磁气悬吊微重力模拟系统动力学研究 *

周梅　张欢　宋晓东†

（北京理工大学 宇航学院，北京 100081）

摘要　地面微重力模拟试验指导机械臂在轨服务已成必然趋势，然而地面试验获取的是机械臂和微重力模拟装置的耦合动力学特性，现有的微重力模拟装置特别是气浮法附加惯量较大，影响地面试验的准确性．为了解决这一问题，本文提出了一种新型的磁气悬吊微重力模拟装置，由磁悬浮钢板、磁悬浮气足和吊绳三部分组成．通过柔性绳索连接机械臂和磁悬浮气足，磁悬浮气足在钢板上被动跟随机械臂运动，减小微重力模拟装置对机械臂的影响．以在平面转动的刚柔耦合臂杆为研究对象，分别建立臂杆-磁气悬吊微重力模拟系统、臂杆-气浮微重力模拟系统以及零重力臂杆的多体动力学模型并进行仿真计算．结果表明，与气浮微重力模拟装置相比，磁气悬吊微重力模拟装置对机械臂系统的动力学特性影响较小，对改善空间机械臂的运动平稳特性和末端定位精度有重要意义．

关键词　磁气悬吊，　微重力模拟，　刚柔耦合，　多体动力学

DOI：10.6052/1672-6553-2020-111

引言

随着太空探测和开发的不断深入，空间技术得到了急速发展，在轨操作任务的需求也在不断增加，并且任务特性呈现越发复杂繁重的特点．因此，利用机械臂代替宇航员舱外作业是现阶段和未来探索太空的必然发展趋势[1,2]．空间机械臂是典型的刚柔耦合系统，并且由于臂杆细长、结构刚度低等特点展现明显的柔性特性，在大范围刚性运动的同时伴随小幅度的柔性运动．特别是末端执行器在抓取目标时的残余柔性振动将严重影响空间机械臂的操作稳定性和末端定位精度[3-5]．因此，机械臂投入太空使用之前，需要对其进行地面微重力模拟试验指导在轨服务，复现真实的微重力环境保证在轨准确服务[6-8]．

目前，空间机械臂地面微重力模拟已经发展了吊丝配重法、静平衡法、水浮法、水浮磁悬浮混合法、气浮法等方法[9,10]．吊丝配重法是指通过滑轮组悬挂配重，并调节配重物的质量来补偿空间机械臂的重力．该方法同样可以实现空间机械臂的三维微重力模拟，但是由于吊丝和滑轮之间的摩擦以及吊丝的颤振导致系统的微重力模拟精度较差[11]．静平衡法利用钢丝、弹簧、连杆机构、滑轮等部件，遵循系统的能量守恒定律即系统的重力势能和弹性势能的总和保持不变实现微重力模拟，但是模拟精度比较差[12]．水浮法可以用于三维微重力模拟试验，但是需要对空间机械臂系统进行密封性改造，在水池中通过配重的变化使得空间机械臂在水中的浮力与重力相平衡来实现空间机械臂的微重力模拟[13]．当机械臂进行动力学试验时，水阻力和惯性将严重影响试验的正确性，而且利用液体浮力配平重力不具有实时操作性，可控性差，产生的误差在长时间操作过程中会导致被实验物体发生竖直向上的运动．为了解决水浮法的这些问题，电磁力系统结合水浮法悬浮微重力环境实验模拟方法利用混合磁悬浮技术在线调控微重力状态和稳定实验物体的高度，但是该方法除了需要液体密封外，还需要在机械臂内布置永磁铁和精确的电磁力补偿控制，无疑引入了附加惯量和增加了系统复杂性[14]．气浮法采用空气轴承的喷气反作用力来抵消支撑在光滑气浮台上空间机械臂的重力．气浮法在二维平面的微重力模拟应用广泛，但是难以用于三

2020-10-28 收到第 1 稿，2020-12-15 收到修改稿．

* 国家自然科学基金资助项目（11872108）

† 通讯作者 E-mail：xd_song@bit.edu.cn

维空间运动下的空间机械臂微重力模拟[15].虽然气浮法具有结构简单、承载能力大、精度高等特点,但是气浮装置由于引入系统的附加惯量较大会导致气浮装置和机械臂的动力学耦合特性明显.从微重力模拟精度上看,气浮法最优,但是从与机械臂动力学特性的耦合和三维微重力模拟能力方面看,气浮法存在明显的不足.

针对现有微重力模拟方法的不足,本文基于磁悬浮气足的吸附特性和通气低阻尼特性提出一种新型的微重力模拟装置—磁气悬吊微重力模拟装置,该装置由磁悬浮钢板、磁悬浮气足和吊绳组成,通过磁吸力、磁悬浮气足重力、气浮力和吊索张力的平衡实现微重力模拟.为了研究所提装置的微重力模拟特性,利用多体动力学方法建立系统的动力学模型并进行仿真计算,并与气浮式微重力模拟装置进行了对比,验证所提装置具有与机械臂低耦合动力学特性.

1 磁气悬吊微重力模拟装置设计

1.1 悬吊式磁悬浮气足

悬吊式磁悬浮气足,如图 1所示,由进气口、套轴、出气口、磁块、吊环等部件组成,简称为气足.吊环用于连接吊索悬挂机械臂,并提供重力卸载力.气足在磁块与空间磁性钢板之间的磁吸力、气垫作用力和吊索拉力的作用下在空间钢板上随机械臂移动,从而实现机械臂的二维微重力模拟.

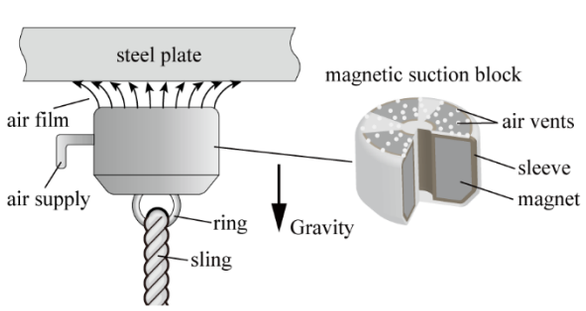

图1 磁悬浮气足示意图

Fig.1 Schematic diagram of hybrid magnetic air bearing

一种磁气悬吊微重力模拟装置主要包括磁性钢板、磁悬浮气足和吊绳三部分,实现机械臂的微重力模拟的布局如图2所示.特制的马氏体磁性钢板通过支撑或者悬吊等方式置于平台上方.钢板对气足中磁块的向上磁吸力用于重力卸载和约束气足在钢板平面运动.为了降低气足在钢板上运动的摩擦力,系统参考气浮法在气足与钢板之间形成高压气膜,使气足呈悬浮状态.柔性吊绳一端固连在气足的吊环上,另一端捆绑在机械臂的吊点位置.通过调节磁块的磁吸力、高压气体的压强和绳索长度设计绳索的张力,保证在初始状态机械臂在竖直方向平衡.气足处于工作状态时,能沿着钢板的表面做低摩擦被动跟随式移动.

相比于气浮法,磁气悬吊微重力模拟装置与机械臂之间通过柔性索连接,降低了装置与机械臂之间的动力学耦合特性.又由于系统采用悬吊形式,若将吊环替换为滑轮,并在索的另一端连接配重,可将其拓展到三维微重力模拟.相比于吊丝配重法,系统结构简单易实现.另外,改变磁悬浮钢板的尺寸规格、气足数量、吊点布局、悬吊方式等,能够使得磁气悬吊微重力模拟装置在不同情况下高精度和高可靠性地进行空间机械臂的地面微重力模拟实验.

1.2 臂杆–磁气悬吊微重力模拟系统

为了分析磁气悬吊微重力模拟装置对空间机械臂的重力卸载能力和对其动力学特性的影响,本文以柔性臂杆为研究对象,研究臂杆绕固定点在平面内以恒定角速度$\omega = \pi/10$ rad/s转动的动力学特性.臂杆–磁气悬吊微重力模拟系统,如图 2所示,臂杆由两端和中部三个刚性连接段(编号0,1,2)和两个柔性段(编号3,4)组成,采用两点磁气悬吊形式.系统的具体结构和材料参数如表 1所列.

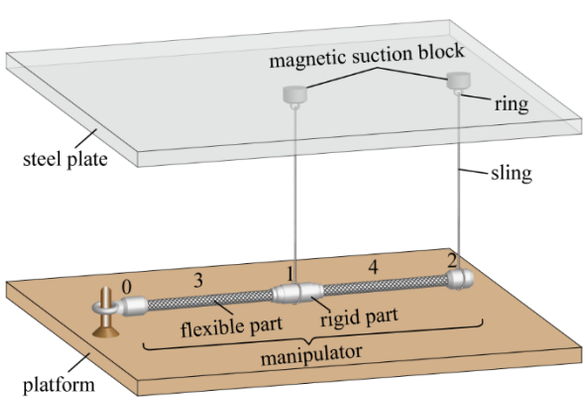

图2 臂杆-磁气悬吊微重力模拟系统

Fig.2 The system of a manipulator and the hybrid magnetic air suspension

2 系统多体动力学建模

基于多体动力学方法,建立臂杆–磁气悬吊微重力模拟系统的动力学模型,如图 3a所示.臂杆的连接段、磁悬浮气足等不需要考虑变形或者变形很

表 1　系统的主要参数

Table 1　Main parameters of the system

Parameter	Value
Length of rigid parts of the manipulator (m)	0.048, 0.066, 0.028
Mass of rigid parts of the manipulator (kg)	0.131, 0.179, 0.076
Length of flexible parts of the manipulator (m)	0.168, 0.168
Radius of flexible parts of the manipulator (cm)	0.850, 0.850
Young's modulus of flexible parts of the manipulator (GPa)	210.000
Length of the slings (m)	0.500
Stretching stiffness of slings *EA* (kN)	219.900
Mass of magnetic suction blocks (kg)	1.025

小的,但是在空间大范围运动和转动的物体利用基于旋转向量的刚体建模.考虑臂杆的柔性段和吊索在空间的大幅运动和柔性振动,分别利用基于转动向量的几何精确 Timoshenko 梁单元和 Lagrange 索单元建模.不考虑钢板与磁悬浮气足之间的磁吸力和高压气膜,利用平面约束将磁悬浮气足约束在钢板表面上.另外,臂杆的刚性段和柔性段连接、吊索与臂杆刚性段的连接以及吊索与吊环的连接采用固定约束建模,臂杆的一端施加转动约束实现平面转动.磁悬浮气足在钢板上运动时还受到磁阻尼力和气浮阻力的作用,在系统的多体动力学方程中以广义外力的形式加入.因此,臂杆-磁气悬吊微重力模拟系统是典型的刚柔耦合多体动力学系统.

鉴于刚体、几何精确梁、旋转副、固定副等建模理论与方法已经完备[16-18],下面对系统中的刚体、柔性体、约束和外力的建模方法进行简要介绍.

2.1　刚体

如图 3c 所示,在刚体 r 的质心位置固连局部坐标系 $o_r x_r y_r z_r$,选择刚体的广义坐标为

$$\mathbf{q}_r = \left[\mathbf{r}_r^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{\varphi}_r^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} \quad (r = 0, 1, 2, \ldots n_r) \tag{1}$$

其中,$\mathbf{r}_r^{\mathrm{T}} = [\,x_r \quad y_r \quad z_r\,]^{\mathrm{T}}$ 为在全局坐标系 $oxyz$ 下刚体 r 的质心位置,$\boldsymbol{\varphi}_r = \varphi_r \mathbf{n}_r$ 为刚体 r 的局部坐标系相对全局坐标系的转动向量,利用缩放技术将转角限制在 $[\,-\pi \quad \pi\,]$ 以内避免奇异性,对应的旋转矩阵 $\mathbf{A}$ 可表示为

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\varphi}_r) = \mathbf{I} + \frac{\sin\varphi_r}{\varphi_r}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_r + \frac{1-\cos\varphi_r}{\varphi_r^2}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_r\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_r \tag{2}$$

这里 $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}$ 是转动向量 $\boldsymbol{\varphi}$ 的偏斜矩阵,具体形式为

$$\tilde{\boldsymbol{\varphi}} = \begin{bmatrix} 0 & -\varphi_3 & \varphi_2 \\ \varphi_3 & 0 & -\varphi_1 \\ -\varphi_2 & \varphi_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

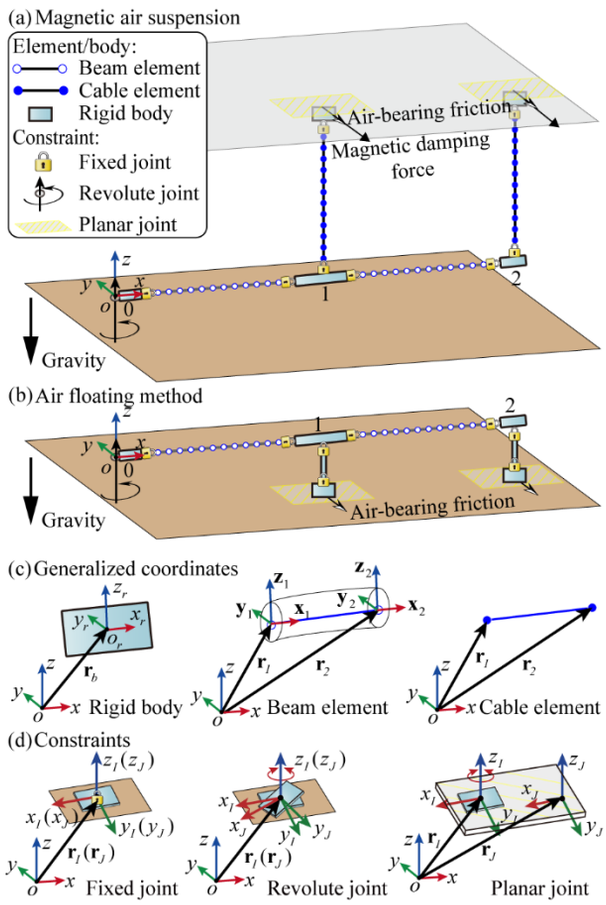

图 3　系统多体动力学模型

Fig.3　Multi body dynamic model of system

刚体 r 在全局坐标系下的速度为 $\dot{\mathbf{r}}_r$,局部角速度向量为 $\bar{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{H}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\varphi}}$,其中 $\mathbf{H}$ 是传递矩阵

$$\mathbf{H}(\boldsymbol{\varphi}) = \mathbf{I} + \frac{1-\cos\varphi}{\varphi^2}\tilde{\boldsymbol{\varphi}} + \frac{\varphi - \sin\varphi}{\varphi^3}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}\tilde{\boldsymbol{\varphi}} \tag{4}$$

则刚体的动能可表示为

$$T_r = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}_r^{\mathrm{T}}\mathbf{M}_r\dot{\mathbf{q}}_r \tag{5}$$

其中质量矩阵 $\mathbf{M}_r$ 为

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} m_r\mathbf{I}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}\mathbf{J}_r\mathbf{H}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中,m_r 为刚体质量,$\mathbf{J}_r$ 为刚体在局部坐标系下的惯性矩阵.具体建模方法见参考文献[19].

2.2　柔性体

如图 3c 所示,基于转动向量的两节点 Timoshenko 梁的广义坐标为

$$\mathbf{q}_f = \left[\mathbf{r}_1^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{\varphi}_1^{\mathrm{T}} \quad \mathbf{r}_2^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{\varphi}_2^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

其中,转动向量 $\boldsymbol{\varphi}_k^{\mathrm{T}}$ 用于参数化截面姿态 $[\,\mathbf{x}_k \quad \mathbf{y}_k \quad \mathbf{z}_k\,]$. 单元内任意一点 p 的位置 $\mathbf{r}$ 和转动向量 $\boldsymbol{\varphi}$ 可由 Lagrange 插值得到

$$\begin{aligned}\mathbf{r} &= N_1(\xi)\mathbf{r}_1 + N_2(\xi)\mathbf{r}_2 = \mathbf{N}_r\mathbf{q}_f \\ \boldsymbol{\varphi} &= N_1(\xi)\boldsymbol{\varphi}_1 + N_2(\xi)\boldsymbol{\varphi}_2 = \mathbf{N}_\varphi\mathbf{q}_f\end{aligned} \tag{8}$$

其中，

$$N_1(\zeta) = 1-\xi, N_2(\xi) = \xi,\ \xi = \frac{s}{l} \in [0 \quad 1] \tag{9}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{N}_r &= [N_1\mathbf{I}_{3\times3} \quad \mathbf{0}_{3\times3} \quad N_2\mathbf{I}_{3\times3} \quad \mathbf{0}_{3\times3}] \\ \mathbf{N}_\varphi &= [\mathbf{0}_{3\times3} \quad N_1\mathbf{I}_{3\times3} \quad \mathbf{0}_{3\times3} \quad N_2\mathbf{I}_{3\times3}]\end{aligned} \tag{10}$$

为形函数，l为单元长度.对式(8)求导，可得梁单元的动能为

$$T_f = \frac{1}{2}\rho l\int_0^1 [A(\dot{\mathbf{r}}\cdot\dot{\mathbf{r}}) + \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{\mathrm{T}}\mathbf{H}^{\mathrm{T}}\mathbf{J}\mathbf{H}\dot{\boldsymbol{\varphi}}]\,\mathrm{d}\xi \tag{11}$$

其中ρ，A和$\mathbf{J}$分别为梁单元的密度、截面面积和截面惯性矩阵，矩阵$\mathbf{H}$的形式与式(4)相同.梁单元的应变向量$\boldsymbol{\gamma}$和曲率向量$\boldsymbol{\kappa}$分别为

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}',\ \ \boldsymbol{\kappa} = \mathbf{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}' \tag{12}$$

其中，上标一撇表示对弧长的求导，矩阵$\mathbf{A}$的形式与式(2)相同.则Timoshenko梁的弹性势能为

$$\mathrm{U} = \frac{1}{2}\int_0^l [\boldsymbol{\gamma}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_N^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\kappa}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_M^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\kappa}]\,\mathrm{d}s \tag{13}$$

其中，$\mathbf{C}_N$和$\mathbf{C}_M$为线弹性本构关系.索单元的建模方法与梁单元类似，只需将梁单元的动能、弹性力和阻尼力消除转动项即可.具体建模见文献[20].

2.3 约束

如图3d所示，系统包含固定约束、平面约束和转动约束，分别建立这三类约束的约束方程为

$$\mathbf{r}_I - \mathbf{r}_J = 0,\ \mathbf{x}_I^{\mathrm{T}}\mathbf{z}_J = 0,\ \mathbf{y}_I^{\mathrm{T}}\mathbf{z}_J = 0,\ \mathbf{x}_I^{\mathrm{T}}\mathbf{y}_J = 0 \tag{14}$$

$$z_I - z_J = 0,\ \mathbf{x}_I^{\mathrm{T}}\mathbf{z}_J = 0,\ \mathbf{y}_I^{\mathrm{T}}\mathbf{z}_J = 0 \tag{15}$$

$$\mathbf{r}_I - \mathbf{r}_J = 0,\ \mathbf{x}_I^{\mathrm{T}}\mathbf{z}_J = 0,\ \mathbf{y}_I^{\mathrm{T}}\mathbf{z}_J = 0 \tag{16}$$

其中，$\mathbf{r}_k = [x_k \quad y_k \quad z_k]^{\mathrm{T}}$和$[\mathbf{x}_k \quad \mathbf{y}_k \quad \mathbf{z}_k]^{\mathrm{T}}$分别为$k(k = I, J)$在刚体约束对应位置或梁/索节点的位置向量和旋转矩阵$\mathbf{A}$分量.索节点与刚体的固定约束只有位置约束.另外，在臂杆的一端施加转动角速度约束

$$\omega_z = \pi/10\ \mathrm{rad/s} \tag{17}$$

其中，ω_z为刚体0的角速度的分量.

2.4 磁气阻尼力

磁悬浮气足内部对称分布四个圆柱形永磁铁，由周恩权[21]和谢晓[22]等针对圆柱形永磁铁磁场建模和实验可得，磁铁在运动过程中将受到与运动速度方向相反的磁阻尼力f_{mag}的作用，其大小与运动速度相关

$$f_{mag} = kv \tag{18}$$

其中，k可由实验测得，本文中的k为0.18 kg/s.除了磁阻尼外，磁悬浮气足在运动过程中还受到气浮阻尼f_{air}的作用，其方向与气足运动方向相反，大小同样由实验测得

$$f_{air} = 0.28\ \mathrm{N} \tag{19}$$

2.5 系统控制方程

利用第一类拉格朗日方程，将系统中的刚体、柔性体整合，可建立描述多体系统的微分代数方程Differential-Algebraic Equations，DAEs)[23]：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{\partial T}{\partial\dot{\mathbf{q}}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial\mathbf{q}} + \dfrac{\partial U}{\partial\mathbf{q}} + \left(\dfrac{\partial\boldsymbol{\Phi}}{\partial\mathbf{q}}\right)\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q} \\ \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}},t) = 0\end{cases} \tag{20}$$

其中，T和U为系统的总动能和总势能，$\mathbf{q}$为系统广义坐标向量，$\mathbf{Q}$为系统的广义外力向量，$\boldsymbol{\Phi}$为系统约束方程，$\boldsymbol{\lambda}$为拉格朗日乘子向量.完成系统动力学方程建模后，采用向后差分方法高效求解[24].

3 系统的动力学特性

为了验证磁气悬吊微重力模拟装置对臂杆的动力学特性的影响，利用上一节的建模方法分别对臂杆-气浮微重力模拟系统(如图3b所示)和零重力臂杆系统建立多体动力学模型，其中气浮法中两个气足和气足支撑杆的总质量均为0.422 kg，采用刚体建模，与臂杆刚性段(1，2)的连接采用固定约束建模.在相同的求解框架下，分别对臂杆-磁气悬吊微重力模拟系统、臂杆-气浮微重力模拟系统和零重力臂杆的多体动力学模型进行仿真计算.

臂杆在电机驱动下在平面oxy内转动，对比臂杆刚性段1，2的水平方向位移如图4所示，磁气悬吊微重力模拟法下的位移与零重力几乎吻合，而气浮法出现2倍转动周期的较大振动，且末端位置2处振动更明显.将图4中的位移减去臂杆的刚性运动得到臂杆的柔性振动，如图5所示.磁气悬吊法和零重力下臂杆柔性振动较小，而气浮法柔性振动较大，且出现2倍转动周期的较大振动.

对臂杆柔性振动结果进行FFT变换法得到臂杆频谱图如图6所示，磁气悬吊法和零重力法的臂杆柔性振动频率约为2 Hz，而气浮法下臂杆振动频率约为1 Hz，这是因为气浮法的气足与臂杆采用刚性连接，增加了臂杆的附加惯量，臂杆振动频率变小.因此，相对于气浮法，磁气悬吊装置和臂杆的耦合特性较弱.臂杆的一阶弯曲固有频率和振动频率如表2所列.图7为微重力模拟装置对臂杆的水平

作用力,同样可得到上述结论.

图 8 为对臂杆 1 和 2 位置处竖直方向位移和竖直方向作用力.磁气悬吊法由于绳索柔性的影响,臂杆的竖直方向位移和竖直卸载力在额定值附近存在微小波动,影响卸载能力,但是本方案可拓展到三维空间微重力模拟运动.

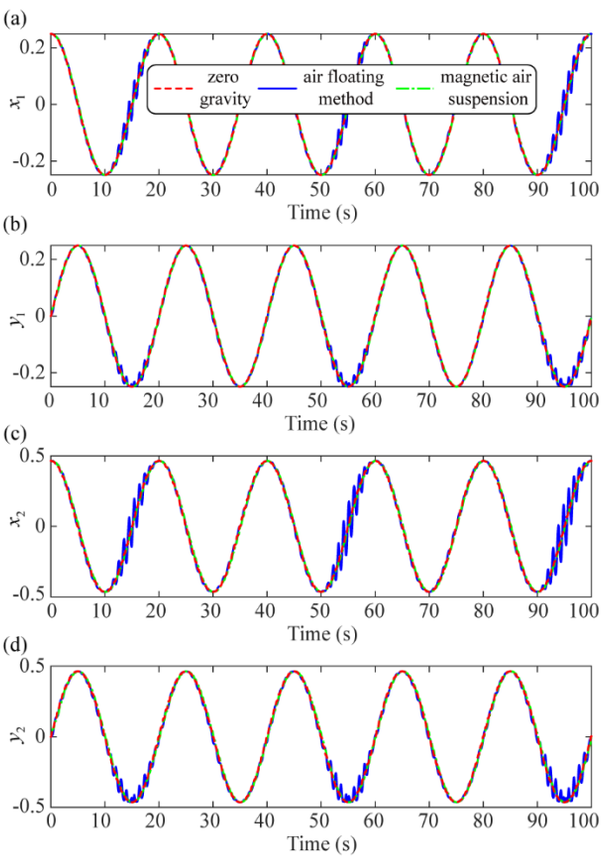

图 4　连接段 1 和 2 的平面内位移

Fig.4　The in-plane displacements of connecting segments 1 and 2

4　结论

针对现有的微重力模拟装置和机械臂的耦合动力学特性明显,提出一种新型的磁气悬吊微重力模拟装置.本文围绕微重力模拟装置对臂杆动力学特性影响展开研究,针对臂杆–磁气悬吊微重力模拟系统、臂杆–气浮微重力模拟系统和零重力臂杆系统动力学建模,微重力模拟装置对臂杆动力学特性的影响进行深入研究.结果表明,相对于气浮微重力模拟装置,磁气悬吊微重力模拟装置对臂杆的动力学特性影响较小,这对实现机械臂在空间运动的操作平稳性和定位精度都有重要意义.本装置还可通过加滑轮的方式实现机械臂在三维空间的微重力模拟.

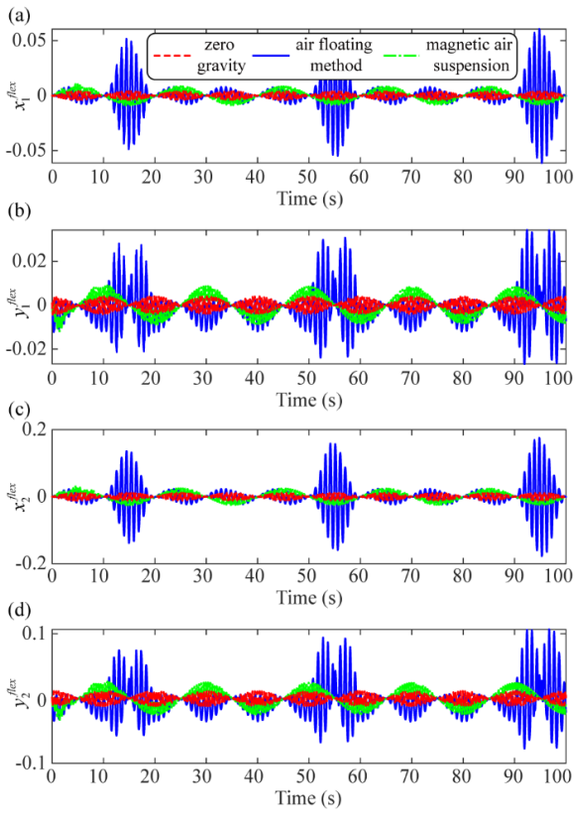

图 5　连接段 1 和 2 的平面内柔性变形

Fig.5　The in-plane flexible deformations of connecting segments 1 and 2

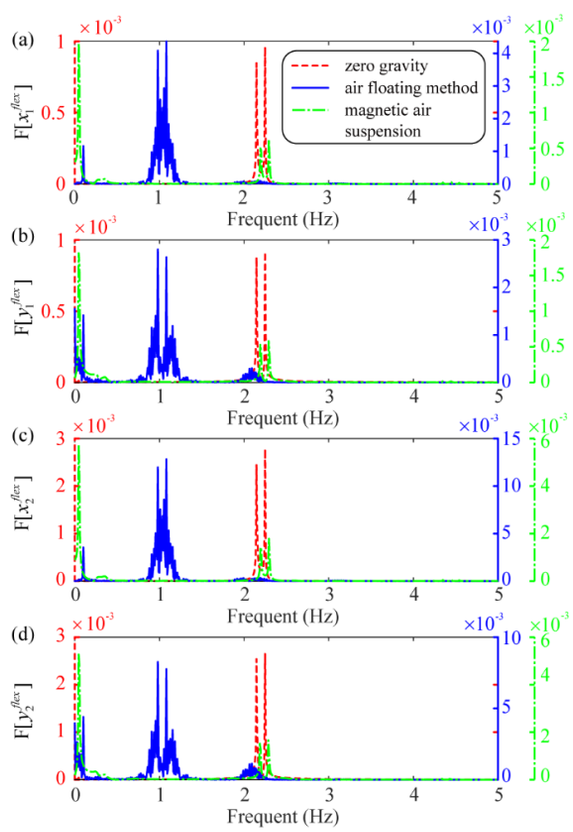

图 6　连接段 1 和 2 的平面内柔性变形的频谱

Fig.6　The FFT spectrum of the in-plane flexible deformations of connecting segments 1 and 2

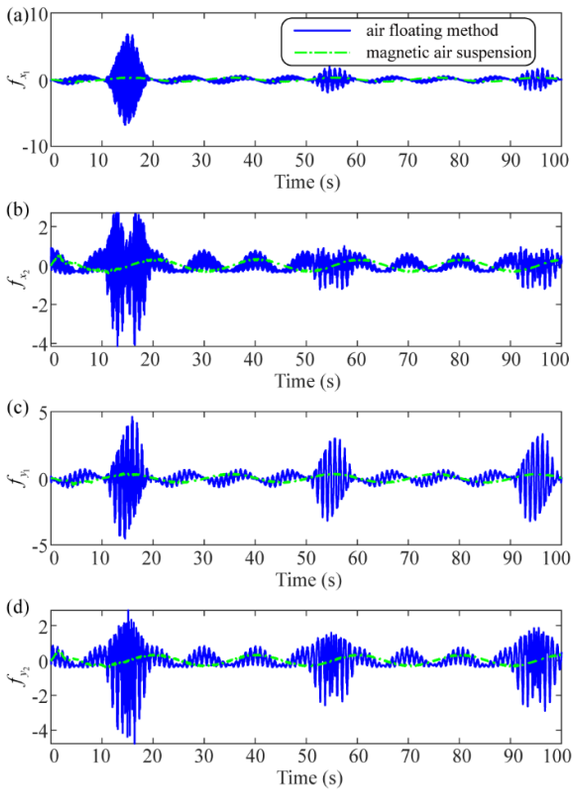

图7 微重力模拟装置对机械臂的水平力

Fig.7 Horizontal force on connecting segments by microgravity simulator

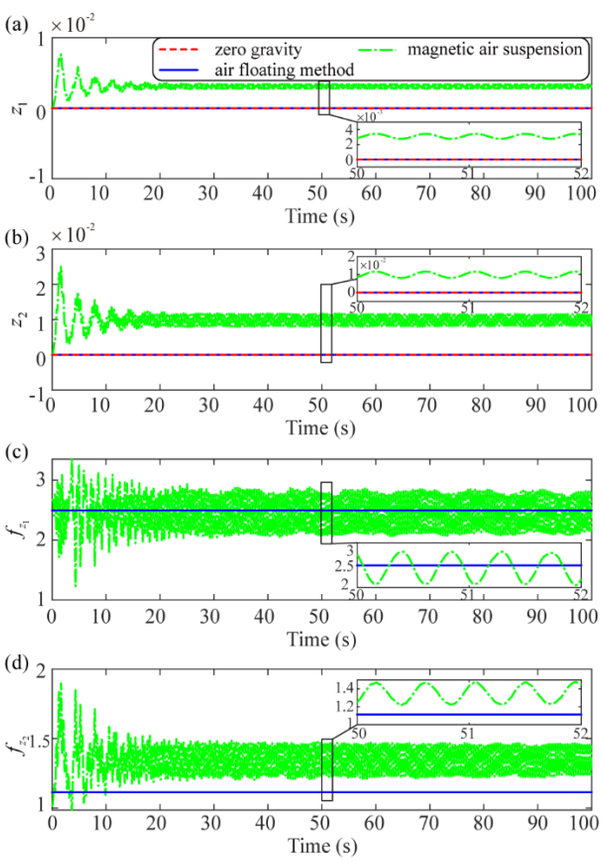

图8 连接段的竖直方向位移和受力

Fig.8 Vertical displacement and force of connecting segments

表2 臂杆一阶柔性振动频率

Table 2 Main parameters of system modeling

Scenario	Theoretical (Hz)	FFT(Hz)
Zero gravity	2.20	2.1~2.3
Air floating method	0.98	0.9~1.1
Magnetic air suspension	1.83	2.15~2.25

参 考 文 献

1 刘宏,蒋再男,刘业超.空间机械臂技术发展综述.载人航天, 2015,21(5):435~443(Liu H,Jiang Z N,Liu Y C. Review of space manipulator technology. *Manned Spaceflight*,2015,21(5): 435~443(in Chinese))

2 于登云,孙京,马兴瑞.空间机械臂技术及发展建议.航天器工程, 2007, 16(4):1~8(Yu D Y,Sun J,Ma X R. Suggestion on development of Chinese space manipulator technology. *Spacecraft Engineering*, 2007, 16 (4): 1~8 (in Chinese))

3 徐文福,杜晓东,王成疆,等.空间机械臂系统总体技术指标确定方法.中国空间科学技术,2013,(1):53~60(Xu W F,Du X D,Wang C J,et al. Determination method of overall technology index for space manipulator. *Chinese Space Science and Technology*, 2013,(1):53~60(in Chinese))

4 杨敏,刘克平.柔性机械臂动力学建模与控制方法研究进展.长春工业大学学报(自然科学版).2011,32(1):7~13(Yang M,Liu K P. The research advances in modeling and control method for flexible manipulator. *Journal of Changchun University of Technology* (*Natural Science Edition*).2011,32 (1):7~13 (in Chinese))

5 徐拴锋,杨保华,张笃周,等.面向非合作目标抓捕的机械臂轨迹规划方法.中国空间科学技术,2014,34(4):8~15(Xu S F, Yang B H, Zhang D Z, et al. Trajectory planning algorithm for manipulators capturing non-cooperative objects. *Chinese Space Science and Technology*, 2014,34(4):8~15(in Chinese))

6 徐兴念,文浩,韦正涛.基于超二次曲线障碍描述的航天器交会对接地面实验研究.动力学与控制学报, 2020,18(2):42~49(Xu X N, Wen H,Wei Z H. Ground-based experiment on spacecraft rendezvous and docking using superquadric curve for obstacle representation. *Journal of Dynamics and Control*, 2020, 18 (2): 42~49 (in Chinese))

7 Angel F,Ma O,Khanh P,et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. *Progress in Aerospace Sciences*,2014,68:1~26

8 Tomasz R,Karol S,Jakub O,et al. Application of a planar air-bearing microgravity simulator for demonstration of op-

erations required for an orbital capture with a manipulator. *Acta Astronautica*, 2019, 155: 211~229

9 徐文福,梁斌,李成,等.空间机器人微重力模拟实验系统研究综述.机器人,2009,31(1):88~96(Xu W F, Liang B, Li C, et al. A review on simulated micro-gravity experiment systems of space robot. *Robot*, 2009, 31(1): 88~96(in Chinese))

10 史士财,吴剑威,崔平远,等.空间机械臂全局反作用优化及其地面试验研究.机器人,2009,31(3):242~247,253(Shi S C, Wu J W, Cui P Y, et al. Global reaction optimization of space manipulator and its ground test. *Robot*, 2009, 31(3): 242~247, 253(in Chinese))

11 Fujii H A, Uchiyama K. Ground-based simulation of space manipulators using test bed with suspension system. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1996, 19(5): 985~991

12 Sunil K A, Abbas F. Gravity-balancing of spatial robotic manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 2004, 39: 1331~1344

13 Carignan C R, Akin D L. The reaction stabilization of on-orbit robots. *IEEE Control Systems Magazine*, 2000: 19~23

14 Wen T, Ming Z F, Zhu Z X, et al. Modeling and controller design of a novel large-gap magnetic suspension and balance system for 3D non-contact manipulation. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, 56(2): 275~291

15 Rybus T, SewerynKarol. Planar air-bearing microgravity simulators: Review of applications, existing solutions and design parameters. *Acta Astronautica*, 2016, 120: 239~259

16 韩艳铧.面向人工重力技术的绳系自旋航天器动力学建模与分析.动力学与控制学报,2019:17(3):213~223(Han Y H. Study on modeling and analysis of a tethered spinning artificial gravity spacecraft. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(3): 213~223(in Chinese))

17 郭益深,陈力.漂浮基柔性空间机械臂姿态与关节协调运动的Terminal滑模控制.动力学与控制学报,2009,7(2):158~163(Guo Y S, Chen L. Terminal sliding mode control of coordinated motion of free-floating flexible space manipulator. *Journal of Dynamics and Control*, 2009, 7(2): 158~163(in Chinese))

18 田强,刘铖,李培,等.多柔体系统动力学研究进展与挑战.动力学与控制学报, 2017, 15(5):385~405(Tian Q, Liu C, Li P, et al. Advances and challenges in dynamics of flexible multibody systems. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(5): 385~405(in Chinese))

19 Zhang H, Guo J Q, Liu J P. An efficient multibody dynamic model of arresting cable systems based on ALE formulation. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 151: 103892

20 Liu J P, Cheng Z B, Ren G X. An arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation of a geometrically exact Timoshenko beam running through a tube. *Acta Mechanica*, 2018, 229: 3161~3188

21 周恩权,郑仲桥,张燕红,等.圆柱形永磁体磁场建模及仿真研究.河南科技, 2017, 623(11):139~143(Zhou E Q, Zheng Z Q, Zhang Y H, et al. Modeling and simulation for cylinder permanent magnetic field. *Henan Science and technology*, 2017, 623(11): 139~143(in Chinese))

22 谢晓,王祝盈,顾萍萍,等.气垫导轨上的磁阻尼效应实验.物理实验, 2005, 25(11):45~47(Xie X, Wang Z Y, Gu P P, et al. Magnetic damping effect on an air tracker. *Physics Experimentation*, 2005, 25(11): 45~47(in Chinese))

23 Hairer E, Wanner G. Solving ordinary differential equations II: stiff and differential-algebraic problems. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996

24 Hairer E, Nrsett S P, Wanner G. Solving ordinary differential equations I: nonstiff problems. Springer, Berlin, Heidelberg, 1993

A DYNAMIC STUDY OF MAGNETIC AIR SUSPENSION MICROGRAVITY SIMULATION SYSTEM *

Zhou Mei Zhang Huan Song Xiaodong†

(*School of Aerospace Engineering*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract Ground microgravity simulation test plays an increasingly important role in guiding on-orbit service of the manipulator. However, the coupling dynamic characteristics of the manipulator and the microgravity simulator are acquired by the ground test. The existing microgravity simulation device, especially the air floatation method, has relatively high additional inertia, which leads to inaccuracy of the ground test results. In this paper, a novel magnetic air suspension microgravity simulation device is proposed. It consists of a magnetic steel plate, magnetic suspension air bearings, and slings. The magnetic suspension air bearings are suspended on the steel plate and dragged by the flexible slings to passively follow of the manipulator, thus reducing influences of the microgravity simulation device on the manipulator. Then, the multi-body dynamic models, corresponding to the system of a manipulator and magnetic air suspension microgravity devices, the system of a manipulator and air floating microgravity devices, and the system of the manipulator under zero gravity, are established and simulated to analyze the planar motion of the manipulator. Results confirm that the coupling dynamic influences of the magnetic air suspension microgravity device on the manipulator are greatly reduced compared to the air floating method. Furthermore, it is of great significance to improve motion smoothness and end positioning accuracy of the space manipulator using the proposed microgravity simulation experiments.

Key words magnetic air suspension, microgravity simulation, rigid flexible coupling, multi-body dynamics

Received 28 October 2020, revised 15 December 2020.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11872108)

† Corresponding author E-mail: xd_song@bit.edu.cn