

基于 SVR 的多股簧机床张力控制

刘 青, 王时龙, 尹梦娇, 张 其

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对多股螺旋弹簧加工机床张力控制系统的非线性特性及存在干扰的问题, 提出了基于支持向量回归 (Support Vector Regression, 简称 SVR) 的有效抑制噪声的控制算法; 即在基于 SVR 的逆动力学建模中采取非线性松弛因子替代线性松弛因子, 抑制噪声在建模过程中的影响, 提高建模精度; 把系统逆模型作为前馈控制器, 构成伪线性系统, PID 控制器作为反馈控制, 组成有效抑制噪声的复合控制算法; 实验结果表明, 这种改进基于 SVR 的复合控制方式在多股螺旋弹簧张力控制系统中具有较好的控制精度和鲁棒性。

关键词: 多股螺旋弹簧张力控制系统; 支持向量回归; 松弛因子; 逆模型控制

Tension Control Based on Support Vector Regression in Stranded Wire Helical Spring Machines

Liu Qing, Wang Shilong, Yin Mengjiao, Zhang Qi

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Giving the nonlinear characteristics and interference in the tension control system in Stranded Wire Helical Spring Machines, a control algorithm based on support vector regression (SVR) was proposed to decrease noise. By replacing linear relaxation factor with nonlinear relaxation factor, and making the inverse model of the system as feed-forward controller and PID (Proportion Integration Differentiation) controller as feed-back controller, a compound control algorithm was constituted to decreasing noise. Experiment has demonstrated that the improved control method has a good control precision as well as good robustness in the tension control system in Stranded Wire Helical Spring Machines.

Keywords: tension control system in stranded wire helical spring machines; support vector regression; relaxation factor; inverse control

0 引言

多股螺旋弹簧 (简称多股簧) 是由多层多股钢丝拧制的钢丝绳卷绕而成的螺旋弹簧^[1], 见图 1。与普通单股螺旋弹簧相比, 具有强度高、减振效果好和服役寿命长等独特性能, 是航空发动机和自动武器等产品的关键零件^[2]。多股簧加工过程中各股钢丝承受的张力需严格控制, 否则将导致所加工的弹簧出现松散、变形等缺陷, 精高度、稳定好的张力控制方法是多股簧加工的关键技术^[3]。



图 1 多股螺旋弹簧

多股簧加工机床张力控制系统主要由控制器 ADAM-

5510、模拟输入模块 ADAM-5017H、模拟输出模块 ADAM-5024、称重传感器及其驱动器和磁粉离合器及其驱动器组成。钢丝张力通过人机交互界面下载到控制器 ADAM-5510, 称重传感器检测其实际张力, 并将检测信号输入 ADAM-5017H, 反馈给数字控制器。控制器 ADAM-5510 通过张力控制算法, 把控制输入信号和反馈信号处理后, 经过 ADAM-5024 输出, 控制磁粉离合器补偿张力差值。其结构如图 2 所示。

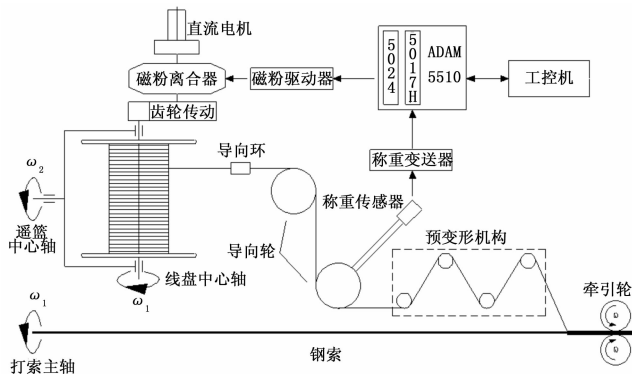


图 2 多股簧加工机床张力控制系统结构图

钢丝是绕在线盘上的, 而线盘在整个过程中都作三维旋转运动 (自转、绕摇篮中心轴旋转、绕拧索主轴旋转), 给钢丝张力的检测和控制带来了很大的困难。在多股簧的加工过程中, 磁粉在离心力的作用下分布不均, 产生迟滞效应, 给张力控制系统引入非线性特点。此外, 由于钢丝“跳丝”、回路干

收稿日期:2016-04-14; 修回日期:2016-05-24。

基金项目:国家自然科学基金项目(51375508); 国家科技支撑计划项目(2014BAF08B02)。

作者简介:刘 青(1990-),男,湖南衡阳常宁人,硕士研究生,主要从事机电一体化方向的研究。

王时龙(1966-),男,博士,教授/博士生导师,主要从事制造信息自动化/数控装备技术方向的研究。

扰、张力检测装置的重力和离心力影响等问题,实际检测过程中存在一定程度的噪声。因此,传统的控制算法在实施效率和控制性能上难以满足要求。

比较现有张力控制算法,周杰等^[4]研究的单一 PID (Proportion Integration Differentiation) 控制,在非线性系统中很难满足控制精度和要求;田志峰等^[5]研究的模糊控制算法,由于其模糊规则、模糊子集及隶属度函数的选择大多数取决于经验,缺少相应的理论根据,设计难度比较大。曹克强等^[6]研究的基于 SVR 的直接逆模型控制,建模精度高,简单易行,但由于控制系统是开环的,其抗干扰能力和鲁棒性不强;黄银蓉等^[7]提出了一种基于 LS-SVM 与 PID 复合的逆控制系统,能够克服直接逆模型控制鲁棒性不强的缺点。但是,由于多股弹簧张力控制系统在建模过程中存在干扰问题,使得基于传统的 SVR 逆动力学建模很难满足建模精度要求,而建模精度是影响逆模型控制的关键因素。

针对以上情况,本文基于 SVR 提出了一种改进的带 PID 补偿的逆动力学建模及控制的方法。本方法通过 SVR 对系统进行逆模型辨识建模,在建模过程中采用一种有效抑制噪声的 SVR,降低噪声和异常点对逆模型的泛化能力的影响,提高了建模精度。将逆模型作为前馈控制器,并且采用 PID 控制器进行反馈控制,克服直接逆模型控制鲁棒性不强的缺陷。实验结果表明,运用该张力控制,可以实现在多股螺旋弹簧加工过程中对张力的实时精确控制,达到加工工艺要求。

1 抑制噪声的 SVR

1.1 SVR 概述

支持向量回归^[8]是 Vapnik 提出的一种新型机器学习算法,具有全局最优、结构简单和泛化能力强等优点。SVR^[9]方法的基本原理是用非线性映射将数据映射到多维特征空间,在高维特征空间进行线性回归。

在基于 SVR 构建控制系统逆模型的过程中,考虑到多股弹簧张力控制系统存在干扰的问题,使得采集的训练样本中必然会存在噪声和异常点,这将使回归超平面过度弯曲,降低 SVR 的泛化能力,且导致计算复杂度增加,降低回归建模精度。为了降低这些因素对回归建模的影响,本文提出一种有效抑制噪声和异常点的改进 SVR 方法。

1.2 改进的 SVR 方法

本方法采用一种非线性松弛因子替代线性松弛因子以降低噪声对目标函数的影响,提高目标函数的回归精度。假设给定训练样本集 $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, $x_i \in R^d$, $y_i \in R$, 利用一个非线性映射 φ , 将数据 x 映射到多维特征空间 F , 并在这个空间进行线性逼近, 求出能够很好地逼近给定数据的映射 f 。根据 SVR 的基本原理^[10], 考虑到拟合存在误差, 引入非线性松弛因子 $\pi(\xi_i) \geq 0$ 和 $\pi(\xi_i^*) \geq 0$, 可将有效抑制噪声的 SVR 问题等价为解决如下的凸优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2}W^2 + C \sum_{i=1}^n (\pi(\xi_i) + \pi(\xi_i^*)) \\ \text{s.t.} \quad & W^T \varphi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ & y_i - W^T \varphi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ & \xi_i \geq 0 \\ & \xi_i^* \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, 常数 $C \geq 0$ 为惩罚参数, 用于控制模型复杂度和逼近误

差的折中。 $\pi(\xi_i), \pi(\xi_i^*)$ 为 $\mu = 0$ 的正态分布的分布函数, 是一个抑制噪声的非线性函数。其原理为用一个非线性松弛因子替代线性松弛因子, 把 $\pi(\xi_i), \pi(\xi_i^*)$ 的值域约束在某个小区间内, 以降低对应松弛变量 ξ_i, ξ_i^* 很大的噪声和异常点在目标函数 (1) 中的控制作用。这样构造出来的目标函数可实现对误差进行控制, 从而提高回归精度。即:

$$\pi(\xi_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\xi_i} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx, \pi(\xi_i^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\xi_i^*} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2)$$

当 $\xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0$ 时, $\pi(\xi_i), \pi(\xi_i^*) \in [0, 1]$ 。

为了求解带有线性约束的凸优化问题, 采用对偶理论, 把它转化成二次规划问题。建立 Lagrange 方程:

$$\begin{aligned} L(W, b, \xi, \xi^*) = & \frac{1}{2}W^2 + C \sum_{i=1}^n (\pi(\xi_i) + \pi(\xi_i^*)) - \\ & \sum_{i=1}^n \alpha_i [\xi_i + \varepsilon + y_i - W^T \varphi(x_i) - b] - \\ & \sum_{i=1}^n \alpha_i^* [\xi_i^* + \varepsilon + W^T \varphi(x_i) + b - y_i] - \\ & \sum_{i=1}^n (\xi_i \gamma_i + \xi_i^* \gamma_i^*) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\alpha_i, \alpha_i^* \geq 0, \gamma_i, \gamma_i^* \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

为了求解 $L(W, b, \xi, \xi^*)$ 的最小值, 对 $L(W, b, \xi, \xi^*)$ 关于 W, b, ξ, ξ^* 求偏导数, 有:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial W} = 0 \rightarrow W = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) \varphi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 \rightarrow C\pi'(\xi_i) - \alpha_i - \gamma_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i^*} = 0 \rightarrow C\pi'(\xi_i^*) - \alpha_i^* - \gamma_i^* = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,

$$\pi'(\xi_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\xi_i^2}{2\sigma^2}}, \pi'(\xi_i^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\xi_i^{*2}}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

即 $\pi'(\xi_i), \pi'(\xi_i^*)$ 为 $\mu = 0$ 的正态分布概率密度函数。当 $\xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0$ 时, $\pi'(\xi_i), \pi'(\xi_i^*) \in (0, 1/\sqrt{2\pi\sigma})$ 。

将式 (4) 代入式 (3), 根据 Wolf 对偶^[11]的定义, 在 Karush-Kuhn-Tucker (KKT)^[12]条件下, 得到 Lagrange 的对偶形式为:

$$\begin{aligned} \max Q(\alpha, \alpha^*, \xi_i, \xi_i^*) = & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) \\ & \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) - \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^n y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \\ & C \sum_{i=1}^n [(\xi_i \pi'(\xi_i) + \xi_i^* \pi'(\xi_i^*)) - (\pi(\xi_i) + \pi(\xi_i^*))] \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq C\pi'(\xi_i), 0 \leq \alpha_i^* \leq C\pi'(\xi_i^*), i = 1, 2, \dots, n$$

在约束条件 $0 \leq \alpha_i \leq C\pi'(\xi_i), 0 \leq \alpha_i^* \leq C\pi'(\xi_i^*)$ 下, 由于 $\pi'(\xi_i), \pi'(\xi_i^*)$ 在 $\xi_i, \xi_i^* \in [0, +\infty)$ 上均单调递减, 使得具有较大 ξ_i, ξ_i^* 的可能异常点对应的 α_i, α_i^* 被一个较小的上界约束, 因此降低了噪声对回归目标函数的影响, 提高了回归建模的

精度。

对于对偶问题 (6), 可以通过训练数据用标准 SVR 求出 ξ_i, ξ_i^* , 对偶问题可以化简成下式:

$$\begin{aligned} \max Q(\alpha, \alpha^*, \xi_i, \xi_i^*) = & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) \\ & \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) - \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^n y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \quad (7) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ & 0 \leq \alpha_i \leq C\pi'(\xi_i), 0 \leq \alpha_i^* \leq C\pi'(\xi_i^*), i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

式中, ξ_i, ξ_i^* 为已知。对于求解问题 (7), 先选取一个初始参数 σ_0 , 求出 $W, \alpha_i, \alpha_i^*, b$, 得到 $\sigma = \sigma_0$ 的拟合函数。定义目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^n (W^T \varphi(x_i) + b - y_i)^2 \quad (8)$$

即以测试数据的拟合误差的平方和最小为目标, 选取合适的步长对 $\pi'(\xi_i), \pi'(\xi_i^*)$ 中的参数 σ 进行优化, 代入 (7) 式, 即可简化求解得到最优 $W, \alpha_i, \alpha_i^*, b$ 。

定义核函数: $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$, $K(x_i, x_j)$ 为满足 Mercer 条件的对称函数, 可采用线性核、多项式核、B 样条核、高斯基 RBF 核等。因此, 采用核函数 $K(x_i, x_j)$ 的非线性函数拟合为:

$$f(x) = W^T \varphi(x) + b = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, x) + b \quad (9)$$

2 基于 SVR 的逆动力学建模及其控制

2.1 多股簧机床张力控制系统原理

多股簧加工机床的张力控制系统原理图如图 3。钢丝张力通过工控机的人机交互界面设定, 其控制信号输入类型为方波输入。张力传感器检测其实际张力, 并将检测信号输入 A/D 转换器, 反馈给数字控制器。数字控制器通过带 PID 补偿的基于改进的 SVR 控制算法, 把控制输入信号和反馈信号处理后, 经过 D/A 转换器输出, 控制磁粉离合器补偿张力差值。

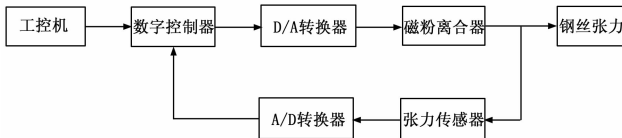


图3 张力控制系统原理图

在多股螺旋弹簧加工机床张力控制系统中, 本文需要对图 3 中的信号输出线路, 即数字控制器→D/A 转换器→磁粉离合器→钢丝张力建立系统的逆动力学模型。

2.2 改进的 SVR 在逆动力学建模中的应用

对于单输入单输出 (SISO) 的非线性系统其逆模型^[13] 为:

$$u(k) = f[y(k+1), \dots, y(k-n), u(k-1), u(k-m)] \quad (10)$$

式中, y 为系统输出; u 为系统输入; n 为系统阶次; m 为系统输入延迟; f 为一非线性函数。

令:

$$\begin{cases} X(k) = [y(k+1), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m)] \\ Y(k) = f(X(k)) \end{cases} \quad (11)$$

构造训练样本时, 采用正弦输入信号作为系统的辨识信号。对于采集到的对实验数据 $\{X(k), Y(k)\} (k = 1, \dots, L)$, 采用第一节改进的 SVR 方法, 可以得到与式 (9) 类似的系统精确逆模型:

$$u(k) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) K(X(i), X(k)) + b \quad (12)$$

基于 SVR 的系统逆模型辨识结构如图 4 所示, 图 4 中 u 为张力控制系统的辨识输入信号; y 为系统的输出; $\hat{u}(k)$ 为 SVR 的建模输出; TDL 表示多头延迟系统。

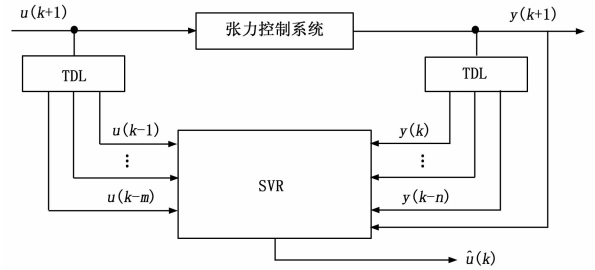


图4 基于SVR的张力控制系统逆模型辨识建模结构

2.3 带 PID 补偿的逆模型控制

带 PID 补偿的逆模型控制算法结构原理如图 5。从图中可以看出, 控制算法由逆模型控制器^[14] 和 PID 控制器组成。其中, 逆模型控制器与原系统串联起来构成一个伪线性系统, 其复合而成的系统输入输出关系是线性的。为了消除直接逆模型控制模型辨识误差, 以及外界干扰的影响, 使用 PID 控制器作为补偿, 形成闭环控制, 加强了系统的动态性能和鲁棒性。

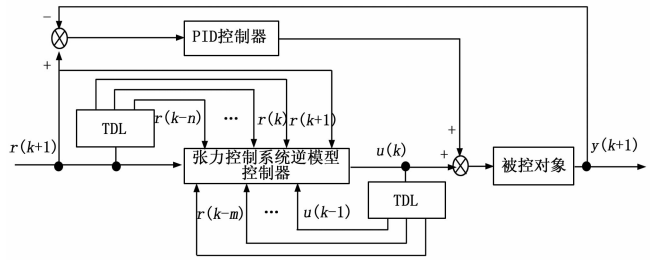


图5 多股簧张力控制系统结构

3 实验验证及结果分析

获取数据样本。利用 NI 数据采集系统对逆动力学建模对象进行数据采集, 经过理论分析和交叉验证, 在获取数据样本时, 采用回归向量 $X(k) = [y(k+1), y(k), y(k-1), u(k-1)]$, 组成 500 个样本 $\{X(k), Y(k)\}_{k=1}^{500}$, 其中前 300 个作为训练样本, 后 200 个用作测试样本。

建立系统的逆动力学模型。按照第二节逆动力学建模的方式, 前 300 个训练样本用标准 SVR 求出 ξ_i, ξ_i^* ; 后 200 个测试样本进行拟合, 以拟合误差的平方和最小为目标, 选取合适的步长对 $\pi'(\xi_i), \pi'(\xi_i^*)$ 中的参数 σ 进行优化, 代入式 (6), 即可得到逆动力学模型式 (12)。回归中采用高斯核函数 $K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\delta^2}\right)$, 核宽度 $\delta = 3.5$, 常数 $C = 100, \varepsilon = 0.03$ 。通过参数优化, 选取 $\sigma = 0.2$ 。

基于标准 SVR 方法和基于改进的 SVR 方法的逆模型输出如图 6 和图 7, 与测试样本集的误差校验情况分别如图 8 和图

9. 从图中可以看出标准 SVR 方法的拟合误差在 $\pm 6\%$ 以内, 改进 SVR 方法的拟合误差在 $\pm 3\%$ 以内, 改进 SVR 方法的拟合结果较好且精度较高, 由此可见, 基于改进的 SVR 方法在逆动力学建模中具有较好的辨识精度和泛化能力。

系统串联, 构成伪线性系统, 把输出作为反馈信号与输入进行比较, 其偏差通过 PID 控制器调节, 选择适当的 PID 参数, 建立系统的控制算法, 编写控制程序。本文采用典型的方波信号作为系统的输入, 来测试控制算法在张力控制系统中的可靠性和有效性, 对比实际输出与输入的差别, 校验其跟踪效果。方波信号 $2 * \text{sign}(\sin(0.1 * \pi * t) + \pi) + 5$, 带 PID 补偿的基于标准 SVR 和改进 SVR 方法的逆模型控制算法的跟踪结果分别如图 10 和图 11。表 1 为两种控制算法在方波输入信号下的各项动静态性能指标。可以看出, 基于改进 SVR 方法的逆模型控制算法在动态和静态性能上比基于标准 SVR 方法的逆模型控制算法要优越, 控制效果更好。

表 1 带 PID 补偿的基于标准 SVR 和改进 SVR 方法的逆模型控制算法性能指标

方法	上升阶段			下降阶段		
	超调量 /%	调节时 间/s	稳态误 差/N	超调量 /%	调节时 间/s	稳态误 差/N
标准 SVR	3.58	1.7	8.4	1.5	2.3	2.9
改进 SVR	1.23	1.1	1.9	0.23	1.8	0.7

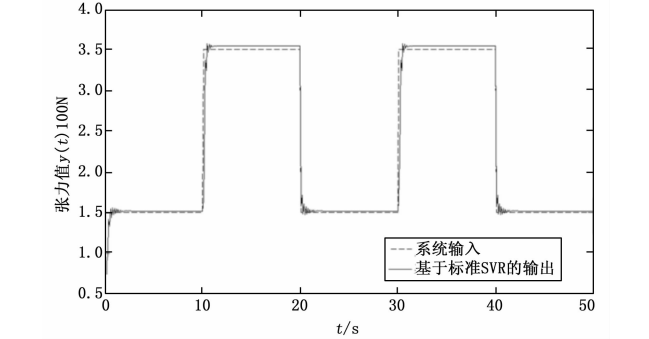


图 10 基于标准 SVR 的系统输入输出

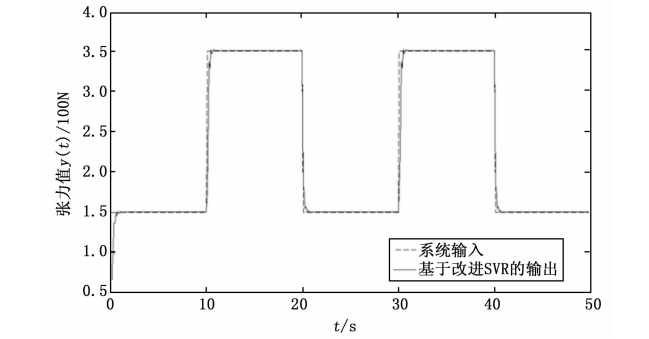


图 11 基于改进 SVR 的系统输入输出

图 12 为在干扰作用下基于改进 SVR 带 PID 补偿的控制算法的系统输出。控制程序中分别在 $t = 15\text{ s}$ 时加上一个 $+50\text{ N}$ 的干扰信号且持续 0.5 s , 在 $t = 16\text{ s}$ 时加上一个 -50 N 的干扰信号且持续 0.5 s 。在图 12 中可以看出, 在干扰作用下, 系统的输出只出现了一个幅值小于 1 N 、调节时间小于 1 s 的波动, 说明系统的抗干扰能力很强。可以看出, 带 PID 补偿的基于改进 SVR 方法的逆模型控制算法在每股簧张力控制系统中控制性能好, 跟踪精度高, 鲁棒性好, 抗干扰能力强。

(下转第 106 页)

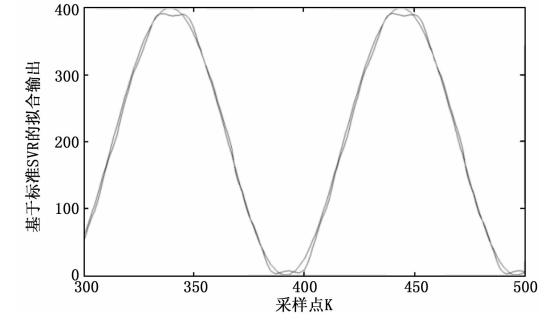


图 6 基于标准 SVR 方法的拟合输出

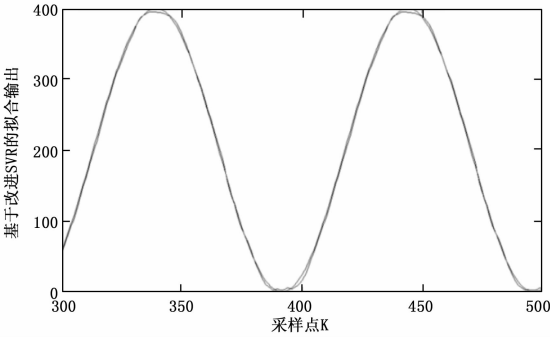


图 7 基于改进 SVR 方法的拟合输出

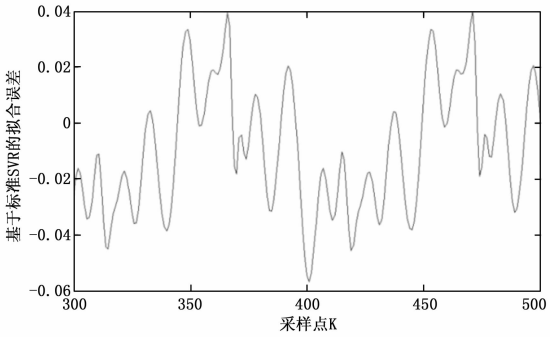


图 8 基于标准 SVR 方法的拟合误差

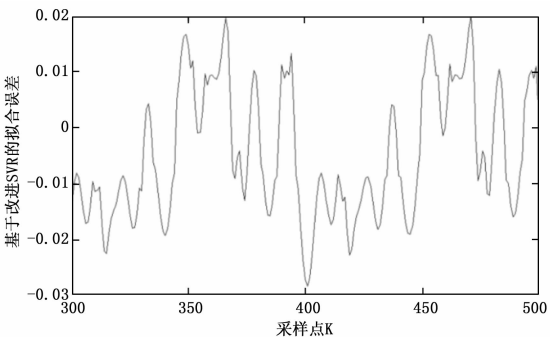


图 9 基于改进 SVR 方法的拟合误差

把求出的逆动力学模型 (12) 作为逆模型控制器与原控制