

DOI: 10.3901/JME.2023.14.298

基于模型控制的液压机械臂高精度轨迹跟踪*

丁孺琦^{1,2} 王振¹ 程敏³ 徐兵² 刘子辰¹

- (1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室 南昌 330013;
2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027;
3. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要: 液压机械臂具有高度非线性动力学特性, 末端轨迹跟踪误差大。为此, 提出一种辨识动力学参数的基于模型的控制算法 (Model-based control, MBC)。该控制算法由外环的液压缸位置反馈控制器、内环的力控制器以及前馈流量补偿控制器三部分输出叠加组成。力控制器充分考虑液压机械臂动力学模型, 动态补偿惯性力、重力和摩擦力等干扰力对控制精度的影响; 位置控制器用以消除液压执行器造成的力偏差; 前馈流量补偿器根据液压执行器动力学模型计算流量补偿量, 提高系统响应与精度。针对动力学模型中存在的参数不准确问题, 采用了最小二乘参数辨识的方法, 在激励轨迹下获取液压机械臂动力学参数精确值。试验结果表明, 所提出的辨识动力学参数的 MBC 控制算法相比 3D 模型参数的 MBC 控制在自由空间运动位置跟踪精度提升了 39.24%, 相比与传统 PID 控制提升了 93%, 显著提高了轨迹跟踪精度。

关键词: 液压机械臂; 基于模型的控制; 动力学模型; 参数辨识; 前馈流量补偿

中图分类号: TH137

Model-based Control of the Hydraulic Manipulator for the High-precision Trajectory Tracking

DING Ruqi^{1,2} WANG Zhen¹ CHENG Min³ XU Bing² LIU Zichen¹

- (1. Key Laboratory of Conveyance and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013;
2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027;
3. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: The hydraulic manipulator has high non-linear dynamic characteristics, causing large errors of end-effector trajectory tracking. A model-based control algorithm (Model-based control, MBC) with dynamic parameters identification was proposed for high-precision end-effector trajectory tracking of the hydraulic manipulator. The control algorithm was composed of three output parts: the hydraulic cylinder position feedback controller of the outer loop, the force controller of the inner loop and the feedforward flow compensation controller. The force controller fully considered the dynamics model of the hydraulic manipulator and compensated for the influence of inertial force, gravity force, and friction force on the control accuracy. The position controller is used to eliminate the force deviation caused by hydraulic actuators. The feedforward flow compensator calculates the flow compensation amount according to the dynamic model of the hydraulic actuator to improve the control response and accuracy. The least-square parameter identification method was adopted to solve the problem of inaccurate parameters in the dynamics model, and the accurate dynamic parameters of the hydraulic manipulator were captured under the excitation trajectory. The experimental results show that the proposed MBC control algorithm for identifying dynamic parameters improves the tracking accuracy of motion position in free space

* 国家自然科学基金(U21A20124, 52175050)、浙江省重点研发计划(2022C01039)和江西省自然科学基金(20212ACB214004)资助项目。
20220310 收到初稿, 20221220 收到修改稿

by 39.24% compared with the MBC control with 3D model parameters, and increases the tracking accuracy by 93% compared with the traditional PID control, which significantly improves the trajectory tracking accuracy.

Key words: hydraulic manipulator; model-based control; dynamic model; parameter identification; feedforward flow compensation

0 前言

液压机械臂因其高功率密度比、传动平稳等特点被广泛应用于建筑、采矿和林业等重载场合^[1]。液压机械臂同时具有机械臂的非线性动力学特性, 以及液压驱动特有的时变不确定特性, 因此相比于电驱动的工业机器人, 液压机械臂高精度轨迹跟踪控制难度更高。目前液压机械臂轨迹跟踪控制方法主要包括 PID 控制^[2-3]、滑模控制^[4-5]、自适应控制^[6-7]、智能控制(神经网络控制^[8-9]、模糊控制^[10-11])等。PID 控制和智能控制方法不需要考虑液压机械臂动力学模型, 但 PID 控制难以处理系统模型中存在的参数不确定性和非线性问题。神经网络控制需要大量的样本数据进行学习, 计算量大, 耗时长; 模糊控制需要操作者经验和相关的专家知识, 难以设计高水平的模糊控制器。此外, 不依赖于液压机械臂模型的 PID 控制、神经网络控制和模糊控制未考虑惯性力、摩擦力和重力等对轨迹跟踪控制的影响, 因此制约了跟踪精度的提升。滑模控制和自适应控制考虑液压机械臂动力学模型, 但前者易发生滑模面抖动, 难以保证系统的稳定性; 后者存在参数调整困难和难以快速收敛参数估计算法等问题。考虑上述控制算法的局限性, 以及液压机械臂特有的高度非线性特性, 需要研究一种简单、参数易于调整且稳定性好的基于模型的控制算法。

基于模型的控制(Model based control, MBC)通过动态补偿惯性力、摩擦力和重力等动力学特性, 以提高机械臂的轨迹跟踪性能。YANG 等^[12]采用 MBC 算法在六自由度并联液压操纵器进行了理论分析和试验验证, 结果表明该控制算法能够提高该执行器的旋转平稳性和精度, 消除了其稳态误差; DAVLIAKOS 等^[13]将 MBC 应用于六自由度电液 Stewart-Gough 平台上, 典型轨迹获得了良好的跟踪性能; BOAVENTURA 等^[14]将 MBC 作为液压四足机器人(HyQ)单腿阻抗控制

的内环位置控制器, 并通过正弦角度信号验证了其控制性能; MELLER 等^[15]将 MBC 应用在以液压人工肌肉(HAMs)为驱动的负载型机械臂的控制, 并通过试验验证了位置跟踪性能; CHIN 等^[16]将 MBC 用于三自由度并联液压操纵器的轨迹跟踪控制, 并采用不同轨迹对跟踪误差进行评估, 试验结果表明了控制算法的有效性。但是, 以上 MBC 的应用研究均没有考虑到机器人运动过程中模型动力学参数不准确对轨迹跟踪精度的影响。

为解决模型中的参数不确定性问题, 需要对机械臂动力学参数进行辨识。目前主要的辨识方法包括分布辨识法^[17]、闭环输出误差法^[18]、多目标遗传法^[19]、最小二乘法^[20]等。分布辨识法要利用已辨识的参数值作为辨识剩余参数的先验值, 故会产生累积误差; 闭环输出误差辨识对初始化非常敏感, 且需要计算灵敏度函数, 因此耗时较长; 多目标遗传法需要依赖先验经验对参数设定。文献[20]中采用最小二乘法, 辨识了二自由度液压机械臂 MBC 控制器的惯性和摩擦参数, 但是该研究未详细阐述激励轨迹的设计, 对于液压机械臂来说, 众多管路、阀块等部件, 以及不同位置下液压缸伸出行程的差异, 均会影响大范围内运动时动力学参数辨识的准确性, 因此需要优化设计其激励轨迹, 以充分激发其动力学特性, 提高辨识精度; 同时该控制器通过动力学模型计算执行器所需流量, 继而根据阀口流量模型获取阀所需控制信号, 因此流量模型存在的误差也会降低控制精度。

本文以多自由度重载液压机械臂为研究对象, 旨在实现高精度轨迹跟踪控制。为提高液压机械臂的轨迹跟踪性能, 提出了一种动力学参数辨识的 MBC 控制算法。该控制算法由外环液压缸位置控制器、内环力控制器和前馈流量补偿组成。对于动力学参数不准确问题, 采用了最小二乘法在优化的激励轨迹下辨识出了真实的动力学参数, 实现在自由空间运动的高精度轨迹和力矩跟踪。

1 液压机械臂动力学建模

液压机械臂主要由执行机构(机械臂)和驱动系统(液压执行器、控制阀与动力源等)两部分组成,如图1所示。因此对于液压机械臂运动控制研究问题,需要将机械臂动力学和液压执行器动力学分别进行研究。

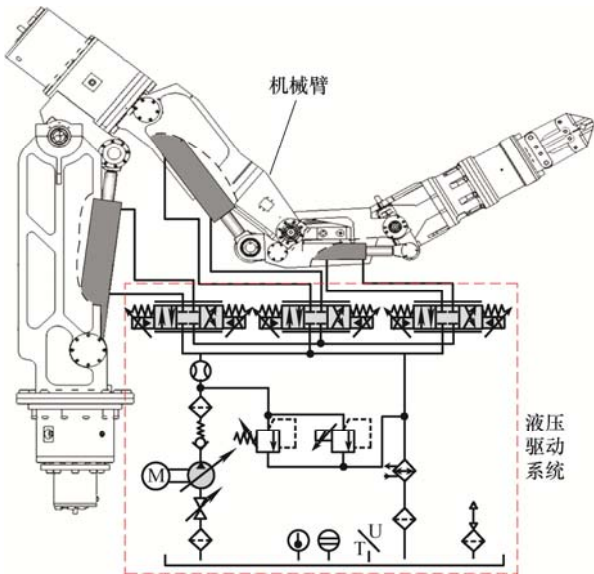


图1 多自由度液压重载机械臂

1.1 机械臂动力学建模

采用拉格朗日能量法(Lagrange)建立动力学模型, n 自由度机械臂动力学表达式为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (1)$$

式中, L 为拉格朗日函数; $q \in \mathbf{R}^n$ 为关节角度; $\dot{q} \in \mathbf{R}^n$ 为关节角速度; $\tau \in \mathbf{R}^n$ 为关节驱动力矩。

对于液压机械臂, 忽略外部干扰, 通过式(1)可得系统的动力学模型为

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + f(\dot{q}, q) \quad (2)$$

式中, $M \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为对称惯性矩阵; $C \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为离心力和科氏力矩阵; $G \in \mathbf{R}^n$ 为重力向量; $f \in \mathbf{R}^n$ 为摩擦力向量。

$$f(\dot{q}, q) = bR_i(q)\dot{q} \quad (3)$$

式中, $b \in \mathbf{R}^n$ 为黏性摩擦因数向量, $R_i \in \mathbf{R}^n$ 为力臂向量。

1.2 液压系统动力学建模

机械臂依靠各关节液压执行器运动来实现预定轨迹动作, 而液压执行器运动则由伺服阀进行控制。如图2所示, 伺服阀阀口开度决定液压缸两腔流量,

流入和流出液压缸流量 Q_1 和 Q_2 可通过以下非线性方程表达。

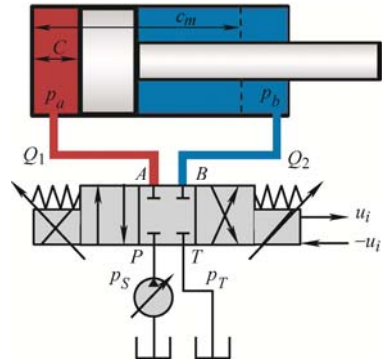


图2 液压执行器的简化控制模型

$$\begin{cases} Q_1 = C_{PA} \sqrt{p_s - p_a} S(u) u + C_{AT} \sqrt{p_a - p_T} S(-u) u \\ Q_2 = C_{PB} \sqrt{p_s - p_b} S(-u) u + C_{BT} \sqrt{p_b - p_T} S(u) u \end{cases} \quad (4)$$

式中, u 为阀的控制信号, C_{PA} 、 C_{PB} 、 C_{AT} 和 C_{BT} 为阀口通道流量系数, p_a 和 p_b 为无杆腔和有杆腔压力, p_s 和 p_T 为系统压力和油箱压力, 符号函数 $S(u)$ 被定义为

$$S(u) \triangleq \begin{cases} 1 & u > 0 \\ 0 & u \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

忽略内/外泄漏特性, 液压缸流量连续性方程为

$$\begin{cases} \dot{p}_a = \frac{E}{A_a c} (Q_1 - A_a \dot{c}) \\ \dot{p}_b = \frac{E}{A_b (c_m - c)} (A_b \dot{c} - Q_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中, E 为有效体积模量, c_m 为活塞杆行程, c 为活塞杆的位移, A_a 和 A_b 是液压缸无杆腔和有杆腔的作用面积, 液压缸输出力可由两腔压力得出

$$F = p_a A_a - p_b A_b \quad (7)$$

将液压缸输出力对时间求导

$$\dot{F} = \dot{p}_a A_a - \dot{p}_b A_b = E \left(\frac{Q_1 - A_a \dot{c}}{c} - \frac{A_b \dot{c} - Q_2}{c_m - c} \right) \quad (8)$$

阀口的控制流量可以表示为

$$\underbrace{-\frac{Q_1}{c} - \frac{Q_2}{c_m - c}}_{\bar{Q}} = \underbrace{\left(-\frac{A_a}{c} - \frac{A_b}{c_m - c} \right) \dot{c}}_{\bar{Q}} - \frac{E^{-1} \dot{F}}{\bar{Q}} \quad (9)$$

式中, Q 为阀控流量, \bar{Q} 为活塞运动所需要的流量, $\frac{E^{-1} \dot{F}}{\bar{Q}}$ 为油液压缩所需要的流量。

阀控流量 Q 可以映射为唯一的控制信号

$$u_{ff} = -\frac{S(-Q)Q}{\frac{C_{PA}\sqrt{p_s - p_1}}{c} + \frac{C_{BT}\sqrt{p_2 - p_T}}{c_m - c}} - \frac{S(Q)Q}{\frac{C_{AT}\sqrt{p_1 - p_T}}{c} + \frac{C_{PB}\sqrt{p_s - p_2}}{c_m - c}} \quad (10)$$

2 基于模型的控制器设计

液压机机械臂运动控制采用如图 3 所示的 MBC 控制算法, 主要由 3 个独立部分组成: 外环的液压缸位置反馈控制器、内环的力控制器以及前馈流量补偿。力控制器是核心, 对控制精度的影响最大; 位置控制器消除液压执行器造成的力偏差; 前馈流量补偿为根据液压机机械臂运动而设计的特定前馈项——基于液压缸动力学模型计算

流量补偿量,两者均在力控制器基础上进一步提高控制响应与精度。力控制器输入为各个关节期望驱动力,关节期望驱动力包括前馈期望驱动力和位置控制器输出两部分。前馈期望驱动力首先由逆运动学求解出期望关节角度,继而通过逆动力学方程得到关节期望驱动力矩,再利用机械臂关节几何关系可求出各个关节前馈期望驱动力。位置控制器输出为液压缸的力偏差补偿。整个系统的输出则由力控制器与前馈流量补偿输出信号叠加组成。

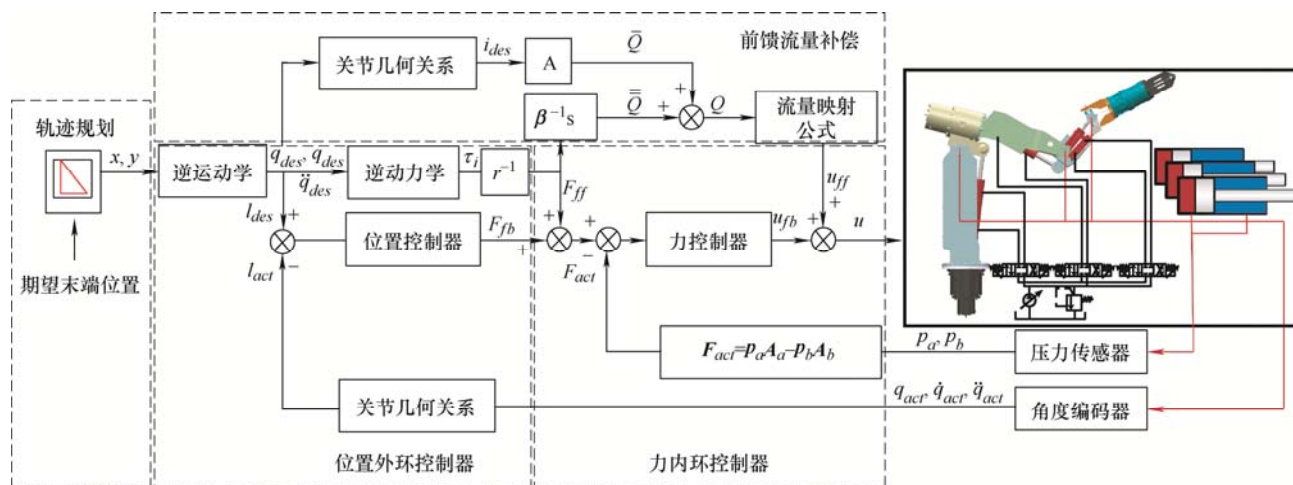


图3 MBC 控制系统框图

2.1 逆运动学/动力学建模

机械臂的运动学建模是机械臂轨迹跟踪控制的基础,逆运动学模型将规划的笛卡儿空间轨迹转换到关节空间的角度

$$(x, y) \rightarrow (q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (11)$$

为得到连续平滑的末端轨迹，首先利用五次多项式插值法^[21]对液压机械臂末端轨迹进行规划，保证指令位移、速度和加速度连续，避免机械臂发生冲击和震荡。然后，考虑多关节具备的冗余特性，将规划的末端轨迹利用梯度投影法进行逆运动学运算，从而得到期望得关节角度。

采用梯度投影法^[22]的逆运动学求解公式为

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + k(I - J^+ J) \nabla H(q) \quad (12)$$

式中, \mathbf{J} 为雅可比矩阵, \mathbf{J}^+ 为雅可比矩阵的广义逆, $\dot{\mathbf{x}}$ 为机械臂末端速度, k 为放大系数, $\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}$ 为零

空间投影矩阵, $\nabla H(\mathbf{q})$ 为优化目标函数的梯度。

逆动力学模型主要用于前馈控制和反馈控制,通过机械臂各个时刻的状态(关节角度、角速度和角加速度)获取关节的驱动力矩,其计算方程如式(2)所示。

2.2 位置控制器

液压机机械臂控制精度受到末端载荷、非线性摩擦等因素的影响。因此,设计位置控制器对液压缸造成的力偏差进行补偿。利用液压缸的长度偏差进行外环的位置反馈控制,液压缸的长度变化可由机械臂的关节几何关系求出。图 4 为液压机机械臂关节几何关系示意图。液压缸和机械臂刚体形成闭链回路,通过余弦定理来表示关节角和液压缸长度之间的几何关系为

$$l_i = \sqrt{L_{i1}^2 + L_{i2}^2 - 2L_{i1}L_{i2} \cos(\beta_{i3})} \quad (13)$$

式中, l_i 为第 i 液压缸长度, L_{j1} 为机械臂关节 1 两

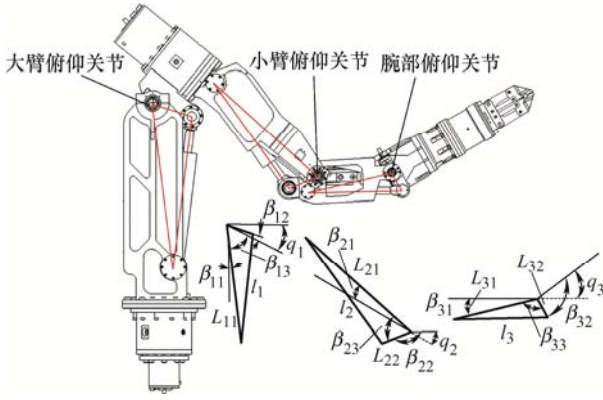


图 4 液压机械臂关节几何关系示意图

旋转中心之间的距离, L_{12} 是机械臂关节 1 旋转中心和液压缸铰点之间距离。 β_{11} 为基座两个铰点连线和竖直方向夹角, β_{12} 表示关节 1 活塞铰点与旋转中心连线和关节 1 与关节 2 旋转中心连线的夹角, β_{13} 为基座两个铰点连线和关节 1、关节 2 旋转中心连线的夹角。液压缸 2 和液压缸 3 的长度与关节角的关系同理可得。

液压缸速度、加速度与关节运动之间的关系可分别表示为

$$v_i = \frac{\partial l_i(q_i)}{\partial q_i} \dot{q}_i = r_i(q) \dot{q}_i \quad (14)$$

$$a_i = \frac{\partial r_i(q_i)}{\partial q_i} \dot{q}_i^2 + r_i(q) \ddot{q}_i \quad (15)$$

式中, v_i 和 a_i 分别为关节 i 的速度和加速度。

液压缸力臂可以表示为

$$r_i(q) = \frac{L_{11}L_{12}\sin(\beta_{13})}{\sqrt{L_{11}^2 + L_{12}^2 - 2L_{11}L_{12}\cos(\beta_{13})}} \quad (16)$$

$$\beta_{13} = \frac{\pi}{2} - \beta_{11} + \beta_{12} + q_1 \quad (17)$$

$$\beta_{23} = \pi + \beta_{21} - \beta_{22} + q_2 \quad (18)$$

$$\beta_{33} = \pi - \beta_{31} - \beta_{32} + q_3 \quad (19)$$

式中, $r_i(q)$ 为液压缸力臂, q_i 与 β_{ij} 如图 4 中所示位置反馈控制方程为

$$F_{fb} = K_p(l_{des} - l_{act}) + K_d(\dot{l}_{des} - \dot{l}_{act}) \quad (20)$$

式中, K_p 和 K_d 为正对角矩阵, 分别包含液压缸的比例和微分控制增益, l_{des} 和 l_{act} 分别为液压缸的期望长度与实际长度。

2.3 力控制器

力控制器作为整个控制器的核心部分, 对整个

控制精度的影响最大。通过补偿影响机械臂控制精度的最大干扰力(重力、惯性力等)以有效减小机械臂末端的位置误差。力控制器根据期望的运动主动生成所需的驱动力, 用以补偿液压机械臂动力学模型中的惯性力、摩擦力和重力等动态力。液压机械臂压力传感器测得液压缸两端的压力 p_a 和 p_b , 通过计算可得液压缸的实际输出力 F_{act} , 并与由逆动力学方程所求出的期望驱动力组成内环的力控制器。力控制器方程在频域内表达形式如式(21)所示

$$u_{fb}(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \right) e_F(s) \quad (21)$$

式中, k_p 、 k_i 和 k_d 分别为比例、积分和微分增益, 且大于零。

力误差 e_F 定义为

$$e_F = F_{des} - F_{act} \quad (22)$$

F_{des} 表示为

$$F_{des} = F_{ff} + F_{fb} \quad (23)$$

式中, F_{ff} 为动力学方程所求出的期望驱动力, F_{ff} 表示为

$$F_{ff} = R_i^{-1}(q) \tau_i \quad (24)$$

式中, $R_i = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_n \end{bmatrix}$, r_i 为液压缸力臂, 可

由式(16)~(19)得到, τ_i 为关节驱动力矩由式(2)可得。

2.4 前馈流量补偿

前馈流量补偿控制, 根据液压机械臂所需的运动, 求出运动过程中所需要的流量, 并利用式(10)推导的流量与阀控制信号映射关系, 获得伺服阀的控制信号。该特定的前馈项考虑了阀口流量非线性、容腔压力响应等液压系统特性, 减少液压系统参数时变、非线性对控制精度的影响。

伺服阀的控制信号 u 为反馈部分 u_{fb} 和前馈流量补偿部分 u_{ff} 之和构成

$$u = u_{fb} + u_{ff} \quad (25)$$

由以上分析可知, 外环位置控制器由逆运动学方程与机械臂关节几何关系得到, 通过液压缸位置反馈对内环的力偏差进行补偿, 而内环由逆动力学方程解算和压力反馈组成的力控制器用以补偿液压机械臂的动态力(惯性力、重力等), 并结合前馈流量补偿起到提高轨迹跟踪精度和力矩跟踪精度的作用。

3 动力学参数辨识

MBC 控制系统中的力控制器需要根据动力学模型计算关节期望力矩, 因此动力学参数的准确性直接影响控制精度。尽管根据机械臂三维模型可以估算动力学参数, 但是液压机械臂不同姿态下液压缸与刚性臂构成的闭链结构支点位置不同, 且存在安装于臂上的阀块、管路等零部件, 因此连杆质量、质心、转动惯量和摩擦力等信息估计不准。为了获得机械臂参数的准确值, 故需要对估计的参数进行辨识处理。首先将建立的机械臂动力学方程进行线性化组合, 分离出需要辨识项, 然后机械臂运行设定的激励轨迹, 获得尽可能准确的机械臂动力学参数, 最后利用最小二乘法进行参数估计。具体的机械臂动力学参数辨识流程如图 5 所示。

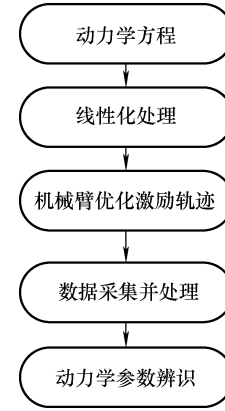


图 5 机械臂动力学参数辨识流程图

3.1 动力学方程的线性化处理

为了将不准确的参数从动力学方程中分离出来, 将动力学方程划分为可以进行辨识的线性组合, 动力学方程可由式(2)中的机械臂动力学模型获取。以三自由度机械臂为例, 其重组参数以及相应的回归矩阵采用以下线性输入参数形式

$$\tau = \begin{pmatrix} g \cos(q_1) & 0 & 0 \\ -g \sin(q_1) & 0 & 0 \\ \ddot{q}_1 & 0 & 0 \\ \dot{q}_1 r_1^2 & 0 & 0 \\ Y(1,5) & Y(2,5) & 0 \\ Y(1,6) & Y(2,6) & 0 \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 r_2^2 & 0 \\ Y(1,9) & Y(2,9) & Y(3,9) \\ Y(1,10) & Y(2,10) & Y(3,10) \\ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 r_3^2 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} m_1 c_{x1} + m_2 d_2 + m_3 d_3 \\ m_1 c_{y1} \\ m_1 l_1^2 + m_2 d_1^2 + m_3 d_1^2 + I_1 \\ b_1 \\ m_2 c_{x2} + m_3 d_2 \\ m_2 c_{y2} \\ m_2 l_2^2 + m_3 d_2^2 + I_2 \\ b_2 \\ m_3 c_{x3} \\ m_3 c_{y3} \\ m_3 l_3^2 + I_3 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (26)$$

$Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ π_1

式中, c_{xi} 和 c_{yi} 分别为连杆质心沿 X 轴和 Y 轴的长度, I_1 、 I_2 和 I_3 为绕 Z 轴的惯性矩, 此外 $g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$ 为重力加速度, 而 d_i 为两关节铰链之间的长度。

机械臂回归矩阵 Y 中的表达式定义如下

$$\begin{aligned} Y(2,5) &= d_1 \ddot{q}_1 \cos(q_2) + d_1 \dot{q}_1^2 \sin(q_2) + g \cos(q_1 + q_2) \\ Y(2,6) &= -d_1 \ddot{q}_1 \sin(q_2) + d_1 \dot{q}_1^2 \cos(q_2) - g \sin(q_1 + q_2) \\ Y(1,5) &= Y(2,5) + d_1 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_2) - d_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \times \sin(q_2) \\ Y(1,6) &= Y(2,6) - d_1 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_2) - d_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \times \cos(q_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y(3,9) &= d_1 \ddot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) + d_1 \dot{q}_1^2 \sin(q_2 + q_2) + \\ & d_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_3) + d_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin(q_3) + \\ & g \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ Y(3,10) &= -d_1 \ddot{q}_1 \sin(q_2 + q_3) + d_1 \dot{q}_1^2 \cos(q_2 + q_2) - \\ & d_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_3) + d_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos(q_3) - \\ & g \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ Y(2,9) &= Y(3,9) + d_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \cos(q_3) - \\ & d_2 \dot{q}_3 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + 2\dot{q}_1 + 2\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \sin(q_3) \\ Y(2,10) &= Y(3,10) - d_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \sin(q_3) - \\ & d_2 \dot{q}_3 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + 2\dot{q}_1 + 2\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \cos(q_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y(1,9) &= Y(2,9) + d_1(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3)\cos(q_2 + q_3) - \\
& d_1(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_3 + 2\dot{q}_2\dot{q}_3 + \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2)\sin(q_2 + q_3) \\
Y(1,10) &= Y(2,10) - d_1(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3)\sin(q_2 + q_3) - \\
& d_1(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_3 + 2\dot{q}_2\dot{q}_3 + \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2)\cos(q_2 + q_3)
\end{aligned}$$

3.2 激励轨迹的优化与运行

为避免建模不准确和测量噪声引起的参数辨识误差, 获得更加准确的动力学参数, 对激励轨迹进行优化至关重要。有限傅里叶级数^[23]作为激励轨迹的求解模型多用于参数辨识中, 可以限制关节角度和角速度, 同时具有的周期性可以使机械臂连续多次重复地执行激励轨迹, 从而充分激发机械臂动力学特性, 提升辨识精度。有限傅里叶级数表示为

$$\begin{aligned}
q_i(t) &= \sum_{l=1}^N \frac{a_{l,i}}{w_f l} \sin(w_f l t) - \frac{b_{l,i}}{w_f l} \cos(w_f l t) + q_{i0} \\
\dot{q}_i(t) &= \sum_{l=1}^N a_{l,i} \cos(w_f l t) + b_{l,i} \sin(w_f l t) \\
\ddot{q}_i(t) &= w_f l \sum_{l=1}^N [b_{l,i} \cos(w_f l t) - a_{l,i} \sin(w_f l t)] \quad (27)
\end{aligned}$$

式中, N 表示正弦和余弦项的数目, $w = 2\pi f$ 为基频, $f = 0.05$ Hz, 正弦和余弦项之前的系数 $a_{l,i}$ 、 $b_{l,i}$ 和常数项 q_{i0} 由条件数准则优化确定。

为了优化液压机械臂关节空间内的运动, 需保证在试验开始和结束阶段, 无速度和加速度突变; 同时需要限定最大关节角位移, 避免超限。基于这些准则, 激励轨迹优化的约束条件如式(28)所示

$$\begin{cases} \text{cond}_{\min}(Y) \\ q(0) = q_0, q(t_f) = q_0 \\ \dot{q}(0) = 0, \dot{q}(t_f) = 0 \\ \ddot{q}(0) = 0, \ddot{q}(t_f) = 0 \\ q_{\min} \leq q(t) \leq q_{\max} \\ \dot{q}_{\min} \leq \dot{q}(t) \leq \dot{q}_{\max} \\ \ddot{q}_{\min} \leq \ddot{q}(t) \leq \ddot{q}_{\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中, $\text{cond}_{\min}(Y)$ 为回归矩阵条件数的最小值, $q(0)$ 为机械臂初始关节角度, $q(t_f)$ 表示结束时关节角度, q_{\min} 、 q_{\max} 、 \dot{q}_{\min} 、 \dot{q}_{\max} 、 \ddot{q}_{\min} 、 \ddot{q}_{\max} 为安全运动范围内的所允许的最小和最大角度、角速度、角加速度。该式可以看出, 当一个周期结束时, 机械臂回到初始位姿, 从而可以连续执行下一周期; 初始和结束的速度和加速度设为 0, 有效避免冲击; 限定角度、角速度、角加速度上下限, 保证机械臂在安全范围内运动。

激励轨迹各关节角度和激励轨迹的运动过程如图 6、图 7 所示。

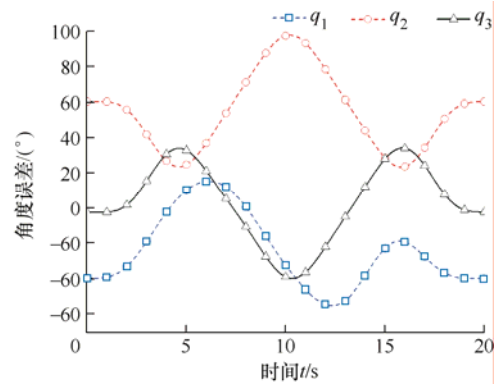


图6 激励轨迹各关节角度曲线

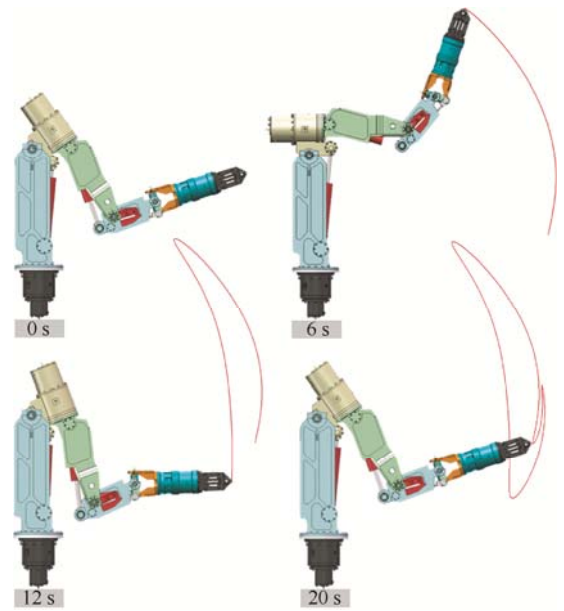


图7 激励轨迹的运动过程

3.3 数据的采集处理与参数辨识

在激励轨迹运行中需要实时采集液压缸两腔压力信号与关节角度信号, 通过对采集的角度信号进行微分获得角速度与角加速度信号。为消除信号微分时所产生的大量噪声, 提高数据采集的准确性, 需要对采集的数据信号进行滤波处理。离散数字 IIR 滤波器具有成本低、延迟小等优点被广泛使用。IIR 滤波器的差分方程为

$$y(n) = \sum_{l=0}^M b_l x(n-l) + \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) \quad (29)$$

式中, a_k 和 b_r 为滤波系数。

最后, 利用最小二乘法对运行激励轨迹所采集的经过滤波处理的信号进行参数估计

$$\pi_1 = (Y^T Y)^{-1} Y^T \tau \quad (30)$$

式中， π_1 为需要辨识的参数集合， Y 为回归矩阵。

4 试验验证

本文在自主研制的重载液压机械臂试验台^[24]上验证提出的控制算法，试验平台如图 8 所示。该试验平台主要由机械臂、液压系统、计算机控制系统和测量传感系统组成。机械臂具有 7 个自由度(不含末端夹持)，最大作业半径 1.87 m，最大载重 500 kg，本文采用如图 8 所示大臂、小臂俯仰和腕

部俯仰三个关节进行试验测试。为降低响应速度对控制性能的影响，采用恒压伺服系统，高频响应电液伺服阀(频响高于 150 Hz)进行测试，经由阀块直接安装于关节处。计算机控制系统为基于 Matlab/Simulink Realtime 的实时控制系统，采用宿主机 Host PC 和目标机 Target PC 的主从双机工作模式，同时包括 EtherCAT 高速总线和 NI 高采样频率数据采集卡。数据采集卡来获取液压缸两端的压力传感器信号和各关节角度编码器信号，计算控制信号输出至伺服阀，从而实现机械臂的运动控制。

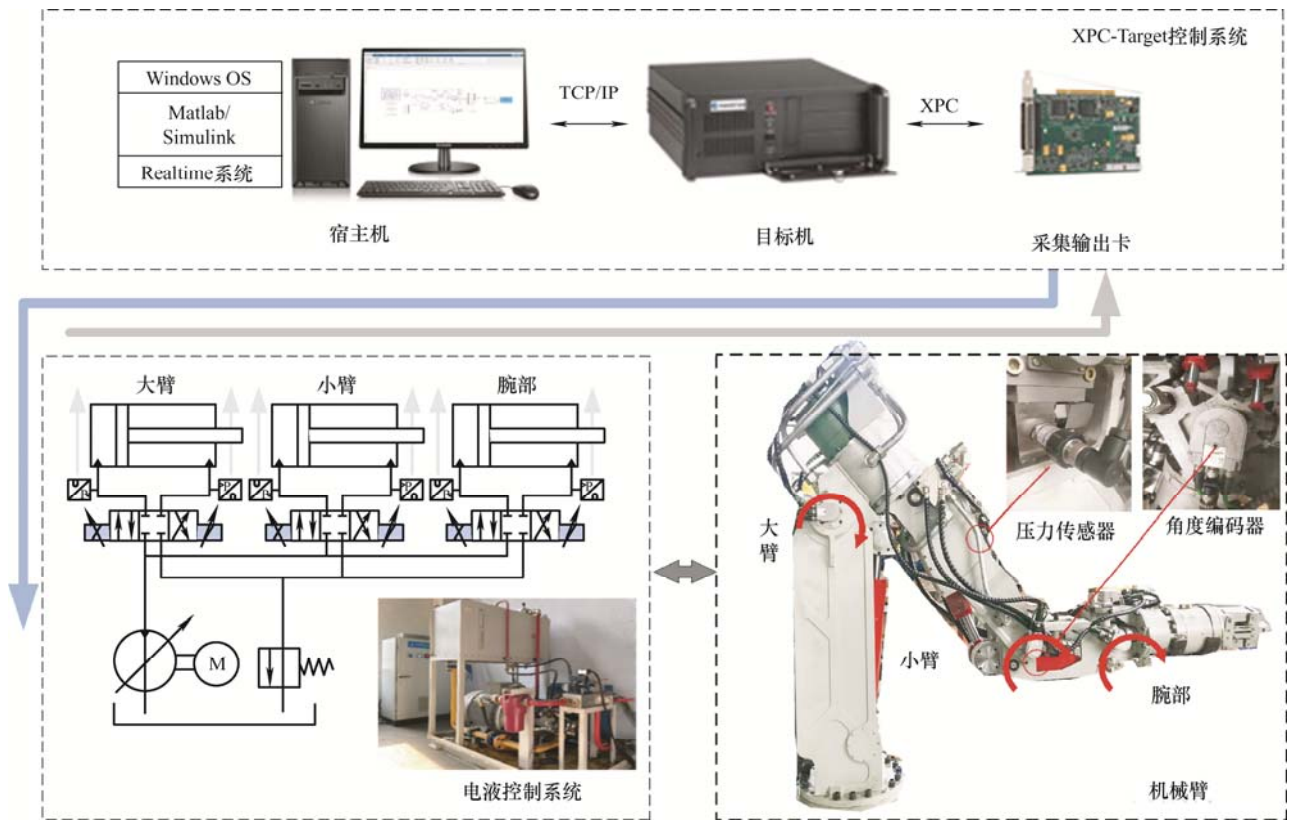


图 8 液压机械臂试验平台

本研究以末端三角形轨迹为例，将提出的基于参数辨识的 MBC 控制分别与基于 3D 模型参数的 MBC 控制和传统 PID 控制两种方法进行试验对比。机械臂具体结构参数如表 1 所示。

表 1 机械臂结构参数

关节 i	大臂俯仰	小臂俯仰	腕部俯仰
臂长/m	0.875	0.36	0.741
质量/kg	286	57	106
角度范围/rad	$-4\pi/9 \sim 2\pi/9$	$0 \sim 2\pi/3$	$-\pi/4 \sim \pi/4$

表 2 机械臂动力学参数辨识值

组合动力学参数	最小二乘辨识值
$m_1c_{x1} + m_2d_1 + m_3d_1 /(\text{kg} \cdot \text{m})$	178.681 0
$m_1c_{y1} /(\text{kg} \cdot \text{m})$	58.344 5
$m_1I_1^2 + m_2d_1^2 + m_3d_1^2 + I_1 /(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	155.069 6
b_1 /N	5 070.634 2
$m_2c_{x2} + m_3d_2 /(\text{kg} \cdot \text{m})$	39.069 4
$m_2c_{y2} /(\text{kg} \cdot \text{m})$	-3.586 7
$m_2I_2^2 + m_3d_2^2 + I_2 /(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2.969 7
b_2 /N	4 803.329 2
$m_3c_{x3} /(\text{kg} \cdot \text{m})$	27.804 6
$m_3c_{y3} /(\text{kg} \cdot \text{m})$	-0.446 6
$m_3I_3^2 + I_3 /(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	5.7176
b_3 /N	8 652.879 9

4.1 试验对比分析

在进行轨迹跟踪控制试验之前, 首先验证动力学参数辨识的准确性(表 2)。如直接根据式(2)进行验证, 需额外增加各关节力矩传感器。另一种方式则是在末端安装力传感器, 通过基于动力学模型计算的末端力与实测值进行比较, 从而验证辨识结果的准确性。当末端施加负载力时, 式(2)可以改写为

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + f(\dot{q}, q) + J^T F \quad (31)$$

式中, J^T 为雅可比矩阵; F 为末端负载力。

利用雅可比矩阵 J^T 将末端力分解到各关节上, 按照下式通过变换求解液压机械臂末端力

$$F = (J^T)^{-1} \cdot [\tau - M(q)\ddot{q} - C(\dot{q}, q)\dot{q} - G(q) - f(\dot{q}, q)] \quad (32)$$

试验过程中, 在机械臂末端添加质量块或压缩弹簧两种方式分别实现末端恒力与变力加载。试验结果如图 9、图 10 所示。辨识参数的力估计值相较于 3D 模型参数的力估计值要更准确。为计算力估计精度, 采用平均绝对百分比误差 (Mean absolute percentage error, MAPE) 来表示, MAPE 公式为

$$M = \frac{1}{s} \sum_{t=1}^s \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (33)$$

式中, A_t 为实测值, F_t 为估计值, s 为样本数, M 越小表示精度越高。在恒力 1 045 N 的工况下, 辨识参数的力估计值的 MAPE 为 0.43%, 在变力负载 0~1 220 N 下的 MAPE 值为 2.47%。因此, 动力学参数辨识精度较高。

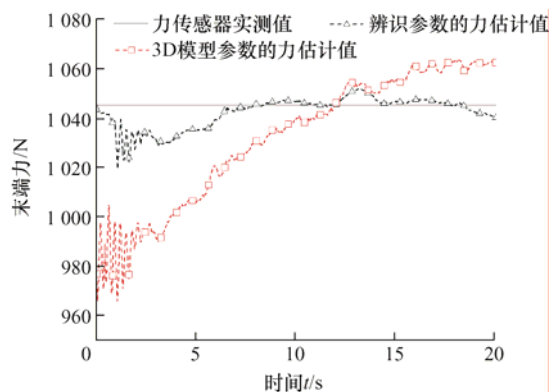


图 9 1 045 N 末端恒力负载测量结果对比

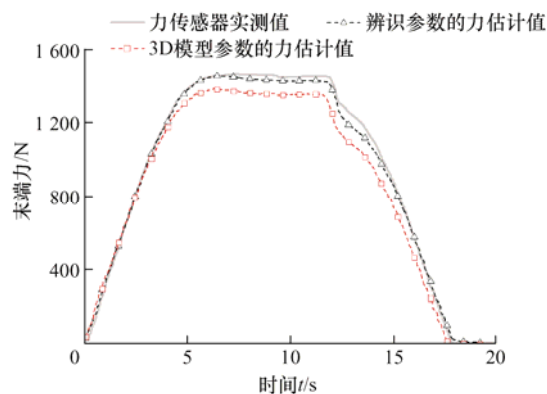


图 10 0~1 220 N 末端变力负载测量结果对比

然后, 进行末端轨迹跟踪控制试验。预设的末端三角形轨迹起点坐标为(1 800 mm, 1 400 mm), 轨迹运行完成时间为 15 s。图 11 为不同控制算法在机械臂末端跟踪对比, 图 12~图 14 分别为三个关节角度误差, 图 15 为在笛卡儿空间中的末端位置跟踪误差。相比于 PID 控制器, MBC 控制精度有很大的提升; 相较于基于 3D 模型参数的 MBC 控制, 提出的基于参数辨识的 MBC 控制关节角度误差在 0.2° 以内, 控制精度改进效果显著。图 16~图 18 分别为三个关节力矩误差对比, 可以看出大臂俯仰关节在基于 3D 模型参数的 MBC 控制中力矩误差在

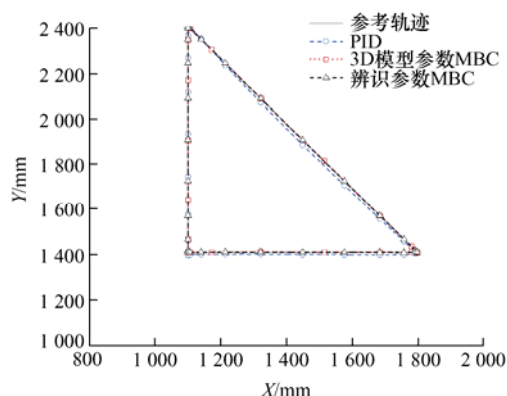


图 11 三角形轨迹末端跟踪对比

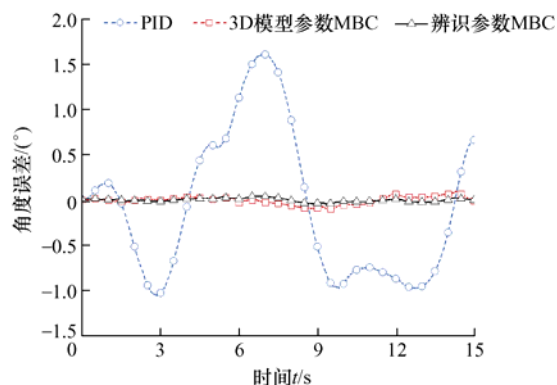


图 12 三角形轨迹大臂俯仰关节角度误差对比

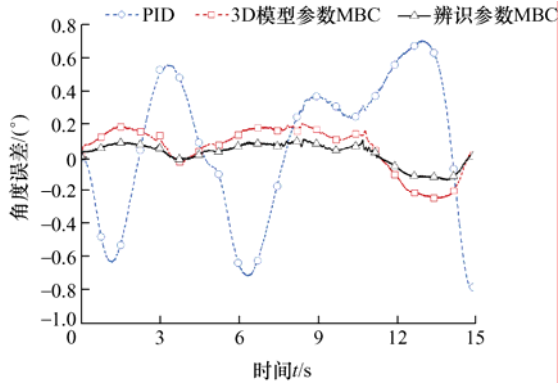


图 13 三角形轨迹小臂俯仰关节角度误差对比

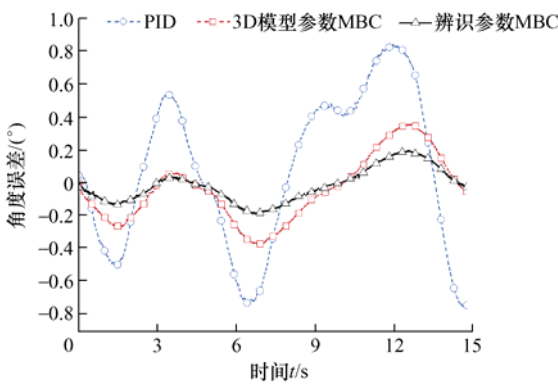


图 14 三角形轨迹腕部俯仰关节角度误差对比

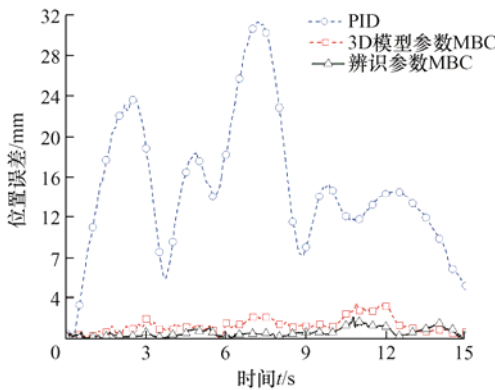


图 15 三角形轨迹笛卡尔空间位置误差对比

600 N·m 以内，而在基于参数辨识的 MBC 控制中误差小于 100 N·m。对力矩控制改进效果同样体现在小臂俯仰和腕部俯仰关节。

通过不同控制方法的试验对比曲线图可以看出，辨识动力学参数的 MBC 算法相比于 PID 控制与 3D 模型参数的 MBC 控制在显著提升轨迹跟踪控制精度的同时也改善了力矩跟踪效果。

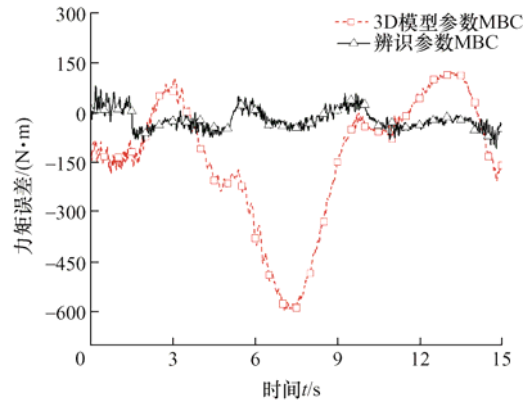


图 16 三角形轨迹大臂俯仰关节力矩误差对比

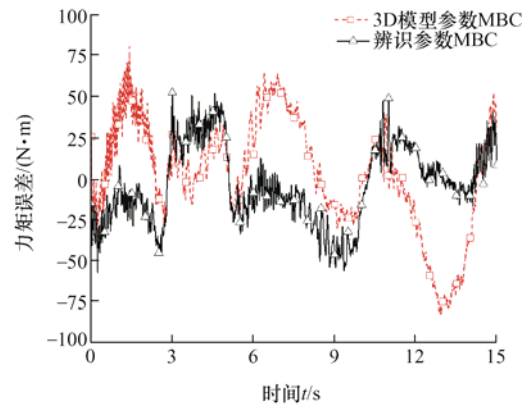


图 17 三角形轨迹小臂俯仰关节力矩误差对比

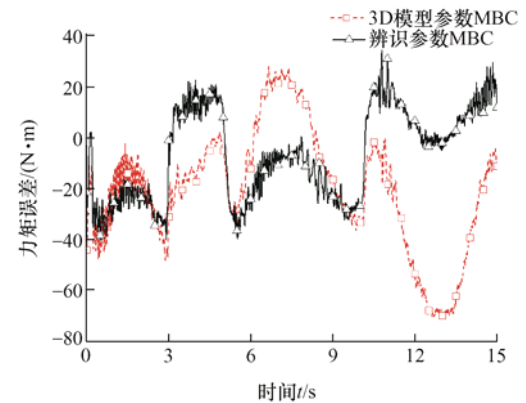


图 18 三角形轨迹腕部俯仰关节力矩误差对比

4.2 控制性能指标评估

由于不同机械臂尺寸和应用场合下运动速度也不同，仅通过最大位置跟踪误差评估控制精度并不合理。为对比不同控制方法的性能，使用文献[25]中定义的针对 n 自由度液压机械臂控制性能的性能指标 ρ 进行评估。该指标^[25]被定义为

$$\rho = \frac{\max(|e|)}{\max(|v|)} \quad (34)$$

式中， $|e|$ 是笛卡尔位置跟踪误差的绝对值， $|v|$ 是笛

卡儿速度的绝对值。 ρ 以 s 为单位, 它的值越小, 说明控制的精度越好。 ρ 量化了机器人跟踪控制性能, 相比于位置跟踪误差, 该指标的优势在于考虑了机械臂速度对跟踪性能的影响, 即任务空间中的速度越大会导致较大的位置跟踪误差, 因此, 最大位置误差与最大速度的比值可以准确地反映控制性能。上述试验过程中三种控制方法的笛卡儿最大位置误差及其位置跟踪性能指标如表 3 所示。

表 3 三种控制方式笛卡儿空间最大位置误差及位置跟踪性能指标对比

控制方式	PID	3D 参数 MBC	辨识参数 MBC
最大位置误差/mm	31.42	3.588	2.2
性能指标	0.068 6	0.007 9	0.004 8

本文提出的基于参数辨识的 MBC 控制方法所得到的最大笛卡儿速度为 0.458 3 m/s, 笛卡儿最大位置误差为 2.2 mm, 由式(34)可以计算出机械臂位置跟踪性能指标 $\rho = 0.004 8$ s, 相比于 PID 和 3D 模型参数 MBC 控制性能分别提升了 93%和 39.24%。

5 结论

(1) 对液压机械臂的机械臂和液压执行器分别进行动力学建模。机械臂动力学模型用于力控制器的设计以及线性化处理后的动力学参数辨识; 液压执行器动力学模型用以建立起伺服阀控制信号与进出液压缸流量之间的映射关系, 从而设计前馈流量补偿控制器。

(2) 建立了基于模型的液压机械臂轨迹跟踪控制系统。该控制系统包含三个部分: 力控制器, 用于实现机械臂动态力补偿, 是保证控制精度的核心; 位置控制器, 用于补偿由机械臂关节摩擦不确定以及末端负载变化等因素造成的力偏差, 以提高控制精度; 前馈流量补偿器, 可减小流量非线性、容腔压力响应等液压特性对控制性能的影响。

(3) 基于 3D 模型的动力学参数估算方法在液压机械臂中尤为不准。为此, 基于优化设计的激励轨迹, 采用最小二乘法进行动力学参数辨识, 且辨识出的动力学参数可以适用于可达空间内运动姿态并保持较高的控制精度。试验结果表明, 基于参数辨识的 MBC 控制在自由空间运动的笛卡儿位置控制精度相比 PID 控制提升了 93%, 相比于基于 3D 模型参数的 MBC 控制提升了 39.24%。

参 考 文 献

- [1] ZHENG S, DING R, ZHANG J, et al. Global energy efficiency improvement of redundant hydraulic manipulator with dynamic programming[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 230: 113762.
- [2] LI I H, CHIANG H H, LEE L W. Development of a linear delta robot with three horizontal-axial pneumatic actuators for 3-dof trajectory tracking [J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3526.
- [3] REGINALD N, SEO J, CHA M. Integrative tracking control strategy for robotic excavation [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(10): 3435-3450.
- [4] HOANG Q D, ROSAS-CERVANTES V A, LEE S G, et al. Robust finite-time convergence control mechanism for high-precision tracking in a hybrid fluid power actuator [J]. IEEE Access, 2020, 8: 196775-196789.
- [5] KADU C, KOTHULE P, VIKHE P, et al. Design, analysis and motion control of hydraulic excavator using discrete sliding mode control with inertial delay[C]//2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). IEEE, 2021: 255-260.
- [6] HELIAN B, CHEN Z, YAO B. Energy-saving and accurate motion control of a hydraulic actuator with uncertain negative loads[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 253-264.
- [7] SUN X, YAO J, DENG W. Active disturbance rejection adaptive control of multi-degrees of freedom hydraulic manipulators[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2022, 36(11): 2880-2902.
- [8] CUI Y, LIU S, ZHOU D, et al. Position tracking and dynamic control of an innovative anchor beam supporting robot[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2020, 51(2): 721-739.
- [9] KIM S W, CHO B, SHIN S, et al. Force control of a hydraulic actuator with a neural network inverse model [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 2814-2821.
- [10] DO T C, TRAN D T, DINH T Q, et al. Tracking control for an electro-hydraulic rotary actuator using fractional order fuzzy PID controller[J]. Electronics, 2020, 9(6): 926.
- [11] CONG S, LIANG C. Research on trajectory tracking control of 7-DOF picking manipulator[J]. Science Progress, 2021, 104(1): 00368504211003383.

- [12] YANG C, HUANG Q, JIANG H, et al. PD control with gravity compensation for hydraulic 6-DOF parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(4): 666-677.
- [13] DAVLIAKOS I, PAPADOPOULOS E. Model-based control of a 6-dof electrohydraulic Stewart-Gough platform [J]. Mechanism & Machine Theory, 2008, 43(11): 1385-1400.
- [14] BOAVENTURA T, BUCHLI J, SEMINI C, et al. Model-based hydraulic impedance control for dynamic robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(6): 1324-1336.
- [15] RYANT M, et al. Model-based feedforward and cascade control of hydraulic McKibben muscles[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 275: 88-98.
- [16] CHIN J H, SUN Y H, CHENG Y M. Force computation and continuous path tracking for hydraulic parallel manipulators[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(6): 697-709.
- [17] XIAO J, ZENG F, ZHANG Q, et al. Research on the forcefree control of cooperative robots based on dynamic parameters identification[J]. Industrial Robot, 2019, 6(4): 499-509.
- [18] LI P, GHASEMI A, XIE W, et al. Visual closed-loop dynamic model identification of parallel robots based on optical cmm sensor [J]. Electronics, 2019, 8(8): 836.
- [19] MONTAZERIA, WEST C, MONK S D, et al. Dynamic modelling and parameter estimation of a hydraulic robot manipulator using a multi-objective genetic algorithm[J]. International Journal of Control, 2017, 90(4): 661-683.
- [20] HULTTINEN L, KOIVUMKI J, MATTILA J. Parameter identification for model-based control of hydraulically actuated open-chain manipulators[C]//Fluid Power Systems Technology. American Society of Mechanical Engineers, 2019, 59339: V001T01A026.
- [21] 孙志毅, 张韵悦, 李虹, 等. 挖掘机的最优时间轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 166-174.
- SUN Zhiyi, ZHANG Yunyue, LI Hong, et al. Time optimal trajectory planning of excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 166-174.
- [22] 华霄桐, 王国磊, 张思敏, 等. 用于复杂管道内表面喷涂的冗余机器人轨迹避障规划[J]. 机器人, 2019, 41(5): 690-696.
- HUA Xiaotong, WANG Guolei, ZHANG Simin, et al. Trajectory planning of redundant robot for painting inner surface of complex duct considering obstacle avoidance[J]. Robot, 2019, 41(5): 690-696.
- [23] 李永泉, 王立捷, 刘天旭, 等. 一种并联机器人机电耦合多能域系统动力学参数辨识, 控制及试验[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 141-150.
- LI Yongquan, WANG Lijie, LIU Tianxu, et al. Dynamic parameter identification, control and experiment of an electromechanical coupling multi-energy domain system for a parallel robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 141-150.
- [24] CHENG M, HAN Z, DING R, et al. Development of a redundant anthropomorphic hydraulically actuated manipulator with a roll-pitch-yaw spherical wrist[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2021, 16(4): 698-710.
- [25] MATTILA J, KOIVUMAKI J, CALDWELL D G, et al. A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 669-680.

作者简介: 丁孺琦, 男, 1987 年出生, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机电液智能控制。

E-mail: dingruqi@ecjtu.edu.cn

王振, 男, 1995 年出生。主要研究方向为液压机械臂运动控制。

E-mail: wangzhen8717@163.com

程敏(通信作者), 男, 1987 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液控制系统、液压机器人。

E-mail: chengmin@cqu.edu.cn