

一种改进的自动化高速公路交通流速度控制器设计

杨旭华^{1,2}, 董颖颖¹, 杨海东¹, 王万良¹

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310032; 2. 浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在自动化高速公路的环境下, 针对一种基于非线性积分器Backstepping方法的交通流密度控制器, 本文提出一种改进的交通流速度控制器设计方法, 选取交通流速度为被控变量, 并采用Backstepping方法进行控制器的设计, 保证使每个路段的交通流速度以指数形式快速收敛到期望值. 与已有的方法相比较, 该控制器极大地提高了算法效率, 而且无需矩阵的逆运算, 可以自动满足系统的可控性条件. 仿真结果显示该控制器可以有效地减少道路拥塞, 有助于在拥堵的高速公路上实现平滑的交通流.

关键词: Backstepping; 自动化高速公路; 速度控制器; 指数收敛

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

An improved traffic flow-speed control design for an automated highway system

YANG Xu-hua^{1,2}, DONG Ying-ying¹, YANG Hai-dong¹, WANG Wan-liang¹

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310032, China;

2. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: On the basis of the traffic density control design by using the nonlinear integrator-Backstepping method, this paper proposes an improved method for designing the traffic flow-speed control by selecting the traffic flow-speed as the controlled variable and applying the Backstepping method to design the controller for an automated highway system. The controller guarantees the traffic flow-speed at each section to be exponentially convergent to the desired speed. Comparing with the prior methods, this controller is superior in algorithm-efficiency, being free from matrix inversion, and automatically satisfying the controllability condition. Simulations show that this controller effectively reduces the congestion and helps to achieve a smooth traffic flow on a congested highway.

Key words: backstepping; automated highway system; speed controller; exponential convergence

1 引言(Introduction)

交通流的不稳定(比如: 交通拥挤)通常是由人为选择路线和不适当的速度造成的. 在一个自动化高速公路的环境中, 计算机控制取代人为驾驶, 将减小人们的主观因素, 并大大降低随机性. 当前自动化高速公路的研究工作^[1~4], 主要是在宏观的水平上, 提供适当的反馈控制命令给交通系统, 其控制目标是防止道路拥塞, 或者至少是避免交通不均匀导致的拥塞扩大.

文献[1]提出一种针对自动化高速公路系统的道路交通流控制器, 使拥塞的高速公路达到均匀的交通密度, 较好地起到了减少道路拥挤的作用. 但这种控制器计算量较大, 而且需要进行矩阵的逆运算, 可

能出现解不唯一的情况.

本文对文献[1]提出的控制器进行了改进, 选取交通流速度为被控变量, 利用非线性积分器Backstepping方法, 保证使交通流速度以指数形式快速收敛到期望值, 并间接地使交通流密度也处于比较均衡的状态, 可以很好地减少道路拥塞和平滑交通流; 与文献[1]的方法相比, 该控制器极大地提高了算法效率, 而且无需矩阵的逆运算, 可以自动满足系统的可控性条件. 由于具有更好的实时性能, 该控制器有利于计算机系统控制更大规模的自动化高速公路.

2 问题描述(Problem statement)

考虑被分成 N 个路段的一条高速公路, 每个路段

的长度为 $L_i, i = 1, 2, \dots, N$, 在采样时刻 nT 进入路段1的交通流量为 $q_0(n)$, 假设路段 i 的交通流速度期望值为 $v_{di}(n)$.

控制的目标为: 选择合适的控制命令 $u_i(n)$, 使第 i 路段的交通流速度以指数形式收敛到期望值 $v_{di}(n)$, 即: 当 $n \rightarrow \infty, v_i(n) \rightarrow v_{di}(n)$.

3 交通流模型(Traffic flow model)

Papageorgiou等^[5~8]提出并改进了高速公路宏观动态交通流模型, 并用巴黎环城大道的实际数据对其进行了测试, 验证了其有效性. Karaasian 等^[1]指出了Papageorgiou模型的几个不足, 并提出了一个更符合实际的改进模型:

$$\begin{aligned} q_i(n) &= \alpha k_i(n) v_i(n) + (1-\alpha) k_{i+1}(n) v_{i+1}(n), \quad (1) \\ k_i(n+1) &= \\ k_i(n) &+ \frac{T}{L_i} [q_{i-1}(n) - q_i(n) + r_i(n) - s_i(n)], \quad (2) \\ v_i(n+1) &= \\ v_i(n) &+ \frac{T}{\tau} \{V_e[k_i(n)] - v_i(n)\} + \\ \frac{T}{L_i} \frac{k_{i-1}(n)}{k_i(n) + \kappa^1} &\times v_{i-1}(n) [\sqrt{v_{i-1}(n) v_i(n)} - \\ v_i(n)] &- \frac{\mu(n)T}{\tau L_i} w_i(n). \quad (3) \end{aligned}$$

式(3)中:

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

$$\mu(n) = \begin{cases} \mu_1 \frac{\rho}{k_{jam} - k_{i+1}(n) + \sigma}, & \text{如果 } k_{i+1}(n) > k_i(n), \\ \mu_2, & \text{其他,} \end{cases} \quad (5)$$

$$w_i(n) = \frac{k_{i+1}(n) - k_i(n)}{k_i(n) + \kappa}. \quad (6)$$

以上公式中各项参数的意义同文献[1].

在自动化高速公路系统中, 式(3)中的第4项 $\frac{\mu(n)T}{\tau L_i} w_i(n)$ 将由控制项 $u_i(n)$ 所取代, 表示控制器在 n 时刻发给第 i 路段车辆的控制命令, 由 $u_i(n)$ 调整下一时刻的速度 $v_{i+1}(n+1)$.

令

$$\begin{aligned} f_i(n) &= \\ v_i(n) &+ \frac{T}{\tau} \{V_e[k_i(n)] - v_i(n)\} + \frac{T}{L_i} \frac{k_{i-1}(n)}{k_i(n) + \kappa^1} \times \\ v_{i-1}(n) &[\sqrt{v_{i-1}(n) v_i(n)} - v_i(n)]. \quad (7) \end{aligned}$$

根据以上分析, 本文所采用的有控制变量输入的自动化高速公路的交通流模型如下所示:

$$q_i(n) = \alpha k_i(n) v_i(n) + (1-\alpha) k_{i+1}(n) v_{i+1}(n), \quad (8)$$

$$k_i(n+1) =$$

$$k_i(n) + \frac{T}{L_i} [q_{i-1}(n) - q_i(n) + r_i(n) - s_i(n)], \quad (9)$$

$$v_i(n+1) = f_i(n) - u_i(n), \quad (10)$$

$$V_e(k_i) = v_f [1 - (\frac{k_i}{k_{jam}})^l]^m. \quad (11)$$

边界条件同文献[1].

4 交通流速度控制器(Traffic flow speed controller)

笔者提出一个交通流速度控制器, 应用积分器Backstepping方法实现控制率, 能跟踪期望的交通流速度, 控制器的分析和设计需要用到以下引理.

4.1 引理(Lemma)

考虑离散时间系统

$$z(n+1) = cz(n) + u(n), \quad z(0) = z_0. \quad (12)$$

式中: 当 c 是一个常量, 且 $|c| < 1$, 则当 $u(n)$ 以指数方式趋近于0时, $z(n)$ 也以指数方式趋近于0, 即 $u(n) \rightarrow 0$, 则 $z(n) \rightarrow 0$.

4.2 控制器设计(The design of the controller)

该控制器设计的主要思想是应用Backstepping方法并两次使用以上引理. 选取各个路段的交通流速度为被控变量, 通过本文算法选取适当的控制命令 $u_i(n)$, 使每个路段的交通流速度以指数形式快速收敛到期望值, 使交通流达到速度均匀的状态.

控制器设计包含以下两个步骤:

步骤1 定义路段 i 的跟踪误差为

$$\xi_i(n) = v_i(n) - v_{di}(n), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (13)$$

则根据式(10),

$$\begin{aligned} \xi_i(n+1) &= \\ v_i(n+1) - v_{di}(n+1) &= \\ f_i(n) - u_i(n) - v_{di}(n+1) &= \\ c_\varepsilon \xi_i(n) + \eta_i(n). \end{aligned} \quad (14)$$

式中

$$\eta_i(n) = f_i(n) - u_i(n) - v_{di}(n+1) - c_\varepsilon \xi_i(n). \quad (15)$$

根据引理, 式(14)中, 当取 $|c_\varepsilon| < 1$, 且 $n \rightarrow \infty$ 时, $\eta_i(n) \rightarrow 0$, 则 $\xi_i(n) \rightarrow 0$, 即 $v_i(n) \rightarrow v_{di}(n)$; 下一步的目标是选择合适的控制输入 $u_i(n)$, 保证当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\eta_i(n) \rightarrow 0$.

步骤2 对 $\eta_i(n)$ 再次应用引理, 则

$$\eta_i(n) = c_\eta \eta_i(n-1) + \beta_i(n-1), \quad (16)$$

$$\beta_i(n-1) = f_i(n) - u_i(n) - v_{di}(n+1) - c_\varepsilon \xi_i(n) - c_\eta \eta_i(n-1). \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \xi_i(0) &= \xi_i(1) = v_i(1) - v_{di}(1), \text{ 则} \\ \eta_i(0) &= \xi_i(1) - c_\varepsilon \xi(0). \end{aligned}$$

如果

$$u_i(n) = f_i(n) - v_{di}(n+1) - c_\varepsilon \xi_i(n) - c_\eta \eta_i(n-1), \quad (18)$$

则 $\beta_i(n-1) = 0$, 根据引理, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\eta_i(n) \rightarrow 0$. 根据引理, 式(16)中, 当取 $|c_\eta| < 1$, 且 $n \rightarrow \infty$ 时, $\beta_i(n-1) \rightarrow 0$, 则 $\eta_i(n-1) \rightarrow 0$, $\eta_i(n) \rightarrow 0$. 则所求控制率为

$$u_i(n) = f_i(n) - v_{di}(n+1) - c_\varepsilon \xi_i(n) - c_\eta \eta_i(n-1). \quad (19)$$

与文献[1]相比, 本文所提出的控制器计算量要小得多, 而且不需要进行矩阵的逆运算, 不会出现解不唯一的情况, 自动满足系统可控性条件.

4.3 证明(Proof)

式(19)提供了控制率 $u_i(n)$ 的求解方法, 将引理应

用到步骤2的式(16), 有: 当 $n \rightarrow \infty$, $\eta_i(n) \rightarrow 0$, $\forall i$. 同样, 将引理应用于步骤1的式(14), 保证当 $n \rightarrow \infty$, $\xi_i(n) \rightarrow 0$, $\forall i$. 因而对 $\forall i$, 当 $n \rightarrow \infty$, $v_i(n) \rightarrow v_{di}(n)$.

5 仿真研究(Simulation study)

仿真研究在MATLAB软件环境下进行, 考虑一段包含12个路段的高速公路, 每个路段的长度为500 m, 进入路段1的初始交通流量为1500 veh/h, 各路段交通流初始速度和密度如表1所示, 交通流模型的各项参数如下:

$$\begin{aligned} v_f &= 93.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, \\ k_{\text{jam}} &= 110 \text{ veh}/(\text{km} \cdot \text{lane}), \\ T &= 15/3600 \text{ h}, l = 1.86, m = 4.05, \\ \alpha &= 0.95, \kappa = 50 \text{ veh}/(\text{km} \cdot \text{lane}), \\ \kappa^1 &= 55 \text{ veh}/(\text{km} \cdot \text{lane}), \\ \mu_1 &= 12 \text{ km}^2 \text{h}^{-1}, \mu_2 = 6 \text{ km}^2 \cdot \text{h}^{-1}, \\ \rho &= 120 \text{ veh}/(\text{km} \cdot \text{lane}), \\ \tau &= 20.4/3600 \text{ h}, \end{aligned}$$

控制器参数: $c_\varepsilon = 0.9$, $c_\eta = 0.9$.

表1 高速公路各路段初始密度和速度

Table 1 Initial densities and velocities of 12 sections in a freeway

路段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
初始密度(veh/(km · lane))	18	18	18	18	18	52	52	52	18	18	18	18
初始速度(km/h)	81	81	81	81	81	29	29	29	81	81	81	81

考虑以下2种情况:

第1种情况 无控制作用, 式(10)中的 $u_i(n)$ 被式(3)中的相应项所取代, 交通流速度和密度的轮廓图如图1,2所示; 从这两个图中, 可以看到: 6~8路段的初始交通拥堵, 导致了持续的交通拥堵现象.

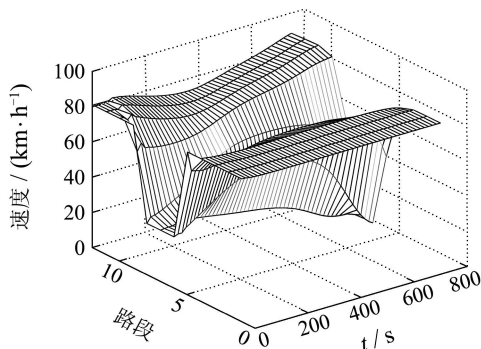


图1 没有控制作用的速度轮廓图

Fig. 1 Velocity profile without control

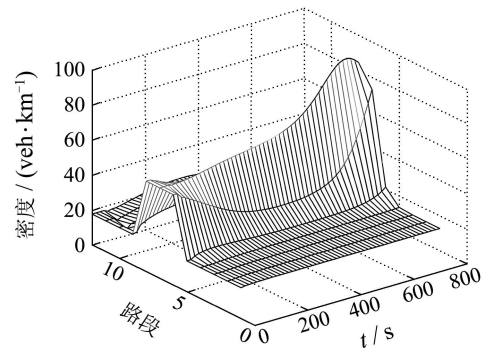


图2 没有控制作用的密度轮廓图

Fig. 2 Density profile without control

第2种情况 使用本文提出的控制器实现期望的交通流速度: 45 km/h, 仿真结果图3~6显示: 初始的交通拥堵现象被迅速消除, 交通流速度以指数形式快速收敛到期望值, 同时, 间接影响了交通流密度, 使交通流密度也处于比较均衡的状态.

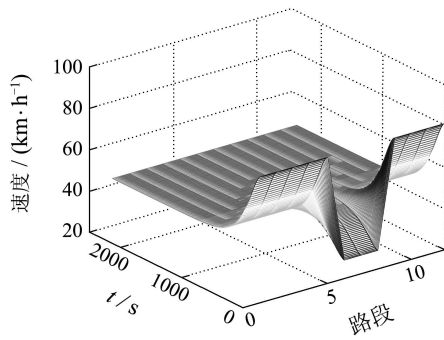


图3 速度轮廓图, 期望速度为45 km/h

Fig. 3 Velocity profile: desired velocity is 45 km/h

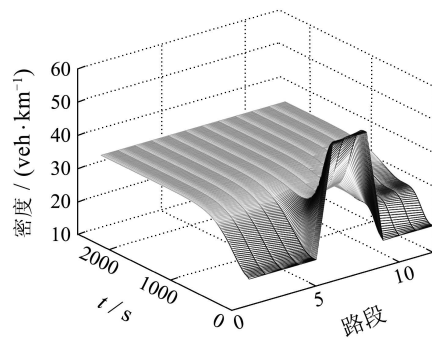


图4 密度轮廓图, 期望速度为45 km/h

Fig. 4 Density profile :desired velocity is 45 km/h

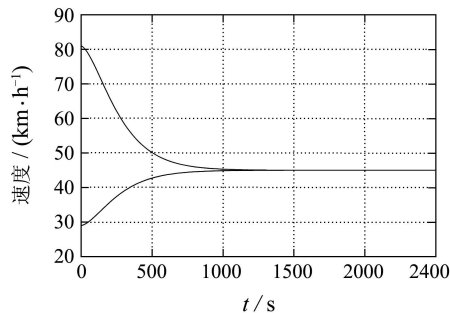


图5 每个路段的速度, 期望速度为45 km/h

Fig. 5 Velocity in each section: desired velocity is 45 km/h

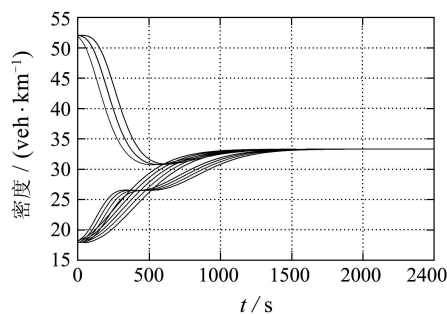


图6 每个路段的密度, 期望速度为45 km/h

Fig. 6 Density in each section: desired velocity is 45 km/h

6 结论(Conclusion)

本文提出一种改进的交通流速度控制器设计方法, 在自动化高速公路的环境下, 使高速公路各路段达到均匀的速度, 与已有的方法相比, 该控制器极大地提高了算法效率, 而且无需矩阵的逆运算, 可以自动满足系统的可控性条件. 仿真结果显示了该控制器使交通流速度以指数形式快速收敛到期望值, 可以有效地降低交通流的不稳定性, 起到缓解交通拥堵和平滑交通流的作用.

参考文献(References):

- [1] CHEN C C, ZHANG Y P, IOANNOU P A. Traffic density control for automated highway systems[J]. *Automatica*, 1997, 33(7): 1273 – 1285.
- [2] ALVAREZ L, HOROWITZ R, LI P. Traffic flow control in automated highway systems[J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(9): 1071 – 1078.
- [3] TOY C, LEUNG K, ALVAREZ L, et al. Emergency vehicle maneuvers and control laws for automated highway systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(2): 109 – 119.
- [4] ALVAREZ L, HOROWITZ R, TOY C V. Multi-destination traffic flow control in automated highway systems[J]. *Transportation Research Part C-emerging Technologies*, 2003, 11(1): 1 – 28.
- [5] PAPAGEORGIOU M. *Application of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [6] PAPAGEORGIOU M, BLOSSEVILLE J M, HADJ-SALEM H. Macroscopic modeling of traffic flow on the Boulevard Peripherique in Paris[J]. *Transportation Research (Part B)*, 1989, 23(1): 29 – 47.
- [7] PAPAGEORGIOU M, BLOSSEVILLE J M, HADJ-SALEM H. Modeling and real time control on traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris. Part I: Modeling[J]. *Transportation Research (Part A)*, 1990, 24(5): 345 – 359.
- [8] PAPAGEORGIOU M, BLOSSEVILLE J M, HADJ-SALEM H. Modeling and real time control on 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.

作者简介:

杨旭华 (1971—), 男, 浙江工业大学副教授, 博士, 目前研究方向为交通控制、人工智能, E-mail: xhyang@zjut.edu.cn;

董颖颖 (1983—), 女, 浙江工业大学硕士研究生, 目前研究方向为交通控制, E-mail: qinyou2002@126.com;

杨海东 (1983—), 男, 浙江工业大学硕士研究生, 目前研究方向为交通控制, E-mail: popular100@126.com;

王万良 (1957—), 男, 浙江工业大学教授, 博士生导师, 目前研究方向为计算机控制、生产调度, E-mail: ww1@zjut.edu.cn.