

高速公路非线性反馈模糊逻辑匝道控制器

梁新荣^{1,2}, 刘智勇², 毛宗源¹

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 五邑大学 信息学院, 广东 江门 529020)

摘要: 入口匝道控制是高速公路交通控制和智能运输系统的重要组成部分,但现有的入口匝道控制效果尚不理想. 为此,本文提出一种非线性反馈方法用模糊逻辑进行入口匝道控制. 建立了高速公路交通流动态模型,在此基础上,结合模糊逻辑理论设计了非线性反馈匝道控制器,根据密度误差和误差变化用模糊控制决定匝道调节率,模糊变量选用三角形隶属度函数,并制定了包含56条模糊规则的规则库,最后用MATLAB软件进行系统仿真. 结果表明该控制器具有优越的动态和稳态性能,它能使高速公路主线交通流密度保持为设定的期望密度,该方法用在高速公路入口匝道控制中效果良好.

关键词: 高速公路; 模糊控制; 匝道调节; 反馈控制; 交通流模型

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A

Nonlinear feedback ramp controller in freeway based on fuzzy logic

LIANG Xin-rong^{1,2}, LIU Zhi-yong², MAO Zong-yuan¹(1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;
2. School of Information, Wuyi University, Jiangmen Guangdong 529020, China)

Abstract: The on-ramp control is considered as an important component of freeway traffic control and intelligent transport systems, but the results of existing on-ramp control are not satisfactory. A nonlinear feedback method is proposed for on-ramp metering by using fuzzy logic. The freeway traffic flow dynamic model is built. Based on the model and in conjunction with the fuzzy logic theory, the nonlinear feedback ramp controller is designed. The ramp metering rate is determined by the fuzzy control based on the density tracking error and error variation. Triangle curves are used for the membership functions of the fuzzy variables. The rule base including 56 fuzzy rules is also established. Finally, the control system is simulated in MATLAB software. The result shows that the controller designed has good dynamic and steady-state performance, and can achieve a desired traffic density along the mainline of a freeway. This method is effective to the on-ramp control.

Key words: freeway; fuzzy control; ramp metering; feedback control; traffic flow model

1 引言(Introduction)

高速公路交通控制系统是一个包含人、车、路交互作用的复杂系统,其控制方法主要有入口匝道控制、主线控制、路网集成控制等. 入口匝道控制是高速公路交通控制和智能运输系统的重要组成部分,其基本目标是控制高速公路的交通需求,即在高峰期间调节进入高速公路的车辆数目,使高速公路交通流运行在最佳状态附近. 通过入口匝道控制阻止高速公路主线瓶颈的出现可使高速公路交通更顺畅,从而提高主线的通行能力、改善交通安全、减少燃油消耗和空气污染. 另一方面,当无入口匝道控制时,车辆从入口匝道强行进入高速公路主线会对主

线交通流产生扰动,此扰动可能会引起主线交通瘫痪,减少汇合区的扰动可减少擦边撞车和追尾事故.

针对传统交通控制技术的缺陷,人们把模糊逻辑^[1-3]、人工神经网络、遗传算法、支持向量机等先进技术应用到交通工程领域. 模糊逻辑是一种处理不确定性、非线性等复杂系统问题的有力工具,能较好地处理语言信息,适用于表示模糊及定性知识. 与人类思维方式的某些特征相一致,故嵌入到推理技术中具有较好的效果,模糊控制方法在交通控制中显示出它的优越性.

本文提出一种非线性反馈方法设计入口匝道模糊逻辑控制器,它由高速公路交通流模型和模糊逻

辑控制器组成.文中研究了高速公路交通流模型和流量-密度关系的非线性,根据密度误差和误差变化设计了模糊逻辑控制器,并用计算机进行了仿真研究.

2 非线性反馈模糊逻辑匝道控制器的设计 (Design of nonlinear feedback ramp controller based on fuzzy logic)

2.1 高速公路交通流模型(Freeway traffic flow model)

考虑图1所示的一段高速公路,主线的车道数目为 λ ,入口匝道的车道数目为1,采样时间为 Δt ,路段长度为 Δx ,上游流量为 q_u ,下游流量为 q ,主线交通流密度为 ρ ,平均速度为 v ,入口匝道调节率为 r ,路段内车辆总数为 N ,由车辆守恒定律^[5]得

$$N(k+1) = N(k) + \Delta t[\lambda q_u(k) - \lambda q(k) + r(k)]. \quad (1)$$

密度 ρ 定义为

$$\rho(k) = N(k)/(\lambda \Delta x). \quad (2)$$

式(1)两边除以 $\lambda \Delta x$ 得

$$\rho(k+1) = \rho(k) + \frac{\Delta t}{\Delta x}[q_u(k) - q(k) + r(k)/\lambda]. \quad (3)$$

流量和密度的基本关系为

$$q = f(\rho). \quad (4)$$

q 和 ρ 的表达式存在多种形式,例如指数型^[4],三角形^[5]和抛物线型^[5,6].这些表达式都可用来近似地描述非均匀的交通流,它们具有一些共同特性:
a)当密度为零时流量为零;
b)存在一个最大密度,称为阻塞密度 ρ_{jam} ,此时高速公路上车辆首尾相接,流量也为零;
c)存在一个临界密度 ρ_c ,此时流量最大.

格林-希尔兹提出的流量-密度关系属于抛物线型,其关系式为

$$q = v_f(\rho - \rho^2/\rho_{jam}). \quad (5)$$

式中 v_f 为自由流速度, ρ_{jam} 为阻塞密度.式(5)实际上由 $q = \rho v$ 和 $v = v_f(1 - \rho/\rho_{jam})$ 组成^[5],式(3)和式(5)形成一阶模型^[4],如果在一阶模型的基础上增加速度动态方程便形成二阶模型,典型的二阶模型是Markos Papageorgiou提出的MACK模型.一阶模型具有简单易处理的特点,适用于交通控制与仿真^[5,6],二阶模型则更适用于交通流建模与仿真.

文献[6]采用有限差分形式的密度动态方程和格林-希尔兹流量-密度关系进行控制仿真.本文采用式(3)的密度动态方程和格林-希尔兹流量-密度关系描述高速公路交通流并建立非线性反馈控制系统.由式(3)(5)得

$$\rho(k+1) = \rho(k) + \frac{\Delta t}{\Delta x}\{q_u(k) - v_f[\rho(k) - \rho^2(k)/\rho_{jam}] + r(k)/\lambda\}. \quad (6)$$

给定初始条件 $\rho(0) = \rho_0$,式(6)完整描述了高速公路交通流过程.

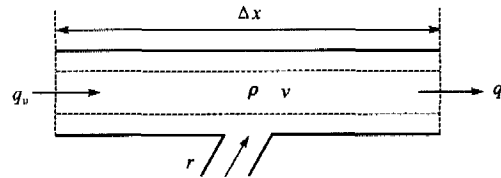


图1 一段高速公路
Fig. 1 A freeway section

2.2 匝道控制目标(Objective of ramp control)

匝道调节的目的是调节从入口匝道进入高速公路的交通量,使高速公路维持在一个期望的服务水平上,以充分利用高速公路.由交通流理论可知,交通密度是反映交通拥挤程度的关键参数^[7],如果交通密度超过临界密度较多,交通就会变得非常拥挤,此时尽管减少入口匝道流量,交通拥挤仍需要较长时间才能恢复到正常状态.所以匝道控制目标是使交通密度不超过临界密度,一般使交通密度维持在临界密度的负邻域,即 $\rho_d = \rho_c - \varepsilon$,式中 ρ_d 为期望密度, ρ_c 为临界密度, ε 为适当的小正数.

2.3 非线性反馈模糊逻辑匝道控制器(Nonlinear feedback ramp controller based on fuzzy logic)

非线性反馈模糊逻辑匝道控制器如图2所示,误差 $e(k) = \rho_d(k) - \rho(k)$,误差变化 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$,入口匝道调节率 $r(k) = r(k-1) + \Delta r(k)$,交通流模型由式(6)描述.

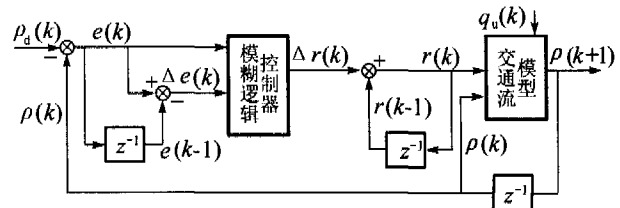


图2 非线性反馈模糊逻辑匝道控制器
Fig. 2 Nonlinear feedback ramp controller based on fuzzy logic

图2所示的控制系统是一个非线性反馈闭环系统,系统的输入是期望的交通密度 ρ_d ,上游流量 q_u 可以看成是扰动输入,系统的输出是实际的交通密度 ρ ,入口匝道调节率 r 是控制变量,交通密度 ρ 通过调节从入口匝道进入高速公路的交通量来实现其控制作用.选择合适的模糊逻辑控制器控制入口匝

道调节率 r 可使系统输出 ρ 跟踪系统的输入 ρ_d 。这种反馈控制能够抑制交通流模型误差, 能够抑制扰动输入 q_u 的噪声, 系统具有较强的鲁棒性, 具有较快的响应速度, 稳态误差很小或为零。相比之下, 文献[3] 是一个多输入单输出的控制系统, 输入维数的增加导致了控制规则的复杂化, 而目前对于多输入模糊控制系统规则的冗余性、兼容性、完备性问题还缺乏有效的解决办法。

模糊逻辑控制器的输入为 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$, 输出为 $\Delta r(k)$ 。 $e(k)$ 的取值范围为 $-40 \sim +40$ veh/km/lane, $e(k)$ 分为 8 个语言变量: NB (负大), NM (负中), NS (负小), NO (负零), PO (正零), PS (正小), PM (正中), PB (正大)。根据文献[3] 提出的隶属度函数选择的基本原则, 选择 $e(k)$ 的隶属度函数如图 3 所示, $e(k)$ 中区分了 NO (负零) 和 PO (正零), 主要是着眼于提高稳态精度。 $\Delta e(k)$ 的取值范围为 $-80 \sim +80$ veh/km/lane, $\Delta e(k)$ 分为 7 个语言变量: NB (负大), NM (负中), NS (负小), ZO (零), PS (正小), PM (正中), PB (正大), 选择 $\Delta e(k)$ 的隶属度函数如图 4 所示。 $\Delta r(k)$ 的取值范围为 $-1000 \sim +1000$ veh/h, 也分为 7 个语言变量, 选择 $\Delta r(k)$ 的隶属度函数如图 5 所示。

模糊控制规则的确定是结合专家知识和设计人员的实际经验, 共有 56 条规则, 这 56 条规则如表 1 所示。

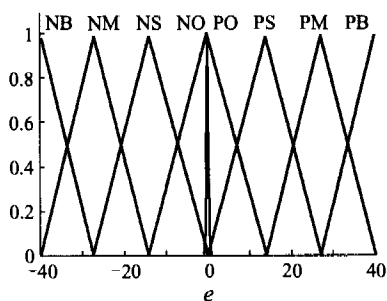


图 3 误差 $e(k)$ 隶属度函数

Fig. 3 Membership function of tracking error $e(k)$

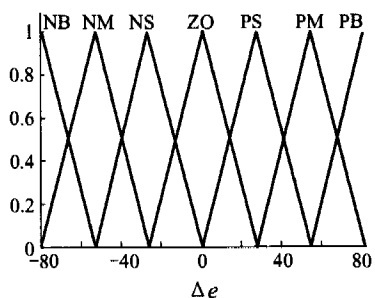


图 4 误差变化 $\Delta e(k)$ 隶属度函数

Fig. 4 Membership function of error variation $\Delta e(k)$

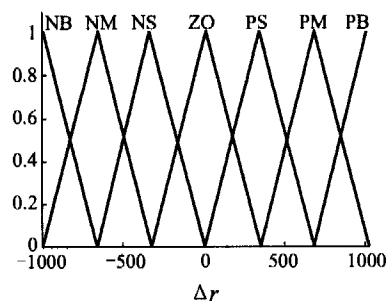


图 5 调节率变化 $\Delta r(k)$ 隶属度函数

Fig. 5 Membership function of metering rate variation $\Delta r(k)$

表 1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules

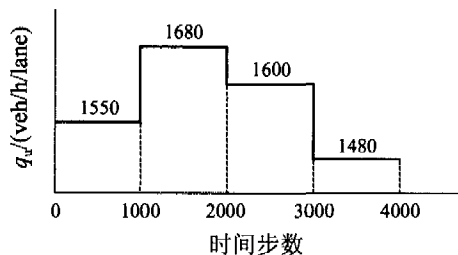
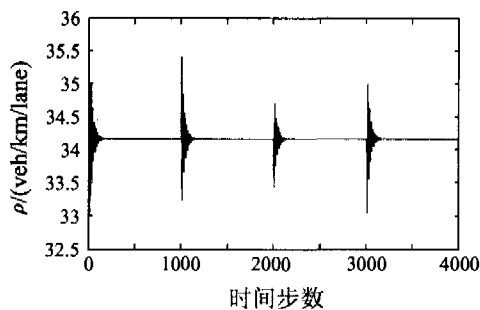
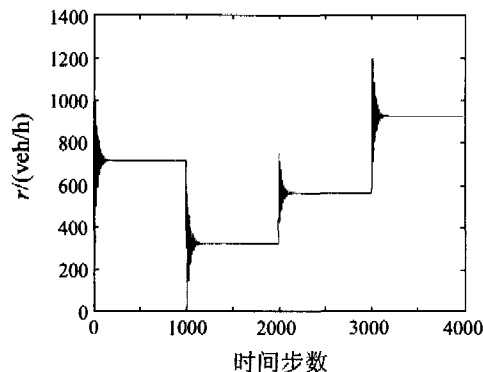
e	Δe						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NS	NM	NM	NM	NM	ZO	PS	PS
NO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PM	PM	PM	PM
PM	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	PB

模糊控制规则的选取说明如下: 由图 2 得: $e = \rho_d - \rho$, 表 1 第 3 行前 3 条规则中, e 为 NB (负大), 说明 ρ 很大, 超过了临界密度, Δe 为负, 说明变化趋势是 ρ 还要继续增大, 根据经验, 应该尽量减小入口匝道调节率 r , 即 Δr 为 NB (负大), 其它规则可以类似理解。

3 仿真研究 (Simulation research)

图 2 所示的控制器可以用两种不同的方法进行仿真, 一种方法是根据图 2 直接编制 Matlab 仿真程序, 另一种方法是用 Matlab 建立 Simulink 仿真模型。上机表明两种方法的仿真结果相同, 相比之下, 直接编程仿真具有灵活方便的特点。仿真时采用第 2 节的模糊控制规则, 交通流模型由式(6)描述, 选择模型参数为: 自由流速度 $v_f = 97.3$ km/h, 阻塞密度 $\rho_{jam} = 74$ veh/km/lane, 临界密度 $\rho_c = 37$ veh/km/lane, 交通流容量 $q_m = 1800$ veh/h/lane, 车道数 $\lambda = 3$ 。选择期望密度 $\rho_d = 34.16$ veh/km/lane, 仿真时间步数为 4000 步。假设上游流量 q_u 变化曲线如图 6 所示, 检验入口匝道采用非线性反馈模糊逻辑控制器的控制效果。

图 7 是高速公路主线密度 ρ 变化曲线, 图 8 是相应的入口匝道调节率 r 曲线。

图6 上游流量 q_u 变化曲线Fig. 6 Variation curve of upstream flow q_u 图7 密度 ρ 变化曲线Fig. 7 Variation curve of density ρ 图8 入口匝道调节率 r 曲线Fig. 8 Curve of on-ramp metering rate r

从图6,图7,图8可以看出:当上游流量 q_u 发生阶跃变化时,主线密度 ρ 和入口匝道调节率 r 都存在过渡过程,经过较短时间的暂态过程后便进入稳态.当 q_u 分别为 1550, 1680, 1600, 1480 veh/h/lane 时,稳定后的调节率 r 分别为 718, 328, 568, 928 veh/h, 而稳态时密度 ρ 均等于 34.16 veh/km/lane, 与选择的期望密度 ρ_d 是相同的.

为了进一步说明采用非线性反馈模糊逻辑控制器的控制效果,上游流量 q_u 仍采用图6的变化曲线,再用经典 PID 控制进行仿真.仿真结果为:经典 PID 控制的控制效果与选择的 k_p , k_i , k_d 参数有很大的关系,当随意选择 k_p , k_i , k_d 时,仿真输出 ρ 和 r 可能无解.当 $k_p = 17.3$, $k_i = 3.0$, $k_d = 3.8$ 时,主线密度 ρ 和入口匝道调节率 r 存在较长的暂态过程,最后进入稳态,稳定后的主线密度 ρ 和入口匝道调节率 r 与非线性反馈模糊逻辑控制器的结果相同.

4 结束语 (Conclusions)

本文把模糊逻辑和自动控制理论结合起来,建立了高速公路入口匝道非线性反馈控制模型,根据主线密度误差和误差变化信息,设计了模糊逻辑控制器,充分利用计算机可视化仿真的优点对模型进行了仿真研究,然后用经典 PID 控制进行了仿真对比.仿真结果表明,经典 PID 控制参数选取困难,非线性反馈模糊逻辑控制暂态过程优于 PID 控制.非线性反馈模糊逻辑控制方法可使高速公路主线交通流运行在期望的最佳状态附近,同时又能维持可接受的匝道服务水平,从而使主线交通流不堵塞,对提高主线的通行能力,改善高速公路运行的安全和效率具有重要的意义.

参考文献 (References):

- [1] 王红岩, 王立公, 孙冬野. 无级变速汽车的自适应模糊控制研究[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 70-74.
(WANG Hongyan, WANG Ligong, SUN Dongye. Study on the adaptive fuzzy control for CVT vehicle [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(1): 70-74.)
- [2] 薛阳, 彭光正, 贺保国. 气动位置伺服系统的非对称模糊 PID 控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 129-133.
(XUE Yang, PENG Guangzheng, HE Baoguo. Asymmetric fuzzy PID control for pneumatic position control system [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(1): 129-133.)
- [3] 徐建闻, 贺敬凯. 高速公路入口匝道模糊控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 639-642.
(XU Jianmin, HE Jingkai. Design of on-ramp fuzzy controller on freeways [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 639-642.)
- [4] KOTSIALOS A, PAPAGEORGIOU M. The importance of traffic flow modeling for motorway traffic control [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2001, 1(1-2): 179-203.
- [5] 刘智勇. 智能交通控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 14-17, 224-251.
(LIU Zhiyong. *The Theory and Applications of Intelligent Traffic Control* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 14-17, 224-251.)
- [6] ZHANG H M, RITCHIE S G, JAYAKRISHNAN R. Coordinated traffic responsive ramp control via nonlinear state feedback [J]. *Transportation Research*, 2001, C (9): 337-352.
- [7] CHIEN C C, ZHANG Youping, IOANNOU P A. Traffic density control for automated highway systems [J]. *Automatica*, 1997, 33(7): 1273-1285.

作者简介:

梁新荣 (1964—), 男, 副教授, 华南理工大学自动化学院博士生, 研究方向: 智能控制理论与应用, E-mail: xrliang@wyu.edu.cn;

刘智勇 (1961—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 智能控制理论与应用;

毛宗源 (1936—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 复杂过程控制、智能控制理论与应用.