

文章编号:1000-582X(2008)08-0842-06

# 基于最小二乘支持向量机的防抱死制动控制方法

冯辉宗, 郑太雄, 李 锐

(重庆邮电大学 自动化学院, 重庆 400006)

**摘 要:**以车轮参考滑移率和角加速度作为输入向量,以制动轮缸的制动压力作为输出向量,设计了基于最小二乘支持向量机(LS-SVM)的汽车防抱死制动系统(ABS)控制器,利用支持向量对控制器进行训练得到控制器的参数。设计了包括输入层、控制层和输出层的汽车防抱死制动系统,系统以各轮的速度作为输入向量,经过控制层的运算得到各轮的制动压力,然后采用 PWM(pulse width modulation)方法控制轮缸压力,进而实现防抱死控制。搭建了汽车 ABS 测控系统,参照国际标准,在不同条件下进行道路试验。试验结果表明,基于 LS-SVM 的汽车防抱死制动控制方法具有良好的制动平稳性和自适应性,是一种有效的新的 ABS 控制方法。

**关键词:**防抱死制动系统;最小二乘支持向量机;控制参数;道路实验

**中图分类号:**U463.526

**文献标志码:**A

## Automobile anti-lock braking system control based on a least squares support vector machine

FENG Hui-zong, ZHENG Tai-xiong, LI Rui

(Automation Department, Chongqing University of Posts and Telecommunications,  
Chongqing 400065, P. R. China)

**Abstract:** Using the referenced slip rate and angle acceleration of the wheel as input vectors and the braking pressure as an output vector, an automobile anti-lock braking system (ABS) controller based on a least squares support vector machine (LS-SVM) was designed. Training the LS-SVM controller using the supporting vector, the parameter of the controller was calculated. An anti-lock braking system was designed that includes an input layer, a control layer, and an output layer. Using wheel speed as an input, the braking pressure of each wheel was calculated. The pulse width modulation (PWM) method was used to control the braking pressure, and thereby to bring ABS control. An automotive ABS test and control system was constructed. Road tests under different conditions were completed according to international standards. Test results show that an anti-lock braking control method based on LS-SVM has good braking stability and adaptability. It is an effective new ABS control method.

**Key words:** anti-lock braking system; least squares support vector machine; control parameters; road test

汽车防抱死制动系统(ABS)对获得有效的制动安全性和操纵稳定性具有重要意义。目前,国内外

对 ABS 的控制开展了许多研究工作,普遍采用逻辑门限控制<sup>[1-2]</sup>,其门限值固定的,控制的自适应性

收稿日期:2008-03-12

基金项目:国家 863 计划资助项目(2006AA11A1C1);重庆市科委重点资助项目(2006AB2026)

作者简介:冯辉宗(1972-),男,重庆邮电大学副教授,博士,主要从事汽车电子控制、控制理论与控制工程研究,  
(E-mail)fenhz@cqupt.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

不强。也有采用 PID、模糊、滑模变结构等控制方法的<sup>[3-4]</sup>,这些方法各有优缺点,并且都需要经过大量的路试和经验来调整控制参数。

支持向量机(SVM)<sup>[5-6]</sup>是 Vapnik 在统计学习理论上提出的一种新型机器学习方法,目前已应用于模式识别、函数估计、优化控制等多个领域<sup>[7-8]</sup>。将 SVM 应用于控制方法的研究,是智能控制的一个崭新的研究方向,具有广阔的应用前景<sup>[9-11]</sup>。将智能控制方法应用于 ABS 控制是 ABS 控制的发展趋势。为了克服传统的 ABS 控制方法需要大量的经验并且开发周期长的缺点,笔者利用最小二乘支持向量机研究汽车防抱死制动系统的控制问题,并应用于道路实验证明该控制方案的有效性。

### 1 最小二乘支持向量机回归

设给定训练样本  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \subset R^n \times R$ , 利用一个非线性映射  $\Phi$  将数据映射到高维特征空间,在高维特征空间进行线性回归。设 SVM 回归为

$$f(x) = \omega \cdot \Phi(x) + b, \tag{1}$$

式中:  $\omega \in R^n$ , 偏置  $b \in R$ 。

在最小二乘支持向量回归估计中,回归问题变为

$$\min \frac{1}{2} \omega^2 + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^n \xi_i^2, \tag{2}$$

$$\text{s. t. } \omega^T \varphi(x_i) + b + \xi_i = y_i, i = 1, 2, \dots, n. \tag{3}$$

式中:  $\xi_i \geq 0$  为松弛因子,  $\gamma > 0$  为惩罚参数。

引入拉格朗日函数求解:

$$L(\omega, b, \xi, a) = \frac{1}{2} \omega^2 + \gamma \sum_{i=1}^n \xi_i^2 - \sum_{i=1}^n a_i (\omega \cdot \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i), \tag{4}$$

其中  $a_i$  是拉格朗日乘子。

根据 KKT 条件有如下等式成立:

$$\frac{\partial L}{\partial \omega} = 0, \frac{\partial L}{\partial b} = 0, \frac{\partial L}{\partial \xi} = 0, \frac{\partial L}{\partial a} = 0. \tag{5}$$

进一步可得

$$\begin{cases} \omega = \sum_{i=1}^n a_i \varphi(x_i), \sum_{i=1}^n a_i = 0, a_i = \gamma \xi_i; \\ \omega^T \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0. \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)消去  $\omega$  和  $\xi$ , 优化问题转化为求解式(7)方程

$$\begin{bmatrix} 0 & e^T \\ e & Q + \gamma^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix}, \tag{7}$$

式中:  $e$  为元素为 1 的  $n \times 1$  向量,  $I$  为  $n \times n$  的单位

阵,  $a = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T, y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T, Q = \varphi(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j), \varphi(\cdot)$  为满足 Mercer 条件的对称函数。笔者采用 RBF 核函数

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\sigma^2}\right). \tag{8}$$

式(7)的线性系统可用最小二乘法求解,则线性回归函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i K(x, x_i) + b. \tag{9}$$

## 2 基于 LS-SVM 的 ABS 控制

### 2.1 基于 LS-SVM 的 ABS 控制器

以车轮参考滑移率和角加速度作为控制器的输入,以制动轮缸的制动压力为输出,设计了基于 LV-SVM 的具有三层网络结构的 ABS 控制器,如图 1 所示。

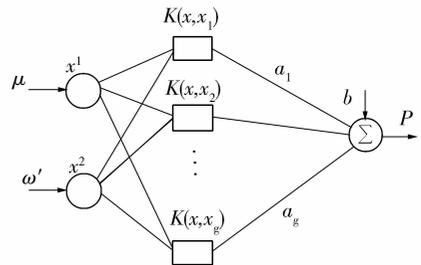


图 1 基于 LS-SVM 的 ABS 控制器

#### 2.1.1 输入层

$$x = (x^1, x^2) = (\mu, \omega'),$$

式中:  $\mu$  为车轮参考滑移率;  $\omega'$  为车轮角加速度。

#### 2.1.2 隐含层

二维输入向量与支持向量进行核运算。

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{\sigma^2}\right),$$

式中:  $\|x - x_i\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x^k - x_i^k)^2}$ ;  $\sigma$  为核宽度。

#### 2.1.3 输出层

$$f(x) = \sum_{i=1}^g a_i K(x, x_i) + b = P,$$

式中:  $g$  是支持向量的个数;  $P$  是制动轮缸的压力。

### 2.2 支持向量机的学习

基于 LS-SVM 的 ABS 控制器需要经过学习建立车轮参考滑移率、车轮角加速度和制动压力之间的映射,为此设计了如下学习方案,如图 2 所示。

具体步骤如下:

1) 采用某款成熟的 ABS 的 ECU, 在不同的路

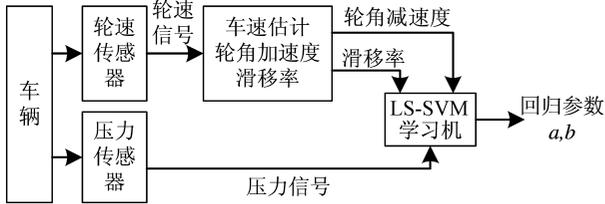


图2 基于LS-SVM的ABS控制器的学习

面条件下做道路实验。实验中,提取轮速信号,并用压力传感器测量制动轮缸的压力,得到实验数据。

2)采用笔者提出的参考车速计算方法计算参考车速,进而得到车轮的参考滑移率,利用差分法求解车轮的角加速度,这些数据与对应的制动轮缸的压力构成样本数据。

3)利用样本数据对支持向量机控制器进行训练,得到控制器中的各参数。

### 2.3 ABS控制系统

基于LS-SVM的ABS控制器可实现对单个车轮的制动控制,要实现全车的安全制动控制还需要设计全车的ABS制动控制系统。为此,采用前轮独立控制,后轮低选控制,设计了ABS控制系统,系统结构如图3所示。

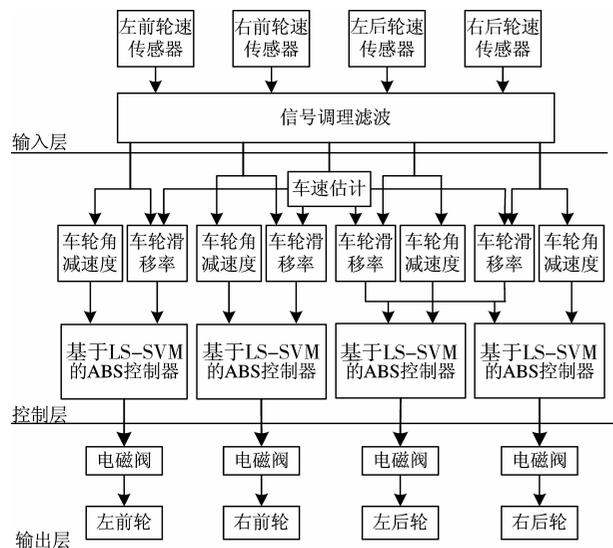


图3 ABS控制系统

ABS控制系统具有3层控制结构。

1)输入层。提取轮速传感器的脉冲信号,并对脉冲信号进行调理和滤波处理。

2)控制层。首先根据4个车轮的轮速,计算车轮的角加速度并估计参考车速,根据车轮的角

速度和参考车速计算车轮参考滑移率<sup>[12-13]</sup>,然后直接以车轮的参考滑移率和角加速度作为控制器的输入,输出制动轮缸的制动压力。具体方法为:

①车速估计。研究初期用逻辑门限控制进行了大量的ABS道路试验,得到了轮速变化曲线。根据制动压力、轮速和地面附着力的关系,可将该曲线大致分为增压、减压和保压3种区间<sup>[14-15]</sup>,见图4。

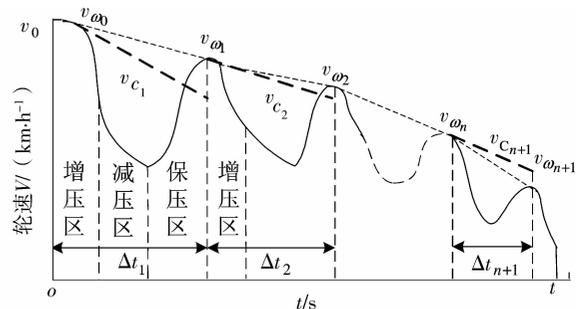


图4 参考车速求解

轮速变化过程反映了制动过程中轮胎与地面接触的力学特性,不同的路面和不同的轮胎,区间变化规律基本一致,只是在区间分界点上有所不同。由此,提出一种取制动过程中轮速峰峰值之间的连线来求解参考车速的方法。因为在轮速峰值点处,车轮压力位于保压和增压的交界点,轮速回升到局部最高,此轮速峰值最可能与当前车速接近,是用来求解参考车速的最佳点。由图3,参考车速可由式(10)求出

$$v_{c_{n+1}} = v_{\omega_n} + (v_{\omega_n} - v_{\omega_{n-1}})t_{n+1}/\Delta t_n; \quad n=0,1,2,\dots \quad (10)$$

式中: $v_{c_{n+1}}$ 是第 $n$ 和第 $n+1$ 时刻间的参考车速, $v_{\omega_{n-1}}$ , $v_{\omega_n}$ 是第 $n-1$ 和第 $n$ 时刻的轮速峰值, $t_{n+1}$ 是 $v_{c_{n+1}}$ 距 $v_{\omega_n}$ 的时间, $\Delta t_n$ 是 $v_{\omega_{n-1}}$ 距 $v_{\omega_n}$ 的时间,特别地,当 $n=0$ 时, $v_{c_1} = v_{\omega_0} + a_0 t_1$ , $a_0$ 为常数,一般取中等附着系数路面下车身减速度经验值。这样,利用式(10),可以不断根据变化的轮速峰值信号来计算和修正参考车速,使之接近真实的车速。

②参考滑移率。求得参考车速后,很容易得到参考滑移率

$$S_{c_{n+1}} = (v_{c_{n+1}} - R\omega_{n+1})/v_{c_{n+1}}, \quad (11)$$

式中: $S_{c_{n+1}}$ 是第 $n$ 和第 $n+1$ 时刻间的参考滑移率; $\omega_{n+1}$ 是第 $n$ 和第 $n+1$ 时刻间车轮的角速度。

③车轮的控制。对于2个前轮,将每个车轮的参考滑移率和车轮的角加速度作为各自控制器的输

入,输入基于 LS-SVM 的 ABS 控制器;对于 2 个后轮,取 2 个后轮中易于抱死的车轮的滑移率和车轮角减速度作为各自控制器的输入,输出得到各制动轮缸的制动压力。

3)输出层。根据控制层的输出的制动压力,采用 PWM 控制方法控制制动轮缸的压力,将车轮的参考滑移率控制在理想的范围内,实现安全制动。

### 3 道路实验

#### 3.1 试验条件

采用 Microchip 公司的 dsPIC16 位数字信号控制器芯片作为处理器,设计 ECU。设计了汽车 ABS 控制软件和试验数据采集分析软件,加上 4 个轮速传感器、控制器 (ECU)、数据采集箱等,搭建汽车 ABS 测试控制系统,见图 5。

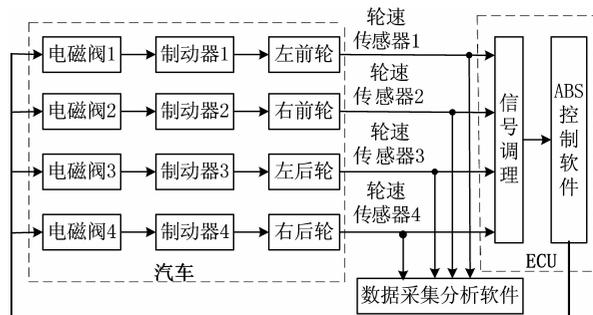


图 5 ABS 道路测试控制系统框图

#### 3.2 道路实验结果

以某重型卡车为实验对象,在多种路面下进行道路实验。实验时,当轮速小于 5 km/h 时,控制电磁阀处于加压状态,使车轮直接抱死,从而缩短制动时间。为了说明问题,提取汽车在 3 种不同路面条件下的轮速信号,如图 6-8 所示。

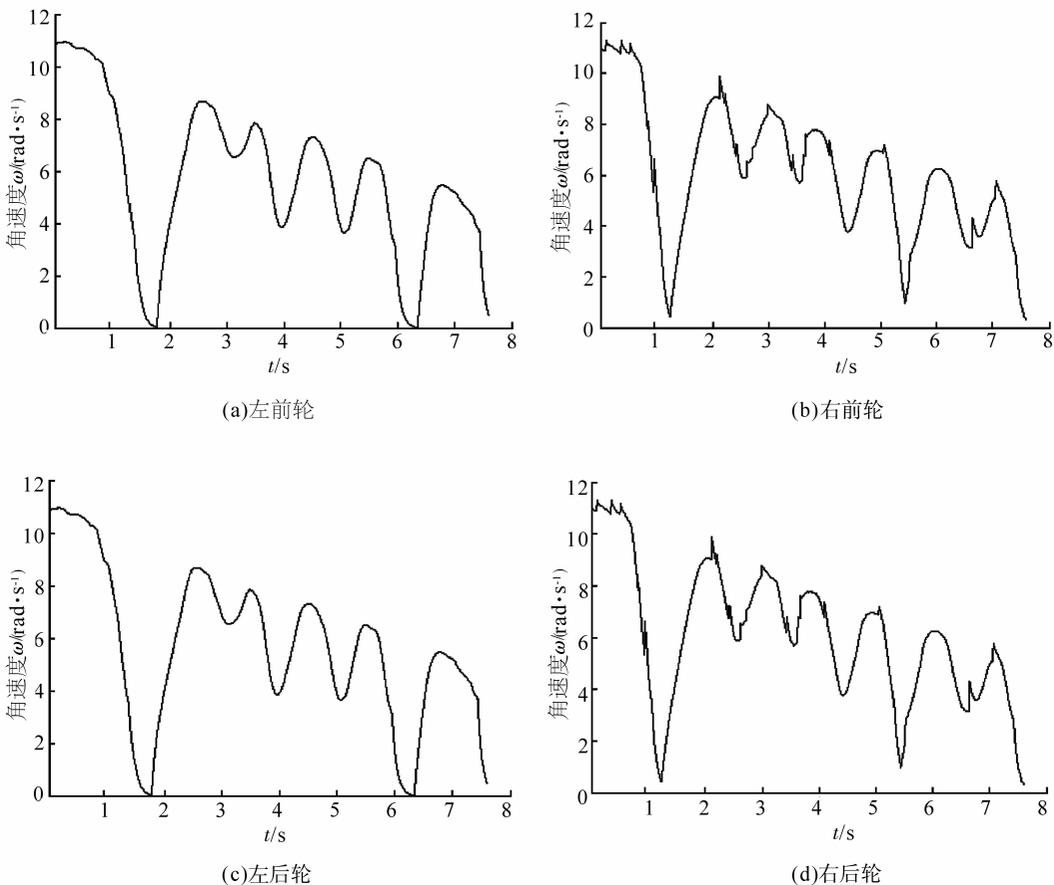


图 6 低附着系数路面轮速曲线

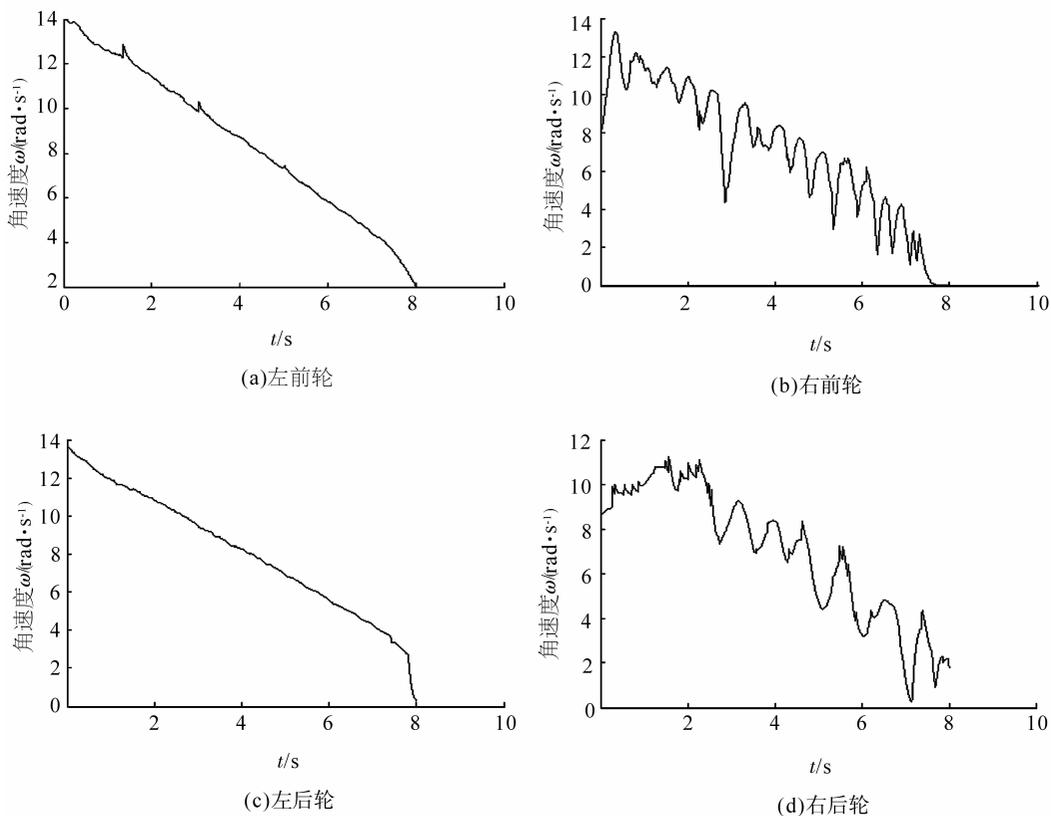


图 7 对开(左高右低)路面轮速曲线

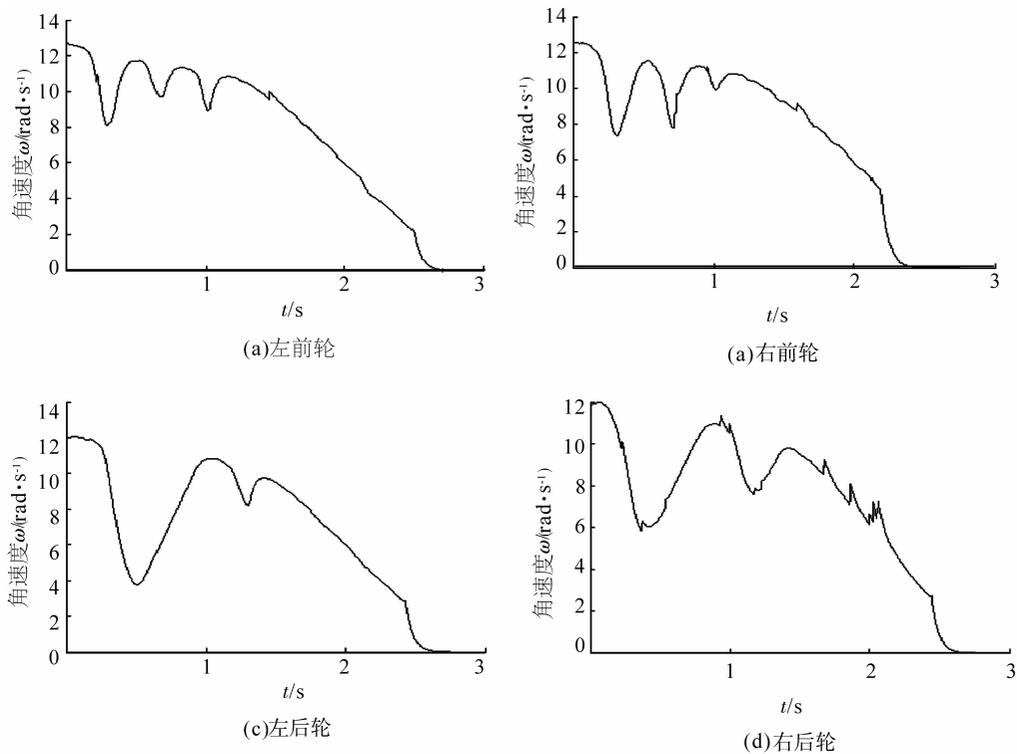


图 8 对接(从低到高)路面轮速曲线

### 3.3 实验分析

由图 6-8 可见,汽车在制动过程中没出现车轮抱死现象,符合国际标准对汽车制动安全的要求。由图 7 可见,汽车在对开路面上制动,左前轮和左后轮都处于制动不足状态,这样就使左前轮和左后轮的滑移率较小,因此受到的地面附着系数也小,有效地抑止了汽车跑偏。由图 8 可见,汽车先在低附着系数路面制动,在制动 1 s 左右行驶到高附着系数路面,ABS 控制系统根据车轮在不同路面条件下的滑移率和角加速度,采取了不同的控制指令,避免了车轮的抱死。图 6-8 同时表明,虽然控制系统没有进行路面辨识,但 ABS 控制系统在各种路面下采取了恰当的控制策略,说明基于支持向量机的 ABS 控制系统能够适应不同的路面条件,具有较好的适应性和可靠性。

## 4 结 语

笔者提出基于 LS-SVM 的 ABS 控制方法,在此基础上设计了 ABS 控制系统,并在不同的路面条件下进行了道路实验,结果表明该方法只需利用样本数据对控制器进行学习,就可得到控制器参数,不需经过大量的道路实验,是一种较为有效的新的 ABS 控制方法,可望减少设计新车 ABS 控制算法时大量的道路匹配试验工作,提高开发效率。

### 参考文献:

- [1] 皇甫世汇,鲍祥英. 汽车 ABS 的模糊预测控制策略研究[J]. 机电工程,2006(10):23-25.  
HUANGFU SHI-HUI, BAO XIANG -YING. The development of a fuzzy predicative control system for automotive anti-lock braking system[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2006(10):23-25.
- [2] 王润琪,言志信,蒋科军. 汽车气压 ABS 模糊控制应用研究[J]. 中南林业学院学报,2006(6):127-131.  
WANG RUN-QI, YAN ZHI-XIN, JIANG KE-JUN. Applied research on the fuzzy control over automobile air ABS [J]. Journal of Central South Forestry University,2006(6):127-131.
- [3] 宋健,沈俊,孔磊. 四驱车辆 ABS 控制算法[J]. 江苏大学学报,2006,27(4):320-323.  
SONG JIAN, SHEN JUN, KONG LEI. ABS control algorithm for four-wheel drive cars [J]. Journal of Jiangsu University,2006,27(4):320-323.
- [4] 朱余清. 四轮驱动 ABS 控制方法分析[J]. 汽车科技,2004,7(4):18-20.  
ZHU YU-QING. ABS control methods of the 4WD vehicle[J]. Automobile Science and Technology,2004,7(4):18-20.
- [5] 程启明,王勇浩. 基于最小二乘算法的模糊支持向量机

控制器及其应用[J]. 中国电机工程学报,2007,27(8):76-80.

CHENG QI-MING, WANG YONG-HAO. The fuzzy support vector network controller based on least square algorithms and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(8):76-80.

- [6] 张浩然,汪晓东. 回归最小二乘支持向量机的增量和在线式学习算法[J]. 计算机学报,2006,29(3):400-406.  
ZHANG HAO-RAN, WANG XIAO-DONG. Incremental and online learning algorithm for regression least squares support vector machine[J]. Chinese Journal of Computer, 2006,29(3):400-406.
- [7] 袁小芳,王耀南,孙炜. 一种模糊支持向量机控制器的研究[J]. 控制与决策,2005,20(5):537-540.  
YUAN XIAO-FANG, WANG YAO-NAN, SUN WEI. On fuzzy support vector machine controller[J]. Control and Decision,2005,20(5):537-540.
- [8] KUH A, De WILDE P. Comments on "pruning error minimization in least squares support vector machines"[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2007, 18(2):606-609.
- [9] ZHANG L, ZHOU W D, JIAO L C. Wavelet support vector machine [J]. IEEE Transaction on Sysyems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics,2004,34(1):34-39.
- [10] LI J Z, LIU H X, YAO X J, et al. Structure-activity relationship study of oxindole-based inhibitors of cyclin-dependent kinases based on least-squares support vector machines[J]. Analytica Chimica Acta,2007, 581(2):333-342.
- [11] HUO H B, ZHU X J, CAO G Y. Nonlinear modeling of a SOFC stack based on a least squares support vector machine[J]. Journal of Power Sources,2006,162(2):1220-1225.
- [12] YANG D F, FENG Z H, MA D S, et al. Development of anti-lock brake system in virtual environment[J]. IEEE International,2004,12:131-135.
- [13] MI C T, LIN H, ZHANG Y. Iterative learning control of antilock braking of electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transation on Control System Technology, 2005,54(2):486-494.
- [14] LIN C M, HSU C F. Self-learning fuzzy sliding-mode control for antilock braking systems [J]. IEEE Transation on Vehicular Technology, 2003, 11(2):273-278.
- [15] KULKARNI A, JAYARAMAN V K, KULKARNI B D. Control of chaotic dynamical systems using support vector machines[J]. Physics Letters A(S0009-2614),2003,317:429-435.

(编辑 张 苹)