

# 带有触觉的空间机械臂操控未知载荷特性识别

侯月阳<sup>1,2</sup>, 卢山<sup>1,2</sup>, 于学文<sup>1,2</sup>, 王奉文<sup>1,2</sup>

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109; 2. 上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109)

**摘要:** 为在线准确辨识载荷特性参数, 提出一种利用关节力矩和触觉传感信息进行未知载荷特性参数辨识的方法。该方法基于牛顿-欧拉方程, 采用归一化最小均方误差法进行自适应滤波, 从而辨识出未知载荷的特性参数。为校验算法, 利用 MATLAB/Simulink 和 ADAMS 软件搭建未知载荷特性辨识仿真平台。该平台执行机构包括多自由度机械臂和二指爪末端操作器, 机械臂关节具有力矩传感, 末端操作器指爪内侧具有触力传感器。仿真表明, 在具有激励信号幅值 1% 的白噪声情况下, 辨识误差小于 2%。

**关键词:** 空间机械臂; 特性辨识; 未知载荷; 触觉传感; 归一化最小均方误差法

**中图分类号:** V448.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2016)10-1215-07

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.10.009

## Characteristic Identification of Unknown Load Controlled by Space Manipulator Based on Tactile

HOU Yue-yang<sup>1,2</sup>, LU Shan<sup>1,2</sup>, YU Xue-wen<sup>1,2</sup>, WANG Feng-wen<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In order to accurately identify the load parameters online, a method is proposed, in which the tactile sensor information of an end-effector is used to identify the characteristic parameters of an unknown load. The method is based on the Newton-Euler equations and using the normalized least mean square error method adaptive filtering. The software of MATLAB/Simulink and ADAMS is used to build the unknown load parameters identification simulation platform in order to verify the algorithm. The actuating mechanism of the simulation platform includes a multi-DOF space manipulator and an end-effector with two claws. The manipulator arm joints have torque sensors. The inner end of the claws for the end-effector each has a tactile sensor, whose data is used to obtain the characteristic parameters. The simulation shows that the identification error is less 2% with the white noise whose values reach to 1% of the excitation signal ranges.

**Key words:** Space manipulator; Characteristic identification; Unknown load; Tactile sensing; Normalized least mean square error method

## 0 引言

空间机械臂基座不固定导致的机械臂动力学和航天器动力学耦合, 是机械臂在轨操作中面临的一个复杂动力学问题<sup>[1]</sup>。空间机械臂捕获的未知载荷具有未知的惯性参数, 如质量、质心和转动惯量。机械臂和载荷之间的动力学相互作用导致无法求解

整个系统的动力学特性。

为了抑制和消除空间未知载荷对航天器的影响, 保证航天器正常工作, 研究的首要前提是对空间未知载荷惯性参数进行辨识<sup>[2]</sup>。

如果未在标称位置捕获载荷, 即使是已知载荷, 也会使广义雅克比矩阵的计算存在误差, 导致惯性参数改变空间机械臂的运动学<sup>[3-5]</sup>。自由飞行空间

机械臂末端操作器捕获未知载荷惯性参数的识别方法基于两种原理:线动量和角动量守恒定理、牛顿欧拉方程<sup>[6-7]</sup>。这些方法的辨识结果是末端固连系统的动力学参数而非载荷物体本身的参数<sup>[8]</sup>。

文献[9]首次提出了通过动量守恒定律辨识空间机械臂捕获的未知目标惯性参数的方法,但该方法无法解决参数解算的奇异性问题。文献[10]提出了机械臂捕获未知载荷动力学参数辨识的两种方法:一种方法根据测量飞行器的速度和角速度信息来辨识未知载荷的惯性参数;另一种方法通过测量对飞行器的反作用力和反力矩解算未知载荷的惯性参数。但是以上两种方法均需要配合振动抑制控制策略使用。

基于上述问题,本文提供一种载荷参数辨识的新途径,采用末端触觉辅助识别未知载荷参数。为验证方法,搭建空间机械臂抓取未知载荷参数辨识仿真平台进行仿真校验。

## 1 空间未知载荷参数辨识理论基础

对空间未知载荷进行参数辨识,需要获取航天器-空间机械臂-未知载荷组成系统的动力学和运动学信息。通过这些信息构造辨识方程,进而求解未知载荷的惯性参数。在此对整个系统的动力学、运动学信息进行分析。

### 1.1 运动学描述

图1为空间机械臂对空间未知载荷捕获后形成的航天器本体- $n$ -DOFs机械臂-未知载荷系统。不失一般性,假设航天器本体处于空间自由漂浮状态,忽略微重力等外力作用。末端固连物的惯性参数未知。

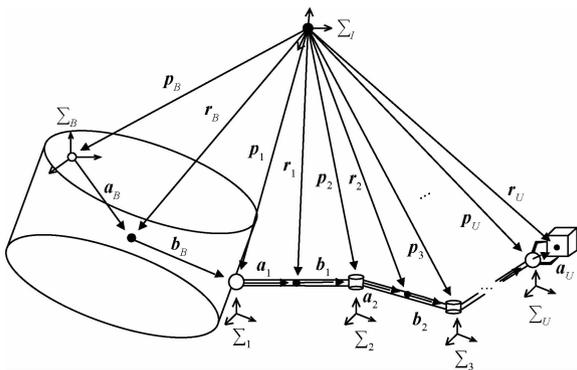


图1 航天器本体-空间机械臂-未知载荷系统

Fig. 1 Spacecraft body-space manipulator-unknown load system

图1中 $\Sigma_I$ 为惯性坐标系, $\Sigma_B$ 为航天器本体坐标系, $\Sigma_i$ 为连杆 $i$ ( $i=1,2,\dots,n-1$ )的本体坐标系(设置在关节 $i$ 上,建系方式遵循D-H规则), $\Sigma_U$ 为末端操作器本体坐标系(设置在关节 $n$ 上); $p_B$ 为航天器本体原点所在惯性系中的空间矢量, $r_B$ 为航天器本体质心在惯性系中的空间矢量; $a_B$ 为航天器本体原点所在航天器本体坐标系到航天器本体质心的位置矢量; $b_B$ 为航天器本体质心到关节1的位置矢量; $p_i$ 为连杆 $i$ 本体坐标系原点在惯性系中的空间矢量, $r_i$ 为连杆 $i$ 质心在惯性系中的空间矢量; $a_i$ 为连杆 $i$ 本体坐标原点到连杆 $i$ 质心的位置矢量; $b_i$ 为连杆 $i$ 质心到关节 $i+1$ 的位置矢量; $a_U$ 为末端操作器本体坐标系原点到末端固连物质心(末端操作器与空间未知载荷固连后的质心)的位置矢量。 $p_U$ 为末端操作器本体坐标系原点在惯性系中的空间矢量, $r_U$ 为末端固连物质心在惯性系中的空间矢量。 $\theta_i$ 为关节 $i$ 的角度, $\dot{\theta}_i$ 与 $\omega_i^*$ 均表示关节 $i$ 的角速度。 $\omega_B$ 为航天器本体角速度, $\omega_i$ 为连杆 $i$ 在惯性系的角速度, $\omega_U$ 为末端固连物的角速度。

### 1.2 动力学建模

根据运动学关系可得惯性系下的动力学关系表达式:

$$\dot{r}_B = \dot{p}_B + \omega_B a_B \quad (1)$$

$$\omega_1 = \omega_B + \dot{\theta}_1 = \omega_B + \omega_1^* \quad (2)$$

$$\dot{p}_1 = \dot{r}_B + \omega_B b_B \quad (3)$$

$$\dot{r}_1 = \dot{p}_1 + \omega_1 a_1 \quad (4)$$

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \dot{\theta}_i \quad (i=2,3,\dots,n) \quad (5)$$

$$\dot{p}_i = \dot{r}_{i-1} + \omega_{i-1} b_{i-1} \quad (i=2,3,\dots,n) \quad (6)$$

$$\dot{r}_i = \dot{p}_i + \omega_i a_i \quad (i=2,3,\dots,n-1) \quad (7)$$

$$\omega_U = \omega_n \quad (8)$$

$$\dot{p}_U = \dot{p}_n \quad (9)$$

$$\dot{r}_U = \dot{p}_U + \omega_U a_U \quad (10)$$

$$\ddot{r}_B = \ddot{p}_B + \dot{\omega}_B a_B + \omega_B (\omega_B a_B) \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_1 = \dot{\omega}_B + \dot{\omega}_1^* \quad (12)$$

$$\ddot{p}_1 = \ddot{r}_B + \dot{\omega}_B b_B + \omega_B (\omega_B b_B) \quad (13)$$

$$\ddot{r}_1 = \ddot{p}_1 + \dot{\omega}_1 a_1 + \omega_1 (\omega_1 a_1) \quad (14)$$

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} + \dot{\omega}_i^* \quad (i=2,3,\dots,n) \quad (15)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_i = \ddot{\mathbf{r}}_{i-1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \mathbf{b}_{i-1} + \boldsymbol{\omega}_{i-1} (\boldsymbol{\omega}_{i-1} \mathbf{b}_{i-1}) \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (16)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = \ddot{\mathbf{p}}_i + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \mathbf{a}_i + \boldsymbol{\omega}_i (\boldsymbol{\omega}_i \mathbf{a}_i) \quad (i = 2, 3, \dots, n-1) \quad (17)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_U = \dot{\boldsymbol{\omega}}_n \quad (18)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_U = \ddot{\mathbf{p}}_n \quad (19)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_U = \ddot{\mathbf{p}}_U + \dot{\boldsymbol{\omega}}_U \mathbf{a}_U + \boldsymbol{\omega}_U (\boldsymbol{\omega}_U \mathbf{a}_U) \quad (20)$$

## 2 未知载荷参数辨识方法

### 2.1 基于关节力矩的末端固连系统载荷参数辨识

采用牛顿-欧拉方程辨识原理进行空间未知载荷参数辨识公式推导。通过关节力矩传感得到末端和载荷的力矩信息,并进行末端载荷的整体参数辨识。针对抓捕任务完成后系统的力和力矩关系进行分析。

系统的内力平衡有以下算式:

$$0 = \hat{\mathbf{f}}_B + \mathbf{f}_1 \quad (21)$$

$$\mathbf{f}_1 = \hat{\mathbf{f}}_1 + \mathbf{f}_2 \quad (22)$$

$$\mathbf{f}_{i-1} = \hat{\mathbf{f}}_{i-1} + \mathbf{f}_i \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (23)$$

$$\mathbf{f}_n = \mathbf{f}_U = \hat{\mathbf{f}}_U \quad (24)$$

$$\hat{\mathbf{f}}_B = m_B \ddot{\mathbf{r}}_B \quad (25)$$

$$\hat{\mathbf{f}}_i = m_i \ddot{\mathbf{r}}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{f}}_U = m_U \ddot{\mathbf{r}}_U \quad (27)$$

$$\mathbf{F} = \hat{\mathbf{f}}_B + \sum_{i=1}^{n-1} \hat{\mathbf{f}}_i + \hat{\mathbf{f}}_U = m_B \ddot{\mathbf{r}}_B + \sum_{i=1}^{n-1} m_i \ddot{\mathbf{r}}_i + m_U \ddot{\mathbf{r}}_U \quad (28)$$

式中: $\mathbf{F}$ 代表系统内力矢量和, $\hat{\mathbf{f}}_B$ 为航天器本体所受外力矢量和,作用于航天器本体质心; $\hat{\mathbf{f}}_i$ 为连杆*i*所受外力矢量和,作用于连杆*i*质心; $\mathbf{f}_1$ 为航天器本体与连杆1之间相互作用力,作用于关节1; $\mathbf{f}_i$ 为连杆*i*-1与连杆*i*之间的相互作用力,作用于关节*i*。现假设系统不受外力,即 $\mathbf{F}=0$ ,则有:

$$-m_U \ddot{\mathbf{p}}_U = m_U [\dot{\boldsymbol{\omega}}_U \mathbf{a}_U + \boldsymbol{\omega}_U (\boldsymbol{\omega}_U \mathbf{a}_U)] + \sum_{i=1}^{n-1} m_i \ddot{\mathbf{r}}_i + m_B \ddot{\mathbf{r}}_B = 0 \quad (29)$$

令 $\mathbf{f}_K = m_B \ddot{\mathbf{r}}_B + \sum_{i=1}^{n-1} m_i \ddot{\mathbf{r}}_i$ ,则

$$- \ddot{\mathbf{p}}_U = \mathbf{f}_K \dot{\boldsymbol{\Omega}}_U \left[ \frac{1}{m_U} \mathbf{a}_U \right]^T \quad (30)$$

式中:

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}}_U = \dot{\boldsymbol{\omega}}_U + \boldsymbol{\omega}_U^2 \quad (31)$$

式(30)实现了未知载荷惯性参数与系统可量测信息的线性化分离,并可写成辨识方程式(32)。

$$\mathbf{A}_3 \mathbf{x}_3 = \mathbf{b}_3 \quad (32)$$

式中: $\mathbf{A}_3 = \mathbf{f}_K \dot{\boldsymbol{\Omega}}_U$ ,  $\mathbf{x}_3 = \left[ \frac{1}{m_U} \mathbf{a}_U^T \right]^T$ ,  $\mathbf{b}_3 = -\ddot{\mathbf{p}}_U$ 。

$\mathbf{A}_3$  ( $3 \times 4$ )、 $\mathbf{b}_3$  ( $3 \times 1$ )为可量测信息组成的矩阵和矢量, $\mathbf{x}_3$ 由空间未知载荷的待辨识参数 $m_U$ 、 $\mathbf{a}_U = [a_{Ux}, a_{Uy}, a_{Uz}]^T$ 组成。式(32)为未知载荷质量和质心的辨识方程。

同理,系统的内力矩平衡有以下算式:

$$0 = \mathbf{n}_1 + \hat{\mathbf{n}}_B + \mathbf{b}_B \mathbf{f}_1 \quad (33)$$

$$\mathbf{n}_{i-1} = \mathbf{n}_i + \hat{\mathbf{n}}_{i-1} + \mathbf{a}_{i-1} \mathbf{f}_{i-1} + \mathbf{b}_{i-1} \mathbf{f}_i \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (34)$$

$$\mathbf{n}_U = \mathbf{n}_n \quad (35)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_U = \hat{\mathbf{n}}_n \quad (36)$$

$$\mathbf{n}_U = \hat{\mathbf{n}}_U + \mathbf{a}_U \mathbf{f}_U \quad (37)$$

式中: $\hat{\mathbf{n}}_B$ 为航天器本体所受外力矩矢量和,作用于航天器本体质心; $\hat{\mathbf{n}}_i$ 为连杆*i*所受外力矩矢量和,作用于连杆*i*质心; $\mathbf{n}_1$ 为航天器本体与连杆1之间相互作用力矩,作用于关节1; $\mathbf{n}_i$ 为连杆*i*-1与连杆*i*之间的相互作用力矩,作用于关节*i*。

根据欧拉方程,有:

$$\hat{\mathbf{n}}_B = \mathbf{I}_B \dot{\boldsymbol{\omega}}_B + \boldsymbol{\omega}_B (\mathbf{I}_B \boldsymbol{\omega}_B) \quad (38)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_1 = \mathbf{I}_1 \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 + \boldsymbol{\omega}_1 (\mathbf{I}_1 \boldsymbol{\omega}_1) \quad (39)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_i = \mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i (\mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i) \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (40)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_U = \mathbf{I}_U \dot{\boldsymbol{\omega}}_U + \boldsymbol{\omega}_U (\mathbf{I}_U \boldsymbol{\omega}_U) \quad (41)$$

由式(27)、(28)、(37)、(41)可得,

$$\mathbf{n}_U = (m_B \ddot{\mathbf{r}}_B + \sum_{i=1}^{n-1} m_i \ddot{\mathbf{r}}_i) \mathbf{a}_U + \mathbf{I}_U \dot{\boldsymbol{\omega}}_U + \boldsymbol{\omega}_U (\mathbf{I}_U \boldsymbol{\omega}_U) \quad (42)$$

即

$$\mathbf{n}_U = \mathbf{f}_K \dot{\boldsymbol{\Omega}}_U [\mathbf{a}_U \quad \mathbf{I}]^T \quad (43)$$

根据力矩守恒关系,假设内力矩和为零,易得:

$$\mathbf{n}_U = \mathbf{b}_B + \sum_{i=1}^{n-1} (\mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i) \hat{\mathbf{f}}_B - \hat{\mathbf{n}}_B + \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \mathbf{b}_i + \sum_{j=2}^{n-1} (\mathbf{a}_j + \mathbf{b}_j) \hat{\mathbf{f}}_i - \hat{\mathbf{n}}_i \right] \quad (44)$$

即通过式(44),  $\mathbf{n}_U$  可量测。式(43)可写为:

$$\mathbf{n}_U - \mathbf{f}_k \mathbf{a}_U = \dot{\mathbf{Q}}_U \mathbf{I} \quad (45)$$

式(45)可写成辨识方程式:

$$\mathbf{A}_4 \mathbf{x}_4 = \mathbf{b}_4 \quad (46)$$

式中:  $\mathbf{A}_4 = \dot{\mathbf{Q}}_U$ ,  $\mathbf{b}_4 = \mathbf{n}_U - \mathbf{f}_k \mathbf{a}_U$ ,  $\mathbf{x}_4 = \mathbf{I}$ 。

$\mathbf{A}_4$  ( $3 \times 6$ ),  $\mathbf{b}_4$  ( $3 \times 1$ ) 为可量测信息组成的矩阵和矢量,  $\mathbf{x}_4$  为空间未知载荷的待辨识参数  $\mathbf{I} = [I_{xx}, I_{xy}, I_{xz}, I_{yy}, I_{yz}, I_{zz}]^T$  组成的矢量。式(46)为未知载荷惯量参数的辨识方程。

通过依次求解式(32)、(46), 末端操作器和未知载荷的10个惯性参数得到了完整辨识。

## 2.2 基于触力信息的未知载荷参数辨识

以上辨识过程是对末端操作器与空间未知载荷固连后形成的末端固连系统进行整体辨识, 即辨识结果为末端固连系统的惯性参数。然而实际中常常更需要知道关于未知载荷本身的惯性参数。如果通过理论计算将末端固连物中包含的已知信息(即末端操作器的惯性参数)去除来得到空间未知载荷本身的惯性参数, 将会导致更加复杂的理论计算。因而可通过对末端操作器在抓取平稳后抓取力的测量实现对未知物本身的参数辨识。配置触觉传感器的末端操作器抓取未知载荷示意图如图2所示。

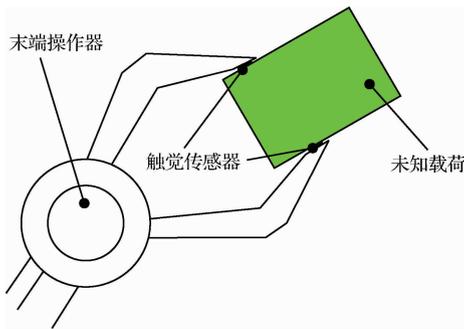


图2 操作未知载荷示意图

Fig. 2 Manipulating unknown load sketch

设触觉传感器测量的力矢量和为  $\mathbf{f}_U$ , 则根据式(24)、(28)以及  $\mathbf{F} = 0$ , 可得,

$$\mathbf{f}_U = -\mathbf{f}_k \quad (47)$$

根据式(30)可得,

$$-\ddot{\mathbf{p}}_U = [-\mathbf{f}_U \quad \dot{\mathbf{Q}}_U] \left[ \frac{1}{m_U} \quad \mathbf{a}_U \right]^T \quad (48)$$

式中:  $\ddot{\mathbf{p}}_U = d(\dot{\mathbf{p}}_U)/dt$ 。

即通过式(48)可得到未知载荷本身的质量和质心。再通过式(46)获得未知载荷的惯量参数。

## 3 参数辨识滤波算法

### 3.1 基于 LMS 滤波算法

未知载荷的参数辨识方程可划归为线性方程  $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$ 。由于辨识方程是不定方程, 无法直接求得方程的解析值。通过构造线性神经网络, 并通过权值迭代准则来辨识惯性参数, 基于 LMS 准则进行线性网络参数辨识。

不失一般性, 系数矩阵  $\mathbf{A}$  为  $M \times N$  矩阵,  $\mathbf{b}$  为  $M \times 1$  列向量,  $\mathbf{x}$  为待辨识惯性参数向量。

由方程

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (49)$$

可得

$$\mathbf{A}(k)\mathbf{x} = \mathbf{b}(k), \quad k=1, 2, \dots, M \quad (50)$$

式中:  $\mathbf{A}(k)$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的第  $k$  行行向量,  $\mathbf{b}(k)$  为向量  $\mathbf{b}$  的第  $k$  个元素。

构造如图3所示的 Adaline 神经网络<sup>[11]</sup>, 网络输入为  $\mathbf{A}(k)$ , 输入节点个数为系数矩阵  $\mathbf{A}$  的列数; 网络期望输出为  $\mathbf{b}(k)$ , 实际输出为  $y$ ,  $e$  为输出偏差; 隐层节点输出为  $t$ 。根据 Adaline 网络的特性, 隐层节点的激活函数  $f(t) = t$ 。

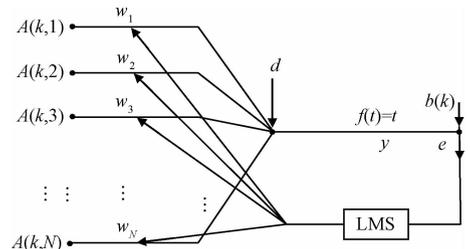


图3 Adaline 网络

Fig. 3 Adaline network

通过以上神经网络的构造, 可得:

$$f\left(\sum_{i=1}^N A(k,i)w_i + d\right) = \sum_{i=1}^N A(k,i)w_i + d = \mathbf{b}(k) \quad (51)$$

为计算方便, 隐层节点偏置  $d$  设置为 0。即

$$\mathbf{A}(k)\mathbf{w} = \mathbf{b}(k) \quad (52)$$

式中:  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 。

对比式(50)、(52),未知载荷的惯性参数向量  $\mathbf{x}$  成为了网络训练中所要训练的权重向量  $\mathbf{w}$ ,对网络权值的训练即是对惯性参数的辨识。将可量测的 1 组  $(\mathbf{A}, \mathbf{b})$  逐一拆解成  $M$  组  $(\mathbf{A}(k), \mathbf{b}(k))$ ,并将此  $1 \times M$  组  $(\mathbf{A}(k), \mathbf{b}(k))$  作为训练集来训练 Adaline 网络,使网络的权值向量  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$  随着训练次数的增加最终收敛到惯性参数的真值。

### 3.2 基于 NLMS 滤波算法

由于 NLMS 与一般意义的 LMS 相比,其收敛条件与输入信号无关,且迭代步长可变使 NLMS 有更快的收敛速度,从而在处理存在不同程度相关性的  $(\mathbf{A}, \mathbf{b})$  过程中能够得到更准确的收敛结果。

权值迭代准则采用 NLMS,即归一化最小均方准则。根据 NLMS 算法:

$$\mathbf{w}(p+1) = \mathbf{w}(p) + \mu e(p)\mathbf{u}(p) \quad (53)$$

$$\mu = \frac{\alpha}{\beta + \mathbf{u}^T(p)\mathbf{u}(p)} \quad (54)$$

算法收敛条件为  $\alpha \in (0, 2), \beta \in (0, 1)$ 。

$\mathbf{w}(p)$  为网络第  $p$  次训练权值向量,  $\mu$  为权值迭代步长,  $e(p)$  为网络期望输出与实际输出的偏差,  $\mathbf{u}(p)$  为网络第  $p$  次输入向量。令  $\mathbf{u} = \mathbf{A}(k)$ 。

通过 Matlab/Simulink 建立 Adaline 神经网络并进行训练,实现对未知载荷惯性参数的辨识。辨识的 NLMS 学习规则中,  $\alpha$  设置为 1.8,  $\beta$  设置为 0.9。网络初始权重均设置为  $\mathbf{w}_0 = [1, 1, \dots, 1]_{N \times 1}^T$ 。

### 4 未知载荷参数辨识联合仿真校验

系统的动力学仿真模型如图 4 所示。

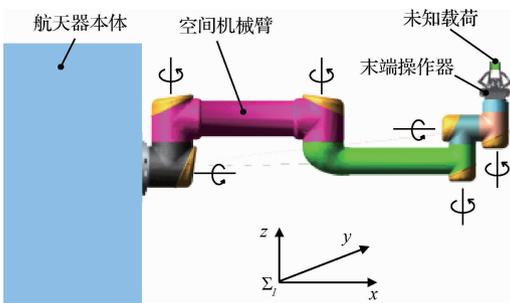


图 4 系统动力学模型

Fig. 4 System dynamic model

采用 ADAMS 动力学仿真软件建立航天器

- 机械臂 - 未知载荷的系统动力学模型。不考虑冗余自由度,仅为载荷参数辨识仿真研究用,采用 6-DOFs 空间机械臂,其 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 空间机械臂 D-H 参数

Table 1 D-H parameters of space manipulator

关节编号	$\theta/\text{rad}$	$a/\text{m}$	$d/\text{m}$	$\alpha/\text{rad}$
1	0	0	0.089159	$\pi/2$
2	0	-0.42500	0	0
3	0	-0.39225	0	0
4	0	0	0.10915	$\pi/2$
5	0	0	0.09465	$-\pi/2$
6	0	0	0.08230	0

为实现对机械臂末端未知载荷的参数辨识,仿真中需要对机械臂上的各个关节施加激励,激励采用周期信号。分别对关节 3、5、6 依次驱动 100 s,总共驱动 300 s,激励信号均为频率 0.2 Hz,幅值 1 rad 的余弦波角加速度信号  $(\cos(4\pi t))$ 。为体现研究方法的实用性,在激励信号中引入幅值 1% 的白噪声信号。

$I_{U_{xz}}$  激励辨识过程(0 ~ 300 s)如图 5 所示。

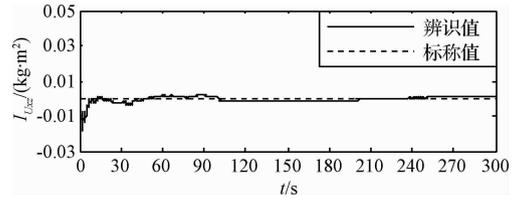


图 5 激励辨识过程

Fig. 5 Excitation identification process

所有参数给出最后 10 s 辨识结果,如图 6 ~ 10 所示。

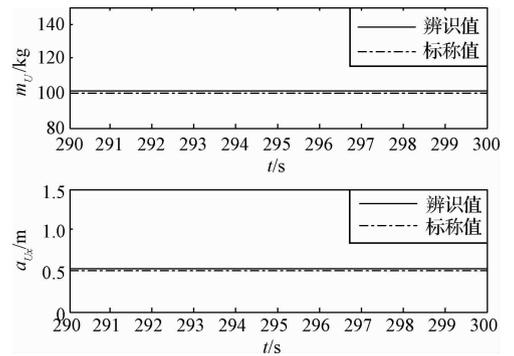


图 6  $m_U, a_{Ux}$  辨识结果

Fig. 6 Identification results of  $m_U$  and  $a_{Ux}$

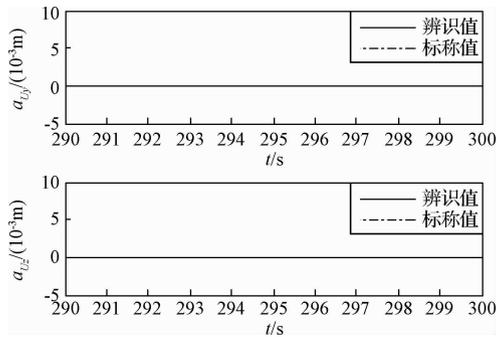
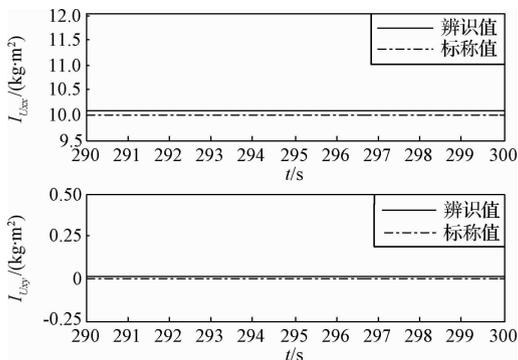
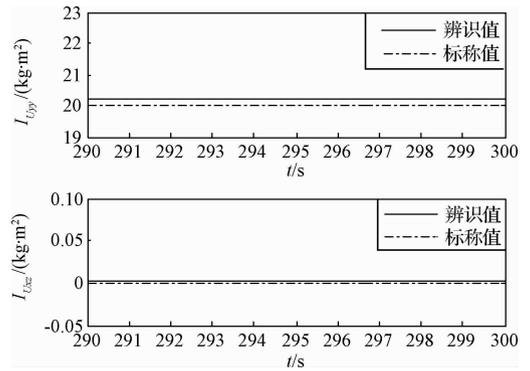
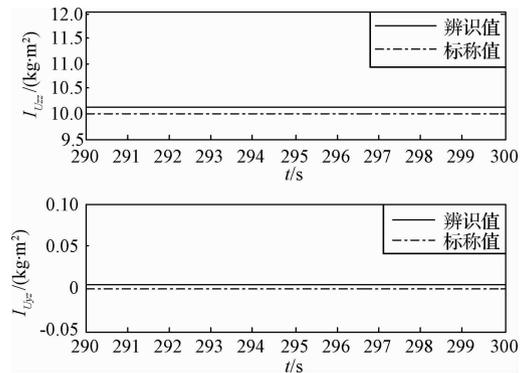
仿真结果如表 2 所示。传统辨识方案是针对末端固连物的惯性参数,而基于触力信息的参数辨识

则是针对未知载荷本身的惯性参数。辨识误差最大为2%。

表2 辨识结果

Table 2 Identification results

特性参数	标称值	辨识值(290~300 s)	误差/%
$m_U/\text{kg}$	100.00	101.60	1.60
$a_{U_x}/\text{m}$	0.50	0.51	2.00
$a_{U_y}/\text{m}$	0.00	0.00	0.00
$a_{U_z}/\text{m}$	0.00	0.00	0.00
$I_{U_{xx}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	10.00	10.10	1.00
$I_{U_{xy}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.00	0.00	0.00
$I_{U_{xz}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.00	0.00	0.00
$I_{U_{yy}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	20.00	20.22	1.10
$I_{U_{yz}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.00	0.00	0.00
$I_{U_{zz}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	10.00	10.13	1.30

图7  $a_{U_y}, a_{U_z}$  辨识结果Fig. 7 Identification results of  $a_{U_y}$  and  $a_{U_z}$ 图8  $I_{U_{xx}}, I_{U_{xy}}$  辨识结果Fig. 8 Identification results of  $I_{U_{xx}}$  and  $I_{U_{xy}}$ 图9  $I_{U_{yy}}, I_{U_{xz}}$  辨识结果Fig. 9 Identification results of  $I_{U_{yy}}$  and  $I_{U_{xz}}$ 图10  $I_{U_{zz}}, I_{U_{yz}}$  辨识结果Fig. 10 Identification results of  $I_{U_{zz}}$  and  $I_{U_{yz}}$ 

1) 提出了基于末端操作器触力传感信息进行参数辨识的方法,该方法能够辨识空间机械臂抓取的未知载荷惯性参数。

2) 辨识方案采用自适应算法,不需要获取未知载荷惯性参数的先验信息,只需获取并构造辨识方程的系数矩阵即可辨识未知载荷的惯性参数。采用基于NLMS准则的Adaline网络进行参数辨识,能够保证对惯性参数的辨识精度与速度。

3) 搭建了参数辨识联合仿真软件平台进行参数辨识仿真。尽管引入激励信号幅值1%的白噪声,算法仍然保持收敛,且辨识误差在2%之内,辨识结果较稳定。

后续工作将在现有研究基础上,对航天器本体的扰动控制做进一步研究,即在对空间未知物参数辨识的同时,通过对机械臂各关节施加最优驱动信号来迅速消除辨识过程对航天器本体的姿态轨迹扰动,保持航天器控制系统的稳、快、准的控制特性。

## 5 结论

以航天器-空间机械臂-抓取的未知载荷为研究对象,进行了未知载荷特性参数辨识的研究,并得出以下结论:

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 卢山,徐帷,刘宗明,等. 面向高轨航天器的在轨操控技术 [J]. 宇航学报,2014,35(4): 425 - 431. [Lu Shan, Xu Wei, Liu Zong-ming, et al. On-orbit manipulation technology for spacecraft in HEO [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(4): 425 - 431. ]
- [ 2 ] 张帆,黄攀峰. 空间绳系机器人抓捕非合作目标的质量特性参数辨识 [J]. 宇航学报, 2015, 36(6):630 - 639. [Zhang Fan, Huang Pan-feng. Inertia parameter estimation for an noncooperative target captured by a space tethered system [J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(6): 630 - 639. ]
- [ 3 ] Wang M, Huang P, Chang H, et al. Docked spacecraft mass property identification using space robot [C]. IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Hailar, China, July 28 - 30, 2014.
- [ 4 ] Ma O, Dang H. On-orbit identification of inertia properties of spacecraft using a robotic arm [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(6): 1761 - 1771.
- [ 5 ] Huang P, Lu Z. The interactive parameters estimation of multiple space robot manipulators [C]. International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems, Beijing, China, September 28 - 29, 2014.
- [ 6 ] 金磊,徐世杰. 空间机器人抓取未知目标的质量特性参数辨识[J]. 宇航学报, 2012, 33(11):1570 - 1576. [Jin Lei, Xu Shi-jie. Inertial parameter identification of unknown object captured by a space robot [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(11): 1570 - 1576. ]
- [ 7 ] Lin S K. Minimal linear combinations of the inertial parameters of a manipulator [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(3): 360 - 373.
- [ 8 ] Zhang L, Tang C W. Dynamics-based mass property identification of non-cooperative space target [C]. International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems, Beijing, China, September 28 - 29, 2014.
- [ 9 ] Murotsu Y, Tsujio S, Senda K, et al. System identification and resolved acceleration control of space robots by using experimental system [C]. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and System, Osaka, Japan, November 3 - 5, 1991.
- [10] Abiko S, Yoshida K. On-line parameter identification of a payload handled by flexible based manipulator[C]. IEEE/RSJ International Conference Intelligent on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, September 28 - October 2, 2004.
- [11] Caldwell M, Coleman D, Correll N. Optimal parameter identification for discrete mechanical systems with application to flexible object manipulation [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, USA, September 14 - 18, 2014.

作者简介:

侯月阳(1983 - ),男,博士,主要从事空间机器人路径规划、控制、参数辨识研究。

通信地址:上海市闵行区中春路1555号(201109)

E-mail: houyueyang\_hit@163.com

(编辑:曹亚君)