

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.03.004

# 机器人操作臂动力学参数的动静态辨识方法研究

张 岩

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**针对机器人惯性参数辨识的问题,提出了一种机械臂动力学参数的动静态混合辨识方法。在静态辨识中,通过变换机械臂的构型构造多维矩阵,利用机器人基座六维力传感器采集的三维力及力矩值,采用最小二乘法求解机械臂各连杆质量与质心坐标的乘积,为动态辨识过程消去待辨识参数的二次项,降低辨识的复杂度。利用静态辨识结果,基于牛顿-欧拉算法推导参数解耦形式的机械臂动力学方程。在动态辨识中,规划各关节按照特定的组合方式运动,根据采集的各关节的力矩、速度及加速度值,采用伪逆法辨识各连杆的惯性张量以及质心坐标,继而完成动力学参数的全辨识,算法的参数辨识误差低于 0.7%。最后,通过仿真实验验证了该辨识算法的正确性与可行性。

**关键词:**动力学参数;动静态辨识;机械臂

中图分类号:TH113;TP241

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)03-0283-06

## Static and dynamic method of identifying dynamic parameters of manipulator

ZHANG Yan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of inertial parameters identification, the method of static and dynamic identification of robot dynamics parameters was presented. In the phase of static identification, a multidimensional matrix was constituted through transforming the configurations of robot arms. Then, the product of mass and center-of-mass coordinates was solved by using the least square method. Based on Newton-Euler algorithm, decoupled dynamic equation of mechanical arms dynamics was deduced. In the phase of dynamic identification, specific joint movement was designed. The inertia tensor and centroid coordinates of robot arms were identified by adopting the pseudo inverse method. Then, the whole identification of dynamic parameters was completed. Finally, the result of simulation and experiment indicate that the correctness and feasibility of the identification algorithm is manifested.

**Key words:** dynamic parameters; dynamic and static identification; manipulator

## 0 引 言

精确的动力学模型是机器人控制及仿真的前提条件,而建立精确的动力学模型需要准确的机器人各连杆动力学参数。机器人在组装完成后,一般无法得到真实机械臂的动力学参数,或只能根据机器人各个关节及连杆的个体参数来估算组装后的参数值,显然这种方法的辨识结果无法满足实际的机器人控制精度要求<sup>[1-2]</sup>。对于机器人动力学参数辨识的研究,美国 MIT

人工智能实验室的 Chae H. An 等人<sup>[3]</sup>根据牛顿欧拉动力学方程,采用岭回归的算法优化得到机器人的组合动力学参数,由于动力学方程中各参数的耦合性较强,该方法仅辨识出机械臂的组合动力学参数值。Kwon S K 等人<sup>[4]</sup>设计了一种高效的机械臂动力学模型辨识算法,该方法在辨识效率上得到了显著地提高,但辨识结果同样出现文献[3]中存在的问题。Katayon 等人<sup>[5]</sup>通过机械臂动力学参数辨识模型的优化,在已知关节力矩的情况下辨识得到除连杆一以外的大部分动力学参数值,由于连杆一只存在绕关节一轴线的旋

转运动,该算法无法辨识连杆一的动力学参数。此外,对于机器人负载动力学参数的辨识,Gautier<sup>[6]</sup>与 Swevers 等人<sup>[7]</sup>根据机械臂的动力学特性并且借助关节力矩传感器,分别设计了负载动力学参数的辨识算法,取得了一定的研究成果。

对于组装完成后的机器人系统,机器人的各个关节一般会装有关节力矩传感器以及关节速度传感器。本研究根据实际情况,在以上条件已知的情况下,设计一种机器人动力学参数的动、静态混合辨识方法。在静态辨识中采用基座六维力传感器,通过变化机械臂的构型,首先辨识得到机器人各连杆的质量与质心坐标的乘积值;在动态辨识过程中,规划关节按特定的组合方式运动,通过辨识算法计算各连杆的惯性张量以及质心坐标,继而完成动力学参数的全辨识。最后,通过仿真实验对辨识方法进行验证,并对辨识精度进行分析。

### 1 符号说明及基本理论

参照机械臂模型图如图 1 所示,现对本研究中出现的符号定义如下:

$c_n$  为第  $n$  连杆质心; ${}^n P_{n+1}$  为第  $n+1$  关节在  $n$  坐标系下的坐标; ${}^{n+1} R$  为坐标系  $n$  到坐标系  $n+1$  的旋转变换矩阵; $\theta_n$ 、 $\dot{\theta}_n$ 、 $\ddot{\theta}_n$  为第  $n$  关节的关节角度、角速度、角加速度; ${}^n \omega_n$ 、 ${}^n \alpha_n$  为第  $n$  连杆在当前坐标系下的角速度、角加速度; ${}^n v_n$ 、 ${}^n a_n$  为第  $n$  关节在当前坐标系下的线速度、线加速度; ${}^n f_n$ 、 ${}^n n_n$  为第  $n$  坐标系下  $n-1$  连杆作用在  $n$  连杆上的力及力矩; $\Sigma_n$  代表第  $n$  关节坐标系; $\tau_n$  代表第  $n$  关节的驱动力矩; ${}^n Z_n$  代表第  $n$  坐标下  $Z$  向单位向量。

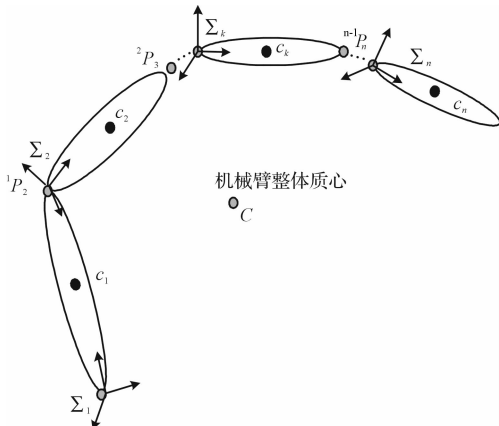


图 1 机械臂模型图

对于机器人旋转关节,各连杆的速度及角速度按如下的方式传递<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} {}^{i+1} \omega_{i+1} &= {}^{i+1} R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1} Z_{i+1} \\ {}^{i+1} a_{i+1} &= {}^{i+1} R^i a_i + {}^{i+1} R^i \omega_i \times \theta_{i+1} {}^{i+1} Z_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1} Z_{i+1} \\ {}^{i+1} v_{i+1} &= {}^{i+1} R ({}^i v_i + {}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1}) \\ {}^{i+1} a_{i+1} &= {}^{i+1} R [{}^i a_i + {}^i \alpha_i \times {}^i P_{i+1} + {}^i \omega_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1})] \end{aligned} \tag{1}$$

机器人各连杆质心所受的力及力矩为:

$$\begin{aligned} {}^i f_{ci} &= m_i {}^i a_{ci} \\ {}^i n_{ci} &= {}^{ci} I_i {}^i \alpha_i + {}^i \omega_i \times ({}^{ci} I_i {}^i \omega_i) \end{aligned} \tag{2}$$

其中: ${}^i a_{ci} = {}^i a_i + {}^i \alpha_i \times c_i + {}^i \omega_i \times ({}^i \omega_i \times c_i)$ 。

本研究所要辨识的动力学参数包括机械臂质量  $m_i$ 、质心坐标  $c_i = \{c_{ix} \ c_{iy} \ c_{iz}\}$  以及惯性张量  $I_i = \{I_{ixx} \ I_{iyy} \ I_{izz} \ I_{ixy} \ I_{ixz} \ I_{iyz}\}$ 。各连杆动力学参数在坐标系间的转化关系为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2) {}^B c_{12} &= m_1 {}^B R^A c_1 + m_2 {}^A c_2 \\ {}^B I &= {}^B R \cdot {}^A I \cdot {}^B R^T \\ {}^B I &= {}^B I_c + m (r_c^T r_c E - r_c r_c^T) \end{aligned} \tag{3}$$

### 2 动力学参数的辨识方法

#### 2.1 静态辨识原理

具有  $n$  个自由度的机器人,各连杆质量与质心坐标存在着如下的关系:

$$MC = m_1 {}^1 R c_1 + m_2 {}^2 R c_2 + \dots + m_n {}^n R c_n \tag{4}$$

式中: $M$ —机械臂总质量; $C$ —机械臂系统的质心; ${}^i R$ ,  $c_i (i=1, 2, \dots, n)$ —各关节坐标系到基坐标系的旋转变换矩阵以及各连杆的质心。

本研究将六维力传感器安装于机器人的第一关节与基座之间,则机械臂系统整体的质量与质心坐标可以通过六维力传感器求得:

$$\begin{aligned} |F| &= Mg \\ N &= F \times C \end{aligned} \tag{5}$$

若基座所受的六维力为: $\{F_x F_y F_z N_x N_y N_z\}$ ,则存在如下的关系:

$$[N_x N_y N_z]^T = -Mg [\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma]^T \times C \tag{6}$$

其中: $|F| = Mg = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ ,  $\alpha = \arccos(F_x/Mg)$ ,  $\beta = \arccos(F_y/Mg)$ ,  $\gamma = \arccos(F_z/Mg)$ 。

取机器人的  $A$  组位姿 ( $A \geq n$ ),每次变化构型时各关节应随机转动一定角度,以确保不出现线性相关的问题。现可以构造如下的矩阵方程:

$$Y = Q \times \psi \tag{7}$$

其中:

$$Y = [MC_1 MC_2 MC_3 \dots MC_A]^T;$$

$$\psi = [m_1 c_1 m_2 c_2 m_3 c_3 \cdots m_n c_n];$$

$$Q = \begin{bmatrix} {}^1_0 R_1 & {}^2_0 R_1 & {}^3_0 R_1 & \cdots & {}^n_0 R_1 \\ {}^1_0 R_2 & {}^2_0 R_2 & {}^3_0 R_2 & \cdots & {}^n_0 R_2 \\ M \\ {}^1_0 R_A & {}^2_0 R_A & {}^3_0 R_A & \cdots & {}^n_0 R_A \end{bmatrix}^o$$

则机器人各连杆的质量与质心坐标乘积的最小二乘解为:

$$\psi = [Q^T \cdot Q]^{-1} Q^T Y \quad (8)$$

### 2.2 动态辨识原理

由牛顿欧拉动力学方程可知,机器人各连杆的力及力矩按照如下的方式逆向递推<sup>[10-12]</sup>:

$${}^i f_i = {}^i R^{i+1} {}^i f_{i+1} + {}^i f_{ci}$$

$${}^i n_i = {}^i R^{i+1} {}^i n_{i+1} + {}^i n_{ci} + {}^i r_{ci} \times {}^i f_{ci} + {}^i P_{i+1} \times {}^i R^{i+1} {}^i f_{i+1}$$

$$\tau_i = {}^i n_i^T Z_i \quad (9)$$

对于末端连杆,由于不存在 ${}^{n+1} f_{n+1}$ 及 ${}^{n+1} n_{n+1}$ ,则末端连杆的力及力矩关系可简化为如下的形式:

$${}^n n_n = {}^n n_{cn} + {}^n r_{cn} \times {}^n f_{cn} \quad (10)$$

合并连杆的质量与质心坐标的乘积项,将其记为 $mc_n$ ,整理后可得:

$${}^n n_n - mc_n \times {}^n a_n = {}^n I_n {}^n \alpha_n + {}^n \omega_n \times ({}^n I_n {}^n \omega_n) + mc_n \times ({}^n \alpha_n \times c_n) + mc_n \times ({}^n \omega_n \times ({}^n \omega_n \times c_n)) \quad (11)$$

将式(11)变换成矩阵方程的形式:

$$N = H \cdot \Phi + K \cdot \Gamma \quad (12)$$

$$\text{其中: } N = \begin{bmatrix} {}^n n_{nx} - {}^n a_{nz} mc_{ny} + {}^n a_{ny} mc_{nz} \\ {}^n n_{ny} + {}^n a_{nz} mc_{nx} - {}^n a_{nx} mc_{nz} \\ {}^n n_{nz} - {}^n a_{ny} mc_{nx} + {}^n a_{nx} mc_{ny} \end{bmatrix};$$

$$\Phi = [I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}]^T;$$

$$\Gamma = [c_{ix}, c_{iy}, c_{iz}]^T。$$

式中: $K$ —连杆质心坐标的系数矩阵,  $K = [K_x \ K_y \ K_z]$ ;  $H$ —惯性张量系数矩阵。

具体形式为:

$$H = \begin{bmatrix} \alpha_{ix} & \omega_{ix} \omega_{iz} & -\omega_{ix} \omega_{iy} \\ -\omega_{iy} \omega_{iz} & \alpha_{iy} & \omega_{ix} \omega_{iy} \\ \omega_{iy} \omega_{iz} & -\omega_{ix} \omega_{iz} & \alpha_{iz} \\ \omega_{ix} \omega_{iz} & -\alpha_{iy} - \alpha_{ix} - \omega_{iy} \omega_{iz} & \omega_{iy}^2 - \omega_{ix}^2 \\ -\alpha_{iz} - \omega_{ix} \omega_{iy} & -\omega_{iz}^2 + \omega_{ix}^2 & \omega_{iy} \omega_{iz} - \alpha_{ix} \\ \omega_{iz}^2 - \omega_{iy}^2 & \omega_{ix} \omega_{iy} - \alpha_{iz} & -\alpha_{iy} - \omega_{ix} \omega_{iz} \end{bmatrix};$$

$$K_x = \begin{bmatrix} m_i c_{yi} \omega_{ix} \omega_{iz} - m_i c_{yi} \alpha_{iy} - m_i c_{zi} \alpha_{iz} - m_i c_{zi} \omega_{ix} \omega_{iy} \\ m_i c_{xi} \alpha_{iy} - m_i c_{zi} \omega_{iy}^2 - m_i c_{xi} \omega_{ix} \omega_{iz} - m_i c_{zi} \omega_{iz}^2 \\ m_i c_{xi} \alpha_{iz} + m_i c_{xi} \omega_{ix} \omega_{iy} + m_i c_{yi} \omega_{iy}^2 + m_i c_{yi} \omega_{iz}^2 \end{bmatrix};$$

$$K_y = \begin{bmatrix} m_i c_{yi} \alpha_{ix} + m_i c_{zi} \omega_{ix}^2 + m_i c_{yi} \omega_{iy} \omega_{iz} + m_i c_{zi} \omega_{iz}^2 \\ m_i c_{xi} \omega_{ix} \omega_{iy} - m_i c_{xi} \omega_{iy} \omega_{iz} - m_i c_{xi} \alpha_{ix} - m_i c_{zi} \alpha_{iz} \\ m_i c_{yi} \alpha_{iz} - m_i c_{xi} \omega_{ix}^2 - m_i c_{yi} \omega_{ix} \omega_{iy} - m_i c_{xi} \omega_{iz}^2 \end{bmatrix};$$

$$K_z = \begin{bmatrix} m_i c_{xi} \alpha_{ix} - m_i c_{yi} \omega_{ix}^2 - m_i c_{yi} \omega_{iy}^2 - m_i c_{zi} \omega_{iy} \omega_{iz} \\ m_i c_{zi} \alpha_{iy} + m_i c_{xi} \omega_{ix}^2 + m_i c_{xi} \omega_{iy}^2 + m_i c_{zi} \omega_{ix} \omega_{iz} \\ m_i c_{xi} \omega_{iy} \omega_{iz} - m_i c_{xi} \alpha_{ix} - m_i c_{yi} \alpha_{iy} - m_i c_{yi} \omega_{ix} \omega_{iz} \end{bmatrix}。$$

由式(9)可知,机器人关节驱动力矩 $\tau$ 为关节力矩 $z$ 方向分量。因此,本研究提取矩阵方程式(12)第3行,在机械臂运动时间内取 $B$ 组数据( $B \geq 9$ ),采用伪逆法辨识得到末端连杆的动力学参数 $\Phi$ 和 $\Gamma$ :

$$[\Phi \Gamma]^T = [H(B)K(B)]^+ \cdot N(B) \quad (13)$$

本研究获得末端连杆动力学参数辨识后,将末端连杆与次末端连杆整体作为待辨识的对象,辨识过程与上述方法相同,然后根据动力学参数的坐标系间转换关系获得次末端机械臂的动力学参数。以此依次递推至第2连杆,完成机器人第2连杆至末端连杆的动力学参数的辨识。

由于机器人第1连杆为绕关节一轴线的旋转运动,其只存在自身坐标系 $z$ 向的速度以及加速度。考虑到连杆一运动的特殊性,需要对其动力学参数辨识的方法进行单独的分析。

关节一在运动的过程中,考虑到上述的分析情况,连杆惯性张量中的3个参数 $I_{1xx}, I_{1yy}, I_{1xy}$ 的变化不会对关节一的力矩产生影响,因此连杆一的上述3个惯性张量均属于无法辨识的动力学参数。令机器人关节一运动,其他关节锁死,则根据牛顿欧拉动力学方程可知关节一的力矩表示如下:

$${}^1 n_1 = {}^1 I_c^1 \alpha + {}^1 \omega \times ({}^1 I_c^1 \omega) + MC \times ({}^1 \alpha \times C) + MC \times ({}^1 \omega \times ({}^1 \omega \times c_n)) + MC \times {}^1 a \quad (14)$$

式中: $C \times ({}^1 \alpha \times C)$ 与 $C \times ({}^1 \omega \times ({}^1 \omega \times c_n))$ —连杆质心的二次方项,其可以通过连杆惯性张量在坐标系间的平移变化进行化简。

式(14)可以变化为如下的形式:

$${}^1 n_1 = {}^1 I_c^1 \alpha + {}^1 \omega \times ({}^1 I_c^1 \omega) + M[(C^T C)E - (CC^T)]^1 \alpha + {}^1 \omega \times [M(C^T C E - CC^T)^1 \omega] + MC \times {}^1 a \quad (15)$$

由公式(3)中惯性张量的转化关系,可以对式(15)进一步化简,最终可以得到如下的关系:

$${}^1 n_1 = {}^1 I^1 \alpha + {}^1 \omega \times ({}^1 I^1 \omega) + MC \times {}^1 a \quad (16)$$

式中: $I^1$ —连杆相对于自身坐标系原点的惯性张量。

则连杆的惯性张量为:

$$[I_{zz} \ I_{xz} \ I_{yz}]^T = \{H_1\}^+ \cdot {}^1 n_1 \quad (17)$$

$$\text{其中: } H_1 = \begin{bmatrix} 0 & -{}^1 \alpha_{1z} & {}^1 \omega_{1z}^2 \\ 0 & -{}^1 \omega_{1z}^2 & -{}^1 \alpha_{1z} \\ {}^1 \alpha_{1z} & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

连杆一的惯性张量  $I_{1zz}$ 、 $I_{1xz}$ 、 $I_{1yz}$  随即可求得。至此,机器人各连杆的惯性张量,第 2 连杆至末端连杆的质量与质心坐标以及机械臂系统整体的质量与质心坐标均以得到辨识,连杆一的质量与质心坐标由式(4)可以直接求得。机械臂动力学参数辨识方法的总体流程图如图 2 所示。

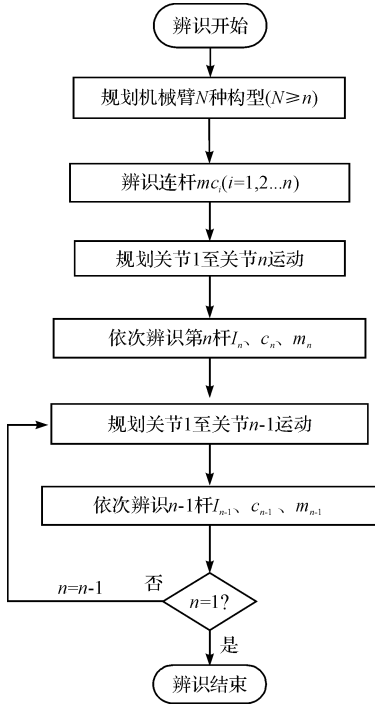


图 2 动力学参数辨识方法流程图

### 3 仿真实验

本研究利用 Visual C++ 开发环境,构建机器人动力学仿真系统的基本构架,并基于 OpenGL 开发六自由度机器人仿真模型。机器人各连杆的 DH 参数、动力学参数如表 1、表 2 所示。

表 1 机器人 D-H 参数表

连杆 $i$	$a_i/m$	$\alpha_i/rad$	$d_i/m$	$\theta_i/rad$
1	0	$-\pi/2$	0	$\pi/2$
2	1.00	0	0	0
3	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
4	0	$-\pi/2$	-0.77	0
5	0	$\pi/2$	0	0
6	0	0	0.42	0

旋转机器人各关节 ( $\theta_{1-6} \in [-\pi, \pi]$ ), 设定机械臂多组构型(实验中选取 8 组位姿)。机械臂各关节的角度如下所示(单位:°):

$$\text{Case1: } \{-172, -27, 158, 90, -145, 35\};$$

$$\text{Case2: } \{-136, -14, 106, -30, -112, 115\};$$

$$\text{Case3: } \{-95, -25, 93, 16, -104, 41\};$$

表 2 机器人连杆名义动力学参数

连杆 $i$	1	2	3	4	5	6	
质量/kg	10.1	7.5	10.1	7.0	10.1	11.9	
${}^i r_i/m$	$r_x$	0.01	0.50	-0.03	0	0	-0.02
	$r_y$	0	0	0	0.14	-0.03	0
	$r_z$	0.10	-0.08	0.13	-0.35	-0.13	0.12
${}^a I_i/(kg \cdot m^2)$	$I_{xx}$	—	0.02	0.10	0.53	0.13	0.11
	$I_{yy}$	—	1.29	0.13	0.47	0.10	0.11
	$I_{zz}$	0.16	1.28	0.06	0.08	0.06	0.11
	$I_{xy}$	—	0	0	0	0	0
	$I_{xz}$	0.01	0	-0.01	0	0	0
	$I_{yz}$	0	0	0	0.10	0.01	0

$$\text{Case4: } \{-71, -38, 79, 8, 142, 5\};$$

$$\text{Case5: } \{-35, -76, 125, -120, 169, 57\};$$

$$\text{Case6: } \{19, -49, 68, 52, -153, 82\};$$

$$\text{Case7: } \{79, -93, 101, -46, -98, -93\};$$

$$\text{Case8: } \{125, -131, -87, 87, 131, 71\}.$$

在动态的辨识实验过程中,本研究首先规划机器人 1~6 关节运动,机器人 1~6 关节的角速度如图 3 所示。规划时间 20 s,初始关节角与终止关节角分别为(单位:°):

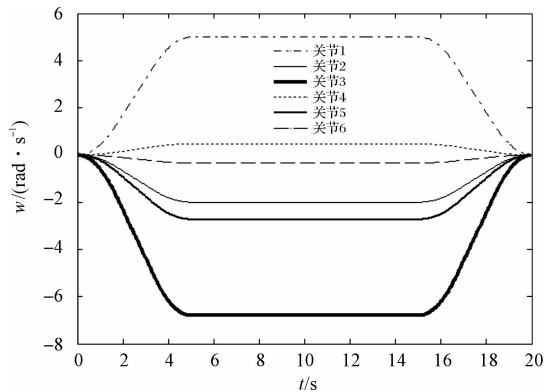


图 3 机器人 1~6 关节的角速度

$$\theta_{be} = \{-165, -60, -78, -7, -139, 5\};$$

$$\theta_{end} = \{-95, -95, -175, -5, -170, 0\}.$$

本研究随机选取 10 个时刻作为采样数据点,各个关节的力矩曲线如图 4 所示。采样完毕后,将关节 6 锁死,1~5 关节按照同样的方式运动,并进行关节力矩的数据提取。依次类推,依次规划机器人 1~n 关节运动, n+1 至 6 关节锁死。

辨识结果如表 3 所示,其中,连杆一的惯性张量的辨识值为相对于自身关节坐标系。由于连杆一运动空间的局限性,  $I_{1xx}$ 、 $I_{1yy}$  以及  $I_{1xy}$  均为无法辨识的参数。连杆一在运动的过程中,其关节力矩与连杆质量、质心坐标以及惯性张量  $I_{1zz}$ 、 $I_{1xz}$ 、 $I_{1yz}$  相关。  $I_{1xx}$ 、 $I_{1yy}$  以及  $I_{1xy}$  的缺失不会对机械臂动力学的建模及运动控制造成影响。

对连杆质量、质心坐标以及惯性张量的误差评判方式采用下式计算模型:

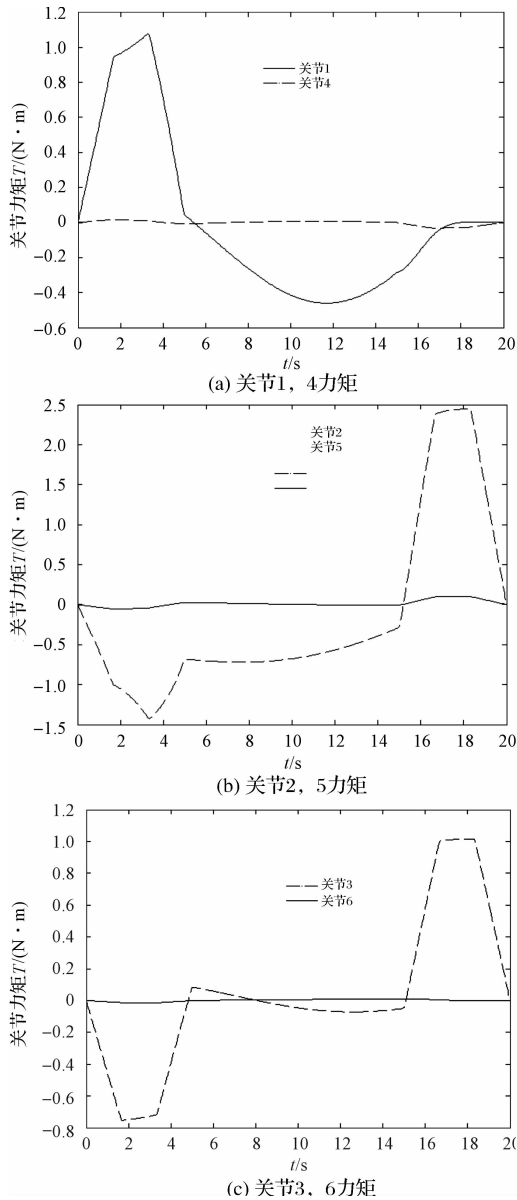


图4 各关节驱动力矩  $\tau$

$$\begin{cases} \text{error}M = |M_{id} - M_{re}| / M_{re} \\ \text{error}C = \sqrt{(c_{xid} - c_{xre})^2 + (c_{yid} - c_{yre})^2 + (c_{zid} - c_{zre})^2} \quad (18) \\ \text{error}I = \text{Norm}(I_{id} - I_{re}) / \text{Norm}(I_{re}) \end{cases}$$

式中:下标 id—辨识值,下标 re—名义值, Norm—求模函数。

表3 连杆动力学参数辨识值

连杆 $i$	1	2	3	4	5	6
质量/kg	10.17	7.45	10.11	6.99	10.10	11.89
$r_i/m$	$r_x$	0.012	0.500	-0.026	0	-0.023
	$r_y$	0	0	0	0.145	-0.026
	$r_z$	0.097	-0.083	0.132	-0.346	-0.132
$I_i/(kg \cdot m^2)$	$I_{xx}$	-	0.014	0.103	0.528	0.127
	$I_{yy}$	-	1.240	0.133	0.464	0.103
	$I_{zz}$	0.147	1.226	0.066	0.082	0.060
	$I_{xy}$	-	-0.018	0	0	0
	$I_{xz}$	0.007	0.003	-0.005	0	0
	$I_{yz}$	0	0	0	0.103	0.005

实验中的关节力、力矩均为理想值。机器人动力学参数辨识误差如表4所示。由表4可见,辨识结果中连杆质量与质心坐标的辨识误差较小,辨识精度较为理想。由于辨识算法采用连杆由外向内递推的辨识思路,存在辨识误差累积的情况。从连杆惯性张量的辨识结果中可以发现其辨识精度由外向内总体呈递减的趋势,所以在动态的辨识过程中,末端连杆惯性张量的辨识精度尤为重要。在实验的过程中,研究者应该尽可能选取多组时刻的数据来对末端连杆惯性参数进行辨识与修正,在减小自身惯性参数辨识误差的同时,避免对后续连杆的辨识精度造成影响。

表4 机器人动力学参数辨识误差

连杆 $i$	errorM/(%)	errorC/mm	errorI
1	0.69	3.61	0.08
2	0.67	3.00	0.04
3	0.10	4.47	0.05
4	0.14	4.46	0.01
5	0.01	4.46	0.03
6	0.08	5.00	0.02

## 4 结束语

本研究在已知机器人关节驱动力矩及基座六维力的情况下,设计了一种机械臂动力学参数的动、静态辨识方法。

本研究采用静态与动态的分步辨识思想,首先由静态辨识得到机械臂质量与质心坐标的乘积,为动态辨识过程消去待辨识参数的二次项,降低辨识的复杂度,在辨识过程中,基座六维力/力矩传感器为静态测量,能够有效降低六维力传感器的动态测量误差;本研究的辨识算法除连杆一的3个惯性张量  $I_{1xx}$ 、 $I_{1yy}$ 、 $I_{1xy}$  外,能够较为精确地辨识出所有连杆的动力学参数值,且连杆的动力学参数辨识结果中包含机械臂关节特性,能够反应机器人实际工作中的惯性参数值。实验结果表明,各连杆动力学参数的辨识结果具有比较高的精度。由于静态辨识结果对动态辨识的修正与补偿,连杆的质量与质心坐标在动态辨识过程中不存在误差累积的情况,其辨识精度相对较高,各连杆质量的辨识误差均小于1%,而各连杆的惯性张量在由外向内递推辨识过程中则存在误差累积的问题。在后续的研究工作中,需要针对这一情况设计连杆惯性张量的修正方法以获得更为理想的辨识结果。

## 参考文献 (References):

[1] ARMSTRONG B, KHATIB O, BURDICK J. The explicit

- dynamic model and inertial parameters of the PUMA560 arm [C]// In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stamford, USA,1986:510-518.
- [2] WU J, WANG J S, ZHENG Y. An overview of dynamic parameter identification of robots[J]. **Robotics and Computer-integrated Manufacturing**,2010,26(5):414-419.
- [3] CHAE H, CHRISTOPHER G, JOHN M. Estimation of inertial parameters of rigid body links of manipulators[C]// In: IEEE Conference on Decision and Control. Fort Lauderdale, USA,1985:990-995.
- [4] HA I J, KO M S, KWON S K. An efficient estimation algorithm for the model parameters of robotic manipulators[J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**,1989,5(3):386-394.
- [5] RADKHAH K, KULIC D, CROFT E. Dynamic parameter identification for the CRS A460 robot [C]// In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA,2007:3842-3847.
- [6] KHALIL W, GAUTIER M, LEMOINE P. Identification of the payload inertial parameters of industrial manipulators [C]// In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy,2007:4943-4948.
- [7] SWEVERS J, VERDONCK W, DE S J. Dynamic model identification for industrial robots[J]. **IEEE Control Systems Magazine**,2007,27(5):58-71.
- [8] 熊有伦,丁 汉,刘思沧. 机器人学[M]. 北京:机械工业出版社,1993:143-148.
- [9] 孙昌国,马香峰,谭吉林. 机器人操作器惯性参数的计算[J]. 机器人,1990,12(2):19-24.
- [10] 陈伟强,张 才,许亚敏. 新型六自由度拟人并联机械臂及其径道分析[J]. 轻工机械,2012,30(2):6-8.
- [11] 张 帝. 空间机器人动力学参数辨识及控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [12] 李保丰. 六自由度空间机器人的工作空间分析与参数辨识[D]. 北京:北京邮电大学自动化学院,2011.

[编辑:张 翔]

#### 本文引用格式:

张 岩. 机器人操作臂动力学参数的动静态辨识方法研究[J]. 机电工程,2014,31(3):283-288.

ZHANG Yan. Static and dynamic method of identifying dynamic parameters of manipulator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(3):283-288.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 269 页)

#### 参考文献 (References):

- [1] 何柏林,孙 佳,史建平. 工模具材料激光表面强化处理应用与发展[J]. 材料热处理技术,2009,38(18):85-89.
- [2] 周建忠,杨超君,杜生亚. 激光强化技术提高模具使用寿命[J]. 电加工与模具,2000(1):42-44.
- [3] 许亚敏. 软固结磨粒气压砂轮的光整加工技术及实验研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2011.
- [4] 计时鸣,金明生,张 宪,等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [5] 计时鸣,丁洁瑾,金明生,等. 软固结气压砂轮的质量评价及试验研究[J]. 机电工程,2013,30(1):21-25.
- [6] 徐 泳,孙其诚,张 凌,等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展,2003,33(2):251-260.
- [7] 王泳嘉,邢纪波. 离散元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳:东北工学院出版社,1991.
- [8] 邢纪波,王泳嘉. 离散元法的改进及其在颗粒介质研究中的应用[J]. 岩土工程学报,1990,12(5):51-57.
- [9] 田 莉. 基于离散元方法的沥青混合料劲度模量虚拟试验研究[D]. 西安:长安大学汽车学院,2008.
- [10] 冯 浩. 基于粘弹性理论的沥青胶浆试验特性研究[D]. 长沙:长沙理工大学公路工程学院,2008.
- [11] POTYONDY DO, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**,2004,41(8):1329-1364.

[编辑:罗向阳]