

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.040

柔性多关节液压机械臂运动过程碰撞检测方法

刘军伟¹, 杨路², 田大海¹

(1. 江苏安全技术职业学院 智能制造与应急装备学院, 江苏 徐州 221011;

2. 上海工程机械厂有限公司, 江苏 徐州 201901)

摘 要:机械臂通常用于复杂、高精度操作任务。针对柔性多关节液压机械臂自由度多、执行任务时需同时考虑机械臂末端位姿和整体构型的问题,当前研究碰撞检测方法需要大量的外部传感器监测机械臂与外部环境的接触可能性,检测效率低,虚警率高。提出一种柔性多关节液压机械臂运动过程碰撞检测方法。采用拉格朗日功能平衡法分析柔性多关节液压机械臂的动力学特性并建立动力学方程。设计一种通用的力矩观测器,将接收到的机械臂动力学方程作为输入,利用标准 2 阶系统和 PD 调节器进行力矩观测;由于动力学方程误差和噪声干扰,引入动态阈值,用来比较连杆阈值和力矩观测值以实现碰撞的检测。同时引入重力补偿算法来对检测结果中的误差进行补偿。实验结果表明:所提方法能够准确检测出机械臂在运动过程中碰撞力的发生情况,且碰撞检测效率较高。

关键词:液压机械臂;动力学特性;力矩观测器;重力补偿算法;碰撞检测

中图分类号:TH113.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0206-05

Collision Detection Method for Flexible Multi Joint Hydraulic Machinery Arm in Movement

LIU Junwei¹, YANG Lu², TIAN Dahai¹

(1. Intelligent Manufacturing and Emergency Equipment School, Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou, 221011 China;

2. Shanghai Engineering Machinery Co., Ltd., Xuzhou 201901, China)

Abstract: Mechanical arms are commonly used for complex, high-precision operational tasks. In response to the issue of flexible multi joint hydraulic robotic arms with multiple degrees of freedom and the need to simultaneously consider the end pose and overall configuration of the robotic arm during task execution, current research on collision detection methods requires a large number of external sensors to monitor the possibility of contact between the robotic arm and the external environment, resulting in low detection efficiency and high false alarm rate. A collision detection method for the motion process of a flexible multi joint hydraulic robotic arm is proposed. The Lagrangian functional balance method is used to analyze the dynamic characteristics of a flexible multi joint hydraulic robotic arm and establish dynamic equations. A universal torque observer is designed, which takes the received dynamic equations of the robotic arm as input and utilizes a standard second-order system and a PD regulator for torque observation. Due to dynamic equation errors and noise interference, dynamic thresholds are introduced to compare the linkage threshold and torque observation values, achieving collision detection. Meanwhile, a gravity compensation algorithm is applied to compensate for errors in the detection results. The experimental results show that the proposed method can accurately detect the occurrence of collision forces during the motion of the robotic arm, with high collision detection efficiency.

Keywords: hydraulic robotic arm; dynamic characteristics; torque observer; gravity compensation algorithm; collision detection

0 引言

柔性多关节液压机械臂是一种具有柔性和多关节结构的机械臂,通过液压系统来提供动力和控制。它通常由多个关节、连接器和执行器组成,可以模仿人的手臂运动,并且具有较大的运动自由度和适应性。但由于其自身的惯量大,运动过程多处于动态不确定的非结构环境,各连杆和关

节之间难免与周围物体或人发生碰撞,从而引起重大事故。因此,在机械臂运动过程中实施必要的防碰撞检测是保障其安全作业的重要前提。

张建华等^[1]根据柔性多关节液压机械手臂在未知位置下运动的不确定性,对柔性多关节液压机械臂的关节间电流信号展开分析以判断其有无产生碰撞冲击现象,并实施迭代试探,以减少测量偏差,建立碰撞臂杆逆运动学模型以提高碰撞检

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB540028)

第一作者简介:刘军伟(1987—),男,江苏连云港人,讲师,本科,研究方向为液压设备与控制,592281160@qq.com。

测精度,简化2阶前馈外力观测器,实现机械臂的快速碰撞检测。但该方法计算复杂度较高。刘建春等^[2]提出基于球体与胶囊体包围盒的可简化柔性多关节液压与液压机械臂模型,使用二次投影法将包围盒子空间转化为线段结构,对该问题实施相应的求解实现机械臂的碰撞检测。但该方法存在动态障碍物或其他环境因素干扰时,其碰撞检测不够及时,检测精度较低。刘纯键等^[3]为了提高柔性多关节液压机械臂的运行安全性,提出一种基于柔顺度评估方式的机械臂碰撞检测机制。使用动量偏差观测器获得柔性滑膜关节液压机械臂之间的碰撞力,并通过相关测试系统验证了该观测器的有效性。但该方法的实时性不高。

为了解决上述方法中存在的问题,本文提出柔性多关节液压机械臂运动过程碰撞检测方法。

1 柔性多关节液压机械臂动力学分析

为了分析柔性多关节液压机械臂运动过程与自身受到的作用力之间的关系,以进一步提高机械臂的碰撞检测精度^[4],采用拉格朗日功能平衡法快速确定机械臂的动力学结构特性。拉格朗日函数^[5-6]可表示为

$$L = K - P \quad (1)$$

式中: K 表示机械臂的动能; P 表示机械臂的势能。假设 n 为柔性多关节液压机械臂^[7-8]的关节参数, q_i 、 $\dot{q}_i$ 分别表示机械臂关节的动能、势能坐标, g_d 表示坐标点的速度,则第 i 个坐标的作用力 F_i 可表示为

$$F_i = g_d \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (2)$$

在上述基础上用一种二连杆机构^[9]去简化柔性多关节液压机械臂,其机构如图1所示。

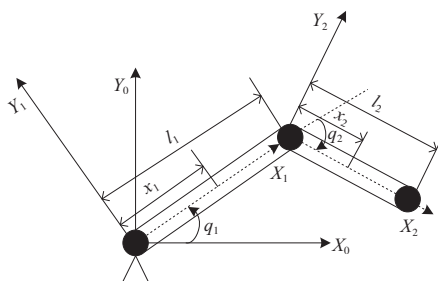


图1 简易二连杆机械臂机构

在描述机械臂的动力学方程时,常常使用连杆端动力学方程和电机端动力学方程。机械臂的关节在转矩传递过程中起着重要作用^[10],这一过

程是通过双编码器和谐波减速器实现的,如图2所示。

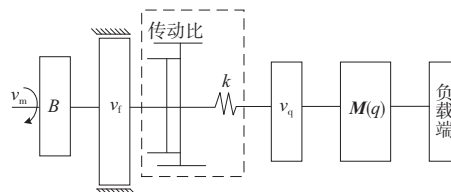


图2 双编码器关节结构图

机械手臂的连杆与其体积和质量等因素密不可分。基于此情况,可以建立一个连杆惯量矩阵 $M(q_i) \in R^{n \times n}$,得到机械臂关节之间的动力学方程为

$$v_\alpha = M(q_i) \ddot{q}_i + C(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i + F_i G(q_i) \quad (3)$$

式中: $C(q_i, \dot{q}_i) \in R^n$ 为机械臂连杆端离心力矩; $G(q_i) \in R^n$ 为机械臂连杆的重力矩^[11]。以式(3)为基础展开分析,建立机械臂的电机动力学方程:

$$v_m = J_i \ddot{\vartheta} + \dot{q}_i + v_\alpha \quad (4)$$

式中: ϑ 为机械臂连杆的位置; $J_i = \text{diag}(J_1, J_2, \dots, J_n)$ 为电机惯性矩阵。在此基础上构建机械臂的外力矩转换到各个关节的动力学方程: $v_e = J^T \times F$ 。其中, F 表示机械臂外力。

式(3)中包含了机械臂执行的所有转矩,当机械臂在运动过程中发生不确定性碰撞时^[12],外部转矩将会产生不同的变化,由此完成液压机械臂动力学分析。

2 柔性多关节液压机械臂运动过程碰撞检测

根据建立的柔性多关节液压机械臂动力学方程,可以深入了解机械臂的受力情况,明确力矩和力的分布情况,同时也能得到机械臂各关节的力矩、速度、加速度等参数。基于此,设计一种通用的力矩观测器,以实现对机械臂的碰撞智能检测^[13]。该观测器的作用是通过测量外力矩的值,将其输入到柔性多关节液压机械臂的电机动力学方程中,获取其数学表达式为

$$G = K_1(A - \hat{A}) + \int_0^t [K_2(A - \hat{A}) - K_3 v_m] dt \quad (5)$$

式中: A 和 $\hat{A}$ 分别为机械臂广义动量实际值、估计值; K_1 、 K_2 、 K_3 为增益矩阵。力矩观测器工作原理如图3所示。

将式(5)展开进一步 Laplace 变换^[14-16],并由

$$s = \frac{K_1 + K_2}{G^2 + (K_1 + K_2)V + K_2} \quad (6)$$
$$V = s \mathbf{J}^T(w) \mathbf{G}_s \quad (7)$$

The diagram illustrates a control system for a robot. It features a main feedback loop where the robot's position is compared with a reference. The error signal is processed by a controller. Additionally, there are two feedforward paths: one based on the derivative of position (q) and another based on a generalized momentum value. These feedforward signals are combined with the feedback signal to drive the robot. The system includes gain blocks (K_1, K_2, K_3) and a final output r .

根据式(7)可知,力矩观测器本身可以被视作一个简单的2阶系统,当 V 发生改变时,观测值 r 发生相应的变化;当稳态时, $r \approx V$;该观测器的工作过程是通过标准2阶系统和PD调节器实现的,选择合适的 K_1 、 K_2 、 K_3 值即可实现快速准确地检测机械臂碰撞。

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_i, r_{i+1}, \dots, r_n]^T \quad (8)$$

在机械臂的实际运行过程中,其动力学方程的误差和噪声的干扰^[17-18]是无法完全避免的,观测值 $\mathbf{r}$ 随着机械臂的运动不会恒为 $\mathbf{0}$,为了获取更高灵敏度的碰撞检测结果,减少检测误差,在上述基础上设定动态阈值 ϖ ,其上、下限分别为 ϖ_{up} 、 ϖ_{down} ,第 i 个连杆的阈值上、下限为 $\varpi_{i\text{up}}$ 和 $\varpi_{i\text{down}}$,对每一个连杆阈值和观测值展开对比,若满足下述条件则表明第 i 个连杆发生碰撞:

$$\begin{cases} r_i > r_{i\text{up}} \text{ 或 } r_i < r_{i\text{down}}, \text{ 动态阈值 } \varpi_{\text{th}} \text{ 的计算公式为} \\ r_{i+1\text{down}} < r_{i+1} < r_{i+1\text{up}} \end{cases}$$

$$\varpi_{\text{th}} = \nu V + \nu_s \mid \mathbf{r} \mid \pm \nu_r \quad (9)$$

为了实现机械臂碰撞检测的高精度和高效率,本文提出一种基于力矩观测的重力补偿算法。该算法利用机器检测到的力矩结果作为评估指标,并引入误差补偿,从而提高碰撞检测的准确性和可靠性。其满足以下条件:

- 当柔性多关节液压机械臂的结构特征符合上述条件后,根据其各个关节的运动特性,计算各个关节所受的重力矩极大值矩阵:

$$\begin{bmatrix} - \\ g_1 \\ - \\ g_2 \\ \vdots \\ - \\ g_n \end{bmatrix} = g \varpi_{\text{th}} \begin{bmatrix} m_1 l_1^c + l_1 \sum_{n=2}^n m_n \\ m_2 l_2^c + l_2 \sum_{n=3}^n m_n \\ \vdots \\ m_n l_n^c \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: g 为机械臂的重力加速度; $\bar{g}_n$ 为第 n 个关节重力矩在运动过程中的最大速度; l_n^c 为第 n 个坐标系原点和质心间的距离; m_n 和 l_n 为分别第 n 个关节的重力和长度。在此基础上引入重力补偿算法, 提高碰撞检测精度, 计算公式为

$$\Psi = \begin{cases} H(w_1) (m_1 l_1^c + l_1 \sum_{k=2}^n m_k) \bar{g}_1 \cos w_1 \\ H(w_2) (m_2 l_2^c + l_2 \sum_{k=3}^n m_k) \bar{g}_2 \cos(w_1 + w_2) \\ \vdots \\ H(w_n) (m_n l_n^c + \bar{g}_n \cos(\sum_{i=1}^n w_i)) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $H(w_n)$ 为机械臂运动过程中第 n 个关节角 w_n 所需补偿的力矩。通过上式对机械臂的碰撞检测结果实施补偿, 进而提高碰撞检测精度。由此即可完成在减少干扰因素影响下, 柔性多关节液压机械臂运动过程的碰撞检测。

为了验证柔性多关节液压机械臂运动过程碰撞检测方法的整体有效性,需要对其展开测试。机械臂选取埃夫特智能装备 SCARA 机械臂。运用该公司自带软件完成算法导入。选用二连杆机械臂作为实验对象,连杆长度分别为 0.5 m、0.4 m,关节类型为旋转关节,第 1 关节和第 2 关节的角度

均为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$, 关节角速度为 $0 \sim 360^{\circ}/\text{s}$ 。以某一障碍物路段为虚拟实验环境, 区域内存在大量不规则的障碍物, 以该机械臂的 3 个移动关节 1、2、3 展开验证, 通过本文方法对机械臂的动力学参数进行检测, 实验现场及检测结果如图 4 所示。

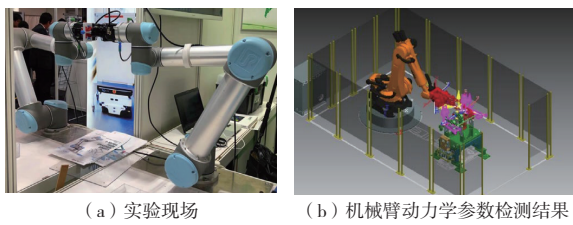


图 4 机械臂动力学参数检测结果

在机械臂运动过程中添加不同时段的碰撞力, 将通过所提方法得到的检测结果记录下来, 如图 5 所示。

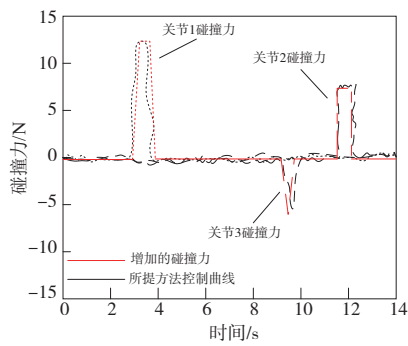


图 5 所提方法碰撞检测结果

从图 5 中可以看出, 在柔性多关节液压机械臂的运动过程中, 每个关节发生碰撞之前, 每个关节的观测值很小, 在 0 附近波动但不为 0; 当每个关节的观测值在碰撞发生后, 随着碰撞力的变化, 所提方法得到的碰撞检测结果也发生相应的变化, 具有较快的响应特性, 在碰撞力消失后, 每个关节的观测值又迅速返回在 0 附近波动。整体上看, 所提方法的整个碰撞检测过程均可以较好地跟随碰撞力的变化, 说明所提方法是可行有效的。

3.1 碰撞信号分析

将所提方法和文献[1]方法、文献[2]方法应用到上述测试条件中展开机械臂整体运动过程中的碰撞检测, 分析 3 种方法检测下获取的碰撞信号与通过实际距离确定的碰撞信号之间的误差, 当机械臂发生碰撞时, 碰撞信号为“1”, 当机械臂无碰撞时, 信号为“0”, 以此证明方法的准确性, 由此得到不同方法碰撞信号曲线如图 6 所示。

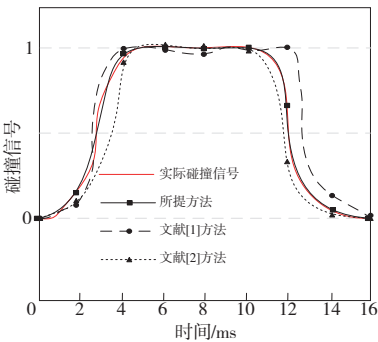


图 6 不同方法碰撞信号对比

从图 6 中可以看出, 所提方法检测下获取的碰撞信号与实际信号几乎完全重合, 无明显波动, 能够明显地检测出机械臂的碰撞情况。这是因为所提方法在完成机械臂碰撞检测的基础上, 对其实施了误差补偿, 提高了机械臂碰撞检测精度; 而文献[1]方法在部分时段已经完全脱离真实碰撞信号, 其检测精度较差; 文献[2]方法虽然在检测精度方面比文献[1]方法优一些, 但不够稳定, 从其碰撞信号检测曲线上可以看出, 信号的波动较大, 出现较多不平稳的检测结果偏离真实值, 由此可以证明所提方法具有更高的机械臂碰撞检测精度。

3.2 碰撞检测耗时分析

为了进一步地验证所提方法的实时性, 实验在柔性多关节液压机械臂运动过程中经过的某一路段中分别设定 10~100 个不同形状大小的障碍物, 分别采用所提方法和文献[1]方法、文献[2]方法执行碰撞检测并得出碰撞点, 由此得到耗时统计结果如表 1 所示。

表 1 不同方法碰撞检测耗时 单位:ms			
障碍物数量/个	所提方法	文献[1]方法	文献[2]方法
10	15.02	20.41	16.08
20	15.85	22.08	17.02
30	16.33	23.44	17.99
40	16.97	24.78	18.25
50	17.41	25.56	18.97
60	17.99	26.32	19.35
70	18.36	27.08	20.05
80	19.01	27.89	21.14
90	19.89	28.46	22.03
100	20.25	29.74	22.98

由表1可知,相比于其他两种方法,所提方法的碰撞检测耗时最低,且能够在较平稳的检测状态下快速准确地检测机械臂碰撞,其平均耗时仅为17.71 ms,低于其他两种对比方法,有明显的时间差别,由此可以充分说明所提方法在机械臂的碰撞检测方面具有更高的实时性和检测效率。

3.3 碰撞检测效果分析

误报率是指在检测过程中,本应该被正确识别的事件而未能被准确地检测到的比例。误报率越高,检测效果越差,测试结果如图7所示。

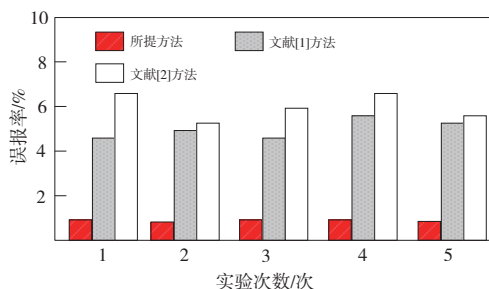


图7 不同方法的误报率检测结果

由图7可知,在5次实验过程中,所提方法的误报率始终在1%以下,而文献[1]方法、文献[2]方法的误报率则在4%~7%之间。该实验表明,所提方法具有良好的碰撞检测效果。

4 结语

柔性多关节液压机械臂在运动过程中的碰撞检测是提高其运动稳定性和安全性的关键。为了提高碰撞检测的精确度和效率,提出柔性多关节液压机械臂运动过程碰撞检测方法。该方法在分析柔性多关节液压机械臂动力学特性的基础上,采用一种力矩观测器完成其运动过程中的碰撞检测,为了提高其检测精度,引入重力补偿算法,对机械臂碰撞检测结果实施误差补偿,得到更精确的碰撞检测结果。实验证明该方法能够解决当前方法的不足和问题,具有比较重要的实际应用意义。

参考文献:

[1] 张建华,任宝珍,赵岩,等. 基于二分试探的平面冗余机械臂碰撞检测与避障[J]. 机械工程学报,2023,59(1):113-122.
[2] 刘建春,秦昆,林彦锋,等. 双机械臂碰撞检测算法研究[J]. 机械传动,2021,45(1):40-44,70.

[3] 刘纯键,高红星,蒋林,等. 基于一种碰撞检测算法的液压机械臂柔顺性分析[J]. 武汉科技大学学报,2021,44(5):366-373.
[4] 孟范伟,旷建,陈昊男,等. 基于奇异摄动的柔性关节机械臂鲁棒控制[J]. 电机与控制学报,2024,28(10):193-200.
[5] 刘健,张庆利. 机械传动在冲击载荷作用下的误差检测仿真[J]. 计算机仿真,2022,39(7):437-440,511.
[6] 楼飞,沈巍,关静,等. 基于空间算子代数理论的被动步行机器人局部稳定性分析[J]. 机械传动,2020,44(8):124-129.
[7] 欧劲松,李蓉,尹辉,等. 基于奇异摄动的柔性关节机械臂约束跟随控制研究[J]. 应用数学和力学,2023,44(5):513-524.
[8] 付中乐,段洪君,骆新,等. 基于奇异摄动的柔性关节机械臂终端滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(5):116-119.
[9] 朱奇,龙华,周志红,等. 多臂节机械臂架系统连杆组参数化建模及优化设计[J]. 机械传动,2021,45(3):75-81.
[10] 刘福才,刘林,郭根旺. 柔性关节空间漂浮机械臂奇异摄动自抗扰控制仿真研究[J]. 高技术通讯,2020,30(9):928-937.
[11] 李刚,李锋,丁孺琦,等. 基于关节力矩补偿的液压机械臂末端力软测量[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(10):140-152.
[12] 浦玉学,周润润,陈演,等. 空间机械臂碰撞过程的模糊无模型自适应振动控制[J]. 振动与冲击,2023,42(19):14-21.
[13] 董丽莎. 基于改进Dijkstra算法的轮式移动机械臂无碰撞轨迹研究[J]. 制造业自动化,2022,44(8):66-69.
[14] 朱悦璐,李光灿,吴帅兵. Richards方程Laplace变换解中几个遗留问题的讨论[J]. 长江科学院院报,2024,41(12):126-132.
[15] 滕黎明,江锦波,彭旭东,等. 基于Laplace变换的干气密封轴向自由振动与强迫振动解析研究[J]. 振动与冲击,2022,41(21):148-160.
[16] 王源,韩英,屈贺,等. 拉普拉斯变换在控制理论中的应用[J]. 北京石油化工学院学报,2023,31(1):60-65.
[17] 冯立康,张维海,吴昭景. 受多随机噪声和多随机脉冲干扰的非线性系统稳定性分析[J]. 控制与决策,2023,38(2):569-576.
[18] 沙毅刚,王强,何晓晖,等. 基于模糊补偿的液压机械臂轨迹跟踪控制[J]. 信息与控制,2021,50(2):184-194.

收稿日期:2023-09-19