

文章编号: 1001-0920(2005)02-0152-04

交通信号自适应模糊控制器的设计及稳定性分析

樊晓平, 李 艳

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 针对城市道路路口的信号控制, 提出一种自适应模糊控制器, 并对其稳定性进行分析. 通过控制器给出路口实时信号配时, 根据红灯相位的等候车辆平均损失和绿灯相位释放车辆的平均增益, 给出了模糊控制器的自适应算法, 以实时修正其模糊规则. 在自适应模糊控制器的稳定性分析中, 采用模糊控制系统闭环模型的模糊关系矩阵, 证明在路口车辆随机产生的情况下, 模糊控制系统是稳定的. 仿真结果表明, 自适应模糊控制器比全感应控制器、简单模糊控制器更能适应路口交通流的变化, 极大地改善了系统性能.

关键词: 城市交通信号控制; 自适应模糊控制器; 稳定性分析

中图分类号: U 491. 23; U 491. 51

文献标识码: A

Design and stability analysis of the adaptive fuzzy controller for traffic signal control

FAN Xiao-ping, LI Yan

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China
Correspondent: FAN Xiao-ping, E-mail: xpfan@mail.csu.edu.cn)

Abstract: An adaptive fuzzy controller is developed for urban traffic signal control, and its stability analysis is also analyzed. The controller gives the real-time signal timing at an intersection, and then the average losses of vehicles waited in red phase and the average profits of vehicles cleared in green phase respectively according to the current traffic conditions are calculated. The adaptive fuzzy controller develops the adaptive algorithm for the controller to modify the fuzzy rules in real-time. The fuzzy relation matrixes of the closed-loop model is used to prove the stability of the fuzzy control system in such a traffic condition that the vehicles arrive at the intersection randomly. The simulation shows that, with the comparison with the full-actuated controller and the simple fuzzy controller, the proposed one is more successfully to response the traffic conditions.

Key words: urban traffic signal control; self-adaptive fuzzy controller; stability analysis

1 引言

人工智能理论用于控制系统的研究是目前备受关注的研究课题^[1]之一. 其中很多研究将模糊控制用于路口信号的控制^[2-6]. 虽然模糊控制器对于用语言信息描述的复杂系统能够起到满意的控制作用, 但在具体仿真过程中, 模糊逻辑规则的选取、模糊输入变量的选择将对控制器的结果起到重要的作用. 改变输入变量和模糊规则, 将对仿真结果影响很大; 当二者选取不合适时, 仿真结果不甚理想, 甚至

比传统的感应控制器更差.

自适应模糊系统是具有学习算法的模糊逻辑系统^[7], 即自适应模糊系统保持了模糊控制器的优势, 通过学习, 利用实时数据信息对控制器的参数进行调整, 能够自动产生新的模糊规则, 具有适应控制系统实时变化的能力. 在目前已有的研究中, 自适应模糊逻辑控制用于城市交通信号控制的研究尚未见文献报道, 仅仅依靠有限的模糊规则对路口信号进行配时, 不能实时有效地响应实际车流量变化, 因而限

收稿日期: 2004-04-07; 修回日期: 2004-06-15

作者简介: 樊晓平(1961—), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、智能交通系统等研究; 李艳(1978—), 女, 陕西澄城人, 博士生, 从事交通信息工程及控制的研究.

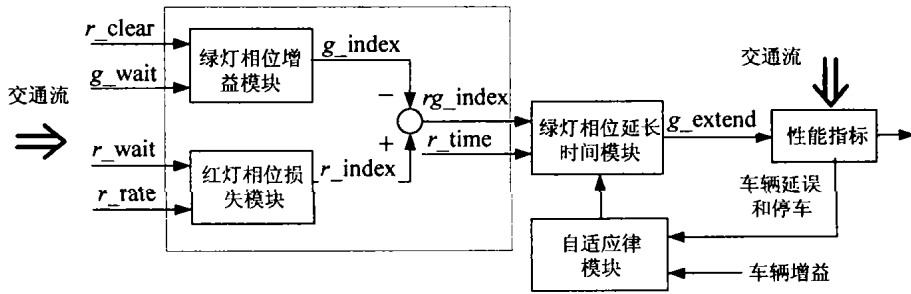


图 1 城市交通路口信号自适应模糊控制器原理

制了模糊控制器的作用

本文将自适应模糊系统用于城市交通信号控制, 通过系统性能指标, 即路口车辆的延迟和停车次数来改变输入变量值, 以产生新的控制器模糊规则路口信号配时性能指标的改善非常明显, 具有很好的应用前景 本文通过模糊关系矩阵对控制系统进行稳定性分析, 分析表明在车流以大流量随机到达的情况下, 自适应模糊信号控制系统能够保持良好的稳定性

2 自适应模糊控制器的设计

在城市交通路口信号控制中, 信号周期是一系列基本交通信号组合的循环时间 而信号相位是信号周期中具有通行权的一组车流通过路口的持续通行时间, 根据路口几何状况和车流量信息可设置多个信号相位 通过给具有通行权的车流设置绿灯相位, 而与其冲突的其他车流设置为红灯相位来进行路口信号控制, 实现了路口车流在时间上的优化分配

本文通过红绿灯相位的车流和信号信息, 设计出交通信号自适应模糊控制器 如图 1 所示, 控制器由绿灯相位增益模块、红灯相位损失模块、绿灯时间延长模块和自适应律学习模块组成

2.1 绿灯相位增益模块

设计绿灯相位增益模块的目的是为了得到绿灯相位释放车辆的增益指数 增益是相对信号路口红灯相位的等候车辆所产生的损失而言, 绿灯相位释放车辆是没有延误和停车而顺畅通过路口的收益

输入输出变量: 输入变量为绿灯相位车辆的释放数 g_wait (0~ 30 veh/相位)、绿灯相位车辆的增长率 g_rate (0~ 8 veh/15 s/车道); 输出变量为绿灯相位增益指数 g_index (0~ 5)。

控制原则: 绿灯相位车辆的释放数越多, 增长率越大, 绿灯相位增益指数越大; 反之, 绿灯相位车辆的释放数越少, 增长率越小, 绿灯相位增益指数越小 模糊规则如表 1 所示

表 1 绿灯相位增益模块模糊规则表

g - rate	g - wait						
	零	小	较小	中	较中	大	很大
零	零	零	零	小	小	中	中
小	零	零	小	小	中	中	大
中	小	小	中	中	中	大	很大
大	小	中	中	中	大	很大	很大
很大	中	中	中	大	很大	很大	很大

2.2 红灯相位损失模块

设计红灯相位损失模块的目的是为了得到红灯相位等候车辆的损失指数, 即由于车辆等候而产生的延误和停车损耗程度

输入输出变量: 输入变量为(等候车辆数最大的)红灯相位车辆的等待数 r_wait (0~ 30 veh/相位), 红灯相位车辆的增长率 r_rate (0~ 8 veh/15 s/车道); 输出变量为红灯相位损失指数 r_index (0~ 5)。

控制原则: 等待数越多, 增长率越大, 红灯相位损失指数越大; 反之, 等待数越少, 增长率越小, 红灯相位损失指数越小 模糊规则如表 2 所示

表 2 红灯相位损失模块模糊规则表

r - rate	r - wait					
	零	小	较小	中	大	很大
零	零	零	零	小	中	中
小	零	小	小	中	中	大
中	小	小	中	中	大	很大
大	小	中	中	大	很大	很大
很大	中	中	大	很大	很大	很大

2.3 绿灯相位延长时间模块

设计绿灯相位延长时间模块的目的是根据红绿灯相位车辆的增益指数和损失指数, 得到当前绿灯相位的延长时间 若延长时间为零, 则控制器自动进行相位切换, 等候车辆损失指数最大的红灯相位转为绿灯相位

输入输出变量: 输入变量为红灯相位的运行时间 r_time (0~ 60 s), 红灯相位损失指数与绿灯相位

增益指数之差 $rg\text{-index}$; 输出变量为绿灯相位的延长时间 $g\text{-extend}$ (0~ 20 s).

控制原则: 红灯相位运行时间越长, 指数差越大, 绿灯相位的延长时间越小; 红灯相位运行时间越短, 指数差越小, 绿灯相位的延长时间越大. 模糊规则如表 3 所示

表 3 绿灯相位延长时间模块模糊规则表

$r\text{-time}$	$rg\text{-index}$						
	负大	负中	负小	零	正大	正中	正大
零	很大	很大	大	中	中	中	小
小	很大	很大	大	大	中	小	小
较小	很大	很大	大	中	中	小	零
中	很大	大	中	中	小	零	零
较中	大	中	小	小	零	零	零
大	中	小	小	零	零	零	零
很大	零	零	零	零	零	零	零

2.4 自适应律的确定

根据目标函数(即车辆延误和停车的损失 D , 及其与绿灯相位释放车辆的总增益之差 E (对应误差和误差变化)) 的比较, 求得绿灯时间延长的校正量 C (- 2~ 2).

自适应律作用的方式是: 将校正量 C 直接加到绿灯时间延长子控制器的输入及红绿指数之差 $rg\text{-index}$ 上, 即通过路口等候车辆的延误损失和释放车辆的增益二者的权衡来影响绿灯时间的延长, 并对绿灯时间延长子控制器的模糊规则进行校正

校正原则: 在损失 D 较小的情况下, 尽量保持绿灯相位的通行; 在同等情况下, 尽量保持红灯相位车辆延迟最小. 模糊规则如表 4 所示

表 4 自适应律模块的模糊规则表

D	E				
	负大	负小	零	正小	正大
小	负大	负大	负小	正小	正大
较小	负大	负小	正小	正大	正大
中	负小	正小	正大	正大	正大
大	正小	正大	正大	正大	正大
很大	正大	正大	正大	正大	正大

2.5 自适应模糊控制器各变量的隶属函数选取

模糊控制器的隶属函数都选取高斯 2 型, 这是因为相对三角形隶属函数而言, 高斯 2 型曲线形状变化较缓, 稳定性好; 另外, 根据交通路口信号配时的实际情况, 输出响应对灵敏度要求较低. 在仿真试验中采用高斯 2 型, 能够得到更好的信号配时

3 稳定性分析

在自适应模糊控制系统的稳定性分析部分, 利

用模糊集理论, 针对由规则描述的被控制过程与控制器组成的模糊控制系统, 通过关系矩阵来分析其稳定性^[8], 即任意初始状态下通过关系矩阵方程进行状态转换, 在有限次状态转换后, 能够稳定于平衡状态

根据图 1 的控制原理, 以绿灯时间延长子模糊控制器为例, 其模糊规则表示如下:

$$R_i: \text{if } r\text{-time}(k) = A_i^i \text{ and } rg\text{-index}(k) = B_j^j \\ \text{then } g\text{-extend}(k) = C_p^i \quad (1)$$

其中: $A_i^i \in F(A)$, $i = 1, 2, \dots, 7$; $B_j^j \in F(B)$, $j = 1, 2, \dots, 7$; $C_p^i \in F(C)$, $p = 1, 2, \dots, 5$ 分别表示输入输出模糊集合上的语言集, k 表示采样时刻. 其对应的模糊关系矩阵和输入输出关系分别为

$$R_c = \bigcup_{i=1}^{49} R_i^i = \bigcup_{i=1}^{49} [A_i^i \times B_j^j]^T \times C_p^i \quad (2)$$

$$C = (A \times B) \circ R_c \quad (3)$$

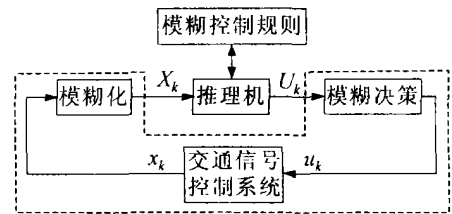


图 2 广义模糊过程控制系统

本文将绿灯时间延长子模糊控制器中的模糊化过程和模糊决策部分都归入被控过程, 称之为“广义模糊过程”, 如图 2 所示. 则扩展的广义模糊过程的闭环模糊模型表示如下:

$$R_i: \text{if } r\text{-time}(k) = A_i^i \text{ and } rg\text{-index}(k) = B_j^j \\ \text{and } g\text{-extend}(k) = C_p^i, \\ \text{then } r\text{-time}(k+1) = E_m^i \quad (4)$$

与式(2)和(3)类似, 可推导出闭环模型(4)的关系矩阵和输入输出关系, 即通过模糊集理论得出如下形式的关系矩阵:

$$X_{k+1} = X_k \circ R_p \quad (5)$$

根据关系矩阵及其模糊控制系统稳定性的必要充分条件, 可证明由式(4)表示的系统是稳定的, 且在随机大交通流的任意初始状态下, 通过闭环关系矩阵转换方程, 能够达到平衡状态, 即 $r\text{-time}$ 为很大, $rg\text{-index}$ 为正小的状态. 该状态既符合本文提出的自适应控制器的控制原则, 又与实际路口交通流状态相匹配. 值得注意的是, 在实际交通路口, 交通流量是随机变化的, 需要控制系统能够实时响应交通状态, 因而其稳定性是属于动态稳定的

采用类似的方法分别对 3 个子控制器和自适应模块进行稳定分析, 证明 3 个子控制器和自适应模

块是稳定的。由图 1 可知, 子控制器和自适应模块之间是相互关联的, 从而可证明整个自适应模糊控制系统是稳定的。

4 仿真研究

本文的仿真研究是在具有双向 6 车道的入口路段和 4 相位信号交通路口上进行的, 如图 3 所示。

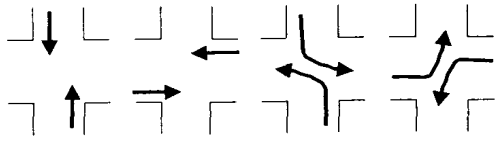


图 3 4 相位交叉路口信号相位分布

在传统的交通信号控制中, 全感应控制^[4,5]适用于交叉路口各方向交通流量相差不大的情况。其在路口所有的进口处设置车辆感应器, 并规定各个相位的控制参数, 即最小绿灯时间、单位延长绿时以及最大绿灯时间等控制参数(本文的设计值^[5]分别为 15 s, 2 s 和 60 s)。它的控制策略是: 当绿灯相位运行完最小绿灯时间后, 若路口感应器检测到有车辆到达, 则延长一个单位的延长绿时, 直到绿灯时间达到最大绿灯时间, 便强行转换为红灯。全感应交通信号控制的缺点是, 没有考虑其他红灯相位车辆的等待时间, 只是追求绿灯相位车辆的顺利通过, 所以容易造成路口总的车辆延迟时间和停车次数的增加。

在交通信号控制中多采用简单模糊控制器^[2~6], 一般取输入变量为绿灯相位释放车辆数(论域为 0~30)、红灯相位等候车辆数(论域为 0~30)和红灯运行时间(论域为 0~60 s); 输出变量为绿灯相位延长时(论域为 0~20)和相位改变指数(论域为 [0, 1])。各输入输出模糊变量及其控制规则与绿灯延长子控制器类似。在路口的信号配时与相位转换方式上基于以下原则: 当绿灯相位运行结束时, 信号转换为红灯, 同时比较其他几个红灯相位的等候车辆数和延误时间, 将具有最大值的红灯相位设定为下一时段的绿灯相位, 该相位等候时间设为零; 当某一红灯相位的等候时间达到 60 s 时, 控制器强制将该相位转换为绿灯相位, 从而考虑了等候司机的心理承受能力, 体现了最小化车辆延迟和停车的目的。

本文对自适应模糊控制器和上述两种信号控制器在相同的条件下分别进行了仿真。该仿真在 MATLAB 6.5 上进行, 两种模糊控制器都调用了模糊逻辑工具箱, 其中推理器采用 MAMDANI 类型, 去模糊化采用中心模糊消除器。在路口交通仿真中, 取路口车辆在释放过程中的平均车头时距^[4]为 1.8 s。考虑到相邻路口之间的路段上车辆的跟车影

响, 假设路口车辆到达以 1 200~2 700 veh/h 的速率, 以随机的方式产生。不失一般性, 假设车辆理想行驶速度为 10~14 m/s。

分别对 3 种信号控制器进行 40 次仿真, 并对其仿真结果在同一表格上进行比较, 其结果如图 4 所示。其中: \square , \cdot , $*$ 分别代表全感应控制器、简单模糊控制器和自适应模糊控制器的仿真结果。由图 4 可以看出, 简单模糊控制器在模糊规则没有学习能力的情况下, 与全感应信号控制器的控制效果相差无几, 而经过具有学习模块的自适应控制器的模糊规则优化后, 路口信号配时对性能指标的改善非常明显。在全感应控制器的仿真结果中, 车辆平均延迟为 12.49 s, 其中仿真流量为 1 200~2 040 veh/h。在简单模糊控制器的仿真结果中, 车辆平均延迟为 12.18 s, 其中仿真流量为 1 680~2 040 veh/h。在自适应模糊控制器的仿真结果中, 车辆平均延迟为 9.1 s, 车流量为 1 560~2 640 veh/h。与上述两种信号控制器的仿真结果相比, 自适应模糊控制对路口车辆平均延迟减少达 24.8%。

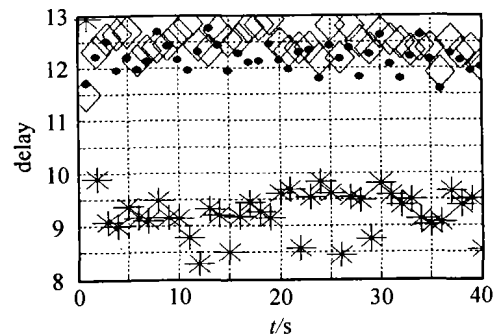


图 4 3 种控制器的控制效果比较

5 结 语

本文针对城市交通路口的信号控制, 提出一种自适应模糊控制器, 并对其稳定性进行分析。利用实时交通数据信息的反馈来对模糊控制器的参数进行调整, 并通过自适应模块的学习作用, 模糊控制器表现出良好的控制效果。通过与其他两种控制器的比较, 模糊控制器显示出明显的优势。更重要的是, 由于模糊控制器的硬软件易于实现, 使其具有现实的工程意义。利用模糊关系矩阵对控制系统进行稳定性分析, 结果表明在车流以大流量随机到达的情况下, 自适应模糊信号控制系统能够保持良好的稳定性。通过考虑相邻路口车流的相关性, 可将自适应模糊信号控制器扩展到相邻多路口车流的运动情况, 以设计城市交叉路口群的信号控制。

(下转第 160 页)

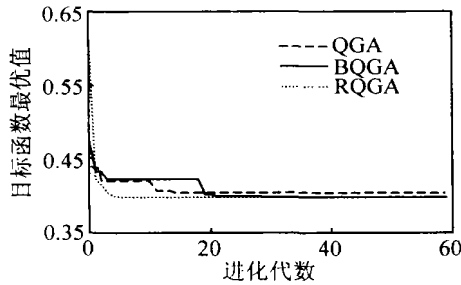


图4 优化 f_1 时各种方法的性能变化曲线

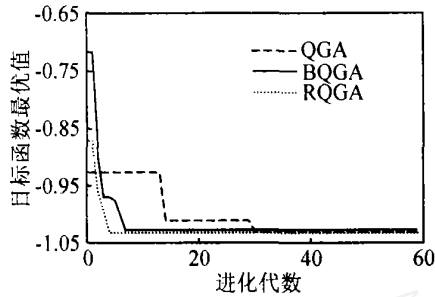


图5 优化 f_2 时各种方法的性能变化曲线

需要指出的是,仿真中QGA和RGA所用的参数(譬如种群数、交叉和变异概率等)相同,而这些参数完全可以不一样,甚至可以是自适应时变的,以体现不同的搜索特性和行为

6 结 语

本文提出了量子遗传算法与传统GA的混合框架,采用多模态空间和多操作搜索的混合(即量子搜索空间和遗传码空间混合搜索以及量子搜索和遗传搜索的多方位混合),给出了混合量子遗传算法

RQGA. 仿真研究表明,RQGA能有效地改善QGA的收敛速度和质量以及对初值的鲁棒性.进一步的工作是开展有关RQGA的理论研究,并尝试在实际问题中的应用

参考文献(References)

- [1] Grover L K. A fast quantum mechanical algorithm for database search [A]. *Proc of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing* [C]. Pennsylvania, 1996: 212-221.
- [2] Shor P W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring [A]. *Proc of the 35th Annual Symposium on the Foundation of Computer Sciences* [C]. Los Alamitos, 1994: 20-22.
- [3] 王凌. *智能优化算法及其应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [4] Yang J A, Li B, Zhuang Z Q, et al. Quantum genetic algorithm and its application research in blind source separation [J]. *Micro Systems*, 2003, 24(8): 1518-1523.
- [5] Han K H, Kim J H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem [A]. *IEEE Int Conf on Evolutionary Computation* [C]. La Jolla, 2000: 1354-1360.
- [6] Narayanan A, Moore M. Quantum inspired genetic algorithm [A]. *IEEE Int Conf on Evolutionary Computation* [C]. Nagoya, 1999: 161-661.
- [7] Zhang G X, Jin W D. Improvement of quantum genetic algorithm and its application [J]. *J of Southwest Jiaotong University*, 2000, 38(6): 717-722.

(上接第155页)

参考文献(References)

- [1] 李士勇, 夏承光. *模糊控制和智能控制理论与应用* [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
- [2] Pappis C P, Mamdani E H. A fuzzy logic controller for a traffic junction [J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics*, 1977, 7(10): 707-717.
- [3] 陈洪, 陈森发. 单路口交通实时模糊控制的一种方法 [J]. *信息与控制*, 1997, 26(3): 227-233.
(Chen H, Chen S F. A method for real-time traffic fuzzy control of a single intersection [J]. *Information and control*, 1997, 26(3): 227-233.)
- [4] Jee-Hyong Lee, Hyung Lee-Kwang. Distributed and cooperative fuzzy controllers for traffic intersections group [J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics*, 1999, 29(2): 263-271.
- [5] 李艳, 樊晓平. 基于模糊控制的城市交叉路口群信号控制及仿真 [J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(2): 117-119.
(Li Y, Fan X P. Fuzzy logic control and simulation of urban traffic Intersections group [J]. *J of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(2): 117-119.)
- [6] Li Y, Fan X P. Design of signal controllers for urban intersections based on fuzzy logic and weightings [A]. *The 6th IEEE Int Conf on Intelligent Transportation System* [C]. Shanghai, 2003: 867-871.
- [7] 王立新. *自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [8] 陈建勤, 吕剑虹, 陈来九. 模糊控制系统的闭环模型及稳定性分析 [J]. *自动化学报*, 1994, 20(1): 1-10.
(Chen J, Lv J H, Chen L J. Model and stability analysis of fuzzy closed-loop control systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1994, 20(1): 1-10.)