

DOI: 10.7641/CTA.2018.70852

地面和空间机械臂的动力学等效条件与控制相似律

宗立军, 罗建军[†], 王明明, 袁建平

(西北工业大学 航天学院 航天飞行动力学技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对如何在地面机械臂上有效验证空间机械臂控制律的问题, 本文研究空间机械臂和地面机械臂系统间的动力学等效条件和控制相似律. 首先, 基于量纲分析研究地面机械臂和空间机械臂之间的动力学等效条件, 并基于等效条件设计地面机械臂系统. 其次, 基于量纲分析建立空间和地面机械臂系统间的控制相似律, 设计的空间机械臂控制律通过控制相似律将可以转化为地面机械臂相应的控制律. 最后, 考虑地面机械臂基座往往无法和空间机械臂的基座航天器一样进行全6自由度运动, 以及地面机械臂运动时受到重力影响, 使得地面机械臂不再满足动力学等效条件, 基于反馈线性化技术设计一种地面机械臂的动力学误差补偿策略, 使得地面机械臂和空间机械臂具有相似的闭环动力学行为. 这样, 空间机械臂的控制律可以在设计的地面机械臂上进行验证, 仿真中以在地面机械臂上验证空间机械臂的PID控制器为例说明所提方法的有效性.

关键词: 空间机械臂; 地面机械臂; 量纲分析; 动力学等效条件; 控制相似律

引用格式: 宗立军, 罗建军, 王明明, 等. 地面和空间机械臂的动力学等效条件与控制相似律. 控制理论与应用, 2018, 35(10): 1521 – 1529

中图分类号: V448.2 文献标识码: A

Dynamic equivalence conditions and control scaling laws for ground and space manipulators

ZONG Li-jun, LUO Jian-jun[†], WANG Ming-ming, YUAN Jian-ping

(National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: This paper establishes the dynamic equivalence conditions and control scaling laws between ground and space manipulators, thus a ground manipulator can be designed to verify the performance of controllers that developed for space manipulators. First, the dynamic equivalence conditions between the space and ground manipulators are obtained by using the dimensional analysis, based on which, a ground manipulator can be designed for the given space manipulator leading to the dynamic equivalence between the two systems. Then, the control scaling laws between the two systems are formalized, therefore the given controller of the space manipulator can be transformed to that of the ground manipulator and verified on the ground system. Finally, unlike the space manipulator, since the ground manipulator may not have the complete six degrees of freedom for its base and it suffers from the gravity effects, the realistic dynamics of the ground manipulator may deviate from the dynamic equivalence conditions, thus a feedback linearization technique based dynamic error compensation scheme is developed for the ground manipulator to make it have the same joint movements to those of the space manipulator. As a result, controllers of the space manipulator can be verified on the ground manipulator, and it is shown how the performance of a PID controller for the space manipulator is verified using the designed ground manipulator in the simulations.

Key words: space manipulators; ground manipulators; dimensional analysis; dynamic equivalence conditions; control scaling laws

Citation: ZONG Lijun, LUO Jianjun, WANG Mingming, et al. Dynamic equivalence conditions and control scaling laws for ground and space manipulators. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(10): 1521 – 1529

1 引言(Introduction)

自1990s年代中期起, 大量研究及相关文献关注了空间机械臂在在轨服务、航天器燃料加注、移除空间碎片等任务中的广泛应用前景^[1]. 全球各航天机构

对相关研究成果进行了在轨实验以验证新兴的空间机械臂技术, 例如ROTEX^[2], ETS-VII^[3]和OE^[4]等计划. 一些还处于研究阶段的空间机械臂计划包括E. DEORBIT^[5], PHOENIX^[6]和RS GS^[7]等, 与其他空

收稿日期: 2017-11-20; 录用日期: 2018-10-20.

[†]通信作者. E-mail: jlluo@nwpu.edu.cn; Tel.: +86 29-88493350.

本文责任编辑: 裴海龙.

国家自然科学基金项目(61690210, 61690211)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61690210, 61690211).

间系统类似,空间机械臂在发射前必须在地面验证其相关技术,因此各个研究机构开发了大量地面实验平台以促进空间机械臂的研究与发展.空间机械臂地面实验平台按功能性可分为气浮平台^[8]、中性浮力池^[9]、抛物线飞行实验^[10]、自由落塔^[11]以及地面机械臂模拟装置^[12-17]等.本文关注如何在地面机械臂系统上有效验证空间机械臂系统的关键技术.

文献[18]搭建了基于气浮平台的地面机械臂系统来验证空间机械臂的协调控制策略,然而,并没有研究空间机械臂系统和地面实验系统的动力学等效性,协调控制策略在地面实验系统上有效并不能说明其能保证空间机械臂的控制性能.文献[19]研究了6自由度空间机械臂系统轨迹规划方法的地面实验验证,对于地面机械臂受重力影响以及不能像空间机械臂一样自由运动的问题,提出了合理设计和配置气浮系统的重力平衡策略.文献[20]设计了基于气浮台的空间机械臂的全物理仿真实验系统,采用星上部件、控制软件等,对设计的空间机械臂的协调控制方法进行地面实验验证.然而,臂分系统使用了星上产品,卫星本体由气浮装置模拟,必须通过配置使气浮装置和卫星本体具有相同的转动惯量特性,文献[20]并没有研究空间机械臂和地面机械臂实验系统之间的动力学等效条件,一个尺寸更小、动力学参数取值不同但符合动力学等效条件(系统间运动学、动力学参数取值相同仅为其中一种特殊情形)的地面机械臂系统就可以替代空间机械臂系统来验证其控制律.可以看出,尽管已经有一些机构使用地面机械臂验证空间机械臂技术,对于地面机械臂和空间机械臂可能运动自由度数目不同以及空间和地面产生的动力学环境不同的问题,很少有研究关注建立地面机械臂实验系统和空间机械臂系统之间的动力学等效条件,通过满足该条件,设计的地面机械臂实验系统将空间机械臂系统具有相似的动力学行为,从而空间机械臂(尤其是其控制器系统)的性能可以在地面机械臂平台上进行验证.

量纲分析理论建立了两个系统相似需要满足的条件,Buckingham π 理论(简称 π 理论)是一种进行量纲分析的有效工具,它提供了一种系统的方法来能够表征一个系统完整动力学的最小数目的参数,并将这些参数进行无量纲化称之为 π 群.当两个系统动力学参数无量纲化后 π 群一一对应相等时,两个系统被认为是动力学等效的^[21].基于量纲分析理论,文献[22]研究了宏-微双边系统的遥操作,在动力学信息最少被损失的情况下,将一个微型系统放大到方便操作的尺度,从而可以通过控制大尺度的系统对微型系统进行遥操作.在地面实验场地大小、机构速度以及运行时间等都与空间的情形不一致下,文献[23-25]使用

量纲分析理论分别研究了如何使用地面实验系统再现空间合作目标的运动和航天器绕逼近翻滚目标的运动.文献[26]推导了无量纲坐标系统下机械臂的动力学方程,通过从无量纲化的动力学方程中移除数值较小的参数,得到了一种机械臂简化的动力学方程,大大减小了机械臂逆动力学求解的计算量.应用量纲分析理论,文献[27]研究了单连杆柔性机械臂的动力学等效模型,并推导了连续、离散状态下柔性机械臂和其动力学等效模型的控制相似律,从而在动力学等效模型基础上设计的控制器可以直接应用到真实的柔性机械臂系统.文献[28]研究了刚性连杆机械臂系统间的动力学等效条件和控制相似律,例如如何在地面重力环境下构建与月球上工作的两连杆机械臂动力学等效的机械臂原型,以及为地面机械臂原型设计的滑模控制器如何被相似变换后应用到月球上的机械臂.在文献[29]中,文献[27-28]中的工作被拓展应用到一般的刚、柔连杆机械臂中,提出了一种非线性动力学补偿技术处理系统参数不确定问题.为在地面气浮实验平台上再现航天器的相对运动,文献[30]使用 π 理论建立了空间和地面动力学缩放的准则,使得建立的地面实验系统具有与空间系统等效的动力学行为.然而,将量纲分析理论应用于构建地面和空间机械臂之间的动力学等效条件是具有挑战性的,因为地面机械臂工作在重力环境下而空间机械臂受到的重力影响可以被忽略不计,以及地面机械臂的基座往往不能像空间机械臂的基座航天器那样进行6自由度运动,使得地面机械臂和空间机械臂不可能具有完全相同的无量纲动力学参数.本文研究地面机械臂和空间机械臂之间的动力学等效条件和控制相似律,对于一个空间机械臂及其给定的控制律,可以设计与其具有等效的动力学特性的地面机械臂,并将空间机械臂的控制律相似地变换为地面机械臂的控制律,从而空间机械臂的控制律可以在设计的地面机械臂实验系统上进行验证.在实际应用中,当两个系统无法实现完全动力学等效时,本文同时提出一种误差补偿策略,使得空间机械臂和地面机械臂具有相同的闭环动力学行为,保证了空间机械臂的控制律可以在地面机械臂实验系统上进行验证.

本文内容组织如下:第2节建立了空间和地面机械臂的动力学模型,并确定了两个系统各自的动力学参数及其量纲.基于量纲分析理论,第3节给出了空间和地面机械臂间的动力学等效条件以及控制相似律.针对两个系统无量纲动力学参数不一致的问题,第4节研究了一种动力学误差补偿策略,使得地面和空间机械臂具有相似的闭环动力学行为.第5节通过仿真说明了所提方法的有效性.第6节对方法的效果进行了总结.

2 系统模型(System model)

一个基座可以移动的机械臂系统(包括空间机械臂,如图1所示,和地面机械臂)由运动的基座和具有 n_m 个自由度的臂组成. 空间机械臂系统的基座具有6个自由度,然而地面机械臂系统的基座只能在平面移动和绕垂直于平面的轴转动,因此具有3个自由度. 以基座姿态、基座质心的位置以及关节位移为广义坐标,并假设机械臂末端执行器不受外力和外力矩,基座可以运动的机械臂系统的动力学方程可以表示为^[31-32]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_b \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{bb}(\mathbf{x}_b, \boldsymbol{\theta}) & \mathbf{M}_{bm}(\mathbf{x}_b, \boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{M}_{bm}^T(\mathbf{x}_b, \boldsymbol{\theta}) & \mathbf{M}_{mm}(\mathbf{x}_b, \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_b \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}_b(\dot{\mathbf{x}}_b, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \\ \mathbf{c}_m(\dot{\mathbf{x}}_b, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_b \\ \mathbf{g}_m(\boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $\ddot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathbb{R}^{n_m}$ 为关节角加速度, $\ddot{\mathbf{x}}_b \in \mathbb{R}^{n_b}$ 为基座线加速度和角加速度, $\mathbf{M}_{bb} \in \mathbb{R}^{n_b \times n_b}$ 为基座惯量矩阵, $\mathbf{M}_{mm} \in \mathbb{R}^{n_m \times n_m}$ 为臂惯量矩阵, $\mathbf{M}_{bm} \in \mathbb{R}^{n_b \times n_m}$ 为基座-臂耦合惯量矩阵, $\mathbf{c}_b \in \mathbb{R}^{n_b}$ 和 $\mathbf{c}_m \in \mathbb{R}^{n_m}$ 分别是基座和臂与速度相关的非线性项. $\mathbf{g}_b \in \mathbb{R}^3$ 和 $\mathbf{g}_m \in \mathbb{R}^{n_m}$ 分别是地面机械臂系统基座和臂上的重力作用,对于空间机械臂系统重力影响可以被忽略. $\mathbf{F}_b \in \mathbb{R}^{n_b}$ 是施加于基座的外力和外力矩, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{n_m}$ 是施加于臂的关节力矩.

空间和地面机械臂系统的动力学参数如表1所示.

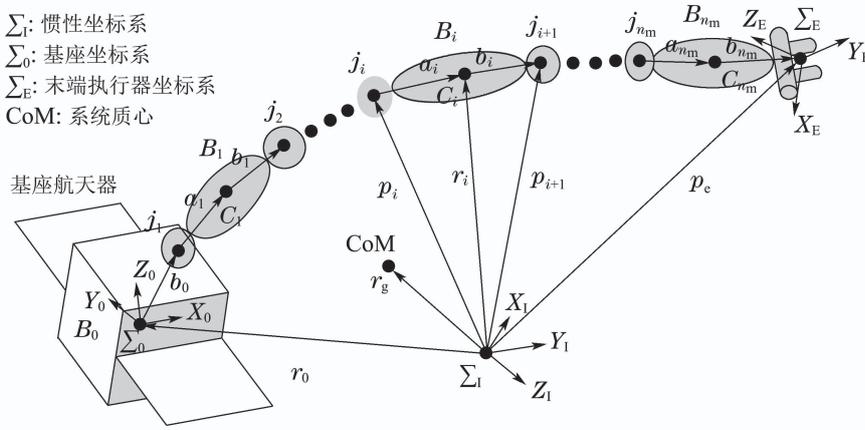


图 1 空间机械臂系统示意图

Fig. 1 A schematic of a space manipulator system

表 1 空间和地面机械臂系统动力学参数

Table 1 Dynamic parameters of the space and ground manipulators

参数	符号	量纲
基座质量	m_0	$[M]$
基座惯量矩阵	\mathbf{J}_0	$[M][L]^2$
基座质心到 j_1 位置向量	\mathbf{b}_0	$[L]$
连杆 i 质量	m_i	$[M]$
连杆 i 惯量矩阵	\mathbf{J}_i	$[M][L]^2$
j_i 到 C_i 位置向量	\mathbf{a}_i	$[L]$
C_i 到 j_{i+1} 位置向量	\mathbf{b}_i	$[L]$
重力加速度(仅对地面机械臂系统)	\mathbf{g}	$[L][T]^{-2}$
时间比例因子	Ω	$[T]^{-1}$

3 地面机械臂设计 (Design of ground manipulator)

3.1 动力学等效条件 (Dynamic equivalence conditions)

本节建立空间和地面机械臂系统动力学参数之间满足的条件,使得设计的地面机械臂系统与给定的空间机械臂系统具有相似的动力学行为. 基于 π 理论,一

个包含 n 个参数 ν_k 的物理系统的模型,可以将参数变换为由初始参数构建的数目更少的 $p = n - q$ 个无量纲参数 $\pi_{\nu_1}, \pi_{\nu_2}, \dots, \pi_{\nu_p}$,其中 q 是系统模型中独立的物理量纲的数目. 无量纲参数 π_{ν_k} ,称之为 π 群,可以由式(2)得到

$$\pi_{\nu_k} = \nu_1^{e_1} \nu_2^{e_2} \dots \nu_n^{e_n}, \quad k = 1, 2, \dots, p, \quad (2)$$

其中 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 是能够使 π 群无量纲的适当的指数.

根据 π 理论,如果两个系统的动力学参数具有相同的 π 群,那么它们的动力学等效. 如表1所示的空间和地面机械臂系统的动力学参数,其量纲均具有以下形式:

$$[\nu_k] = M^{w_k} L^{s_k} T^{t_k}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

其中指数 w_k, s_k, t_k 为无量纲整数.

通过选择包含的量纲完整而独立的动力学参数子集 $\{m_0, (J_0)_{zz}, \Omega\}$ (称之为系统的基变量),空间和地面机械臂系统动力学参数的量纲可以表示为

$$[\nu_k] = [m_0^{N_{k1}} (J_0)_{zz}^{N_{k2}} \Omega^{N_{k3}}], \quad (4)$$

其中 N_{k1}, N_{k2}, N_{k3} 为无量纲整数,其取值在大部分情

形下可以直接看出,也可以通过如下规范的代数方法计算得到.

使得式(3)和式(4)中参数的量纲相同,可以得到如下方程:

$$\begin{cases} N_{k1} + N_{k2} = w_k, \\ 2N_{k2} = s_k, \\ -N_{k3} = t_k. \end{cases} \quad (5)$$

通过式(5)可以解得3个未知的指数 N_{k1}, N_{k2}, N_{k3} .

通过将每个参数 ν_k 除以其量纲相同的 $m_0, (J_0)_{zz}, \Omega$ 的次幂项的乘积,可以得到空间和地面机械

臂系统无量纲的动力学参数:

$$\pi_{\nu_k} = \frac{\nu_k}{m_0^{N_{k1}} (J_0)_{zz}^{N_{k2}} \Omega^{N_{k3}}}, \quad k = 1, 2, \dots, p. \quad (6)$$

空间和地面机械臂系统无量纲的动力学参数如

表2中所示,其中 $l = \sqrt{\frac{(J_0)_{zz}}{m_0}}$ 具有量纲 $[L]$. 通过使空

间和地面机械臂系统的无量纲动力学参数相等,可以让二者具有相似的动力学行为. 对于给定的空间机械臂系统,两个系统无量纲动力学参数相等的条件可以确定地面机械臂系统的动力学参数取值.

表2 空间和地面机械臂系统动力学参数对应的 π 群

Table 2 π groups for the dynamic parameters of space and ground manipulators

	π 群
基座	$\left. \begin{aligned} \pi_{(J_0)_{xx}} &= \frac{(J_0)_{xx}}{(J_0)_{zz}}, \pi_{(J_0)_{yy}} = \frac{(J_0)_{yy}}{(J_0)_{zz}} \\ \pi_{(J_0)_{xy}} &= \frac{(J_0)_{xy}}{(J_0)_{zz}}, \pi_{(J_0)_{yz}} = \frac{(J_0)_{yz}}{(J_0)_{zz}}, \pi_{(J_0)_{xz}} = \frac{(J_0)_{xz}}{(J_0)_{zz}} \end{aligned} \right\} \text{(仅对空间机械臂)}$
	$\pi_{(b_0)_x} = \frac{(b_0)_x}{l}, \pi_{(b_0)_y} = \frac{(b_0)_y}{l}, \pi_{(b_0)_z} = \frac{(b_0)_z}{l}$
连杆 <i>i</i>	$\pi_{m_i} = \frac{m_i}{m_0}, \pi_{(J_i)_{xx}} = \frac{(J_i)_{xx}}{(J_0)_{zz}}, \pi_{(J_i)_{yy}} = \frac{(J_i)_{yy}}{(J_0)_{zz}}, \pi_{(J_i)_{zz}} = \frac{(J_i)_{zz}}{(J_0)_{zz}}$
	$\pi_{(J_i)_{xy}} = \frac{(J_i)_{xy}}{(J_0)_{zz}}, \pi_{(J_i)_{yz}} = \frac{(J_i)_{yz}}{(J_0)_{zz}}, \pi_{(J_i)_{xz}} = \frac{(J_i)_{xz}}{(J_0)_{zz}}$
	$\pi_{(a_i)_x} = \frac{(a_i)_x}{l}, \pi_{(a_i)_y} = \frac{(a_i)_y}{l}, \pi_{(a_i)_z} = \frac{(a_i)_z}{l}$
	$\pi_{(b_i)_x} = \frac{(b_i)_x}{l}, \pi_{(b_i)_y} = \frac{(b_i)_y}{l}, \pi_{(b_i)_z} = \frac{(b_i)_z}{l}$
重力	$\pi_g = \frac{g}{l\Omega^2} \text{(仅对地面机械臂)}$

3.2 控制相似律(Control scaling laws)

针对空间和地面机械臂闭环系统,为保证两个闭环系统具有相似的动力学行为,将 π 理论拓展应用到控制器参数设计中. 以采用PID控制器的两个机械臂系统为例,假设它们已经满足第3.1节提出的动力学等效条件,为使其具有相似的闭环动力学行为,它们PID控制器的控制增益应满足如下条件.

机械臂第*i*个关节的PID控制器可以表示为

$$\tau_i(t) = K_{P_i} e_i(t) + K_{I_i} \int_{t_0}^t e_i(\tau) d\tau + K_{D_i} \dot{e}_i(t), \quad i = 1, \dots, n_m, \quad (7)$$

其中: $K_{P_i}, K_{I_i}, K_{D_i}$ 分别是PID控制器比例、积分、微分增益, $e_i(t) = \theta_i^d(t) - \theta_i(t)$ 是关节位移跟踪误差.

关节控制力矩的量纲是 $[M][L]^2[T]^{-2}$, 以及 $e_i(t), \int_{t_0}^t e_i(\tau) d\tau$ 和 $\dot{e}_i(t)$ 三项的量纲分别是 $1, [T]$ 和 $[T]^{-1}$. 为保持量纲一致,控制参数 $K_{P_i}, K_{I_i}, K_{D_i}$ 的量纲分别为 $[M][L]^2[T]^{-2}, [M][L]^2[T]^{-3}, [M][L]^2[T]^{-1}$. 因此,

机械臂PID控制器参数对应的 π 群可以由下式得到:

$$\begin{cases} \pi_{K_{P_i}} = \frac{K_{P_i}}{m_0 l^2 \Omega^2}, \\ \pi_{K_{I_i}} = \frac{K_{I_i}}{m_0 l^2 \Omega^3}, \\ \pi_{K_{D_i}} = \frac{K_{D_i}}{m_0 l^2 \Omega}. \end{cases} \quad (8)$$

使两个满足动力学等效条件的系统的控制参数的 π 群一一对应相等,称之为控制相似律,可以保证两个系统具有相似的闭环动力学行为.

4 误差补偿策略(Error compensation scheme)

在第3节中,提出了空间和地面机械臂系统的四类 π 群,分别与基座动力学参数、臂动力学参数、重力加速度(如表2所示)以及控制器参数相关. 通过使两个系统的所有 π 群一一对应相等,可以使得两个系统具有相似的闭环动力学行为,从而空间机械臂系统的控制器可以进行相似变换后在相应的地面机械臂系统上进行验证. 然而,在实际应用中,因为只有地面机械臂

系统受重力影响(只有地面机械臂系统包含与重力相关的 π 群)以及地面机械臂系统的基座不能和空间机械臂系统的航天器基座一样做6自由度运动(只有空间机械臂系统包含 $\pi_{(J_0)_{xx}}$ 等与基座相关的 π 群),不可能通过让两个系统所有的 π 群相等来使二者具有相似的闭环动力学行为。

本节提出一种空间和地面机械臂系统的动力学误差补偿策略。针对给定的空间机械臂系统及其控制器,首先在第3.1节给出的动力学等效条件下确定地面机械臂系统的动力学参数,之后基于反馈线性化技术设计地面机械臂系统的控制器,使得空间和地面机械臂系统具有相似的闭环动力学行为。因而,尽管空间和地面机械臂系统的动力学参数明显不同以及二者受不同的重力影响,空间机械臂系统的控制器可以在地面机械臂系统上进行验证。需要指出的是,该动力学误差补偿策略是利用额外的控制输入来消除动力学上的差异。原理上,两个机械臂系统任意大的动力学差异都可以通过额外的控制输入来补偿。然而,动力学差异越大,需要用来补偿动力学差异的控制输入也就越大。因为机械臂系统执行机构能够产生的控制力矩有限,本节仍然要求设计的地面机械臂系统和空间机械臂系统满足动力学等效条件,从而使得二者之间需要补偿的动力学差异尽可能小,降低在动力学误差补偿时对控制输入(执行机构)的要求。

通过消除式(1)中的基座线、角加速度,空间机械臂系统的动力学方程可以改写为

$$\tau_S = \bar{M}_S(q_S)\ddot{\theta}_S + \bar{c}_S(q_S, \dot{q}_S), \quad (9)$$

其中:下标S表示空间机械臂系统, $q_S = [x_{b,S}^T \ \theta_S^T]^T \in \mathbb{R}^{n_m+6}$ 是空间机械臂系统广义坐标的集合,

$$\bar{M}_S(q_S) = M_{mm,S} - M_{bm,S}^T M_{bb,S}^{-1} M_{bm,S}, \quad (10)$$

$$\bar{c}_S(q_S, \dot{q}_S) = c_{m,S} - M_{bm,S}^T M_{bb,S}^{-1} c_{b,S}. \quad (11)$$

由式(1)可以获得地面机械臂系统类似的动力学方程:

$$\tau_G = \bar{M}_G(q_G)\ddot{\theta}_G + \bar{c}_G(q_G, \dot{q}_G), \quad (12)$$

其中:下标G表示地面机械臂系统, $q_G = [x_{b,G}^T \ \theta_G^T]^T \in \mathbb{R}^{n_m+3}$ 是地面机械臂系统广义坐标的集合,

$$\bar{M}_G(q_G) = M_{mm,G} - M_{bm,G}^T M_{bb,G}^{-1} M_{bm,G}, \quad (13)$$

$$\bar{c}_G(q_G, \dot{q}_G) = (c_{m,G} + g_{m,G}) - M_{bm,G}^T M_{bb,G}^{-1} (c_{b,G} + g_{b,G}). \quad (14)$$

为使空间和地面机械臂系统具有相似的闭环动力学行为,本文建立空间和地面机械臂系统关节控制力矩之间的关系,使得两个系统关节产生相同的角位移,

即 $\theta_S = \theta_G$ 。两个系统的关节角速度和角加速度之间满足如下关系:

$$\dot{\theta}_S = \frac{d\theta_S}{dt_S} = \frac{\Omega_S}{\Omega_G} \frac{d\theta_G}{dt_G} = \frac{\Omega_S}{\Omega_G} \dot{\theta}_G, \quad (15)$$

$$\ddot{\theta}_S = \frac{d^2\theta_S}{dt_S^2} = \frac{\Omega_S^2}{\Omega_G^2} \frac{d^2\theta_G}{dt_G^2} = \frac{\Omega_S^2}{\Omega_G^2} \ddot{\theta}_G. \quad (16)$$

其中,适当的比例因子 $\frac{\Omega_S}{\Omega_G}$ 保证地面机械臂平台在规定的时间内完成空间机械臂相应任务的验证,其取值主要受限于地面机械臂平台允许的实验时间。本文假设地面机械臂平台可以运行足够长的时间来完整地验证空间机械臂任务,即取 $\Omega_S = \Omega_G$,因而两个系统关节角速度和角加速度之间满足:

$$\dot{\theta}_S = \dot{\theta}_G, \quad \ddot{\theta}_S = \ddot{\theta}_G. \quad (17)$$

同时,由于自由漂浮空间机械臂系统满足动量守恒定理,可以通过臂关节角速度得到基座航天器的速度^[31]

$$\dot{x}_{b,S} = -M_{bb,S}^{-1} M_{bm,S} \frac{\Omega_S}{\Omega_G} \dot{\theta}_G, \quad (18)$$

并且进一步积分得到 $x_{b,S}$ 。

因为惯量矩阵 \bar{M}_S 是可逆的^[33],对于给定的关节控制力矩 τ_S ,空间机械臂的关节角加速度可以通过式(9)计算得到

$$\ddot{\theta}_S = \bar{M}_S^{-1}(q_S) \cdot (\tau_S - \bar{c}_S(q_S, \dot{q}_S)). \quad (19)$$

基于反馈线性化技术^[32],设计地面机械臂系统的控制器具有如下形式:

$$\tau_G = \bar{M}_G(q_G)\eta + \bar{c}_G(q_G, \dot{q}_G). \quad (20)$$

将式(20)代入式(12),地面机械臂系统的闭环动力学方程变为一个双积分系统:

$$\ddot{\theta}_G = \eta. \quad (21)$$

将式(19)中空间机械臂的角加速度用作 η ,即使得闭环的空间和地面机械臂系统具有相同的关节运动,并代入式(20)可以计算出地面机械臂需要的关节控制力矩:

$$\tau_G = -\bar{M}_G(q_G)\bar{M}_S^{-1}(q_S)\bar{c}_S(q_S, \dot{q}_S) + \bar{c}_G(q_G, \dot{q}_G) + \bar{M}_G(q_G)\bar{M}_S^{-1}(q_S)\tau_S. \quad (22)$$

式(22)给出了 τ_G 和 τ_S 之间的关系,使得闭环的空间和地面机械臂系统具有相同的关节运动,因而空间机械臂系统的控制器可以在地面机械臂平台上进行验证。图2给出了使用地面机械臂系统验证空间机械臂系统控制器的完整流程图。

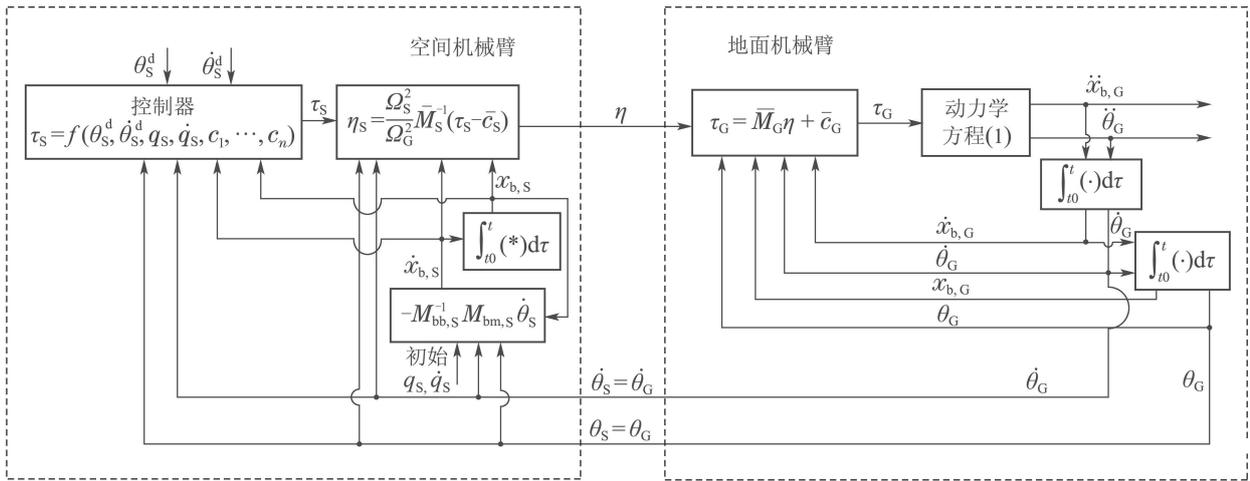


图2 空间机械臂控制器地面验证流程图

Fig. 2 The block diagram of verifying the controller of the space manipulator on the ground manipulator

5 仿真(Simulations)

本节通过仿真验证提出的空间和地面机械臂系统的动力学等效条件、控制相似律以及动力学误差补偿策略的有效性。首先,对于给定的空间机械臂系统,基于动力学等效条件确定地面机械臂系统的动力学参数。为了验证得到的地面机械臂系统和空间机械臂系统具有尽可能相近的闭环动力学行为,在假设地面机械臂不受重力影响并且其基座可以做6自由度运动的条件下,基于控制相似律将空间机械臂系统的控制器进行相似变换后作用在地面机械臂系统,并比较空间和地面机械臂系统的闭环输出。之后,在地面机械臂系统受重力影响并且其基座只具有3个自由度的真实情形下,验证设计的地面机械臂系统及其在动力学误差补偿策略下设计的控制器与空间机械臂系统及其给定的控制器具有相似的闭环动力学行为(产生相同的关节输出),从而空间机械臂系统的控制器可以在地面机械臂平台上进行验证。

5.1 动力学等效验证 (Verification of the dynamic equivalence of the two systems)

本文采用的空间机械臂系统的动力学参数如表3所示。选取 $m_{0,S}, (J_0)_{zz,S}, \Omega_S$ 作为空间机械臂系统的基变量, Ω_S 设为 $1 s^{-1}$, 利用表2可以计算得到空间机械臂系统的 π 群, 如表4所示。

为了设计与空间机械臂系统满足动力学等效条件的地面机械臂系统, 选取地面机械臂系统的基变量为 $m_{0,G} = 5 kg, (J_0)_{zz,G} = 0.5 kg \cdot m^2, \Omega_G = 1 s^{-1}$ 。并使地面机械臂系统的 π 群与空间机械臂系统的 π 群(如表4所示)一一对应相等, 可以得到地面机械臂系统满足动力学等效条件的动力学参数如表5所示。

假设空间机械臂系统各关节初始角度为 $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T rad$, 期望到达的关节角度为 $[0 \ 0.05 \ 0.3 \ -0.1 \ -0.3 \ 0.2]^T rad$, 各关节PID控制器的控制增益分别为

$$\begin{cases} K_{P_i} = 15, \\ K_{I_i} = 1, \quad i = 1, \dots, 6. \\ K_{D_i} = 10, \end{cases} \quad (23)$$

基于式(8)所示的控制相似律, 地面机械臂系统各关节PID控制器的控制增益应该为

$$\begin{cases} K_{P_i} = 0.2143, \\ K_{I_i} = 0.0143, \quad i = 1, \dots, 6. \\ K_{D_i} = 0.1428, \end{cases} \quad (24)$$

表3 空间机械臂系统动力学参数

Table 3 The dynamic parameters of the space manipulator

	m_i / kg	$a_i, b_i / m$	$J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} / (kg \cdot m^2)$
基座	100	— 0.9	25 25 35
连杆1	2	0.09 0.09	0.1 0.1 0.1
连杆2	8	0.7 0.7	0.5 0.8 0.8
连杆3	5	0.15 0.15	0.3 0.4 0.4
连杆4	4	0.128 0.128	0.3 0.3 0.2
连杆5	2	0.09 0.09	0.1 0.1 0.1
连杆6	4	0.128 0.128	0.3 0.3 0.2

表4 空间机械臂系统 π 群

Table 4 π group values of the space manipulator

	π_{m_i}	π_{a_i}	π_{b_i}	$\pi_{J_{xx}}, \pi_{J_{yy}}, \pi_{J_{zz}}$
基座	—	—	1.5213	0.7143 0.7143 —
连杆1	0.02	0.1521	0.1521	0.0029 0.0029 0.0029
连杆2	0.08	1.1832	1.1832	0.0143 0.0229 0.0229
连杆3	0.05	0.2535	0.2535	0.0086 0.0114 0.0114
连杆4	0.04	0.2164	0.2164	0.0086 0.0086 0.0057
连杆5	0.02	0.1521	0.1521	0.0029 0.0029 0.0029
连杆6	0.04	0.2164	0.2164	0.0086 0.0086 0.0057

表 5 地面机械臂系统动力学参数

Table 5 The dynamic parameters of the ground manipulator

	m_i / kg	$a_i, b_i / \text{m}$	$J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
基座	5	—	0.4811 0.3571 0.3571 0.5
连杆1	0.1	0.0481 0.0481	0.0014 0.0014 0.0014
连杆2	0.4	0.3742 0.3742	0.0071 0.0114 0.0114
连杆3	0.25	0.0802 0.0802	0.0043 0.0057 0.0057
连杆4	0.2	0.0684 0.0684	0.0043 0.0043 0.0029
连杆5	0.1	0.0481 0.0481	0.0014 0.0014 0.0014
连杆6	0.2	0.0684 0.0684	0.0043 0.0043 0.0029

图3展示了空间和地面机械臂系统各关节的角度变化轨迹, 可以看出, 两个系统的关节角变化轨迹重合, 表明满足动力学等效条件和控制相似律的地面机械臂系统和空间机械臂系统具有相似的闭环动力学行为。

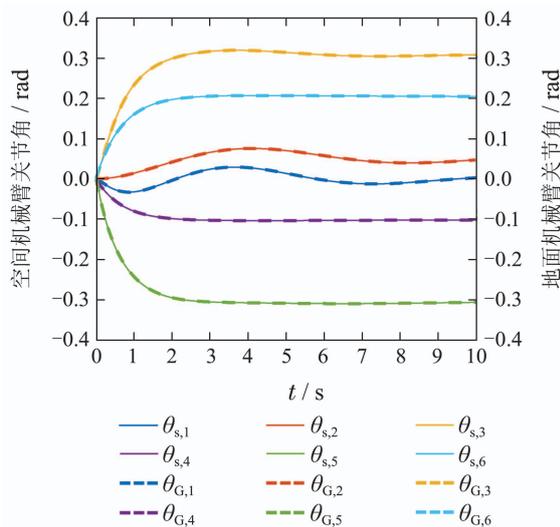


图 3 空间和地面机械臂系统关节角变化轨迹
Fig. 3 Joint displacements of the space and ground manipulators

图4和图5分别给出了两个系统基座质心无量纲化前后的位置变化轨迹. 本文要求两个系统机械臂关节产生相同的输出, 可以看出, 因为空间和地面机械臂几何尺寸明显不同, 二者基座质心运动的范围也不同(如图4所示), 但表现出相似的变化趋势. 图5显示二者基座质心具有相同的无量纲的位置变化轨迹.

以“zyx”顺序的欧拉角表示基座的姿态, 图6表明空间和地面机械臂系统基座姿态变化一致. 至此, 已经表明空间和地面机械臂系统无量纲(化)的所有运动状态(包括基座姿态、基座质心位置和关节角)在每一时刻都相同, 意味着基于本文提出的动力学等效条件和控制相似律设计地面机械臂系统及其控制器, 可以使其与给定的空间机械臂系统及其控制器具有相似的闭环动力学行为。

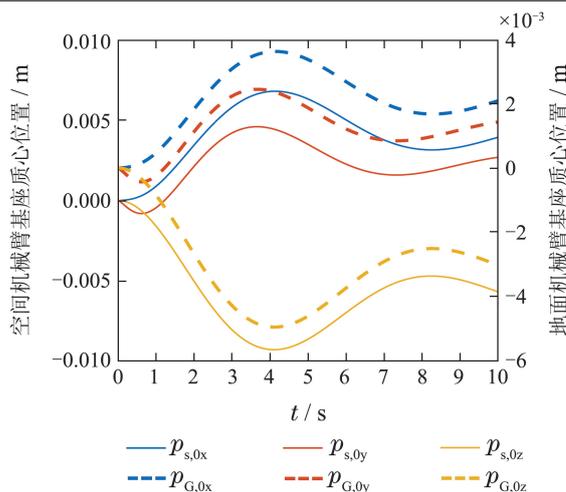


图 4 空间和地面机械臂系统基座质心位置
Fig. 4 Base CoM positions of the space and ground manipulators with the dimension

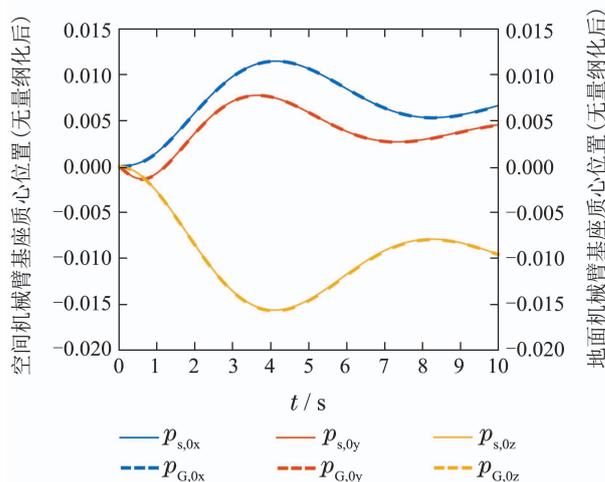


图 5 无量纲化后空间和地面机械臂系统基座质心位置
Fig. 5 Base CoM positions of the space and ground manipulators without the dimension

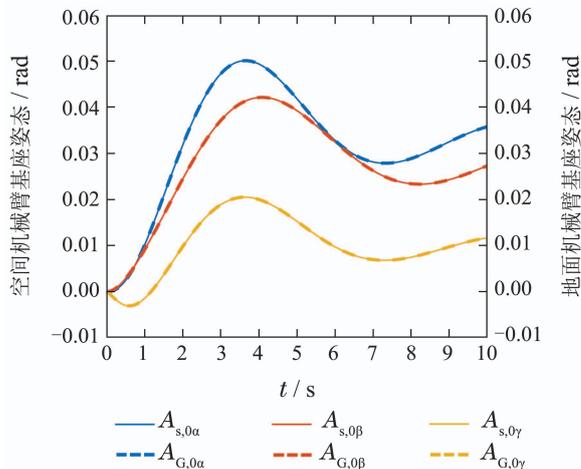


图 6 空间和地面机械臂系统基座姿态
Fig. 6 Base attitudes of the space and ground manipulators

5.2 地面机械臂验证空间机械臂控制器(Verifying the space manipulator controller on the ground manipulator)

在实际情形下,地面机械臂系统的基座只具有3个自由度,并且地面机械臂系统受重力影响,使得设计的地面机械臂系统与空间机械臂系统不完全动力学等效.本仿真案例用以说明地面机械臂系统使用动力学误差补偿策略中提出的控制器,具有与空间机械臂系统及其给定的控制器相似的闭环动力学行为,从而可以利用地面机械臂系统来验证空间机械臂系统的控制器.

以验证空间机械臂系统的PID控制器为例,式(23)给出了控制器中各控制增益的取值,因而施加在空间机械臂系统各关节的控制力矩可以由下式计算得到

$$\tau_{i,S} = 15e_{i,S}(t) + \int_{t_0}^t e_{i,S}(\tau)d\tau + 10\dot{e}_{i,S}(t),$$

$$i = 1, 2, \dots, 6. \quad (25)$$

进一步地,需要施加在地面机械臂系统各关节上的控制力矩可以通过式(22)计算得到,即

$$\tau_G = -\bar{M}_G \bar{M}_S^{-1} \bar{c}_S + \bar{c}_G + \bar{M}_G \bar{M}_S^{-1} \tau_S,$$

其中 $\tau_S = [\tau_{1,S} \ \tau_{2,S} \ \dots \ \tau_{6,S}]^T$.

因此,给定空间机械臂系统的PID控制器,可以获得地面机械臂系统相应的控制输入,保证空间和地面机械臂系统产生相同的关节输出.为说明地面机械臂系统及其动力学误差补偿策略可以验证空间机械臂系统的控制器性能,本案例将地面机械臂系统(使用动力学误差补偿策略)的输出与空间机械臂系统(使用给定的控制器)的仿真输出结果进行比较,因为前者中地面机械臂系统的控制力矩通过空间机械臂的控制器计算得到,并将地面机械臂系统的输出返回给空间机械臂系统的控制器使用,如果地面机械臂系统的输出和空间机械臂系统的仿真输出结果相同,则说明使用设计的地面机械臂系统可以有效地验证空间机械臂系统的控制器.

图7给出了空间机械臂系统仿真时关节角的运动轨迹和使用地面机械臂系统验证时地面机械臂的关节角运动轨迹,可以看出,两种情形下空间机械臂系统和地面机械臂系统的关节具有相同的运动轨迹,表明基于提出的动力学误差补偿策略,可以使用设计的地面机械臂系统验证空间机械臂系统控制器的有效性.

图8分别给出了空间机械臂系统(PID控制器下)和地面机械臂系统(动力学误差补偿策略下)关节的控制力矩取值.值得注意的是,随着各关节被控制到期望位置,空间机械臂系统各关节的控制力矩也收敛到零.然而,地面机械臂系统第2个关节处始终需要较大的控制力矩,该力矩用于平衡重力对臂的影响.

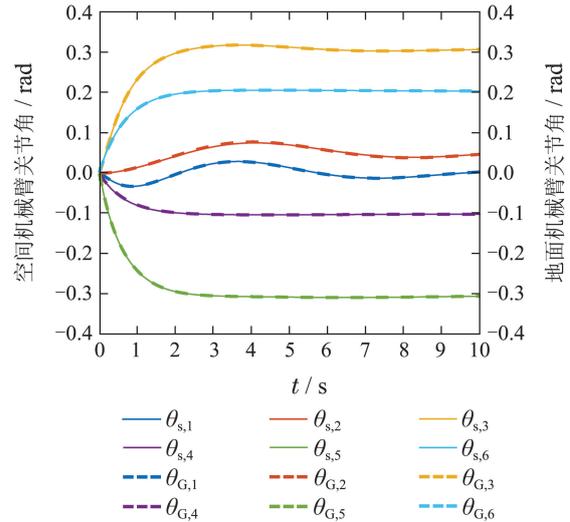


图7 空间机械臂(使用PID控制器)和地面机械臂(使用动力学误差补偿策略)关节角运动轨迹

Fig. 7 Joint displacements of the space manipulator (with PID controller) and ground manipulator (with error compensation scheme)

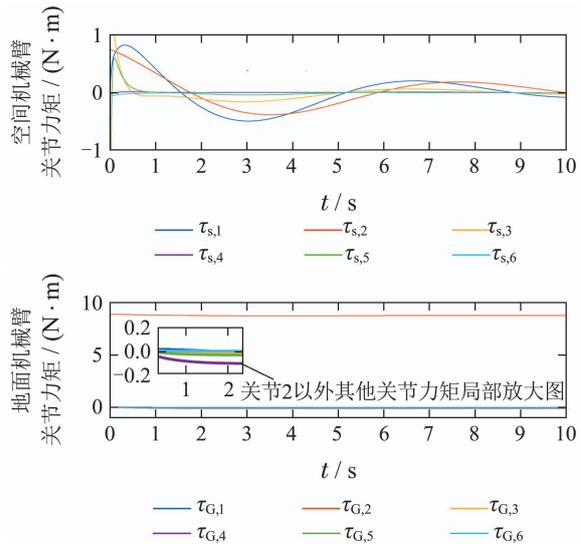


图8 空间机械臂(使用PID控制器)和地面机械臂(使用动力学误差补偿策略)关节控制力矩

Fig. 8 Joint torque of the space manipulator (with PID controller) and ground manipulator (with error compensation scheme)

6 结论(Conclusions)

本文提出了一种利用自由度更少的地面机械臂系统验证空间机械臂系统控制器性能的方法.基于所提出的动力学等效条件,给定空间机械臂系统可以设计出与之动力学等效的地面机械臂系统.在实际情形下,只有地面机械臂系统受到重力影响,而且其基座自由度少于空间机械臂系统基座的自由度,本文提出了一种动力学误差补偿策略,使得空间和地面机械臂系统具有相似的闭环动力学行为.因而,可以利用设计的

地面机械臂系统验证空间机械臂系统的控制器性能。以使用地面机械臂系统验证空间机械臂系统的PID控制器为例, 仿真结果说明了所提出的方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] FLORES A A, MA O, PHAM K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 68(8): 1 – 26.
- [2] HIRZINGER G, BRUNNER B, DIETRICH J, et al. ROTEX-the first remotely controlled robot in space [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Diego, CA, USA: IEEE, 1994: 2604 – 2611.
- [3] ODA M, KIBE K, YAMAGATA F. ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 1996.
- [4] OGILVIE A, ALLPORT J, HANNAH M, et al. Autonomous satellite servicing using the orbital express demonstration manipulator system [C] // *Proceedings of the 9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS'08)*. Universal City, California, USA: NASA, 2008.
- [5] JAEKEL S, LAMPARIELLO R, PANIN G, et al. Robotic capture and de-orbit of a heavy, uncooperative and tumbling target in low earth orbit [C] // *13th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation*. Noordwijk, Nederlande: DLR, 2015.
- [6] HENSHAW C G. The darpa phoenix spacecraft servicing program: Overview and plans for risk reduction [C] // *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*. Quebec, Canada: CSA, 2014.
- [7] ANDREW W, NICOLE M, JENNIFER H. GEO robotic servicer trajectory optimization [C] // *AIAA SPACE Forum*. Long Beach, California, USA: AIAA, 2016: 1 – 9.
- [8] SCHWARTZ J L, PECK M A, HALL C D. Historical review of air-bearing spacecraft simulators [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 26(4): 513 – 522.
- [9] LANE J C, CARIGNAN C R, SULLIVAN B R, et al. Effects of time delay on telerobotic control of neutral buoyancy vehicles [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington, DC, USA: IEEE, 2002: 2874 – 2879.
- [10] MENON C, ABOUDAN A, COCUZZA S, et al. Free-flying robot tested on parabolic flights: kinematic control [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2005, 28(4): 623 – 630.
- [11] WATANABE Y, YOSHIHIKO N. Experiments of a space robot in the free-fall environment [C] // *Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*. Paris: European Space Agency, 1999: 601 – 607.
- [12] DUBOWSKY S, DURFEE W, CORRIGAN T, et al. A laboratory test bed for space robotics: the VES II [C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Munich, Germany: IEEE, 1994: 463 – 475.
- [13] AGHILI F. A robotic testbed for zero-g emulation of spacecraft [C] // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, Canada: IEEE, 2005: 1033 – 1040.
- [14] REKLEITIS I, MARTIN E, ROULEAU G, et al. Autonomous capture of a tumbling satellite [J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(4): 275 – 296.
- [15] BOGE T, OU M. Using advanced industrial robotics for spacecraft rendezvous and docking simulation [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China: IEEE, 2011.
- [16] ARTIGAS J, STEFAN O M D, RACKL W, et al. The OOS-SIM: An on-ground simulation facility for on-orbit servicing robotic operations [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seattle, WA, USA: IEEE, 2015: 2854 – 2860.
- [17] DE S M, JORDI D A, ALESSANDRO M G, et al. On-ground experimental verification of a torque controlled free-floating robot [C] // *13th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA 2015)*. Noordwijk, the Netherlands: ESA, 2015: 1 – 7.
- [18] VIRGILI L, DREW J, ZAPPULLA R, et al. Autonomous capture of a resident space object by a spacecraft with a robotic manipulator: analysis, simulation and experiments [C] // *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*. Long Beach, California, USA: AIAA/AAS, 2016: 1 – 18.
- [19] LIU J, HUANG Q, WANG Y, et al. A method of ground verification for energy optimization in trajectory planning for six DOF space manipulator [C] // *International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*. Harbin, China: IEEE, 2015: 791 – 796.
- [20] WANG Ying, HAN Dong, LIU Tao. The design and verification of experiment system for cooperative control of space robot [J]. *Aerospace Control and Application*, 2015, 41(2): 30 – 35. (王颖, 韩冬, 刘涛. 空间机器人协调控制全物理仿真设计与验证 [J]. *空间控制技术与应用*, 2015, 41(2): 30 – 35.)
- [21] SONIN A A. *The Physical Basis of Dimensional Analysis* [M]. 2nd ed. Cambridge MA, USA: Department of Mechanical Engineering, MIT, 2001: 29 – 43.
- [22] GOLDFARB M. Dimensional analysis and selective distortion in scaled bilateral telemanipulation [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 1609 – 1614.
- [23] ZHAO Lin, SUN Shihao, JIA Yingmin. Similarity degree analysis for motion reconstruction of space cooperative vehicles [J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(1): 94 – 101. (赵林, 孙施浩, 贾英民. 空间合作目标运动再现的相似度分析 [J]. *宇航学报*, 2016, 37(1): 94 – 101.)
- [24] SUN Shihao, JIA Yingmin. Attitude and orbit control of spacecrafts for motion reconstruction of flying around and approaching the tumbling target [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2016, 11(6): 818 – 826. (孙施浩, 贾英民. 航天器绕飞逼近翻滚目标运动再现的姿轨控制 [J]. *智能系统学报*, 2016, 11(6): 818 – 826.)
- [25] SUN Shihao, ZHAO Lin, JIA Yingmin. Similitude design method for motion reconstruction of space cooperative vehicles [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(7): 802 – 810. (孙施浩, 赵林, 贾英民. 空间合作目标运动再现的相似设计方法研究 [J]. *宇航学报*, 2014, 35(7): 802 – 810.)
- [26] LIN Y J, ZHANG H Y. Simplification of manipulator dynamic formulations utilizing a dimensionless method [J]. *Robotica*, 1993, 11(2): 139 – 147.
- [27] GHANEKAR M, DAVID W, GLENN R H. Scaling laws for linear controllers of flexible link manipulators characterized by nondimensional groups [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1997, 13(1): 117 – 127.
- [28] GHANEKAR M, DAVID W, GLENN R H. Scaling laws for nonlinear controllers of dynamically equivalent rigid-link manipulators [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 2633 – 2639.
- [29] GHANEKAR M, DAVID W, GLENN R H. Dynamic equivalence conditions for controlled robotic manipulators [J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(2): 280 – 287.
- [30] MARCO C, ROBERTO C, MARCELLO M R. Emulating scaled clothessy-wiltshire dynamics on an air-bearing spacecraft simulation testbed [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2017, 40(10): 2496 – 2510.
- [31] UMETANI Y, YOSHIDA K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix [J]. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 1989, 5(3): 303 – 314.
- [32] SPONG M W, HUTCHINSON S, VIDYASAGAR M. *Robot Modeling and Control* [M]. New York: John Wiley and Sons, 2006: 301 – 302.
- [33] GU Y L, XU Y S. A normal form augmentation approach to adaptive control of space robot systems [J]. *Dynamics and Control*, 1995, 5(3): 275 – 294.

作者简介:

宗立军 (1991–), 男, 博士研究生, 主要从事空间机械臂动力学与控制研究, E-mail: zonglijun@mail.nwpu.edu.cn;

罗建军 (1965–), 男, 博士, 教授, 主要从事航天飞行动力学与控制、组合导航与制导研究, E-mail: jlluo@nwpu.edu.cn;

王明明 (1983–), 男, 博士, 助理教授, 主要从事空间机器人动力学建模、轨迹规划与控制方法研究, E-mail: mwang@nwpu.edu.cn;

袁建平 (1957–), 男, 博士, 教授, 主要从事航天飞行器轨道机动与相对运动动力学、航天器在轨服务技术, E-mail: jyuan@nwpu.edu.cn.