 \mu\text{m}$ 。

因此, 由上述分析可得:

$$M=mg \begin{bmatrix} \frac{y_0 - z_0}{2} \sin 2\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = mg \begin{bmatrix} 0.1 \sin 2\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由上式可知, 当三轴气浮台绕水平轴转动时, 由平台在自重作用下弹性变形引起的不平衡力矩与转动角的 2 倍呈正弦变化, 又由于轴承结构的限制, 平台绕水平轴旋转的范围在 $\pm 25^\circ$ 以内, 所以可以得到当平台与水平方向夹角为 $\pm 25^\circ$ 时不平衡力矩达到最大值, 计算可得为 $0.23 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$, 能够很好地满足仿真要求。并且在自研的高精度小型三轴气浮台上获得了很好的应用, 自研的三轴气浮台如图 6 所示。



图6 自研的高精度小型三轴气浮台

4 结 论

本文对三轴气浮台的工作平台进行了详细设计,并基于运动弹性动力学理论推导出设计的伞形工作台在自重下的不平衡力矩公式。计算及分析结果表明,设计的伞形工作台在自重下的不平衡力矩能够很好地满足全物理仿真的试验要求。因此,其在自研的高精度小型三轴气浮台上获得了很好的应用,下一步将依托该三轴气浮台积极开展各种实验,深入研究三轴气浮台的综合性能,为空间飞行器的全物理仿真打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 王云飞. 气体润滑理论与气体轴承设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 144-153.
- [2] 邹文信, 郭德申, 邓玉新, 等. 三轴卫星运动模拟台的工作台设计及其平衡问题研究[J]. 光学机械, 1984(2): 82-90.
- [3] 刘墩, 刘育华, 陈世杰. 静压气体润滑[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
- [4] 徐在峰. 三轴气浮台球轴承制造及安装误差引起的涡流力矩的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2007.
- [5] 王祖温, 李延彬, 包刚. 3 自由度气浮台力学性能研究-关于自重作用下不平衡力矩的分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 179-184.

作者简介: 解鹏(1985-), 男, 汉族, 山东聊城人, 硕士, 研究实习员, 主要从事精密光仪结构设计及气浮轴承方面的研究。
E-mail: wl2sbq1314@126.com

声明: 《光机电信息》2010年第9期发表的“中国晶体——藏匿的珍宝”(译者: 赵新, 赵震声) 译自《Nature》(Vol.457, 19. Feb. 2009, pp.953-955)。