

基于动量观测器的机械臂碰撞检测与隔离*

张淑珍, 李金霞, 杨凯, 魏兴佳, 南文虎, 郑海霞

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 机械臂在复杂空间规划运动过程中, 难免与周围环境及工作人员发生碰撞, 因此需要快速可靠地检测机械臂与外界发生的碰撞, 并使机械臂做出安全的反应。文中建立了机械臂动力学模型, 结合广义动量设计了一种力矩观测器, 考虑动力学模型误差、速度引起噪声误差等设定了动态阈值, 通过比较观测值与动态阈值, 实现机械臂实时碰撞检测。利用观测值将由位置、速度跟踪的控制律改变为基于观测值的力矩控制律, 进而隔离碰撞。以 2 自由度机械臂为例, 采用 ADAMS 分析了其动力学并结合 MATLAB 对所设计动量观测器进行了仿真, 与传统观测器观测值进行比较, 验证了所设计的动量观测器可快速准确地检测碰撞。

关键词: 机械臂; 力矩观测器; 动态阈值; 碰撞检测与隔离

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2354(2021)09-0065-06

DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2021.09.010

Collision detection and isolation for manipulators based on the momentum observer

ZHANG Shu-zhen, LI Jin-xia, YANG Kai, WEI Xing-jia, NAN Wen-hu, ZHENG Hai-xia

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: In the process of complex space planning and movement, the manipulators will inevitably collide with the surrounding environment and staff. Therefore, it is necessary to detect collisions between the manipulators and the outside world in a reliable manner and make the manipulators respond safely. In this article, the dynamic model of the manipulators is set up, and a torque observer is designed based on the generalized momentum. The dynamic threshold is identified with the dynamic model error and the speed-induced noise error taken into account. The observed value is compared with the dynamic threshold, and thus the real-time collision detection of the manipulators is realized. The observation value is adopted to change the control law based on position and speed tracking to the torque control law based on the observation value, in order to isolate collisions. With the two-degree-of-freedom manipulator taken as an example, the dynamics is analyzed by means of ADAMS and MATLAB is used to simulate the momentum observer. The values are compared with those obtained from the traditional observer, which has verified that the momentum observer can detect collisions quickly and accurately.

Key words: manipulator; momentum observer; dynamic threshold; collision detection and isolation

机械臂在复杂空间规划路径运动过程中, 难免与周围物体或人发生碰撞。通常采用视觉传感器^[1]和路径规划^[2]方法以实现无碰撞路径规划。视觉传感器通过摄像头获取周围环境信息, 将光学信号转化为电信号, 使机械臂无碰撞运动^[1]。路径规划通过规划算法,

规划出从初始点到目标点的无碰撞路径^[2]。但由于人类运动的固有速度(人类通常比任何典型的高传动比机械臂高一个数量级), 使机械臂和人类之间的相对运动非常快, 无法保证无碰撞行为^[3]。利用力/转矩传感器可以实现碰撞检测^[4-6], 但检测复杂且价格昂贵。

* 收稿日期: 2020-07-01; 修订日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51765031); 甘肃省自然科学基金资助项目(18JR3RA135); 甘肃省科技计划资助项目(17JR5RA111)

De Luca等^[7]在 2003 年首先提出基于广义动量的扰动观测器检测碰撞,利用动量与外力矩的解耦性实现碰撞检测,该方法无需计算加速度,计算量小,也不需要外部传感器,成本低。钟琮玮等^[8]用基于广义动量的扰动观测器和阈值快速检测碰撞,但其阈值为两个固定值,灵敏度较低。吴海彬等^[9]通过性能调整函数改进基于动量偏差观测器的动态响应特性,使响应时间在 20 ms 左右。Lee 等^[10]、Tian 等^[11]通过补偿关节摩擦,提高了碰撞检测灵敏度。张建华等^[12]基于二阶前馈外力观测器进行碰撞检测,同时采取碰停安全措施,但其阈值范围较大且碰停响应不能完全保证人员碰撞及机械臂的安全。

一旦检测到机械臂与外界发生碰撞,必须采取相应的控制措施隔离碰撞。已有研究通常采用零重力控制、反射控制等^[13]。零重力控制^[14]是使机械臂在工作环境中保持外力平衡状态,如果有外力作用于机械臂上时,机械臂由于碰撞外力作用,产生与碰撞外力方向相同的加速度,从而离开外力碰撞位置,但该控制可能导致机械臂损坏。反射控制^[15]是在外力作用瞬间,机械臂转换为力控制模式,使机械臂以更大加速度逃离外力作用位置,保证机械臂及外界环境安全。

文中基于机械臂动力学模型,结合广义动量,设计出一种力矩观测器。通过综合考虑动力学模型不确定性、机械臂实际运动中噪声、速度影响及其他干扰因素,设置动态阈值。比较观测值与动态阈值,实现更快速、更准确的碰撞检测。在反射策略的基础上,考虑阈值 r_0 及噪声因素,并利用观测值改变控制律,使机械臂快速离开碰撞位置,提高机械臂安全性。

1 机械臂动力学模型

文中分别建立了刚性机械臂和柔性机械臂动力学模型,在分析两者动力学方程基础上设计力矩观测器。

1.1 刚性机械臂动力学模型

当机械臂与外部环境发生碰撞时,动力学方程为:

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

式中: $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ —— 机械臂惯性矩阵,且为对称正定矩阵;

$\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ —— 机械臂各连杆角度、角速度和角加速度矢量;

$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}$ —— 科氏力和离心力项;

$\mathbf{G}(\mathbf{q})$ —— 作用于各关节的重力矩矢量;

$\boldsymbol{\tau}$ —— 电机驱动力矩;

$\boldsymbol{\tau}_f$ —— 关节摩擦力矩阵;

$\boldsymbol{\tau}_e$ —— 由碰撞产生的等效力矩, $\boldsymbol{\tau}_e = \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \mathbf{F}$;

\mathbf{F} —— 外部作用力;

$\mathbf{J}(\mathbf{q})$ —— 力作用位置的雅可比矩阵。

由文献 [16] 知, $\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为反对称矩阵, 即有:

$$\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{C}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (2)$$

由文献 [8-9] 知, 机械臂广义动量为:

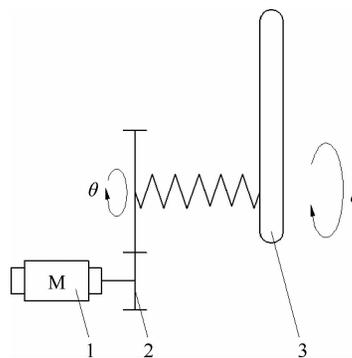
$$\mathbf{P} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

对式 (3) 求导, 结合式 (1)、(2) 可得:

$$\dot{\mathbf{P}} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_e - \boldsymbol{\tau}_f + \mathbf{C}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (4)$$

1.2 柔性机械臂动力学模型

机械臂柔性主要由关节柔性和连杆柔性构成, 对于小负载机械臂, 由于连杆变形引起的弹性位移很小, 因此只考虑机械臂关节柔性。关节柔性通过在关节处引入线性弹簧模拟。假设电机和连杆之间没有惯性耦合, 关节简化模型如图 1 所示。



1 电动机; 2 传动件; 3 连杆

图 1 柔性关节简化模型

当外力作用于机械臂时, 连杆动力学方程为:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_{f,q} = \boldsymbol{\tau}_j + \mathbf{D}_j(\dot{\boldsymbol{\theta}} - \dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_e \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}$ —— 电机侧 (电机 + 传动件) 输出角度;

$\boldsymbol{\tau}_j$ —— 关节弹性力矩, $\boldsymbol{\tau}_j = \mathbf{K}_j(\boldsymbol{\theta} - \mathbf{q})$;

\mathbf{D}_j —— 关节阻尼矩阵;

\mathbf{K}_j —— 关节刚度矩阵;

$\boldsymbol{\tau}_{f,q}$ —— 连杆侧摩擦力矩。

电机动力学方程表示为:

$$\mathbf{B} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}_j(\boldsymbol{\theta} - \mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{D}_j(\dot{\boldsymbol{\theta}} - \dot{\mathbf{q}}) - \boldsymbol{\tau}_{f,\theta} \quad (6)$$

式中: \mathbf{B} —— 惯性矩阵, 且对角正定;

$\boldsymbol{\tau}_{f,\theta}$ —— 电机侧摩擦力矩。

柔性关节机械臂广义动量为:

$$P_j = \begin{bmatrix} P_q \\ P_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q) \dot{q} \\ B \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

通常将机械臂传动件关节阻尼忽略不计,即 $D_j \approx 0$,由式(3)~式(7)得:

$$\dot{P}_q = \tau_j + \tau_e - \tau_{f,q} + C^T(q, \dot{q}) \dot{q} - G(q) \quad (8)$$

$$\dot{P}_\theta = \tau + \tau_j - \tau_{f,\theta} \quad (9)$$

2 机械臂碰撞检测算法

2.1 观测器设计

由式(4)、(8)可知,刚性、柔性机械臂运动过程中受到外部作用力(碰撞)时,广义动量都会发生变化,且外部作用力与广义动量具有解耦性。因此,设计通用力矩观测器:

$$\dot{r} = K_1(P - \hat{P}) + \int_0^t (K_2(P - \hat{P}) - K_3 r) dt \quad (10)$$

式中: r ——观测器的外力矩值;

\hat{P} ——机械臂广义动量估计值;

K_1, K_2, K_3 ——增益矩阵。

由式(4)、(8)可知,刚性动力学与柔性动力学区别为驱动力矩 τ 和 τ_j 不同,对观测值 r 不产生影响。因此为了简洁,后文以刚性机械臂为例进行分析,则:

$$\dot{P} = \tau + r - \tau_f + \hat{C}^T(q, \dot{q}) \dot{q} - G(q) \quad (11)$$

力矩观测器工作原理如图 2 所示。

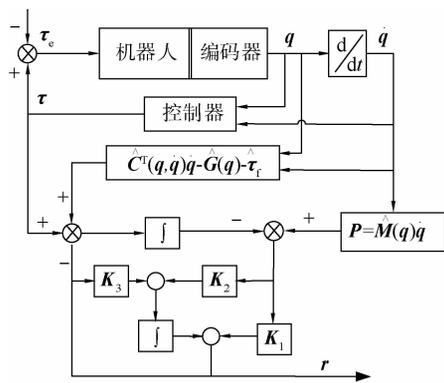


图 2 力矩观测器原理

2.2 观测器性能分析及阈值设定

对式(10)求 2 阶微分,然后进行 Laplace 变换,得该力矩观测器传递函数:

$$\frac{r(s)}{\tau_e(s)} = \frac{K_1 s + K_2}{s^2 + (K_1 + K_3) s + K_2} \quad (12)$$

由式(12)可知,该观测器为一个二阶系统,一旦 τ_e 发生变化,观测值 r 将随之变化。稳态时, $r \approx \tau_e$ 。该二阶系统由标准二阶系统和 PD 调节器构成,因此选择合适的 K_1, K_2, K_3 值,可以快速、准确地检测碰撞。

观测值 $r = [r_1, r_2, \dots, r_i, r_{i+1}, \dots, r_n]^T$, r_i 表示第 i 个连杆的力矩观测值。在不存在建模误差及噪声干扰的情况下,假设只在机械臂第 i 个连杆上发生碰撞,则第 j 列雅可比矩阵 $J(q_j)$ 为:

$$J(q_j) \begin{cases} \text{不全为 } 0 & (j < i) \\ \neq 0 & (j = i) \\ = 0 & (j > i) \end{cases} \quad (13)$$

结合 $r \approx \tau_e = J^T(q) F$ 可知, $r_i \neq 0$ 且 $r_j = 0 (j > i)$, 因此可判断碰撞发生在第 i 个连杆上,从而控制第 i 个关节运动,避开障碍。

实际运动过程中,动力学模型误差和噪声不可避免,即使不发生碰撞,观测值 r 也不恒为 0 ,且随机械臂运动而发生变化。为获得较高灵敏度检测结果并减少错误检测,文中设定动态阈值 r_{th} ,其下限为 r_{down} ,上限为 r_{up} ,则第 i 个连杆的阈值上、下限为 $r_{i up}$ 和 $r_{i down}$,将每一个连杆阈值与观测值比较,若满足:

$$\begin{cases} r_i > r_{i up} \text{ 或 } r_i < r_{i down} \\ r_{i+1 down} < r_{i+1} < r_{i+1 up} \end{cases} \quad (14)$$

则表示第 i 个连杆发生碰撞。 r_{th} 主要由动力学模型误差、摩擦力建模误差、速度引起噪声产生的误差等,因此设定动态阈值为:

$$r_{th} = r_0 + K_4 |\dot{q}| \pm K_5 \quad (15)$$

式中: r_0 ——动力学模型误差,其中摩擦力由文献[10]可知, r_0 可采用不发生碰撞时的观测值;

$K_4 |\dot{q}|$ ——噪声引起的误差,主要受速度影响,通过多次试验可确定不同速度对应的误差系数 K_4 ;

K_5 ——包含其他干扰产生的误差,决定了动态阈值的宽度。

3 碰撞隔离方法

当观测值超过动态阈值时,可判断机械臂与外部环境发生了碰撞,此时,立即改变机械臂碰撞连杆运动状态,使机械臂快速反向运动,进而隔离碰撞。文中采用改变底层力矩控制律来改变控制模式,即由位置、速度跟踪控制改变为基于观测值的力矩控制,改变后的关节驱动力矩 τ' 为:

$$\tau' = K_p(r - r_0) + \hat{G}(q) + \hat{\tau}_1 \quad (16)$$

该力矩随外力变化而变化。发生碰撞时,机械臂控制器立即切换为力矩控制模式,直至观测值为 $r_{i\ down} \leq r_i \leq r_{i\ up}$ 。考虑式(1)可得:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} = (K_p - 1)(r - r_0) \quad (17)$$

式中: K_p ——用来调整隔离速度, K_p 越大,逃离速度越快,但振动越大,因此需根据 $(r - r_0)$ 的大小选择相应的 K_p 值。

机械臂运动碰撞检测与隔离算法框图如图 3 所示。

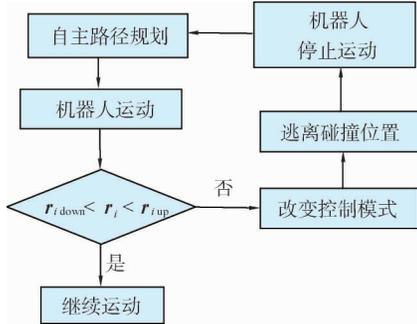


图 3 机械臂自主运动碰撞检测与隔离框图

4 碰撞检测仿真分析

为了对文中提出的碰撞检测算法有效性进行验证,用该力矩观测器结合动态阈值对 2 自由度机械臂运动进行碰撞检测,采用 ADAMS 结合 MATLAB 联合仿真分析。图 4 所示为 2 自由度机械臂简化模型,图 5 所示为利用 ADAMS 软件建立的二杆机构模型,图 6 所示为结合 ADAMS 和 MATLAB 软件建立的 2 自由度机械臂碰撞检测仿真模型。

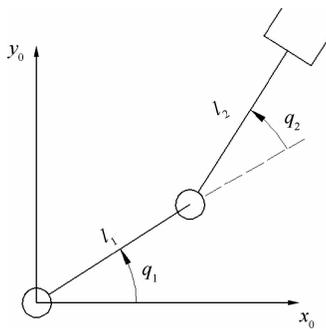


图 4 2 自由度机械臂简化模型

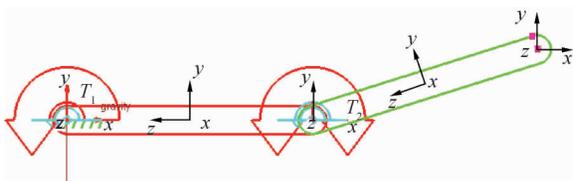


图 5 ADAMS 构建的二杆机构模型

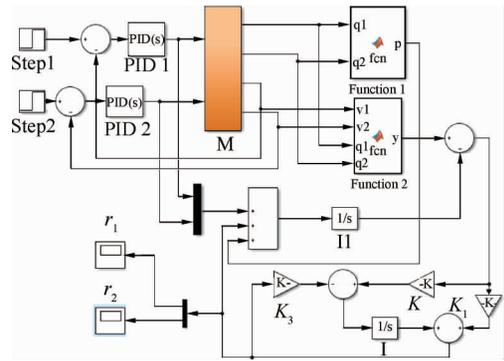


图 6 仿真模型

由于存在建模误差,故不发生碰撞时,阈值 $r_{th} \neq 0$,设二杆均以 2 rad/s 速度匀速运动,两个杆件的动态阈值如图 7 所示。

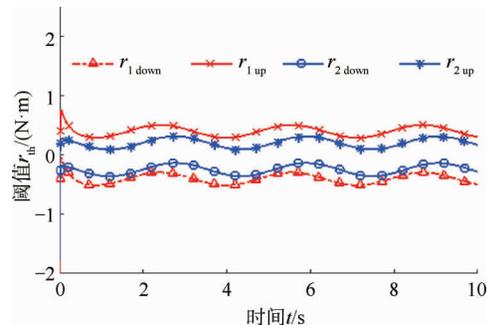


图 7 两个杆件动态阈值 r_{th}

二杆机构两个杆以 2 rad/s 速度匀速运动,用文献 [7] 所设计的动量观测器和文中设计动量观测器对外力进行检测,文中和文献 [7] 观测值分别为 r_{new} 和 r_{old} , 则第 i 个连杆的观测值为 $r_{i\ new}$ 和 $r_{i\ old}$ 。

二杆机构运动至 6 s 时,于连杆 1 末端施加 2 N 外力,二杆机构的观测值如图 8、图 9 所示。

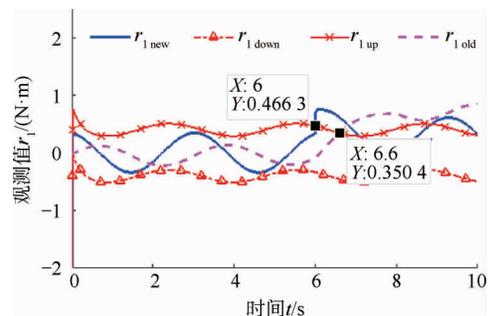


图 8 外力作用于杆 1 时关节 1 力矩观测值

由图 8 可知,碰撞发生在杆 1 时,关节 1 观测值超过阈值,文中观测器于 6 s 检测到碰撞,文献 [7] 观测器于 6.6 s 检测到碰撞。由图 9 可知,碰撞发生在杆 1 时,关节 2 观测值没有发生变化。

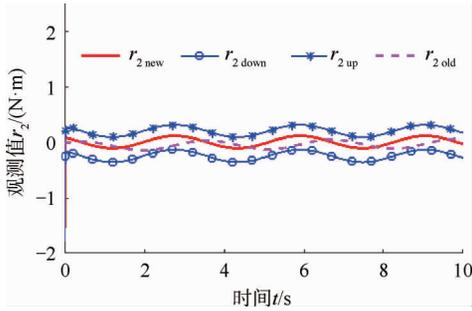


图9 外力作用于杆1时关节2力矩观测值

二杆以 2 rad/s 速度匀速运动至 6 s 时,在连杆 2 末端施加 2 N 外力,二杆机构的观测值如图 10 和图 11 所示。

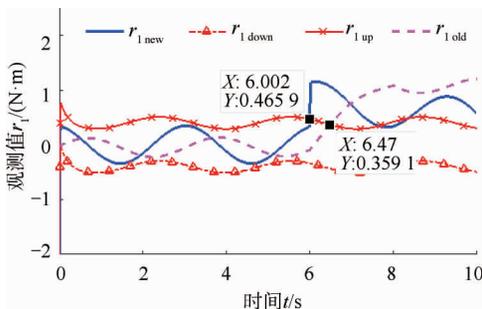


图10 外力作用于杆2时关节1力矩观测值

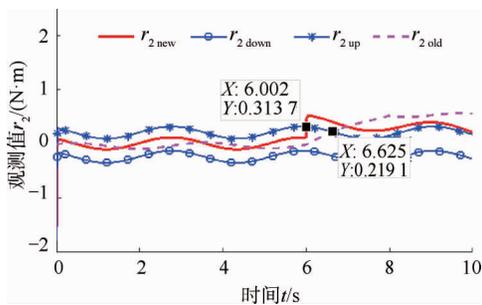


图11 外力作用于杆2时关节2力矩观测值

由图 10 可知,碰撞发生在杆 2 时,关节 1 观测值超过阈值,文中观测器于 6.002 s 检测到碰撞,文献 [7] 观测器于 6.47 s 检测到碰撞。

由图 11 可知,碰撞发生在杆 2 时,关节 2 观测值超过阈值,文中观测器于 6.002 s 检测到碰撞,文献 [7] 观测器于 6.625 s 检测到碰撞。

由图 8~图 11 可知,所设计力矩观测器结合动态阈值能在 2 ms 内检测出外力,而文献 [7] 观测器需 625 ms,文中观测器检测速度明显优于文献 [7] 中观测器。

5 结论

(1) 文中设计的力矩观测器结合所设置的动态阈值实现了无外部传感器机械臂碰撞检测,降低了检测成本及工作复杂度。

(2) 调节力矩观测器增益矩阵 K_1, K_2, K_3 可调节观测器的灵敏度,调节动态阈值中噪声误差系数矩阵 K_4 ,其他干扰误差系数矩阵 K_5 可调节检测的快速性、准确性。

(3) 文中所设计力矩观测器由标准二阶系统和 PD 调节器构成,相对于基于广义动量的典型扰动观测器(一阶系统),检测速度更快。通过 MATLAB 仿真分析,验证了其快速性。

参考文献

- [1] Kulic D, Croft E A. Real-time safety for human-robot interaction [C] // International Conference on Advanced Robotics, IEEE Press, 2005: 719-724.
- [2] 郝安民,王琦,孙学彬. 一种有效的地图创建方法和机器人的路径规划 [J]. 机械设计, 2010, 27(1): 35-38.
- [3] Haddadin S, de Luca A, Albu-Schaffer A. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(6): 1292-1312.
- [4] Le D P, Choi J, Kang S. External force estimation using joint torque sensors for a robot manipulator [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE Press, 2012: 4507-4512.
- [5] Wisanuvej P, Liu J, Chen C M, et al. Blind collision detection and obstacle characterisation using a compliant robotic arm [C] // IEEE International Conference On Robotics and Automation, IEEE Press, 2014: 2249-2254.
- [6] Phan S, Quek Z F, Shah P, et al. Capacitive skin sensors for robot impact monitoring [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE Press, 2011: 2992-2997.
- [7] De Luca A, Mattone R. Actuator failure detection and isolation using generalized momenta [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003 Proceedings ICRA: IEEE Press, 2003: 634-639.

- [8] 钟琮玮,项基,韦巍,等.基于扰动观测器的机械手碰撞检测与安全响应[J].浙江大学学报:工学版,2012,46(6): 1115-1121.
- [9] 吴海彬,李实懿,吴国魁.基于动量偏差观测器的机器人碰撞检测算法[J].电机与控制学报,2015,19(5): 97-104.
- [10] Lee S D, Kim M C, Song J B. Sensorless collision detection for safe human-robot collaboration [C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2015: 2392-2397.
- [11] Tian Y, Zhi C, Jia T, et al. Sensorless collision detection and contact force estimation for collaborative robots based on torque observer [C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(ROBIO), IEEE, 2016: 946-951.
- [12] 张建华,蔡灿,刘璇,等.基于二阶前馈外力观测器的机械臂碰撞策略[J].计算机集成制造系统,2019,25(7): 1775-1783.
- [13] 王彬峦.机械臂碰撞检测与响应策略及柔顺控制算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018: 16-17.
- [14] Martinez S, Garcia-Haro J M, Victores J G, et al. Experimental robot model adjustments based on force-torque sensor information [J].Sensors(Switzerland), 2018,18(3): 836.
- [15] Luca A D, Albu-Schaffer A, Haddadin S, et al. Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE Press, 2006: 1623-1630.
- [16] 理查德·摩雷,李泽湘,夏恩卡·萨斯特里.机器人操作的数学导论[M].北京:机械工业出版社,1998.

作者简介:张淑珍(1969—),女,副教授,博士,研究方向:工业机器人。

E-mail: janezs@163.com

李金霞(通信作者)(1993—),女,硕士研究生,研究方向:工业机器人。E-mail: 1814504681@qq.com