

基于 ε -支持向量回归理论的区域交通信号智能控制

游子毅^{1,2*}, 陈世国^{1,2}, 王 义^{1,2}

(1. 贵州师范大学 物理与电子科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州省教育厅汽车电子技术特色重点实验室, 贵阳 550001)

(* 通信作者电子邮箱 youziyi00@foxmail.com)

摘 要: 城市交通信号控制是当前智能交通领域的研究热点之一。针对区域交通信号协同控制的实时性和准确性, 提出一种基于 ε -支持向量回归(SVR)非线性回归理论的智能控制方法(ICSRTS)。该方法在无线传感网络结构的基础上结合已有的数据汇聚算法, 并采用分簇策略将区域交通控制系统建模成一类集成信息调度与控制的离散切换系统。在离散切换系统中, 不仅考虑了数据包传输的网络时延和丢包率, 而且观测器利用改进的 ε -SVR 训练方法实现对多数据源融合的交通信号状态的在线预测并通过控制器进行总体协调控制。运用 Lyapunov 函数方法验证了该系统的渐近稳定性及其可调度性。仿真结果表明, ICSRTS 方法相比普通模糊神经网络控制和普通 ε -SVR 预测算法在交叉口平均延误时间方面具有较好的性能。因此, 该方法能实时、有效地对区域交通信号进行协调控制, 从而减少了区域内的交通拥堵和能源消耗。

关键词: 交通信号系统; 区域交通控制; 交通状态预测; ε -支持向量回归理论; Lyapunov 函数

中图分类号: TP3 **文献标志码:** A

Intelligent control based on ε -support vector regression theory for regional traffic signal system

YOU Ziyi^{1,2*}, CHEN Shiguo^{1,2}, WANG Yi^{1,2}

(1. School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang Guizhou 550001, China;

2. Key Laboratory of Special Automotive Electronics Technology of the Education Department of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550001, China)

Abstract: Intelligent control of urban traffic signal is an important element of intelligent transportation system. In order to meet the real-time and accuracy for the regional traffic signal coordinated control, this paper presented an Intelligent Control Strategy for Regional Traffic Signal (ICSRTS) based on ε -SVR (Support Vector Regression) nonlinear regression theory. Combining with the existing data aggregation algorithm, ICSRTS was based on the wireless sensor network structure, and it adopted the clustering strategy to create a model of discrete switching system, which integrated the information scheduling and control for the regional traffic system. In the discrete switching system, the network delay and packet loss rate for data transmission were considered, furthermore, the observer used the modified ε -SVR theory to realize the online prediction of the multi-source data based traffic state, then the controller carried out coordination control of the overall traffic signal. The asymptotic stability of discrete switching system was analyzed using Lyapunov function. Simulation results show that ICSRTS has better performance in the intersection average delay time compared with ordinary fuzzy neural control and ordinary ε -SVR prediction algorithm. Therefore, this method can realize the regional traffic signal coordinated control in real-time and effectively, and reduce the area of traffic congestion and energy consumption.

Key words: traffic signal system; regional traffic control; traffic state prediction; ε -SVR (Support Vector Regression) theory; Lyapunov function

0 引言

智能交通系统是解决现代交通问题最有效的途径之一^[1]。交通信号控制是其子系统“先进的交通管理系统”的重要研究内容, 已成为智能交通领域的研究热点之一。

交通信号控制的目的表现在以下两个方面: 1) 缓解交通拥堵, 减少交通事故; 2) 减少机动车因停车次数而造成的环境污染, 减低能耗。交通信号控制技术发展至今, 形成了区域协调信号控制、集中控制和分层控制的主导控制系统^[2-4]。这 3 种系统对缓解城市问题起了很大作用, 但仍不能完全适

应我国城市交通系统的发展: 1) 对我国交通流运行特性的预判不足; 2) 以数学模型为基础不能很好地满足实时控制的需求; 3) 交叉口信号配时存在局限性。交通信号控制系统的研究和开发, 需要在借鉴国外先进控制技术的基础上进一步结合我国交通环境的特点。不断扩大的城市规模和日益严重的交通问题向城市交通控制技术提出了更高的要求。

目前, 人工智能技术、现代控制技术等在城市交通控制领域应用广泛。由于道路交通系统的复杂性以及动态分配的实时性, 城市交通控制应采用动态反馈控制。然而, 交通系统的非线性和随机性使得建立在动态反馈系统上的控制算法很

收稿日期: 2014-12-10; 修回日期: 2015-01-21。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61262007); 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合 J 字[2013]2222 号); 贵州师范大学博士科研启动基金资助项目。

作者简介: 游子毅(1982-), 男, 贵州贵阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 无线网络、安全协议; 陈世国(1969-), 男, 贵州贵阳人, 教授, 博士, 主要研究方向: 网络信息处理; 王义(1957-), 男, 贵州贵阳人, 教授, 博士, 主要研究方向: 智能网络控制。

难用数学模型方法描述。因此,相关人工智能方法的应用倍受学术界的重视。在已见报道中,文献[5]提出了一种交通信号模糊控制方法适用于四相位单交叉路口,该模糊控制器的控制模式直接由各相位的车辆排队长度来决定。然而,模糊控制器中的控制规则和隶属度函数通常依据专家经验通过反复实验来完成。这种设计难以获得性能优良的模糊控制器。文献[6]提出了一种基于遗传算法的模糊隶属度的优化方案,实现了模糊控制器中模糊规则的合理优化。文献[7]针对交通流量预测的特点,提出了反向传播(Back Propagation, BP)神经网络的方案以预测路口交通流量。该方案考虑了路口其他非预测方向和交通信号配时方案对流量预测的影响。神经网络具有很强的非线性,但自身也存在收敛慢等的缺点。文献[8]结合模糊控制理论和神经网络各自的优点,构造了模糊粗糙神经网络,实现路口交通流预测与控制。文献[9]提出了基于约束 Kalman 滤波的短时交通流量组合预测模型以克服单一的交通流预测模型性能不稳定的问题。但是 Kalman 滤波预测算法需要做大量的矩阵和向量运算,难以用于实时在线预测。文献[10]提出了一种基于在线支持向量回归算法(Support Vector Regression, SVR)^[11]的短时交通流预测方法,预测结果表明了其有效性。但是该方法还只是基于车辆检测器的单点预测模型,并且模型的参数优化、预测精度的提高以及应用规模还需进一步研究。

以上文献都只针对交通路段的某一点或某一类指标进行预测和控制。本文结合已有的数据聚合算法^[12],提出一种基于 ε -SVR 的智能控制方法(Intelligent Control Strategy for Regional Traffic Signal, ICSRTS),用于区域交通信号综合的协调控制。ICSRTS 考虑了从传感器到观测器与从控制器到执行器的信息调度,将区域交通信号系统建模成一种集成信息调度与控制的动态反馈系统。该动态反馈控制系统具有通信约束和不确定参数的特性,可通过构造状态观测器来实现对状态的预测。状态观测器则采用改进的 ε -SVR 训练方法,通过交通信号输出变量的预测值与实际值间的误差 ε 构建最优超平面。依据训练样本进行非线性回归计算,进而得到回归函数对下一时刻输出变量的预测值。

1 支持向量回归 ε -SVR

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)建立在统计学习理论^[13]的基础上,通过已知有效算法寻求目标函数的全局最优解,其具有很好的推广能力,同时巧妙地解决了维数灾难问题。

SVR 是 SVM 在回归学习中的应用。 ε -SVR 引入 ε 不敏感损失函数,将 SVM 推广到非线性系统的回归估计,展现了极好的学习能力。

ε 损失函数的形式如下:

$$e(f(x) - y) = \begin{cases} 0, & |f(x) - y| < \varepsilon \\ |f(x) - y| - \varepsilon, & |f(x) - y| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

SVR 回归函数为:

$$y = f(x) = w \cdot \varphi(x) + b \quad (2)$$

其中: w 为偏差, b 为权重, $\varphi(x)$ 为输入空间 \mathbf{R}^d 高维特征空间 H 的非线性映射。对于线性不可分的情况, ε -SVR 通过非线性映射函数 $\varphi: \mathbf{R} \rightarrow F$ 将线性不可分的样本 X 转化为高维

的特征空间 F 使其线性可分,从而使得 F 空间采用线性算法对问题进行求解。通过最小化范数来调整 w 和 b :

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\zeta_i + \zeta_i^*) \right\} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} y_i - w \cdot x_i - b \leq \varepsilon + \zeta_i \\ w \cdot x_i + b - y_i \leq \varepsilon + \zeta_i^* \\ \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0 (i = 1, 2, \dots, l) \end{cases}$$

其中: C 为平衡系数, ζ_i 和 ζ_i^* 为松弛变量。引入 Lagrange 乘子与核函数 $K(x_i, x_j)$, 对式(3)进一步求解,从而得到最优超平面线性回归函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (4)$$

其中: l 为支持向量的个数, α_i 和 α_i^* 为 Lagrange 乘子。在 ε -SVR 算法中,常用的核函数有多项式核函数、高斯径向基核函数、Sigmoid 核函数以及傅里叶级数核函数等。

预测函数建模的数据长度直接影响着预测精度以及预测效率,并且后二者之间相互制约。原 SVR 理论在二次型寻优过程中要进行大量矩阵运算,使得算法收敛速度较慢。因此,SVR 训练需从提高训练算法收敛速度和处理大规模样本集的训练问题两方面进行改进^[14],分解方法是目前 SVR 训练算法一般采用的途径。本文采用固定工作变量集的方法进行训练,使得工作样本集的大小固定在算法效率可容忍的限度内。当在线预测运算量加大时,可采用加速减量的方法^[15]以降低算法计算量和缩减在线样本集规模,通过对非支持向量集样本进行采样和有选择性加速“遗忘”策略改进减量训练算法,实现在线训练数据样本的规模缩减,提升算法执行效率。

2 ICSRTS 系统模型

2.1 网络模型

目前,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)逐渐被用于智能交通系统的数据采集与检测、识别与通信。智能交通中 WSN 结构设计由车辆之间组成的移动的、分布式自组织形式与公路设施上传感器间组成的固定无线网络结构相结合^[16]。存在两种信息通信类型,即车—车协同系统(Vehicle to Vehicle, V2V)与车—路协同系统(Vehicle to Infrastructure, V2I)。

区域交通信号网络在文献[12]的基础上,采用目前流行的分簇结构。如图1所示,每个簇区内有一个固定的汇聚点,负责获取其他成员节点(车辆或固定设施)的感知数据。这些数据由汇聚点融合形成非冗余数据集,再将新数据包打上时间戳与地理位置并传输至 Sink 节点。Sink 节点经过验证后将数据包上传到信息中心。信息中心对各分簇的融合数据进行分析,产生控制数据并分别回送给交通网络中的各执行器以实现区域交通协调控制。

在交通信息的采集过程中,ICSRTS 采用基于数据的网格化系统。交通网络根据具体的原则和方法进行划分^[17],其格状网每个正方形小区域为 $\alpha \times \alpha$, 边长 α 根据应用任务的求解精度而定。如节点 P 的位置可记为 $L_P(x_i, y_i)$ 。

交通系统中的每一个传感器(安装在车辆和路边设施)都有一个唯一的标志(Identity, ID),由可信中心(Trusted Authority, TA)负责对节点认证、注册并授权。节点可通过 ID 号和 TA 签发的数字证书相互验证身份。

始长度为 l 且每次采样周期步进长度为 1。此外,监控系统不能永远保存所有的采样数据,数据过多也不利于实时运算。因此,观测器从当前时刻前 m 个时刻开始选择样本,建立集合 S 为:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_{m-l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\bar{y}(k-m+1), \dots, \bar{y}(k-m+l))^T \\ (\bar{y}(k-m+2), \dots, \bar{y}(k-m+l+1))^T \\ \vdots \\ (\bar{y}(k-l), \dots, \bar{y}(k-1))^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

将集合 S 中的每一个向量作为训练样本,则对应每个训练样本的预期值 Pre 为:

$$Pre = \begin{bmatrix} \hat{y}(k-m+l+1) \\ \hat{y}(k-m+l+2) \\ \vdots \\ \hat{y}(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

观测器中的动态预测算法步骤描述如下:

- 1) 根据网络控制系统的反馈模型采用对应的交通数据采集的记录方法。
- 2) 在缓冲区的采样数据中提取前 m 个数据作为基准数据。根据基准数据建立样本集合 S , 并通过集合 S 中获得预期值 Pre 。
- 3) 将集合 S 和预期值 Pre 作为 ε -SVR 预测的训练样本, 选定高斯径向基核函数进行训练, 调整参数 w 与 b 。
- 4) 从采样数据中提取最后一组作为预测样本, 用训练得到的线性回归函数获得下一时刻被控对象的预测值并输出。
- 5) 获得支持向量集和错误支持向量集。
- 6) 减量在线训练, 在训练样本中筛选需要遗忘的样本, 更新支持向量集与错误支持向量集。
- 7) 进行一次信号采样, 记录当前采样时刻 k 与数据 $\bar{y}(k)$ 。
- 8) 当运算量所占处理器资源超过一定比例时, 则调整建模数据长度(比例值通过大量实验数据获得)。更新集合 S 与预期值 P 。重复步骤 3) ~ 7)。

该预测算法可采用高斯径向基核函数, 则构造决策函数如下:

$$\hat{x}(k+1) = \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i) \exp\left(-\frac{\|\bar{y}(k) - \bar{y}_i\|^2}{2\sigma^2}\right) + \bar{b} \quad (14)$$

其中最优解 $\bar{\alpha} = (\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_1^*, \dots, \bar{\alpha}_l, \bar{\alpha}_l^*)^T$ 。观测器可在缓存区存入 $\bar{y}(k)$ 与 $\hat{x}(k+1)$ 对应的数值表, 便于实时运算与更新。

4 稳定性与可调度性分析

假设系统的状态全部可测, 首先考虑系统(10)在无外界干扰输入时(即 $w(t) \equiv 0$)的镇定问题。无干扰输入下设计控制器使得闭环系统

$$Z(k+1) = \Psi^* Z(k) \quad (15)$$

引理 1^[19] 对给定的对称矩阵 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$, 其中 S_{11}

是 $r \times r$ 矩阵。以下 3 个条件是等价的:

- 1) $S < 0$ 。
- 2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$ 。

$$3) S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0。$$

引理 2^[19] 设 $W, M, N, F(k)$ 为具有适当维数的实矩阵, 其中 $F(k)$ 满足 $F^T(k)F(k) \leq 1, W$ 为对称矩阵, 则

$$W + MF(k)N + N^T F^T(k)M^T < 0$$

当且仅当存在常数 $\varepsilon > 0$, 使得

$$W + \varepsilon MM^T + \varepsilon^{-1} N^T N < 0$$

定理 1 对于系统(15), 若存在对称正定矩阵 X 、标量 $\varepsilon_1 > 0$ 和矩阵 Y , 使得下列矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} J^* & \bar{G}X + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}Y & 0 \\ * & -X & XE^T \\ * & * & -\varepsilon_1 I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

其中: $J^* = -P^{-1} + \varepsilon_1 [I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)D] [I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)D]^T$, 则称闭环系统(15)是渐近稳定的, 且状态反馈增益矩阵 $K_0 = YX^{-1}$ 。

证明 取 Lyapunov 函数 $V(k) = z^T(k)Pz(k)$, 有

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= V(k+1) - V(k) = \\ &= z^T(k+1)Pz(k+1) - z^T(k)Pz(k) = \\ &= [(\bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 + I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)DF(\tau'_k)E)z(k) + \\ &+ I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)DF(\tau'_k)Ez(k)]^T P [(\bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 + \\ &+ I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)DF(\tau'_k)E)z(k) - z^T(k)Pz(k)] = \\ &= z^T(k) \{ [\bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 + I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)DF(\tau'_k)E]^T P [\bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 + \\ &+ I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)DF(\tau'_k)E] - P \} z(k) = \\ &= z^T(k) (W^T P W - P) z(k) \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $W = \bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 + I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)DF(\tau'_k)E$ 。若 $W^T P W - P < 0$, 则 $\Delta V(k) < 0$, 闭环系统(15)渐近稳定。

由 $W^T P W - P < 0$, 根据引理 1 进行变换, 并将 W 代入可得:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 + I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)DF(\tau'_k)E \\ * & -P \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

式(17)可重新写为:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 \\ * & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)D \\ 0 \end{bmatrix} F(\tau'_k) [0 E]^T + [0 E]^T F^T(\tau'_k) \begin{bmatrix} I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)D \\ 0 \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

由前面分析可知, $F^T(\tau'_k)F(\tau'_k) \leq I$, 根据引理 2, 设 $\varepsilon_1 > 0$, 式(18)等价于

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 \\ * & -P \end{bmatrix} + \varepsilon_1 \begin{bmatrix} I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)D \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(I_2^T + \bar{M}K_0)D \\ 0 \end{bmatrix}^T + \varepsilon_1^{-1} [0 E]^T [0 E] < 0 \quad (20)$$

根据引理 1, 式(19)等价于:

$$\begin{bmatrix} J^* & \bar{G} + (\bar{H}_0 + I_2) \bar{M}K_0 & 0 \\ * & -P & E^T \\ * & * & -\varepsilon_1 I \end{bmatrix} < 0 \quad (21)$$

对于式(21)分别左乘和右乘矩阵 $\text{diag}[I, P^{-1}, I]$, 并设

$X = P^{-1}, Y = K_0 P^{-1}$, 即可得到式(16)。因此, 式(16)与 $W^T P W - P < 0$ 等价。根据 $Y = K_0 P^{-1} = K_0 X$, 易得 $K_0 = Y X^{-1}$ 。证毕。

在受到外界干扰时, 可通过定义2进一步讨论系统(10)的抗干扰能力, 其验证方法与无干扰输入情况下类似。

定义2 对于系统(10), 若存在状态反馈控制器

$$U(k) = [0, u^T(k), v^T(k-1)]^T = K_0 z(k) \quad (22)$$

使得

1) 闭环系统(15)在无外界干扰输入时渐近稳定。

2) 给定 $\gamma > 0$, 在零初始条件下, 满足 H_∞ 范数约束条件 $\|y\|_2 < \gamma \|w\|_2$, 其中 $\|\cdot\|_2$ 为 $L_2[0, \infty]$ 的标准范数。则称状态反馈控制器(22)是系统(10)的一个 H_∞ 控制律, 且具有 H_∞ 性能指标。

定义3 通信序列周期为的网络控制系统在某种允许的调度策略下, 如果存在一种系统综合方法使闭环系统稳定, 则该系统调度策略具有可调度性。

证明 由于交通信号控制系统通常是一个周期为 N 的离散周期系统。假设其通信序列为 s_k , 且 $s_{k+N} = s_k (k = 0, 1, \dots, N-1)$, $s_k \in \{\Delta(1), \Delta(2), \dots, \Delta(n)\}$ 。 $\Delta_j(i) (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p)$ 表示在采样周期 k 内传输到执行点 j 的调度参数。若满足

$$\text{rank}[s_0 \ s_1 \ \dots \ s_{N-1}] = n \quad (23)$$

则系统的调度策略是允许的, 其中 rank 表示求解矩阵的秩。

5 仿真示例

为了验证 ICSRTS 的有效性, 假定交通条件^[20]并对普通模糊神经网络控制^[8]、普通 ε -SVR 预测控制^[10]和 ICSRTS 方法进行计算机仿真^[21]。

设置状态控制器对某道路交叉口的红绿灯进行控制, 其所采用的方法是: 直行车道的通行时间为 80 s, 左行道通行时间为 25 s, 右行道通行无时间限制。15 s 为绿灯最短持续时间; 若某相位车辆在绿灯最后一秒仍未通过路口, 则该相位绿灯延长 3 s。当该相位已没有车辆到达交叉口或绿灯信号延长达到上限值, 则按切换顺序切换相位。相位切换时的色灯时间为 5 s。

仿真参数设置: 假设交叉口各方向车辆到达是随机的, 当车辆达到流量小于 800 PCU (Passenger Car Unit)/h 时, 服从泊松分布, 相反则服从二项分布。直行和右行的饱和车流量为 3500 PCU/h, 左行的饱和车流量为 2650 PCU/h。其网络环境参数如表 1 所示。

表1 网络仿真环境参数设置

参数名称	参数值
协议	fuzzy neural, ICSRTS
区域面积	800 m × 400 m
数据流速率	128 kb/s
数据包大小	1024 B
车辆节点移动模型	Random waypoint
车辆移动速度	10 km/h ~ 40 km/h
通信范围	100 m
MAC 协议	IEEE 802.11b
仿真时间	300 s
节点个数	50

表2显示了各相位车流量在 200 PCU/h ~ 2000 PCU/h 范围内的仿真结果。

表2 不同方法的仿真结果 (平均延误时间: s/PCU)

流量/(PCU/h)	普通模糊神经网络	普通 ε -SVR 预测	ICSRTS 控制
200	5.82	5.84	5.66
400	5.94	5.98	5.73
600	6.09	6.16	5.84
800	6.67	6.81	6.38
1000	9.58	9.83	9.16
1200	14.89	15.08	13.17
1400	24.94	26.03	22.68
1600	36.07	38.98	32.21
1800	50.38	53.43	44.32
2000	67.06	71.23	58.64

从表2中可以看出, 当车辆达到率较低时, 3种方法控制下的交叉口平均延误时间非常接近。然而, 随着车辆达到率的增加, ICSRTS 控制相对普通模糊神经网络和普通 ε -SVR 的平均延误有较好的改进。当车流量是 1800 PCU 时, ICSRTS 控制相对于普通模糊神经网络改进率为 12.03%, 相对于普通 ε -SVR 改进率为 17.05%。当 2000 PCU 时, 普通模糊神经网络改进率为 12.56%, 普通 ε -SVR 改进率为 17.68%。当车流量饱和度较高时, 改进效果更为明显, 这表明了 ICSRTS 控制的实时性和有效性。

6 结语

本文针对城市道路规模复杂性和交通流动态特性的实时性, 提出一种基于 ε -SVR 理论的区域交通信号智能控制策略 ICSRTS。ICSRTS 将复杂的交通信号系统通过分簇的方法划分成小的、彼此相互通信及协调的子系统。在此基础上考虑从感知数据汇聚点到观测器和从控制器到执行器的信息调度, 将此网络控制系统建模成一类参数不确定的离散切换系统。在离散切换系统中, 状态观测器利用支持向量回归理论在学习和推广能力的优势应用于交通信号的状态估计。 ε -SVR 模型将系统输出信号的预测值和实际值作为训练样本, 通过改进的训练样本方法调整回归函数以提高对被控对象预测的准确性。

利用分段 Lyapunov 函数方法验证了该离散切换系统在周期性信息调度策略下的渐近稳定性和可调度性。最后, 通过网络仿真验证了 ICSRTS 的实时性与有效性。研究成果对于城市交通信号的智能控制具有一定的理论指导意义。但本文方法仍存在一些不足之处, 如系统的能观性与鲁棒性条件将在日后进一步研究。

参考文献:

- [1] YANG Z. An introduction to intelligent transportation system[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2009: 12 ~ 34. (杨兆升. 智能运输系统概论[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2009: 12 ~ 34.)
- [2] TRIGUERO I, DERRAC J, GARCIA S, et al. A taxonomy and experimental study on prototype generation for nearest neighbor classification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews, 2012, 42(1): 86 ~ 100.
- [3] SUI L, LI W, SHI J, et al. The analysis and application actuality of

- traffic signal control system - SCOOT and ACTRA in Beijing[J]. Road Traffic and Safety, 2007, 7(2): 10 - 13. (隋莉颖, 李威, 石建军, 等. SCOOT 和 ACTRA 信号控制系统分析[J]. 道路与安全, 2007, 7(2): 10 - 13.)
- [4] LIANG C, FAN B, HAN Y. Coordination control method of regional traffic flow [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011(3): 112 - 117. (梁超, 范炳全, 韩印. 区域交通流协调控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2011(3): 112 - 117.)
- [5] NAIR B M, CAI J. A fuzzy logic controller for isolated signalized intersection with traffic abnormality considered[C]// Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway: IEEE, 2007: 1229 - 1233.
- [6] GAO J, LI J, CHEN Y, *et al.* Optimize design and simulation of traffic signal two level fuzzy control system[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(1): 19 - 24. (高俊侠, 李建更, 陈阳舟, 等. 交通信号 2 级模糊控制系统的优化设计与仿真[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(1): 19 - 24.)
- [7] LIN D, ZHENG C, CHEN S, *et al.* Study of traffic delay predicting at signalized intersection based on BP neural network[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2013, 34(4): 53 - 56. (林得刚, 郑长江, 陈淑燕, 等. 基于神经网络的信号交叉口进口车道交通延误预测[J]. 大连交通大学学报, 2013, 34(4): 53 - 56.)
- [8] LIU Y. Study of traffic flow prediction based on fuzzy rough neural network[J]. Journal of Hainan Normal University: Natural Science, 2012, 25(4): 386 - 388. (刘琰. 基于模糊粗糙神经网络的交通流研究[J]. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2012, 25(4): 386 - 388.)
- [9] HAN M, WANG Y. Multivariate time series online predictor with Kalman filter trained reservoir[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(1): 169 - 173. (韩敏, 王亚楠. 基于 Kalman 滤波的储备池多元时间序列在线预报器[J]. 自动化学报, 2010, 36(1): 169 - 173.)
- [10] GAO X, LIU Y, WANG Q, *et al.* Prediction of short-term traffic flow with on-line support vector regression algorithm[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 30(1): 78 - 82. (高学辉, 刘艳忠, 王巧芝, 等. 基于在线支持向量回归算法的短时交通流预测[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2011, 30(1): 78 - 82.)
- [11] CRISTIANINI N, SHAW-TAYLOR J. An Introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods[M]. LI G, WANG M, ZENG H, translated. Beijing: Electronic Industry Press, 2004: 82 - 105. (CRISTIANINI N, SHAW-TAYLOR J. 支持向量机导论[M]. 李国正, 王猛, 曾华军, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 82 - 105.)
- [12] YOU Z, ZHANG J, CHEN S. A data aggregation scheme based on wireless sensor networks and its application research in intelligent transportation system [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(6): 1719 - 1722. (游子毅, 章俊华, 陈世国. 基于无线传感网络的数据融合方法及其在智能交通系统中的应用[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(6): 1719 - 1722.)
- [13] ALPAYDIN E. Introduction to machine learning[M]. FAN M, translated. Beijing: China Machine Press, 2009: 9 - 20. (ALPAYDIN E. 机器学习导论[M]. 范明, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009: 9 - 20.)
- [14] WANG X, WANG J. A Survey on support vector machines training and testing algorithms[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 21(13): 75 - 78. (王晓丹, 王积勤. 支持向量机训练和实现算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2004, 21(13): 75 - 78.)
- [15] BAI S, JIANG Z, WANG T, *et al.* Application of online SVR on the dynamic liquid level soft sensing[C]// Proceedings of the 2013 25th Chinese Control and Decision Conference. Piscataway: IEEE, 2013: 3003 - 3007.
- [16] HE K, LI X, SCHICK B, *et al.* On-road video delivery with integrated heterogeneous wireless networks [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(7): 1992 - 2001.
- [17] OSSENBRUGGEN P, LAFLAMME E. Time series analysis and models of freeway performance[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(8): 1030 - 1039.
- [18] HUANG Y, CUI B. Stochastic stability and stabilization of networked control systems with uncertain data losses and long delay [J]. Journal of Huaihai Institute of Technology: Natural Science Edition, 2013, 22(4): 22 - 27. (黄逸彤, 崔宝同. 具有随机长时延与丢包的网络控制系统的随机稳定与镇定[J]. 淮海工学院学报: 自然科学版, 2013, 22(4): 22 - 27.)
- [19] CHEN X. The theory of linear system[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 1 - 30. (陈晓平. 线性系统理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 1 - 30.)
- [20] LOU X. Urban road network signal design optimization considering the impact of intersections[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2013, 11(1): 108 - 110. (楼小明. 考虑交叉口影响的都市路网信号优化设计问题研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2013, 11(1): 108 - 110.)
- [21] LI X. The traffic flow and the signal control of intersections research with Matlab[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2008: 17 - 39. (李星. 基于 Matlab 的交通流及交叉口信号控制的仿真研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2008: 17 - 39.)

(上接第 1360 页)

- [8] LIN P, JIA Y. Average consensus in networks of multi-Agents with both switching topology and coupling time-delay [J]. Physical A, 2008, 37(1): 303 - 313.
- [9] YU H, JIAN J. Multi-Agent consensus with a time-varying reference state in directed network with switching topology and time-delay[C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2009: 477 - 481.
- [10] LIU X, XU B. Distributed H_∞ consensus control for multiple-Agent systems with communication delays [J]. Control and Decision, 2012, 27(4): 494 - 500. (刘学良, 胥布工. 具有多个通信时延的多智能体系统分布式 H_∞ 一致性控制 [J]. 控制与决策, 2012, 27(4): 494 - 500.)
- [11] CUI Y. $L_2 \sim L_\infty$ consensus control for high-order multi-Agent system with non-form time-varying delays [J]. Asian Journal of Control, 2014, 16(6): 1751 - 1759.
- [12] GAO Q, FAN C, WEI Q. Research on consensus of multi-Agent system with random time-delay [J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(10): 52 - 55. (高庆文, 樊春霞, 韦庆阳. 具有随机时延的多智能体系统的一致性研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(10): 52 - 55.)
- [13] BOYD S, CHAOUI L E, FERON E, *et al.* Linear matrix inequalities in system and control theory [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994: 19 - 20.