

不同重力环境的空间机械臂自抗扰轨迹跟踪控制

刘福才^{1†}, 梁利环¹, 高娟娟¹, 王文魁²

(1. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 国防科技学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对空间机械臂在地面装调与空间应用时, 由于重力环境变化导致机械臂模型发生变化的问题, 提出了一种自抗扰控制算法, 用于完成空间机械臂轨迹跟踪控制的任务. 该算法通过将系统模型及未知外扰作为系统的总和扰动, 并利用扩张状态观测器对该扰动进行观测且给予补偿, 从而提高了系统抗扰的性能. 当机械臂模型随重力环境变化而发生变化时, 使用同一个自抗扰控制器对其末端轨迹进行控制, 均能取得较好的控制效果. 通过对系统的稳定性进行分析, 证明了所设计控制器的有效性. 将仿真结果与PD控制及自适应鲁棒控制做比较, 结果表明该控制算法不仅能适应机械臂模型的变化而且还能有效抵抗系统的扰动, 从而使系统具有较强的鲁棒性.

关键词: 空间机械臂; 微重力; 自抗扰控制; 轨迹跟踪; 鲁棒性

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Trajectory tracking control with active disturbance rejection for space manipulator in different gravity environments

LIU Fu-cai^{1†}, LIANG Li-huan¹, GAO Juan-juan¹, WANG Wen-kui²

(1. Key Lab of Industrial Computer Control of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

2. National Defense Science and Technology College, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: The active disturbance rejection control (ADRC) method is proposed to cope with the model change in the space manipulator caused by the variations of gravity, when it is aligned on the ground and applied in the space. In this method, we treated the model change and the unknown disturbances as the total system disturbance which is observed and compensated by means of an extended state observer (ESO). Simulation results show that good trajectory tracking results can be achieved with ADRC even when the model is changing. The effectiveness of the proposed control law is further verified by the theoretical analysis of the system stability. This control algorithm not only adapts to the model change and rejects the system disturbance as shown in the simulation, but also improves the system robustness in comparison to the PD control and adaptive robust control.

Key words: space manipulator; microgravity; active disturbance rejection control; trajectory tracking; robustness

1 引言(Introduction)

航天事业的发展使空间机械臂的作用日益重要. 在未来空间活动中, 空间机械臂将代替人类从事各种搬运、各固件的紧固、有毒或危险品的处理等任务, 所以说研究空间机械臂具有重大的意义^[1-2]. 由于机器人智能还未达到实用阶段, 目前对空间机器人的研究还主要集中在理论和方法的探索上. 文献[3-4]研究了机械臂的鲁棒自适应控制. 文献[5]针对高度非线性机器人的轨迹跟踪问题, 提出一类输出反馈重复学习控制算法. 文献[6-7]针对几种不同情况下的机械臂分别使用了神经网络的方法对其进行了轨迹跟踪控制. 文献[8]针对不确定空间机器人轨迹跟踪问题, 提

出了滑模变结构的神经网络控制方案. 但是以上这些研究只是针对地面重力环境机械臂或者空间自由漂浮机械臂进行研究, 并没有将一个控制器同时应用于地面装调与空间应用两种情况. 由于绝大部分空间机构都是在地面组装调试, 在空间使用服役的, 所以有必要对机械臂在地面重力环境及空间微重力环境两种情况进行研究. 机械臂由地面到空间由于重力消失会导致机械臂的运动学及动力学发生变化, 使用常规的控制方法如PID或PD控制无法适应模型的变化.

针对上述问题文献[9]提出了一种自适应鲁棒控制策略, 用于空间机械臂的末端控制, 通过设计自适应律对重力加速度进行在线估计, 并且通过鲁棒控制

器对系统的不确定性进行补偿,从而使空间机械臂在重力与微重力环境下均能很好的完成轨迹跟踪的任务.然而,鲁棒控制器的设计主要考虑了系统内部不确定性,对于系统的外部扰动没有考虑.

针对这一问题,本文使用了自抗扰控制方法,对地面装调和空间应用两种情况下的机械臂进行控制.由于该控制器中含有扩张状态观测器(extended state observer, ESO),它可以把系统的未建模动态及系统外扰作为系统的总和扰动进行观测并给予补偿,因此,避免了鲁棒控制器的复杂设计,并且能够很好地抵抗外部扰动.使用该控制器对空间机械臂进行控制,同样可以使在地面重力条件下装调好的空间机械臂在空间微重力条件下很好的完成在轨操控的任务,并且在有外部扰动存在时通过与自适应鲁棒控制^[9]的仿真结果作对比,可以看出本文所设计的控制器的优越性.

2 系统模型建立(System modeling)

针对图1所示的空间机械臂系统作如下假设:

- 1) 系统为刚体系统;
- 2) 空间忽略微重力,系统处于自由漂浮状态,在地面和空间系统均不受其他外力及外力矩作用;
- 3) 系统由基座和 n 个连杆组成,基座的位姿不受主动控制,连杆每个关节具有一个转动自由度且受主动控制.

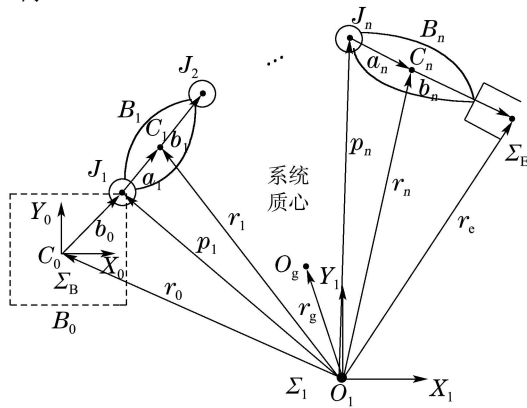


图1 n 自由度自由漂浮空间机械臂模型

Fig. 1 The model of n -DOF free-floating space manipulator

图中: 坐标系 Σ_1 为惯性坐标系; 坐标系 Σ_B 为基座坐标系; 坐标系 Σ_E 为末端坐标系; O_1 为惯性坐标系原点; O_g 为整个系统的质心; B_0 为基座; B_i 为第 i 个连杆; X_0, Y_0 为基座坐标; X_1, Y_1 为惯性坐标; J_i 为第 i 个关节; C_0 为基座质心; C_i 为第 i 个连杆的质心; a_i 为从第 i 个关节到第 i 个连杆质心的矢量; b_i 为从第 i 个连杆质心到第 $i+1$ 个关节的矢量; r_g 为系统质心的位置矢量; r_0 为基座的位置矢量; r_i 为各连杆质心的位置矢量; r_e 为末端执行器质心的位置矢量; P_i 为各关节的位置矢量. 其中: $i = 1, 2, \dots, n$.

2.1 地面装调阶段模型(Ground alignment model)

空间机械臂系统处于地面装调阶段时,由于存在

重力,所以基座是固定的,系统有 n 个自由度,根据拉格朗日方程得到的空间机械臂的动力学模型为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (1)$$

式中: $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T \in \mathbb{R}^n$ 为空间机械臂各关节角的位移矢量, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_n]^T \in \mathbb{R}^n$ 为作用在空间机械臂各关节上的驱动力矩, $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统的惯量矩阵, $B(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统的离心力和哥氏力矩阵, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 为系统的重力载荷向量矩阵.

用 $x \in \mathbb{R}^n$ 表示空间机械臂末端在工作空间的位置和姿态, $J(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统的雅克比矩阵,则系统在工作空间的运动学方程为

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (2)$$

2.2 空间应用阶段模型(Space applications model)

空间机械臂处于空间应用阶段时,由于只有微重力,因此系统将处于自由漂浮状态,整个系统的运动将增加6个自由度.系统不受外力及外力矩,满足线动量及角动量守恒.此时系统的动力学方程为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} = \tau, \quad (3)$$

式中: $D(q) \in \mathbb{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ 为空间机械臂系统的惯量矩阵, $B(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ 为系统的离心力和哥氏力矩阵, $q = [q_b^T \ q_m^T]^T \in \mathbb{R}^{n+6}$ 为系统的广义位移矢量, $q_b = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T \in \mathbb{R}^6$ 为基座的位姿矢量, $q_m = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T \in \mathbb{R}^n$ 为关节角的位移矢量, $\tau = [0_{6 \times 1}^T \ \tau_{n \times 1}^T]^T \in \mathbb{R}^{n+6}$ 为作用在空间机械臂上的驱动力矩, $0_{6 \times 1}, \tau_{n \times 1}$ 分别为作用在基座和机械臂关节上的驱动力矩.

用 x 表示空间机械臂末端在工作空间的位置和姿态, $J^*(q) = [J_b(q) \ J_m(q)] \in \mathbb{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ 为广义雅克比矩阵,其中 $J_b(q) = \frac{\partial x}{\partial q_b}$ 为系统基座的雅克比矩阵, $J_m(q) = \frac{\partial x}{\partial q_m}$ 为机械臂本体的雅克比矩阵,则系统在工作空间的运动学和动力学方程为

$$\dot{x} = J^*(q)\dot{q}. \quad (4)$$

3 控制器设计(Controller design)

从式(1)和式(3)可以看出机械臂的动力学模型具有强非线性及强耦合性,常规的控制方法很难达到高精度的控制要求.而自抗扰控制器不依赖被控对象精确数学模型,可以将耦合看做扰动并进行实时估计和补偿^[10],因此可以去掉解耦环节,对每个关节分别进行控制.以下分4种情形对空间机械臂系统进行讨论.

情形1 地面重力环境下无扰动情况.

定义

$$\begin{aligned} \Psi(q, \dot{q}, t) &= -D^{-1}(q)[B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)], \\ \tilde{B}(q) &= D^{-1}(q), \end{aligned}$$

则由动力学方程(1)可得

$$\ddot{q} = \Psi(q, \dot{q}, t) + \tilde{B}(q)\tau, \quad (5)$$

其中:

$$\Psi(q, \dot{q}, t) = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \cdots \ \varphi_n]^T \in \mathbb{R}^n,$$

$$\tilde{B}(q) = \begin{bmatrix} b_{11}(q) & b_{12}(q) & \cdots & b_{1n}(q) \\ b_{21}(q) & b_{22}(q) & \cdots & b_{2n}(q) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1}(q) & b_{n2}(q) & \cdots & b_{nn}(q) \end{bmatrix}.$$

机械臂第*i*(*i* = 1, 2, ..., *n*)个关节的方程可表示为

$$\ddot{q}_i = \varphi_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij}\tau_j + (b_{ii} - b)\tau_i + b\tau_i. \quad (6)$$

将其他关节的力矩对该关节的作用看作扰动, 并且将本关节控制力中未知部分(*b_{ii}* - *b*) τ_i 也作为扰动量, 定义该关节的总和扰动量为

$$\chi_i = \varphi_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij}\tau_j + (b_{ii} - b)\tau_i, \quad (7)$$

则式(6)可写为

$$\ddot{q}_i = \chi_i + b\tau_i. \quad (8)$$

情形 2 地面重力环境下有扰动情况.

当有扰动存在时, 式(1)变为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \omega = \tau, \quad (9)$$

其中 $\omega \in \mathbb{R}^n$ 为作用于系统的扰动量. 定义

$$\Psi(q, \dot{q}, \omega, t) = -D^{-1}(q)[B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \omega],$$

则 $\Psi(q, \dot{q}, \omega, t) = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_n]^T \in \mathbb{R}^n$, 由式(9)得

$$\ddot{q} = \Psi(q, \dot{q}, \omega, t) + \tilde{B}(q)\tau. \quad (10)$$

按照情形1中的处理方法可以得到, 此时机械臂第*i*(*i* = 1, 2, ..., *n*)个关节的方程可表示为

$$\ddot{q}_i = h_i + b\tau_i, \quad (11)$$

其中 $h_i = \phi_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij}\tau_j + (b_{ii} - b)\tau_i$, 看作作用在该关节上的总和扰动.

情形 3 空间微重力环境下无扰动情况.

定义

$$\Psi(q, \dot{q}, t) = -D^{-1}(q)B(q, \dot{q})\dot{q},$$

$$\tilde{B}(q) = D^{-1}(q).$$

则由式(3)可得

$$\ddot{q} = \Psi(q, \dot{q}, t) + \tilde{B}(q)\tau, \quad (12)$$

其中:

$$\Psi(q, \dot{q}, t) = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \cdots \ \varphi_{n+6}]^T \in \mathbb{R}^{n+6},$$

$$\tilde{B}(q) = \begin{bmatrix} b_{11}(q) & b_{12}(q) & \cdots & b_{1,n+6}(q) \\ b_{21}(q) & b_{22}(q) & \cdots & b_{2,n+6}(q) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n+6,1}(q) & b_{n+6,2}(q) & \cdots & b_{n+6,n+6}(q) \end{bmatrix}.$$

由于空间机械臂的基座位姿不受主动控制, 只有关节受控, 根据第2.2节中空间应用阶段模型特点可以得出第*i*(*i* = 7, 8, ..., *n* + 6)个关节的方程为

$$\ddot{q}_i = \varphi_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+6} b_{ij}\tau_j + (b_{ii} - b)\tau_i + b\tau_i. \quad (13)$$

将式(13)写为

$$\ddot{q}_i = \chi_i + b\tau_i, \quad (14)$$

其中 $\chi_i = \varphi_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+6} b_{ij}\tau_j + (b_{ii} - b)\tau_i$, 看作作用在该关节上的总和扰动.

情形 4 空间微重力环境下有扰动情况.

当有扰动存在时, 式(3)变为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + \omega = \tau, \quad (15)$$

其中 $\omega \in \mathbb{R}^{n+6}$ 为作用于空间机械臂系统的扰动量. 定义 $\Psi(q, \dot{q}, t) = -D^{-1}(q)[B(q, \dot{q})\dot{q} + \omega]$, 则由式(15)可得

$$\ddot{q} = \Psi(q, \dot{q}, \omega, t) + \tilde{B}(q)\tau, \quad (16)$$

其中 $\Psi(q, \dot{q}, \omega, t) = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_{n+6}]^T \in \mathbb{R}^{n+6}$.

机械臂第*i*(*i* = 7, 8, ..., *n* + 6)个关节的方程为

$$\ddot{q}_i = h_i + b\tau_i, \quad (17)$$

其中 $h_i = \phi_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+6} b_{ij}\tau_j + (b_{ii} - b)\tau_i$, 看作作用在该关节上的总和扰动.

式(8)(11)(14)及式(17)可以统一表示为

$$\ddot{q}_i = f(q, \dot{q}, \omega, t) + b\tau, \quad (18)$$

其中 $f(q, \dot{q}, \omega, t)$ 为总和扰动.

对于前面所述的4种不同情况, 关节的总和扰动 $f(q, \dot{q}, \omega, t)$ 的具体表达式不同, 但是由于ESO不依赖系统的具体数学模型, 仅仅依赖对象的阶次, 并且可以把系统的未建模动态及各种扰动的总和看成一个扩张状态量, 通过输出反馈对这个状态量进行观测. 因此, 通过合理选择ESO的参数, 可以获得不同情况下的对应扰动的观测值.

自抗扰控制器主要针对如下—类对象^[11]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n, \\ \dot{x}_n = f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, \omega, t) + bu(t), \\ y = x_1, \end{cases} \quad (19)$$

其中: ω 是系统所受的外部扰动, $u(t)$ 为控制量, b 为输入量放大系数. 将式(18)与式(19)对比可以看出, 可用同一种自抗扰控制器对系统进行控制. 并且由式(18)可知该自抗扰控制器是二阶的, 因此使用二阶自抗扰控制器对空间机械臂的各个关节分别进行控制. 系统的控制框图如图2所示.

图中: x_d 是给定的末端轨迹, q_d 是由给定的末端轨迹通过运动学逆运算得出的期望关节角度, q 是实

际输出的关节角度, x 是实际的末端轨迹, ω 是系统所受外部扰动. 虚线内部是自抗扰控制器的结构, 从图中可以看出自抗扰控制器由3部分构成: 跟踪微分器(tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器(extended state observer, ESO)及非线性状态误差反馈律(non-linear state error feedback, NLSEF). 通过控制各关节的驱动力矩, 使得机械臂的各关节的位置、速度等状态变量能够跟踪期望值.

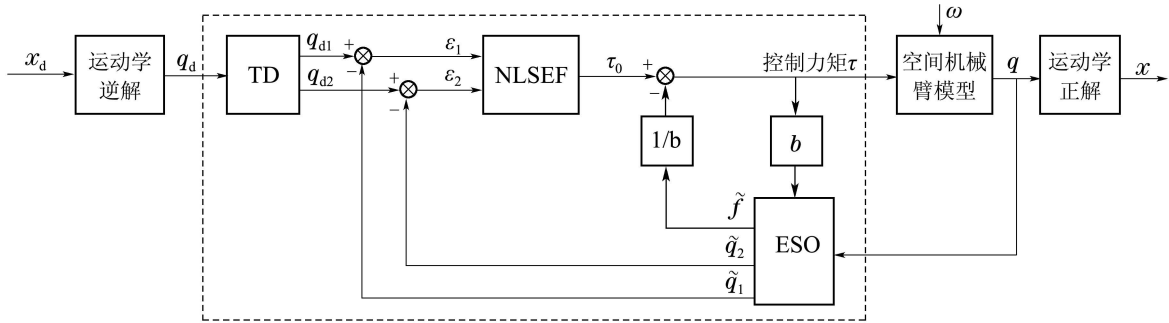


图2 空间机械臂自抗扰控制原理图

Fig. 2 ADRC controller for space manipulator

根据自抗扰控制器原理^[12]本文设计了二阶非线性跟踪微分器. 它可以根据参考输入及被控对象的限制来安排过渡过程, 因此可以避免控制量剧烈变化的问题. 二阶跟踪微分器的公式为

$$\begin{cases} \dot{q}_{d1} = q_{d2}, \\ \dot{q}_{d2} = \text{fhan}(q_{d1} - q_d, q_{d2}, r, h), \end{cases} \quad (20)$$

其中: q_d 是期望得到的关节角度, q_{d1} 和 q_{d2} 分别为输入信号的跟踪信号及微分信号, r 和 h 为TD的参数, fhan 为韩教授提出的最速跟踪函数^[12], 具体为

$$\begin{cases} d = rh^2, a_0 = hx_2, \\ y = x_1 + a_0, \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)}, \\ a_2 = a_0 + \text{sgn} y \frac{a_1 - d}{2}, \\ s_y = \frac{\text{sgn}(y + d) - \text{sgn}(y - d)}{2}, \\ a = (a_0 + y - a_2)s_y + a_2, \\ s_a = \frac{\text{sgn}(a + d) - \text{sgn}(a - d)}{2}, \\ \text{fhan} = -r\left(\frac{a}{d} - \text{sgn} a\right)s_a - r\text{sgn} a, \end{cases} \quad (21)$$

其中: $x_1 = q_{d1} - q_d$, $x_2 = q_{d2}$.

针对式(18)所示的二阶系统利用ESO估计 q, \dot{q} 及 $f(q, \dot{q}, \omega, t)$, 为了方便将 $f(q, \dot{q}, \omega, t)$ 记为 \tilde{f} 并且设

估计值分别为 \tilde{q}_1, \tilde{q}_2 及 \tilde{f} , ESO算法为

$$\begin{cases} e_1 = \tilde{q}_1 - q, \\ \dot{\tilde{q}}_1 = \tilde{q}_2 - \beta_{01}e_1, \\ \dot{\tilde{q}}_2 = \tilde{f} - \beta_{02}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta) + b\tau, \\ \dot{\tilde{f}} = -\beta_{03}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta), \end{cases} \quad (22)$$

其中: $\beta_{01} > 0, \beta_{02} > 0, \beta_{03} > 0$ 为误差校正参数并且影响ESO的跟踪效果; fal 为如下非线性函数^[13]:

$$\text{fal}(e_1, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e_1|^\alpha \text{sgn} e_1, & |e_1| > \delta, \\ e_1/\delta^{\alpha-1}, & |e_1| \leq \delta. \end{cases} \quad (23)$$

其中: α 为非线性参数且取值范围为(0,1), δ 为线性段的区间长度并且有 $\delta > 0$.

非线性状态误差反馈控制律利用TD的输出 q_{d1}, q_{d2} 和ESO的输出 \tilde{q}_1, \tilde{q}_2 之差来产生控制量 τ_0 由此得出的非线性状态误差反馈控制律为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = q_{d1} - \tilde{q}_1, \\ \varepsilon_2 = q_{d2} - \tilde{q}_2, \\ \tau_0 = -\text{fhan}(\varepsilon_1, c * \varepsilon_2, r, h_0), \end{cases} \quad (24)$$

其中 c, r, h_0 为NLSEF的可调参数.

为了减少系统的内部扰动及外部扰动对系统性能的影响, 将ESO估计出的扰动量 \tilde{f} 补偿到控制量中, 得到空间机械臂系统总的控制律为

$$\tau = \tau_0 - \tilde{f}/b. \quad (25)$$

将式(25)代入到式(18)可得

$$\begin{aligned} \ddot{q} &= f + b\tau = f + b(\tau_0 - \tilde{f}/b) = \\ &f - \tilde{f} + b\tau_0. \end{aligned} \quad (26)$$

由式(26)可以看出当ESO取得较高的观测精度时, 即 $f \rightarrow \tilde{f}$ 时, 式(26)将变为积分串联型系统:

$$\ddot{q} = b\tau_0. \quad (27)$$

式(20)(22)(24)及式(25)构成了自抗扰控制器的控制算法, 合理调整各部分参数可以使 $q \rightarrow q_d$, 从而完成轨迹跟踪的任务.

4 稳定性分析(Stability analysis)

定理 1 对于系统(18), 若没有扰动存在, 则通过状态反馈可实现系统的渐近稳定性.

证 令 $\alpha(t) = f(q, \dot{q}, t)$ 为开环控制过程中的实时表现量, 则式(18)可化为

$$\alpha(t) = \ddot{q} - b\tau. \quad (28)$$

由于没有扰动, 所以 $\alpha(t)$ 可以直接提取, 由式(25)得

$$\tau = \tau_0 - \alpha(t)/b. \quad (29)$$

将式(29)代入式(28)得

$$\ddot{q} = b\tau_0. \quad (30)$$

当 τ_0 取为如下形式时:

$$\tau_0 = \frac{1}{b}(\gamma_1 e + \gamma_2 \dot{e} + \ddot{v}(t)), \quad (31)$$

其中: $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$, 则

$$\ddot{e}(t) = -\gamma_1 e - \gamma_2 \dot{e}. \quad (32)$$

取李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2}\gamma_1 e^2 + \frac{1}{2}\dot{e}^2. \quad (33)$$

由于 $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$, 则 V 是正定的.

$$\dot{V} = \gamma_1 e \dot{e} + \dot{e}(-\gamma_1 e - \gamma_2 \dot{e}) = -\gamma_2 \dot{e}^2. \quad (34)$$

$\dot{V} \leq 0$, 则系统满足李雅普诺夫稳定性, 进一步由Lasalle不变集原理可知系统是渐近稳定的. 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e \rightarrow 0$, $\dot{e} \rightarrow 0$, $q \rightarrow q_d$.

大量仿真已验证当采用式(24)所示的非线性状态反馈控制律 $\tau_0 = -\text{fhan}(\varepsilon_1, c * \varepsilon_2, r, h_0)$ 时, 同样可保证闭环系统的稳定性, 且系统的动态品质更好.

当有扰动存在时, 此时控制量不可以直接获取, 需要用扩张状态观测器对其进行观测. 能否比较准确地从扩张状态观测器里提取系统状态及扰动的实时作用量, 对整个控制器的品质至关重要^[13]. 因此, 有必要对扩张状态观测器进行稳定性分析.

定理 2 对于系统(18), 若没有扰动存在, 则使用状态观测器对系统进行观测, 合理选择参数可以保证观测器的稳定性.

证 令

$$\eta_1 = q, \eta_2 = \dot{q}, \eta = [\eta_1^T \eta_2^T]^T,$$

则式(18)所示的系统可表示为

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = \eta_2, \\ \dot{\eta}_2 = f(\eta_1, \eta_2, t) + b\tau. \end{cases} \quad (35)$$

令 $e_1 = \tilde{q}_1 - q, e_2 = \tilde{q}_2 - \eta_2$, 此时观测器的形式为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{q}}_1 = \tilde{q}_2 - \beta_{01}e_1, \\ \dot{\tilde{q}}_2 = -\beta_{02}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta) + b\tau. \end{cases} \quad (36)$$

将式(35)和(36)两式作差可得两个系统的误差系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \tilde{q}_1 - \eta_1 = \tilde{q}_2 - \beta_{01}e_1 - \eta_2 = e_2 - \beta_{01}e_1, \\ \dot{e}_2 = \tilde{q}_2 - \eta_2 = -f(\eta_1, \eta_2, t) - \beta_{02}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta). \end{cases} \quad (37)$$

当系统达到稳定状态时, 满足 $\dot{e}_1 = \dot{e}_2 = 0$, 即

$$\begin{aligned} -f(\eta_1, \eta_2, t) - \beta_{02}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta) = \\ e_2 - \beta_{01}e_1 = 0. \end{aligned}$$

由式(23)可知, 当 $|e_1| > \delta, \alpha = \frac{1}{2}$, 即误差较大时,

$$\text{fal}(e_1, \frac{1}{2}, \delta) = |e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sgn } e_1.$$

取如下形式的李雅普诺夫函数:

$$V = \alpha|e_1|^{\frac{3}{2}} - \beta e_1 e_2 + \lambda e_2^2, \quad (38)$$

其中: $\alpha > 0, \lambda > 0, 4\alpha\lambda > \beta^2|e_1|^{\frac{1}{2}}$. 将式(38)写为

$$V = \alpha(|e_1|^{\frac{3}{4}} e_2)^2 - \beta e_1 e_2 + \lambda e_2^2 = \begin{pmatrix} |e_1|^{\frac{3}{4}} e_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha & -\frac{1}{2}\beta|e_1|^{\frac{1}{4}} \\ -\frac{1}{2}\beta|e_1|^{\frac{1}{4}} & \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |e_1|^{\frac{3}{4}} \\ e_2 \end{pmatrix},$$

则所选的李雅普诺夫函数是正定的, 且有

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial e_1} = \frac{3}{2}\alpha|e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sgn } e_1 - \beta e_2, \\ \frac{\partial V}{\partial e_2} = -\beta e_1 + 2\lambda e_2, \end{cases} \quad (39)$$

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial e_1} \dot{e}_1 + \frac{\partial V}{\partial e_2} \dot{e}_2 =$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{3}{2}\alpha|e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sgn } e_1 - \beta e_2\right)(e_2 - \beta_{01}e_1) + \\ & (-\beta e_1 + 2\lambda e_2)(-\alpha(t) - \beta_{02}|e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sgn } e_1) = \\ & \left(\frac{3}{2}\alpha|e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sgn } e_1 e_2 - \beta e_2^2 - \frac{3}{2}\alpha\beta_{01}|e_1|^{\frac{3}{2}} + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \beta\beta_{01}e_1e_2) + (\beta\alpha(t)e_1 - 2\lambda\alpha(t)e_2 + \\ & \beta\beta_{02}|e_1|^{\frac{3}{2}}) - 2\lambda\beta_{02}|e_1|^{\frac{1}{2}}\text{sgn}e_1e_2 = \\ & (\frac{3}{2}\alpha - 2\lambda\beta_{02} + \beta\beta_{01}|e_1|^{\frac{1}{2}})|e_1|^{-\frac{1}{4}}|e_1|^{\frac{3}{4}}\text{sgn}e_1 \\ & e_2 - \beta e_2^2 - (\frac{3}{2}\alpha\beta_{01} - \beta\beta_{02})|e_1|^{2(\frac{3}{4})} + \\ & (\beta\alpha(t)e_1 - 2\lambda\alpha(t)e_2). \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{cases} e_2 - \beta_{01}e_1 = 0, \\ e_3 - \beta_{02}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta) = 0, \\ -\beta_{03}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta) - \dot{f} = 0. \end{cases} \quad (44)$$

定义

$$\begin{aligned} E &= \beta, \\ F &= (\frac{3}{2}\alpha - 2\lambda\beta_{02} + \beta\beta_{01}|e_1|^{\frac{1}{2}})|e_1|^{-\frac{1}{4}}, \\ A &= \frac{3}{2}\alpha\beta_{01} - \beta\beta_{02}, \\ x_1 &= |e_1|^{\frac{3}{4}}\text{sgn}e_1, \quad x_2 = e_2, \end{aligned}$$

则式(40)可写作如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= F|e_1|^{\frac{3}{4}}\text{sgn}e_1e_2 - Ee_2^2 - \\ & A|e_1|^{2(\frac{3}{4})} + (\beta\alpha(t)e_1 - 2\lambda\alpha(t)e_2) = \\ & Fx_1x_2 - Ex_2^2 - Ax_1^2 + \\ & (\beta\alpha(t)e_1 - 2\lambda\alpha(t)e_2). \end{aligned} \quad (41)$$

取

$$\begin{aligned} V_1 &= Fx_1x_2 - Ex_2^2 - Ax_1^2, \\ V_2 &= \beta\alpha(t)e_1 - 2\lambda\alpha(t)e_2, \end{aligned}$$

则由式(41)得 $\dot{V} = V_1 + V_2$, 且当 $A > 0, F > 0, F^2 - 4AF < 0$ 时, 有 $V_1 < 0$. 进一步求解知当 $\beta > 0, 3\frac{\alpha}{\beta} > 2\frac{\beta_{02}}{\beta_{01}}, \beta\beta_{02}(2\lambda\beta_{01} - \beta) > 0, 3\alpha > 4\lambda\beta_{02}$ 时, 式(41)在很大范围内都是负定函数, 只有在 V_1 和 V_2 两个面相交的上面部分不满足负定, 由此证明了状态观测器在很大范围内都是渐近稳定的. 即 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, \tilde{q}_1 \rightarrow q, \tilde{q}_2 \rightarrow \dot{q}$.

定理 3 对于系统(18), 若扰动存在并且有界, 则适当选择参数值可实现ESO对状态的实时观测.

证 令 $\eta_1 = q, \eta_2 = \dot{q}, \eta_3 = f$, 式(18)可写为

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = \eta_2, \\ \dot{\eta}_2 = \eta_3 + b\tau. \end{cases} \quad (42)$$

扩张状态观测器的形式如式(22)所示, 定义 $e_1 = \tilde{q}_1 - \eta_1, e_2 = \tilde{q}_2 - \eta_2, e_3 = \tilde{f} - f$, 将式(42)和(22)两式作差得到两个系统的误差系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \tilde{q}_1 - \dot{\eta}_1 = \tilde{q}_2 - \beta_{01}e_1 - \eta_2 = e_2 - \beta_{01}e_1, \\ \dot{e}_2 = \tilde{q}_2 - \dot{\eta}_2 = e_3 - \beta_{02}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta), \\ \dot{e}_3 = \tilde{f} - \dot{f} = -\beta_{03}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta) - \dot{f}. \end{cases} \quad (43)$$

当系统进入稳态时, 即 $\dot{e}_1 = \dot{e}_2 = \dot{e}_3 = 0$, 即

因为 $\text{fal}(e_1, \alpha, \delta)$ 是关于 e_1 的单调函数且 $\text{fal}(0, \alpha, \delta) = 0$, 并且一般先将 α 和 δ 根据经验给定为固定常数, 故其反函数存在且 $\text{fal}^{-1}(0) = 0$. 因此, 当系统进入稳态时, 估计误差为

$$\begin{cases} e_1 = \text{fal}^{-1}(-\dot{f}/\beta_{03}), \\ e_2 = \beta_{01}e_1 = \beta_{01}\text{fal}^{-1}(-\dot{f}/\beta_{03}), \\ e_3 = \beta_{02}\text{fal}(e_1, \alpha, \delta) = -\beta_{02}\dot{f}/\beta_{03}. \end{cases} \quad (45)$$

因此, 当 $|\beta_{03}| \gg |\dot{f}|$ 时, 估计误差将趋于0, 只要扰动有界通过合理选择参数可以使 $\tilde{q}_1 \rightarrow q, \tilde{q}_2 \rightarrow \dot{q}, \tilde{f} \rightarrow f$, 实现扩张状态观测器对状态的实时观测.

5 仿真研究(Simulation research)

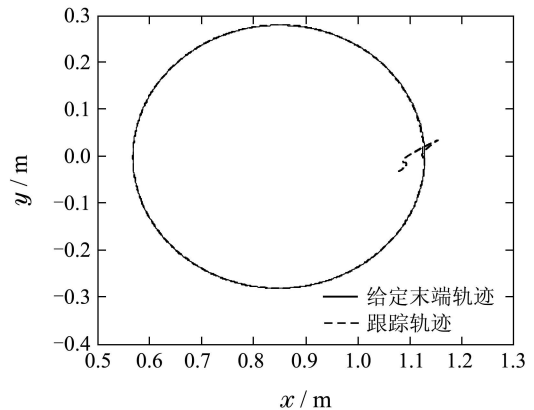
为了验证本文所设计的自抗扰控制器的有效性, 以平面两杆空间机械臂为例, 对其在地面装调和空间应用阶段分别进行轨迹跟踪仿真研究. 控制器中各部分仿真参数为: TD中 r 分别为2000和10000, h 均取0.01; 第1个NLSEF中 $c = 0.6, r = 1000$, 另一个为 $c = 0.5, r = 2000$; ESO中 $\alpha = 0.5, \delta = 0.01$, 第1个ESO中 $\beta_{01} = 400, \beta_{02} = 2000, \beta_{03} = -1000$; 另一个为 $\beta_{01} = 400, \beta_{02} = 2500, \beta_{03} = -1200$.

为了突出自抗扰控制的优越性, 仿真比较了含有重力补偿的PD作用下的控制效果. 设计PD控制器为

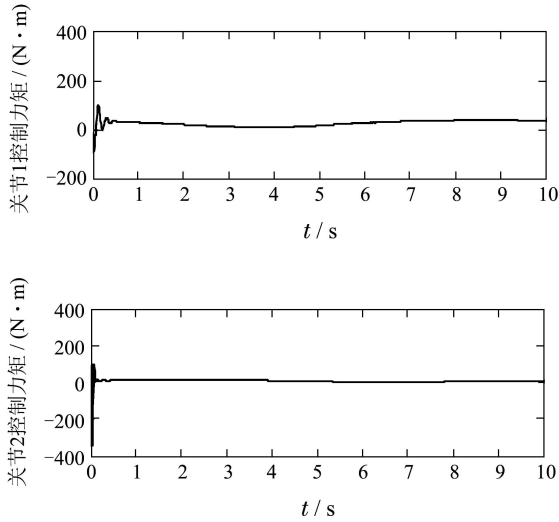
$$\tau = k_p e + k_d \dot{e} + G,$$

其中: $k_p = 250, k_d = 50$. 当有扰动存在时将本文的控制结果与自适应鲁棒控制结果^[9]作比较, 仿真结果如图3-6所示. 机械臂参数如表1所示, 机械臂期望的末端轨迹为

$$\begin{cases} x_{1d} = 0.28 \cos \frac{\pi t}{5} + 0.85, \\ x_{2d} = 0.28 \sin \frac{\pi t}{5}. \end{cases}$$



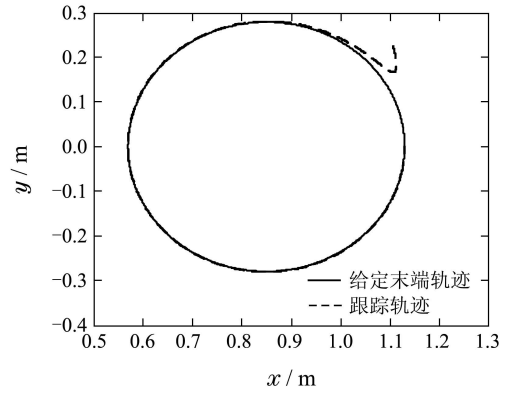
(a) 末端轨迹跟踪



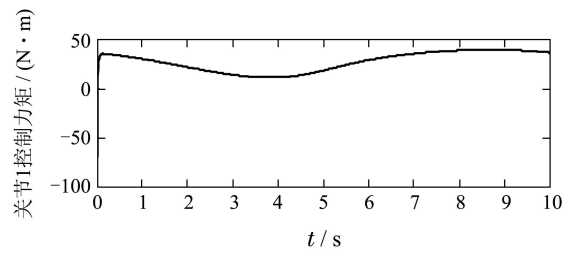
(b) 关节控制力矩

图3 地面二自由度机械臂自抗扰控制仿真结果

Fig. 3 Simulation results of ADRC control on the ground



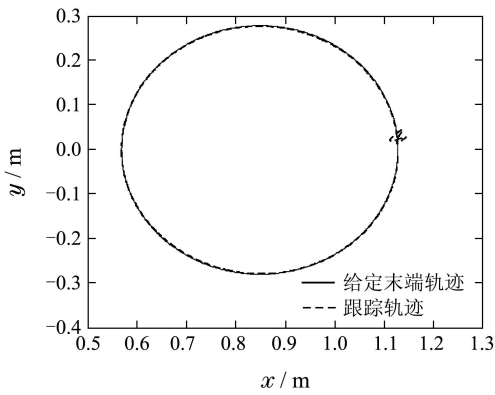
(a) 末端轨迹跟踪



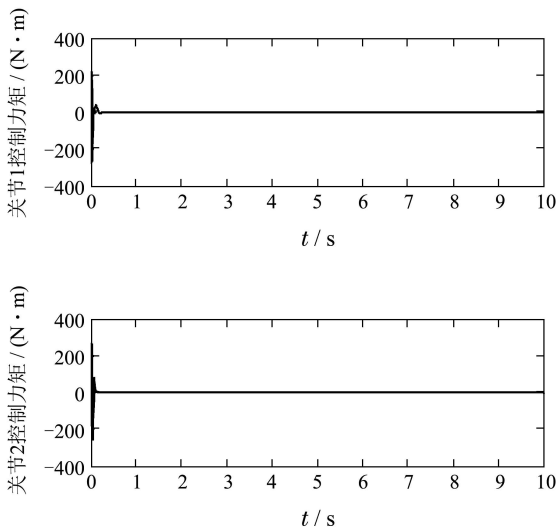
(b) 关节控制力矩

图5 地面二自由度机械臂PD控制仿真结果

Fig. 5 Simulation results of PD control on the ground



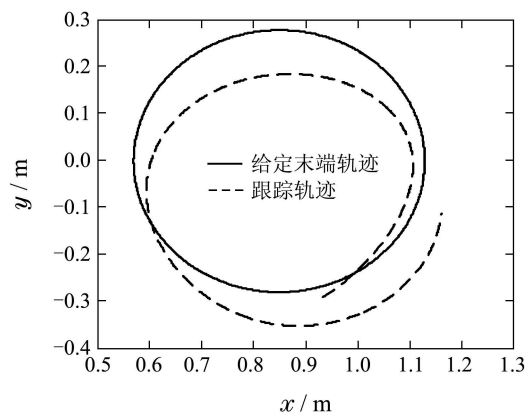
(a) 末端轨迹跟踪



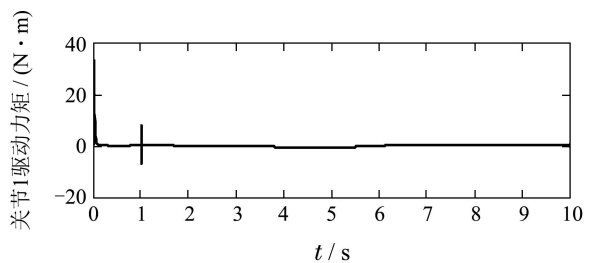
(b) 关节控制力矩

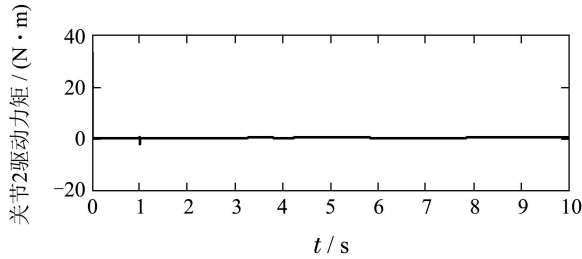
图4 空间自由漂浮机械臂自抗扰控制仿真结果

Fig. 4 Simulation results of ADRC control in space



(a) 末端轨迹跟踪





(b) 关节控制力矩

图6 空间自由漂浮机械臂PD控制仿真结果

Fig. 6 Simulation results of PD control in the space

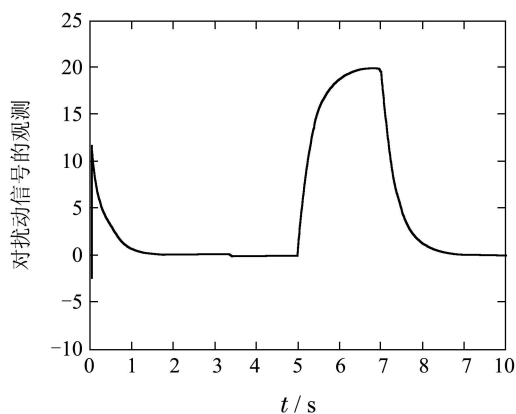
表1 机械臂参数

Table 1 Parameters of manipulator with two links

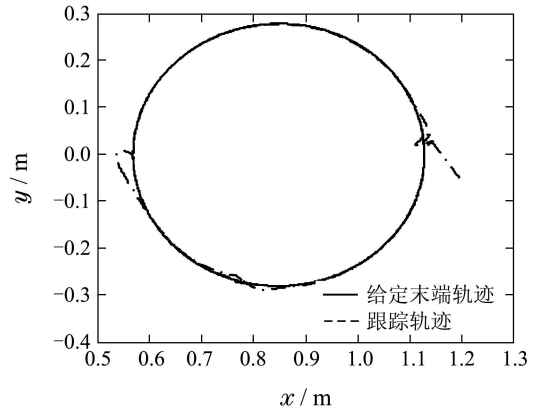
杆件号	a_i (m)	b_i (m)	m_i (kg)	I_i (kg·m ²)
0	—	0.5	40	6.667
1	0.5	0.5	4	0.333
2	0.5	0.5	3	0.250

从图3-图6可以看出,使用PD控制器对机械臂进行控制时,在地面可以得到很好的控制效果;当在空间时,由于重力消失,机械臂将处于自由漂浮状态,模型会发生变化.控制器中的重力补偿会对机械臂产生影响,无法跟踪上期望轨迹.而使用自抗扰控制器对这两种情况下机械臂进行控制时,由于ESO可以将系统模型变化视为扰动并进行观测和补偿,因此,合理调整控制器的参数,可以获得较好的控制效果,仿真结果表明两种情况均能取得较好的控制效果.

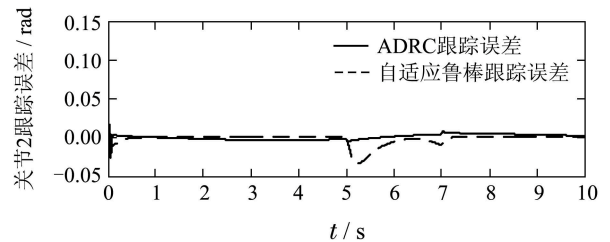
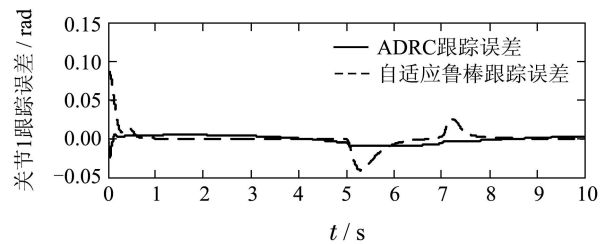
由于太空环境有很多不确定性干扰,为了进一步验证自抗扰控制器的抗扰性能及ESO的观测作用,在仿真5s时将一个幅值为20的阶跃扰动信号作用于处于空间自由漂浮状态下的机械臂,7秒时再将此扰动信号去掉.使用ESO对其进行观测,并且将关节跟踪误差及末端轨迹的跟踪结果与自适应鲁棒控制器进行比较,仿真曲线如图7所示.



(a) 对扰动信号的观测结果



(b) 末端轨迹跟踪



(c) 角度跟踪误差

图7 有扰动存在时仿真结果

Fig. 7 Simulation results when there exists disturbances

从图7可以看出,当没有外部扰动时使用自适应鲁棒控制器对空间机械臂进行控制可以取得较好的控制效果,然而,当外部扰动存在时,则会产生跟踪误差,无法取得较好的跟踪效果.由于自抗扰控制器中的ESO能够对扰动进行实时观测并给予补偿,所以当有扰动存在时使用自抗扰控制器对空间机械臂系统进行控制依旧能够取得很好的控制效果.由此说明使用ADRC对空间机械臂系统进行控制不仅能适应空间机械臂由地面到空间模型的变化,而且还具有很强的抗扰能力,这充分显示了本文所设计的自抗扰控制器的优越性.

6 结论(Conclusions)

本文针对处于地面重力及空间微重力两种环境下的空间机械臂分别建立了系统的动力学模型,并设计了两种情况下轨迹跟踪的自抗扰控制算法.通过使用扩张状态观测器估计系统总干扰,对系统的扰动进行观测与补偿.通过对系统及观测器的稳定性进行分析,表明了所设计控制器的有效性.将自

抗扰控制结果与PD控制及自适应鲁棒控制结果作对比, 仿真结果表明, 本文所设计的自抗扰控制算法不仅能够适应模型重力的变化, 而且具有很强的抗扰能力. 为空间机械臂地面装调与空间服役提供了一种新的控制方法.

参考文献(References):

- [1] LANDZETTEL K, PREUSCHE C, ALBU-SCHAFFER A, et al. Robotic on-orbit servicing-DLR's experience and perspective [C] // *Proceedings of IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing: IEEE, 2006, 10: 4587 – 4594.
- [2] PAPADOPOULOS E G, DUBWSKY S. On the nature of control algorithms for free floating space manipulators [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, 7(6): 750 – 758.
- [3] 王景, 刘良冻, 梁斌. 任务空间内空间机械臂的一种鲁棒自适应控制 [J]. *航天控制*, 2000, 18(1): 37 – 43.
(WANG Jing, LIU Liangdong, LIANG Bin. A robust adaptive control for space manipulators in task space [J]. *Space Control*, 2000, 18(1): 37 – 43.)
- [4] 陈力. 参数不确定空间机械臂系统的鲁棒自适应混合控制 [J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(4): 512 – 516.
(CHEN Li. Robust and adaptive composite control of space manipulator system with uncertain parameters [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 512 – 516.)
- [5] 田慧慧, 苏玉鑫. 机器人系统输出反馈重复学习轨迹跟踪控制 [J]. *控制与决策*, 2012, 27(11): 1756 – 1760.
(TIAN Huihui, SU Yuxin. Global asymptotic stable repetitive output feedback tracking control of robot manipulators [J]. *Control and Decision*, 2012, 27 (11): 1756 – 1760.)
- [6] 谢箭, 刘国良, 颜世佐, 等. 基于神经网络的不确定性空间机器人自适应控制方法研究 [J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 123 – 127.
(XIE Jian, LIU Guoliang, Yan Shizuo, et al. Study on neural network adaptive control method for uncertain space manipulator [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31 (1): 123 – 127.)
- [7] GE S S, HANG C C, WOON L C. Adaptive neural network control of robot manipulators in task space [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, 44(6): 746 – 752.
- [8] 张文辉, 齐乃明, 尹洪亮, 等. 基于滑模变结构的空间机器人神经网络跟踪控制 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(9): 1141 – 1144.
(ZHANG Wenhui, QI Naiming, YIN Hongliang, et al. Neural network tracking control of space robot base on sliding-mode variable structure [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(9): 1141 – 1144.)
- [9] 刘福才, 高娟娟, 王芳. 空间机械臂地面装调与空间应用自适应鲁棒控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(1): 69 – 76.
(LIU Fucui, GAO Juanjuan, WANG Fang. Adaptive robust control of space manipulator during both ground alignment and space applications [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(1): 69 – 76.)
- [10] ZHENG Q, CHEN Z Z, GAO Z Q. A practical approach to disturbance decoupling control [J]. *Engineering Practice*, 2009, 17(9): 1016 – 1025.
- [11] 武利强, 韩京清. 直线型倒立摆的自抗扰控制设计方案 [J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(5): 665–669,688.
(WU Liqiang, HAN Jingqing. Active disturbance rejection controller scheme for the linear inverted pendulum [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(5): 665 – 669, 688.)
- [12] 韩京清. 自抗扰控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
(HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2008.)
- [13] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展 [J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(4): 485–492.
(HUANG Yi, ZHANG Wenge. Development of active disturbance rejection controller [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 485 – 492.)

作者简介:

刘福才 (1966–), 男, 博士生导师, 目前研究方向为模糊辨识与预测控制等, E-mail: lfc_xb@263.net;

梁利环 (1990–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为空间机器人控制, E-mail: lhliang719@163.com;

高娟娟 (1987–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为空间机器人建模与控制, E-mail: gaojuanjuan_2008@163.com;

王文魁 (1937–), 男, 博士生导师, 目前研究方向为极端条件下凝聚态物理、微重力科学等, E-mail: wkwang@ysu.edu.cn.