

DOI: 10.7652/xjtuxb202001012

采用支持向量机的非对称阀控液压缸 模型预测控制

杨泰春, 陶建峰, 覃程锦, 刘成良

(上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海)

摘要: 针对非对称阀控液压缸位置控制中出现超调与由阀芯换向引起的压力冲击问题, 设计了基于支持向量机与序列二次规划算法的非线性模型预测控制器。采用支持向量机拟合控制信号与活塞速度的关系得到系统的近似模型, 使用序列二次规划算法求解获取控制器输出; 通过增加输出约束以及满足输入约束实现每次控制过程中阀芯不换向、活塞快速到达目标位置并且无超调。数值仿真结果表明: 在相对位置误差信号大于8%时, 控制器输出的控制信号始终大于最大控制信号的90%, 有效缩短了系统的响应时间; 在保证活塞位置无超调、阀芯不换向的条件下, 实现了精确位置控制, 稳态误差小于0.02%。所提算法实现了多约束条件下非对称阀控液压缸系统的无超调快速控制, 具有一定的理论和工程价值。

关键词: 非对称阀控液压缸; 模型预测控制; 支持向量机; 序列二次规划算法

中图分类号: TH132; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0093-08

A Model Predictive Control of Asymmetric Valve Control Hydraulic Cylinders Based on Support Vector Machine and Sequential Quadratic Programming Algorithm

YANG Taichun, TAO Jianfeng, QIN Chengjin, LIU Chengliang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A nonlinear model predictive controller based on a support vector machine and a sequential quadratic programming algorithm is designed to solve problems of overpressure in the position control of asymmetric valve-controlled hydraulic cylinders and pressure shock caused by spool reversal. The support vector machine is used to fit the relationship between the control signal and the piston speed and to obtain an approximate model of the system, and the sequential quadratic programming algorithm is employed to obtain outputs of the controller. The valve spool is not reversed and the piston displacement quickly reaches the target position without overshoot by adding output constraints and constraints satisfying input. Numerical simulation results show that when the signal of relative position errors is greater than 8%, the control signal output by the controller is greater than 90% of the maximum control signal, which effectively shortens the response time of the system. At the same time, accurate position control is realized and the steady-state error is less than 0.02% under the condition of no overshooting of the piston position

收稿日期: 2019-03-28。 作者简介: 杨泰春(1994—), 男, 硕士生; 陶建峰(通信作者), 男, 副教授, 硕士生导师。 基金项目: 上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重点资助项目(201705-XH-C1085-015); 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1702500); 上海隧道工程有限公司专项研究科研资助项目(2017-SK-09)。

网络出版时间: 2019-10-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191014.1119.004.html>

and no reversing of the valve spool. Therefore, the proposed algorithm realizes the fast control of the asymmetric valve-controlled hydraulic cylinder system without over-tuning under multi-constraint conditions, and has certain theoretical and engineering value.

Keywords: asymmetrical valve-controlled hydraulic cylinder; model predictive control; support vector machine; sequential quadratic programming algorithm

非对称阀控液压缸具有响应速度快,功率密度大,结构简单等优点,广泛应用于液压机^[1]、车辆主动悬挂^[2]、机器人^[3-4]等设备。然而,非对称阀控液压缸也存在强非线性、运动不对称等缺点,使该系统控制性能受到严重影响。

针对如何提高阀控液压缸的位置控制精度、控制器鲁棒性、克服非线性等问题,科研人员已经开展了大量的研究。Ye等采用PID算法对挖掘机铲斗进行位置控制,以位置误差的平方作为目标函数,通过改进粒子群算法对PID的参数进行优化^[5];Zheng等设计了一个模糊PID控制器,以误差信号及误差信号的微分为输入,调整PID控制器的参数^[6];Centin、Yousif、Kalyoncu等运用模糊控制器直接控制系统的输出^[7-9]。除了上述PID控制器及改良版本,一些学者设计了其他类型的控制器。例如,Guan和Pan设计了自适应滑膜控制器,通过全局李雅普诺夫函数对存在未知参数的非线性电液伺服系统进行控制^[10];Yang等为解决非线性模型失配问题,采用了反步控制算法^[11]。尽管这些控制算法具有一定的优越性,但存在着以下问题:为提高快速性,这些算法都存在着超调,在一些应用场景中,如粉末成型液压机上,超调是被严格禁止的;多数控制方法实施控制时伺服阀有换向动作,当系统惯性力较大时,系统压力会突然变化,造成较大的压力冲击。

上述问题可归纳为在满足输入约束(阀芯位置不换向切换)的同时对输出(油缸位置)进行约束控制。模型预测控制(MPC)是解决带约束控制问题的有效方法。模型预测控制在刚提出时多用于线性系统以及慢动态过程^[12]。随着机器学习技术的发展以及计算机计算速度的提高,模型预测控制被越来越广泛地应用到非线性系统和更多的控制领域。在电液伺服系统力控制中,Yuan等设计了MPC与PIC相结合的控制^[13];Kilic等结合神经网络与MPC实现对压力变化的预测^[14]。然而,神经网络具有需要较大的训练数据集、泛化能力较差等缺点,不完全适用于控制系统的近似辨识。与多层神经网络等其他机器学习算法相比,支持向量机算法具有训练速度快、样本量需求少以及泛化能力强等特点,

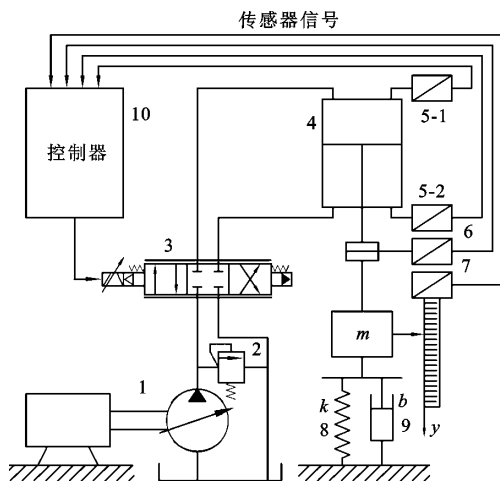
因此适合作为控制系统的近似辨识模型。基于支持向量机的预测控制器求解问题属于非线性约束优化问题,求解这类问题一般采用数值解法,其中一种典型的算法是序列二次规划算法。序列二次规划算法具有强大的非线性处理能力,非常适用于约束优化问题的求解,具有快速收敛性甚至超线性收敛性,稳定性好、鲁棒性强^[15]。

本文设计了一种基于支持向量机与序列二次规划算法的模型预测控制器,保证了系统在满足输入约束与输出约束条件下能够实现最优控制。首先提出被控系统与控制器设计思想,其次利用支持向量机对上述系统进行辨识,最后设计预测控制器并通过数值仿真验证其控制性能。

1 伺服阀控非对称缸控制系统介绍

1.1 伺服阀控非对称缸控制系统

伺服阀控非对称缸控制系统如图1所示。系统由恒压变量泵、安全阀、伺服阀、非对称缸、压力传感器、力传感器、位移传感器、弹簧、阻尼和控制器组成。



1—恒压变量泵;2—安全阀;3—伺服阀;4—非对称缸;
5—压力传感器;6—力传感器;7—位移传感器;
8—弹簧;9—阻尼;10—控制器。

图1 伺服阀控非对称缸控制系统示意图

当伺服阀输入正信号时,伺服阀阀芯左移,液压油经由恒压变量泵、伺服阀流入液压缸无杆腔,有杆腔液压油从有杆腔经过伺服阀流入油箱。然后活塞

克服弹力与阻尼力运动到目标位置。类似地,当伺服阀输入负信号时,伺服阀阀芯右移,恒压变量泵与有杆腔接通,活塞反向移动。控制器根据采集的位移、压力与力的信号计算输出信号,以实现伺服阀控非对称缸控制系统。

1.2 控制目标

对于精确位置控制,无超调阶跃响应是非常重要的要求,尤其是对成型机等工厂液压设备。在压制过程中,产品多为塑性变形,因此如果阶跃响应中存在着超调量,尽管活塞最终不存在位置误差,产品的精度仍然会受到影响。同时,对于阀控系统,将活塞从超调位置移动回目标位置需要变换伺服阀阀芯方向,当系统惯性力较大时,系统的压力会突然变化,造成压力冲击。为避免这种冲击,阀芯在控制过程中不能换向。此外,为保证效率,还应在满足上面两个条件的同时,尽快提高响应速度。

1.3 控制器设计

控制目标本质上是在满足输入约束的同时对输出进行约束,而解决带约束控制问题较为有效的控制算法是模型预测控制算法。然而,传统模型预测控制算法难以直接应用于上述问题,这是由于被控对象的高度非线性以及部分模型参数无法准确获取导致的无法对系统输出进行准确的预测。

为解决上述问题,采用具有优良泛化性能的支持向量机预测系统输出。支持向量机可选择的输入包括位移信号、控制信号、力信号与压力信号等,具体采用哪些信号可以根据训练效果决定。使用支持向量机建立起准确的预测模型,进而构建预测控制器。控制器的输入包括参考信号以及支持向量机所需要的输入信号。支持向量机多步预测得到一系列的预测输出,以用于计算代价函数以及比较是否满足输出约束。代价函数通过序列二次规划算法进行优化。

2 支持向量机与序列二次规划算法

2.1 支持向量机

支持向量机主要分为两类,用于分类的支持向量回归机(SVC)以及用于回归的支持向量回归机(SVR)。

SVR 问题是根据给定的样本 $\{(\mathbf{x}, y)\}$,可以得到一个回归模型,使 $f(\mathbf{x})$ 与 y 尽可能地接近。

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b \quad (1)$$

式中: $\mathbf{w}$ 、 b 为需要确定的参数。

与传统的回归模型不同的是,只有当 $f(\mathbf{x})$ 与 y

偏差超过一个容忍的范围 ϵ 时才计算损失。SVR 问题可以形式化为

$$\min_{\mathbf{w}, b} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + Cl_{\epsilon}(f(\mathbf{x}_i) - y_i) \quad (2)$$

式中: C 为正则化常数; l_{ϵ} 为损失函数。

引入松弛变量 ξ_i 和 $\hat{\xi}_i$, 可将其重写为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, b, \xi_i, \hat{\xi}_i} \quad & \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \hat{\xi}_i)^2 \\ \text{s. t.} \quad & f(\mathbf{x}_i) - y_i \leq \epsilon + \hat{\xi}_i \\ & y_i - f(\mathbf{x}_i) \leq \epsilon + \xi_i \\ & \xi_i \geq 0, \hat{\xi}_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上述问题的对偶问题为

$$\left. \begin{aligned} \max_{\alpha, \hat{\alpha}} \quad & \sum_{i=1}^m y_i (\alpha_i - \hat{\alpha}_i) - \epsilon (\alpha_i + \hat{\alpha}_i) - \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (\alpha_i - \hat{\alpha}_i) (\alpha_j - \hat{\alpha}_j) \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \hat{\alpha}_i) = 0 \\ & 0 \leq \alpha_i, \hat{\alpha}_i \leq C \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

求解式(4)可以得到 α 、 $\hat{\alpha}$ 以及

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \hat{\alpha}_i) \quad (5)$$

进而有

$$b = y_i + \epsilon - \sum_{j=1}^m (\hat{\alpha}_j - \alpha_j) \mathbf{x}_j^T \mathbf{x}_i \quad (6)$$

则 SVR 的解形式如下

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) \mathbf{x}_i^T \mathbf{x} + b \quad (7)$$

对于采用了核函数方法的问题,可以得到

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}_i) \quad (8)$$

最终可以得到 SVR 的解形式如下

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) \kappa(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b \quad (9)$$

式中: $\kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 为核函数, $\kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}_i)^T \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}_j)$ 。

2.2 序列二次规划(SQP)算法

SQP 算法具有收敛速度快、迭代精度高等特点,非常适用于非线性约束的优化问题,基本思想是通过每一步求解一个二次规划子问题来确立一个下降方向,沿该方向移动一定步长进行下一次搜索,直到得到最优解。

假设目标函数为

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s. t.} \quad & G(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

每一次迭代点为

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \alpha^k \mathbf{S}^k \quad (11)$$

式中: α^k 为步长; $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_n]^T$, $\mathbf{S}$ 的方向是此次迭代的搜索方向。

在迭代点 $\mathbf{x}^k$ 附近的二次规划子问题可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & QP(\mathbf{S}) = [\nabla f(\mathbf{x}^k)]^T \mathbf{S} + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{A}^k \mathbf{S} \\ \text{s. t.} \quad & C_v(\mathbf{x}^k) + [\nabla C_v(\mathbf{x}^k)]^T \mathbf{S} = 0, v = 1, 2, \dots, p \\ & C_j(\mathbf{x}^k) + [\nabla C_j(\mathbf{x}^k)]^T \mathbf{S} \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: $C_v(\mathbf{x}^k)$ 代表等式约束; $C_j(\mathbf{x}^k)$ 代表不等式约束; $\nabla f(\mathbf{x}^k)$ 、 $C_v(\mathbf{x}^k)$ 、 $\nabla C_v(\mathbf{x}^k)$ 、 $C_j(\mathbf{x}^k)$ 、 $\nabla C_j(\mathbf{x}^k)$ 为确定的量。

$\mathbf{A}^k$ 在实际计算中有多种构造方法, 比较常用的一种构造方法为

$$\mathbf{A}^k = \nabla^2 f(\mathbf{x}^k) \quad (13)$$

3 基于 SVM 与 SQP 的预测控制

模型预测控制算法结构如图 2 所示。基于 SVM 离线辨识阀控液压缸系统建立系统的预测模型; 选择合理的目标函数以及约束函数, 利用 SQP 求解得到最优控制。

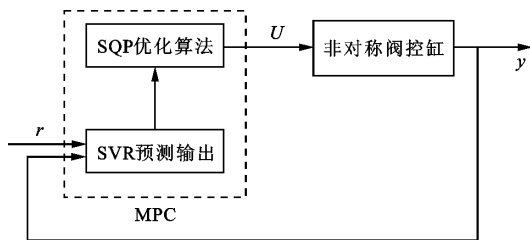


图2 模型预测控制算法结构

3.1 基于 SVM 的被控模型辨识

为降低辨识系统的阶数, 选择单位时间内液压缸的位置变化量为输出, 得到被控液压缸的位置关系为

$$y(k+1) = y(k) + \Delta y(k+1) \quad (14)$$

式中: $y(k)$ 为活塞在 k 时刻的位置; $\Delta y(k+1)$ 为活塞在 k 时刻至 $k+1$ 时刻的位置变化量。

对于 $\Delta y(k+1)$, 可以用一个非线性模型表示为

$$u(k+1), u(k), \dots, u(k-m+1)) \quad (15)$$

式中: $u(k)$ 为系统在 k 时刻输入的控制量; $f(\cdot)$ 是非线性函数; n, m 分别为位置信号和控制信号的最大影响时域长度。

利用 SVM 对上式进行建模, 表达式为

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= \hat{f}(y(k), y(k-1), \dots, y(k-\hat{n}+1), \\ &u(k+1), u(k), \dots, u(k-\hat{m}+1)) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\hat{f}(\cdot)$ 为支持向量机函数; $\hat{n}, \hat{m}$ 为结构参数, 与 n, m 并不一定相同, 主要由拟合精度决定。

经过测试, 选择 $\hat{n} = 1, \hat{m} = 1$, 支持向量机选择 RBF 作为核函数, 则式(16)可以表示为

$$\Delta y(k+1) = \sum_{i=1}^{n_s} a_i e^{-\gamma \|\mathbf{X}(k) - \mathbf{X}_i\|^2} + b \quad (17)$$

式中: γ 为超参数; $\mathbf{X}_i$ 为支持向量; a_i, b 是由训练得到的常数; n_s 为支持向量的个数; $\mathbf{X}(k)$ 是输入向量, $\mathbf{X}(k) = [y(k), u(k+1)]^T$ 。

采用 SVR 辨识阀控液压缸系统的步骤如下。

步骤 1 仿真采集得到一组系统输入输出数据 $(u(k), y(k))$, 并计算 $\Delta y(k), k = 1, 2, \dots, m$, 采样点应尽可能覆盖全部工作状态。同时, 为了避免 $u(k), y(k), \Delta y(k)$ 的原始数据因不在统一数量级上造成 SVR 拟合精度的下降, 需要在训练前进行近似归一化处理, 为计算方便可采用实际值除以最大值的方法。

步骤 2 构建矩阵 $\mathbf{X}_{\text{train}}(i) = [u(i), y(i-1)]$, $\mathbf{Y}_{\text{train}}(i) = [\Delta y(i)]$, $i = 1, 2, \dots, m$ 的形式, 其中 $\mathbf{X}_{\text{train}}(i), \mathbf{Y}_{\text{train}}(i)$ 分别为训练 SVR 所需要的输入与输出数据。

步骤 3 设置 SVM 的正则化参数 C , 超参数 γ 以及容忍误差 ϵ 。

步骤 4 构建形如式(4)的最优化问题, 求解该问题就可以得到被控系统的辨识模型。

3.2 MPC 控制器的构建

3.2.1 目标函数 阀控系统的重要目标是使液压缸以高精度跟踪参考信号, 因此可设置目标函数为

$$\min_u J = \sum_{i=1}^m \alpha_i (y_p(k+i|k) - y_r(k+i))^2 + \sum_{i=1}^n \beta_i (u(k+i|k) - u(k+i-1|k))^2 \quad (18)$$

式中: α_i, β_i 为权重系数; $y_p(k+i|k)$ 为 k 时刻对 $k+i$ 模型预测值; $y_r(k+i)$ 为参考信号; $u(k+i|k)$ 为控制信号。

3.2.2 约束 对于本文阀控液压缸系统, 因为被控对象为液压缸, 要求控制中阀芯不换向, 同时不能超过最大阀芯位移, 因此存在输入约束

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq u \leq u_{\max}, & y_r > y \\ u_{\min} &\leq u \leq 0, & y_r < y \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

同时, 要求液压缸位置无超调, 存在输出约束

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \quad (20)$$

3.3 序列二次规划算法求解最优控制信号

将预测时域内的预测模型式(15)(17)作为等式

约束,控制时域内的输入约束和预测时域内的输出约束作为不等式约束,测得的状态作为初始状态,得到目标函数的有限时域优化控制问题如下式

$$\left. \begin{aligned} \min_{u, y_p} J &= \sum_{i=1}^m \alpha_i (y_p(k+i|k) - y_r(k+i))^2 + \\ &\quad \sum_{i=1}^n \beta_i (u(k+i|k) - u(k+i-1|k))^2 \\ \text{s. t. } y_p(k+i|k) &= y_p(k+i-1|k) + \\ &\quad \left(\sum_{j=1}^{n_s} \alpha_j \exp(-\gamma \|X(k+i-1|k) - X_j\|^2) + b \right), \\ &\quad i = 1, \dots, m \\ &\quad \left. \begin{aligned} 0 \leq u \leq u_{\max}, \quad y_r > y \\ u_{\min} \leq u \leq 0, \quad y_r < y \end{aligned} \right\} \\ &\quad y_{\min} \leq y_p \leq y_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\nabla^2 J(\mathbf{x}^l) = \begin{bmatrix} 2\beta_1 + 2\beta_2 & -2\beta_2 & 0 & & & \\ -2\beta_2 & 2\beta_2 + 2\beta_3 & -2\beta_3 & & & \\ 0 & -2\beta_3 & 2\beta_3 + 2\beta_4 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 2\beta_{n-2} + 2\beta_{n-1} & -2\beta_{n-1} & 0 \\ & & & & -2\beta_{n-1} & 2\beta_{n-1} + 2\beta_n & -2\beta_n \\ & & & & 0 & -2\beta_n & 2\beta_n \\ & & & & & & 2\alpha_1 & & \\ & & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & & 2\alpha_m \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{hi}(\mathbf{x}^l) &= y_p(k+i|k) - y_p(k+i-1|k) - \left(\sum_{j=1}^{n_{sv}} \alpha_j \exp(-\gamma((u(k+i-1|k) - \mathbf{U}(j))^2 + \right. \\ &\quad \left. (y_p(k+i-1|k) - \mathbf{Y}(f))^2) + b \right), i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \nabla \mathbf{C}_{hi}(\mathbf{x}^l) &= \\ &\quad \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^{n_{sv}} 2\alpha_j \gamma ((u(k+i|k) - \mathbf{U}(j)) \exp(-\gamma((u(k+i-1|k) - \mathbf{U}(j))^2 + (y_p(k+i-1|k) - \mathbf{Y}(f))^2)) \\ \vdots \\ -1 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

从而得到如下二次规划问题

$$\min QP(\mathbf{S}) = [\nabla J(\mathbf{x}^l)]^T \mathbf{S} + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \nabla^2 J(\mathbf{x}^l) \mathbf{S}$$

其中

$$\mathbf{X}(k+i|k) = [u(k+i+1|k), y_p(k+i|k)]^T \quad (22)$$

当 $n \leq i \leq m$ 时

$$u(k+i|k) = u(k+n|k) \quad (23)$$

$$\mathbf{x} = [u(k+1|k), \dots, u(k+m|k), y_p(k+1|k), \dots, y_p(k+n|k)]^T \quad (24)$$

运用 SQP 方法,在一个迭代点 $\mathbf{x}^l$ 处有

$$\nabla J(\mathbf{x}^l) = \begin{bmatrix} 2\beta_1(u(k+1|k) - u(k|k)) - \\ 2\beta_2(u(k+2|k) - u(k+1|k)) \\ \vdots \\ 2\beta_n(u(k+n|k) - u(k+n-1|k)) \\ 2\alpha_1(y_p(k+1|k) - y_r(k+1)) \\ \vdots \\ 2\alpha_m(y_p(k+m|k) - y_r(k+m)) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{C}_{hi}(\mathbf{x}^l) + [\nabla \mathbf{C}_h(\mathbf{x}^l)]^T \mathbf{S} = 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\begin{aligned} 0 \leq u \leq u_{\max}, \quad y_r > y \\ u_{\min} \leq u \leq 0, \quad y_r < y \end{aligned}$$

$$y_{\min} \leqslant y \leqslant y_{\max} \tag{29}$$

求解上述二次规划问题得到的解 $\mathbf{S}$ 即为本次搜索方向,然后更新迭代点

$$\mathbf{x}^{l+1} = \mathbf{x}^l + a\mathbf{S} \tag{30}$$

当搜索步长 $\|\mathbf{S}\|$ 小于某一设定值时即可停止迭代,此时 $\mathbf{x}$ 中的值即为最优控制值以及对应的预测输出。

4 Simulink 仿真实验验证

基于仿真数据对算法的有效性进行验证,非对称阀控缸的数学模型与参数选择见附录 A、B。辨识系统的激励信号选择一组伪随机阶跃信号,得到一组输入输出数据对 $[U, Y]$,同时可以计算得到 $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$ 。为避免不同类型数据数量级相差过大影响训练效果,将上述数据进行近似归一化处理

$$\left. \begin{aligned} \hat{u}(k) &= u(k)/u_{\max} \\ \hat{y}(k) &= y(k)/y_{\max} \\ \Delta \hat{y}(k) &= \Delta y(k)/\Delta y_{\max} \end{aligned} \right\} \tag{31}$$

设置支持向量机的结构参数 $\hat{n}=1, \hat{m}=1$,正则化常数 $C=0.101\ 6$,超参数 $\gamma=1$,回归向量 $\mathbf{x}(k)=[\hat{u}(k), \hat{y}(k)]^T$,目标为变量 $\Delta \hat{y}(k)$,这样可以用 $[\mathbf{x}(k), \Delta \hat{y}(k)]$ 来训练 SVM 模型。

为验证 SVM 的泛化性能,考虑到实际应用可能出现的情况,选择更容易出现变动以及对系统影响较大的两个参数负载质量和外力作为对照变量,增加了 5 个测试集作为对照,见表 1。

训练集和测试集样本的实际数据与 SVM 输出

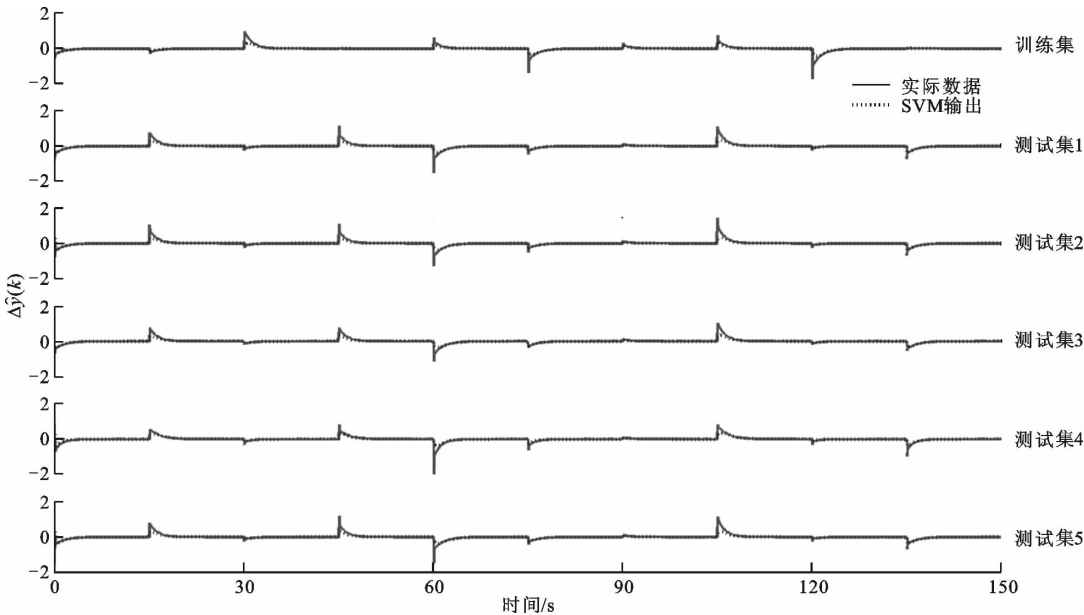


图 3 训练集与测试集上实际数据与 SVM 输出

如图 3 所示。在训练集与测试集上全部样本与动态过程 ($\Delta \hat{y}(k) > 0.01$) 的均方差见表 2。

表 1 SVM 测试集与不同工况下参数对比

数据集	m_i/kg	F/kN
训练集	50	1
测试集 1	50	1
测试集 2	100	1
测试集 3	25	1
测试集 4	50	5
测试集 5	50	0.5

表 2 测试集与训练集均方差

样本	均方差/ 10^3					
	训练集	测试集 1	测试集 2	测试集 3	测试集 4	测试集 5
全部样本	2.43	2.77	2.86	2.69	2.58	2.82
动态过程	6.63	8.07	8.33	8.87	8.67	8.05

由表 2 可知,该预测模型在测试集上误差很小,说明所提支持向量机模型能够很精确地预测被控对象;在不同工况的测试集上泛化均方差并未明显增加,说明其具有较强的泛化能力。

设置模型预测控制器中预测时域 $n=10$,控制时域 $m=5$,权重系数 $\alpha_i=1, \beta_i=0.04$,控制作用的约束为 $0 \leqslant u \leqslant 0.2$ 或 $-0.2 \leqslant u \leqslant 0$,输出无超调,即 $y \leqslant 0.1$ 或 $y \geqslant -0.1$,控制周期为 0.01 s 。为了更好地验证所提方法的优势,将所提控制算法与 PID 控

制器进行对比。PID 控制器在不考虑负向阶跃响应的情况下,依然无法同时满足无超调与快速性,因此在多次试验之后,选择两组分别侧重快速性与无超调两种指标的 PID 参数进行对比,PID 参数对比结果见表 3。为验证本方法的鲁棒性,对表 1 所示的不同测试集进行测试。

测试集 1 下预测控制与 PID 控制效果对比如图 4、5 所示。不同测试集下的预测控制效果如图 6、

7 所示。5 种测试集下预测控制与测试集 1 下侧重快速性的 PID 控制的稳态误差见表 4,表 4 中负数表示出现了超调,代表输出超调量。

表 3 PID 参数对比结果

PID 特性	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
侧重快速性	17.3	1.3	0
侧重无超调	2.1	0	0

表 4 5 种测试集下预测控制与测试集 1 下侧重快速性的 PID 控制的稳态误差 %

输入信号	稳态误差				
	模拟预测控制器				
	测试集 1	测试集 2	测试集 3	测试集 4	测试集 5
正向阶跃响应	0.016	0.008	−0.010	0.014	0.026
反向阶跃响应	0.010	0.013	0.008	−0.003	0.017

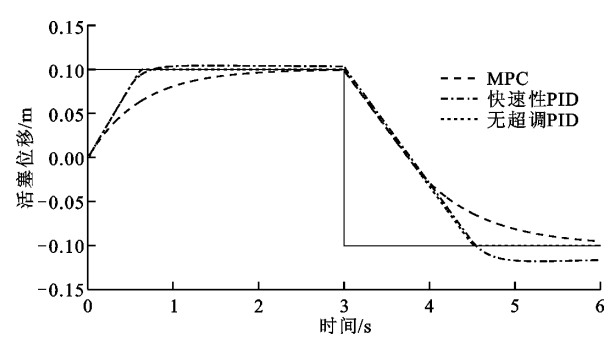


图 4 MPC 与 PID 控制器阶跃响应曲线

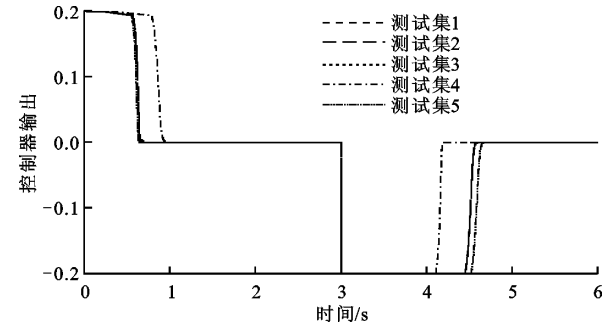


图 7 不同测试集下控制器输出曲线

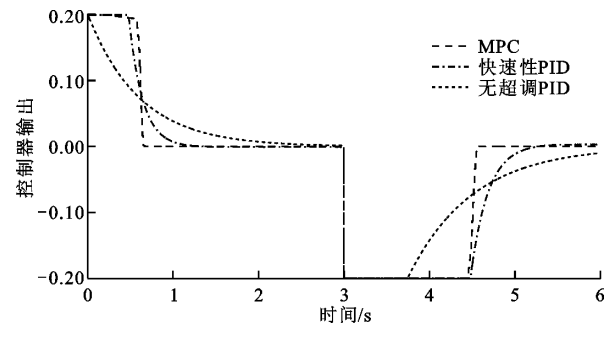


图 5 MPC 与 PID 控制器输出曲线

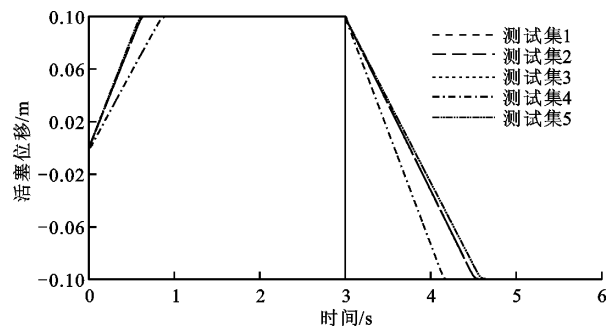


图 6 不同测试集下阶跃响应曲线

结合图 4~7 以及表 4,可以得到如下结论:所提控制算法具有良好的控制性能,在误差信号较大阶段(相对位置误差大于 8%),控制器始终输出较大的控制信号, $u>0.9u_{\max}$,具有优良快速性。在接近目标位置时,控制器输出迅速分步减小至 0,同时活塞位移到达参考曲线,进入稳态。此外,所提控制算法比传统 PID 具有更好的控制效果。一方面,所提算法有效地避免了 PID 控制器为增加快速性带来的超调问题,调整时间缩短至无超调 PID 控制器的 20%左右;另一方面,所提算法具有更高的响应速度,即使 PID 控制器以 4%超调为代价,由于控制量逐渐变小其响应速度仍慢于所提方法。同时需要指出的是,由于被控对象具有运动不对称特性,PID 控制器难以同时满足不同方向阶跃响应的控制要求。通过不同测试集下的响应曲线对比,可以看出该算法鲁棒性较好,在负载增加 1 倍与外力增加 4 倍的情况下,控制器依然能够快速准确地将活塞调整至目标位置。综上所述,所提控制算法在距离参考曲线较远的位置时控制器能够以接近最大控制

信号控制系统,在接近参考曲线时能够迅速减小控制量,实现在无阀芯换向的情况下无超调的最优控制,具有优秀的控制精度与快速性。

需要特别指出的是,非对称阀控缸具有强非线性、运动不对称等特点,为了能够实现无超调情况的最优控制,预先需要对被控对象进行辨识。所提算法采用 SVM 对系统进行建模,需要进行相应的阶跃响应实验获得训练数据,增加了一定的工作量。然而,SVM 算法具有样本量需求少的优势,较少的实验即可满足系统精确辨识的要求。因此,所提控制算法仅需要进行少量实验即可完成非对称阀控缸的无超调最优控制。

5 结 论

为避免非对称阀控液压缸位置控制出现超调与由阀芯换向引起的压力冲击问题,设计了采用支持向量机与序列二次规划算法的非线性模型预测控制器。数值仿真结果表明:

(1)采用支持向量机对模型阀控液压缸进行拟合具有极其优良的拟合结果,利用这一算法代替模型预测控制中的非线性模型,结合序列规划算法可以快速准确地求解出最优控制量。

(2)所提算法比 PID 控制算法具有更好的控制效果,不仅有效地避免 PID 控制器为增加快速性带来的超调问题,而且具有更高的响应速度,调整时间缩短至无超调 PID 控制器的 20%左右,即使 PID 控制器以 4%超调为代价,其响应速度仍慢于所提方法。

(3)所提算法具有良好的鲁棒性,在负载最大增加 1 倍与外力增加 4 倍的情况下,控制器依然能够快速准确地将活塞调整至目标位置,实现在无阀芯换向的情况下无超调的最优控制。

参考文献:

- [1] SEPEHRI N, LAWRENCE P D, SASSANI F, et al. Resolved-mode teleoperated control of heavy-duty hydraulic machines [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1994, 116(2): 232-240.
- [2] SUN Weichao, ZHAO Zhengli, GAO Huijun. Saturated adaptive robust control for active suspension systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3889-3896.
- [3] SIROUSPOUR M R, SALCUDEAN S E. Nonlinear control of hydraulic robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(2): 173-182.
- [4] LU Lu, YAO Bin. Energy saving adaptive robust con-

trol of a hydraulic manipulator using five cartridge valves with an accumulator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 7046-7054.

- [5] YE Yi, YIN Chenbo, GONG Yue, et al. Position control of nonlinear hydraulic system using an improved PSO based PID controller [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 83: 241-259.
- [6] ZHENG Jianming, ZHAO Shengdun, WEI Shuguo. Application of self-tuning fuzzy PID controller for a SRM direct drive volume control hydraulic press [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(12): 1398-1404.
- [7] CENTIN S, AKKAYA A V. Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system [J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(3): 465-476.
- [8] YOUSIF H M, GANESH K. Interval type-2 fuzzy position control of electro-hydraulic actuated robotic excavator [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(3): 437-445.
- [9] KALYONCU M, HAYDIM M. Mathematical modeling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servo system with internal leakage [J]. Mechatronics, 2009, 19(6): 847-858.
- [10] GUAN Cheng, PAN Shuangxia. Adaptive sliding mode control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters [J]. Control Theory and Applications, 2008, 16(11): 1275-1284.
- [11] YANG Xuebo, ZHENG Xiaolong, CHEN Yuhong. Position tracking control law for an electro-hydraulic servo system based on backstepping and extended differentiator [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(1): 132-140.
- [12] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制: 现状与挑战 [J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
- [13] XI Yugeng, LI Dewei, LING Shu. Model predictive control-status and challenges [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.
- [14] YUAN Haibo, NA H C, KIM Y B. Robust MPC-PIC force control for an electro-hydraulic servo system with pure compressive elastic load [J]. Control Engineering Practice, 2018, 79: 170-184.
- [15] KILIC E, DOLEN M, KOKU A B, et al. Accurate pressure prediction of a servo-valve controlled hydraulic system [J]. Mechatronics, 2012, 22(7): 997-1014.
- [15] 江爱朋. 大规模简约空间 SQP 算法及其在过程系统优化中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 10-12.

(下转第 107 页)