

基于旋量理论的上肢康复机器人 Kane 动力学方程

李鸿儒, 姜志斌, 武 玮

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 引入基于旋量理论的运动旋量、力旋量及偏速度旋量等概念, 推导出五自由度上肢康复机器人的 Kane 动力学方程. 结果表明, 采用旋量理论分析机器人更加简明有效, 比建立局部坐标系的 D-H 法更简易. Kane 方程的求解只需加、减、乘运算, 与拉格朗日、牛顿-欧拉等非线性动力学方程相比, 计算效率更高, 更易于实现实时控制. 通过仿真研究了机器人各关节从初始位形到准备位形的角位移、角速度、角加速度以及驱动力矩, 验证了基于旋量理论的 Kane 方程的正确性和有效性.

关 键 词: 上肢康复机器人; 旋量理论; 偏速度旋量; 动力学; Kane 方程

中图分类号: TP 241.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)02-0153-05

Kane Dynamic Equations Based on Screw Theory for Upper Limb Rehabilitation Robot

LI Hong-ru, JIANG Zhi-bin, WU Wei

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Hong-ru, professor, E-mail: lihongru@ise.neu.edu.cn)

Abstract: Based on the screw theory, the concepts of motion screw, force screw and partial velocity screw were introduced. Then Kane dynamic equations were derived for an upper limb rehabilitation robot with 5 DOF. Simulation results show that dynamics analysis for the robot based on the screw theory is more concise and explicit than that based on the D-H method in which local coordinate systems are used. The solution of Kane equations only involves addition, subtraction and multiplication, so the method has higher calculation efficiency than nonlinear Lagrange and Newton-Euler dynamic equations and is easier to implement real time control. The robotic joint curves of angular displacements, angular velocities, angular accelerations were studied by simulation from initial configuration to ready configuration. The conclusion validates the correctness and effectiveness of Kane equations based on the screw theory.

Key words: upper limb rehabilitation robot; screw theory; partial velocity screw; dynamics; Kane equations

脑卒中是老龄人群中常见的重大疾病之一, 多数患者伴有偏瘫症状. 康复训练不仅能够维持关节活动度, 防止关节挛缩, 而且能够明显提高患者运动功能的最终康复程度^[1]. 传统的康复训练是由治疗师对患者进行一对一式辅助运动, 该方法效率低, 难以精确控制和制定出有效的治疗方案. 随着机器人技术和康复医学的发展, 康复机器人已经成为一种新的运动神经康复治疗技术, 利用机器人技术进行康复训练对脑卒中患者肢体功

能的恢复具有重要意义^[2-3].

上肢康复机器人是具有多输入多输出、非线性、强耦合且时变等特性的复杂系统. 为了达到机器人的实时控制要求, 需建立动力学模型. 动力学研究物体的运动和作用力之间的关系^[4]. 本文利用旋量理论建立了机器人的 Kane 动力学模型. Kane 方法形式简单, 计算速度快, 适用于计算机运算^[5], 不必计算拉格朗日方程中的能量函数及其偏导数, 也不必考虑牛顿-欧拉方程中的理想

约束力,但却兼顾了以牛顿-欧拉方法为代表的矢量力学和以拉格朗日方法为代表的分析力学的优点。基于旋量理论的分析方法只需建立基础坐标系 S 和工具坐标系 T ,与采用传统 D-H 方法建立局部坐标系相比,简化了对机器人动力学的分析^[6],从而使得空间机构的分析更加简明有效。

1 建立基于旋量理论的 Kane 方程

作用于各连杆的广义主动力和广义惯性力为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}^{(j)} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{f}_i \mathbf{v}_i^{(j)}, \\ \mathbf{F}^{*(j)} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{f}_i^* \mathbf{v}_i^{(j)}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{f}_i = [\mathbf{f}_{Li}, \mathbf{\Gamma}_{Li}]^T$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 是作用于连杆质心 L_{ci} 的广义主动力旋量, 其中 \mathbf{f}_{Li} 是作用于 L_{ci} 的主动力, $\mathbf{\Gamma}_{Li}$ 是 \mathbf{f}_{Li} 对 L_{ci} 的主力矩; 带“*”量表示惯性力; $\mathbf{v}_i^{(j)}$ 是 L_{ci} 的第 j 个偏速度旋量。

对于具有 n 自由度的刚体系统, Kane 方程为

$$\mathbf{F}^{(j)} + \mathbf{F}^{*(j)} = \mathbf{0}, (j = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

2 建立上肢康复机器人 Kane 方程

2.1 计算偏速度旋量

本文所研究的上肢康复机器人如图 1 所示, 其中: q_i ($i = 1, \dots, 5$) 是关节运动旋量轴线上的 5 个点; l_i ($i = 1, \dots, 5$) 是各连杆的长度; 物体坐标系 L_i 固结于连杆 i 的质心。

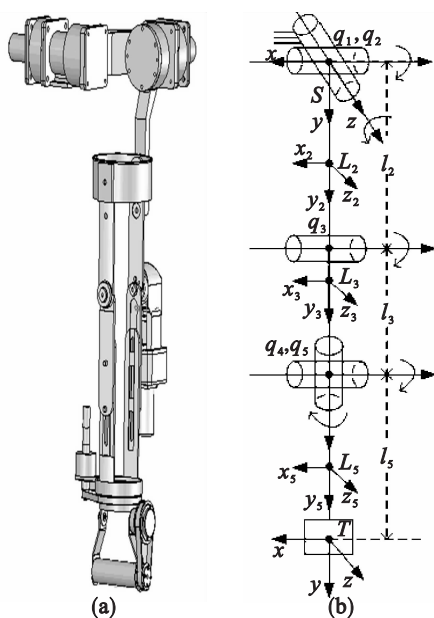


图 1 康复机器人及其坐标系

Fig. 1 Rehabilitation robot and its coordinate systems

(a)—结构图; (b)—坐标系。

Kane 方程分 3 部分: 各连杆主动力旋量; 惯性力旋量及偏速度旋量^[6]。机器人平面投影见图 2。

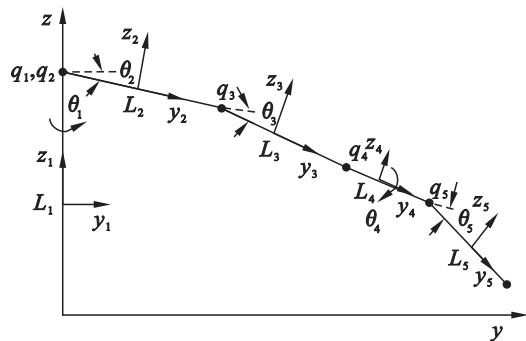


图 2 康复机器人的平面投影

Fig. 2 Planar projection of the rehabilitation robot

由图 2 可得各连杆的物体雅克比矩阵 \mathbf{J}_{sL_i} ($i = 1, \dots, 5$), 分别为

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{J}_{sL_1} &= [\xi_{11}^+ \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}], \\ \mathbf{J}_{sL_2} &= [\xi_{21}^+ \quad \xi_{22}^+ \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}], \\ \mathbf{J}_{sL_3} &= [\xi_{31}^+ \quad \xi_{32}^+ \quad \xi_{33}^+ \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}], \\ \mathbf{J}_{sL_4} &= [\xi_{41}^+ \quad \xi_{42}^+ \quad \xi_{43}^+ \quad \xi_{44}^+ \quad \mathbf{0}], \\ \mathbf{J}_{sL_5} &= [\xi_{51}^+ \quad \xi_{52}^+ \quad \xi_{53}^+ \quad \xi_{54}^+ \quad \xi_{55}^+]. \end{aligned} \right.$$

式中: $\xi_{11}^+ = [0, 0, 0, 0, 0, 1]^T$;

$$\xi_{21}^+ = [-r_1 c_2, 0, 0, 0, -s_2, c_2]^T;$$

$$\xi_{22}^+ = [0, 0, -r_1, -1, 0, 0]^T;$$

$$\xi_{31}^+ = [-r_2 c_{23} - l_1 c_2, 0, 0, 0, -s_{23}, c_{23}]^T;$$

$$\xi_{32}^+ = [0, l_1 s_3, -r_2 - l_1 c_3, -1, 0, 0]^T;$$

$$\xi_{33}^+ = [0, 0, -r_2, -1, 0, 0]^T;$$

$$\xi_{41}^+ = [c_{23} c_4 (-r_3 - l_2 - l_1 c_3) - l_1 s_{23} s_3 c_4, 0, -l_1 s_{23} s_3 s_4 - (r_3 + l_2 + l_1 c_3) c_{23} s_4, -c_{23} s_4, -s_{23}, c_{23} c_4]^T;$$

$$\xi_{42}^+ = \xi_{41}^+;$$

$$\xi_{43}^+ = [(r_3 + l_2) s_4, 0, -(r_3 + l_2) c_4, -c_4, 0, -s_4]^T;$$

$$\xi_{44}^+ = [0, 0, 0, 0, -1, 0]^T;$$

$$\xi_{51}^+ = \begin{bmatrix} (-r_4 - l_2 c_5 - l_3 c_5 - l_1 c_{35}) c_{23} c_4 + [-l_1 s_{35} - (l_2 + l_3) s_5] s_{23} c_4, \\ 2s_4 [l_1 s_{35} c_{23} c_4 + (l_2 + l_3) s_5], \\ [l_1 s_{35} + (l_2 + l_3) s_5] s_{23} s_4 - (r_4 + l_2 c_5 + l_3 c_5 + l_1 c_{35}) c_{23} s_4, \\ -c_{23} s_4, \\ -s_{23}, \\ c_{23} c_4 \end{bmatrix};$$

$$\xi_{52}^+ = \xi_{51}^+;$$

$$\xi_{53}^+ = [(r_4 + l_2 c_5 + l_3 c_5) s_4, 0, -(r_4 + l_2 c_5 +$$

$$l_3 c_5) c_4, -c_4, 0, -s_4]^T;$$

$$\xi_{54}^+ = [(-r_4 - l_3 c_5) s_5, 0, 0, 0, c_5, s_5]^T;$$

$$\xi_{55}^+ = [0, 0, -r_4, -1, 0, 0]^T.$$

式中: ξ_{ij}^+ 表示关节 j 相对于坐标系 L_i 的瞬时速度旋量坐标, $\xi_{ij}^+ = \mathbf{v}_i^{(j)}$; r_i ($i = 1, \dots, 5$) 是关节旋转轴 i 至连杆 i 质心的距离; $s_i = \sin \theta_i$, $c_i = \cos \theta_i$, $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, ($i, j, k = 1, \dots, 5$), 下文同此.

2.2 计算广义主动力

由图2知,机器人各连杆的主动力旋量分别为

$$\mathbf{f}_1 = [\mathbf{f}_{L1}, \mathbf{F}_{L1}]^T = [0, 0, -m_1 g, \tau_2, 0, \tau_1]^T;$$

$$\mathbf{f}_2 = [\mathbf{f}_{L2}, \mathbf{F}_{L2}]^T = [0, m_2 g s_2, -m_2 g c_2, \tau_3 - \tau_2, 0, 0]^T;$$

$$\mathbf{f}_3 = [\mathbf{f}_{L3}, \mathbf{F}_{L3}]^T = [0, m_3 g s_{23}, -m_3 g c_{23}, -\tau_3, -\tau_4, 0]^T;$$

$$\mathbf{f}_4 = [\mathbf{f}_{L4}, \mathbf{F}_{L4}]^T = [m_4 g s_4, 0, -m_4 g c_4, \tau_5, \tau_4, 0]^T;$$

$$\mathbf{f}_5 = [\mathbf{f}_{L5}, \mathbf{F}_{L5}]^T = [m_5 g [c_5 s_4, s_5, -c_4 c_5, -\frac{\tau_5}{m_5 g}, 0, 0]^T.$$

式中: m_1, \dots, m_5 分别为连杆1~5的质量; g 为重力加速度; τ_1, \dots, τ_5 分别为作用于连杆1~5质心上的驱动力矩,其方向与各自连杆的角速度方向一致.

由式(1)可得机器人连杆 j 的广义主动力为

$$\mathbf{F}^{(j)} = \sum_{i=1}^5 (\mathbf{f}_{Li} \mathbf{v}_{Li}^{(j)} + \mathbf{F}_{Li} \boldsymbol{\omega}_{Li}^{(j)}) = \sum_{i=1}^5 \mathbf{f}_i \mathbf{v}_i^{(j)} = \sum_{i=1}^5 \mathbf{f}_i \xi_{ij}^+. \quad (3)$$

因此,各连杆的广义主动力分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^{(1)} = & m_4 g s_4 c_{23} c_4 (-r_3 - l_2 - l_1 c_3 - s_{23} l_1 s_3 c_4) + \\ & m_5 g c_5 s_4 \{-c_{235} c_4 [r_4 + (l_2 + l_3) c_5 + l_1 c_{35}] - \\ & s_{235} [l_1 s_{35} + (l_2 + l_3) s_5] c_4\} + 2m_5 g s_5 c_{235} c_4 \times \\ & [l_1 s_{35} + (l_2 + l_3) s_5] s_4 + m_4 g s_4 c_4 [s_{23} l_1 s_3 + \\ & c_{23} (r_3 + l_1 c_3 + l_2)] - m_5 g c_4 c_5 \{s_{235} [l_1 s_{35} + \\ & (l_2 + l_3) s_5] s_4 - c_{235} s_4 [l_1 c_{35} + (l_2 + l_3) c_5 + \\ & r_4]\} + \tau_5 s_4 (c_{235} - c_{23}) + \tau_1; \end{aligned}$$

$$\mathbf{F}^{(2)} = m_3 g c_2 c_3 r_2 + m_3 g c_2 c_3^2 l_1 - m_3 g s_2 s_3 r_2 + m_2 g c_2 r_1 + l_1 s_3^2 m_3 g c_2 - \tau_4 s_{23} + \tau_2;$$

$$\mathbf{F}^{(3)} = m_4 g [s_4^2 (r_2 + l_2) + c_4^2 (r_3 + l_2)] + m_5 g s_4 c_5 \times [s_4 (r_4 + l_2 c_5) + l_3 c_5] + m_3 g r_2 c_{23} + m_5 g c_4^2 c_5 \times (r_2 + l_2 c_5 + l_3 c_5) + \tau_3;$$

$$\mathbf{F}^{(4)} = m_5 g c_5 s_4 s_5 (-r_4 - l_3 c_5) - \tau_4;$$

$$\mathbf{F}^{(5)} = m_5 g c_4 c_5 r_4 + \tau_5.$$

2.3 计算广义惯性力

机器人连杆 i 的惯性力旋量 \mathbf{f}_i^* 由两部分组成: 惯性力 \mathbf{f}_{Li}^* 和惯性力矩 \mathbf{F}_{Li}^* , 其公式见式(4)、式(5).

$$\mathbf{f}_{Li}^* = -m_i \mathbf{a}_{ci}, \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{Li}^* = -I_{ci} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{Li} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_{Li} \times I_{ci} \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}}_{Li}. \quad (5)$$

式中: \mathbf{a}_{ci} , $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{Li}$ 和 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{Li}$ 分别为连杆 i 的质心在物体坐标系 L_i 中的线加速度、角速度和角加速度; I_{ci} 为连杆 i 在物体坐标系 L_i 中的惯性矩阵.

连杆1~5的惯性力旋量分别为

$$\mathbf{f}_1^* = [0, 0, 0, 0, 0, -I_{cx1} \ddot{\theta}_1]^T;$$

$$\mathbf{f}_2^* = \begin{bmatrix} m_2 r_1 \ddot{\theta}_2, \\ m_2 r_1 \ddot{\theta}_1 s_2 + m_2 r_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 c_2, \\ -m_2 r_1 \ddot{\theta}_1 c_2 + m_2 r_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 s_2, \\ I_{cx2} \ddot{\theta}_2 + (I_{cz2} - I_{cy2}) \dot{\theta}_1^2 s_2 c_2, \\ I_{cy2} (\ddot{\theta}_1 s_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 c_2) + I_{cx2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 c_2 - I_{cz2} c_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2, \\ I_{cz2} (-\ddot{\theta}_1 c_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 s_2) + (I_{cx2} - I_{cy2}) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 s_2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{f}_3^* = \begin{bmatrix} m_3 (l_1 c_3 + r_2) \ddot{\theta}_2 + m_3 r_2 \dot{\theta}_3, \\ m_3 \dot{\theta}_1 s_{23} (l_1 c_3 + r_2), \\ -m_3 \dot{\theta}_1 c_{23} (l_1 c_3 + r_2), \\ I_{cx3} (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + (I_{cy2} - I_{cz2}) \dot{\theta}_1^2 s_{23} c_{23}, \\ I_{cy3} (\ddot{\theta}_1 s_{23} + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 c_{23} - \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 c_{23}) + (I_{cz2} - I_{cx2}) \dot{\theta}_1 c_{23} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3), \\ I_{cz3} s_{23} [\ddot{\theta}_1 c_{23} + \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3] + \dot{\theta}_1 s_{23} (I_{cx2} - I_{cy2}) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} f_4^* = & \left[\begin{aligned} & m_4(\dot{\theta}_1 c_{23} s_4 + \dot{\theta}_2 c_4)(l_1 c_3 + l_2 + r_3) + m_4(l_2 + r_3)\dot{\theta}_3 c_4, \\ & m_4 \dot{\theta}_1 s_{23}(l_1 c_3 + l_2 + r_3), \\ & -m_4(\dot{\theta}_1 c_{23} c_4 - \dot{\theta}_2 s_4)(l_1 c_3 + l_2 + r_3) + m_4(l_2 + r_3)\dot{\theta}_3 s_4, \\ & -I_{cx3}(\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3)c_4 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)[\dot{\theta}_4 + \dot{\theta}_1 s_{23} s_4(1 - I_{cx2}) + s_4] - \\ & \ddot{\theta}_1 c_{23} s_4 + (\dot{\theta}_1^2 I_{cy2} s_{23} + \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4) c_{23} c_4, \\ & I_{cy3}[-\ddot{\theta}_1 s_{23} + \ddot{\theta}_2 c_{23}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)] + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)(s_4 - I_{cx2} \dot{\theta}_1 c_{23} c_4^2) - \\ & s_4[\dot{\theta}_1 c_{23} + c_4(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_1 c_{23} t_4) I_{cx2}(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1 c_{23} c t_4)], \\ & I_{cx3}[(\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3)s_4 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)(\dot{\theta}_4 + \dot{\theta}_1 s_{23})c_4 - \dot{\theta}_1 c_{23} c_4 + \\ & \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 c_{23} s_4] + \dot{\theta}_1 s_{23}(I_{cx2} - I_{cy2})(\dot{\theta}_2 c_4 + \dot{\theta}_3 c_4 + \dot{\theta}_1 c_{23} s_4) \end{aligned} \right]; \\ f_5^* = & \left[\begin{aligned} & m_5(\dot{\theta}_1 c_{23} s_4 + \dot{\theta}_2 c_4)(l_1 c_3 + l_2 + l_3 + r_4) + m_5(l_2 + r_3)\dot{\theta}_3 c_4, \\ & m_5 \dot{\theta}_1 s_{23}(l_1 c_3 + l_2 + l_3 + r_4), \\ & -m_5[(\dot{\theta}_1 c_{23} c_4 - \dot{\theta}_2 s_4)(l_1 c_3 + l_2 + l_3 + r_4) - (l_2 + l_3 + r_4)\dot{\theta}_3 s_4], \\ & -I_{cx3}[(-\ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_3 - \ddot{\theta}_5)c_4 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_5)\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_1 c_{23} s_4 + \dot{\theta}_1(\dot{\theta}_2 + \\ & \dot{\theta}_3)s_{23} s_4 - \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 c_{23} c_4] + [(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_5)s_4 - \dot{\theta}_1 c_{23} c_4](I_{cy2} + \\ & I_{cx2})\dot{\theta}_1 s_{23}, \\ & I_{cy3}[\ddot{\theta}_1 s_{23} + \ddot{\theta}_2 c_{23}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)] - [(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_5)s_4 - \dot{\theta}_1 c_{23} c_4] \times \\ & (I_{cx2} + I_{cx2})[(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_5)c_4 + \dot{\theta}_1 c_{23} s_4], \\ & I_{cx3}[(\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_5)s_4 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_5)c_4 \dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_1 c_{23} c_4 + (\dot{\theta}_2 + \\ & \dot{\theta}_3)\dot{\theta}_1 s_{23} c_4 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 c_{23} s_4] + \dot{\theta}_1 s_{23} I_{cx2}[(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_5)c_4 - \\ & \dot{\theta}_1 c_{23} s_4] - [(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_5)c_4 + \dot{\theta}_1 c_{23} s_4] I_{cy2} \dot{\theta}_1 s_{23} \end{aligned} \right]. \end{aligned}$$

式中： $t_i = \tan\theta_i$; $ct_i = \cot\theta_i$.

由式(1)可得机器人连杆 j 的广义惯性力为

$$\begin{aligned} F^{*(j)} = & \sum_{i=1}^5 (f_{Li}^* v_{Li}^{(j)} + I_{Li}^* \omega_{Li}^{(j)}) = \\ & \sum_{i=1}^5 f_i^* v_i^{(j)} = \sum_{i=1}^5 f_i^* \xi_{ij}^+. \end{aligned} \tag{6}$$

综上所述,基于旋量理论的五自由度上肢康复机器人动力学 Kane 方程为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 \left\{ \begin{bmatrix} f_{Li}^* \\ I_{Li}^* \end{bmatrix} \cdot \xi_{ij}^+ \right\} + \sum_{i=1}^5 \left\{ \begin{bmatrix} f_{Li}^* \\ I_{Li}^* \end{bmatrix} \cdot \xi_{ij}^+ \right\} = 0, \\ (j = 1, \cdots, 5). \end{aligned} \tag{7}$$

将各连杆的物体雅克比矩阵、广义主动力、广义惯性力代入式(7),可求得各关节的驱动力矩.

3 上肢康复机器人动力学仿真

通过仿真验证本文所提出的 Kane 动力学方程,并计算出上肢康复机器人各关节的驱动力矩.表 1 是上肢康复机器人的杆件参数^[7].

表 1 康复机器人杆件参数			
Table 1 Bar parameters of the rehabilitation robot			
杆件 编号 i	质量 m_i/g	重心和旋转轴 距离 r_{ci}/mm	杆件长度 l_i/mm
1	2 371.23	120	105
2	992.6	145	290
3	3 477	103	220
4	618	32	57
5	237	77	80

假设各关节从 $q_0 = [0, 0, \pi/2, 0, 0]$ 运动到 $q_r = [-\pi/4, -\pi/4, -5\pi/8, -\pi/8, \pi/4]$. 运动时间设为 10 s.

图 3 为机器人各关节从初始位形运动到准备位形的角位移时序曲线. 考虑到机器人的结构配置,关节 2 支撑整个机械臂,关节 3 支撑前臂,关节 1 连接于基座,关节 4,5 分别支撑腕部和手部;因此,关节 2,3 的驱动力矩变化应远大于关节 1,4,5. 由图 4 可知,关节 2,3 的驱动力矩远大于关

节 1,4,5 的驱动力矩,并且各个关节的驱动力矩的变化趋势符合实际运动规律,从而验证了 Kane 动力学方程的有效性和正确性.

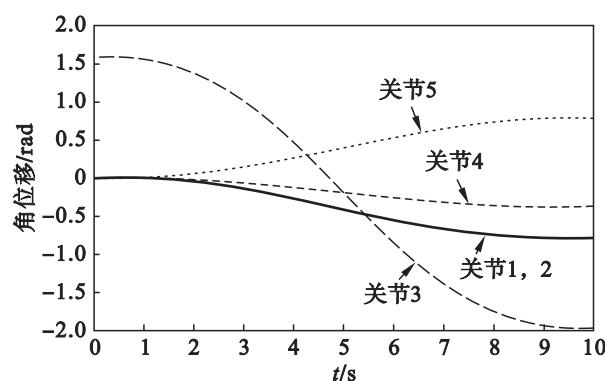


图 3 机器人各关节角位移曲线
Fig. 3 Angle displacement curves of robotic joints

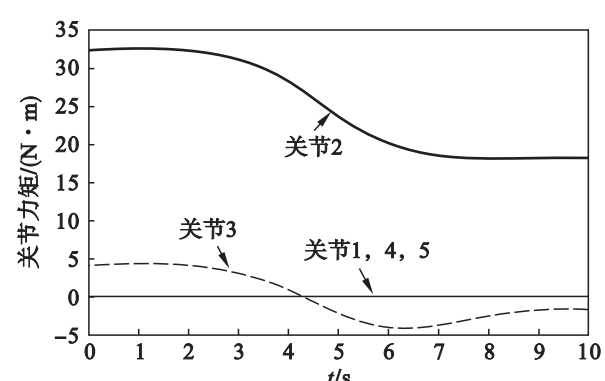


图 4 从 q_0 运动到 q_r 的各关节驱动力矩曲线
Fig. 4 Curves of joints driving torques from q_0 to q_r

4 结 论

1) 根据运动旋量和力旋量等概念,推导出了五自由度上肢康复机器人各关节的偏速度旋量、主动力旋量及惯性力旋量,从而建立了上肢康复机器人的 Kane 动力学方程,体现出采用旋量理论分析机器人的简单明了.

2) 求解动力学 Kane 方程只需加、减、乘运算,与拉格朗日、牛顿-欧拉等非线性动力学方程

相比,更易进行计算机求解且效率更高,更易于实现实时控制.

3) 通过 MATLAB 软件仿真出上肢康复机器人的驱动力矩时序曲线,验证了基于旋量理论的 Kane 方程,为上肢康复机器人的运动控制优化和精确实时控制奠定了基础.

参考文献:

[1] Tombari D, Loubinoux I, Pariente J, et al. A longitudinal fMRI study: in recovering and then in clinically stable subcortical stroke patients [J]. *Neuroimage*, 2004, 23 (3): 827 - 839.

[2] Pignolo L. Robotics in neuro-rehabilitation [J]. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 2009, 41 (12): 955 - 960.

[3] Mehrholz J, Platz T, Kugler J, et al. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving arm function and activities of daily living after stroke [J]. *Stroke*, 2009, 40 (5): 392 - 393.

[4] 石炜, 郝安民, 张玉宝. 基于凯恩方法的机器人动力学建模与仿真 [J]. *微计算机信息*, 2008, 24 (2): 222 - 223.
(Shi Wei, Xi An-min, Zhang Yu-bao. Robot dynamics modeling and simulation based on Kane [J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24 (2): 222 - 223.)

[5] 夏丹, 陈维山, 刘军考, 等. 基于 Kane 方法的仿鱼机器人波状游动的动力学建模 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45 (6): 41 - 49.
(Xia Dan, Chen Wei-shan, Liu Jun-kao, et al. Dynamic modeling of a fishlike robot with undulatory motion based on Kane's method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45 (6): 41 - 49.)

[6] 刘武发, 龚振邦, 汪勤恣. 基于旋量理论的开链机器人动力学 Kane 方程研究 [J]. *应用数学和力学*, 2005, 26 (5): 577 - 584.
(Liu Wu-fa, Gong Zhen-bang, Wang Qin-que. Investigation on Kane dynamic equations based on screw theory for open-chain manipulators [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2005, 26 (5): 577 - 584.)

[7] 叶腾茂. 五自由度上肢康复机器人辅助控制的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
(Ye Teng-mao. Research on force assistant control of 5 DOF rehabilitation robot for upper limbs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.)