

空间在轨服务物理仿真系统有效性研究

郑永洁¹, 张笃周^{1,2}, 谌 颖^{1,2}

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190; 2. 空间智能控制技术重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 研究典型在轨服务机器人气浮式物理仿真系统的有效性。针对在轨逼近和操作(抓取、移动和释放)这两种关键工作模式,从动力学原理和干扰下响应的一致性两个方面,系统分析了仿真数据的有效性。基于对误差模型的分析,研究仿真系统中干扰因素对仿真数据有效性的影响,给出物理仿真系统的可应用条件。将该结果应用到具体物理仿真系统中,可以对物理仿真试验起指导作用。

关键词: 物理仿真; 在轨逼近; 在轨操作; 有效性

中图分类号: V416.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2014)04-0432-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.04.009

Research on Effectiveness of Physical Simulation System for On-Orbit Service

ZHENG Yong-jie¹, ZHANG Du-zhou^{1,2}, CHEN Ying^{1,2}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;

2. Science and Technology on Space Intelligent Control Laboratory, Beijing 100190, China)

Abstract: On the basis of operating modes of space relative proximity and manipulation (capture, remove and release), the effectiveness of typical physical simulation system from both basic dynamics equation and response consistency of the two similar systems in the presence of various disturbances is analyzed in the paper, also effects of the disturbance on simulation data effectiveness is studied based on analysis of the error model, and then applicable qualification of the simulation system is summarized. Analysis results provides a reference ideal and approach for effectiveness of similar simulation systems.

Key words: Physical simulation; On-orbit proximity; On-orbit operation; Effectiveness

0 引 言

空间在轨服务,即对空间飞行器实施在轨装配、修理、维护和空间营救等操作,已成为空间技术的研究热点。空间在轨服务的关键技术主要有对合作和非合作目标的交会对接技术以及对目标的抓取和连接技术^[1]。发展空间在轨服务技术的同时,相应的地面仿真系统亦在同步发展^[2]。

仿真数据的有效性已经成为仿真技术的一个关键问题^[3-4]。针对空间在轨服务操作,最为成熟的仿真系统是气浮式物理仿真系统。但对该系统

仿真数据的有效性,现有工程实现中,只是尽量降低干扰^[5],对干扰的作用未曾做过系统的评估。

本文针对常见物理仿真系统中在轨逼近和抓取两个典型工作模式下仿真系统的有效性,进行了分析研究,总结出了物理仿真系统的可应用条件,以及影响物理仿真系统有效性的关键因素。为此类物理仿真试验的开展,提供参考。

1 物理仿真系统方案

常见的在轨服务空间机器人物理仿真系统如图1所示。模拟星底部采用平面静压气浮轴承支撑,

可以在大平台上作平面位置和转动运动,将气浮平面作为模拟轨道面,即可以模拟轨道面上航天器的共面逼近运动^[6]。在机器人星手臂的关节处也用气足支撑,便可以模拟轨道面上对目标器的在轨操作过程。在模拟星 A 上装备实际空间机器人拥有的姿轨控和机械臂控制系统。模拟星 B 上装备姿轨控系统。

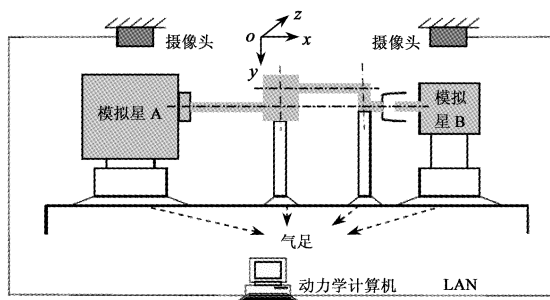


图1 空间机器人气浮实验系统

Fig.1 Air-bearing simulation system for space robot

模拟机器人通过测量部件获得实时相对位姿信息,计算制导律和位置控制律,通过发动机喷气作用,完成对目标器的逼近和相对位置保持。机械臂控制计算机根据关节角测量数据给出关节控制力矩,完成对目标器的抓取和移动操作。

2 逼近过程有效性分析

2.1 航天器系统和地面系统相对运动方程

首先建立两个系统的 Hill 坐标系:原点 o 位于目标航天器质心, z 轴指向引力体中心, x 轴在轨道平面内垂直于 z 轴并指向目标航天器运动方向, y 轴与 x 、 z 轴构成右手系。可得到圆轨道上空间机器人在 Hill 系中的引力线性化相对运动方程^[7]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = 2\omega_o \dot{z} + a_x \\ \ddot{y} = -\omega_o^2 y + a_y \\ \ddot{z} = 3\omega_o^2 z - 2\omega_o \dot{x} + a_z \end{cases} \quad (1)$$

式中:取库伦摩擦 $f_c = 5 \times 10^{-3}$ N,黏性摩擦系数 $f_v = 3 \times 10^{-3}$ N·s·m⁻¹,stribeck 速度 $v_s = 0.005$ m/s,

ω_o 为目标星的轨道角速度。引力项线性化后的相对运动方程,与未简化的方程相比,两者对近距离交会的描述差别很小^[8]。

在仿真系统中,以地面坐标系为惯性坐标系,目标器不受推力作用,Hill 坐标系中相对运动方程为:

$$\begin{cases} \ddot{x} = a_x \\ \ddot{z} = a_z \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_x 、 a_z 为作用在追踪航天器上并投影于 Hill 坐标系的制导加速度。

对比实际系统和仿真系统的相对运动方程,仿真系统只反映了 oxz 平面上的相对运动,且两方程也有差别,该差别来源于,在仿真系统中,模拟轨道面的气浮平面内,没有地球引力的作用。如果在仿真系统中引入由实际系统的中心引力和轨道角速度造成的项,即令地面系统制导律为:

$$\begin{cases} a_x = 2\omega_o \dot{z} + a_{rx} \\ a_z = 3\omega_o^2 z - 2\omega_o \dot{x} + a_{rz} \end{cases} \quad (3)$$

式中: a_{rx} 、 a_{rz} 是与实际系统相同的制导律。此时,仿真系统运动方程和实际系统的线性化运动方程完全一致,因此将制导律进行适当修改,可以进行在轨逼近运动的模拟。

2.2 受扰状态下的相对运动分析

物理试验系统存在干扰作用,主要表现为气足底部的摩擦作用^[9],将影响地面模拟航天器的相对运动结果。将两系统的平面运动方程相减,得到状态偏差的运动方程:

$$\begin{cases} \ddot{\delta}_x = 2\omega_o \dot{\delta}_z + \delta_{ax} \\ \ddot{\delta}_z = 3\omega_o^2 \delta_z - 2\omega_o \dot{\delta}_x + \delta_{az} \end{cases} \quad (4)$$

由于制导律是提前设计的,只随时间变化,因此偏差轨控加速度 δ_{ax} 、 δ_{az} 就是地面仿真系统中摩擦阻力加速度。摩擦作用 $f(v)$ 采用典型的静摩擦 + Coulomb + 黏性 + Stribeck 摩擦模型^[10]来表示,即:

$$f = \begin{cases} f_c + f_v v + (f_s - f_c) \exp(-(v/v_s)^\delta), & v \neq 0 \\ f_e, & v = 0 \text{ 且 } |f_e| < f_s \\ f_s \text{sgn}(f_e), & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

δ 取 2,表示高斯指数模型,最大静摩擦 $f_s = 8 \times 10^{-3}$ N。

由于摩擦模型的非线性,无法得到状态偏差运动的解析解,但可以通过假定某一最大摩擦常量的方法,解出逼近偏差的最大值,另一方面,可以通过数值模拟,得出摩擦作用下的响应差别。假设目标星位于高度 275 km 的近地圆轨道上,以直线制导为例^[11]。假设追踪星出发点在 Hill 坐标系中的坐标为 $r_0 = [-20 \ 0 \ 2]^T$ m,机动到停靠点位置 $r_T = [-0.5 \ 0 \ 0]^T$ m,等速逼近的速度为 0.05 m/s,加速段恒定加速度为 0.001 m/s²,则加速时间为 50 s,等速逼近时间为 300 s,速度衰减段 50 s。数学计算结果 x 、 z 轴偏差如图 2 所示。

从仿真结果看出,在摩擦作用下,两系统响应位置偏差接近 0.8 m,显然这样的仿真数据不具备较高可信性,无法反映出所采用制导律的性能。可见在开环制导的情况下,摩擦作用对逼近试验数据可信性的影响很大,在物理仿真试验时必须根据逼近精度要求设法将摩擦减小。

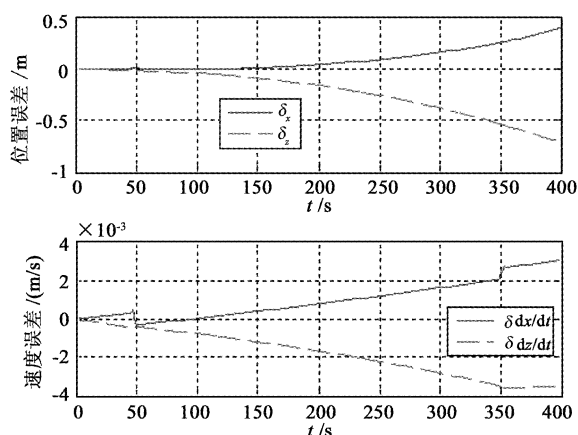


图 2 摩擦作用下的逼近偏差

Fig. 2 Proximity error with friction

对于闭环制导,则情况有所变化。闭环情况下,星载相对位姿测量系统将实时测量两星相对位置,与由制导律所确定的标准接近轨迹比较,获得相对位置差,并进行相应的反馈控制。要使得仿真系统能够与实际系统有尽量相同的输出,即要求仿真系统的状态变化过程始终与实际系统的状态保持一致。将仿真系统比实际系统多出的干扰作用称为剩余干扰力,则剩余干扰力将导致两系统的响应出现偏差,如果这个偏差能够被消除,那么两系统的响应趋于一致。即由剩余干扰产生的状态偏差能够在尽量短的时间内被控制系统消除。这就要求在有状态

偏差的情况下,由系统的反馈控制律计算出来的控制作用在系统的控制裕量范围之内,并且反馈控制律具有相当的快速性,如图 3 所示。满足这个条件的仿真系统,数据可信。因此在闭环控制实验中,可通过剩余干扰与控制裕量之间的关系,以及所采用控制律的快速性来确定数据的可信性。

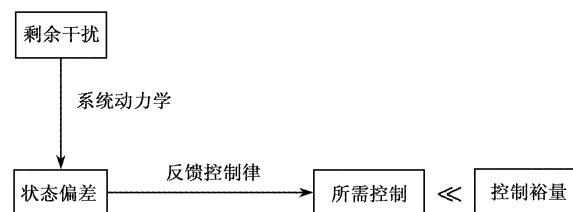


图 3 剩余干扰与控制裕量关系

Fig. 3 Relationship between disturbance and control redundancy

以 x^* 、 z^* 表示标准制导轨迹,则任意时刻,轨迹误差表示为 $\begin{cases} \delta_x = x - x^* \\ \delta_z = z - z^* \end{cases}$,则系统控制方程为^[12]:

$$\begin{cases} \ddot{\delta}_x = 2\omega_o \dot{\delta}_z + a_{ux} \\ \ddot{\delta}_z = 3\omega_o^2 \delta_z - 2\omega_o \dot{\delta}_x + a_{uz} \end{cases} \quad (6)$$

假设采用 PD 控制,令闭环控制律为:

$$\begin{cases} a_{ux} = -2\omega_o \dot{\delta}_z - k_{dx} \dot{\delta}_x - k_{px} \delta_x \\ a_{uz} = 2\omega_o \dot{\delta}_x - 3\omega_o^2 \delta_z - k_{dz} \dot{\delta}_z - k_{pz} \delta_z \end{cases} \quad (7)$$

则受控运动方程变为:

$$\begin{cases} \ddot{\delta}_x + k_{dx} \dot{\delta}_x + k_{px} \delta_x = 0 \\ \ddot{\delta}_z + k_{dz} \dot{\delta}_z + k_{pz} \delta_z = 0 \end{cases} \quad (8)$$

适当选择 k_{dx} 、 k_{px} 、 k_{dz} 、 k_{pz} 以使得两个二阶系统阻尼比 $\xi = 0.707$,自然频率 $\omega_n = \pi/6$ 。假设机器人质量为 $m = 800$ kg,采用两个 1 N 的发动机进行位置控制。显然控制力矩裕量远大于状态偏差决定的所需控制力矩,如图 4 所示,加上 PD 控制律采用标准二阶系统的参数,快速性较好,即只要系统能够提供的控制力大于干扰力,状态偏差将迅速衰减。因此可以预见针对闭环制导的仿真是有效的。仿真数据如图 5 所示,此时两系统 x 、 z 轴状态响应偏差很小。

综上,在轨相对逼近试验中,自由运动受到中心体引力缺失和平面摩擦作用的严重影响,因此对于类似双脉冲等开环的制导接近实验来说,必须进一

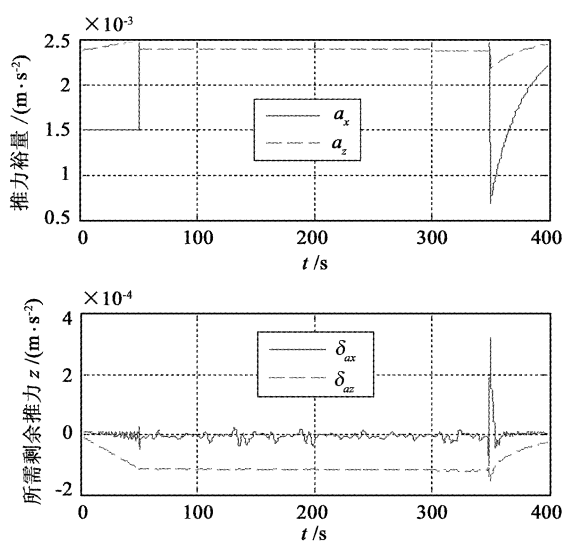


图4 推力裕量与仿真系统所需推力

Fig. 4 Thrust redundancy and simulation system thrust

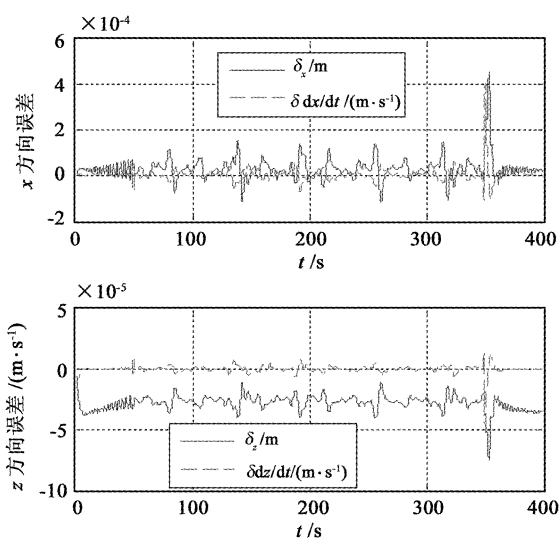


图5 仿真系统与实际系统的运动状态差

Fig. 5 State error of simulation system and real system

步设法补偿气足底部的摩擦作用。而闭环制导接近实验,则可以通过考察干扰力和控制力裕量之间的关系确定仿真的有效性,当满足图3所示关系时,仿真数据有效。

3 在轨操作过程的有效性分析

3.1 在轨操作仿真原理

空间机器人机械臂的运动与载体的运动是耦合的。如果空间机器人在标称位置,只做轨道面内的机械臂伸缩运动,则其运动状态可以由仿真系统中气浮平面上的载体机械臂系统耦合运动来模拟。此

时地面仿真系统模拟机器人的动力学方程与简化的实际空间机器人动力学方程完全一致。由Lagrange方法可以得到系统动力学方程^[13]:

$$H(Z) \ddot{Z} + C(Z, \dot{Z}) = F \quad (9)$$

式中: F 为广义力向量, $H(Z)$ 为广义惯量, Z 为广义坐标向量, $C(Z, \dot{Z})$ 为离心力和哥氏力项。

地面系统中,由于气足的引入,改变了系统的质量特性,并且引入了气足底部与大平台的阻力干扰。关于系统质量特性的变化,可以通过配重的方法进行补偿。但气足阻力的引入,使得广义力发生了变化。实际系统广义力为:

$$F = [\sum f_b - \sum r_d^x f_b + g_b \quad \tau + \tau_d]^T \quad (10)$$

仿真系统中,广义力为:

$$F' = F + Q \quad (11)$$

式中: Q 是由于气足摩擦等引入的干扰作用带来的广义力。因此,仿真有效性主要受广义力 Q 的影响,而 Q 是由气足阻力映射的。

3.2 干扰下的有效性分析

空间机器人在抓取或释放目标星的瞬间,手抓和抓环间有不规则碰撞出现,持续时间很短,是工程师最关心而又无法解析分析的细节,因而也是试验需要模拟的细节,尤其是释放碰撞,对两星产生分离干扰。因此必须清楚仿真系统轨道面内的运动情况是否可以真实反映实际系统的情况。如图6所示,碰撞干扰作用在手抓和抓环上,然后传递到机器人星和目标星上。对机器人星来说干扰产生的作用于手抓末段的冲量在星本体系下的投影为: $P = [P_x \quad P_y \quad P_z]^T$ 。通过目标器上的敏感器和分离时两星的相对姿态可以获得干扰冲量,进而分别计算出两颗星的姿态、轨道以及机械臂关节运动情况,考察仿真系统数据的有效性。释放过程中,最为关注的是机器人星的各个运动状态,主要包括载体的位置、姿态和机械臂关节角三方面的差别。

首先将碰撞作用这个冲量分解到各个广义坐标下。由冲量——动量方程^[14],可得到冲量在各个广义坐标中的投影。

$$\Delta \dot{Z} = m^{-1} S \quad (12)$$

式中: m 是系统的广义质量矩阵, S 是系统的广义冲量。

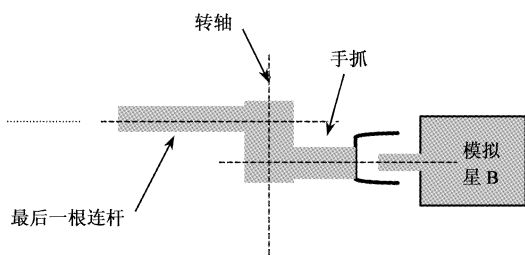


图6 手抓与抓环结构

Fig. 6 Structure of pincers and handle

借助质点的位置坐标与广义坐标之间的关系,可以获得由第 k 个碰撞点的外力冲量 $\mathbf{P}_k$ 表示的广义冲量矩阵 $\mathbf{S}$,即:

$$S_i = \sum_{k=1}^N \mathbf{P}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \mathbf{Z}_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: N 表示外力作用的个数, n 表示广义坐标个数, $\mathbf{r}_k$ 表示第 k 个碰撞点的位矢。考察如图7所示系统构型。

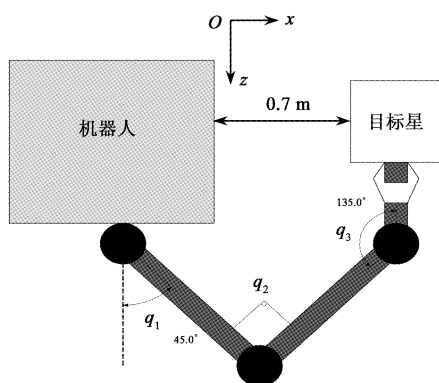


图7 空间机器人释放目标时刻构型

Fig. 7 Configuration of space robot

令广义坐标为:

$$\mathbf{Z} = [X_{cb} \quad Z_{cb} \quad \theta \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T$$

由Lagrange方法可得到6自由度的动力学方程:

$$\mathbf{H} \ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{Z}}, \mathbf{Z}) = \mathbf{F} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{H}$ 是系统的广义动量,是哥氏力和惯性力的组合项。在地面仿真系统中,方程右边的广义力除了对应于6个广义坐标的主动力外,还包括气足底部的摩擦干扰,即:

$$\mathbf{F} = [f_{cbx} \quad f_{cbz} \quad g_b \quad \tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T + \left[\sum_{i=1}^4 \vec{f}_i \cdot \frac{\partial \vec{R}_i}{\partial Z_1} \quad \dots \quad \sum_{i=1}^4 \vec{f}_i \cdot \frac{\partial \vec{R}_i}{\partial Z_6} \right]^T \quad (15)$$

式中: $\vec{R}_i$ 是气足 i 相对于惯性系原点的位置矢量,可由雅克比矩阵得到^[13], $\vec{f}_i$ 是气足 i 处的摩擦力矢量。对于如图7所示的构型,有4个气足干扰源,分别为载体的平动阻力、转动阻力、以及两关节处的平动阻力。每个气足干扰都以摩擦力为主,仍用式(5)所示的典型摩擦模型来表示。

各关节角采用PD控制,分离时将产生动态调节。假设两均质连杆长度均为 $l = 1 \text{ m}$,手抓长度为 $h = 0.3 \text{ m}$,空间机器人载体质量为 $m_b = 700 \text{ kg}$,转动惯量为 $I_b = 660 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,机器人连杆为质量 $m = 40 \text{ kg}$,转动惯量 $I = 3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 的均质杆;关节1距载体质心的距离 0.7 m ;手抓质量为 $m_h = 20 \text{ kg}$,转动惯量为 $I_h = 0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;干扰冲量为:

$$\mathbf{P} = [0.8 \quad 0.2 \quad 0.8]^T \text{ kg} \cdot \text{m/s} \quad (16)$$

冲量干扰作用在机械手爪的末端,该点在惯性系下的坐标为 $\mathbf{r}_T$ 。可求得其相对于各个广义坐标的导数,因此可以得到广义外力冲量。

代入冲量——动量方程,可以求得广义坐标变化率的增量,以此作为系统自由运动的初始条件,便可以计算机器人系统在受扰后的运动情况。此时,如果机械臂系统是处于自由运动状态,则问题转换为一定初始条件下的系统运动。由于气足作用处广义力的引入,以及空间机器人系统的强非线性,两系统产生无法预知的运动偏差。

当机器人系统处于控制状态时,上述参数下,假设机器人系统进行反馈线性化控制^[15],使系统动力学方程简化为:

$$\ddot{\tilde{\mathbf{Z}}} + 2\lambda \dot{\tilde{\mathbf{Z}}} + \lambda^2 \tilde{\mathbf{Z}} = 0 \quad (17)$$

取 $\lambda = 1$,仿真时长为 $t_s = 15 \text{ s}$,仿真结果如图8。

从两系统轨道面内的响应情况可以看出,闭环条件下,各广义坐标差别很小,而自由运动中两系统的广义坐标相差很大,这可以由剩余干扰与控制裕量的关系来解释,在闭环控制下,如图9所示,分离初期,气足摩擦引入的投影到各广义坐标下的干扰力,远远小于分离扰动决定的控制力,由于PD控制律收敛的快速性,干扰对系统运动基本不起作用;随着运动的衰减,干扰造成的状态偏差所决定的控制力几乎为零,远小于控制裕量,因此即使存在气足摩

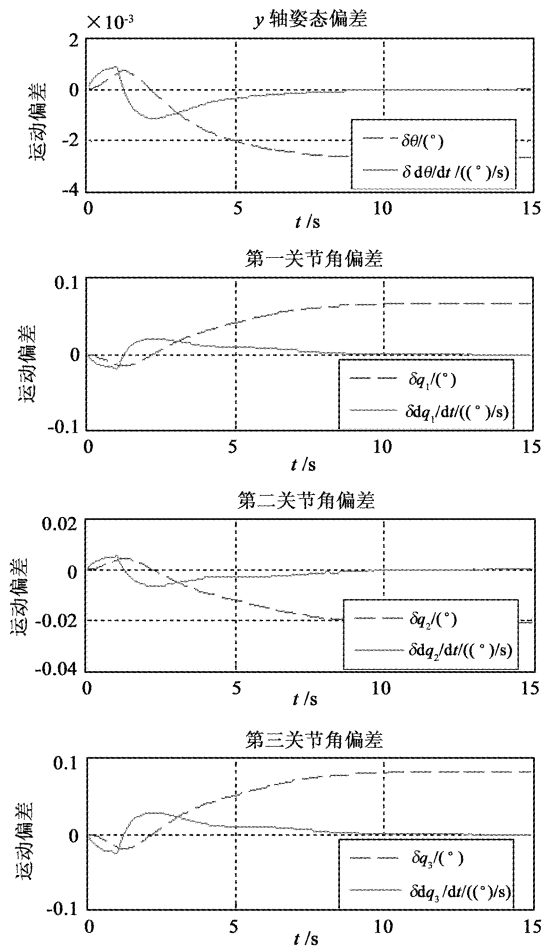


图8 仿真系统与实际系统运动偏差

Fig. 8 State error of simulation system and real system

擦作用时,对受控状态下的在轨操作过程,仿真数据仍具有较强的可信性。

综上,在轨操作目标的过程中,将手抓与抓环的接触看作瞬间碰撞作用,自由状态下,试验数据受平面摩擦影响较大。受控状态,碰撞造成的运动在很短的时间内衰减,仿真系统能够体现出这种短时间的运动。

4 结论

本文研究了常见气浮式在轨服务物理仿真系统的有效性。针对在轨逼近和抓取两个典型工作模式,通过对自由运动和受控状态下的系统运动,及误差方程的分析,总结出了物理仿真系统的可应用条件,以及影响物理仿真数据有效性的关键因素。为此类物理仿真试验的开展,提供思路和参考。

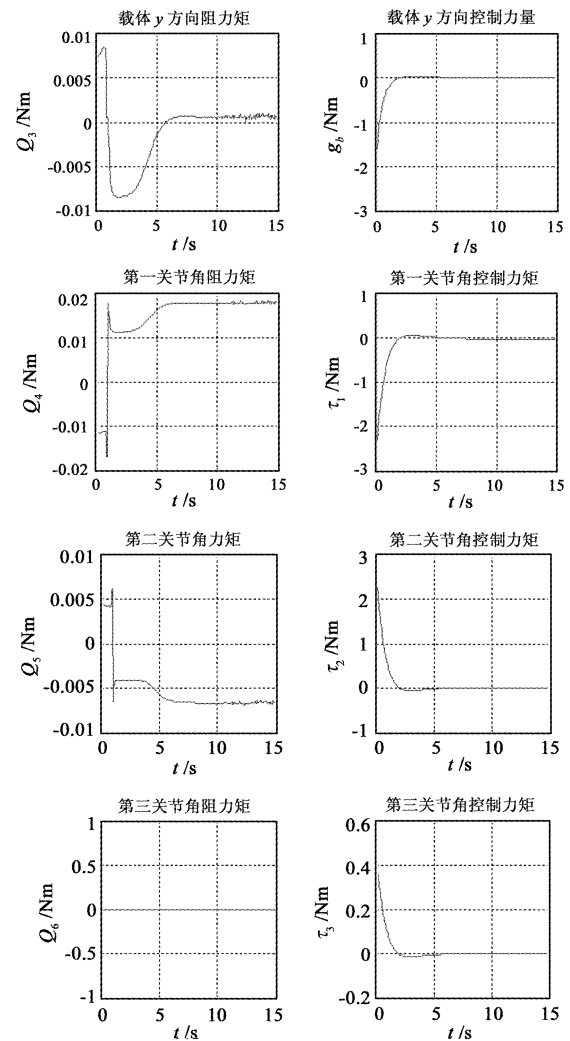


图9 干扰力矩与控制力矩比较

Fig. 9 Comparison of disturbance torque and control torque

参考文献

- [1] 崔乃刚,王平,郭继峰,等. 空间在轨服务技术发展综述[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 805 - 811. [Cui Nai-gang, Wang Ping, Guo Ji-feng, et al. A review of on-orbit servicing[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 805 - 811.]
- [2] Marcello R. An on-the-ground simulator of autonomous docking and spacecraft servicing for research and education [J]. Spacecraft Platforms and Infrastructure, 2004, 5419: 142 - 151.
- [3] 鲁建厦,方荣,兰秀菊. 国内仿真技术的研究热点——系统仿真学报近期论文综述[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1910 - 1913. [Lu Jian-xia, Fang Rong, Lan Xiu-ju. Hot research areas of simulation technique in the country-review of journal of system simulation in recent years [J]. Journal of System

- Simulation, 2004, 16(9):1910-1913.]
- [4] Ma O, Wang J G, Misra S. On the validation of SPDM task verification facility[J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(5): 219-235.
- [5] David A F. Laboratory experimentation of autonomous spacecraft docking using cooperative vision navigation[D]. California: Naval Postgraduate School, December 2005.
- [6] Xu W F, Liang B, Xu Y S. A ground experiment system of free-floating robot for capturing space target[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2007, 48(2): 187-208.
- [7] 林来兴. 空间交会动力学和安全模式[J]. 宇航学报, 1993, 14(1): 1-6. [Lin Lai-xing. Space rendezvous dynamic and safety mode[J]. Journal of Astronautics, 1993 14(1): 1-6.]
- [8] 林来兴, 车汝才. 航天器编队飞行动力学模型和精度分析[J]. 航天器工程, 2008, 17(2): 19-25. [Lin Lai-xing, Che Ru-cai. Spacecraft formation flying dynamic model and precision analysis[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(2): 19-25.]
- [9] 刘良栋. 卫星控制系统仿真技术[M]. 宇航出版社, 2003: 2-16.
- [10] 刘丽兰, 刘宏昭, 吴子英, 等. 机械系统中摩擦模型的研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 201-205. [Liu Li-lan, Liu Hong-zhao, Wu Zi-ying. An overview of friction models in mechanical systems[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 201-205.]
- [11] 张万里, 马广程, 温奇咏, 等. 交会对接最终逼近段制导控制律设计方法研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 860-864. [Zhang Wan-li, Ma Guang-cheng, Wen Qi-yong, et al. Research on the method of a guidance law and control strategy for the final phase of rendezvous and docking[J]. Journal of Astronautics, 2007 28(4): 860-864.]
- [12] 朱仁璋, 邹勇波, 王晓光. 空间交会最终逼近段相对位移估计与控制[J]. 航天器工程, 2008, 17(1): 36-41. [Zhu Ren-zhang, Zou Yong-bo, Wang Xiao-guang. Relative position estimation and control for final approach phase of spacecraft rendezvous[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(1): 36-41.]
- [13] 张翼. 空间机器人系统的运动动力学及其控制[D]. 长沙: 国防科技大学, 2000. [Zhang Yi. The kinematics, dynamics and control of space robot system[D]. Changsha: Defense Science University, 2000.]
- [14] 金栋平, 胡海岩. 碰撞振动与控制[M]. 科学出版社, 2005: 1-60.
- [15] Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li. 应用非线性控制[M]. 程代展, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2006: 266-274.

作者简介:

郑永洁(1985-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事航天器 GNC 系统设计与测试研究工作。

通信地址: 北京 2729 信箱(100190)

电话: (010)68745557

E-mail: zyjl1985@sohu.com

(编辑: 张宇平)