

DOI: 10.3724/SP.J.1218.2011.00009

空间机械臂收拢状态零重力模拟

高海波^{1,2}, 郝峰^{1,2}, 邓宗全^{1,2}, 刘振^{1,2}, 丁亮^{1,2}, 岳洪浩^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学宇航空间机构及控制国防科工委重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 利用吊丝配重法进行零重力模拟装置的结构设计, 结合重力补偿原理推导出空间机械臂分离体静力学重力补偿计算公式, 同时采用最小方差原理将多个力矩的优化问题转化为一个总体目标, 建立了吊点力优化程序, 通过该优化程序得到各吊点力的数值. 当吊丝长度为 1 000 mm 时, 利用 ADAMS 建立空间机械臂零重力模拟装置模型. 当空间机械臂为静止状态时, 吊点优化计算结果与仿真值相比, 结果相对误差在 10% 左右; 当空间机械臂各关节以 0.5°/s 和 1°/s 匀速运动时, 零重力模拟装置对其产生的附加弯曲力矩和附加反转力矩均未超过技术指标要求. 因此, 该方案可用于实际空间机械臂的零重力模拟.

关键词: 空间机械臂; 零重力模拟; 吊点力优化; ADAMS 仿真

中图分类号: TP24

文献标识码: B

文章编号: 1002-0446(2011)-01-0009-08

Zero-g Simulation of Space Manipulator in Furled Status

GAO Haibo^{1,2}, HAO Feng^{1,2}, DENG Zongquan^{1,2}, LIU Zhen^{1,2}, DING Liang^{1,2}, YUE Honghao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Aerospace Mechanism and Control Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The zero-g simulation device is designed by using suspender spring and counter weight, and the static gravity compensation formulas of space manipulator's detached body are deduced with gravity compensation theory. Based on the least minimum square theory, an optimization program of suspension force is developed, through which the optimization of multiple torques is transformed into the optimization of a whole target, and the numerical value of each suspension force can be obtained. The model of the zero-g simulation device of space manipulator is built in ADAMS when the length of suspender spring is 1 000 mm. Under the condition that the space manipulator is in stationary state, the relative errors between the optimization results and the simulation results are around 10%. And the bending torque and counter torque generated by the zero-g simulation device can meet the technical requirements when each joint of space manipulator moves at the constant angular speed of 0.5°/s and 1°/s. Therefore, this approach is suitable for zero-g simulation of space manipulator.

Keywords: space manipulator; zero-g simulation; optimization of suspension force; ADAMS simulation

1 引言 (Introduction)

空间机器人是人类探索太空活动的重要工具. 从安全、效率和费用角度出发, 它协助或者代替宇航员完成舱外工作, 在空间工作站的建立、维修^[1-2]等任务的完成中起着关键的作用. 空间机械臂是空间机器人系统的重要组成部分, 在 3 维太空零重力环境下工作. 在地面环境进行空间机械臂的相应实验研究需要模拟太空的零重力环境, 只能在地面通过零重力模拟的方法进行空间机械臂实验. 目前空间机械臂采用的地面零重力实验方法主要包括自由落体法、水浮法、气浮法和吊丝配重法等几种方法.

自由落体微重力实验方法是在微重力塔中利用自由落体运动得到微重力环境, 这种方法需要建造微重力塔, 费用昂贵, 并且在空间机械臂实验方面应用较少. 此种方法提供的微重力时间短, 可进行的实验内容有限. NASDA 在日本微重力实验室的微重力塔中进行过空间机械臂方面的实验研究^[3].

水浮方法是指在某种液体池 (一般为水池) 内模拟失重环境的地面仿真实验, 利用水或其他液体的浮力与重力相平衡. 这种方法能够模拟零重力环境, 但是机械臂在水浮环境中运动时需要克服水中较大的阻力. 此外, 为了实现机械臂在水中的功能

测试,对机械臂的密封性要求很高,需要对机械臂进行较大的改造,这种方法周期长,可靠性低,成本高.美国 Maryland 大学研制的 Ranger 地面实验系统采用的是水浮方法^[4].

气浮方法是采用气浮轴承,将空间机械臂托在平整光滑的平台上,利用喷气推力的反作用力抵消机械臂的重力.此种方法具有结构简单、建造周期短、费用低、易于实现等特点.但气浮平台仅适用于空间机械臂在 2 维空间内的功能测试,不能应用于 3 维空间的实验.加拿大斯帕公司研制的 SRMS 和 SSRMS 地面实验系统^[5]、美国 Stanford 大学开发的双臂自由飞行空间机器人系统^[6]、以及北京控制工程研究所建造的“空间智能机器人地面实验综合平台”^[7],均采用气浮方法进行相应的实验研究.

吊丝配重方法是采用悬吊的方式,通过滑轮组利用配重物的重力来补偿空间机械臂的重力,其基本原理是采用吊丝的竖直拉力来平衡空间机械臂的重力.此种方法系统复杂,但可用于空间机械臂 3 维空间的实验.美国 Carnegie Mellon 大学机器人所研制的 SM² 地面实验系统采用的就是吊丝配重法^[8-9],此外北京控制工程研究所对于基于时间的舱外自由移动机器人也采用了吊丝配重法^[10].

根据六自由度空间机械臂的结构和实验要求,本文采用能够模拟 3 维空间零重力环境的吊丝配重方法补偿系统.该实验系统由六自由度空间机械臂、支撑机构、吊丝、滑轮、配重块、拉力传感器和倾角传感器等组成,通过重力补偿方式调整配重块的质量改变吊丝的拉力,可在一定范围内实现对空间机械臂的零重力模拟.

2 零重力模拟方案 (Zero-g simulation approaches)

2.1 空间机械臂简介

空间机械臂收拢状态结构原理如图 1 所示.固定坐标系 $X_0Y_0Z_0$ 与基座固定,从根部依次为根部固定座 0、杆 1、杆 2、杆 3、杆 4、杆 5、杆 6,相邻杆件之间的连接为转动关节.

功能测试时,根部固定座 0 与固定在地面上的固定基座固定在一起,因此将其作为基座看待,其重力产生的影响完全由固定部位消除,因此不必考虑对根部固定座 0 进行重力补偿,只需补偿各杆件的重力即可实现对空间机械臂的零重力模拟,此外为规范名称,本文中根部固定座 0 与固定基座之间的固定副称作关节 0.

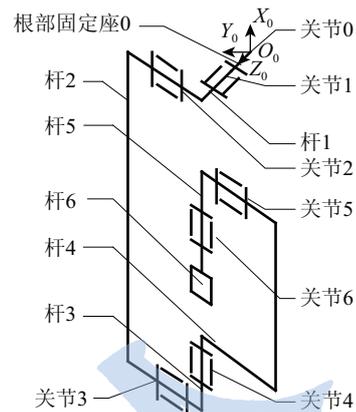


图 1 空间机械臂收拢状态结构原理图

Fig.1 Structural schematic diagram of space manipulator in furled status

2.2 零重力模拟方案讨论

由于空间机械臂具有 6 个活动的关节,而且结构复杂,需要将其分解为几个部分分别进行重力补偿以实现零重力模拟,每个部分构成一个补偿子系统.在水平面内,需要跟随各部分质心位置的变化,在竖直方向上,需要通过配重块的质量来控制吊丝的拉力.

所设计的零重力模拟方案应满足项目的技术指标要求:

(1) 空间机械臂在收拢状态下进行功能验证实验时,零重力模拟装置可实现各关节单独运动,且各关节最大运动角度范围是 $+\alpha$ 或 $-\alpha$.

(2) 零重力模拟装置对空间机械臂各关节所产生的附加弯曲力矩不得超过 P 、附加反转矩不得超过 Q .

综合考虑空间机械臂的特点和项目技术指标要求,讨论零重力模拟方案:

方案 1: 悬吊点分别通过各个杆件的质心,各吊丝提供的拉力为各杆件的重力,此时空间机械臂的重力可完全补偿.如图 2(a) 所示,杆件 1、3、5、6 的质心位于杆件上,而杆件 2、4 的质心位于杆件之外.虽然此种方案可以满足技术指标中模拟装置对空间机械臂的附加反转矩和弯曲力矩要求,但是难于实现对各杆件质心的吊装,故此方案实施性较差.

方案 2: 悬吊点分别通过各杆件的连接点——关节,如图 2(b) 所示.该方法避免了质心附近无法吊装的问题,但是某些杆件的重心位置与相邻悬挂点的连线偏离太远,经过计算可以得知,零重力模拟装置对空间机械臂产生的附加弯曲力矩超过 P ,难以符合项目技术指标的要求.

方案 3: 收拢状态的机械臂合理的悬吊位置有

关节 1、2、3、5 两侧；由于空间机械臂设计的特殊性，其杆件 1~3 和杆件 4~6 组成的杆组具有对称结构，它们的质量主要集中在杆件 2 和 4 上。结合以上因素，设计方案 3 如图 2(c) 所示。经过计算发现，四吊点方案零重力模拟装置对空间机械臂产生的附加弯曲力矩超过 P ，难以符合项目技术指标的要求。

方案 4：考虑到空间机械臂尺寸条件，在方案 3 的基础上，于关节 5 处增加一个顺时针方向的力矩以满足项目的技术指标要求，关节 5 附近的尺寸空间有限，故选择将配重块安装在杆 4 的外侧，如图 2(d) 所示。选择合理的吊点力和配重块质量，就可以满足项目技术指标中的力矩要求，此方案可行。

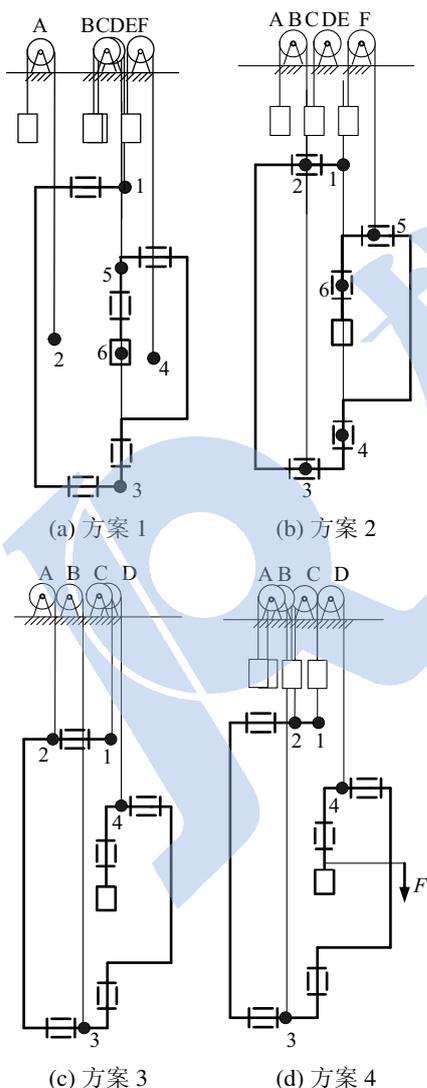


图 2 零重力模拟方案
Fig.2 The approaches of zero-g simulation

2.3 可行方案的说明和特制轴承

为了使空间机械臂在功能测试时可以实现 6 个关节单独运动，同时满足项目技术指标的要求，经

分析认定方案 4 为可行。零重力模拟装置中吊丝配重机构通过特制轴承安装在杆 1、2、3 的外圆柱面上，吊丝另一端通过定滑轮与配重块相连，以提供不同的吊丝拉力，定滑轮安装在零重力模拟装置的机架上。配重块通过锁紧机构安装在杆 5 外侧，以补偿吊丝拉力所产生的过余力矩，从而达到零重力模拟的目的。

吊丝和空间机械臂之间通过特制轴承连接，空间机械臂外轴安装于特制轴承内孔处，吊丝吊装于特制轴承上方吊爪处。特制轴承的原理与十字轴的原理相似，可以绕 X 轴和 Y 轴转动，即可以实现绕空间机械臂轴向和径向转动，确保吊点力始终通过机械臂轴线与特制轴承 Y 轴的交点，如图 3 所示。

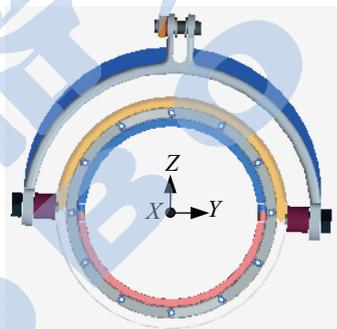


图 3 特制轴承
Fig.3 The special bearing

3 吊点力的优化 (Optimization of suspension force)

3.1 静力学分析

由于项目技术指标中要求空间机械臂在收拢状态下进行功能验证实验，零重力模拟装置可实现其各关节单独运动，且各关节最大运动角度范围是 $+\alpha$ 或 $-\alpha$ ， α 是一个很小的角度，并且关节运动的角速度很小，角加速度也很小，可以近似看作缓慢运动，所以对空间机械臂进行静力学分析，就能够满足项目的技术指标要求。各关节弯曲力矩的计算通式为

$$T_{i-1} = T_i + F_i \times l_i + m_{i-1} \times g \times d_{i-1} + C_i \times a_i + m_r \times g \times a_i \quad (1)$$

其中 T_i 为关节 i 的弯曲力矩， m_i 为杆件 i 的质量， $i=0,1,\dots,6$ ； F_i 为关节 i 与 $i+1$ 之间的关节力， C_i 为第 i 个吊丝提供的吊点力， l_i 为关节力 F_i 与关节 $i-1$ 之间的距离， d_i 为杆件 i 质心到关节 i 之间的距离， a_i 为吊点力 C_i 与关节 i 之间的距离， $i=1,\dots,5$ ； m_r 为特制轴承的质量。

现对空间机械臂的各个杆件分离体进行受力分析,如图4所示.

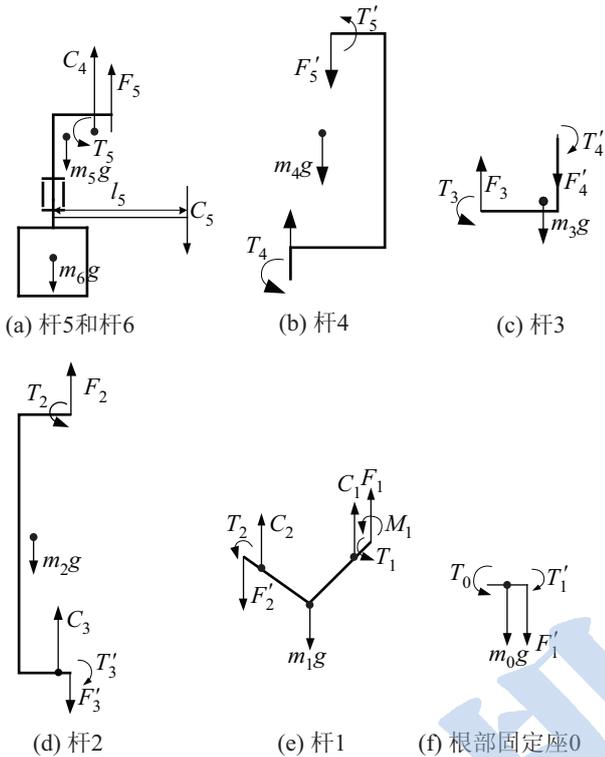


图4 分离体静力学分析图

Fig.4 The statics analysis of each detached body

由于项目技术指标中 α 很小,文中只分析了初始状态时收拢状态空间机械臂的受力情况.空间机械臂结构决定了零重力模拟装置对其关节 2~6 产生的附加反转矩很小,未将其纳入优化变量中,所以本文只优化计算了关节 1 的反矩.同理,零重力模拟装置对关节 6 产生的附加弯曲力矩也很小,亦未将其列为优化变量.

分别对以上 6 个部分列静力平衡方程得:

$$\begin{cases} T_5 = m_6 \times g \times d_6 + m_5 \times g \times d_5 + C_4 \times a_4 + \\ \quad C_5 \times a_5 + m_r \times g \times a_4 \\ T_4 = T_5 + F_5 \times l_5 + m_4 \times g \times d_{4-1} \\ T_3 = T_4 + F_4 \times l_4 + m_3 \times g \times d_3 \\ T_2 = T_3 + m_2 \times g \times d_2 + C_3 \times a_3 + \\ \quad m_r \times g \times a_2 \\ T_1 = F_2 \times l_2 + m_1 \times g \times d_1 + C_2 \times a_2 + \\ \quad C_1 \times a_1 + m_r \times g \times (a_1 + a_2) \\ T_0 = T_1 + F_1 \times l_1 + m_0 \times g \times d_0 \\ M_1 = T_2 + m_r \times g \times a_1 + m_1 \times g \times d_1 + \\ \quad F_2 \times l_1 + C_2 \times a_1 \end{cases} \quad (2)$$

3.2 优化计算基本思路

通过对空间机械臂的静力学分析,建立了力矩计算方程,即零重力方案数学模型.在所选择的方案中,机械臂关节数大于吊点数,所以此问题属于优化问题.为了优化各个吊点力,需要选择一个合适的目标函数,以使得零重力模拟装置对空间机械臂所产生的弯曲力矩和反转矩满足项目技术指标要求.为了简化问题,基于最小方差原理,多个力矩的优化问题转化为一个总体目标——各力矩平方和最小,多目标优化转化为单目标优化问题.

本文采用 MATLAB 中的非线性规划函数 `fmincon` 函数作为优化函数,设定优化目标函数为 $fun = T_0^2 + T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + T_4^2 + T_5^2 + M_1^2$, 限制条件为 $|M_1| < P, |T_i| < Q, i = 0, \dots, 5$.

根据此目标函数和限制条件,在 MATLAB 中编写吊点力优化程序,优化计算程序的主要流程如图 5 所示.其中 M_1 为关节 1 的反矩.

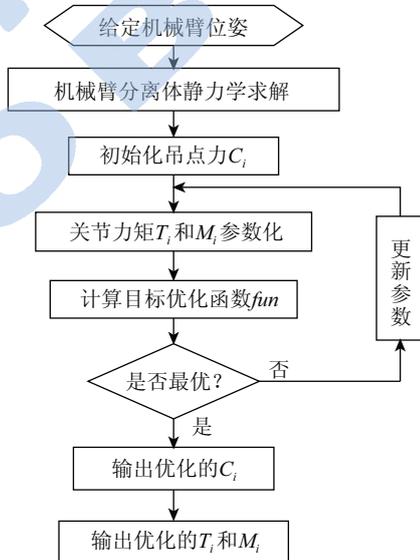


图5 fmincon 优化函数计算流程图

Fig.5 Flow chart of optimization for the fmincon function

3.3 吊点力优化结果

在优化计算时,本文规定零重力模拟装置对空间机械臂产生的附加力矩逆时针为正方向,相应的数值为正值,顺时针为负方向,相应的数值为负值.经过优化计算得出的吊点力、附加反转矩和附加倾覆力矩的优化结果为

$$\begin{aligned} C &= [26.5 \text{ N}, 136.3 \text{ N}, 89.2 \text{ N}, 78.9 \text{ N}, -45.1 \text{ N}]^T \\ T &= [-400.1 \text{ N} \cdot \text{mm}, 1067.0 \text{ N} \cdot \text{mm}, \\ &\quad 1349.2 \text{ N} \cdot \text{mm}, -2300.0 \text{ N} \cdot \text{mm}, \\ &\quad 3097.3 \text{ N} \cdot \text{mm}, -1461.2 \text{ N} \cdot \text{mm}]^T \end{aligned}$$

$$M_1 = -685.3 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

从计算结果可知，零重力模拟装置对空间机械臂各关节所产生的附加弯曲力矩未超过 P ，附加反转矩未超过 Q ，此优化方法可行。

4 零重力模拟的 ADAMS 仿真分析 (Zero-g simulation analysis in ADAMS)

4.1 仿真模型

在 ADAMS 动力学仿真软件中建立空间机械臂的零重力模拟模型，如图 6 所示，空间机械臂的 3 维模型通过 Pro/Engineer 建模得到，然后通过 Pro/Engineer 与 ADAMS 的接口软件导入 ADAMS 中，其质量属性和动力学参数等都与空间机械臂实物模型相同。

本文所设计的零重力模拟装置中采用固定吊点来提供吊点力，关节运动时吊丝与空间机械臂之间存在一定的角度 θ ，这个角度影响着空间机械臂所受到的补偿拉力的大小，也就是说会影响到零重力模拟的效果。假设吊丝长度为 L ，空间机械臂上的吊点 2 与吊点 1 之间的距离为 S ，当关节 1 顺时针转动 α 时，吊丝 2 和竖直方向形成的角度为 θ 。角度形成时，吊丝 2 对空间机械臂提供的拉力为 C'_2 ，如图 6 所示。

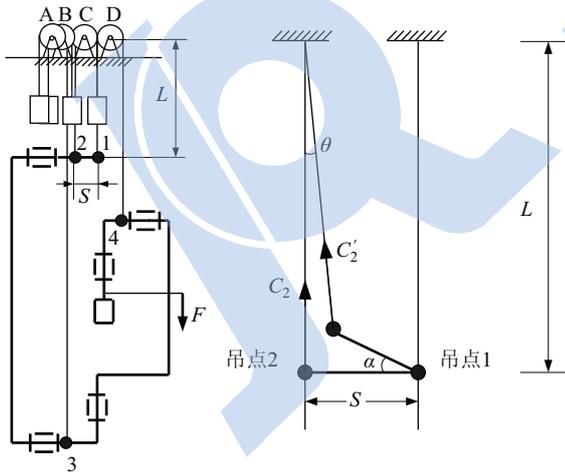


图 6 角度 θ 推导示意图

Fig.6 Sketch chart of deducing for θ

角度 θ 与吊丝长度 L 和吊点之间距离 S 的关系为

$$\cos \theta = \left[1 + \frac{S^2 (\cos^2 \alpha - \cos \alpha + 1)}{(L - S \sin \alpha)^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由式 (3) 可见，当 L 越大时， $\cos \theta$ 越接近 1，而 $C'_2 = C_2 \times \cos \theta$ ，即 C'_2 越接近 C_2 。

在 ADAMS 模型中选择的吊丝长度 L 为 1 m，建立零重力模拟装置模型，观察仿真结果。

4.2 仿真结果

在 ADAMS 中，在静止状态下，测量零重力模拟装置对空间机械臂各关节所产生的附加弯曲力矩和附加反转矩，如图 7 所示。

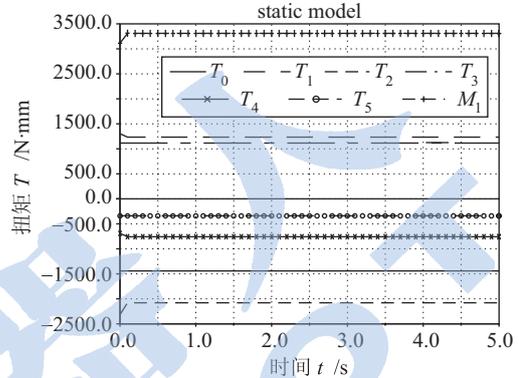


图 7 静止状态 T_i 和 M_1 变化曲线

Fig.7 The curve of T_i and M_1 in stationary state

针对上文所建立的 ADAMS 模型，使其各关节以 $\omega_1 = 0.5^\circ/\text{s}$ 的速度匀速运动，关节单独运动可达位移为 $+\alpha$ 或 $-\alpha$ 。测量各个关节单独运动时，其他关节的附加弯曲力矩和附加反转矩的变化。关节 5、6 单独运动时，其他关节的附加弯曲力矩和关节 1 附加反转矩的变化很小，因此文中未给出其变化曲线。

当关节 1、2 分别以 $\omega_1 = 0.5^\circ/\text{s}$ 的速度匀速运动时，其他关节的附加弯曲力矩和关节 1 附加反转矩变化曲线如图 8、9 所示。

当关节 3、4 分别以 $\omega_1 = 0.5^\circ/\text{s}$ 的速度匀速运动时，其他关节的附加弯曲力矩和关节 1 附加反转矩变化曲线如图 10、11 所示。

在上文所建立的 ADAMS 模型中，赋予各关节以 $\omega_2 = 2^\circ/\text{s}$ ， $\omega_1 = 1^\circ/\text{s}$ 的速度匀速运动，关节单独运动可达位移为 $+\alpha$ 或 $-\alpha$ 。测量各个关节单独运动时，其他关节的附加倾覆力矩和附加反转矩的变化。关节 5、6 单独运动时，其他关节的附加弯曲力矩和关节 1 附加反转矩的变化很小，故文中未给出其变化曲线。

当关节 1、2 分别以 $\omega_2 = 1^\circ/\text{s}$ 的速度匀速运动时，其他关节的附加弯曲力矩和关节 1 附加反转矩变化曲线如图 12、13 所示。

当关节 3、4 分别以 $\omega_2 = 1^\circ/\text{s}$ 的速度匀速运动时，其他关节的附加弯曲力矩和关节 1 附加反转矩变化曲线如图 14、15 所示。

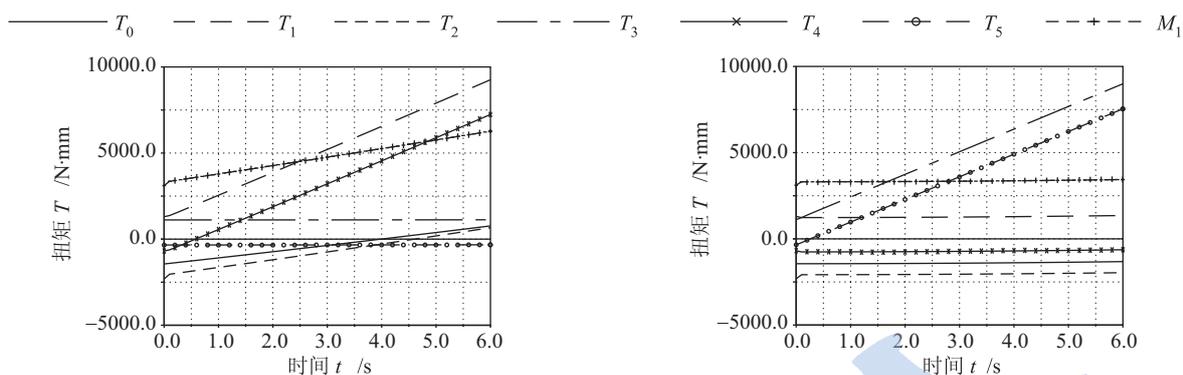


图8 关节1以 ω_1 单独运动时 T_i 和 M_1 的变化曲线
Fig.8 The curve of T_i and M_1 when joint 1 moves at the angular speed of ω_1 separately

图9 关节2以 ω_1 单独运动时 T_i 和 M_1 的变化曲线
Fig.9 The curve of T_i and M_1 when joint 2 moves at the angular speed of ω_1 separately

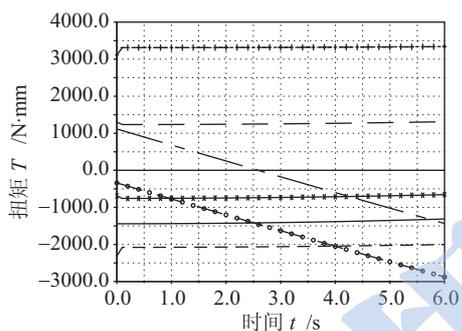


图10 关节3以 ω_1 单独运动时 T_i 和 M_1 的变化曲线
Fig.10 The curve of T_i and M_1 when joint 3 moves at the angular speed of ω_1 separately

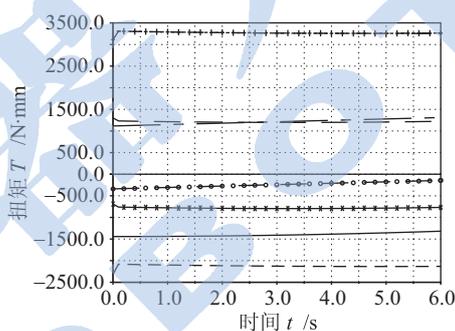


图11 关节4以 ω_1 单独运动时 T_i 和 M_1 的变化曲线
Fig.11 The curve of T_i and M_1 when joint 4 moves at the angular speed of ω_1 separately

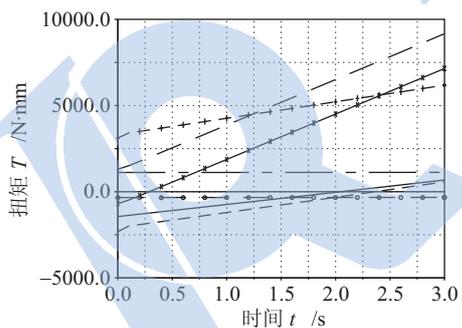


图12 关节1以 ω_2 单独运动时 T_i 和 M_1 的变化曲线
Fig.12 The curve of T_i and M_1 when joint 1 moves at the angular speed of ω_2 separately

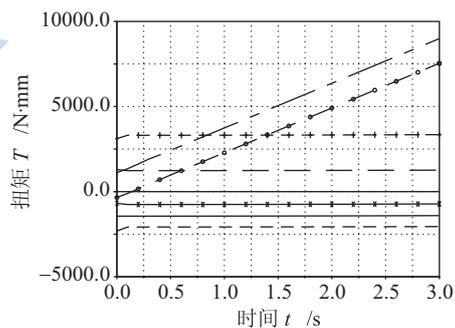


图13 关节2以 ω_2 单独运动时 T_i 和 M_1 的变化曲线
Fig.13 The curve of T_i and M_1 when joint 2 moves at the angular speed of ω_2 separately

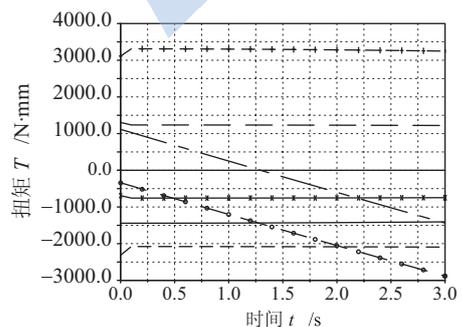


图14 关节3以 ω_2 单独运动时 T_i 和 M_1 的变化曲线
Fig.14 The curve of T_i and M_1 when joint3 moves at the angular speed of ω_2 separately

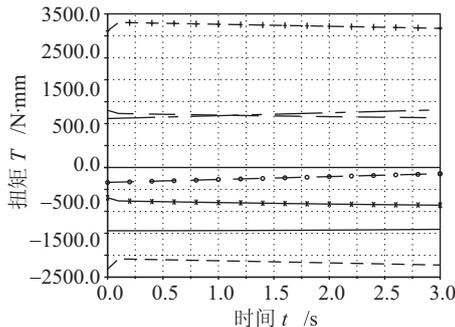


图15 关节4以 ω_2 单独运动时 T_i 和 M_1 的变化曲线
Fig.15 The curve of T_i and M_1 when joint 4 moves at the angular speed of ω_2 separately

综上, 不仅当机械臂静止时低重力模拟方案能够满足项目技术指标要求, 而且当机械臂以一定角速度转动时低重力模拟方案也能够满足项目技术指标要求。

4.3 优化与仿真结果的对比与分析

在 ADAMS 中测量出静止状态空间机械臂零重力模拟各关节附加弯曲力矩和关节 1 的附加反转矩数值, 与 MATLAB 优化计算结果比较见表 1。可以得出: 相对误差在允许的范围内, 优化程序计算结果和 ADAMS 仿真结果相似, 可以将此优化结果用于空间机械臂—吊丝配重的零重力补偿计算中。

表 1 静止状态空间机械臂各关节附加弯曲力矩与附加反转矩零重力模拟优化计算结果与仿真结果的对比

Tab.1 The comparison between optimization results and simulation results of bending torque and counter torque of space manipulator joints in stationary state

	优化计算值 /N·mm	ADAMS 仿真测量值 /N·mm	前者和后者的差值 /N·mm	相对误差 /%
M_1	3 097.3	3 310.4	213.1	6.9
T_0	-1 461.2	-1 442.1	19.1	1.3
T_1	-2 300.0	-2 079.0	221.0	9.6
T_2	1 067.0	1 115.7	48.7	4.6
T_3	1 349.2	1 234.3	-114.9	8.5
T_4	-685.3	-758.2	-72.9	10.6
T_5	-400.1	-339.1	61.0	1.5

从图 8 ~ 15 中可以看出, 零重力模拟装置虽然无法完全模拟太空零重力场环境, 但零重力模拟装置产生的附加弯曲力矩小于 P 且附加反转矩的值小于 Q , 能够符合项目技术指标的要求。

5 结论 (Conclusion)

根据空间机械臂项目技术指标的要求, 本研究并建立了空间机械臂零重力模拟装置模型, 并对其进行了 ADAMS 动力学仿真分析。本文的研究有如下特点:

(1) 针对根部固定空间机械臂收拢状态的运动学和动力学特点, 建立了空间机械臂分离体静力学分析模型。

(2) 提出了空间机械臂零重力模拟装置的吊丝配重优化布丝方案, 并以优化程序验证了方案的合理性。

(3) 利用优化计算得到的吊点力数值进行了仿真验证, 仿真结果表明零重力模拟装置对各个关节

的附加弯曲力矩和附加反转矩值均满足项目要求。验证了低重力模拟方案和吊点力数值的可行性。

参考文献 (References)

- [1] Dubowsky S, Papadopoulos E. The kinematics, dynamics, and control of free-flying and free-floating space robotic system[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 531-543.
- [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. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1994: 2604-2611.
- [3] Preusche C, Reintsema D, Landzettel K, et al. Robotics component verification on ISS ROKVISS – Preliminary results for telepresence[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 4595-4601.
- [4] 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.
- [5] 孙汉旭, 王凤翔. 加拿大、美国空间机器人研究情况 [J]. 航天技术与民品, 1999(4): 33-35.
Sun Hanxu, Wang Fengxiang. The researches of space robot in USA and Canada[J]. Space Technology and Civilian Products, 1999(4): 33-35.
- [6] 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.
- [7] 梁斌, 刘良栋, 陈建新, 等. 舱外自由移动机器人系统 [J]. 控制工程, 2001(5/6): 91-100.
Liang Bin, Liu Liangdong, Chen Jianxin, et al. Extravehicular free-moving robot system[J]. Control Engineering of China, 2001(5/6): 91-100.
- [8] Nechyba M C, Xu Y S. Human-robot cooperation in space: SM² for new space station structure[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1995, 2(4): 4-11.
- [9] Xu Y S, Brown B, Friedman M, et al. Control system of self-mobile space manipulator[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992: 866-871.
- [10] 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 Cheng, Liang Bin. Event-based adaptive planning and control method for EMR teleoperation[J]. Spaceflight Control, 2001, 19(3): 17-22.

作者简介:

高海波 (1970–), 男, 副教授, 博士生导师。研究领域: 宇航空间机构及控制。

郝峰 (1986–), 女, 硕士生。研究方向: 空间机械臂零重力模拟。

邓宗全 (1956–), 男, 教授, 博士生导师。研究领域: 宇航空间机构及控制等。