

DOI: 10.7652/xjtuxb201704017

采用状态估计的泵控非对称液压缸模型预测控制

熊志林, 陶建峰, 张峰榕, 刘成良

(上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海)

摘要: 针对伺服电机驱动泵控非对称液压缸系统存在约束和鲁棒性差等问题,提出了采用状态估计的模型预测控制策略。根据泵控液压缸系统的原理和实际要求,建立了含输入和输出约束的状态空间模型;引入模型预测控制,避免了阀切换带来的非线性,提高了约束优化控制性能;结合卡尔曼滤波器,补偿了干扰和模型误差的影响,提高了系统的鲁棒性。仿真结果表明,所设计的控制策略能够实现无偏移跟踪,保证输入不超限、输出无超调,且具有很好的处理干扰和模型失配的能力。实验结果中,液压缸位置无超调,相对位置跟踪误差约为0.5%,干扰和模型误差对控制性能的影响很小。可见,所提方法能应用于实际泵控系统,提高输入、输出约束下的控制性能,容许一定的干扰和建模误差。

关键词: 泵控非对称液压缸;约束;鲁棒性;模型预测控制;卡尔曼滤波器

中图分类号: TH137;TP271 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0109-07

A Model Predictive Control Strategy of Pump-Controlled Asymmetric Cylinders Using State Estimation

XIONG Zhilin, TAO Jianfeng, ZHANG Fengrong, LIU Chengliang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A state estimation-based model predictive control strategy is proposed to deal with the constraints and the poor robustness problems existing in the system of servo motor driven pump-controlled asymmetric cylinders. A state-space model with input and output constraints is developed according to the principle of pump-controlled cylinder system and the practical requirements. The model predictive control is introduced to avoid the nonlinearity of valve switching and to improve the performance of constrained optimal control. The Kalman filter is combined to compensate the impacts of disturbance and modelling errors and to improve the robustness of the system. Simulation results of the strategy show that offset-free reference tracking is achieved, no over-limit of the input and no overshoot of the output are guaranteed, and model mismatch and disturbance are handled satisfactorily. Experimental results with the strategy show that the position has no overshoot with a relative tracking error of about 0.5 % and the effects of disturbance and modelling error are small. Hence, the proposed method is applicable to the real pump-controlled systems, improves the control performance under input and output constraints, and allows for certain disturbance and modelling error.

收稿日期: 2016-10-25。 作者简介: 熊志林(1993—),男,硕士生;陶建峰(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375297,51275288);国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035403);上海市优秀学术带头人计划资助项目(14XD1402000)。

网络出版时间: 2017-03-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170303.0925.002.html>

Keywords: pump-controlled asymmetric cylinder; constraint; robustness; model predictive control; Kalman filter

泵控系统具有结构简单、能效高、发热少的特点,广泛应用于飞机襟翼、注塑机和移动机械中。非对称液压缸中流量的不对称性、电液系统本身的非线性、参数的不确定性,使得泵控系统难以获得好的控制性能。若考虑系统中的输入、输出和状态约束,如液压缸位置要求无超调、输出电压范围有限等,也限制了控制性能的提高。同时,泵控液压系统控制精度低,且外部扰动易使系统鲁棒性变差^[4],因此寻找一种能够解决含约束的泵控非对称液压缸的控制技术,并提高系统的控制精度和鲁棒性尤为必要。

目前,许多不同的控制策略已被用于泵控非对称液压缸系统中。非线性控制理论和方法,例如奇异摄动理论^[2]、鲁棒控制^[3]、自适应控制^[4]、自适应鲁棒控制^[5]等,智能控制方法,例如自适应模糊控制^[6]、模糊滑模控制^[7]等,这些方法在解决泵控液压缸系统的非线性、时变参数和参数不确定性等方面具有一定的效果,但难以处理约束。对于输入约束,一般采用饱和限幅,强制限幅使系统性能恶化;对于输出约束,一般控制方法无法提前预测输出,且参数较难调整。模型预测控制是一种易于将约束考虑在内的优化控制技术,在处理复杂约束优化控制问题时表现出巨大的潜力^[8]。模型预测控制在电液系统的研究主要集中在阀控系统,例如机器人操作臂的控制^[9]、电液弯辊力伺服控制^[10]、冷带轧机电液伺服控制^[11]和注塑机注射速度控制^[12]等,但这些应用中并没有考虑约束。Piotr等采用基于差分方程的模型预测控制应用于电液执行器的力控制,考虑了输入和输出约束,通过实验验证了控制器良好的跟踪性能和约束处理能力^[13]。然而,模型预测控制在泵控液压缸系统中的应用几乎没有。Peng等提出基于神经动态优化的模型预测控制用于伺服电机泵控差动液压缸系统^[14],但未考虑干扰和模型失配的影响,且缺乏实验验证。

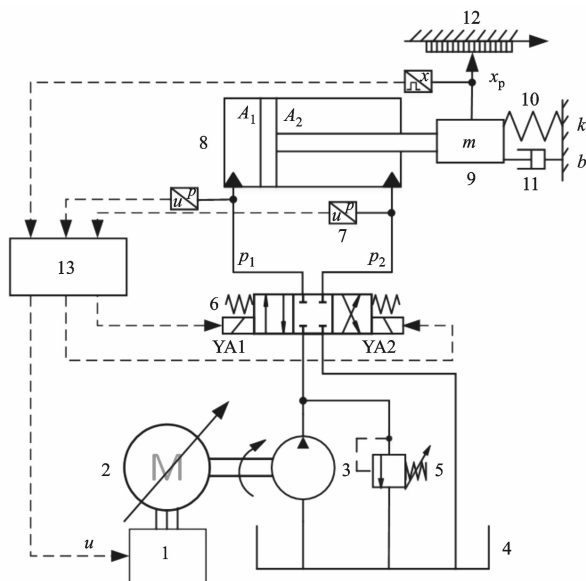
为了考虑系统中的约束并提高处理干扰和模型失配的能力,本文提出了一种采用状态估计的模型预测控制策略,建立了含输入和输出约束的状态空间模型,设计了模型预测控制器和状态观测器;采用仿真对比分析了两种状态估计方法在干扰和模型失配下的约束控制性能,并通过实验进行了验证。

1 系统原理及数学模型

1.1 系统描述

本文讨论的伺服电机驱动泵控非对称液压缸系

统原理如图1所示,系统为开式泵控系统。差动液压缸的运动通过调整定量泵的转速直接控制,其负载包括滑块、弹簧和阻尼。控制器中集成了数据采集、控制算法和控制逻辑等功能。光栅尺位移传感器将液压缸位置反馈到控制器用于闭环控制,压力传感器用于对液压缸两腔的压力进行监控。控制器一方面输出数字信号控制电磁换向阀的切换,另一方面通过控制算法输出控制电压给伺服器来调节伺服电机的转速,从而控制液压泵的输出流量。溢流阀用作安全阀,超出设定压力时油液溢流回油箱。系统工作过程如下:电磁铁YA1得电,通过控制算法对液压缸的伸出过程进行位置控制;电磁铁YA2得电,通过伺服器控制液压缸匀速缩回。



1:伺服器;2:伺服电机;3:定量泵;4:回油箱;5:溢流阀;
6:电磁换向阀;7:压力传感器;8:差动液压缸;9:滑块;
10:弹簧;11:阻尼;12:光栅尺位移传感器;13:控制器

图1 伺服电机驱动泵控液压缸系统原理图

1.2 系统假设

针对图1中的系统作如下假设:①油液体积弹性模量为常数;②由于伺服电机的响应时间短,不考虑其动态特性,即电机的转速与输入电压成正比;③电磁换向阀的压降很小,忽略不计;④不考虑回油背压的影响;⑤液压系统的外泄漏相对较小,可忽略不计;⑥控制器能够保证液压缸单向趋近设定目标。

1.3 数学建模

模型预测控制器只对液压缸伸出过程进行控

制,避免了液压缸的不对称产生的非线性使得建模困难,此处只需考虑液压缸伸出过程即可。

液压泵输出流量与伺服电机转速有关,而转速又与控制电压成正比。因此,液压泵的流量为

$$q = \eta K_n D_p u \quad (1)$$

式中: η 为液压泵的效率; K_n 为电机转速增益系数; D_p 为液压泵的排量; u 为控制电压。

系统流量连续性方程为

$$q = \frac{V_1}{E} \dot{p}_1 + A_1 \dot{x}_p + K_{ci} p_1 \quad (2)$$

式中: V_1 为液压缸无杆腔的体积; E 为油液体积弹性模量; p_1 为液压缸无杆腔的压力; A_1 为液压缸活塞的有效面积; K_{ci} 为内泄漏系数; x_p 为活塞杆的位移。

活塞杆上具有惯性负载、弹性负载和阻尼负载,力平衡方程为

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 = m \ddot{x}_p + b \dot{x}_p + k x_p \quad (3)$$

$$p_2 \approx 0 \quad (4)$$

式中: p_2 为液压缸有杆腔压力(此处忽略不计); A_2 为液压缸活塞杆端环形面积; m 为滑块的质量; k 为弹簧的刚度; b 为系统的阻尼系数。

取状态变量 $\mathbf{x}_m = [x_p \ x_p \ p_1]^T$, 液压缸位移 y 作为输出变量,则泵控液压缸系统的连续时间状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_{cm} \mathbf{x}_m + \mathbf{B}_{cm} u \\ y = \mathbf{C}_{cm} \mathbf{x}_m \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$\mathbf{A}_{cm} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} & \frac{A_1}{m} \\ 0 & -\frac{E}{v_1} A_1 & -\frac{E}{v_1} A_1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{cm} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{E}{v_1} \eta K_n D_p \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_{cm} = [1 \ 0 \ 0].$$

模型预测控制一般为离散时间形式,设采样周期为 T ,系统的离散时间状态空间表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_m(k+1) = \mathbf{A}_{dm} \mathbf{x}_m(k) + \mathbf{B}_{dm} u(k) \\ y(k) = \mathbf{C}_{dm} \mathbf{x}_m(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A}_{dm} = e^{\mathbf{A}_{cm} T}$; $\mathbf{B}_{dm} = \mathbf{B}_{cm} \int_0^T e^{\mathbf{A}_{cm} t} dt$; $\mathbf{C}_{dm} = \mathbf{C}_{cm}$ 。

2 模型预测控制器设计

采用状态估计的泵控非对称液压缸模型预测控

制系统结构如图2所示,模型预测控制器由预测模型、目标函数和约束组成。通过上一时刻液压缸的位置 $y(k-1)$ 和伺服电机的控制电压 $u(k-1)$ 估计当前时刻的状态 $\hat{\mathbf{x}}(k)$, 预测模型以 $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 为初始状态预测未来有限时域内的输出,目标函数用于刻画跟踪参考 $r(k)$ 等的性能指标。通过每个时刻(滚动时域)在线求解含约束的有限时域最优控制问题获得最优控制序列,并将第一项作为伺服电机的控制电压 $u(k)$ 。

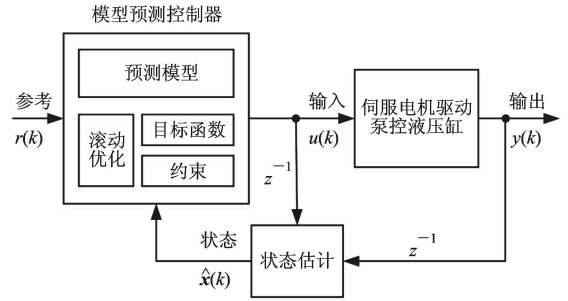


图2 泵控非对称液压缸的模型预测控制系统框图

2.1 预测模型

预测模型可采用式(6)中的离散时间状态空间模型,但为了消除预测模型与实际模型间误差的影响,这里通过状态增广引入积分为^[15]。将状态变量的差分 $\Delta \mathbf{x}_m(k)$ 和测量输出 $y(k)$ 作为新的增广状态,即 $\mathbf{x}(k) = [\Delta \mathbf{x}_m^T(k) \ y(k)]^T$, 则增广状态空间模型为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B} \Delta u(k) \\ y(k) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{dm} & \mathbf{O} \\ \mathbf{C}_{dm} \mathbf{A}_{dm} & \mathbf{E} \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{dm} \\ \mathbf{C}_{dm} \mathbf{B}_{dm} \end{bmatrix}$; $\mathbf{C} = [\mathbf{O} \ \mathbf{E}]$ 。

2.2 目标函数

泵控液压缸系统的目标是使液压缸以高精度跟踪参考信号,同时控制电压不能变化太快。目标函数用二次型函数表达如下

$$\min_{u(k+i|k), \mathbf{x}(k)} J = \sum_{i=1}^{N_p} \| r(k+i|k) - y(k+i|k) \|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \| \Delta u(k+i) \|_R^2 \quad (8)$$

式中: N_p 为预测时域; N_c 为控制时域; $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 为权矩阵; $\Delta u(k+i) = u(k+i|k) - u(k+i-1|k)$ 。

2.3 约束

实际系统中一般都包含约束,常规控制器如抗饱和和积分 PID 控制器,处理约束的方式都是强制饱和和限幅,这种方式会使控制系统的性能严重恶化。模型预测控制与其他控制技术相比,最大的特点就

是能够主动地处理约束,包括控制输入约束、输出约束和状态约束。

针对伺服电机驱动泵控液压缸系统,由于液压泵为单向比例泵,且伺服控制器输出电压有一定范围,因此存在输入约束

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \quad (9)$$

要求液压缸位置无超调,即存在输出约束

$$y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max} \quad (10)$$

2.4 滚动时域控制

将 N_p 内的预测模型式(7)作为等式约束, N_c 时域内的输入约束式(9)和 N_p 时域内的输出约束式(10)作为不等式约束,估计的状态作为初始状态,得到如下具有式(8)中目标函数的有限时域的优化控制问题

$$\begin{aligned} \min_{u(k+i|k), \mathbf{x}(k)} J = & \sum_{i=1}^{N_p} \|r(k+i|k) - \\ & y(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i)\|_R^2 \\ \text{s. t. } & \mathbf{x}(k+i+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k+i|k) + \\ & \mathbf{B}\Delta u(k+i|k) \\ & y(k+i|k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k+i|k) \\ & u_{\min} \leq u(k+i|k) \leq u_{\max} \\ & y_{\min} \leq y(k+i|k) \leq y_{\max} \\ & \mathbf{x}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k) \end{aligned} \quad (11)$$

采用矩阵的形式表达控制信号、状态和输出信号,问题式(11)可转化为如下二次型规划(QP)问题

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \mathbf{U}(k), \mathbf{x}(k)} J = & \frac{1}{2} \Delta \mathbf{U}^T(k) \mathbf{H} \Delta \mathbf{U}(k) + \Delta \mathbf{U}^T(k) \mathbf{f}(k) \\ \text{s. t. } & \mathbf{G} \Delta \mathbf{U}(k) \leq \mathbf{S} \begin{bmatrix} u(k-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k|k) \end{bmatrix} + \mathbf{W} \end{aligned} \quad (12)$$

目标函数中 $\mathbf{f}(k)$ 与当前时刻的状态 $\mathbf{x}(k)$ 和参考信号 $r(k)$ 有关,约束方程与上一时刻的输入 $u(k-1)$ 和当前时刻的状态 $\mathbf{x}(k)$ 有关。采用积极集法求解上述 QP 问题,可得最优控制序列

$$\Delta \mathbf{U}^*(k) = -\mathbf{H}^{-1} \left(\mathbf{f}(k) + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\lambda}^*(k))^T \mathbf{G} \right) \quad (13)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}(k)$ 为积极状态约束对应的拉格朗日乘子。

将最优控制序列 $\Delta \mathbf{U}^*(k)$ 中的第一项 $\Delta u^*(k|k)$ 作为采样时刻 k 伺服电机的控制电压增量,最优控制输入

$$u^*(k) = u(k-1) + \Delta u^*(k|k) \quad (14)$$

3 状态估计

模型预测控制算法需要用到当前时刻系统全部

的状态信息,但在实际过程中,并非所有状态(如液压缸的速度)都容易用传感器测量得到,或测量信号(如压力信号)中含有较大噪声。因此,对系统的状态进行估计是有必要的,且状态估计性能的好坏很大程度上决定了模型预测控制器的性能。若伺服电机驱动泵控液压缸的真实模型为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \Delta u(k)) \\ y(k) = h(\mathbf{x}(k)) \end{cases} \quad (15)$$

则由于观测器模型式(7)与真实模型式(15)的失配和测量噪声将出现状态估计误差,最终导致稳态偏移。

考虑模型误差和测量干扰的影响,引入如下随机模型

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta u(k) + \mathbf{w}(k) \\ y(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + v(k) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{w}(k) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \Delta u(k)) - \mathbf{A}\mathbf{x}(k) - \mathbf{B}\Delta u(k)$ 为过程输入干扰,用于补偿模型误差; $v(k) = h(\mathbf{x}(k)) - \mathbf{C}\mathbf{x}(k)$ 为测量输出干扰,用于补偿传感器测量误差。

针对式(16)中的随机模型,可采用如图3所示的卡尔曼滤波器获得最优的状态估计。

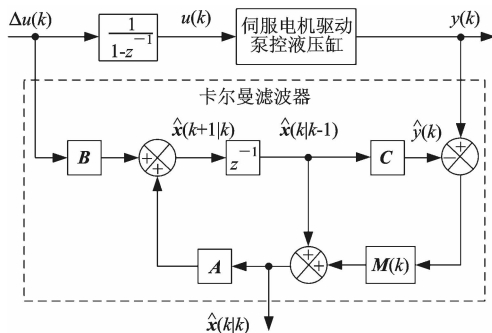


图3 卡尔曼滤波器结构框图

对第 k 步的预测状态 $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$, 预测误差为 $\tilde{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{x}(k+1) - \hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$, 预测误差协方差矩阵 $\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{E}[\tilde{\mathbf{x}}(k+1|k)\tilde{\mathbf{x}}^T(k+1|k)]$ 。卡尔曼滤波器包含测量更新和时间更新两步。对于测量更新,有误差修正

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k|k) = & \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{M}(k)[y(k) - \\ & \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)] \end{aligned} \quad (17)$$

对于时间更新,有预测状态

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k|k) + \mathbf{B}u(k) \quad (18)$$

考虑到模型预测控制优化求解的计算量,为了避免递归求解误差增益矩阵 $\mathbf{M}(k)$ 和均方误差矩阵 $\mathbf{P}(k+1|k)$, 此处采用稳态卡尔曼滤波器,即

$$\mathbf{M}(k) = \mathbf{M} = \mathbf{P}_{\infty} \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{P}_{\infty} \mathbf{C}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (19)$$

式中: P_{∞} 为代数 Riccati 方程的唯一正定解,即

$$P_{\infty}=AP_{\infty}A^T+Q_0-AP_{\infty}C^T(CP_{\infty}C^T+R_0)^{-1}CP_{\infty}A^T \tag{20}$$

4 仿真与实验结果

4.1 仿真分析

在 Matlab/Simulink 平台搭建系统的仿真模型,采用 Matlab Function 模块编写模型预测控制算法。仿真中采样周期为 0.05 s,预测时域为 30 个采样周期,控制时域为 3 个采样周期,权矩阵 Q 和 R 分别为[1]和[0.01]。

图 4 和图 5 分别是无测量干扰和无模型误差下控制电压和液压缸位移结果。由图可以看出,模型预测控制能够获得很好的位置跟踪性能,且控制电压未出现饱和,位移输出没有出现超调。

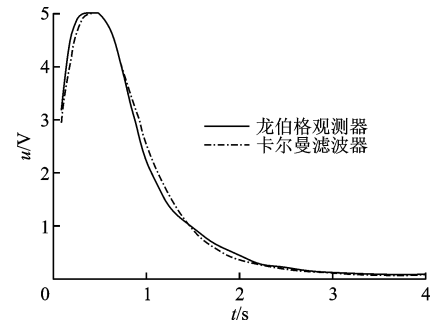


图 4 两种状态估计下的控制电压仿真结果

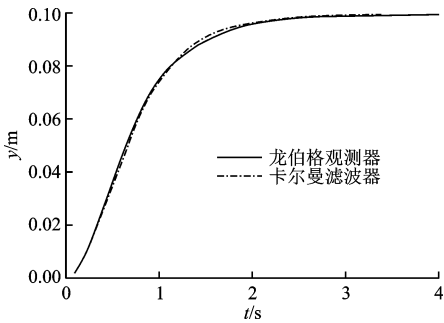


图 5 两种状态估计下的液压缸位移仿真结果

在不考虑干扰和模型误差的情况下,龙伯格观测器和卡尔曼滤波器的性能差别很小。为了评估干扰的影响,在仿真模型的输出端施加一功率谱密度为 1×10^{-6} W/Hz 的带限白噪声信号。由图 6 可以看出,采用龙伯格观测器在某些时刻控制电压严重超出给定范围,约束优化问题在当前精度要求下无可行解。采用卡尔曼滤波器则仅有微小的超限量,极大地提高了优化问题的递归可行性。图 7 是相应的液压缸位移,龙伯格观测器无可行解时控制电压产生突变,对应液压缸位移也出现跳变,最终产生了

稳态偏差,而卡尔曼滤波器基本无影响,仍然可实现无偏移跟踪。对比龙伯格观测器的增益矩阵($L=[-1.39\ 0\ 0\ 0]^T\times 10^{10}$)和稳态卡尔曼滤波器的增益矩阵($AM=[0\ 0\ 0\ 0.95]^T$)发现,龙伯格观测器增益系数在数量级上远大于卡尔曼滤波器,其对噪声信号更加敏感,因此卡尔曼滤波器具有很好的抗干扰能力,能够提高模型预测控制的递归可行性。

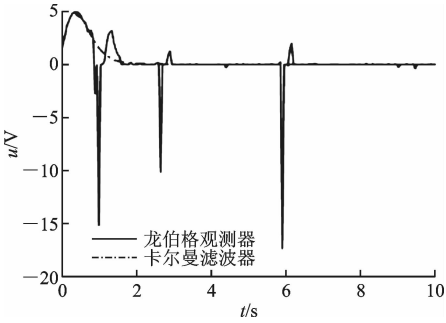


图 6 测量干扰下的控制电压仿真结果

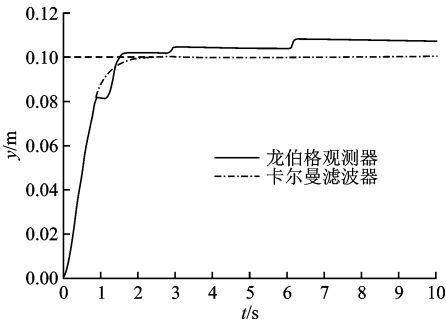


图 7 测量干扰下的液压缸位移仿真结果

为了比较两种状态估计方式在模型失配下的效果,将原系统的 3 个极点从 0.999 8, 0.965 3±i0.162 2 调整为 0.999 8, 0.9±i0.2。由图 8 可以看出,在模型失配下龙伯格观测器和稳态卡尔曼滤波器的控制电压都在给定范围内,即都能获得递归可行解,但龙伯格观测器的控制电压出现振荡,衰减速度缓慢。由图 9 可以看出,在模型失配条件下,采用两种方式进行状态估计时,液压缸位移的响应速度都

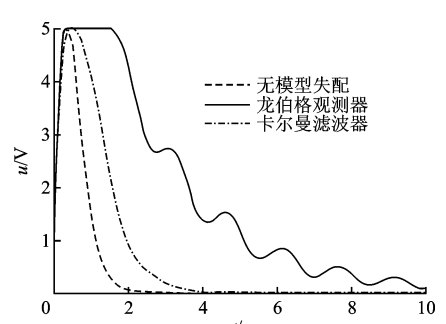


图 8 模型失配下的控制电压仿真结果

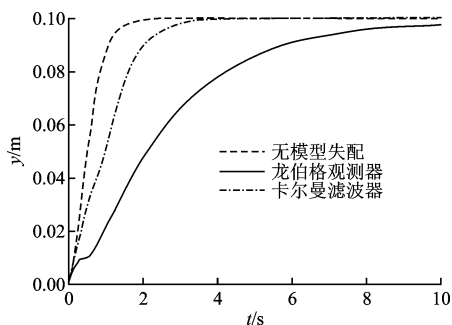


图9 模型失配下的液压缸位移仿真结果

会下降,而龙伯格观测器的响应速度下降尤为明显,且出现稳态偏差。稳态卡尔曼滤波器的响应速度略微下降,但仍可实现无偏移跟踪。因此,卡尔曼滤波器能够减小模型失配对模型预测控制性能的影响。

综合以上分析结果,状态估计对模型预测控制的性能有很大影响,卡尔曼滤波器具有很好的处理模型失配和抗干扰的能力,提高了模型预测控制的递归可行性和鲁棒性。

4.2 实验测试

搭建如图10所示的伺服电机驱动泵控非对称液压缸实验台。主要实验设备包括NT3-D20F型内啮合齿轮泵、HG-SR7024型交流永磁同步电机(伺服器型号MR-J4-A)、KKA300-420型光栅尺、工业PC、PCI-1716多功能数据采集卡、PCL-833三轴正交编码器和计数器卡。实验测试在Simulink Real-Time平台下进行,控制器和观测器参数设置与仿真相同。

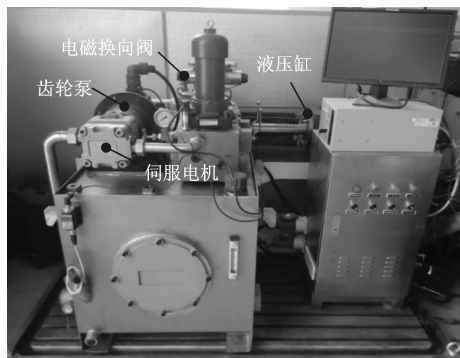


图10 伺服电机驱动泵控非对称液压缸实验台

采用龙伯格观测器可能出现超调和无可行解,实验主要测试了以稳态卡尔曼滤波器进行状态估计的模型预测控制器的性能。实验中的干扰主要来源于传感器采集的信号本身,模型失配由控制算法和观测器的模型与真实系统模型的误差造成。图11和图12分别是仿真和实验中控制电压和液压缸位移的结果。实验结果中,控制电压能限制在0~5 V

范围内,在约5 s和7 s时出现了波动。由于液压系统泄露的影响,稳定时并没有趋于0,而是维持在0.05 V;液压缸位移没有出现超调,相对于仿真有略微的滞后,稳态误差约为0.5 mm(相对跟踪误差约为0.5%)。实际位移出现了略微的滞后是由于建模过程中没有考虑伺服电机的动态特性和其他非线性因素,与4.1节中的仿真结果吻合;卡尔曼滤波器对噪声的最大过滤和实验中采用的数字传感器,使得干扰对系统的影响并不明显。泵控系统的控制精度低,本文实验中定位精度的提高受实验设备(如采用普通油缸而非伺服液压缸和分辨率为0.02 mm的位移传感器等)的限制。

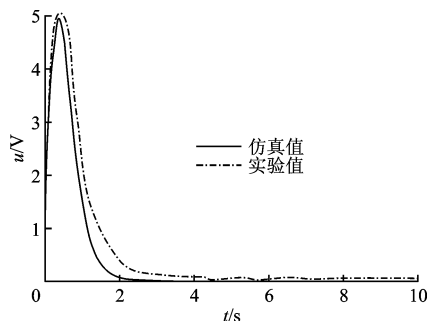


图11 仿真与实验中控制电压的结果

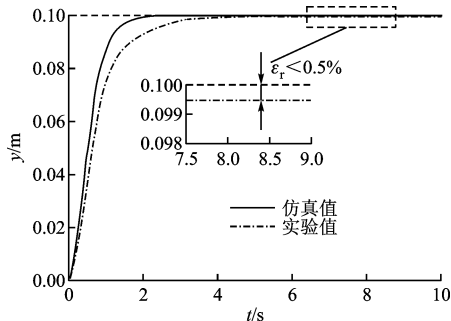


图12 仿真与实验中液压缸位移的结果

5 结论

本文提出了将采用状态估计的模型预测控制器应用于泵控非对称液压缸系统,以解决存在非线性、约束、模型误差和干扰下的定位控制问题。建立了含输入和输出约束的状态空间模型,并以此设计了模型预测控制器和状态观测器。对比了两种状态估计方法,并通过仿真深入分析了两种状态估计方法处理干扰和模型失配的能力。仿真和实验结果表明,采用卡尔曼滤波器的模型预测控制能应用于实际泵控系统,保证输入不超限、输出无超调,且能应对一定的干扰和模型误差,提高了系统的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 李小虎,柳松玮,施虎,等. 基于两自由度 H_∞ 控制策略的泵控液压系统研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 7-13.
LI Xiaohu, LIU Songwei, SHI Hu, et al. A study on hydraulic systems controlled by pumps based on H_∞ control strategy with two degrees of freedom [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 7-13.
- [2] WANG Longke, BOOK W J, HUGGINS J D. Application of singular perturbation theory to hydraulic pump controlled Systems [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(2): 251-259.
- [3] AHN K K, CHAU N H T. Design of a robust force controller for the new mini motion package using quantitative feedback theory [J]. Mechatronics, 2007, 17(10): 542-550.
- [4] DAHER N, IVANTYSYNOVA M. An indirect adaptive velocity controller for a novel steer-by-wire system [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2014, 136(5): 051012.
- [5] BUSQUETS E, IVANTYSYNOVA M. Adaptive robust motion control of an excavator hydraulic hybrid swing drive [J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2015, 8(2): 568-582.
- [6] CHIANG M H. A novel pitch control system for a wind turbine driven by a variable-speed pump-controlled hydraulic servo system [J]. Mechatronics, 2011, 21(4): 753-761.
- [7] CHIANG M H, CHEN C C, KUO C F J. The high response and high efficiency velocity control of a hydraulic injection molding machine using a variable rotational speed electro-hydraulic pump-controlled system [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 43(9/10): 841-851.
- [8] XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model predictive control status and challenges [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.
- [9] KOTZEV A, CHERCHAS D B, LAWRENCE P D, et al. Generalized predictive control of a robotic manipulator with hydraulic actuators [J]. Robotica, 1992, 10(5): 447-459.
- [10] 尹国芳,王益群,孙旭光. 电液弯辊力伺服控制系统的预测控制 [J]. 液压气动与密封, 2003(4): 21-23.
YI Guofang, WANG Yiqun, SUN Xuguang. Generalized predictive control for electro-hydraulic bending roller force servo control system [J]. Hydraulics Pneumatics and Seals, 2003(4): 21-23.
- [11] 孙孟辉,王益群,张伟,等. 冷带轧机电液伺服系统广义预测控制应用研究 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(22): 2659-2662.
SUN Menghui, WANG Yiqun, ZHANG Wei, et al. Generalized predictive control in electro-hydraulic servo system of cold rolling mill [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(22): 2659-2662.
- [12] HUANG Sunan, TAN K K, LEE T H. Predictive control of ram velocity in injection molding [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 1999, 38(2): 285-303.
- [13] MARUSAK P M, KUNTANAPREEDA S. Constrained model predictive force control of an electro-hydraulic actuator [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(1): 62-73.
- [14] PENG Yonggang, WANG Jun, WEI Wei. Model predictive control of servo motor driven constant pump hydraulic system in injection molding process based on neurodynamic optimization [J]. Journal of Zhejiang University: Science C Computers & Electronics, 2014, 15(2): 139-146.
- [15] WANG Liuping. Model predictive control system design and implementation using Matlab [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009: 4-36.

[本刊相关文献链接]

- 郝双晖,王磊,宋宝玉,等. 交流伺服系统永磁同步电机电流及位置二级状态观测器设计. 2015, 49(5): 100-107. [doi: 10.7652/xjtuxb201505016]
- 罗中宝,杨志东,陈良,等. 大型单轴离心振动台的复合控制策略. 2014, 48(12): 131-139. [doi: 10.7652/xjtuxb201412021]
- 俞珏,庄健,于德弘. 采用李雅普诺夫函数的电液伺服系统反馈线性化控制. 2014, 48(7): 71-76. [doi: 10.7652/xjtuxb201407013]
- 杨晓君,赵万华,刘辉,等. 直线电机进给系统机械系统动态特性研究. 2013, 47(4): 44-50. [doi: 10.7652/xjtuxb201304009]
- 赵劲松,叶正茂,沈刚,等. 飞行模拟器操纵负荷系统内回路的逆模型控制. 2012, 46(4): 38-44. [doi: 10.7652/xjtuxb201204007]
- 魏树国,赵升吨,张立军,等. 直驱泵控式液压机液压系统的动态特性仿真及优化. 2009, 43(7): 79-82. [doi: 10.7652/xjtuxb200907017]
- 张国亮,王捷,刘宏. 大范围视觉伺服方法在空间机器人上的应用. 2009, 43(1): 85-89. [doi: 10.7652/xjtuxb200901019]

(编辑 武红江)