

## 高速公路入口匝道模糊控制器的设计

徐建闽, 贺敬凯

(华南理工大学 交通学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 入口匝道控制是高速公路控制中的重要内容,但目前在高速公路中使用的入口匝道控制方法的效果均不理想.本文提出使用模糊控制方法进行入口匝道控制的思路,并根据入口匝道控制的原理和模糊控制系统的设计步骤对模糊控制器进行了设计.选用上、下游时间占有率、车速及排队长度等五个模糊量为输入量,根据实际情况分别采用三角形和梯形隶属度函数,建立了包含 12 条模糊控制规则的规则库,并使用 MATLAB 工具进行系统仿真.结果表明该控制器用在高速公路入口匝道控制中具有良好的效果.

**关键词:** 模糊控制器; 入口匝道控制; 匝道调节率

**中图分类号:** TP27      **文献标识码:** A

## Design of on-ramp fuzzy controller on freeways

XU Jian-min, HE Jing-kai

(College of Traffic and Communications, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** The on-ramp control is an important method in freeway traffic control. But the effects of the current methods of on-ramp control are not satisfactory. The idea of fuzzy control method is promoted in on-ramp control problem. The fuzzy controller was designed based on the theory of on-ramp control and the design process of fuzzy control system. Five fuzzy variables including occupancy, speed and queue are taken as inputs, and triangle and trapezoid subjection degree functions are used according to actual condition. The rule base including 12 rules is established. Finally, the control system is simulated in MATLAB software. The result indicates that the fuzzy controller designed is effective to the on-ramp control.

**Key words:** fuzzy controller; on-ramp control; metering rate

### 1 引言 (Introduction)

高速公路交通控制系统是一个复杂的包含人、车、路交互作用的社会系统,其控制包括匝道控制、主线控制、通道控制等.随着控制理论的发展,控制策略的优化方法经历了线性规划、最优控制、次优控制、分层递阶控制.从数学动力模型来考察交通控制系统是一个非线性、时变系统,交通控制系统可以实现优化交通的目的,但是一旦出现非正常交通时,交通控制系统往往无法适从,甚至出现交通混乱的情况.智能控制系统的出现给高速公路交通控制系统带来了新的希望.智能控制系统一般具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型混合表示的混合控制过程,它适用于含复杂性、不完全性、模糊性、不确定和不存在已知算法的生长过程.目前,模糊控制在高速公路中已经开始应用,并取得了一定的成就,模糊控制在交通控制中有着广阔的发展前景.

文献[1,2]综述了城市高速公路交通控制,文中得出结论:模糊控制和神经网络是解决交通控制问

题的有效途径.文献[3]讨论了匝道模糊控制器的设计,但文中没有给出选择输入量的依据,也没有给出具体的模糊隶属度函数.本文在它们的基础上选择了不同的模糊输入量并阐明选择这些参数的原因,对模糊控制器的设计进行了详细的说明,并在仿真实验中得到了较满意的结果.

### 2 模糊控制系统设计步骤 (Design method of fuzzy control system)

由于利用人的直觉和经验来设计控制系统,不需要受控对象的数学解析模型,因此设计模糊控制器也没有如经典控制器设计那样成熟而固定的设计过程和方法.但对于模糊控制器的设计,可以参照以下设计步骤及设计原则:

#### 1) 定义输入输出变量.

首先要决定受控系统有哪些输入的状态必须被监测和哪些输出的控制作用是必须的.对于多输入的情况,要考虑实现的复杂性.因此在选择输入输出量时要分清主次轻重.

## 2) 定义所有变量的模糊化条件.

根据受控系统的实际情况,决定输入变量的测量范围和输出变量的控制作用范围,以进一步确定每个变量的论域,然后再安排每个变量的语言值及其相对应的隶属度函数.

## 3) 设计控制规则库.

这是一个把专家知识和熟练操作工的经验转换为用语言表达的模糊控制规则的过程.

## 4) 设计模糊推理结构.

这一部分可以设计成通用的计算机或单片机上用不同推理算法的软件程序来实现,也可采用专门设计的模糊推理硬件集成电路芯片来实现.

## 5) 选择反模糊化策略的方法.

为了得到确切的控制值,就必须对模糊推理获得的模糊输出量进行转换,这个过程称作反模糊化计算,亦称精确化计算.这实际上是要在一组输出量中找到一个有代表性的值,或者说对推荐的不同输出量进行促裁判决.

## 3 入口匝道控制原理及控制输入检测量的选择 (Principle of on-ramp control and the selection of inputs of the fuzzy control)

### 3.1 入口匝道控制原理 (Principle of on-ramp control)

入口匝道控制的基本目标是控制高速公路的交通需求.它以高速公路主线交通流为控制对象,以匝道入口流量为系统的输入控制量,通过计算匝道上游交通需求与下游道路容量差额来寻求最佳入口匝道流量控制,从而使高速公路本身的交通需求不超过它的容量,使高速公路主线交通流处于最佳状态.

入口匝道控制包括匝道调节和匝道关闭两种方法,因入口匝道整体定时控制容易实现,所以其在交通控制中应用最广泛<sup>[1]</sup>.采用入口匝道定时调节来消除高速公路上的交通拥挤现象,那就必须保持整个交通需求量小于高速公路的交通容量,所以匝道调节率  $r$  /辆·h<sup>-1</sup> 的计算应立足于匝道上游交通需求  $q_d$  /辆·h<sup>-1</sup>、匝道下游交通容量  $C_a$  /辆·h<sup>-1</sup> 和匝道处期望进入高速公路的交通流量  $q_r$  /辆·h<sup>-1</sup> 三者之间的关系上.当  $C_a \geq q_d + q_r$  时,不需进行调节,因为不会发生拥挤;如果不满足上式并且  $q_d > C_a$ ,此时进行匝道调节也无法消除拥挤,可短时关闭匝道,并设法使上游入口匝道调节率减少,减少上游交通需求;当  $q_d < C_a < q_d + q_r$  时,可进行匝道定时调节.匝道调节率计算公式为

$$r = C_a - q_d. \quad (1)$$

调节周期长度  $T$  (单位为 s) 为

$$T = 3600/r. \quad (2)$$

约束条件为

$$r_{\min} \leq r \leq r_{\max}, \quad (3)$$

$$d - \frac{L_{\max} - L_0}{T_0} \leq r \leq d + \frac{L_0}{T_0}. \quad (4)$$

式中:  $d$  为匝道车辆到达率/辆·h<sup>-1</sup>;  $L_0$  为匝道上初始排队车辆数;  $L_{\max}$  为匝道上允许的最大排队车辆数;  $T_0$  为时段长度;  $T$  为周期长度;  $r_{\min}$  为调节率下限值,一般取 180~240 辆/h;  $r_{\max}$  为调节率上限值,单车调节为 900 辆/h,车队调节为 1100 辆/h.

因此,人口匝道调节率主要依据匝道上游需求、下游容量、匝道需求、调节率的上下约束条件和道路条件等因素来确定,主要用于预防高速公路上常发性的拥挤.

另外,根据交通调查观测得到的交通资料,假设车流均匀、车种单一时,可得到 3 个参数之间的理论关系式,这就是交通流基本模型,即

$$\rho = q/v_s. \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为交通流密度,单位为辆/km;  $q$  为交通量,单位为辆/h;  $v_s$  为空间平均车速,单位为 km/h.

上式表示了  $\rho$ 、 $q$ 、 $v_s$  三者之间的关系,若已知 3 个参数中任意 2 个,则第 3 个就可确定.在研究三者之间的关系时,尽管实际上三者之间不存在着单一的从属关系,但通常采用近似的方法进行研究.

因时间占有率与交通流密度有着正比例的关系,而且在实际交通调查中时间占有率有良好的检测性,因此常用作监测参数.

### 3.2 模糊控制输入量的确定 (Selections of inputs of fuzzy control)

由上面讨论可知,在进行入口匝道的模糊控制器的设计中,可以采用时间占有率、车速来近似描述交通流的状态,同时也要考虑入口匝道排队处的情况.

因此,进行模糊控制时,选用以下模糊量作为输入:上游时间占有率  $O_{u1}$ 、上游车速  $V_u$ 、下游时间占有率  $O_{d1}$ 、下游车速  $V_d$ 、匝道排队长度  $L$  等 5 个模糊输入量;模糊输出量为入口匝道调节率.同时根据入口匝道控制原理得出,当上游时间占有率较低时,匝道调节率较高,上游时间占有率较高时,入口匝道调节率较低等规则,这些即模糊控制规则,其他控制规则将在模糊控制器的控制规则中详细给出.

以上各种变量需满足边界条件:  $0 < \text{时间占有率} / (\%) < 80$ ;  $0 < \text{车速} / \text{km} \cdot \text{h}^{-1} < 150$ ;  $0 < \text{排队长度} / \text{辆}$

$< 20$ (最大排队长度);  $180 < \text{调节率/辆} \cdot \text{h}^{-1} < 1000$ . 这些边界条件被用于下面模糊控制器的设计. 上面时间占有率的约束条件最大为 80%, 这是因为车辆在行驶时需有一定的停车时距. 当然, 以上边界的条件需要根据道路的实际情况进行确定, 并且在本文设计的模糊控制器中亦可进行修改.

#### 4 入口匝道模糊控制器的设计 (Design of on-ramp controller)

##### 4.1 输入变量隶属函数的确定 (Selections of membership functions of inputs)

隶属函数的选择遵循以下基本原则:

- 1) 表示隶属函数的模糊集合必须是凸模糊集合;
- 2) 变量所取隶属函数通常是对称和平衡的;
- 3) 隶属函数要符合人们的语言顺序, 避免不

恰当的重叠;

4) 论域中的每个点应该至少属于一个隶属度函数的区域, 同时它一般应该属于至多不超过两个隶属度函数的区域.

根据以上原则, 并且在实际中为了简化计算, 通常选用三角形或梯形作为隶属度函数曲线.

$O_u$  和  $O_d$  分别采用 3 个语言变量: short(低占有率), aver(中等占有率), long(高占有率);  $V_u$  和  $V_d$  采用 3 个语言变量: low(低速), aver(中速), high(高速);  $L$  采用 3 个语言变量值: short(短), aver(中等), long(长); 对于输出量  $R$ , 采用 5 个语言变量: NS(小), NM(较小), Z(中等), PM(较大), PB(大). 根据实际情况,  $O_u, O_d$  和  $L$  采用三角形隶属度函数,  $V_u$  和  $V_d$  采用梯形隶属度函数,  $R$  亦采用三角形隶属度函数. 各隶属度函数的图形分别用图 1~4 表示.

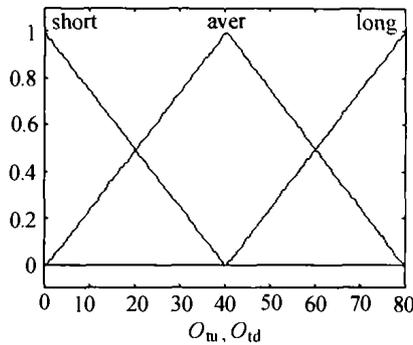


图 1  $O_u, O_d$  的隶属度函数

Fig. 1 membership function of  $O_u$  and  $O_d$

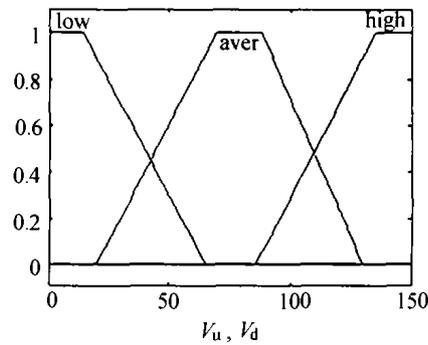


图 2  $V_u$  和  $V_d$  的隶属度函数

Fig. 2 Membership function of  $V_u$  and  $V_d$

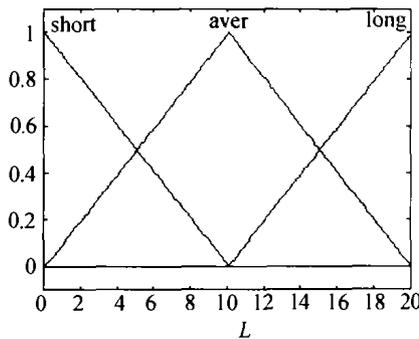


图 3 排队长度的隶属度函数

Fig. 3 Membership function of  $L$

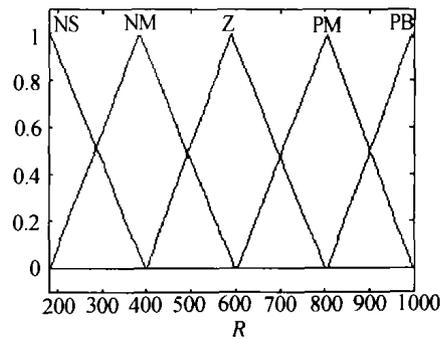


图 4 调节率  $R$  的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of  $R$

##### 4.2 模糊控制规则的确定 (Establishment of the fuzzy control rules)

模糊控制规则的来源是专家, 模糊规则的数目也来自专家, 为了得到一个控制效果令人满意的实用的控制系统, 必须咨询专家的意见. 在此, 本文根据在入口匝道控制方面的经验体会, 建立一个简单的包含 12 条规则的规则库:

- 1) If ( $O_d$  is short) or ( $V_d$  is high) then ( $R$  is PB) (1);
- 2) If ( $V_d$  is aver) and ( $L$  is long) then ( $R$  is PB) (1);
- 3) If ( $O_u$  is short) and ( $O_d$  is aver) then ( $R$  is PB) (1);
- 4) If ( $V_u$  is high) and ( $V_d$  is aver) then ( $R$  is PB) (1);

5) If ( $O_{tu}$  is aver) and ( $O_{td}$  is aver) and ( $L$  is long) then ( $R$  is PM) (1);

6) If ( $V_u$  is aver) and ( $V_d$  is aver) and ( $L$  is long) then ( $R$  is PM) (1);

7) If ( $V_u$  is aver) and ( $V_d$  is aver) and ( $L$  is aver) then ( $R$  is Z) (1);

8) If ( $O_{tu}$  is aver) and ( $O_{td}$  is aver) and ( $L$  is aver) then ( $R$  is Z) (1);

9) If ( $O_{td}$  is long) or ( $V_d$  is low) or ( $L$  is long) then ( $R$  is NM) (1);

10) If ( $O_{td}$  is long) or ( $V_d$  is low) or ( $L$  is short) then ( $R$  is NS) (1);

11) If ( $O_{tu}$  is long) and ( $O_{td}$  is aver) then ( $R$  is NM) (1);

12) If ( $O_{tu}$  is long) and ( $V_u$  is low) and ( $V_d$  is low) then ( $R$  is NS) (1).

第1)条规则说明,当下游车道时间占有率“低”或车速“高”时,调节率为“大”,该条规则的权值为1,其他规则可做类似理解.需要说明一点,可以根据每条规则的重要性给每条规则赋予不同的权值,权值在每条规则最后的括号中标出.

## 5 仿真结果(Simulation result)

模糊推理是一种以模糊判断为前提,运用模糊语言规则,推出一个新的近似的模糊判断结论的方法,Mamdani推理法是目前在模糊控制中普遍使用的方法.对于反模糊化方法应用比较普遍的是面积中心法.

本文使用 Matlab 工具对文中设计的控制器进行仿真,采用的模糊推理为 Mamdani 类型;反模糊化方法采用而积中心法.使用5个输入量  $O_{tu}$ ,  $V_u$ ,  $O_{td}$ ,  $V_d$ ,  $L$  进行仿真,仿真结果如下:

5个输入量为40,75,40,75,10,则系统输出  $R$  的反模糊化值为524.6403;

5个输入量为40,75,0,150,10,则系统输出  $R$  的反模糊化值为728.4375;

5个输入量为40,75,80,0,10,则系统输出  $R$  的反模糊化值为279.2639;

仿真结果说明如下:在下游车速高或者时间占有率低时,则应有较大的入口匝道率;而在下游车速低,交通拥挤时,采用较低的入口匝道调节率;而在

上下游车速中等,时间占有率中等时,有较大的入口匝道调节率.

由以上结果可以看出,该模糊控制器得出较为理想的结果.在实际控制中,可以根据实时测得的上下游的时间占有率、车速以及入口匝道排队长度,给出适当的入口匝道调节率.

## 6 结束语(Conclusion)

本文首先介绍入口匝道控制原理,并据此详细设计了用于入口匝道控制的模糊控制器.仿真结果表明,该方法简单可行,具有实用价值.

另外,需要说明的是本文设计的为多维模糊控制器.从理论上分析,提高控制器输入变量的个数会提高控制器的控制性能,但是输入维数的增加导致了控制规则的复杂化、控制算法的复杂化.如何解决多维模糊控制系统规则的冗余性、兼容性等,有效的方法还没有.因此,本文设计的多维模糊控制器需要经过实践的检验,并需要在实践中改进控制规则库.

## 参考文献(References):

- [1] 刘伟铭.高速公路系统控制方法[M].北京:人民交通出版社,1998.  
(LIU Weiming. *The Control Technique on Freeway* [M]. Beijing: People Traffic Press, 1998.)
- [2] 王亦兵,韩曾晋,贺国光.城市高速公路交通控制综述[J].自动化学报,1998,(4):484-496.  
(WANG Yibing, HAN Zengjin, HE Guoguang. A survey on urban freeway traffic control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998,25(4): 484-496.)
- [3] 谭满春,徐建闽,毛宗源.高速公路入口匝道模糊逻辑控制[J].华南理工大学学报,1998,25(8):5-8.  
(TAN Manchun, XU Jianmin, MAO Zongyuan. On-ramp fuzzy logic control in freeway[J]. *J of South China University of Technology (Natural Science)*, 1998,25(8):5-8.)

## 作者简介:

徐建闽 (1960—),男,华南理工大学教授,博士生导师,研究领域:复杂系统控制及应用、智能交通系统、道路交通信息工程, E-mail: aujmxu@scut.edu.cn.

贺敬凯 (1974—),男,华南理工大学控制理论与控制工程专业博士研究生,主要研究方向:智能控制及应用, E-mail: he.jing kai@zte.com.cn;