

DOI: 10.3724/SP.J.1218.2013.00299

## 空间机械臂地面微重力混合模拟方法研究

叶平, 何雷, 宋爽, 孙汉旭

(北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

**摘要:** 针对可用于空间站组装的 7-DOF 空间机械臂的结构特点, 提出了基于气浮和静平衡的地面微重力混合模拟方法. 采用气浮法实现 7-DOF 空间机械臂中间段的重力补偿, 并设计两套静平衡机构分别用于实现 7-DOF 空间机械臂两端肩部和腕部的重力补偿. 利用该混合模拟方法搭建的地面微重力实验系统, 能够实现 7-DOF 空间机械臂的 3 维运动, 可用于 7-DOF 空间机械臂的末端定位精度测试、目标捕获等地面实验研究. 利用 ADAMS 建立了 7-DOF 空间机械臂地面微重力实验系统的仿真模型, 并进行了仿真实验研究. 仿真实验结果表明: 该方法可以用于 7-DOF 空间机械臂的微重力模拟.

**关键词:** 空间机械臂; 微重力环境; 静平衡机构; 气浮

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1002-0446(2013)-03-0299-07

### A Hybrid Method for Microgravity Simulation of Space Robotic Manipulator

YE Ping, HE Lei, SONG Shuang, SUN Hanxu

(Automation School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** According to structural characteristics of a space robotic manipulator with 7 DOFs (degrees of freedom) which can be used for space station assembly, a hybrid method for microgravity simulation for the 7-DOF manipulator on the ground is proposed. The presented method is a combination of air-bearing support and static balancing. Gravity of the middle segment of the 7-DOF manipulator is compensated by air-bearing support. And two static balancing mechanisms are designed to compensate the gravity of both ends of the 7-DOF manipulator, i.e. the shoulder and wrist, respectively. The microgravity ground-based facility using the hybrid method allows the 7-DOF manipulator to perform movement in three dimensions. Therefore, in the simulated microgravity environment, the positioning accuracy of the end-effector of the 7-DOF manipulator can be measured, and experiments of target capture also can be carried out on the ground. The microgravity ground-based facility of the 7-DOF manipulator is modeled with ADAMS, and its performance is studied. Simulation results demonstrate the feasibility of the proposed microgravity simulation method for the 7-DOF space robotic manipulator.

**Keywords:** space robotic manipulator; microgravity environment; static balancing mechanism; air-bearing support

## 1 引言 (Introduction)

随着科学技术的发展, 空间机器人在人类探索太空活动中发挥着越来越重要的作用, 不仅可以协助或者代替宇航员执行空间站组装、维修、部件更换等传统在轨操作, 还可以执行燃料补给、航天器监视与捕获等新型在轨操作. 空间机械臂作为空间机器人系统的重要组成部分, 具有多自由度控制的难度与高风险, 是决定在轨操作任务成败的关键. 因此, 在发射入轨之前, 必须在地面模拟的微重力环境中对空间机械臂进行全面的、严格的仿真与验证, 从而保证空间机械臂在轨执行各项任务时的准

确性<sup>[1-3]</sup>. 在地面进行实验验证, 首先需要模拟太空的微重力环境. 目前, 国内外空间机械臂地面微重力环境的模拟方法主要有: 气浮法、水浮法和吊丝配重法等.

气浮法是采用气足 (又称空气轴承), 将空间机械臂支撑在光滑的气浮台上, 利用气足喷气的反作用力抵消机械臂的重力. 该方法具有结构简单、承载能力大、精度高等特点, 在 2 维平面内, 气浮法可以达到很好的实验效果. 加拿大 MDA 公司研制的 Canadarm2 机械臂和欧洲航天局 ESA 研制的 ERA 机械臂, 均采用气浮法开展相应的地面实验研究. 但是, 气浮法只适用于空间机械臂在 2 维平面内的

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2013CB733005); 国家自然科学基金资助项目 (61175080); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2012PTB-00-11).

通讯作者: 叶平, yeping@bupt.edu.cn 收稿/录用/修回: 2012-12-31/2012-01-22/2012-03-21

微重力实验,难以用于3维空间运动条件下的微重力实验<sup>[3-4]</sup>.

水浮法是指在大型中性水池中模拟微重力环境,通过添加配重使得空间机械臂在水中的浮力与重力相平衡.利用水浮法能够在地面微重力环境中实现空间机械臂的3维空间运动.美国马里兰大学研制的Ranger机器人,其地面实验系统采用水浮法模拟微重力环境<sup>[5]</sup>.但是,空间机械臂在水中运动,水的黏性阻力会改变系统动力学特性.同时,水浮法对空间机械臂的密封性要求很高,因而需要对系统进行较大的改造.

吊丝配重法是指通过滑轮组利用配重物的重力来补偿空间机械臂的重力,即采用吊丝竖直向上的拉力来平衡空间机械臂的重力.美国卡耐基-梅隆大学研制的SM<sup>2</sup>机器人地面实验系统<sup>[6]</sup>和北京控制工程研究所研制的舱外自由移动机器人系统<sup>[7]</sup>,均采用吊丝配重法.吊丝配重法虽然可以实现空间机械臂的重力补偿,但是系统复杂且重力补偿精度不高.

静平衡机构是通过添加辅助连杆机构和弹簧,使整个系统的重力势能和弹性势能总和保持不变,从而实现机构系统的重力补偿<sup>[8-9]</sup>.文[10]利用静平衡机构减小因自身重力产生的机械臂关节负载转矩,从而提高机械臂的操作性能.文[11-12]采用静平衡机构设计了用于手臂和下肢康复训练的医疗器械.文[13]利用平行四边形辅助机构和弹簧提出了多自由度机械臂的重力补偿方法,但是系统设计复杂,文献中只针对2自由度机械臂研制了重力补偿原型系统.

针对可用于空间站组装的7自由度空间机械臂(以下简称7-DOF空间机械臂)的结构特点<sup>[14]</sup>,本文提出了基于气浮和静平衡的地面微重力混合模拟方法.利用该方法所搭建的地面微重力实验系统,能够实现7-DOF空间机械臂的3维运动,可用于末端定位精度测试、动力学参数辨识与验证、目标捕获以及接触-碰撞动力学特性分析等地面实验.

## 2 7-DOF 空间机械臂系统 (7-DOF space robotic manipulator system)

图1所示为本文研究的7-DOF空间机械臂系统,主要由7个转动关节、2段碳纤维臂杆和2个末端执行器等组成.

其特点是:①7个转动关节具有相同的尺寸与内部机构,且对称布置;②肩部和腕部各有3个关节,肘部有1个关节;③关节3、关节4和关节5的

轴线相互平行.在轨操作时,7-DOF空间机械臂肩部的末端执行器与空间站连接,腕部的末端执行器用于操作.此外,肩部和腕部可以交替使用,实现行走.

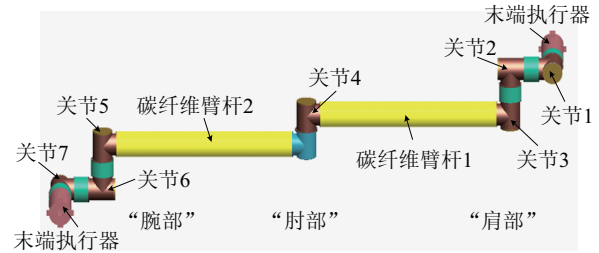


图1 7-DOF空间机械臂系统  
Fig.1 The 7-DOF space robotic manipulator system

建立7-DOF空间机械臂的连杆坐标系,如图2所示;表1所示为7-DOF空间机械臂连杆参数.

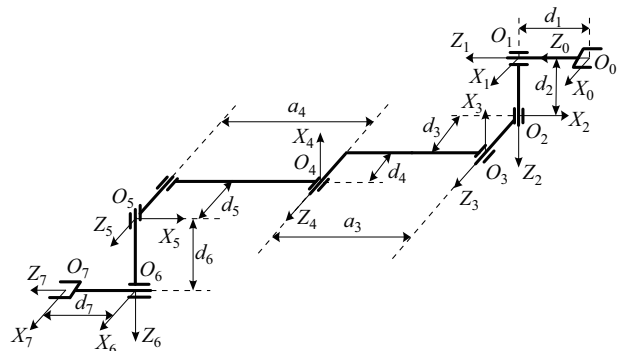


图2 7-DOF空间机械臂的连杆坐标系  
Fig.2 Link frame of the 7-DOF space robotic manipulator

表1 7-DOF空间机械臂的连杆参数表

Tab.1 Link parameters of the 7-DOF space robotic manipulator

$i$	$\theta_i$	$d_i$ /mm	$a_{i-1}$ /mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$
1	$\theta_1$	$d_1$	0	0
2	$\theta_2$	$d_2$	0	90
3	$\theta_3$	$d_3$	0	-90
4	$\theta_4$	$d_4$	$a_3$	0
5	$\theta_5$	$d_5$	$a_4$	0
6	$\theta_6$	$d_6$	0	90
7	$\theta_7$	$d_7$	0	0

7-DOF空间机械臂的在轨任务主要包括:空间站组装与维护、悬停航天器的捕获与辅助对接、辅助航天员执行舱外任务、舱外科学实验载荷的照料等.为了成功完成上述在轨任务,必须建立可行的地面微重力环境,用于末端定位精度测试、动力学参数辨识与验证、接触-碰撞动力学特性分析等关键问题的研究.

### 3 基于气浮和静平衡的混合模拟方法 (A hybrid simulation method based on air-bearing support and static balancing)

#### 3.1 地面微重力混合模拟方案

综合分析现有气浮法、水浮法和吊丝配重法的优缺点, 结合 7-DOF 空间机械臂的结构特点, 本文提出了基于气浮和静平衡的混合模拟方法, 并设计了 7-DOF 空间机械臂的地面微重力实验系统, 如图 3 所示. 在地面微重力实验系统中, 将 7-DOF 空间机械臂的 7 自由度复杂运动分解为 5 自由度和 2 自由度的组合运动, 即将关节 2 与基座固连, 关节 1 和关节 2 组成具有 2 个自由度的机械臂 (记为 2-DOF 机械臂), 关节 3 ~ 关节 7 则组成具有 5 个自由度的机械臂 (5-DOF 机械臂).

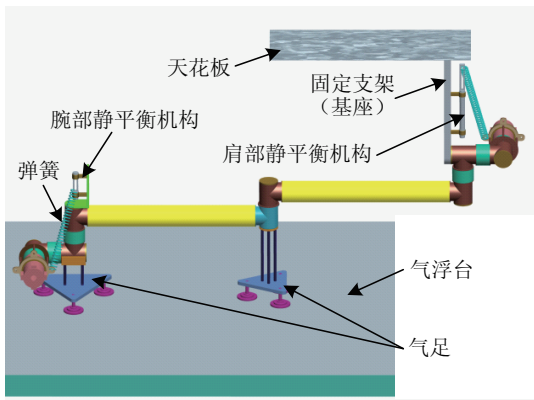


图 3 7-DOF 空间机械臂地面微重力实验系统

Fig.3 Microgravity experiment system of the 7-DOF space robotic manipulator

如图 3 所示, 将 7-DOF 空间机械臂置于气浮台之上, 其中间段采用气浮法实现重力补偿, 由 2 个气浮足支撑; 由于关节 3 和关节 4 的轴线垂直于气浮台, 因而可以实现关节 3 和关节 4 在 2 维平面内的自由运动. 两端的肩部、腕部以及末端执行器则采用静平衡机构实现重力补偿; 设计两套静平衡机构, 分别称为肩部静平衡机构和腕部静平衡机构; 肩部静平衡机构用于实现由关节 1、关节 2 和末端执行器组成的 2 自由度机械臂的重力补偿; 而腕部静平衡机构则用于实现由关节 5、关节 6、关节 7 和末端执行器组成的 3 自由度机械臂的重力补偿. 由于腕部末端执行器的质心不在由关节 4 和关节 5 的轴线所确定的垂直平面内, 会产生侧翻力矩, 所以对安装在腕部的气足需要进行合理的设计, 使末端执行器的质心始终落在气足的支撑范围内.

利用图 3 所示的地面微重力实验系统能够为 7-DOF 空间机械臂提供微重力环境, 因而在此基础

上可以开展相关的地面微重力实验的研究, 初步方案设计如下: (1) 针对 7-DOF 空间机械臂的末端定位精度测试问题: 首先测得肩部末端执行器 (记为 A 点) 和腕部末端执行器 (记为 D 点) 相对于基座 (与关节 2 固连, 记为 B 点) 的坐标变换, 即  ${}^B_A T$  和  ${}^B_D T$ ; 然后利用  ${}^A_D T = {}^A_B T^{-1} {}^B_D T$  求取 D 点相对于 A 点的坐标变换, 从而完成对 7-DOF 空间机械臂的末端定位精度测试实验. (2) 针对动力学参数辨识与验证问题: 首先分别针对 2-DOF 机械臂和 5-DOF 机械臂的动力学参数进行辨识与验证; 然后组合上述两者的结果最终获得 7-DOF 空间机械臂的动力学参数. (3) 针对目标捕获过程中发生的接触-碰撞动力学特性分析问题: 考虑到在真正完成目标捕获的短暂过程中, 空间机械臂肩部关节 1 和关节 2 的运动量往往很小或保持不动, 其运动主要来源于关节 3 ~ 关节 7, 因此可以利用 5-DOF 机械臂代替 7-DOF 空间机械臂开展目标捕获等相关问题的研究.

#### 3.2 静平衡机构设计

由 3.1 节可知, 腕部和肩部静平衡机构分别用于腕部 (关节 5 ~ 关节 7 和末端执行器) 和肩部 (关节 1、关节 2 和末端执行器) 的重力补偿. 本节以腕部静平衡机构的设计为例, 介绍具体的设计步骤.

针对 7-DOF 空间机械臂的关节 5 ~ 关节 7 和末端执行器, 建立如图 4 所示的 3 自由度机械臂. 为了更好地描述腕部静平衡机构设计中的理论分析与公式推导, 在图 4 中重新建立连杆坐标系, 其中关节 1 ~ 关节 3 分别对应于图 1 中 7-DOF 空间机械臂腕部的关节 5 ~ 关节 7. 连杆 1 的质量为关节 5、关节 6 及其连接件的总质量, 连杆 2 的质量为关节 7 及其与关节 6 的连接件的总质量, 连杆 3 的质量为末端执行器及其与关节 7 的连接件的总质量. 在本节中, 若无特殊说明, 关节 1 ~ 关节 3、连杆 1 ~ 连杆 3 是指图 4 中所示的腕部关节以及相关连杆.

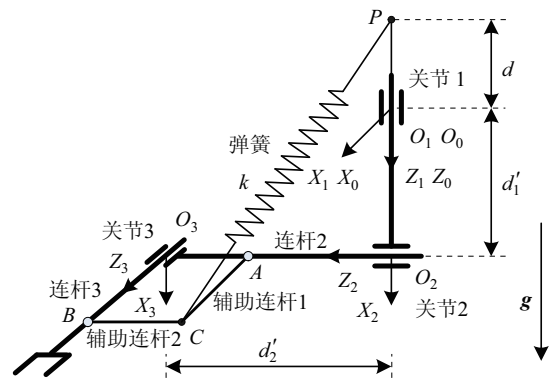


图 4 腕部 3 自由度机械臂

Fig.4 3-DOF manipulator in the wrist

由于关节 1 的轴线始终垂直于气浮台, 即与重力方向一致, 使得连杆 1 的重力可以通过气浮法实现补偿, 所以在设计腕部静平衡机构时, 可将连杆 1 的质量视为 0. 因此, 腕部静平衡机构的设计目标是实现连杆 2 和连杆 3 的重力补偿, 使上述自身重力施加在关节 1 ~ 关节 3 上的负载转矩接近于 0 或尽可能小.

假设腕部 3 自由度机械臂的质心为  $C$  点, 则在基坐标系 (其坐标原点为  $O_0$ ) 中  $C$  点的空间矢量为

$$\mathbf{r}_{O_0C} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^3 m_i \mathbf{r}_{O_0C_i}, \quad M = \sum_{i=1}^3 m_i \quad (1)$$

式中:  $m_i$  为连杆  $i$  的质量, 其中  $m_1 = 0$ ;  $\mathbf{r}_{O_0C_i}$  为连杆  $i$  的质心  $C_i$  在基坐标系下的空间矢量,  $\mathbf{r}_{O_0C_i}$  可以表示为

$$\mathbf{r}_{O_0C_i} = \mathbf{r}_{O_0O_i} + \mathbf{r}_{O_iC_i} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{r}_{O_0O_i}$  为连杆坐标系  $\{i\}$  的坐标原点  $O_i$  在基坐标系下的空间矢量,  $\mathbf{r}_{O_iC_i}$  为连杆  $i$  的质心  $C_i$  在连杆坐标系  $\{i\}$  中的空间矢量.

由于腕部 3 个关节的轴线两两垂直,  $\mathbf{r}_{O_0O_i}$  可以表示为

$$\mathbf{r}_{O_0O_i} = \sum_{j=0}^{i-1} d'_j \mathbf{Z}_j \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{Z}_j$  为连杆坐标系  $\{j\}$  的  $\mathbf{Z}$  轴矢量;  $d'_j$  为相邻连杆坐标系的坐标原点之间的距离, 如图 4 所示; 由于坐标原点  $O_0$  和  $O_1$  重合, 所以  $d'_0 = 0$ ; 同时由图 2 所示参数可知,  $d'_1 = d_5$ ,  $d'_2 = d_6$ .

质心  $C_i$  点在连杆坐标系  $\{i\}$  中可表示为

$$\mathbf{r}_{O_iC_i} = \beta_{ix} \mathbf{X}_i + \beta_{iy} \mathbf{Y}_i + \beta_{iz} \mathbf{Z}_i \quad (4)$$

将式 (2) ~ (4) 代入式 (1) 中得到:

$$\mathbf{r}_{O_0C} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^3 m_i \left[ \sum_{j=0}^{i-1} (d'_j \mathbf{Z}_j) + \beta_{ix} \mathbf{X}_i + \beta_{iy} \mathbf{Y}_i + \beta_{iz} \mathbf{Z}_i \right] \quad (5)$$

整理得到:

$$\mathbf{r}_{O_0C} = \sum_{i=1}^3 (\gamma_{ix} \mathbf{X}_i + \gamma_{iy} \mathbf{Y}_i + \gamma_{iz} \mathbf{Z}_i) \quad (6)$$

式中:  $\gamma_{ix}$ 、 $\gamma_{iy}$  和  $\gamma_{iz}$  称为 scaled length<sup>[13]</sup>, 为包含了机械臂的结构尺寸和质量分布参数的常量.

由 7-DOF 空间机械臂的结构特点, 可以假设图 4 所示的连杆 2 和连杆 3 的质量分布是沿轴线对称的, 即连杆 2 的质心  $C_2$  和连杆 3 的质心  $C_3$  分别在坐标轴  $\mathbf{Z}_2$  和  $\mathbf{Z}_3$  上, 则有:

$$\beta_{2x} = \beta_{2y} = 0, \quad \beta_{3x} = \beta_{3y} = 0 \quad (7)$$

将式 (7) 代入到式 (6), 并将  $\mathbf{X}_i$ 、 $\mathbf{Y}_i$  和  $\mathbf{Z}_i$  变换到基坐标系中, 整理得到

$$\mathbf{r}_{O_0C} = \delta_1 \mathbf{X}_0 + \delta_2 \mathbf{Y}_0 + \delta_3 \mathbf{Z}_0 \quad (8)$$

式中:  $\delta_1 = \frac{m_3 \beta_{3z}}{M} \cos \theta_2$ ,  $\delta_2 = \frac{m_2 \beta_{2z} + m_3 d'_2}{M}$ ,  $\delta_3 = \frac{m_2 + m_3}{M} d'_1 - \frac{m_3 \beta_{3z}}{M} \sin \theta_2$ .

$\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  分别为  $\mathbf{r}_{O_0C}$  在基坐标轴  $\mathbf{X}_0$ 、 $\mathbf{Y}_0$  和  $\mathbf{Z}_0$  上的投影分量. 由于包含了腕部关节的角度信息, 因而随机械臂的运动而变化, 是变量.

如图 4 所示, 在  $O_0$  点正上方 (沿重力场  $\mathbf{g}$  的反方向) 距离为  $d$  的空间  $P$  点 (称为弹簧悬挂点) 和质心  $C$  点之间安装一根弹簧, 其刚度系数为  $k$ . 以平面  $X_0O_0Y_0$  为零势能平面, 系统的重力势能可表示为

$$V_g = M \mathbf{g} \cdot \mathbf{r}_{O_0C} = M g \delta_3 \quad (9)$$

式中:  $Mg$  为系统重力;  $\mathbf{g}$  为重力场的单位矢量, 由图 4 可知  $\mathbf{g} = \mathbf{Z}_0$ .

为了便于计算弹簧的弹性势能, 假设所采用的弹簧为零初长弹簧, 即弹簧所受拉力为 0 时, 弹簧的长度为 0; 在实际系统中, 零初长弹簧常采用非零初长弹簧、滑轮和钢丝绳来实现<sup>[15]</sup>. 如图 4 所示, 弹簧的弹性势能为

$$V_s = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} k \|\mathbf{r}_{PC}\|^2 = \frac{1}{2} k \|\mathbf{r}_{O_0C} - \mathbf{r}_{O_0P}\|^2 \quad (10)$$

式中:  $x$  为弹簧的伸长量, 即为空间  $P$  点和质心  $C$  点之间的距离;  $\mathbf{r}_{O_0P}$  为坐标原点  $O_0$  到  $P$  点的空间矢量, 由图 4 可知  $\mathbf{r}_{O_0P} = -d \mathbf{Z}_0$ .

将式 (8) 代入式 (10), 则系统的弹性势能为

$$V_s = \frac{1}{2} k [\delta_1^2 + \delta_2^2 + (\delta_3 + d)^2] \quad (11)$$

由式 (9) 和 (11) 得到系统总势能为

$$V = V_g + V_s = M g \delta_3 + \frac{1}{2} k [\delta_1^2 + \delta_2^2 + (\delta_3 + d)^2] \quad (12)$$

将式 (8) 中的  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  代入式 (12), 则系统的总势能为

$$V = \frac{m_3 \beta_{3z}}{M} [k(d'_1 + d) - M g] \sin \theta_2 + V_0 \quad (13)$$

式中:  $V_0$  为只包含机械臂结构和质量参数的常量.

要使机械臂在任何构型下都能够达到平衡, 系统总势能必须为常量<sup>[9]</sup>. 选取弹簧的刚度系数  $k = M g / (d'_1 + d)$ , 可使  $V \equiv V_0$ , 从而实现系统在任意位置的静平衡. 由文 [13] 可知, 要实现腕部 3 自由度机械臂的重力补偿, 理论上总共需要添加的弹簧数目为  $n + 1 = 4$  ( $n = 3$  为系统自由度), 那么所设计

的腕部静平衡机构将十分复杂. 本文针对 7-DOF 空间机械臂的结构特点和腕部关节 5 轴线位于铅垂方向的安装方式, 同时合理地假设连杆 2 和连杆 3 的质量分布沿轴线对称, 只采用一根弹簧实现了腕部静平衡机构的设计.

为了定位腕部 3 自由度机械臂的系统质心, 需要添加两段辅助连杆, 如图 4 所示. 连杆 2 和辅助连杆 1 则固定于 A 点. 由于关节 3 具有旋转运动的要求, 所以连杆 3 与辅助连杆 2 之间采用轴承进行连接, 即图 4 中 B 点. 因此, 所设计的腕部静平衡机构主要包括: 特制轴承、弹簧和固定架等, 如图 5(a) 所示. 特制轴承的初步设计方案如图 5(b) 所示, 一端与连杆 2 固定, 另一端用于托住末端执行器以减小关节 3 输出轴所受的弯矩. 图 5(a) 所示为系统质心 C 点位于实际物理结构外部的设计方案. 如果质心 C 点位于物理结构内部, 则可以采用质心点正上方的其它点代替, 具体设计可参考文 [15]. 弹簧悬挂点 P 设计在与关节 1 固连的固定架上, 同时设计有一个被动旋转副, 使之可垂直转动, 其转动轴线与关节 1 同轴.

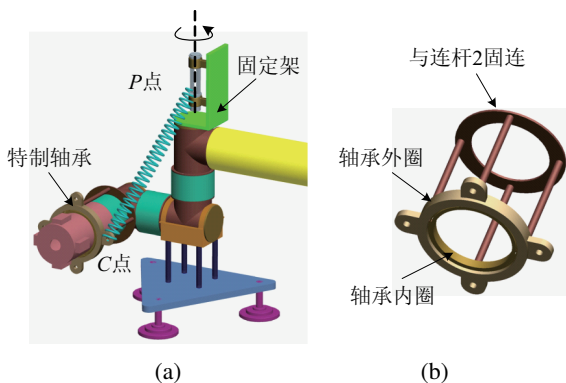


图 5 腕部静平衡机构与特制轴承  
Fig.5 Static balancing mechanism and special bearing in the wrist

基于上述相同的方法可以设计肩部静平衡机构, 同样只需要采用一根弹簧即可以实现 7-DOF 空间机械臂肩部关节 1 和关节 2 的重力补偿. 由于 7-DOF 空间机械臂的腕部与肩部是对称的, 因此肩部静平衡机构与腕部的完全相同, 包括弹簧刚度系数、弹簧悬挂点以及系统质心等.

综上所述, 利用如图 3 所示的地面微重力实验系统, 能够克服自身重力产生的关节负载转矩, 从而实现 7-DOF 空间机械臂的重力补偿. 但是, 受限于所设计的静平衡机构, 7-DOF 空间机械臂的各个关节只能在一定关节角范围内运动, 具体如表 2 所示 (以图 3 所示的位形为初始位形).

表 2 7-DOF 空间机械臂的各关节运动范围

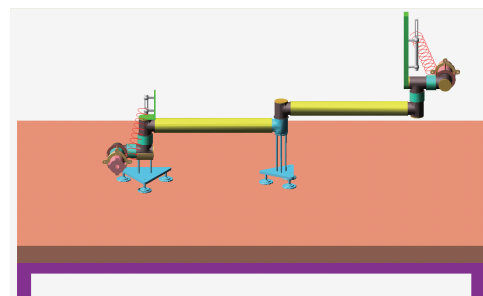
Tab.2 Each joint range of the 7-DOF space robotic manipulator

joint <i>i</i>	joint range / (°)
1	-160 ~ 160
2	-80 ~ 80
3	-160 ~ 160
4	-160 ~ 160
5	-120 ~ 120
6	-80 ~ 80
7	-160 ~ 160

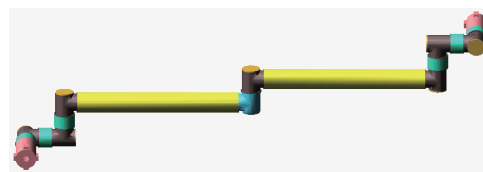
## 4 仿真研究 (Simulation study)

### 4.1 仿真模型

利用 ADAMS 软件建立 7-DOF 空间机械臂的重力补偿的仿真模型, 如图 6(a) 所示. 其中 7-DOF 空间机械臂、静平衡机构的杆件通过 Pro/Engineer 建模得到, 导入到 ADAMS 软件中, 其质量属性与动力学参数在 ADAMS 软件中设置; 然后加入两根弹簧, 每根弹簧的一端连接在点 P 处, 另一端连接到相应系统的质心 C 点, 并设置弹簧的刚度系数以及初始长度为 0.



(a) Simulation model with  $g = 9.8$



(b) Simulation model with  $g = 0$

图 6 7-DOF 空间机械臂的仿真模型

Fig.6 Simulation models of the 7-DOF space robotic manipulator

具体仿真模型中, 7-DOF 空间机械臂的质量参数为: 各关节质量约为 50kg, 末端执行器 60kg, 两段臂杆分别为 40kg; 其结构尺寸为:  $a_3 = a_4 = 4\text{ m}$ ,  $d_2 = d_3 = d_4 = d_5 = d_6 = 0.5\text{ m}$ ,  $d_1 = d_7 = 0.8\text{ m}$ . 以腕部静平衡机构为例, 连杆 2 和连杆 3 的质量分别为 50kg 和 60kg, 取弹簧悬挂点 P 距坐标原点  $O_0$  点的距离为  $d = 0.3\text{ m}$ , 又有  $d'_1 = d_5 = 0.5\text{ m}$ , 所以  $d'_1 + d =$

0.8 m, 这样就得到弹簧刚度系数:  $k = Mg/(d + d'_1) = 1.3475 \text{ N/mm}$ .

同时, 在 ADAMS 软件中建立 7-DOF 空间机械臂的失重模型, 设置重力加速度  $g$  为 0, 如图 6(b) 所示. 为了便于比较研究, 失重模型中也将关节 2 与基座固连.

### 4.2 仿真结果分析

针对图 6 所建立的两两种仿真模型, 使各关节以如图 7 所示的角速度运动, 测得各关节所需的驱动力矩, 如图 8 所示.

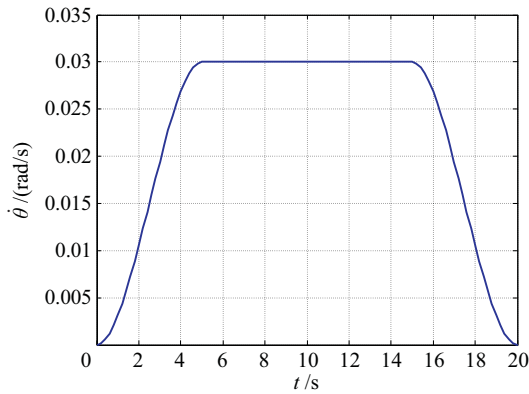
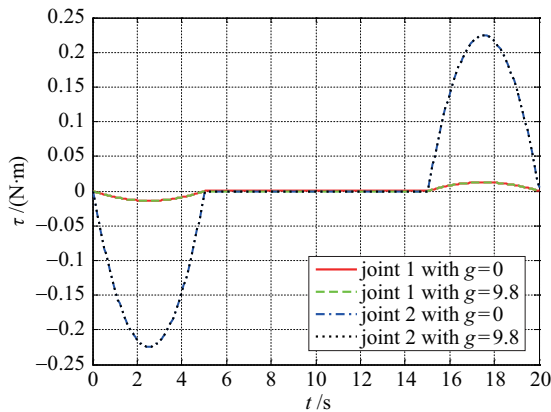
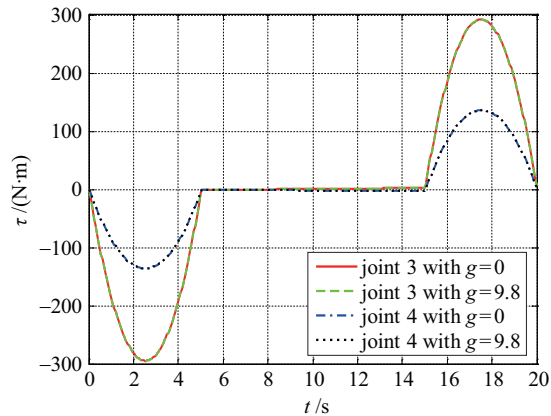


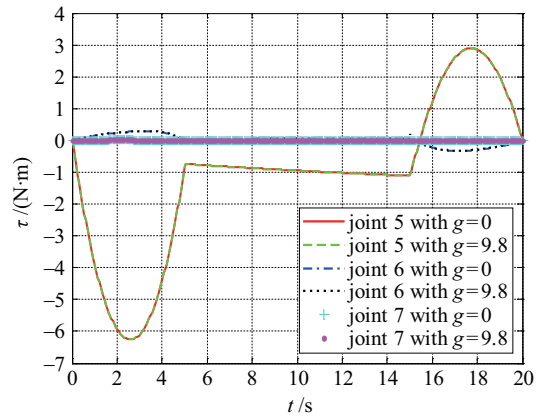
图 7 各关节运动的角速度曲线  
Fig.7 Angular velocity curve of each joint



(a) 关节 1 和关节 2 的力矩曲线



(b) 关节 3 和关节 4 的力矩曲线



(c) 关节 5、关节 6 和关节 7 的力矩曲线

图 8 7-DOF 空间机械臂的关节力矩曲线

Fig.8 Joint torque curves of the 7-DOF space robotic manipulator

由图 8 所示的仿真结果可知: 在重力环境中, 通过重力补偿, 可使各关节所需的关节驱动力矩曲线与失重环境下的几乎重合. 因此, 从关节输出力矩的角度来看, 可以认为该方法使整个 7-DOF 空间机械臂处于失重状态.

虽然关节和末端执行器理论上可以设计为质量分布沿轴线对称, 但是实际样机中由于材料、加工以及装配等原因会导致系统质心偏离轴线, 因此实际的 7-DOF 空间机械臂无法严格满足以下条件: ① 连杆 (图 4 中连杆 2 和连杆 3) 的质量分布沿轴线对称; ② 准确地获得质心  $C$  点的位置. 考虑到上述两个条件不满足时将严重影响关节 6 (关节 2) 所需的关节驱动力矩, 而对其他关节的影响较小 (如关节 1、关节 5 和关节 7), 或几乎不受影响 (如关节 3 和关节 4), 因而本文重点针对上述两个条件不满足时对关节 6 (关节 2) 的影响开展相关的研究工作.

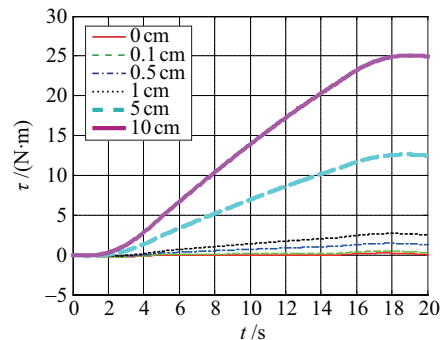


图 9 连杆质心偏离轴线不同距离时关节力矩曲线

Fig.9 Joint torques with different distance from link mass center to joint Z-axis

以腕部静平衡机构为例, 图 9 所示为连杆质心偏离轴线不同距离时关节 6 的力矩输出曲线. 由仿真结果可知: 在连杆质心偏离轴线的距离小于 1 cm

时, 两种仿真模型(即重力补偿模型与失重模型)中关节 6 的力矩曲线较为接近; 当连杆质心偏离轴线的距离达到 10 cm 时, 重力补偿模型中关节 6 的力矩将远大于失重模型的关节力矩, 最大关节力矩达到 25 N·m.

图 10 所示为弹簧连接点(图 4 中 C 点)与系统真实质心存在不同偏差时关节 6 的力矩输出曲线. 由仿真结果可知: 当偏差小于 1 cm 时, 两种仿真模型(即重力补偿模型与失重模型)中关节 6 的力矩曲线较为接近; 当偏差超过 5 cm 时, 两种仿真模型下关节 6 的力矩曲线相差较大; 当偏差达到 10 cm 时, 重力补偿模型下关节 6 的最大力矩达到 70 N·m, 将远大于失重时所需的关节力矩.

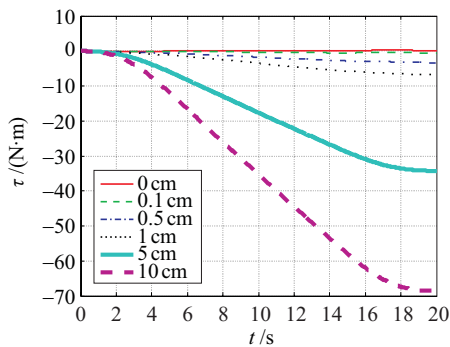


图 10 弹簧连接点偏离系统真实质心不同距离时关节力矩曲线

Fig.10 Joint torques with different distance from spring attachment point to system center mass

由图 9 和图 10 的结果可知: 当连杆质心偏离轴线的距离或弹簧连接点偏离系统真实质心的距离超过 1 cm 时, 所设计的腕部静平衡机构难以实现理想的重力补偿效果; 但是, 只要偏差距离小于 10 cm, 关节 6 的驱动力矩就不超过 100 N·m. 由于大型空间机械臂关节的最大输出力矩往往可以达到 1000 N·m, 因此, 虽然在实际的系统中难以实现理想的重力补偿效果, 但是只要偏差距离在 10 cm 以内, 仍然能够在重力环境中实现 7-DOF 空间机械臂的 3 维运动. 在这种情况下, 为了达到更好的重力补偿效果, 可以采用高精度质心测量方法<sup>[16]</sup>测得实际样机的质心, 同时采用适当的配重, 使系统质心尽量靠近轴线; 此外, 还可以将弹簧连接点(即图 4 中 C 点)设计为可调节的, 即增加一个机构使弹簧连接点沿轴线 X、Y 和 Z 具有一定的调节范围, 从而使弹簧连接点尽可能与系统质心重合.

## 5 结论 (Conclusion)

(1) 本文针对 7-DOF 空间机械臂的结构特点, 提出了基于气浮和静平衡的地面微重力混合模拟方

法. 该方法将 7-DOF 空间机械臂的 7 自由度复杂运动分解为 5 自由度和 2 自由度的组合运动. 7-DOF 空间机械臂的中间段采用气浮法实现重力补偿, 而两端的肩部和腕部则采用静平衡机构实现重力补偿.

(2) 在相关连杆的质量分布沿轴线对称的合理假设下, 所设计的腕部(肩部)静平衡机构只需要一根弹簧, 极大地降低了系统复杂度. 此外, 由于所设计的弹簧机构质量较轻, 额外增加的惯量较小.

(3) 在实际系统中, 当连杆质心偏离轴线的距离或弹簧连接点偏离系统真实质心的距离小于 1 cm 时, 所提出的重力补偿方法能够达到较好的重力补偿效果. 当偏差距离超过 1 cm, 但是小于 10 cm 时, 所设计的地面微重力实验系统虽然无法达到理想的重力补偿效果, 但是仍然能够实现 7-DOF 空间机械臂的 3 维运动, 可用于末端定位精度测试等相关问题的研究.

(4) 本文所取得的研究成果将为 7-DOF 空间机械臂地面微重力实验系统的搭建提供理论基础. 下一步将进一步细化静平衡机构与特制轴承的设计, 并研究系统质心测量与配平方法.

## 参考文献 (References)

- [1] Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J, et al. ROTEX – The first remotely controlled robot in space[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1994: 2604-2611.
- [2] 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 [J]. 机器人, 2009, 31(1): 88-96.  
Xu W F, Liang B, Li C, et al. A review on simulated microgravity experiment systems of space robot[J]. Robot, 2009, 31(1): 88-96.
- [3] Russakow J, Rock S M, Khatib O. An operational space formulation for a free-flying, multi-arm space robot[C]//4th International Symposium on Experimental Robotics. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1997: 448-457.
- [4] 高海波, 郝峰, 邓宗全, 等. 空间机械臂收拢状态零重力模拟 [J]. 机器人, 2011, 33(1): 9-15.  
Gao H B, Hao F, Deng Z Q, et al. Zero-g simulation of space manipulator in furling status[J]. Robot, 2011, 33(1): 9-15.
- [5] Gefke G G, Carignan C R, Roberts B J, et al. Ranger telerobotic shuttle experiment: Status report[C]//Proceedings of SPIE: vol.4570. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2001: 123-132.
- [6] Nechyba M C, Xu Y S. Human-robot cooperation in space: SM<sup>2</sup> for new space station structure[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1995, 2(4): 4-11.
- [7] 李成, 梁斌. 基于事件的 EMR 遥操作自适应规划与控制方法 [J]. 航天控制, 2001, 19(3): 17-22.  
Li C, Liang B. Event-based adaptive planning and control method for EMR teleoperation[J]. Aerospace Control, 2001, 19(3): 17-22.

降低机身质心运动范围, 增强运动的稳定性; 同时, 对于通过调节充气加压时间来改变弹跳腿跳跃高度的控制方法, 该方法也可以起到补充作用. 未来将在弹跳腿水平及自由跳跃<sup>[1]</sup>运动中进行研究应用.

### 参考文献 (References)

- [1] Raibert M H. Legged robot that balance[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1986.
- [2] Raibert M H, Chepponis M, Brown Jr H B. Running on four legs as though they were one[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2(2): 70-82.
- [3] Raibert M H, Brown Jr H B, Chepponis M. Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine[J]. International Journal of Robotics Research, 1984, 3(2): 75-92.
- [4] Naik K G, Mehrandehz M. Control of a one-legged hopping robot using an inverse dynamic-based PID controller[C]// Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 770-773.
- [5] Alexander R M. Three uses for springs in legged locomotion[J]. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(2): 53-61.
- [6] 赵明国, 裘有斌, 陈向, 等. 单足气动跳跃机器人的基于时间事件控制方法 [J]. 机器人, 2012, 34(5): 525-530.
- Zhao M G, Qiu Y B, Chen X, et al. Control algorithm based on time event for a pneumatic single-legged hopping robot[J]. Robot, 2012, 34(5): 525-530.

- [7] 吴振顺. 气压传动与控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- Wu Z S. Pneumatic drive and control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999.
- [8] 李建藩. 气压传动系统动力学 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1991.
- Li J F. Dynamics of pneumatic drive system[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1991.
- [9] Karpenko M, Sepehri N. Design and experimental evaluation of a nonlinear position controller for a pneumatic actuator with friction[C]//American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 5078-5083.
- [10] Richer E, Hurmuzlu Y. A high performance pneumatic force actuator system. Part-I. Nonlinear mathematical model[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2000, 122(3): 416-425.
- [11] Richer E, Hurmuzlu Y. A high performance pneumatic force actuator system. Part-II. Nonlinear controller design[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2000, 122(3): 426-434.

### 作者简介:

- 李 哲 (1961-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 气动技术基础理论, 仿生机器人技术, 机电一体化装备.
- 苏兴旺 (1987-), 男, 硕士生. 研究领域: 足式机器人, 气动位置伺服技术.

(上接第 305 页)

- [8] van Dorsser W D, Barents R, Wisse B M, et al. Gravity-balanced arm support with energy-free adjustment[J]. Journal of Medical Devices, 2007, 1(2): 151-158.
- [9] Lu Q, Ortega C, Ma O. Passive gravity compensation mechanisms: Technologies and applications[J]. Recent Patents on Engineering, 2011, 5(1): 32-44.
- [10] Ulrich N, Kumar V. Passive mechanical gravity compensation for robot manipulators[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1991: 1536-1541.
- [11] Banala S K, Agrawal S K, Fattah A, et al. Gravity-balancing leg orthosis and its performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(6): 1228-1239.
- [12] Rizk R, Krut S, Dombre E. Design of a 3D gravity balanced orthosis for upper limb[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 2447-2452.
- [13] Agrawal S K, Fattah A. Gravity-balancing of spatial robotic manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(12): 1331-1344.
- [14] 杨明远, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 七自由度空间机械臂避障路

径规划方法 [J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 65-71.

Yang M Y, Sun H X, Jia Q X, et al. Research on path planning for 7-DOF space manipulator to avoid obstacle[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 65-71.

- [15] Herder J L. Energy-free systems, theory, conception and design of statically balanced spring mechanisms[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2001.
- [16] 卢志辉, 孙志扬, 李祥云, 等. 高精度质心测量方法研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(12): 1748-1752.
- Lu Z H, Sun Z Y, Li X Y, et al. Research on high precision measurement of centroid[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(12): 1748-1752.

### 作者简介:

- 叶 平 (1979-), 男, 讲师, 博士. 研究领域: 空间机器人容错控制, 移动机器人视觉定位.
- 何 雷 (1988-), 男, 硕士生. 研究领域: 空间机器人微重力补偿, 宇航员失重训练.
- 宋 爽 (1989-), 女, 硕士生. 研究领域: 空间机器人微重力补偿, 宇航员抗阻力训练.