

# 大型挠性空间机械臂振动抑制的一种关节控制策略\*

谭春林

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

**摘要** 大型空间机械臂在操作过程中, 一个突出的问题是超低频挠性, 不仅存在机械臂的弯曲振动, 而且还存在关节的扭转变形振动; 另外一个不能忽视的问题就是减速器的扭矩传递特性, 以及机械臂关节运动与基座扰动(空间站)之间的耦合特性, 这就要求根据关节结构和传感器配置实现关节位置控制, 同时稳定和衰减机械臂及其关节的低频挠性振动. 本文运用集中参数法对空间机械臂的挠性动力学进行建模, 设计了工程可实现的单个关节控制策略及其控制律, 分析和数值仿真了其稳定性, 对未来空间站的大型挠性空间机械臂设计、动力学与控制的研究具有一定的参考价值.

**关键词** 空间机械臂, 挠性动力学, 关节控制, 振动抑制

## 引言

空间机械臂在卫星抓捕、辅助交会对接、作为航天员移动工作平台、空间站建造等方面具有重要的工程应用, 国外有加拿大制造的机械臂 SRMS 与 SSRMS, 日本臂 JEMRMS 和欧洲臂 ERA, 如文献 [1] ~ [10], 其中空间机械臂的动力学建模与关节控制是空间机械臂系统的关键技术之一. 空间机械臂动力学建模中, 一个突出的问题是超低频挠性, 不仅要考虑机械臂的弯曲振动, 而且要考虑关节的扭转变形振动; 另外一个不能忽视的问题就是减速器的扭矩传递特性, 以及机械臂关节运动与基座扰动(空间站)之间的耦合特性. 国内已有众多研究挠性机械臂动力学建模和振动抑制的文献, 几乎主要针对直接驱动的关节结构, 只考虑机械臂的弯曲挠性. 其实, 为操作大型空间载荷以及达到缓慢移动的目的, 空间机械臂关节结构不可能是通过关节电机直接驱动的, 而是有较大减速比的间接驱动, 关节减速器有限的扭转刚度以及存在的齿隙要求重视关节挠性的扭转变形振动, 航天飞机机械臂 SRMS 和日本机械臂 JEMRMS 均考虑了关节挠性.

本文提出了同时考虑关节扭转变形振动、机械臂弯曲振动和减速器扭矩传递特性的工程化动力学建模方法及其动力学模型, 在此基础上提出工程可实现的一种关节控制策略.

空间机械臂操作是复杂的多关节系统, 却总是通过协同运动化为各独立关节的运动控制. 本文仅以图 1 空间机械臂的肩关节控制为例.

## 1 空间机械臂挠性动力学的线性化建模方法及其动力学模型

### 1.1 线性化建模方法

如上所述, 空间机械臂的关节是间接驱动的, 需要考虑关节挠性和机械臂的挠性以及机械臂与基座(空间站)的耦合运动. 含关节柔性和机械臂柔性的机械臂动力学是非常复杂的非线性耦合方程组, 要绝对精确建模是很难的. 为满足工程应用要求, 首先不妨线性化

(1) 假设空间站具有足够大的控制力矩抑制姿态扰动, 可以使得姿态扰动角保持在零附近;

(2) 可忽略非线性乘积项的影响, 但主要的惯性加速度耦合项不能忽略.

然后建立直接驱动的挠性机械臂与空间站系统的动力学方程组, 再在此基础上考虑减速器关节的减速比和扭矩传递特性、扭转变形振动, 采取牛顿力学中的隔离法建立间接驱动的挠性动力学模型.

### 1.2 直接驱动的挠性动力学建模及其模型

这里暂时不考虑关节挠性, 用集中参数法对机械臂分解成若干个集中质量块, 例如其弯曲振动假

设为4个质量块的弹性运动,机械臂划分为 $m_1, m_2, m_3, m_4$ ,其中 $m_4$ 还包括末端执行器和载荷的总质量,这样可得到机械臂4阶模态频率和振型。

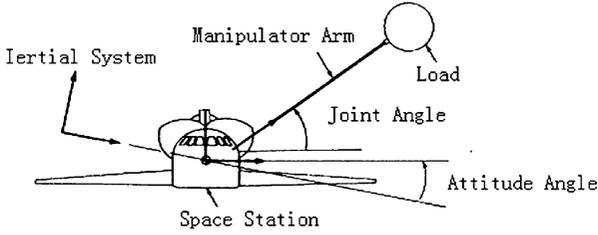


图1 空间站机械手的肩关节转动模型图

Fig.1 Shoulder Joint Model of Space Manipulator

集中参数法比假定模态的形函数法精确得多,还有一个好处是集中参数法对机械臂梁而言编程较为简单、计算量小,当改变有效负载质量时,机械臂的弯曲频率、弯曲模态及其动力学耦合系数可以在动力学仿真程序中即时修改,还可便于控制参数的实时更新。

根据机械臂与空间站系统的动量定理和动量距定理、以及机械臂的模态正交法和叠加法,经过复杂推导运算可以得到如下形式的动力学方程组。

$$I_s \dot{\omega} + J_a A^T \dot{\omega}_a + A^T C \dot{q} = T_e - T_a \quad (1)$$

$$I_a \dot{\omega}_a + A J_a^T \dot{\omega} + B \dot{q} = A T_a \quad (2)$$

$$\ddot{q} + \Lambda^2 q + B^T \dot{\omega}_a + C^T A \dot{\omega} = 0 \quad (3)$$

其中, $I_s$  - 空间站含机械臂系统绕 $z$ 轴的转动惯量, $I_a$  - 空间机械臂系统的转动惯量, $q$  - 模态坐标向量, $\omega_a$  - 关节角速度, $\omega$  - 空间站绕 $z$ 轴的角速度, $J_a$  - 机械臂关节刚体运动和空间站姿态运动的动力学耦合系数, $\Lambda$  - 机械臂弯曲振动的模态频率向量, $A$  - 旋转矩阵。 $B, C$ 为刚柔动力学耦合系数矩阵,与模态频率和振型、机械臂和载荷等有关。

### 1.3 柔性关节的动力学模型

机械臂要驱动负载,就必须有一定的减速比,进行机械臂动力学建模时必须考虑减速比的运动传递及其减速器的动力学特性,若只考虑关节柔性的影响,暂不考虑机械臂的挠性弯曲振动,机械臂单个关节时的动力学方程为

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m + D_m \dot{\theta}_m = K_m I_m - \frac{k}{N} \left( \frac{\theta_m}{N} - \gamma \right) - T_{Lm} \\ I_a \ddot{\gamma} + D_a \dot{\gamma} = k \left( \frac{\theta_m}{N} - \gamma \right) - T_{Lm} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $J_m$  - 电机转动惯量, $I_a$  - 机械臂及其负载的

转动惯量, $k$  - 关节刚度, $K_m$  - 电流力矩常数, $I_m$  - 电枢电流, $T_{Lm}$  - 机械臂的干扰力矩, $T_{Lm}$  - 电机干扰力矩(如摩擦力矩), $\theta_m, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m$  - 伺服转角、角速度和角加速度, $\gamma, \dot{\gamma}, \ddot{\gamma}$  - 关节转角、关节角速度和关节角加速度, $N$  - 关节减速比

### 1.4 空间机械臂的工程化动力学模型

在前两节建模的基础上,利用牛顿隔离法,可进行系统的动力学建模,因为

$$T_a = k \left( \frac{\theta_m}{N} - \theta_a \right) \quad (5)$$

把(5)代入(1),(2)即可,并考虑到空间站的姿态小扰动可近似有 $A = I$ (单位矩阵),于是得到含减速比 $N$ 、挠性关节和机械臂挠性弯曲振动的空间机械臂线性化动力学微分方程组如下:

$$J_m \ddot{\theta}_m + D_m \dot{\theta}_m = K_m I_m - \frac{k}{N} \left( \frac{\theta_m}{N} - \theta_a \right) \quad (6)$$

$$I_m \ddot{\theta}_s + J_a \ddot{\theta}_a + C \dot{q} = T_e - k \left( \frac{\theta_m}{N} - \theta_a \right) \quad (7)$$

$$I_a \ddot{\theta}_a + J_a \ddot{\theta}_s + B \dot{q} = k \left( \frac{\theta_m}{N} - \theta_a \right) \quad (8)$$

$$\ddot{q} + \Lambda q + B \dot{\theta}_a + C \dot{\theta}_s = 0 \quad (9)$$

这是一种结合空间机械臂集中参数法和牛顿隔离法而成的线性化建模方法,考虑了关节挠性和机械臂挠性,方程组反映了各部分之间主要的加速度惯性耦合项,比单纯的简支梁模态假设精度高,但忽略了小量的非线性乘积项。

## 2 关节控制及其稳定性

通过分析表明:压缩闭环带宽的伺服阻尼控制方法是稳定关节挠性和机械臂挠性振动的可行策略之一。参考SRMS空间机械臂的关节结构,光电码盘测量关节角,速度传感器测量的不是关节角速度,而是伺服电机的角速度,两个信号不共位,中间有关节扭转变形振动环节带来的延迟,设计怎样的控制律才能既简单又稳定呢?

提出一种如下的关节伺服控制律

$$K_m I_m = [ -K_p N (\gamma - \gamma_d) - K_d \dot{\theta}_m ] / N^2 \quad (10)$$

其中 $N$ 是减速比, $\gamma_d$ 是所要求的关节角, $\gamma$ 是光电码盘测量的关节角, $\dot{\theta}_m$ 是伺服电机角速度的测量信号, $K_p, K_d$ 为刚度增益和阻尼增益。

下面说明对于挠性关节,根据机械臂关节角和

关节速度反馈是难以稳定的. 伺服电机转子本身的阻尼是非常小的, 为简单起见, 不妨假设  $D_m = 0, D_a = 0$ , 干扰也为零, 则考虑关节挠性的动力学方程组为

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m = K_m I_m - \frac{k}{N} (\frac{\theta_m}{N} - \gamma) \\ J_a \ddot{\gamma} = k (\frac{\theta_m}{N} - \gamma) \end{cases} \quad (11)$$

不妨假设控制律为

$$I_m = K_p (\gamma_d - \gamma) + K_d (\dot{\gamma}_d - \dot{\gamma}) - \dot{C} \theta_m \quad (12)$$

把(4)代入方程组(3), 并求拉普拉斯变换, 可求得挠性关节控制的闭环传递函数.

(1)从传递函数的特征方程式可以看出, 如果没有伺服电机的角速度反馈即  $C_m = 0$ , 仅有关节位置和关节速度反馈, 则根据 Huwitz - Routh 稳定性判据, 因为

$$a_3 = \frac{C_m J_m N}{k} = 0 \quad (13)$$

显然是不稳定的.

(2)如果有伺服电机的角速度反馈, 即  $C_m > 0$ , 即使没有关节角速度反馈  $K_d = 0$ , 由 Huwitz - Routh 稳定性判据可以证明是稳定的.

关于本控制策略为什么还可以同时稳定和抑制机械臂的弯曲挠性振动的理论分析, 因篇幅限制以下仅给出数值仿真算例.

### 3 挠性动力学与控制的数值仿真

算例1: 假设减速比  $N = 100$ , 机械臂 10 米, 载荷为 1 名航天员 (200Kg 左右), 关节扭转变形振动的频率为 0.18Hz, 一阶弯曲振动频率为 0.57Hz. 图 2 ~ 图 5 中给出了相应关节角、关节角速度、扭转变形角、末端振动位移的响应曲线. 从图 4 的关节扭转变形角振动曲线和图 5 的机械臂末端振动曲线看出, 控制律较好地衰减了振动, 同时满足期望的关节角.

算例2: 假设某机械臂的减速比 1000, 载荷 10 吨且半径为 5 米的圆球, 机械臂 10 米, 此时柔性关节扭转振动频率降低到 0.018Hz, 对应的一阶弯曲振动频率为 0.1Hz. 图 6 ~ 图 11 中给出了相应的关节角、关节角速度、扭转变形角、末端振动位移的响应曲线.

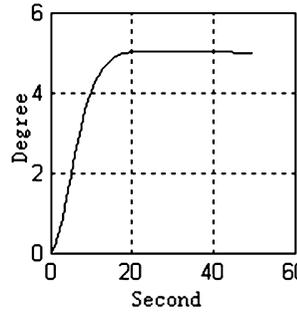


图2 关节角响应

Fig. 2 Joint Angle Response

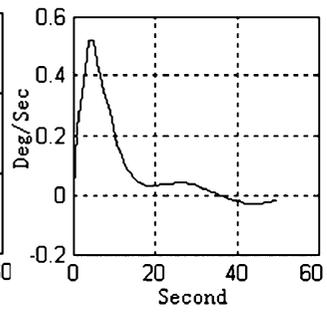


图3 关节角速度响应

Fig. 3 Joint Rate Response

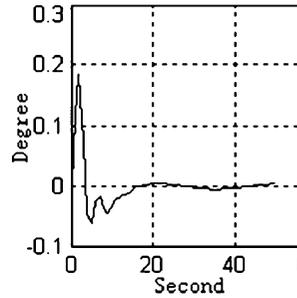


图4 关节扭转变形角响应

Fig. 4 Joint Torsional Response

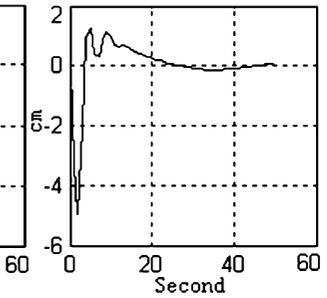


图5 末端振动位移响应

Fig. 5 End-point Vibration Response

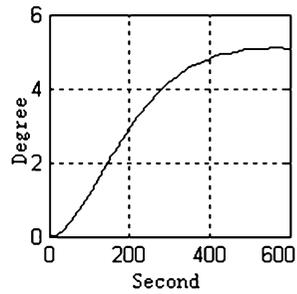


图6 关节角响应

Fig. 6 Joint Angle Response

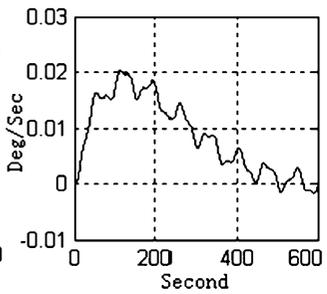


图7 关节角速度响应

Fig. 7 Joint Rate Response

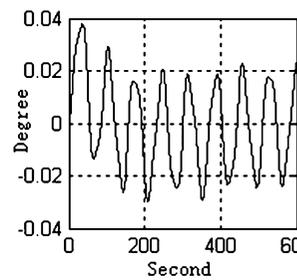


图8 关节扭转变形角响应

Fig. 8 Joint Torsional Response

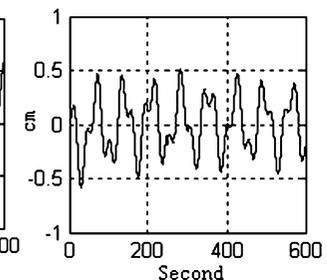


图9 末端振动位移响应

Fig. 9 End-point Vibration Response

### 4 结论

(1)所提出与关节结构对应的关节控制策略及其控制律, 考虑了减速比, 简单工程易实现, 既能满足关节角的控制, 又能稳定和抑制关节和机械臂的挠性振动, 但减速比参数要合理选择, 可以作为

空间机械臂单个关节的一种候选控制策略之一。

(2)本文的关节控制策略虽然可以稳定和衰减振动,但关节运动速度相对较慢,在此基础上研究快速控制策略并能较快消除残余振动是一个有实际工程应用价值的研究方向。

## 参 考 文 献

- 1 J A Hunter, T H Ussher, D M Gossain. Structural dynamic design considerations of the shuttle remote manipulator system. AIAA - 0706, 1986
- 2 P K Nguyen, R Ravindran, R Carr. Structural flexibility of the shuttle remote manipulator system mechanical arm . AIAA - 1536, 1982
- 3 Michael A Scott, et al. Active vibration damping of the space shuttle remote manipulator system. AIAA - 12073, 1994
- 4 J C Chiou, J D Downer, et al. Interaction dynamics of an orbiter and a flexible space structure undergoing incremental in - space construction. AIAA - 2088 - CP, 1992
- 5 Darryl G Sargent. The impact of remote manipulator structural dynamics on shuttle on - orbit flight control. AIAA - 85, 1963
- 6 Elizabeth Bains, Y M Kuo. Upgrade of the SRMS math model to support the orbiter tile repair maneuver. AIAA - 5990, 2006
- 7 Satoko Abiko, Kazuya Yoshida. An adaptive control of a space manipulator for vibration suppression. AIAA - 0568, 1998
- 8 Peter J Lambooy, et al. Some mechanical design aspects of the european robotic arm. AIAA - 27262, 1996
- 9 Leslie J Quioco, et al. SRMS assisted docking and undocking for the orbiter repair maneuver. AIAA - 5987, 2006
- 10 George J Bennett, et al. ISS russian segment motion control system operating strategy during orbiter repair maneuver. AIAA - 5855, 2006
- 11 Liu K, Kujath M R. Trajectory optimization for a two - link Flexible Manipulator. *Int. J. Robotics and Automation*, 1996, 11(2): 56 ~ 71
- 12 刘新建. 柔性机械手动力学与控制研究. 国防科技大学博士学位论文, 1998 (Liu Xinjian. Dynamics and control research of flexible manipulator. Doctoral Thesis of National University of Defence Technology, 1998 (in Chinese))

# A JOINT CONTROL STRATEGY FOR VIBRATION SUPPRESSION OF LARGE FLEXIBLE SPACE MANIPULATOR\*

Tan Chunlin

(College of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract** The modeling and joint control is one of key technologies for space manipulator. One important issue in dynamic modeling is super - low frequency flexibility, on which bending vibration of arm and joint torsional vibration should be considered, the other is to consider joint torque transfer of gear mechanism and dynamic coupling between manipulator and its base. The control issue is to realize the joint position control and also to stabilize and suppress low - frequency vibration of arm and joint according to the joint structure and sensor configuration. Therefore the dynamic modeling and control of space manipulator from standpoint of engineering were put forward, which have referential values in design and research development of space manipulator.

**Key words** space manipulator, flexible dynamics, joint control, vibration suppression