

DOI: 10.7641/CTA.2013.30016

基于小脑模型关节控制器与PID复合的高速公路交通流密度控制

梁新荣¹, 刘艳艳^{1†}, 满国永¹, 徐建闽²

(1. 五邑大学 信息工程学院, 广东 江门 529020; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 高速公路交通控制系统是一个复杂的非线性时变系统, 传统的匝道控制方法难以取得满意的控制效果. 为此, 本文提出基于小脑模型关节控制器(CMAC)与PID复合的匝道控制方法. 首先建立了二阶宏观动态交通流模型, 然后研究了CMAC与PID复合控制算法, 结合非线性反馈理论, 设计了基于CMAC与PID复合的高速公路交通流密度控制器, 该密度控制问题是一个输出跟踪和扰动抑制问题, 最后采用两个仿真实例对该方法的有效性进行验证. 结果表明, 复合控制具有优越的密度跟踪性能和抑制噪声干扰的能力; 复合控制方法能够有效地消除交通拥挤, 并使主线车流趋于稳定.

关键词: 高速公路; 匝道控制; 交通流模型; 小脑模型关节控制器; 反馈控制

中图分类号: TP27 文献标识码: A

Density control for freeway traffic flow based on the composite of PID controller and cerebella model articulation controller

LIANG Xin-rong¹, LIU Yan-yan^{1†}, MAN Guo-yong¹, XU Jian-min²

(1. School of Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen Guangdong 529020, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Freeway traffic control system is a complex nonlinear and time-varying system; for which the results of conventional ramp control methods are not satisfactory. A new method based on the composite of PID controller and cerebella model articulation controller (CMAC) is proposed for ramp control in this paper. First, a second-order macroscopic dynamic traffic flow model is built; and then, the algorithm of the composite control of CMAC and PID is studied. In conjunction with nonlinear feedback theory, a density controller of freeway traffic flow based on the composite of CMAC and PID is designed, and the density control problem is formulated as an output tracking and disturbance rejection problem. Finally, the effectiveness of this new approach is validated by intensive simulations in two different cases. The results show that the composite controller has excellent tracking performance and noise rejection ability, effectively eliminating traffic congestions and stabilizing the traffic flow on freeway mainlines.

Key words: freeway; ramp control; traffic flow model; cerebella model articulation controller; feedback control

1 引言(Introduction)

入口匝道控制是高速公路交通控制的重要组成部分, 它的基本原理是通过入口匝道调节进入到高速公路主线的车辆数目, 以保证主线的交通需求不超过其交通容量^[1]. 匝道调节是一个通用的术语, 它包括通过入口匝道限制车辆进入到高速公路主线的各种技术. 匝道控制能够调节进入到给定高速公路的交通量, 从而使高速公路主线运行在期望的服务水平上, 并避免交通拥挤. 一般来说, 当高速公路交通量太少时, 匝道调节并不需要; 当高速公路交通量太多时, 匝道调节也是无效的, 因为交通阻塞必然发生. 匝道调节适用于交通量不太少和不太多的情况. 文献[1]中第8章

对匝道控制的作用和有效性进行了系统的阐述. 文献[2]对高速公路匝道控制的现状进行了详细的综述, 这里不再赘述. 现有的匝道控制算法通常可分为两大类, 即定时调节和交通响应调节, 交通响应调节能响应交通量的随机变化, 因而比定时调节更加有效. 交通响应调节方法包括需求容量、占有率控制^[1], 线性二次调节器^[3]、多层控制^[4]、模型预测控制^[5]、非线性最优控制^[6-7]、强化学习^[8]、模糊控制^[9]、神经网络控制^[10]、迭代学习^[2, 11]、动态规划^[12]等. 神经网络在逼近非线性函数和自学习方面的优点使其得到了一定的应用^[10, 13], 但常规的神经网络学习速度慢, 不适合实时控制.

收稿日期: 2013-01-05; 收修改稿日期: 2013-04-23.

†通信作者. E-mail: liuyany_hi@126.com.

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(S2012010010356).

为了进一步丰富交通响应匝道调节方法, 本文提出基于小脑模型关节控制器(cerebella model articulation controller, CMAC)与PID复合的匝道控制方法, 对高速公路主线的密度进行控制. CMAC能有效地克服反向传播神经网络、径向基函数神经网络等多层前馈网络学习速度慢、实时性差的缺点, 具有泛化能力强和学习速度快等优点, 在机器人跟踪和电动加载等系统中得到了广泛的应用^[14-15], 适合于复杂动态环境下的非线性实时控制. 仿真实验表明, CMAC与PID复合的匝道控制方法具有优越的密度跟踪性能和抑制噪声干扰的能力.

2 高速公路宏观交通流模型(Macroscopic freeway traffic flow model)

宏观动态交通流模型是基于与流体动力学的相似性来描述交通流特性的^[16], 交通流满足如下方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - s, \quad (1)$$

式中: x, t 分别为空间和时间, ρ, q 分别为交通密度和流量; r, s 分别为入口、出口匝道流量.

考虑一条多车道、被划分为 N 段、长度为 L_i 的高速公路, 每一段内的交通状态可近似认为是均匀的, 且至多可以包含一个入口匝道和一个出口匝道, 如图1所示.

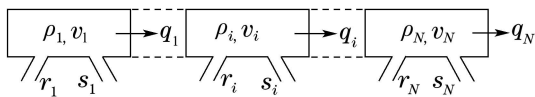


图1 高速公路
Fig. 1 Freeway

式(1)的空间和时间离散化形式为

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k) - s_i(k)], \quad (2)$$

式中: T 为采样时间, L_i 为路段 i 的长度, λ_i 为车道数. T 的选取应满足如下不等式:

$$T < \frac{L_i}{v_f}, \quad (3)$$

式中: v_f 为自由速度. 式(3)意味着以 v_f 行驶的车辆在一个采样时间内不能通过路段 i .

平衡速度方程用于描述平衡速度和密度之间的关系, 一个比较通用的关系式为

$$V_e[\rho_i(k)] = v_f \{1 - [\frac{\rho_i(k)}{\rho_{jam}}]^l\}^m, \quad (4)$$

式中: ρ_{jam} 为阻塞密度, l, m 为常数.

速度和平衡速度之间的关系式为

$$v(x, t + \tau) = V_e[\rho(x + \Delta x), t], \quad (5)$$

式(5)左边对 τ , 右边对 Δx 进行Taylor展开, 整理得

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\tau} [V_e(\rho) - v - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}], \quad (6)$$

式中: $\Delta x = 0.5/\rho, \mu = -0.5\partial V_e/\partial \rho$.

对式(6)进行离散化得

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} \{V_e[\rho_i(k)] - v_i(k)\} + \frac{T}{L_i} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{\mu T}{\tau L_i} \frac{\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa}, \quad (7)$$

式中: μ, τ, k 为常数. 流量-密度-速度的关系式为

$$q_i(k) = \lambda_i \rho_i(k) v_i(k), \quad (8)$$

$$q_i(k) = \alpha \lambda_i \rho_i(k) v_i(k) + (1 - \alpha) \lambda_{i+1} \rho_{i+1}(k) v_{i+1}(k), \quad (9)$$

式中 α 为加权系数. 式(2)(4)(7)-(8)构成二阶宏观动态交通流模型的核心方程. 上述模型中包含的一些参数需要由交通流特性决定, 这些参数随着交通模式的不同而变化. 此外, 交通仿真时的边界条件为

$$v_0(k) = v_1(k), \quad (10)$$

$$\rho_{N+1}(k) = \begin{cases} \rho_N(k), & \rho_N < \rho_{cr}, \\ \rho_{cr}, & \rho_N \geq \rho_{cr}. \end{cases} \quad (11)$$

式(10)意味着高速公路入口处的平均速度与路段1的平均速度相同, 式(11)意味着高速公路的出口路段不存在拥挤.

此外, 增加约束条件式(12)以保证交通变量为正值.

$$\begin{cases} \rho_i(k) \geq 0, \\ q_i(k) \geq 0, \\ v_{min} \leq v_i(k) \leq v_f, \\ r_i(k) \geq 0. \end{cases} \quad (12)$$

3 基于CMAC与PID复合的交通流密度控制 (Density control of traffic flow based on the composite of PID controller and CMAC)

3.1 CMAC与PID复合控制算法 (Algorithm of the composite control of CMAC and PID)

CMAC是一种表达复杂非线性函数的表格查询型自适应神经网络, 可有效地用于非线性函数逼近、动态建模、控制系统设计等, 学习速度快, 适合于复杂动态环境下的非线性实时控制^[17].

CMAC的基本思想是: 在输入空间中给出一个状态, 从存储单元中找到对应于该状态的地址, 将这些存储单元中的内容求和得到CMAC的输出, 将此响应值与期望输出值进行比较, 并根据学习算法修改这些已激活的存储单元的内容^[17]. CMAC与PID复合控制

结构如图2所示.

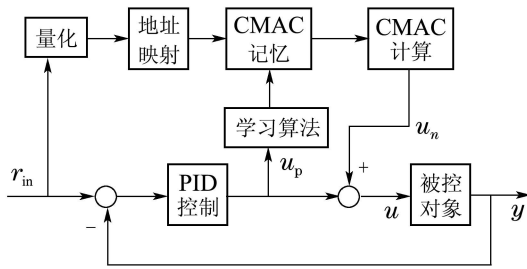


图 2 CMAC与PID复合控制结构

Fig. 2 Control structure based on the composite of CMAC and PID

CMAC网络采用的是有导师的学习算法,以控制周期为基本时间单位,在每一个控制周期结束时,计算出相应的CMAC的输出 $u_n(k)$,并与总的控制输入 $u(k)$ 进行比较,通过比较获得本控制周期产生的差值,根据该差值来修正权值,进而进入到学习阶段.在CMAC的控制过程中,通过学习算法来调整权值,其目的是使CMAC的输出值与总控制输入值之间的差值最小.系统刚开始运行时主要是由PID控制器来控制,经过CMAC神经网络学习过程之后,总控制输入由CMAC产生.控制算法为

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^{N_0+c} w_i a_i, \quad (13)$$

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k), \quad (14)$$

式中: a_i 为二进制向量, c 为CMAC网络的泛化参数, $u_n(k)$ 为CMAC网络的实际输出值, $u_p(k)$ 为PID控制的实际输出值.

实质上,对于CMAC神经网络,其输入与输出的关系被认为是概念映射和实际映射的关系. CMAC概念映射的方法为: 输入空间 S 在区间 $[S_{\min}, S_{\max}]$ 上分成 $N_0 + 2c$ 个量化间隔,即

$$v_1 = v_2 = \dots = v_c = S_{\min}, \quad (15)$$

$$v_j = v_{j-1} + \Delta v_j, \quad j = c + 1, \dots, c + N_0, \quad (16)$$

$$\Delta v_j = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{N_0 - 1}, \quad (17)$$

$$v_{N_0+c+1} = v_{N_0+c+2} = \dots = v_{N_0+2c} = S_{\max}. \quad (18)$$

CMAC实际映射关系为

$$a_j = \begin{cases} 1, & S_j \in [v_j, v_{j+c}], \\ 0, & S_j \notin [v_j, v_{j+c}]. \end{cases} \quad (19)$$

CMAC权值调整的指标定义为

$$E(k) = \frac{1}{2c} [u_n(k) - u(k)]^2. \quad (20)$$

CMAC权值调整公式为

$$\Delta w(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w} = \eta \frac{u(k) - u_n(k)}{c} a_i = \eta \frac{u_p(k)}{c} a_i, \quad (21)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) + \alpha_0 [w(k-1) - w(k-2)], \quad (22)$$

式中: η 为CMAC的学习速率, $\eta \in (0, 1)$; α_0 为惯性量, $\alpha_0 \in (0, 1)$.

3.2 基于CMAC与PID复合的密度控制器设计(Design of density controller based on the composite of CMAC and PID)

交通密度用来替代占有率作为被控变量,因为交通密度是与占有率最接近的变量,并且在仿真时可由宏观动态交通流模型直接提供.控制目标是寻找合适的控制律 $r_i(k)$,使路段 i 在时刻 k 时的交通密度 $\rho_i(k)$ 收敛到期望的交通密度 $\rho_{di}(k)$.明显地,由于交通流模型的强非线性特性,该控制律不能够直接从模型计算得出.在匝道控制中,反馈控制方法已经实施了多年,例如:众所周知的Papageorgiou提出的ALINEA方法^[1].完全用CMAC与PID复合的控制方法取代已有的反馈控制方法是不合适的,相反,笔者寻求该复合控制与反馈控制的组合.这样能够保留已有的反馈控制的功能,同时又享有该复合控制带来的性能改善.图3给出了路段 i 基于CMAC与PID复合的密度控制器,该控制是一个非线性反馈匝道控制器.图3所示的控制系统是一个闭环系统,它的输入信号是期望的交通密度 $\rho_{di}(k)$,即 $r_{in}(k) = \rho_{di}(k)$,其输出信号是实际的交通密度 $\rho_i(k+1)$,即

$$y(k) = \rho_i(k), \quad y(k+1) = \rho_i(k+1), \quad (23)$$

入口匝道调节率 $r_i(k)$ 是一个控制变量,即 $u_i(k) = r_i(k)$.图3中的控制对象是第2节的宏观动态交通流模型.在图3所示的控制系统中,通过控制 $r_i(k)$ 可使 $\rho_i(k)$ 跟踪 $\rho_{di}(k)$.误差 $e_i(k) = \rho_{di}(k) - \rho_i(k)$,误差变化 $\Delta e_i(k) = e_i(k) - e_i(k-1)$,入口匝道调节率为: $r_i(k) = u_{ni}(k) + u_{pi}(k)$,其中: $u_{ni}(k)$ 为CMAC的输出, $u_{pi}(k)$ 为PID控制的输出.

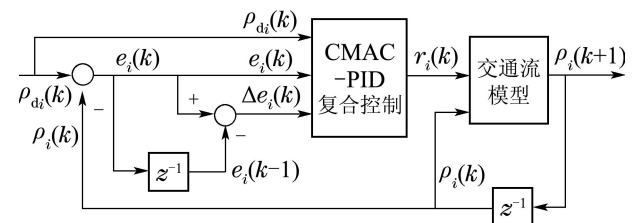


图 3 CMAC与PID复合的密度控制器

Fig. 3 Density controller based on the composite of CMAC and PID

4 仿真结果(Simulation results)

为了验证该复合控制的有效性,考虑一条12个路段两车道的高速公路,每个路段长度为0.5 km,有两个单车道的入口匝道,分别位于路段2和路段9;有一个单车道的出口匝道,位于路段7.从出口匝道流出的那

部分流量可以由出口分流系数计算, 即 $s_i(k) = s_0 \times q_i(k)$, 其中 $0 \leq s_0 \leq 0.25$; 假设入口匝道交通需求的范围是 $0 \sim 1000 \text{ veh/h}$. 考虑下面两种情况:

第1种情况: 从较低密度到稳定密度的情形. 假设每个路段的初始密度为 $26.0 \text{ (veh} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{lane}^{-1})$, 初始速度为 82.0 km/h . 对图3所示的复合控制器进行仿真, 共有两个复合控制器, 分别位于路段2和路段9的入口匝道, 给定这两个路段期望的交通密度 ρ_{d2} 和 ρ_{d9} . 图3中选择第2节的宏观动态交通流模型作为控制对象, 模型的参数为:

$$v_f = 105 \text{ km/h}, \mu = 33 \text{ km}^2/\text{h}, \kappa = 15 \text{ veh/km},$$

$$T = 15 \text{ s}, \rho_{\text{jam}} = 76 \text{ (veh} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{lane}^{-1}), \tau = 36 \text{ s},$$

$$\rho_{\text{cr}} = 38 \text{ (veh} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{lane}^{-1}), l = 1.8, m = 1.7;$$

CMAC参数选为: $N_0 = 400, c = 400, \eta_2 = 0.5, \alpha_{0,2} = 0.0000005, \eta_9 = 0.6, \alpha_{0,9} = 0.5, t_s = 15 \text{ s}$.

经过仿真, 笔者得到各个路段的交通密度和速度, 图4和图5分别示出了路段2和路段9的期望交通密度和实际交通密度. 从图4和图5可以看出, 实际交通密度能够跟踪期望交通密度的轨迹, 稳态误差为零. CMAC与PID复合的控制器具有良好的动态性能和稳态性能. 图6是采用复合控制时整个路段的交通密度变化三维图, 图7是相应的速度变化三维图. 从图6和图7可知, 在初始时刻, 各个路段的实际交通密度较低, 实际速度较高, 随着从入口匝道进入到主线的交通量的增加, 实际交通密度逐渐上升, 速度逐渐下降, 最后, 交通状态进入到正常交通的稳定区, 速度保持均匀, 交通密度达到了期望的交通密度.

为了表现出系统所固有的随机特性, 在仿真过程中, 笔者还给各个路段的流量中加入一定的白噪声, 图8是加入白噪声之后路段9的期望交通密度和实际交通密度, 图9是入口匝道9相应的调节率曲线. 可以看出, 尽管存在噪声干扰, 实际交通密度仍然能够跟踪期望交通密度的轨迹, 稳态跟踪误差非常小, 系统具有抑制噪声干扰的能力.

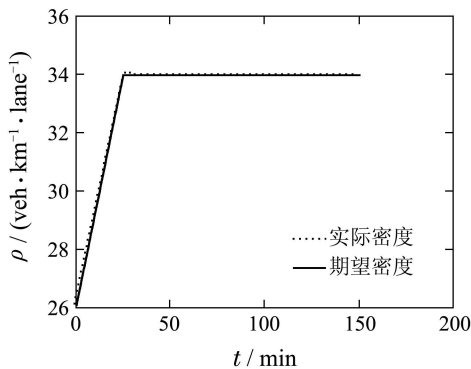


图4 路段2的期望交通密度和实际交通密度
Fig. 4 Desired traffic density and actual traffic density in Section 2

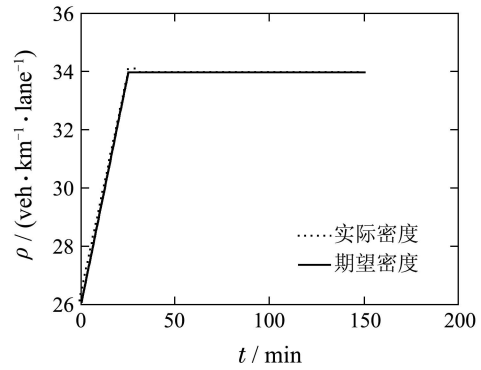


图5 路段9的期望交通密度和实际交通密度
Fig. 5 Desired traffic density and actual traffic density in Section 9

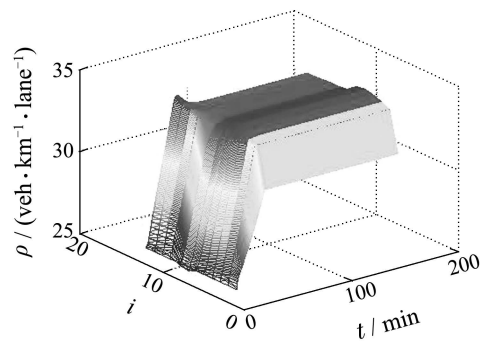


图6 交通密度变化三维图
Fig. 6 Dynamic evolution of traffic density

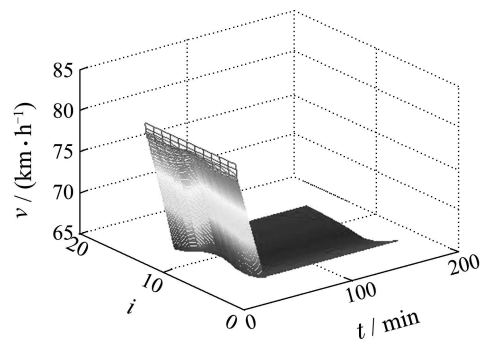


图7 实际速度变化三维图
Fig. 7 Dynamic evolution of actual speed

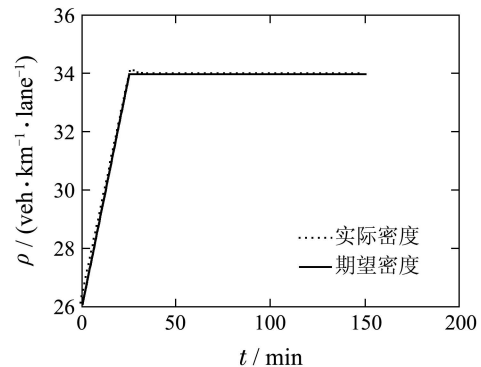


图8 存在噪声时路段9的期望密度和实际密度
Fig. 8 Desired density and actual density in Section 9 with noise

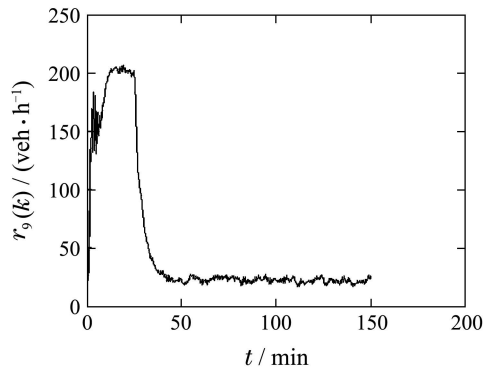


图 9 存在噪声时入口匝道9的调节率

Fig. 9 Ramp metering rate in on-ramp 9 with noise

CMAC复合控制的控制效果比单独的PID控制效果要好很多,当信号输入时,大大减少了超调,加快了控制响应速度,充分体现了CMAC的优点,即输出误差小、实时性好、响应速度快等.为了比较,笔者还单独采用常规PID控制器进行仿真研究,结果是本文的复合控制与单独的常规PID控制器的稳态性能相同,但单独的常规PID控制器超调量较大,而且在进入稳态前有一定的振荡现象,动态性能较差.相比之下,本文的复合控制具有更优越的动态性能以及更好的跟踪效果.

第2种情况:从拥堵密度到稳定密度的情形.假设各个路段的初始密度分别为57.0, 26.0, 26.0, 26.0, 70.0, 40.0, 26.0, 26.0, 26.0, 26.0, 70.0, 33.0辆/km/车道,其中第1, 5, 6, 11路段的初始密度比临界密度大,因而存在初始交通拥挤.对图3所示的复合控制器进行仿真,控制对象仍为第2节的宏观动态交通流模型,模型的参数同第1种情况.图10是采用复合控制时整个路段的交通密度变化三维图.从图10可知,尽管初始存在严重的交通拥挤,大约25 min以后,交通拥挤消除了,最后的密度都为稳定的密度.为了比较,在初始条件和仿真参数不变的情况下,对入口匝道无控制作用进行仿真.结果表明,无控制作用时,仅仅几分钟之后路段密度就大于阻塞密度 ρ_{jam} ,出现了持续的拥堵现象.

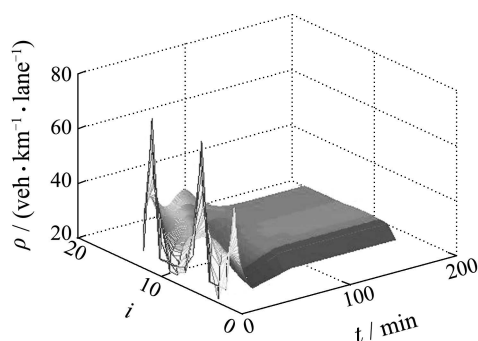


图 10 第2种情况下的交通密度变化三维图

Fig. 10 Dynamic evolution of traffic density in case 2

5 结论(Conclusions)

针对高速公路交通控制系统非线性和时变的特点,本文设计了CMAC与PID复合的密度控制器. CMAC是一类联想记忆神经网络,它特别适合于高速公路这种复杂动态环境下的实时控制. 本文的仿真结果表明,CMAC与PID复合的控制能够直接处理非线性系统而不必进行线性化. 该复合控制具有很快的响应速度和优越的性能,它可使高速公路主线交通流运行在期望的最佳状态. 当某种预料不到的原因导致高速公路交通拥挤时,复合控制能够消除拥挤并使主线交通流趋于稳定.

参考文献(References):

- [1] 刘智勇. 智能交通控制理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. (LIU Zhiyong. *The Theory and Applications of Intelligent Traffic Control* [M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [2] HOU Z S, XU J X, YAN J W. An iterative learning approach for density control of freeway traffic flow via ramp metering [J]. *Transportation Research Part C*, 2008, 16(1): 71 – 97.
- [3] PAPAGEORGIOU M, BLOSSEVILLE J M, HABIB H S. Modeling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris, Part II: coordinated on-ramp metering [J]. *Transportation Research Part A*, 1990, 24(5): 361 – 370.
- [4] PAPAGEORGIOU M. Multilayer control system design applied to freeway traffic [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1984, 29(6): 482 – 490.
- [5] HEGYI A, SCHUTTER B D, HELLENDORRN H. Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits [J]. *Transportation Research Part C*, 2005, 13(3): 185 – 209.
- [6] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M, MANGEAS M, et al. Coordinated and integrated control of motorway networks via nonlinear optimal control [J]. *Transportation Research Part C*, 2002, 10(1): 65 – 84.
- [7] 吕智林, 范炳全. 交通事件下快速路网匝道控制与路线诱导的集成控制 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(10): 1151 – 1156. (LÜ Zhilin, FAN Bingquan. Integration of ramp control and route guidance under accident conditions [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(10): 1151 – 1156.)
- [8] JACOB C, ABDULHAI B. Machine learning for multi-jurisdictional optimal traffic corridor control [J]. *Transportation Research Part A*, 2010, 44(2): 53 – 64.
- [9] 梁新荣, 刘智勇, 毛宗源. 高速公路非线性反馈模糊逻辑匝道控制器 [J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(1): 99 – 102. (LIANG Xinrong, LIU Zhiyong, MAO Zongyuan. Nonlinear feedback ramp controller in freeway based on fuzzy logic [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 99 – 102.)
- [10] ZHANG H M, RITCHIE S G, JAYAKRISHNAN R. Coordinated traffic-responsive ramp control via nonlinear state feedback [J]. *Transportation Research Part C*, 2001, 9(5): 337 – 352.
- [11] 金尚泰, 侯忠生, 池荣虎, 等. 离散时间非线性系统的数据驱动无模型自适应迭代学习控制 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(8): 1001 – 1009. (JIN Shangtai, HOU Zhongsheng, CHI Ronghu, et al. Data-driven model-free adaptive iterative learning control for a class of discrete-time nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(8): 1001 – 1009.)
- [12] ZHAO D B, BAI X R, WANG F Y, et al. DHP method for ramp metering of freeway traffic [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 990 – 999.

- [13] FEBBRARO A D, PARISINI T, SACONE S, et al. Neural approximations for feedback optimal control of freeway systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, 50(1): 302 – 313.
- [14] 李鑫, 陈薇, 董学平, 等. 一种基于小脑模型关节控制器评论-策略家的机器人跟踪控制算法 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(6): 894 – 900.
(LI Xin, CHEN Wei, DONG Xueping, et al. Robot tracking control algorithm based on cerebella model articulation controller adaptive critics and strategists method [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(6): 894 – 900.)
- [15] 杨波, 王哲. 新型小脑模型关联控制器复合控制在电动加载系统中的结构及算法 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(6): 827 – 833.
(YANG Bo, WANG Zhe. Structure and algorithm of hybrid control in cerebella model articulation controller for electric loading system [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(6): 827 – 833.)
- [16] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M. The importance of traffic flow modeling for motorway traffic control [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2001, 76(1): 179 – 203.
- [17] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真 [M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2004.
(LIU Jinkun. *Advanced PID Control and MATLAB Simulation* [M]. 2nd edition. Beijing: Electronics Industry Press, 2004.)

作者简介:

梁新荣 (1964–), 男, 博士, 教授, 曾经做过博士后研究工作, 目前研究方向为智能交通控制, E-mail: xrliang55@126.com;

刘艳艳 (1987–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为交通信息与控制, E-mail: liuyany_hi@126.com;

满国永 (1988–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为交通信息与控制, E-mail: xm1988224@126.com;

徐建闽 (1960–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能交通控制, E-mail: aujmxu@scut.edu.cn.