

交通信号公交优先控制策略及智能控制方法

邝先验^{1,2}, 许伦辉¹, 黄艳国^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 针对公交优先交通信号控制问题, 研究了公交优先的信号控制策略, 提出了一种变论域模糊神经网络公交优先智能控制方法. 提出了基于相位优先度值的公交优先相位选择方法, 并给出了其数学描述. 建立了绿灯时间的3层模糊控制模型, 分别为红灯排队疏散时间、绿灯延长时间和论域调节因子模糊控制器, 其中红灯排队疏散时间和绿灯延长两个模糊控制器的输出变量均采用变论域, 论域的变化考虑混合交通、天气情况、车流转向等因素由论域调节因子模糊控制器确定. 模糊控制器采用粒子群优化神经网络实现. 仿真结果表明该方法具有较好的公交优先控制效果.

关键词: 交通控制; 公交优先; 模糊控制; 变论域; 粒子群优化神经网络

中图分类号: U491.13 **文献标识码:** A

Traffic signal bus-priority control strategy and intelligent control method

KUANG Xian-yan^{1,2}, XU Lun-hui¹, HUANG Yan-guo^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;
2. School of Electronic Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: We investigate the intelligent control for the traffic signal with bus-priority strategy, and propose a control method with variable-universe fuzzy neural network. This strategy decides the bus-priority phase based on the priority-degree, of which the mathematical description is developed. A three-layer fuzzy controller for the green-light time is built, that are queuing-evacuation time fuzzy controller, green-light extension time fuzzy controller, and the fuzzy controller for the regulation factor of the universe. Variable universes are employed for the output of the queuing evacuation time fuzzy controller and the output of the green-light extension time fuzzy controller. The variation of the universe reflects the mixed traffic flow, the weather and the traffic turning. The three-layer fuzzy controller is implemented by using the particle-swarm optimization neural network. Results show that the proposed method has good bus-priority control effects.

Key words: traffic control; bus-priority; fuzzy control; variable universe; particle swarm optimization neural network

1 引言(Introduction)

在现代城市交通系统中, 交通拥挤已经越来越严重, 先进的交通信号控制系统已经证明是缓解交通拥挤的有效方法. 公交系统是城市交通系统中的重要组成部分, 公交优先技术在提升整个公共交通系统的服务水平上发挥着重要的作用, 因此受到了研究学者极大的关注^[1-8].

目前公交优先技术主要针对常规公交及快速公交(BRT)的优先问题, 通过设置公交专用道^[1], 采用优先信号控制方法, 如公交车辆优先排队的双停止线预信号控制^[2]、公交优先感应控制^[3], 以及各种主动优先、被动优先和实时自适应优先控制等^[4-7], 达到公交优先的目的. 公交优先通常可以通过两类方法实现: 道路空间划分和时间资源的合理分配. 道路空间划分主要有设置公交专用道、双停止线等方法,

但是设置公交专用道需要满足相关条件^[9], 并不是所有道路均适用. 时间资源分配方法也即信号优先控制方法, 目前该方法多数需要借助专用道来实现, 因此研究能适用于未设置公交专用道路口的时间资源分配方法, 将更具普遍意义.

在信号控制方面, 由于自适应控制方法能根据车流状态的变化(如流量、延误、排队长度等)自适应地调节控制参数, 改变控制策略, 使控制效果达到最优或次优的目的, 因此该方法一直是国内外学者的关注热点. 其最典型方法之一是以模糊神经网络为代表的智能控制方法^[10-13], 而将智能控制与公交优先方法相结合能更有效提高优先控制效果^[8], 但以上文献未考虑混合交通中行人及非汽车车流、天气情况等因素对车流通行的影响.

本文研究公交优先的信号控制策略, 建立公交优

先智能控制模型, 提出考虑车流状况、道路容量、公交满载率等多因素的公交优先相位选择方法. 采用变论域模糊神经网络控制器确定绿灯时间大小, 模糊输出论域的调节因子考虑了混合交通、天气情况、车流转向等的影响. 本文方法在设置有车辆检测器的道路中无论是否有公交专用道均适用, 仿真实验表明本文方法能有效减少公交车辆延误.

2 公交优先控制策略(Bus-priority control strategy)

为了提高信号交叉口的车辆通行效益, 同时体现公交优先通行原则, 在权衡公交车辆和社会车辆的通行效益的基础上, 采用对通行相位和通行时间进行实时调整的实时优先信号控制策略. 该策略主要由两部分组成: 公交优先的相位选择和相位绿灯时间的实时调整.

公交优先的相位选择采用严格的选择方法, 主要体现以下因素和规则:

1) 每个相位根据各自的公交车辆数及相应权重、社会车辆数及相应权重、道路容量等相关量折算成 $[0, 1]$ 区间上归一化的相位优先度值(priority degree, PD), PD值高的相位将被优先选择.

2) 不同满载率的公交车辆具有不同的权重.

3) 某相位在以下情况下具有最高PD值: 相位的车辆最大停车等待时间超过驾驶员的忍受极限, 或该相位有连续 n 次($n \geq 2$)车辆最大停车等待时间超过车辆等待临界时间. 通常, 相位的车辆最大停车等待时间小于相位红灯时间, 当相位中有车辆出现二次排队时会大于相位红灯时间.

某个相位被选择为运行相位时, 需要为其分配绿灯时间. 现有的基于模糊逻辑的相位绿灯时间分配方法中, 通常在相位开始时刻或最小绿灯结束时刻由模糊控制器获得, 因此主要由该时刻的各相位车流状况决定, 其主要弊端一是由于车辆到达的随机性, 分配的绿灯时间难以适应相位绿灯后期车流到达情况; 二是不能为绿灯后期的晚到公交车辆适当的延长绿灯时间以体现公交相对优先的思想. 因此本文将相位绿灯时间分为两个阶段, 即红灯排队疏散时间 g_{i1} 和绿灯延长时间 g_{i2} , 如图1所示.

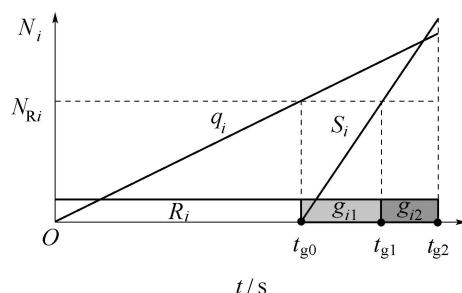


图 1 相位车流运行图

Fig. 1 Flow running diagram of phase

图1中: N_i 是相位 i 累计存在车辆数(辆); q_i 是相位车辆到达率(辆/秒); S_i 是相位 i 饱和和流率(辆/秒). g_{i1} 是为保证该相位绿灯刚启亮时刻(t_{g0})车道内的车辆能完全疏散的时间, 即以饱和流率 S_i 疏散相位累积存在车辆 N_{Ri} 所需时间, 该时间根据 N_{Ri} 排队长度及大车(主要为公交车)百分率由模糊逻辑推理确定; g_{i2} 是在 g_{i1} 结束时刻(t_{g1}), 为了疏散 g_{i1} 时间内到达的车辆 N_{gi1} , 以及降低相位饱和度和停车率而分配的时间, g_{i2} 的大小由队长 N_{gi1} 、公交车比率和其他红灯相位中最大PD值确定, 由模糊逻辑推理获得.

公交优先的信号控制策略如下:

步骤 1 检测所有相位的公交车辆数、社会车辆数、各公交车辆满载率、车辆最大停车等待时间.

步骤 2 根据公交优先相位选择方法计算各相位PD值, 选择PD值高的相位 i 作为运行相位.

步骤 3 根据相位 i 的车辆排队长度和公交车比率, 采用模糊规则推理, 为其分配绿灯时间 g_{i1} .

步骤 4 g_{i1} 结束时刻, 计算所有相位PD值, 根据相位 i 的排队长度、公交车比率以及红灯相位PD值的最高值, 采用模糊规则推理, 为相位 i 分配绿灯时间 g_{i2} .

步骤 5 g_{i2} 结束, 返回步骤1.

3 公交优先相位选择方法(Bus-priority phase choice method)

当交通流不均衡的时候, 会出现某相位无车或少车, 而按照固定相序方法, 经过相位轮换, 其总能获得通行权, 这样将会使绿灯时间未能充分利用, 若能在相位切换时选择通行优先度值高的相位, 则能避免这种情况的发生. 因此本文在相位轮换上采用变相序的方法.

公交车辆混合在各相位中, 若要使其优先通行, 同时又不能过大地损害社会车辆的通行效益, 很自然的做法是为两类车赋予合适的通行权重, 公交车辆的权重显然应该大于社会车辆, 在此基础上计算各相位的PD值, 选择PD高的相位作为下一通行相位.

在不考虑车辆权重进行相位选择时, 通常选择平均车道车辆数(车辆数与车道数之比)多的相位, 当考虑车辆权重时, 可用容量优先度 P_{D1}^i 进行相位比较, P_{D1}^i 为相位 i 的加权车辆数(车辆数与权重之积)与该相位所有车道能容纳的最大加权车辆数之比. 另外, 考虑在某些特殊情况下, 例如相位 i 的 P_{D1}^i 一直较低得不到通行权而使车辆长时间等待, 或相位内车道被车辆占满等, 此时应该给予最高优先度, 称为阈值优先度 P_{D2}^i . 因此相位 i 的优先度 P_D^i 可由 P_{D1}^i 和 P_{D2}^i 中的大者确定. 具体可由下列方程式描

述:

$$P_D^i = \max\{P_{D1}^i, P_{D2}^i\}, \tag{1}$$

$$P_{D1}^i = \frac{C_P^i}{C_{\max}^i}, \tag{2}$$

$$P_{D2}^i = \begin{cases} 1, & T_{\text{stop}}^i \geq T_{\max}, \text{ 或 } H_{\text{veh}}^i \geq H_{\text{det}}^i \\ & \text{或 } n_{\text{stop}} \geq n_{\max}, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \tag{3}$$

$$C_P^i = \sum_{j=1}^{N_B^i} l_j w_B + w_C N_C^i, \quad l_j w_B \geq w_C, \tag{4}$$

$$C_{\max}^i = \max\{w_C N_{C\max}^i, w_B N_{B\max}^i\}, \tag{5}$$

$$\rho = \frac{w_C}{w_B}, \tag{6}$$

$$H_{\text{veh}}^i = \frac{h_B N_B^i + h_C N_C^i}{n_R^i} + h_C, \tag{7}$$

式中: C_P^i 为相位容量,是该相位所有公交车辆的权重总和,与社会车辆数 N_C^i 及其对应权重 w_C 的乘积之和; N_B^i 为公交车辆数; l_j 为第 j 辆公交车的满载率; w_B 为公交车满载时的权重; C_{\max}^i 为相位最大容量; $N_{C\max}^i$ 和 $N_{B\max}^i$ 分别为相位 i 所有车道内能容纳的最大社会车辆数和最大公交车辆数, ρ 为社会车辆与满载公交车辆的权重比,用于表示公交车辆的优先程度,其值越小,说明公交车辆优先程度越高,其值过小将会损害社会车辆的通行效益,通常可按车辆的平均乘容量选取车辆权重(或根据实际情况适当调整).当 $\rho = 1$ 时,所有车辆将同等对待,是本文的一个特例. H_{veh}^i 为相位 i 车辆占用的平均车道长度(m/车道),是阈值优先度 P_{D2}^i 的一个判断指标. H_{veh}^i 通常要小于相位进口道的最大长度 H_{det}^i (两检测器间的距离),否则说明相位车道均被车辆占满而使 $P_{D2}^i = 1$. h_C 和 h_B 为社会车辆和公交车辆的平均停车车头间距, n_R^i 为相位 i 车道总数.

在3种情况下阈值优先度 P_{D2}^i 为最大值1: 1) 该相位车辆的最大停车等待时间 T_{stop} 超过驾驶员的忍受极限 T_{\max} ; 2) $H_{\text{veh}}^i \geq H_{\text{det}}^i$; 3) 相位车辆的最大停车等待时间 T_{stop} 连续超过停车等待临界时间 T_C 的次数 n_{stop} 达到设定的最大次数 n_{\max} .若所有相位 $P_D^i = P_{D2}^i = 1$,交叉口交通已达饱和或过饱和状态,此时交通拥挤已不可避免,需要采取拓宽道路、抑制交通需求等措施加以缓解.

对于行人信号灯,通常可以与同方向直行机动车信号灯同步,由于机动车信号灯已经考虑驾驶员的忍受极限时间,则行人的等待时间也将不会超过该时间,不会导致某个方向行人长时间等待.

以上相位选择方法为变相序方法,在实际交通中采用该方法后,对于对路口相序有一定了解的驾驶员,可能会由于惯性而出现提前启动车辆等误判情况^[8],针对这种现象,在实践中可以通过设置警示

牌、前期交警执勤以及增加红闪灯等措施加以避免.若使用红闪灯,则相位的选择就需要在红闪时间之前进行.

4 变论域模糊控制器(Variable universe fuzzy controller)

相位 i 绿灯时间的红灯排队疏散时间 g_{i1} 和绿灯延长时间 g_{i2} 均由模糊神经网络控制器获得,在实际交通中,同样长度的车流通过交叉口的时间会随着混合交通干扰、天气情况、车流转向等的不同而不同,因此 g_{i1} 和 g_{i2} 的论域需要根据上述状况进行调整,例如在阴雨雾天,车流速度相对正常时候会更低些,通过时间相应会更长些,这时的相位绿灯时间也应稍长些;对于混合交通干扰,主要为行人、自行车、电动车和摩托车等对汽车车流的干扰,其影响同样如此;对于转向车流(主要为左转),其平均车速通常要低于直行车流,通过停车线的时间通常会比直行多些,则绿灯时间也应适当长些.针对这些情况,本文在设计模糊控制器时,对于输出量 g_{i1} 和 g_{i2} 增加一个论域调节因子 α ,即若 g_{i1} 和 g_{i2} 在正常情况下(无混合交通干扰、正常天气、均为直行车流)的初始论域为 $[-U_k, U_k](k = 1, 2)$,则实际情况下的论域为 $[-\alpha U_k, \alpha U_k](k = 1, 2)$.

论域调节因子 α 的大小受到较多因素的影响,本文考虑混合交通干扰、天气情况、车流转向3种因素.由于这些因素难以量化,而易于用语言规则的形式加以描述,因此将其转化为一组模糊规则并由模糊逻辑推理确定 α 的大小.

综合以上分析,相位绿灯时间实际上由3个模糊控制器确定,图2给出了3个模糊控制器的关系及其输入输出变量,其中论域调节因子模糊控制器的输出量 α 用于调节 g_{i1} 和 g_{i2} 输出量的论域.

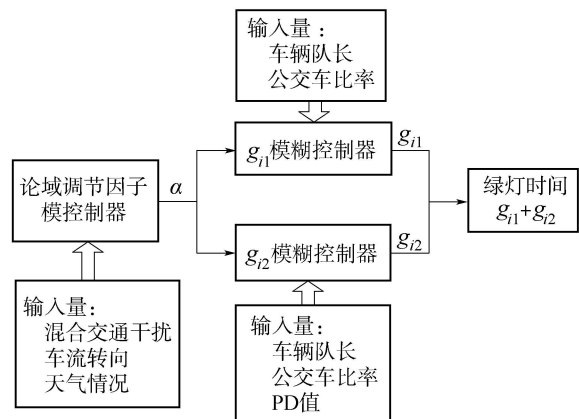


图2 相位 i 绿灯时间模糊控制器组成

Fig. 2 Composing of green time fuzzy controller

4.1 论域调节因子 α 模糊控制器(Fuzzy controller of universe factor α)

论域调节因子模糊控制器有3个输入量: 混合交

通干扰(MT)、车流转向(FT)、天气情况(WS), MT 为混合交通的影响程度, 其语言值为: Z(零)、M(中)、B(大). FT表示车流的转向是否是直行车流, 可以用两个语言值来表示: Y(是)和N(否). WS是天气情况对车流运行影响的语言描述, 其语言值为: Z(零)、M(中)、B(大).

由于3个输入量均为定性量, 可用百分度来表示其对正常车流的影响程度, 论域范围[0%, 100%], 模糊变量MT的论域为{0, 25, 50, 75, 100}, FT的论域为{0, 100}, WS的论域为{0, 25, 50, 75, 100}. 模糊语言值的隶属函数通常可以通过总结操作者的操作经验或采用模糊统计方法来确定, 本文中的模糊变量语言值隶属函数均采用Gauss函数:

$$\mu_X(x) = \exp[-(\frac{x-c}{\sigma})^2], \quad (8)$$

其中: c 为均值, σ 为均方差. 模糊变量MT的3个语言值Z, M, B的均值分别为0, 50, 100, 方差 $\sigma = 15$; 模糊变量FT的2个语言值Y和N的均值分别为0, 100, 方差 $\sigma = 15$; 模糊变量WS的3个语言值Z, M, B的均值分别为0, 50, 100, 方差 $\sigma = 15$. 图3给出了模糊变量MT的隶属函数, 其余变量隶属函数图形类似.

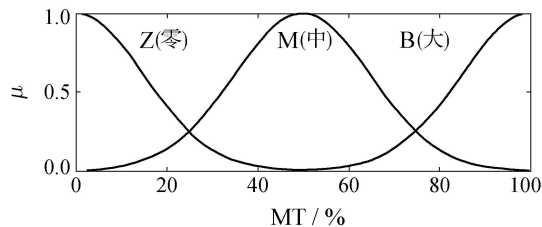


图3 模糊变量MT的隶属函数
Fig. 3 Membership function of MT

该模糊控制器的输出变量为论域调节因子 α , 其语言值取为: Z(零)、M(中)、B(大)、VB(很大), α 的论域设为 $[1, \alpha_{max}]$, 即在极限情况下绿灯时间的论域是正常的 α_{max} 倍. α 的上限 α_{max} 过小, 则起不到调节效果, 过大会使绿灯时间延长过多, 使绿灯后期车辆少而损失一些绿灯时间. 3个输入量对正常直行车流的影响, 主要体现在降低了车速和增大了饱和和车头时距, 因此在实际操作中可以通过调查车流在正常时和三者极限影响程度下的饱和和车头时距, 确定 α_{max} 的取值, 即 α_{max} 可用极限影响程度下车流的饱和和车头时距与正常情况直行车流的饱和和车头时距之比确定.

模糊变量 α 的论域为{1, 1.1, 1.2, 1.3}, 模糊变量语言值隶属函数采用式(8)高斯型函数, 4个语言值Z, M, B, VB的均值分别为1, 1.1, 1.2, 1.3, 方差 $\sigma = 0.05$.

控制规则: 混合交通干扰越大, 车流转向为左转, 天气情况对车流运行的影响越大, 论域调节因子 α 则越大; 反之越小. 其模糊规则如表1所示.

表 1 论域调节因子 α 模糊规则

Table 1 Fuzzy control rules of α

MT	FT	WS	α	MT	FT	WS	α
Z	N	Z	Z	Z	Y	Z	M
Z	N	M	M	Z	Y	M	M
Z	N	B	B	Z	Y	B	VB
M	N	Z	M	M	Y	Z	B
M	N	M	B	M	Y	M	VB
M	N	B	-	M	Y	B	-
B	N	Z	M	B	Y	Z	VB
B	N	M	-	B	Y	M	-
B	N	B	-	B	Y	B	-

表中“-”表示实际情况中不太可能出现的情况, 比如在天气情况(WS)很差的情境下, 交通干扰(MT)一般不大.

4.2 红灯排队疏散时间 g_{i1} 模糊控制器(Fuzzy controller of queuing evacuation time g_{i1})

红灯排队疏散时间 g_{i1} 的输入变量为车辆队长(VL)和公交车比率(BR), VL为相位车道最大排队长度(车辆数), 其语言值为: L(小)、LM(较小)、M(中)、B(大)、VB(很大). BR是指相位所有车道的公交车比率, 由于公交车的启动和运行速度比小客车要慢些, 因此BR越大时疏散时间需要更长些, 并且为公交车比率大的相位适当分配更多的绿灯时间也体现了公交优先的原则, 其语言值为: Z(零)、L(小)、B(大). 模糊变量VL的论域为{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 25}(辆/车道), 隶属函数采用高斯函数, 5个语言值L, LM, M, B, VB的均值分别为0, 6, 12, 18, 25, 方差 $\sigma = 3$; 模糊变量BR的论域为{0, 25, 50, 75, 100}(%), 3个语言值Z, L, B的隶属函数(高斯函数)均值分别为0, 50, 100, 方差 $\sigma = 15$.

输出变量为 g_{i1} , 其语言值为: L(小)、LM(较小)、M(中)、B(大)、VB(很大), 正常情况下的基本论域为[12, 50], 在实际情况下为 $[12\alpha, 50\alpha]$. 模糊变量 g_{i1} 的论域为{12, 17, 22, 27, 33, 37, 43, 50}, 5个语言值L, LM, M, B, VB的隶属函数(高斯函数)均值分别为12, 22, 33, 43, 59, 方差 $\sigma = 4.5$.

控制规则: 车辆队长越长, 公交车比率越大, 则 g_{i1} 就越大, 反之越小. 其模糊规则如表2所示.

表 2 红灯排队疏散时间 g_{i1} 模糊规则

Table 2 Fuzzy control rules of g_{i1}

BR	VL				
	L	LM	M	B	VB
Z	L	LM	M	B	VB
L	LM	M	B	B	VB
B	LM	B	B	VB	VB

4.3 绿灯延长时间 g_{i2} 模糊控制器(Fuzzy controller of green extending time g_{i2})

g_{i2} 的输入变量为车辆队长(VL)、公交车比率(BR)和红灯相位中最大PD值(MPD), VL和BR的含义和语言值与 g_{i1} 相同. MPD表示在 g_{i1} 结束时刻所有红灯相位的PD值的最大值, 该值的大小反应了红灯相位的通行紧急程度, 其语言值为: L(小)、LM(较小)、M(中)、B(大)、VB(很大). g_{i2} 的模糊变量VL和BR的论域与隶属函数与 g_{i1} 中对应变量相同; 模糊变量MPD的论域为 $\{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$, 5个语言值L, LM, M, B, VB的隶属函数(高斯函数)均值分别为0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 方差 $\sigma = 0.1$.

输出变量为 g_{i2} , 语言值为: L(小)、LM(较小)、M(中)、B(大)、VB(很大), 正常情况下的基本论域为 $[0, 25]$, 在实际情况下为 $[0, 25\alpha]$. 模糊变量 g_{i2} 的正常论域为 $\{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 25\}$, 5个语言值L, LM, M, B, VB的隶属函数(高斯函数)均值分别为0, 6, 12, 18, 25, 方差 $\sigma = 3$.

控制规则: 车辆队长越长, 公交车比率越大, 则 g_{i2} 就越大, 反之越小; 若有公交车, 即 $BR > 0$, 该公交车即为晚到公交车, 需要尽可能使其在本相位内通过交叉口; MPD值越大, 说明红灯相位通行紧急程度高, 则 g_{i2} 需要适当调小. 该模糊控制器有75条规则, 表3列出了部分规则.

表3 绿灯延长时间 g_{i2} 模糊规则(部分)

Table 3 Fuzzy control rules of g_{i2}

VL	BR	MPD	g_{i2}	VL	BR	MPD	g_{i2}
L	Z	L	L	LM	L	B	L
L	Z	LM	L	LM	L	VB	L
L	Z	M	L	LM	L	L	LM
L	Z	B	L	-	-	-	-
L	Z	VB	L	VB	B	L	VB
-	-	-	-	VB	B	LM	VB
LM	L	L	LM	VB	B	M	B
LM	L	LM	LM	VB	B	B	B
LM	L	M	LM	VB	B	VB	LM

5 模糊控制器的粒子群优化神经网络实现(Fuzzy controller realization with particle swarm optimization neural network)

模糊控制系统通常是根据“专家经验”给出的模糊推理规则在线做出控制决策. 由于专家规则数有限, 在实际控制中难以达到理想效果. 而将模糊控制与神经网络相结合, 通过神经网络对模糊系统的学习和联想. 对于训练中未出现的样本也能做出灵活有效的控制, 能有效避免该问题, 提高系统的鲁棒性^[14]. 因此本文采用神经网络实现模糊控制的功能. 本文设计的3个模糊控制器均采用具有输入层、模糊化层、模糊推理层、模糊决策层和去模糊化层等5层结构的神经网络实现, 其结构见文献[14].

由于传统BP(bus-priority)算法是采用梯度下降法, 容易陷入局部极小, 且训练过程受初值的影响较大, 而粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)^[15]属于群体全局随机寻优, 可有效避免算法陷入局部最优. 因此本文采用PSO算法对神经网络的连接权值进行优化训练, 训练过程见文献[16].

6 仿真实验(Simulations)

为了比较不同控制方法的效果, 本文应用VC++和MATLAB7.0开发的仿真系统, 对3种交通信号控制方法进行了测试: 定时控制(fixed timing control, FTC), 传统模糊控制(fuzzy control, FC), 以及本文的公交优先模糊神经网络控制(bus-priority fuzzy neural network control, BP-FNNC).

仿真路口: 采用常见的十字路口, 见图4, 每个进口道均有2条直行车道, 各1条左转和右转车道, 在每个进口道的每一条车道均有两个相距 d m的车辆检测器, 一个在停车线处, 另一个在上游入口处, 能够检测社会车辆(本文假定均为小客车)、公交车, 两检测器间距设为 $d = 150$ m, 若小客车平均停车车头间距为6.5 m, 公交车平均停车车头间距为13 m, 则在间距 d 内一条车道最多可容纳23辆小客车或11辆公交车.

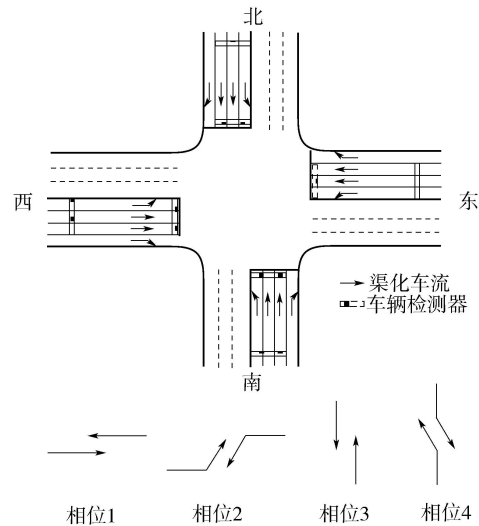


图4 仿真路口结构与相位图

Fig. 4 Structure and phases of intersection

相位: 采用常用的4相位: ① 东西直行; ② 东西左转; ③ 南北直行; ④ 南北左转. 右转车流不受限制. 饱和流量与车速: 设每条直行车道饱和车头时距1.9 s, 则饱和流量为1900辆/h, 车辆通过停车线的平均速度为10 m/s.

仿真流量与不平衡车流发生机制: 假定整个路口的车辆到达率从0.0到2.2(辆/s)逐渐变化, 公交车辆以0%~30%的比例随机出现, 4个入口的左转和右转车比例均设为20%. 对于交叉口每种不同的车辆到达率, 每次仿真运行60 min, 每隔10 min在整个交叉口车辆到达率不变的情况下, 重新随机分配每个相

位的到达率, 这样可以获得变化的不平衡车流. 考虑到整个交叉口流量较大接近饱和状态时, 不平衡现象少有发生, 因此流量在 2.0 辆/s 以上时将其均衡分配到各个相位中. 所有到达车流均服从泊松分布.

控制模型参数设置: 设社会车辆通行权重 $w_C = 3$, 公交车辆通行权重 $w_B = 30$, 公交车满载率 $l = 1$, 设驾驶员能够忍受的最大停车时间 T_{max} 为 120 s, $n_{max} = 2$.

定时控制(FTC): 采用固定相序 4 相位(见图 4), 配时采用 Webster 方法, 按等饱和度分配绿时, 黄灯时间 3 s, 各相位损失时间 3 s, 由于定时控制本身是基于历史流量计算的, 对实时流量不敏感, 因此各相位流量按仿真的小时流量, 而非 10 min 不平衡变化流量.

传统模糊控制(FC): 采用固定相序 4 相位(见图 4), 模糊输入量为本相位排队长度和下一相位(红灯相位)排队长度^[10].

在 3 种控制方法的仿真中, 每种不同的交叉口车辆到达率, 仿真过程运行 3 次, 每次 60 min, 仿真结果取 3 次的平均. 采用平均停车延误时间作为评价指标, 各类车的平均停车延误见图 5-6.

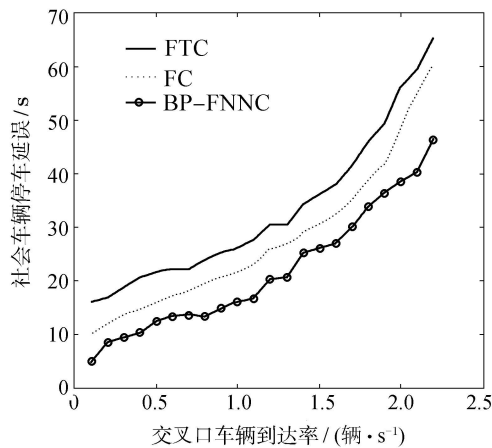


图 5 社会车辆停车延误仿真结果
Fig. 5 Results of social vehicle delay

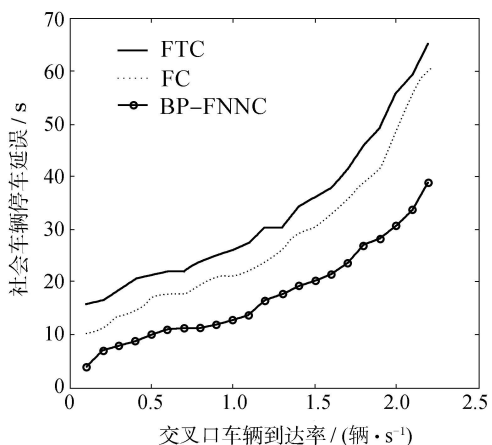


图 6 公交车辆停车延误仿真结果
Fig. 6 Results of bus delay

针对混合交通、天气情况影响的仿真, 设东、南、西、北各方向车流到达率分别 0.3, 0.28, 0.22, 0.2 (辆/s), 各方向左转和右转车比例均设为 20%, 论域调节因子中设 $\alpha_{max} = 1.3$, 即论域为 $[1, 1.3]$. 在该给定流量下, 混合交通影响和天气情况影响程度分别为 0%, 25%, 75% 时的仿真结果如表 4.

表 4 混合交通、天气情况影响的仿真结果

混合交通影响 / %	天气情况 / %	左转相位 α	非左转相位 α	车辆平均延误 / s
0	0	1.04	1.00	16.3
0	25	1.07	1.04	17.8
0	75	1.25	1.21	24.1
25	0	1.08	1.05	18.1
25	25	1.10	1.06	18.6
75	0	1.24	1.18	22.8

从仿真结果可知, 本文的控制方法在降低社会车辆和公交车辆的停车延误上效果非常明显, 主要原因一是采用了变相序、自适应调节绿灯时间的控制策略, 有效解决了绿灯后期无车辆通行的现象, 二是采用了灵活有效的相位选择方法, 能根据实时交通状况选择通行优先度值最高的相位, 这样能减少大多数车辆特别是公交车辆的延误.

由于在流量中等偏低时车流不平衡现象较多, 本文方法的改善效果最好, 比定时控制最高能改善 50% 以上. 在流量较大时, FTC 和 FC 方法延误较大增加, 而本文方法增加较缓, 同样的延误水平下的车辆通过率比前两者提高较多.

在公交车辆通行效益改善的同时, 社会车辆通行效益并未降低, 反而比定时控制和传统定相序模糊控制要好, 由于仿真时设定公交车辆可能出现在任意相位, 这样各个相位通行优先度值总体比较均衡, 如果公交车辆大多集中在某一两个相位(如设置了公交专用道的相位), 这时会使其常具有较高的通行优先度值而得到更多的通行次数, 能更大减少公交延误, 但同时社会车辆延误会相应增大.

在混合交通(WS)、天气情况(MT)影响的仿真中, 随着影响程度的增大, 论域调节因子 α 也增大, 且左转相位比非左转相位要大, 由于论域放大了 α 倍, 车辆的平均延误也随之增大.

7 结论(Conclusion)

针对公交优先交通控制问题, 提出了一种变论域模糊神经网络公交优先智能控制方法, 提出了基于相位优先度的公交优先相位选择方法, 并给出了其数学描述, 采用粒子群优化变论域模糊神经网络技术实现相位绿灯时间的调整. 仿真结果表明, 与定时控制和传统模糊控制方法相比, 该方法可以有效提

高绿灯时间的利用率,减少交叉口公交停车延误,只要参数选择适当,在提高公交车通行效益的同时不会对社会车辆造成过大损害,为公交优先信号控制提供了一种新的思路。

参考文献(References):

- [1] VIEGAS J, LU B. The intermittent bus lane signals setting within an area [J]. *Transportation Research Part C*, 2004, 12(6): 453 – 469.
- [2] 张卫华, 陆化普. 公交优先的预信号控制交叉口车辆延误分析 [J]. *中国公路学报*, 2005, 18(4): 78 – 82.
(ZHANG Weihua, LU Huapu. Analysis of vehicle delay of intersections with presignals based on bus priority [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2005, 18(4): 78 – 82.)
- [3] DION F, HELLINGA B. A rule-based real-time traffic responsive signal control system with transit priority: application to an isolated intersection [J]. *Transportation Research Part B*, 2002, 36(4): 325 – 343.
- [4] 王正武, 夏利民, 罗大庸. 单交叉口自适应公交优先控制 [J]. *中国公路学报*, 2010, 23(4): 84 – 90.
(WANG Zhengwu, XIA Limin, LUO Dayong. Adaptive transit priority control at isolated intersection [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(4): 84 – 90.)
- [5] KOEHLER LA, KRAUS W. Simultaneous control of traffic lights and bus departure for priority operation [J]. *Transportation Research Part C*, 2010, 18(3): 288 – 298.
- [6] 马万经, 杨晓光. 基于时空优化的单点交叉口公交被动优先控制方法 [J]. *中国公路学报*, 2007, 20(3): 86 – 90.
(MA Wanjing, YANG Xiaoguang. Transit passive priority control method based on isolated intersection of optimization of time-space [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, 20(3): 86 – 90.)
- [7] MESBAH M, SARVI M, OUVEYSI I, et al. Optimization of transit priority in the transportation network using a decomposition methodology [J]. *Transportation Research Part C*, 2011, 19(2): 363 – 373.
- [8] 李瑞敏, 陆化普. 公交优先的交通信号多层模糊控制模型 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(90): 1510 – 1513.
(LI Ruimin, LU Huapu. Bus-priority traffic signal multi-layer fuzzy control model [J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2006, 46(90): 1510 – 1513.)
- [9] 陆建, 王炜, 陈学武. 公交专用车道设置条件与效益分析 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 1998, 28(3): 103 – 107.
(LU Jian, WANG Wei, CHEN Xuewu. Benefit analysis and conditions of bus lane [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 1998, 28(3): 103 – 107.)
- [10] MURAT Y S, GEDIZLIOGLU E. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions [J]. *Transportation Research Part C*, 2005, 13(1): 19 – 36.
- [11] SCHMOCKER J D, AHUJA S, BELL M G H. Multi-objective signal control of urban junctions – framework and a london case study [J]. *Transportation Research Part C*, 2008, 16(4): 454 – 470.
- [12] 徐勋倩, 黄卫. 单路口交通信号多相位实时控制模型及其算法 [J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(3): 413 – 416, 422.
(XU Xunqian, HUANG Wei. Multiphase traffic signal real-time controlling model of isolated intersection and its algorithm [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(3): 413 – 416, 422.)
- [13] 臧利林, 贾磊, 杨立才, 等. 基于改进GA的城市交通模糊控制研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(10): 113 – 118.
(ZANG Lilin, JIA Lei, YANG Licai, et al. Research of urban traffic fuzzy control based on improved GA [J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2006, 26(10): 113 – 118.)
- [14] 周志坚, 毛宗源. 一种基于遗传算法的模糊神经网络最优控制 [J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(5): 784 – 788.
(ZHOU Zhijian, MAO Zongyuan. On designing an optimal fuzzy neural network controller using genetic algorithms [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 784 – 788.)
- [15] KENNEDY Y J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, WA: IEEE, 1995: 1942 – 1948.
- [16] 师彪, 李郁侠, 于新花, 等. 基于改进粒子群模糊神经网络的短期电力负荷预测 [J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(1): 157 – 166.
(SHI Biao, LI Yuxia, YU Xinhua, et al. Short-term load forecasting based on modified particle swarm optimizer and fuzzy neural network model [J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2010, 30(1): 157 – 166.)

作者简介:

邝先验 (1976–), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为智能交通控制、交通系统建模与仿真, E-mail: xianyankuang@163.com;

许伦辉 (1965–), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为智能交通系统、智能控制与最优控制, E-mail: lhxu@scut.edu.cn;

黄艳国 (1973–), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为智能交通控制, E-mail: huangyanguo2004@126.com.