

机械臂接触碰撞动力学分析

金国光 武光涛 畅博彦 陈丽莎 张阳演

(天津工业大学天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

摘要: 针对机械臂在运行过程中的接触碰撞问题, 基于碰撞过程中产生冲量和高斯最小约束原理, 提出了一种确定接触碰撞后系统状态量的分析方法。首先, 利用 Lagrange 方程, 建立机械臂系统的动力学模型, 并以此为基础根据经典碰撞理论与恢复系数方程, 推导得到碰撞时系统的外部碰撞冲量求解模型; 该模型中碰撞点的速度与碰撞冲量之间是解耦的, 有利于计算求解。其次, 根据高斯最小约束原理和求解得到的接触碰撞前的系统状态量, 运用求多变量函数极值的方法建立机械臂系统接触碰撞后瞬时速度求解方程式。最后, 以平面三连杆机械臂为实例进行碰撞动力学建模与仿真, 研究分析系统发生接触碰撞时所受到的外部碰撞冲量大小以及碰撞前后机械臂角速度和各关节转角的变化规律, 求解得到了机械臂发生碰撞后保持原有运动规律不变时各关节所需施加的驱动力矩。研究表明: 碰撞发生瞬时各关节将产生刚性冲击; 碰撞后瞬时各杆将产生抖动; 碰撞产生的冲量由远端关节向近端关节以递减的方式变化, 所得结论可为机械臂冲击后的运动轨迹控制提供一定的理论依据。

关键词: 机械臂; 接触碰撞; Lagrange 方程; 高斯最小约束原理

中图分类号: TH112.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0369-07

Dynamic Analysis of Manipulator with Contact Impact

Jin Guoguang Wu Guangtao Chang Boyan Chen Lisha Zhang Yangyan

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Aiming at the contact impact problem caused by the manipulator in the course of operating, a method of determining the state of the system after contact collision is proposed based on the impulse principle and Gauss' principle of least constraint. First of all, the dynamic model of the manipulator system is proposed based on Lagrange equation, besides the solution model of the external impulse of collision of the system under the collision is derived according to the classical collision theory and the equation involving coefficient of restitution; the velocity of collision point is decoupled from the impulse of collision, which is beneficial to the calculation. Secondly, based on the Gauss' principle of least constraint and the state variables of the system before the contact collision, the instantaneous velocity solution equation of the manipulator system after collision is established according to the method of solving the extreme value of a multivariable function; according to the speed after the impact, it can be determined whether the angular velocity of the manipulator is fit for the permitted working range. Finally, taking a planar three link manipulator as an example for collision dynamics modeling and simulation result, the size of the external impulse of collision and the change regularity of the manipulators' angular velocities and each joint angle before and after the collision of the system are studied and analyzed, the driving moment required of each joint is given according to the change regularity of each joint angle before and after the collision. The research shows that the joint will have a rigid impact and each rod will shake at the collision instantaneous; the impulse of collision will be changed in the form of diminishing by the way of the distal joint to the proximal joint. The obtained conclusion in this paper may provide a theoretical basis for the motion control of the manipulator under the external impact.

Key words: manipulator; contact impact; Lagrange equation; Gauss' principle of least constraint

引言

机械臂在目标捕获或运动过程中,不可避免地会与目标物或环境发生碰撞。机械臂的碰撞会导致系统速度的突变,碰撞过程中产生的较大冲击力不仅会影响系统的动态特性,而且有可能损坏机械手或者目标物。因此,对机械臂在运行过程中的碰撞问题进行研究,可为机械臂轨迹规划^[1]和实时控制提供理论依据。

目前,针对机械臂的碰撞问题,国内外学者给予了高度重视^[2-7]。陈钢等^[3]针对空间机械臂目标捕获过程中的碰撞问题,利用碰撞过程中产生冲量的原理建立了碰撞动力学模型;利用空间解析几何的方法进行了碰撞检测,设计了碰撞发生后机器人的运动分析算法。华卫江等^[4]针对柔性机器人与其工作环境发生碰撞时的动力学建模问题,引入冲量势,运用拉格朗日方程推导出柔性机器人系统受外冲击的广义冲量-动量方程,结合碰撞恢复系数方程,得到了碰撞结束瞬时系统的广义速度求解方程。KHULIEF等^[5]运用广义冲量-动量定理研究了柔性体的碰撞,求解得到了碰撞后系统的动力学响应。刘锦阳等^[6]采用子结构法,由 Jourdain 变分原理导出了机械臂在碰撞前、碰撞阶段以及碰撞后的动力学方程。它有别于文献[5]的显著特点在于能获得碰撞力。CHAPNIK等^[7]采用有限元法建模,建模时考虑了多种阻尼效应,对单臂机器人碰撞动力学进行了研究。文献[5]运用绝对坐标法建模,限制了该方法在机器人领域的应用。子结构法认为碰撞瞬时柔性体只有局部参与碰撞,并人为地进行了瞬间局部范围的动量再分配,缺乏理论准则。

本文基于机械臂运动学和动力学模型^[8-10],利用碰撞过程中产生冲量的原理^[11-13]与碰撞恢复系数^[14-15]方程相结合,建立碰撞时系统的外部碰撞冲量求解模型。根据冲击运动的高斯最小约束原理^[16-17],用求多变函数极值的方法,给出碰撞发生后机械臂的运动分析算法,求得碰撞后机械臂系统的运动状态。最后,通过数值仿真分析机械臂系统受到碰撞前后机械臂角速度和各关节转角的变化规律,求解得到机械臂发生碰撞后保持原有运动规律不变时各关节所需施加的驱动力矩。

1 机械臂动力学方程

考虑如图1所示的空间 n 自由度机械臂系统的接触碰撞问题,记系统的广义坐标为 $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 。

不考虑摩擦等外界干扰的作用,由 Lagrange 方

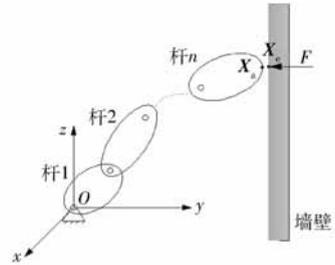


图1 空间机械臂系统接触碰撞示意图

Fig.1 Schematic diagram of space manipulator system's contact collision

程,可得 n 自由度机械臂动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ —— $n \times 1$ 维广义坐标、广义速率、广义加速度向量

\mathbf{M} ——正定的系统惯性矩阵

$\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ——包括系统中离心力和哥氏力的矩阵

$\mathbf{G}(\mathbf{q})$ ——重力对广义坐标的等效力矩阵

$\boldsymbol{\tau}$ ——广义关节坐标的常规驱动力矩向量

假设和环境碰撞的末端执行器是机械臂系统的一部分,碰撞接触点在惯性坐标系中定义为 \mathbf{X}_a ,相应的环境接触点定义为 \mathbf{X}_e 。通过坐标变换, \mathbf{X}_a 可表示为广义坐标的形式

$$\mathbf{X}_a = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{q}) \quad (2)$$

根据系统运动学关系,容易得到执行器接触点 \mathbf{X}_a 在惯性坐标系中的速度与广义坐标间存在运动学关系

$$\dot{\mathbf{X}}_a = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{J} = \left[\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}}{\partial \mathbf{q}} \right]^T$ (4)

在碰撞时间间隔 Δt 内, \mathbf{X}_e 同样可以表示为广义坐标 \mathbf{q} 的形式

$$\mathbf{X}_e = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{q}) \quad (5)$$

当满足式(5)时,在接触点 \mathbf{X}_a 处外部冲击力 \mathbf{F} 随即产生。

由静力平衡条件,与环境相接触时,机械臂的动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (6)$$

\mathbf{J}^T 为 Jacobian 矩阵 \mathbf{J} 的转置,它把作用在末端的冲击力映射为相应广义关节的驱动力矩。

2 碰撞冲量求解模型

根据经典碰撞理论,对系统作如下假设:碰撞时间无限小;碰撞过程中所有杆的位置和方位不变;碰撞是点接触;碰撞过程中杆的形状和惯量不变。

通常,碰撞是部分弹性的。若碰撞恢复系数为

$e(0 < e < 1)$, 杆的碰撞点速度增量沿着接触表面的法向量为 \mathbf{n} , 则系统碰撞时应满足恢复系数方程

$$(\Delta \mathbf{v}_1 - \Delta \mathbf{v}_2)^T \mathbf{n} = -(1 + e)(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)^T \mathbf{n} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ ——两碰撞物体的碰撞点在碰撞前瞬时的绝对速度

$\Delta \mathbf{v}_1, \Delta \mathbf{v}_2$ ——两碰撞物体的碰撞点在碰撞后瞬时引起的速度增量

根据基本假设, 由于碰撞过程中时间间隔无限小, 关节的位置保持不变, 因此关节的角速度是有限量。对给出的式(6)在整个接触碰撞持续时间 Δt 内进行积分, 得

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} dt + \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}) dt = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \mathbf{J}^T \mathbf{F} dt \quad (8)$$

式中 t_0 ——碰撞瞬时

由于位置和速度在碰撞过程中为有限量, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 式(8)左端的第二项趋于零, 得

$$\mathbf{M}(\dot{\mathbf{q}}(t_0 + \Delta t) - \dot{\mathbf{q}}(t_0)) = \mathbf{J}^T \mathbf{p} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{p} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \mathbf{F} dt$, 为碰撞冲量, 由于 $\Delta t \rightarrow 0$ 时冲击趋向于无限大, 方程右端项趋向于一有限量。因此广义坐标的速度增量可表示为

$$\Delta \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{p} \quad (10)$$

由运动学可知, 接触点的速度增量为

$$\Delta \mathbf{v}_1 = \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{p} \quad (11)$$

假设与机械臂的碰撞接触面为刚性固定表面, 则固定表面的绝对速度和速度增量总是零 ($\mathbf{v}_2 = \Delta \mathbf{v}_2 = 0$)。假设在接触表面没有摩擦, 则冲击总是沿着接触点法向量 \mathbf{n} , 将式(11)代入式(7)得

$$(\mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{p})^T \mathbf{n} = -(1 + e) \mathbf{v}_1^T \mathbf{n} \quad (12)$$

又因为

$$\mathbf{p} = p \mathbf{n} \quad (13)$$

则系统的碰撞冲量大小为

$$p = \frac{-(1 + e) \mathbf{v}_1^T \mathbf{n}}{\mathbf{n}^T (\mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T) \mathbf{n}} \quad (14)$$

根据以上推导, 即建立了机械臂碰撞过程中碰撞点处碰撞前的速度与碰撞冲量之间的关系。

3 冲击运动的高斯最小约束原理

在分析力学中, 有质点系高斯最小约束原理。对于刚性杆可以看作由无数个微元体组成, 如图 2 所示杆 B_k (k 为杆的标号, $k = 1, 2, \dots, n$) 上的微元体为 D_k 。设 $t = t_0^-$ 、 $t = t_0^+$ 分别为 D_k 冲击开始和结束时刻, \mathbf{v}_k^- 、 \mathbf{v}_k^+ 分别表示冲击发生瞬时 ($t = t_0$) 之前和之后 D_k 的速度。 $d\mathbf{p}^k$ 为 D_k 在 t_0 时所受的冲

量(由非约束力产生), dm_k 为 D_k 的质量。由冲击运动的高斯最小约束原理, 杆件的冲击运动约束量^[18]

$$Z = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \int_{B_k} \mathbf{w}_k \cdot \mathbf{w}_k dm_k \quad (15)$$

其中 $\mathbf{w}_k = \mathbf{v}_k^+ - \mathbf{v}_k^- - \frac{d\mathbf{p}^k}{dm_k}$ (16)

式中 n ——杆数

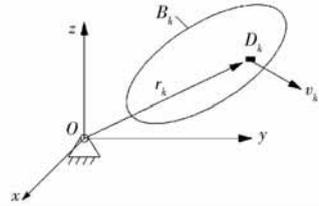


图 2 构件 B_k 及其微元体 D_k

Fig. 2 Component B_k and its micro-body D_k

Z 之所以被称为冲击运动约束量, 是因为无论系统的性质如何, 冲击发生后瞬间的真实运动都受制于 Z 这个量, 即真实运动使作用量 Z 为最小。

根据式(15)可以将 Z 表示为

$$Z = \sum_{k=1}^n \left\{ T_k + T_{k0} + \frac{1}{2} \int_{B_k} \frac{d\mathbf{p}^k}{dm_k} \cdot \frac{d\mathbf{p}^k}{dm_k} dm_k - \int_{B_k} \mathbf{v}_k^+ \cdot \frac{d\mathbf{p}^k}{dm_k} dm_k - \int_{B_k} \mathbf{v}_k^+ \cdot \mathbf{v}_k^- dm_k + \int_{B_k} \mathbf{v}_k^- \cdot \frac{d\mathbf{p}^k}{dm_k} dm_k \right\} \quad (17)$$

其中 $T_{k0} = \frac{1}{2} \int_{B_k} \mathbf{v}_k^- \cdot \mathbf{v}_k^- dm_k$ (18)

$$T_k = \frac{1}{2} \int_{B_k} \mathbf{v}_k^+ \cdot \mathbf{v}_k^+ dm_k \quad (19)$$

式中 T_{k0}, T_k ——碰撞发生前、后瞬间杆 B_k 的动能

对于有限个质点承受冲击的刚性杆, 有

$$\int_{B_k} \mathbf{v}_k^+ \cdot \frac{d\mathbf{p}^k}{dm_k} dm_k = \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{v}_i^+ \cdot \mathbf{p}_i \quad (20)$$

式中 N_p ——杆 B_k 上承受冲击的质点数

$\mathbf{p}_i, \mathbf{v}_i^+$ ——杆 B_k 上的质点 i 承受的冲量和冲击后的速度

根据高斯最小约束原理, 只要使

$$dZ = 0 \quad (21)$$

即可求得真实运动的速度 \mathbf{v}_k^+ 。

将式(17)代入式(21)可得关于真实速度 \mathbf{v}_k^+ 的方程

$$\frac{\partial \sum_{k=1}^n \left[T_k - \int_{B_k} \mathbf{v}_k^+ \cdot \mathbf{v}_k^- dm_k + \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{v}_i^+ \cdot \mathbf{p}_i \right]}{\partial \mathbf{v}_k^+} = 0 \quad (22)$$

因此, 若已知机械臂系统上有限个质点的冲量及冲击前的速度, 则用高斯最小约束原理或式(22)

可求解出机械臂系统冲击后瞬时的速度。

4 仿真实例

4.1 研究对象

图3所示为一典型的平面三杆机械臂。设在关节 O_1 处用电动机驱动,关节 O_2 和 O_3 处分别加装有扭簧,各关节处作用的力矩分别为

$$\tau_1 = 1.9550 - 0.0196\dot{\theta}_1$$

$$\tau_2 = 0.1625 - 0.0161\dot{\theta}_2$$

$$\tau_3 = 0.2300 - 0.0026\dot{\theta}_3$$

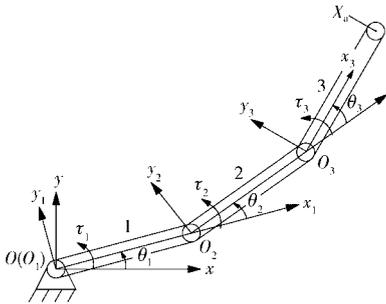


图3 平面三杆机械臂

Fig.3 Three-link planar manipulator

机械臂各杆 $k(k=1,2,3)$ 的几何参数及物理参数如表1所示。

表1 机械臂的几何参数与物理参数

Tab.1 Geometric parameters and physical parameters of manipulator

| 参数 | 杆1 | 杆2 | 杆3 |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| 长度 l_k/m | 0.25 | 0.125 | 0.125 |
| 横截面积 A_k/m^2 | 2×10^{-4} | 2×10^{-4} | 2×10^{-4} |
| 体密度 $\rho_k/(kg \cdot m^{-3})$ | 7800 | 7800 | 7800 |
| 初始转角 θ_k/rad | 0 | 0 | $\pi/2$ |
| 初始角速度 $\dot{\theta}_k/(rad \cdot s^{-1})$ | 0 | 0 | 0 |

设定机械臂末端执行器碰撞接触点 X_a 在 $t = t_0 = 0.4988s$ 时与墙壁发生碰撞,碰撞接触面的法向量 $n = [1 \ 0]^T$,碰撞恢复系数 $e = 0.8$ 。由运动学分析知,碰撞前 ($t = t_0^-$) 各杆绝对角速度

$$\begin{cases} \omega_{10}^- = \dot{\theta}_{10}^- = 7.3465 \text{ rad/s} \\ \omega_{20}^- = \dot{\theta}_{10}^- + \dot{\theta}_{20}^- = -24.6305 \text{ rad/s} \\ \omega_{30}^- = \dot{\theta}_{10}^- + \dot{\theta}_{20}^- + \dot{\theta}_{30}^- = 105.4339 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (23)$$

机械臂发生碰撞后瞬时,系统的碰撞冲量

$$p = [1.3017 \ 0]^T \quad (24)$$

系统的动能

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^3 T_k = & 0.0198\dot{\theta}_1^{+2} + 0.0035\dot{\theta}_2^{+2} + \\ & 0.00051\dot{\theta}_3^{+2} + 0.0070\dot{\theta}_1^+ \dot{\theta}_2^+ + \\ & 0.0039\dot{\theta}_1^+ \dot{\theta}_3^+ + 0.0019\dot{\theta}_2^+ \dot{\theta}_3^+ \end{aligned} \quad (25)$$

碰撞后系统的状态量

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{N_p} (v_i^+ \cdot p_i) = -0.3908\dot{\theta}_1^+ - 0.2905\dot{\theta}_2^+ - 0.1493\dot{\theta}_3^+ \quad (26)$$

$$\sum_{k=1}^3 \int_{B_k} (v_k^+ \cdot v_k^-) dm_k = 0.5714\dot{\theta}_1^+ + 0.1469\dot{\theta}_2^+ + 0.0994\dot{\theta}_3^+ \quad (27)$$

根据式(22)可得,碰撞后瞬时 ($t = t_0^+$) 各杆的绝对角速度

$$\begin{cases} \omega_{10}^+ = \dot{\theta}_1^+ = -0.3175 \text{ rad/s} \\ \omega_{20}^+ = \dot{\theta}_1^+ + \dot{\theta}_2^+ = -11.0460 \text{ rad/s} \\ \omega_{30}^+ = \dot{\theta}_1^+ + \dot{\theta}_2^+ + \dot{\theta}_3^+ = 255.4238 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (28)$$

式中 ω_{k0}^+ 为第 $k(k=1,2,3)$ 杆的绝对角速度。

4.2 数值仿真分析

为了分析系统碰撞前后运动特性,用 Matlab 软件^[19]对机械臂系统进行动力学仿真。由于系统的碰撞动力学方程为非线性方程,求解时应用龙格-库塔法处理非线性方程组,具体仿真流程图如图4所示。

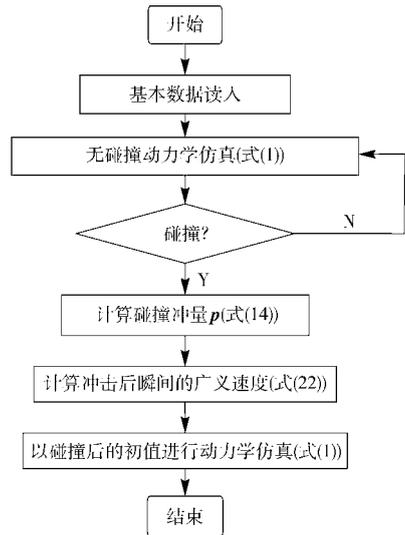


图4 碰撞运动仿真流程图

Fig.4 Flow chart of collision motion simulation

所得的数值仿真结果如图5~13所示。

由图5~7可以看出,机械臂受到冲击后,各关节转角曲线与未受到冲击时的转角曲线有明显差异,碰撞改变了各杆的原有运动规律。若使机械臂在碰撞后仍保持原有运动规律不变,则需要对各个关节的驱动力矩进行控制调节,如图8~10所示。

由图11~13可以看出,机械臂发生碰撞后各杆的角速度有明显突变,这说明机械臂在受到外部冲击作用时各个关节内部将产生刚性冲击;机械臂在驱动力矩不变的条件下,碰撞后各杆的振动幅值要明显大于碰撞前各杆的振动幅值,且碰撞后与碰撞

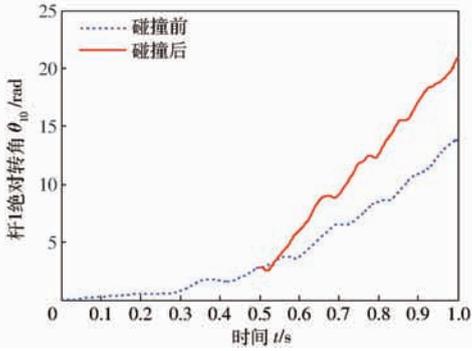


图 5 杆 1 转角变化对比曲线

Fig. 5 Angle variation contrast curves of rod 1

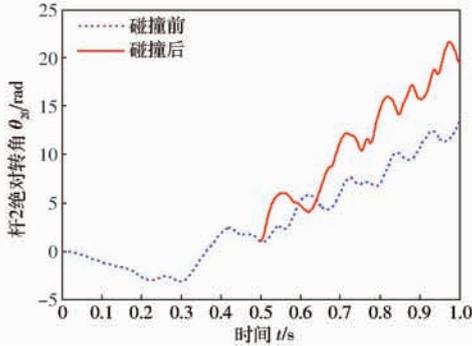


图 6 杆 2 转角变化对比曲线

Fig. 6 Angle variation contrast curves of rod 2

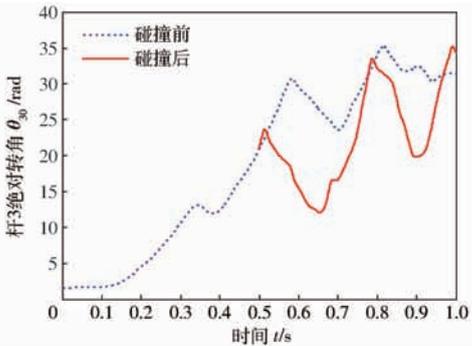


图 7 杆 3 转角变化对比曲线

Fig. 7 Angle variation contrast curves of rod 3

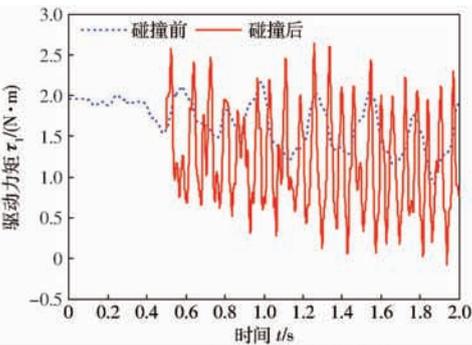


图 8 驱动力矩 tau_1 变化曲线

Fig. 8 Driving torque change curves of tau_1

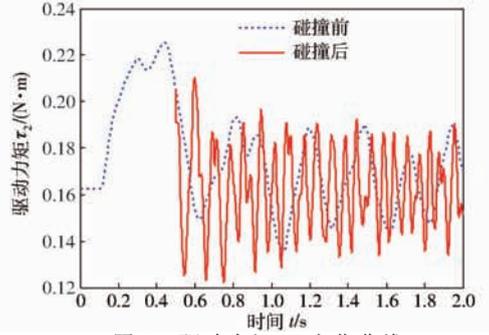


图 9 驱动力矩 tau_2 变化曲线

Fig. 9 Driving torque change curves of tau_2

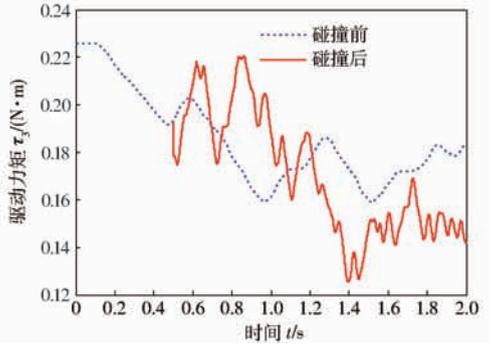


图 10 驱动力矩 tau_3 变化曲线

Fig. 10 Driving torque change curves of tau_3

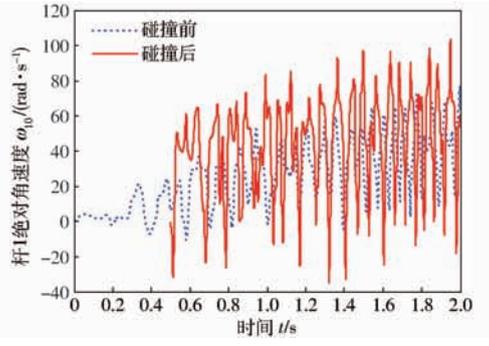


图 11 杆 1 角速度对比曲线

Fig. 11 Angular velocity contrast curves of rod 1

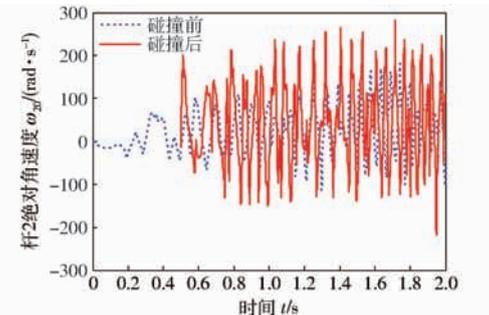


图 12 杆 2 角速度对比曲线

Fig. 12 Angular velocity contrast curves of rod 2

前相比各杆均产生了小段时间范围的抖动；此外，比较各杆的动力学特性发现，由于杆 3 是受到碰撞的杆，其碰撞后角速度和振动幅值的变化均比杆 1 和

杆 2 剧烈，这说明碰撞发生后，大部分冲量转化为杆 3 的动量变化。由振动幅值及各杆角速度突变量可以得出，碰撞产生的冲量由远端关节向近端关节以递减的方式变化。

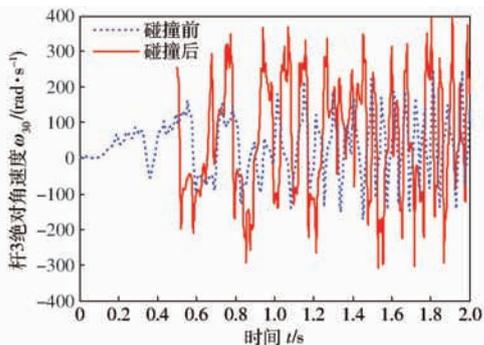


图 13 杆 3 角速度对比曲线

Fig. 13 Angular velocity contrast curves of rod 3

5 结论

(1) 利用碰撞过程中产生冲量的原理与碰撞恢

复系数方程相结合, 推导得到了机械臂系统的碰撞冲量求解模型; 碰撞点的速度与碰撞冲量之间是解耦的, 有利于计算求解。

(2) 基于机械臂碰撞动力学模型, 根据冲击运动的高斯最小约束原理, 用求多变函数极值的方法, 给出了碰撞发生后机械臂的运动分析算法。根据冲击后的速度, 可判断机械臂在发生冲击后各杆角速度是否在工作允许范围内。

(3) 对平面三杆机械臂发生碰撞前后各机械臂角速度和各关节转角的变化规律进行仿真研究, 研究表明: 碰撞发生瞬时各关节将产生刚性冲击; 碰撞瞬时各杆将产生抖动; 碰撞产生的冲量由远端关节向近端关节以递减的方式变化。碰撞冲量对各机械臂角速度大小及振动幅值具有较大影响。

参 考 文 献

- 贾庆轩, 张龙, 陈钢, 等. 多目标融合的冗余空间机械臂碰前轨迹优化[J]. 宇航学报, 2014, 35(6): 639-647.
JIA Qingxuan, ZHANG Long, CHEN Gang, et al. Pre-impact trajectory optimization of redundant space manipulator with multi-target fusion[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(6): 639-647. (in Chinese)
- 董富祥, 洪嘉振. 多体系统动力学碰撞问题研究综述[J]. 力学进展, 2009(3): 352-359.
DONG Fuxiang, HONG Jiazhen. Review of impact problem for dynamics of multibody system[J]. Advance in Mechanics, 2009(3): 352-359. (in Chinese)
- 陈钢, 贾庆轩, 孙汉旭, 等. 空间机器人目标捕获过程中碰撞运动分析[J]. 机器人, 2010, 32(3): 432-438.
CHEN Gang, JIA Qingxuan, SUN Hanxu, et al. Analysis on impact motion of space robot in the object capturing process [J]. Robot, 2010, 32(3): 432-438. (in Chinese)
- 华卫江, 章定国. 柔性机器人系统碰撞动力学建模[J]. 机械工程学报, 2008, 43(12): 222-228.
HUA Weijiang, ZHANG Dingguo. Collision dynamics modeling of flexible robot system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 43(12): 222-228. (in Chinese)
- KHULIEF Y A, SHABANA A A. Dynamic analysis of constrained system of rigid and flexible bodies with intermittent motion [J]. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1986, 108(1): 38-45.
- 刘锦阳, 洪嘉振. 柔性机械臂接触碰撞问题的研究[J]. 机械科学与技术, 1997, 16(1): 100-104.
LIU Jinyang, HONG Jiazhen. Research on contact impact problem of flexible manipulator[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 1997, 16(1): 100-104. (in Chinese)
- CHAPNIK B V, HEPPLER G R, Aplevich J D. Modeling impact on a one-link flexible robotic arm[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(4): 479-488.
- 陈炜, 余跃庆, 张绪平, 等. 欠驱动柔性机械臂动力学建模及仿真[J]. 中国机械工程, 2006, 17(9): 931-936.
CHEN Wei, YU Yueqing, ZHANG Xuping, et al. Dynamic modeling and simulation of an under actuated flexible manipulator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 17(9): 931-936. (in Chinese)
- YI B J, SUH I H, OH S R. Analysis of a 5-bar finger mechanism having redundant actuators with applications to stiffness and frequency modulations[C]//1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997, 1: 759-765.
- 陈修龙, 冯伟明, 赵永生. 五自由度并联机器人机构动力学模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 236-243.
CHEN Xiulong, FENG Weiming, ZHAO Yongsheng. Dynamics model of 5-DOF robot mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 236-243. (in Chinese)
- 丛佩超. 空间机械臂抓取目标的碰撞前构型规划与控制问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
CONG Peichao. A study on the planning and control of the robot arm to grasp the object before the collision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- WALKER I D. Impact configurations and measures for kinematically redundant and multiple armed robot systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(5): 670-683.
- RYU H T, CHOI J Y, YI B J. Impact dynamics of a finger mechanism with application to onset of a cart motion[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2012: 2223-2228.
- 段玥晨. 考虑刚柔耦合效应的柔性多体系统碰撞动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
DUAN Yuechen. Research on the rigid-flexible coupling impact dynamics of flexible multibody systems[D]. Nanjing: Nanjing

University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

- 15 LEE S H, YI B J, KIM S H, et al. Analysis on impact propagation of docking platform for spacecraft[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA, 2001, 1: 413-420.
- 16 黎邦隆, 宋福馨. 关于冲力情况下的高斯最小约束原理[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 1995, 22(4): 23-28.
LI Banglong, SONG Fuqing. On Gauss' principle of least constraint for impulsive motion[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 1995, 22(4): 23-28. (in Chinese)
- 17 姚文莉, 戴葆青. 广义坐标形式的高斯最小约束原理及其推广[J]. 力学与实践, 2014, 36(6): 779-785.
YAO Wenli, DAI Baoqing. The principle of generalized coordinate form of Gauss's minimal constraint and its extension[J]. Mechanics and Practice, 2014, 36(6): 779-785. (in Chinese)
- 18 金国光. 变胞机构结构学, 运动学及动力学研究[R]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
JIN Guoguang. Research on structure theory, kinematics and dynamics of metamorphic mechanism[R]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
- 19 畅博彦, 刘艳茹, 金国光. 3PUS-S(P)变胞并联机构逆动力学分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 317-323.
CHANG Boyan, LIU Yanru, JIN Guoguang. Inverse dynamics of 3PUS-(SP) parallel metamorphic mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 317-323. (in Chinese)

(上接第 223 页)

- 9 KERMIT M, TOMIC O. Independent component analysis applied on gas sensor array measurement data[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(2): 218-228.
- 10 王虎玄, 胡仲秋, 龙芳羽, 等. 苹果汁中鲁氏接合酵母早期污染的电子鼻识别研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 209-214.
WANG Huxuan, HU Zhongqiu, LONG Fangyu, et al. Research on identification of spoilage in apple juice caused by zygosaccharomyces rouxii at early stage using electronic nose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 209-214. (in Chinese)
- 11 ZUPPA M, DISTANTE C, PERSAUD K C, et al. Recovery of drifting sensor responses by means of DWT analysis[J]. Sensors and Actuators B, 2007, 120(2): 411-416.
- 12 ZIYATDINOV A, CHAUDRY A, PERSAUD K, et al. Common principal component analysis for drift compensation of gas sensor array data[C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Olfaction and the Electronic Nose, 2009, 1137: 566-569.
- 13 刘涛, 黄智勇. 一种基于多重自组织图的电子鼻漂移抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1287-1292.
LIU Tao, HUANG Zhiyong. Drift counteraction method for electronic nose based on multiple self-organizing maps[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1287-1292. (in Chinese)
- 14 ZANCHETTIN C, LUDERMIR T B. Wavelet-filter for noise reduction and signal compression in an artificial nose[J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(1): 246-256.
- 15 罗强. 基于小波分析的心电信号去噪研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006: 20-21.
- 16 查显杰, 傅容珊, 戴志阳, 等. 小波基函数选择对 SAR 干涉图去噪的影响[J]. 遥感信息, 2008(2): 17-20.
ZHA Xianjie, FU Rongshan, DAI Zhiyang, et al. The influence on SAR interferograms noise reduction due to the selection of wavelet base function[J]. Remote Sensing Information, 2008(2): 17-20. (in Chinese)
- 17 YIN Y, CHU B, YU H, et al. A selection method for feature vectors of electronic nose signal based on wilks Λ -statistic[J]. Journal of Food Measurement & Characterization, 2014, 8(1): 29-35.