

文章编号: 1000-4750(2012)05-0230-07

漂浮基柔性空间机械臂关节运动的 分块神经网络控制及柔性振动模糊控制

黄登峰, 陈 力

(福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘 要: 讨论了载体位置不受控、姿态受控情况下, 漂浮基柔性空间机械臂关节运动及柔性振动主动抑制的控制问题。由系统动量守恒关系及假设模态法, 利用拉格朗日方法建立了漂浮基柔性空间机械臂的系统动力学方程。之后采用奇异摄动理论, 将其分解为表示刚性运动的慢变子系统和柔性振动的快变子系统。据此, 设计了柔性空间机械臂系统载体姿态及机械臂关节协调运动的组合控制器。针对慢变子系统——柔性空间机械臂的刚性运动, 设计了分块神经网络控制器, 以完成系统参数未知情况下关节空间协调运动的轨迹跟踪; 而对于快变子系统——柔性臂的振动, 则设计了模糊控制器来主动抑制柔性杆的振动。数值仿真证实了提出方法的有效性。

关键词: 漂浮基; 柔性空间机械臂; 奇异摄动法; 分块神经网络控制; 模糊控制

中图分类号: TP241 **文献标志码:** A

PARTITIONED NEURAL NETWORK CONTROL AND FUZZY VIBRATION CONTROL FOR FREE-FLOATING SPACE FLEXIBLE MANIPULATOR

HUANG Deng-feng, CHEN Li

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The trajectory tracking and vibration suppression control of free-floating space flexible manipulator with an attitude controlled base are discussed. With the law of conservation of momentum, the Lagrangian principle is utilized to model the dynamic function of the space flexible manipulator incorporating the assumed modes method. Using singular perturbation theory, a slow subsystem describing the rigid motion and a fast subsystem corresponding to the flexible motion are obtained. Then, a composite controller for coordinated motion between the base's attitude and the manipulator's joints of space flexible manipulator system is designed. The slow-subsystem partitioned neural network controller dominates the trajectory tracking of coordinated motion in joint space in the presence of unknown parameters. The fast-subsystem controller damps out the vibration of the flexible link by fuzzy logic controller. Numerical simulation results illustrate the effectiveness of the proposed controller.

Key words: free-floating; space flexible manipulator; singular perturbation approach; partitioned neural network control; fuzzy logic control

在未来的太空活动中, 人们企望空间机器人能够替代人类在外太空轨道上从事更复杂、危险的工作, 因此它的相关研究受到研究人员的广泛重

视^[1-5]。然而由于发射技术和发射费用上的原因, 出于经济上的考虑, 为了减少发射重量, 以节省发射费用, 空间机械臂的杆件多设计为轻质细长杆

收稿日期: 2010-08-02; 修改日期: 2010-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672040); 福建省自然科学基金项目(2010J01003)

通讯作者: 陈 力(1961—), 男, 江西九江人, 教授, 博士, 博导, 从事多体系统动力学与空间机器人动力学控制研究(E-mail: Chnle@fzu.edu.cn).

作者简介: 黄登峰(1984—), 男, 福建莆田人, 博士生, 从事空间机器人控制研究(E-mail: hdfeng-4950@163.com).

件。因此,空间机器人系统中机械臂的柔性是不可忽略的^[6-8]。

在外太空环境下,当考虑漂浮基柔性空间机械臂处于载体位置不受控、姿态受控状态时,载体位置控制系统是关闭的,系统满足动量守恒关系;因此致使机械臂与载体之间存在着强烈的动力学耦合作用,这大大增加了漂浮基空间机械臂控制系统设计的难度。而当机械臂的杆件又存在柔性时,由于柔性振动的影响漂浮基柔性空间机械臂运动的精确控制设计问题更加困难;此时除了要解决上述动力学耦合、干扰作用,为了实现高精度的运动控制,还必须采用有效的方法来主动抑制机械臂柔性杆的振动。

奇异摄动法是人们在研究地面固定基柔性机器人控制问题中的常用方法,其主要思想是将柔性机械臂的动力学系统分解为相对独立的两部分:一部分是与刚性运动对应的慢变子系统;一部分是与柔性振动对应的快变子系统;再分别独立地对这两个子系统设计各自需要的控制器。据此,文献[9]讨论了地面固定基柔性机器人的反馈线性化控制,文献[10]讨论了漂浮基柔性空间机器人的伪分解加速度与降阶模型的控制,文献[11]讨论了柔性空间机械臂系统协调运动的鲁棒跟踪控制。但上述控制方法均需已知系统动力学模型,或要求系统动力学方程关于惯性参数呈线性函数关系,对于漂浮基柔性空间机械臂系统来说这些要求是比较苛刻的,常常难以满足。

神经网络控制是不依赖于系统精确模型的控制方法,比较适用于具有高度不确定性或非线性的控制对象,并具有较强的适应和学习功能。因此考虑利用神经网络控制方法来研究柔性机械臂的控制问题^[12]。本文讨论了载体位置不受控、姿态受控情况下,漂浮基柔性空间机械臂关节运动及柔性振动主动抑制的控制问题。由系统动量守恒关系及假设模态法,利用拉格朗日方法建立了漂浮基柔性空间机械臂的系统动力学方程。之后采用奇异摄动理论,将其分解为表示刚性运动的慢变子系统和柔性振动的快变子系统。以此为基础,针对慢变子系统——柔性空间机械臂的刚性运动,设计了系统参数未知情况下的分块神经网络控制方案,以控制柔性空间机械臂的载体姿态及机械臂关节协调地完成各自在关节空间的期望运动,其特点是不要求系统动力学方程关于惯性参数呈线性函数关系,甚

至无需预知系统参数,且分块的思想简化了神经网络的设计、提高了权值调整速度^[13];而对于快变子系统——柔性臂的振动,则设计了模糊控制方案来主动抑制柔性杆的振动,其显著优点是不需要准确预知控制对象的模型和系统参数,仅由表示柔性振动情况的相关变量作为输入即可直接获得理想的抑制输出效果^[14]。数值仿真证实了提出方法的有效性。

1 系统动力学建模

不失一般性,考虑作平面运动的自由漂浮柔性空间机械臂系统,系统结构如图1所示。设系统由自由漂浮的载体 B_0 、刚性杆 B_1 及柔性杆 B_2 组成,建立各分体 $B_i(i=0,1,2)$ 的主轴连体坐标系 $(O_i-x_iy_i)$;其中, O_0 与 B_0 的质心 O_{C0} 重合, O_1 、 O_2 分别为联结 B_0 与 B_1 、 B_1 与 B_2 的转动铰中心, x_1 轴为刚性杆 B_1 的对称轴, x_2 轴为柔性杆 B_2 未变形时的对称轴,且在运动中始终与柔性杆在 O_2 处相切。设 O_1 在 x_0 轴上与 O_0 的距离为 l_0 , B_1 的质心 O_{C1} 在 x_1 轴上与 O_1 的距离为 a , B_i 沿 $x_i(i=1,2)$ 轴的长度为 l_i ; B_0 与 B_1 的质量和中心惯量张量分别为: m_i 、 $J_i(i=1,2)$,均质柔性杆 B_2 的线密度为 ρ ,弯曲刚度为 EI 。 $M=m_0+m_1+\rho l_2$ 为系统的总质量。

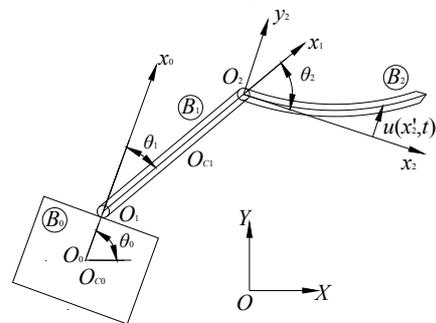


图1 漂浮基柔性空间机械臂系统

Fig.1 Free-floating space flexible manipulator system

建立平动的惯性坐标系 $(O-XY)$,并设 θ_0 为 x_0 轴相对 Y 轴的转角, θ_1 为 x_1 轴相对 x_0 轴的转角, θ_2 为 x_2 轴相对 x_1 轴的转角。忽略轴向变形和剪切变形的影响,柔性杆 B_2 可看成Euler-Bernoulli梁。采用假设模态法来描述柔性杆的横向变形,设 $u(x'_2, t)$ 为柔性杆上横向坐标 x'_2 处、 t 时刻在垂直方向的弹性位移,有:

$$u(x'_2, t) = \sum_{i=1}^n \eta_i(t) \varphi_i(x'_2), \quad 0 \leq x'_2 \leq l_2 \quad (1)$$

其中: $\eta_i(t)$ 为模态坐标; $\varphi_i(x'_2)$ 为第 i 阶模态函数;

n 是截断项数, 本文取二阶模态, 即 $n=2$ 。

忽略微弱的重力梯度, 载体位置不受控制、姿态受控的漂浮基柔性空间机械臂系统为无外力作用的自由漂浮无根多体系统, 系统遵守对 $(O-XY)$ 的动量守恒关系。若以载体姿态和机械臂两关节铰的相对转角 $\theta=(\theta_1 \ \theta_2)^T$ 和柔性杆模态坐标 $\eta=(\eta_1 \ \eta_2)^T$ 为系统广义坐标, 由动量守恒关系及拉格朗日第二类方程, 可以得到载体位置不受控制、姿态受控情况下漂浮基柔性空间机械臂如下形式的系统动力学方程:

$$M(\theta, \eta) \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + C(\theta, \dot{\theta}, \eta, \dot{\eta}) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $M(\theta, \eta)$ 为 5×5 的对称、正定质量矩阵; $C(\theta, \dot{\theta}, \eta, \dot{\eta}) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix}$ 为包含科氏力、离心力的 5 阶列向量; $K = \text{diag}(k_1, k_2)$ 为柔性杆的刚度矩阵, $k_i = EI \int_0^{l_2} \varphi_i'' \varphi_i'' dx_2'$, ($i=1, 2$); $\tau = (\tau_0 \ \tau_1 \ \tau_2)^T$ 为由载体姿态控制力矩 τ_0 和机械臂两关节铰 O_1 、 O_2 的控制输入力矩 τ_1 、 τ_2 组成的 3 阶列向量。

式(2)中的 M 、 C 满足如下特性:

特性: 通过适当选择 C 的形式, 可使 $(M - 2C)$ 为斜对称矩阵^[15]。

2 基于奇异摄动法的快、慢系统分解

为了控制系统设计的方便, 我们采用奇异摄动理论将柔性空间机械臂动力学系统分解为表示刚性运动的慢变子系统及表示柔性振动的快变子系统。为此, 将式(2)用分块矩阵写作:

$$\begin{bmatrix} M_{rr} & M_{rf} \\ M_{fr} & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{rr} & C_{rf} \\ C_{fr} & C_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: M_{rr} 和 C_{rr} 为 3×3 的子矩阵; M_{ff} 和 C_{ff} 分别为 2×2 的子矩阵; $M_{rf} = M_{fr}^T$ 为 3×2 的子矩阵; C_{rf} 、 C_{fr} 则分别为 3×2 、 2×3 的子矩阵。

因为 M 是对称、正定矩阵, 所以它的逆存在且可写作:

$$D = M^{-1} = \begin{bmatrix} M_{rr} & M_{rf} \\ M_{fr} & M_{ff} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} D_{rr} & D_{rf} \\ D_{fr} & D_{ff} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)左乘式(3), 整理后可得:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= -(D_{rr}C_{rr} + D_{rf}C_{fr})\dot{\theta} \\ &\quad (D_{rr}C_{rf} + D_{rf}C_{ff})\dot{\eta} - D_{rf}K\eta + D_{rr}\tau \\ \ddot{\eta} &= -(D_{fr}C_{rr} + D_{ff}C_{fr})\dot{\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

$$(D_{fr}C_{rf} + D_{ff}C_{ff})\dot{\eta} - D_{ff}K\eta + D_{fr}\tau \quad (6)$$

假设 k_s 为柔性杆刚度矩阵 K 中的最小刚度, 即: $k_s = \min(k_1, k_2)$; 引入比例因数: $\varepsilon = 1/\sqrt{k_s}$, 并定义: $\varepsilon^2 z(t) = \eta(t)$, $K^0 = \varepsilon^2 K$; 则式(5)和式(6)可重新写为如下形式:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= -(D_{rr}C_{rr} + D_{rf}C_{fr})\dot{\theta} \\ &\quad (D_{rr}C_{rf} + D_{rf}C_{ff})\varepsilon^2 \dot{z} - D_{rf}K^0 z + D_{rr}\tau \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 \ddot{z} &= -(D_{fr}C_{rr} + D_{ff}C_{fr})\dot{\theta} \\ &\quad (D_{fr}C_{rf} + D_{ff}C_{ff})\varepsilon^2 \dot{z} - D_{ff}K^0 z + D_{fr}\tau \end{aligned} \quad (8)$$

从而我们就得到了柔性空间机械臂系统的奇异摄动模型。为此, 针对上述系统奇异摄动模型我们就可以定义如下组合控制律:

$$\tau = \bar{\tau} + \tau_f \quad (9)$$

其中: $\bar{\tau}$ 对应慢变子系统的控制部分; τ_f 则对应快变子系统控制部分。

为了得到柔性空间机械臂的慢变子系统, 可以先令 $\varepsilon = 0$; 则由式(8)可解出 \bar{z} :

$$\bar{z} = K^0{}^{-1} \bar{D}_{ff}^{-1} [-(\bar{D}_{fr} \bar{C}_{rr} + \bar{D}_{ff} \bar{C}_{fr}) \dot{\theta} + \bar{D}_{fr} \bar{\tau}] \quad (10)$$

其中, 变量上加上划线“ $\bar{\quad}$ ”表示它对应的慢变分量, 即: $\varepsilon = 0$ 时的结果。

将式(10)代入式(7), 并利用: $\bar{M}_{rr}^{-1} = (\bar{D}_{rr} - \bar{D}_{rf} \bar{D}_{ff}^{-1} \bar{D}_{fr})$, 得到慢变子系统表示:

$$\bar{M}_{rr} \ddot{\theta} + \bar{C}_{rr} \dot{\theta} = \bar{\tau} \quad (11)$$

从式(11)可以看出, 慢变子系统的动力学方程和刚性机器人系统的动力学方程具有相同的形式, 它表示了整个漂浮基柔性空间机械臂系统的刚性运动部分。

得到慢变子系统后, 为了更进一步得到快变系统, 我们引入新的变量, 令: $p_1 = z - \bar{z}$, $p_2 = \varepsilon \dot{z}$; 则式(8)可改写为:

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{p}_2 &= -(D_{fr}C_{rr} + D_{ff}C_{fr})\dot{\theta} \\ &\quad (D_{fr}C_{rf} + D_{ff}C_{ff})\varepsilon p_2 - D_{ff}K^0(p_1 + \bar{z}) + D_{fr}\tau \end{aligned} \quad (12)$$

引入快变时间尺度 $\varpi = t/\varepsilon$, 且令 $\varepsilon = 0$, 则:

$$\frac{dp_1}{d\varpi} = p_2 \quad (13)$$

$$\frac{dp_2}{d\varpi} = -\bar{D}_{ff} K^0 p_1 + \bar{D}_{fr} \tau_f \quad (14)$$

式(13)和式(14)就组成了柔性空间机械臂的快变子系统, 它描述的是柔性杆的振动情况。

3 漂浮基柔性空间机械臂基于快、慢变子系统分解的组合控制方案设计

在将柔性空间机械臂系统动力学分解为刚性运动慢变子系统式(11)和柔性振动快变子系统式(13)、式(14)后,我们就可以采用各自便利的控制方法,分别对慢变子系统、快变子系统加以独立的处理,之后将各自的处理结果加以叠加、组合后即可获得对两个子系统的多重控制效果。为此,在下面两部分我们将首先根据分块神经网络控制策略来设计控制输入 $\bar{\tau}$,以便来控制与柔性空间机械臂刚性运动——姿态、关节运动等效的慢变子系统,以使柔性空间机械臂的载体姿态和机械臂两关节的刚性运动轨迹 θ 跟踪期望运动轨迹 θ_d ;然后,我们将依据模糊控制原理来设计快变子系统的控制律 τ_f ,以主动控制与之对应的柔性杆的振动。这样最终得到的组合控制方案: $\tau = \bar{\tau} + \tau_f$,就可以同时满足漂浮基柔性空间机械臂姿态、关节运动及柔性振动主动抑制的双重控制设计要求。

3.1 慢变子系统的分块神经网络控制器设计

在此,我们首先讨论分块神经网络控制器 $\bar{\tau}$ 的设计问题。由于径向基函数神经网络是一种三层前馈神经网络,是利用局部逼近的总和来实现全局逼近,对各类强非线性函数具有良好的逼近能力;且具有学习速度快并能避免局部极小问题的优点,因此我们考虑采用此种类型的神经网络进行设计。其网络一般结构如图2所示。

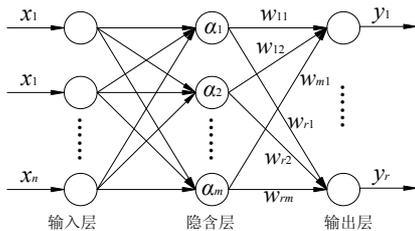


图2 径向基函数神经网络示意图

Fig.2 Schematic diagram of RBF neural network

图2中的输入、输出关系为:

$$y = W^T \alpha(x) \quad (15)$$

其中: $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ 为输入向量; $W^T = [w_{ij}]$ ($i=1, \dots, r; j=1, \dots, m$)为网络权值矩阵; $\alpha(x) = [\alpha_1(x) \ \dots \ \alpha_m(x)]^T$ 为基函数列向量; $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_r]^T$ 为输出列向量。

式(15)中基函数列向量 $\alpha(x)$ 的元素为高斯基函数,有:

$$\alpha_j(x) = \exp(-\|x - c_j\|^2 / \sigma_j^2) \quad (16)$$

其中: c_j 是第 j 个基函数的中心向量; σ_j 是第 j 个基函数的宽度。

回到本文中的慢变子系统,定义柔性空间机械臂系统刚性运动的跟踪误差 e 为:

$$e = \theta_d - \theta \quad (17)$$

其中, $\theta_d = (\theta_{0d} \ \theta_{1d} \ \theta_{2d})^T$ 为载体姿态、机械臂关节的期望运动轨迹。并定义扩展误差函数 s :

$$s = \Lambda e + \dot{e} \quad (18)$$

其中, $\Lambda = \Lambda^T > 0$ 为对称、正定常值矩阵。

对 s 进行微分,并利用式(17)、式(18),则慢变子系统动力学方程式(11)可改写为:

$$\bar{M}_{rr} \dot{s} = -\bar{C}_{rr} s - \bar{\tau} + f \quad (19)$$

其中,非线性函数项 f 定义为: $f = \bar{M}_{rr}(\theta)\zeta_1 + \bar{C}_{rr}(\theta, \dot{\theta})\zeta_2$,其中 $\zeta_1 = \dot{\theta}_d + \Lambda e$, $\zeta_2 = \dot{\theta}_d + \Lambda e$ 。

在实际工况下,漂浮基柔性空间机械臂系统的参数常常是未知的,此时需要对不确定非线性函数项 f 进行神经网络逼近。为了简化神经网络的结构以及加快权值调整的速度,我们可以采用分块神经网络来逼近非线性函数项 f 。具体做法是:设计两个神经网络来分别逼近 f 的第一项和第二项。由 f 的结构,可以取两个神经网络的输入分别为: $X_1 = [\theta^T, \zeta_1^T]^T$, $X_2 = [\theta^T, \dot{\theta}^T, \zeta_2^T]^T$;则用来逼近 f 前、后两项的两个神经网络可分别表示为如下形式:

$$\bar{M}_{rr}(\theta)\zeta_1 = W_M^T \alpha_M(X_1) + \varepsilon_M \quad (20)$$

$$\bar{C}_{rr}(\theta, \dot{\theta})\zeta_2 = W_C^T \alpha_C(X_2) + \varepsilon_C \quad (21)$$

其中: W_M 、 W_C 分别为两个神经网络的理想权值; ε_M 、 ε_C 分别为两个神经网络的逼近误差。则 $f = W_M^T \alpha_M + W_C^T \alpha_C + \varepsilon$,其中 $\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_C$ 。由神经网络的收敛性可知,逼近误差 ε 是有界的,即有: $\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_r$,其中 ε_r 为正常数。

设 $\hat{M}_{rr}(\theta)$ 、 $\hat{C}_{rr}(\theta, \dot{\theta})$ 分别是 $\bar{M}_{rr}(\theta)$ 、 $\bar{C}_{rr}(\theta, \dot{\theta})$ 的不精确估计值, \hat{W}_M 、 \hat{W}_C 是理想权值 W_M 、 W_C 的估计值。设理想权值是有界的,即有: $\|W_M\| \leq W_{Mmax}$, $\|W_C\| \leq W_{Cmax}$, W_{Mmax} 、 W_{Cmax} 是正常数;并定义权值估计误差: $\hat{W}_M = W_M - \hat{W}_M$, $\hat{W}_C = W_C - \hat{W}_C$ 。

由上面的结果,两个神经网络的总输出为:

$$\hat{f} = \hat{M}_{rr}(\theta)\zeta_1 + \hat{C}_{rr}(\theta, \dot{\theta})\zeta_2 = \hat{W}_M^T \alpha_M(X_1) + \hat{W}_C^T \alpha_C(X_2) \quad (22)$$

其中, \hat{f} 是神经网络对 f 的估计值。

设计慢变子系统如下形式的控制输入规律:

$$\bar{\tau} = \hat{f} + K_r s - v \tag{23}$$

其中, K_r 为对称、正定常值矩阵, 鲁棒项 $v = -\varepsilon_r \operatorname{sgn}(s)$ 。

将控制输入规律(23)代入式(19), 可得:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{rr} \dot{s} = & -\bar{C}_{rr} s - \hat{f} - K_r s + v + f = - \\ & (K_r + \bar{C}_{rr}) s + \mathbb{W}_M^T \alpha_M + \mathbb{W}_C^T \alpha_C + v + \varepsilon \end{aligned} \tag{24}$$

定理: 对于式(11)所示的柔性空间机械臂慢变子系统, 当系统参数未知时, 采用控制输入规律式(23)及如下权值自适应调整律:

$$\dot{\mathbb{W}}_M^T = F_M \alpha_M s^T - \kappa_M F_M \|s\| \hat{W}_M \tag{25}$$

$$\dot{\mathbb{W}}_C^T = F_C \alpha_C s^T - \kappa_C F_C \|s\| \hat{W}_C \tag{26}$$

将使扩展误差 s 和权值估计误差 \mathbb{W}_M 、 \mathbb{W}_C 保持最终一致有界性(UUB), 使得 s 能收敛到零的一个小邻域内; 此外, 适当提高 K_r 的取值, 可以使轨迹跟踪误差充分达到期望的跟踪精度, 从而保证误差的收敛性。注意, 式(25)和式(26)中的 F_M 、 F_C 分别为对称、正定常值矩阵; κ_M 、 κ_C 为正常数。

证明: 定义准李雅普诺夫函数 L

$$L = \frac{1}{2} \{s^T \bar{M}_{rr} s + \operatorname{tr}(\mathbb{W}_M^T F_M^{-1} \mathbb{W}_M) + \operatorname{tr}(\mathbb{W}_C^T F_C^{-1} \mathbb{W}_C)\} \tag{27}$$

求 L 对时间 t 的全导数并利用式(24), 得到:

$$\begin{aligned} \dot{L} = & -s^T K_r s + (1/2) s^T (\dot{\bar{M}}_{rr} - 2\dot{\bar{C}}_{rr}) s + \\ & \operatorname{tr}\{\mathbb{W}_M^T (F_M^{-1} \dot{\mathbb{W}}_M + \alpha_M s^T)\} + \\ & \operatorname{tr}\{\mathbb{W}_C^T (F_C^{-1} \dot{\mathbb{W}}_C + \alpha_C s^T)\} + s^T (v + \varepsilon) \end{aligned} \tag{28}$$

利用 $(\dot{\bar{M}}_{rr} - 2\dot{\bar{C}}_{rr})$ 的斜对称性及式(25)、式(26), 有:

$$\begin{aligned} \dot{L} = & -s^T K_r s + \kappa_M \|s\| \operatorname{tr}\{\mathbb{W}_M^T (W_M - \mathbb{W}_M)\} + \\ & \kappa_C \|s\| \operatorname{tr}\{\mathbb{W}_C^T (W_C - \mathbb{W}_C)\} + s^T (v + \varepsilon) \end{aligned} \tag{29}$$

由于 $\operatorname{tr}(A^T B) \leq \|A\| \|B\|$,

$$\begin{aligned} \operatorname{tr}\{\mathbb{W}_M^T (W_M - \mathbb{W}_M)\} & \leq \|\mathbb{W}_M\| \|W_M - \mathbb{W}_M\|, \\ \operatorname{tr}\{\mathbb{W}_C^T (W_C - \mathbb{W}_C)\} & \leq \|\mathbb{W}_C\| \|W_C - \mathbb{W}_C\|. \end{aligned}$$

并代入鲁棒项 $v = -\varepsilon_r \operatorname{sgn}(s)$, 则有:

$$\begin{aligned} \dot{L} \leq & -K_{r \min} \|s\|^2 + \kappa_M \|s\| \{ \|\mathbb{W}_M\| (W_{M \max} - \|\mathbb{W}_M\|) \} + \\ & \kappa_C \|s\| \{ \|\mathbb{W}_C\| (W_{C \max} - \|\mathbb{W}_C\|) \} = \\ & -\|s\| \{ K_{r \min} \|s\| + \kappa_M \|\mathbb{W}_M\| (\|\mathbb{W}_M\| - W_{M \max}) \} + \\ & \kappa_C \|\mathbb{W}_C\| (\|\mathbb{W}_C\| - W_{C \max}) \} \end{aligned} \tag{30}$$

其中, $K_{r \min}$ 是 K_r 的最小奇异值。

由于

$$\kappa_M \{ \|\mathbb{W}_M\| (\|\mathbb{W}_M\| - W_{M \max}) \} =$$

$$\kappa_M \{ \|\mathbb{W}_M\| [\|\mathbb{W}_M\| - (W_{M \max} / 2)]^2 - (\kappa_M W_{M \max}^2 / 4) \},$$

$$\kappa_C \{ \|\mathbb{W}_C\| (\|\mathbb{W}_C\| - W_{C \max}) \} =$$

$$\kappa_C \{ \|\mathbb{W}_C\| [\|\mathbb{W}_C\| - (W_{C \max} / 2)]^2 - (\kappa_C W_{C \max}^2 / 4) \}.$$

则式(30)可以继续简化为:

$$\dot{L} \leq -\|s\| \{ K_{r \min} \|s\| - [(\kappa_M W_{M \max}^2 / 4) + (\kappa_C W_{C \max}^2 / 4)] \} \tag{31}$$

则如果有:

$$\|s\| > [(\kappa_M W_{M \max}^2 / 4) + (\kappa_C W_{C \max}^2 / 4)] / K_{r \min} \tag{32}$$

那么此时恒有 $\dot{L} \leq 0$ 。这表明在紧集 Ω_s

$$\begin{aligned} \Omega_s = \{s \mid \|s\| < & [(\kappa_M W_{M \max}^2 / 4) + \\ & (\kappa_C W_{C \max}^2 / 4)] / K_{r \min} \} \end{aligned} \tag{33}$$

之外, \dot{L} 是负定的; 此时, 轨迹跟踪误差将随时间无限减小。而在原点周围的紧集 Ω_s 之内时, 轨迹跟踪误差明显是有界的。因此, 根据标准李雅普诺夫理论的扩展, 这表明 s 是最终一致有界的(UUB), 即: 使得 s 能收敛到零的一个任意小邻域。显然, 由式(33)即可看到, 该邻域的大小可以通过适当增大 K_r 的大小使之尽可能的小。

另外, 若存在条件:

$$\|\mathbb{W}_M\| > W_{M \max}, \|\mathbb{W}_C\| > W_{C \max} \tag{34}$$

代入式(31), 则亦恒有 $\dot{L} \leq 0$ 。这表明在紧集 Ω_W

$$\Omega_W = \{\mathbb{W}_M, \mathbb{W}_C \mid \|\mathbb{W}_M\| < W_{M \max}, \|\mathbb{W}_C\| < W_{C \max}\} \tag{35}$$

之外, \dot{L} 是负定的; 此时, 权值估计误差随时间无限减小。而在原点周围的紧集 Ω_W 之内时, 权值估计误差是有界的。同样由标准李雅普诺夫理论的扩展, 表明了 \mathbb{W}_M 和 \mathbb{W}_C 是最终一致有界的(UUB)。因为理想权值 W_M 、 W_C 是有界的, 所以权值 \hat{W}_M 、 \hat{W}_C 也是有界的。

3.2 柔性杆振动主动抑制的模糊控制器设计

完成了慢变子系统的分块神经网络控制器设计后, 下面我们将考虑柔性杆振动主动抑制的模糊控制器 τ_f 的控制方案设计。模糊控制器一般是利用模糊集合理论将专家知识或操作人员经验形成的语言规则直接转化为智能控制策略的, 本文的模糊控制器是利用表示柔性振动模态的坐标及其时间导数 $(\eta_1 \ \eta_2 \ \dot{\eta}_1 \ \dot{\eta}_2)$ 做为控制输入, 且由于理想的柔性振动模态以越小、越接近于零为好, 因此模糊控制器的输入等效于通常意义的误差和误差导数; 上述控制输入经过模糊运算控制规则库的一系列处理, 产生相应的控制输出不断地降低提到的误差和误差导数值, 此处即为抑制柔性杆的振动幅值。

在本文的模糊控制方案设计过程中, 为了减少

其中模糊规则库的大小，我们对控制输入做了归并、合成，并由此设计了两个并列的子模糊控制器。这是因为对于讨论的二阶柔性子系统，如果只用一个模糊控制器，模糊系统的输入将对应4个变量 $(\eta_1, \eta_2, \dot{\eta}_1, \dot{\eta}_2)$ ，由于对每个变量都需要定义7个语言词集，这样的话就需要有 7^4 个模糊规则；而如果把一阶模态及其导数组合成第1个子模糊控制器的输入变量，把二阶模态及其导数组合成第2个子模糊控制器的输入变量，则同样对每个变量定义7个语言词集，那么所需要的模糊规则就只有 7^2 个了。这将大大减少模糊规则库的大小，有效提高模糊控制器的计算效率。

图3即为提到的模糊控制器，如上所述它由两个并列的双输入、单输出的子模糊控制器组成；第1个子模糊控制器的输入为 $(\eta_1, \dot{\eta}_1)$ ，输出为 u_{f1} ；第2个子模糊控制器的输入为 $(\eta_2, \dot{\eta}_2)$ ，输出为 u_{f2} ；两个子模糊控制器具有相同的结构。两个子控制器的输出经过如下的线性变换就得到柔性杆振动主动抑制的模糊控制 τ_f ：

$$\tau_f = -K_f [u_{f1} \ u_{f2}]^T \quad (36)$$

其中， K_f 为常值矩阵。

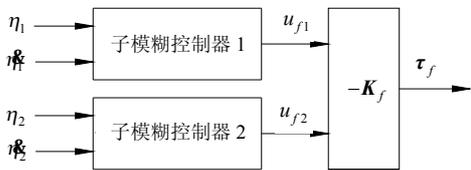


图3 柔性杆振动主动抑制的模糊控制器
Fig.3 Fuzzy control for vibration suppression

子模糊控制器首先进行的是将输入、输出做模糊化处理，在每个输入和输出上均定义7个模糊语言词集：{负大(LN)，负中(MN)，负小(SN)，零(ZE)，正小(SP)，正中(MP)，正大(LP)}，每个模糊语言词集均采用三角形且对称的隶属度函数。图4和图5分别表示的是输入变量 $(\eta_i, \dot{\eta}_i)$ ($i=1,2$)和输出变量 u_{f1} 、 u_{f2} 的模糊隶属度函数的形状和分布情况。

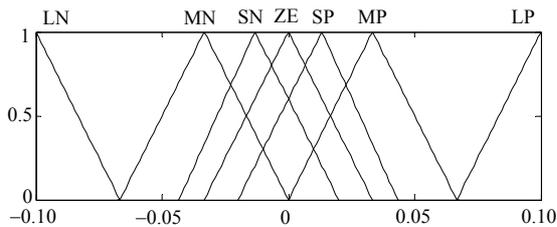


图4 η_1 、 $\dot{\eta}_1$ 、 η_2 和 $\dot{\eta}_2$ 的隶属度函数的形状和分布
Fig.4 Membership function of η_1 、 $\dot{\eta}_1$ 、 η_2 and $\dot{\eta}_2$

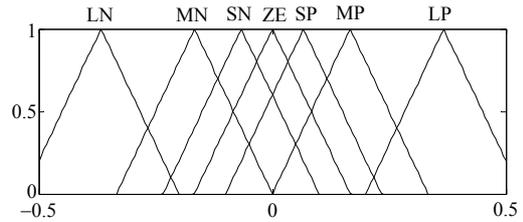


图5 u_{f1} 和 u_{f2} 的隶属度函数的形状和分布
Fig.5 Membership function of u_{f1} and u_{f2}

在完成了上述输入、输出的模糊化处理之后，就是根据人类控制专家的经验总结得到的模糊控制规则，设计一套模糊推理规则进行模糊推理。本文具体采用的模糊控制规则库如表1所示。

表1 模糊控制规则库
Table 1 Rule base of fuzzy logic control

$u_{f1}(u_{f2})$	$\dot{\eta}_i(\dot{\eta}_i)$							
	$\eta_1(\eta_2)$	LN	MN	SN	ZE	SP	MP	LP
LN	LN	LN	LN	LN	MN	ZE	ZE	ZE
MN	LN	LN	LN	LN	MN	ZE	ZE	ZE
SN	MN	MN	MN	MN	ZE	SP	SP	SP
ZE	MN	MN	SN	ZE	SP	MP	MP	MP
SP	SN	SN	ZE	MP	MP	MP	MP	MP
MP	ZE	ZE	MP	LP	LP	LP	LP	LP
LP	ZE	ZE	MP	LP	LP	LP	LP	LP

到此就可利用Mamdani的max-min合成法则^[16]进行模糊推理了，此处采用面积重心法(centroid)进行清晰化计算。最后，两个子模糊控制器的输出 u_{f1} 和 u_{f2} 通过式(36)产生总控制输出 τ_f 来主动抑制柔性空间机械臂柔性杆的振动。

上述控制器的主要优点在于：不需要准确预知控制对象的模型和系统参数，仅由表示柔性振动情况的相关变量作为输入即可直接获得理想的控制输出；且由于对控制输入做了归并、合成，并分设了两个子模糊控制器，减少了规则库的大小，有效降低了计算量。

4 系统数值仿真

以图1所示，作平面运动的自由漂浮柔性空间机械臂系统为例，利用式(23)、式(25)和式(26)给出的关节运动分块神经网络控制以及图3和式(36)所示的柔性振动模糊控制组合得到的控制方案式(9)进行系统数值仿真试验。

仿真时，假设系统相关惯性参数分别为： $m_0 = 40\text{kg}$ ， $l_0 = 1.5\text{m}$ ， $J_0 = 35\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；刚性杆的参数： $m_1 = 2\text{kg}$ ， $l_1 = 2\text{m}$ ， $a_1 = 1\text{m}$ ， $J_1 = 2\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；柔性杆的参数： $l_2 = 1\text{m}$ ， $\rho = 1\text{kg/m}$ ， $EI = 40\text{Pa}$ 。

并设柔性空间机械臂载体姿态及机械臂两关节的期望运动轨迹分别为：

$$\begin{cases} \theta_{0d} = 0 \\ \theta_{1d} = \pi/32 - 0.125\sin(0.25\pi t) \\ \theta_{2d} = \pi/4 - \pi/32 + 0.125\sin(0.25\pi t) \end{cases},$$

载体姿态角及机械臂关节角的运动初始值分别取为： $\theta_0(0) = 0.1\text{rad}$ ， $\theta_1(0) = 0.05\text{rad}$ ， $\theta_2(0) = 0.75\text{rad}$ ；整个追踪过程所用时间为 $t = 8\text{s}$ 。

仿真结果如图6~图9所示，其中图6为柔性空间机械臂载体姿态角的实际运动轨迹(实线)与期望运动轨迹(虚线)对比，图7为柔性空间机械臂两关节在关节空间的实际运动轨迹(实线)与期望运动轨迹(虚线)对比。从仿真结果可以看出，在系统参数未知情况下，分块神经网络控制器可以有效控制慢变子系统——柔性空间机械臂载体姿态和机械臂关节精确跟踪期望的运动轨迹。后面的图8和图9则分别为上述过程柔性杆的一阶模态和二阶模态的振动情况。从图8和图9可以看到，给出的模糊控制器有效地抑制了空间机械臂柔性杆的振动。

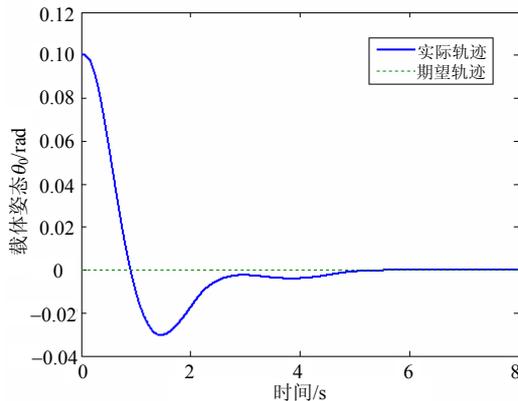


图6 载体姿态角的轨迹跟踪图

Fig.6 The actual and desired trajectory of the base's attitude

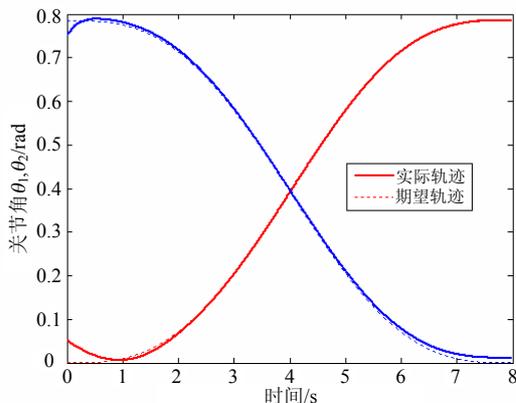


图7 机械臂两关节的轨迹跟踪图

Fig.7 The actual and desired trajectory of the arm's joint

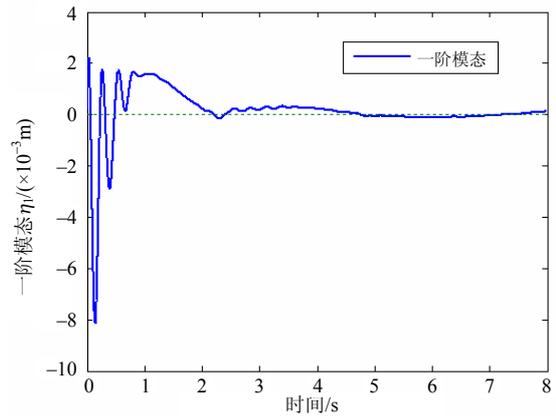


图8 柔性杆的一阶模态

Fig.8 First mode of flexible link

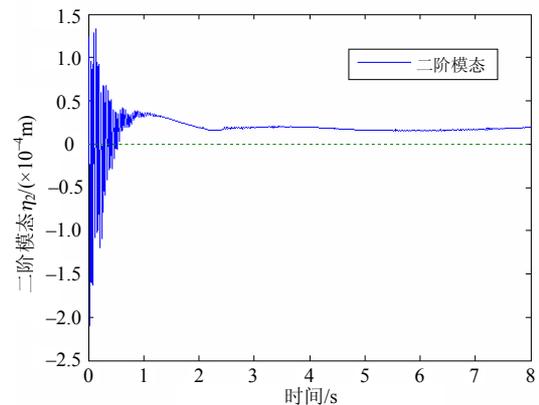


图9 柔性杆的二阶模态

Fig.9 Second mode of flexible link

5 结论

本文应用奇异摄动理论对漂浮基柔性空间机械臂的动力学系统做了两种时间尺度的快、慢变子系统分解。之后对于表示柔性空间机械臂刚性运动的慢变子系统设计了分块神经网络控制方案，以控制系统参数未知的柔性空间机械臂的载体姿态与机械臂关节协调地完成各自的期望运动；它的优点是不要求系统动力学方程关于惯性参数呈线性函数关系，甚至无需预知系统参数，此外分块神经网络的概念既简化了神经网络的设计，又提高了权值调整的速度，且由于分块神经网络的权值是在线调整的，有效节省了离线训练的时间。对于快变子系统则用模糊控制方法来主动抑制柔性杆的振动，其优点是不需要准确预知控制对象的模型和系统参数，仅由表示柔性振动情况的相关变量作为输入即可获得理想的抑制输出效果，且由于设计了两个子模糊控制器来替代一个模糊控制器，有效缩小模糊逻辑规则库的规模，大大减少了计算量。数值仿真结果证实了上述组合控制方法的有效性。

(参考文献转第 250 页)

- Li Xin, Weng Chunsheng. The 2-d MHD effect of plasma armature simulated by CE/SE method [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(10): 240—244, 251. (in Chinese).
- [14] 洪滔, 秦承森. 气体-燃料液滴两相系统爆轰的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 1999, 19(4): 335—342.
- Hong Tao, Qin Chengsen. Numerical modeling of detonation in gas fuel droplets system [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(4): 335—342. (in Chinese).
- [15] Charles K Westbrook, Frederick L Dryer. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 1981, 27: 31—43.
- [16] Gordon S, McBride B J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications [R]. National Aeronautics and Space Administration, 1994: NASA-RP-1311.

(上接第 236 页)

参考文献:

- [1] Dubowsky S, Papadopoulos E. The kinematics, dynamics and control of free-flying and free-floating space robotic systems [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 531—543.
- [2] Melvin Montemerlo (NASA). 25 years of space automation and robotics at NASA: An historical perspective [C]. *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS 2001*, Canadian Space Agency, Quebec, Canada, 2001.
- [3] Lindsay Evans. Canadian space robotics on board the international space station [C]. *2005 CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics*. Canadian Space Agency, Montreal, Canada, May 26-27, 2005.
- [4] 李俊峰, 王照林. 带空间机械臂的充液航天器姿态动力学研究[J]. *宇航学报*, 1999, 20(2): 81—86.
- Li Junfeng, Wang Zhaolin. Study on attitude dynamics of a liquid-filled spacecraft with manipulators [J]. *Journal of Astronautics*, 1999, 20(2): 81—86. (in Chinese)
- [5] 陈力, 刘延柱. 空间机器人姿态与末端抓手协调运动的鲁棒自适应控制[J]. *工程力学*, 2002, 19(2): 165—170.
- Chen Li, Liu Yanzhu. The robust adaptive control of coordinated motion of space-based robot system [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(2): 165—170. (in Chinese)
- [6] Jiang Z H. Kinematics and dynamics of flexible space robot arms [C]. *Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Raleigh, NC, 1992: 1681—1688.
- [7] Senda K, Murotsu Y. Methodology for control of a space robot with flexible links [C]. *IEEE Proceedings Control Theory & Applications*, 2000, 147(6): 562—568.
- [8] 王从庆, 张承龙. 自由浮动柔性双臂空间机器人系统的动力学控制[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10): 196—200.
- Wang Congqing, Zhang Chenglong. Dynamic control of a free-floating flexible dual-arm space robotic system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 196—200. (in Chinese)
- [9] Vandegrift M W, Lewis F L, Zhu S Q. Flexible-link robot arm control by a feedback linearization/singular perturbation approach [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1994, 11(7): 591—603.
- [10] Murotsu Y, Tsujio S, Senda K, et al. Trajectory control of flexible manipulators on a free-flying space robot [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1992, 12(3): 51—57.
- [11] Hong Zhaobin, Chen li. Robust control of coordinated motion for free-floating space flexible manipulator by singular perturbation approach [C]. *ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009*. San Diego, California, USA, August 30 - September 2, 2009.
- [12] Ge S S, Lee T H, Tan E G. Adaptive neural network control of flexible link robots based on singular perturbation [C]. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications*, Hartford, CT, 1997.
- [13] Frank L Lewis, Kai Liu, Aydin Yesildirek. Neural net robot controller with guaranteed tracking performance [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1995, 6(3): 703—715.
- [14] Lin J, Lewis F L. Two-time scale fuzzy logic controller of flexible link robot arm [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 139(1): 125—149.
- [15] Slotine J E, Li W P. On the adaptive control of robot manipulator [J]. *Journal of the Robotics Research*, 1987, 6(3): 49—59.
- [16] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- Sun Zengqi. *Intelligent control theory and technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)