

文章编号:1002-0411(2004)03-0293-06

应用进化策略的城域交叉路口分级模糊控制

李威武¹, 王 慧¹, 邹志君², 钱积新¹

(1. 浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学动力机械和车辆工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要:提出一种面向城域单交叉路口的自适应分级模糊控制系统,采用进化策略对分级模糊控制器的模糊隶属度函数进行离线优化调整.该控制系统不仅具有分级模糊控制的优点,同时能使模糊隶属度函数根据不同的交通情况自适应地变化,从而改善控制效果.对一个具有直行和左转车流运动的四向交叉路口进行的仿真表明了该方法能比定时控制和隶属度函数固定的分级模糊控制取得更好的控制效果.

关键词:进化策略;模糊控制;城域交叉路口;交通控制;自适应调整

中图分类号:TP18

文献标识码:A

Hierarchical Fuzzy Logic Control Using Evolution Strategy for Urban Traffic Intersection

LI Wei-wu¹, WANG Hui¹, ZOU Zhi-jun², QIAN Ji-xin¹

(1. National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Institute of Power-driven Machinery and Vehicle Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A hierarchical adaptive fuzzy control system for an isolated urban traffic intersection is proposed, and an evolution strategy is used to modify the fuzzy membership functions of the system. This control system not only possesses the advantages of hierarchical fuzzy control, but also can change its membership functions adaptively to an optimal setting in different traffic situations, in this way the currency power of the urban intersection is improved. Simulation on an isolated four-approach intersection with through and left-turning movements shows that the presented controller can acquire lower average vehicle delay than the fixed-time controller and the hierarchical fuzzy controller with steady membership functions under various traffic conditions.

Keywords: evolution strategy; fuzzy control; urban traffic intersection; traffic control; adaptive modification

1 引言 (Introduction)

城域交通信号控制系统是一个复杂的多目标系统,它包含很多复杂的因素,如:人的行为、网络内的交通流耦合、天气影响、交通事故、交通流的随机波动等,因此难以对它建立一个准确的数学模型,长期以来采用的是定时切换的简单控制或人工控制模式. Zadeh 教授在 1965 年提出的模糊集理论为解决复杂过程中的不确定性问题提供了一个很好的概念框架,它能够近似地表达人的推理过程,算法结构简单,实施维修费用低^[1]. 自从 Pappis 1977 年首先将模糊控制应用到城域交叉路口控制以来^[2],交叉路口就一直一直是模糊控制研究与应用的对象^[3-6],但大多数的研究只是对 Pappis 提出的控制器的输入输出参数进行改进,对控制器本身的结构并没有实质

性的改变,依然是一种由模糊控制器直接综合所有当前交通参数来决定控制动作的模式. 对于多相位或者交通状况复杂的城域交叉路口而言,这种控制器结构模式容易导致模糊规则数目随输入参数的增加而呈指数级增长,从而严重影响控制器的实时控制效果. 随着城市化进程的日益加剧,城域交叉路口的交通流状况也呈复杂化的趋势,在这种情形下,分级模糊控制器^[7-8]由于能够分散处理交通信息参数,大大减少模糊规则数,且易于提取模糊规则,产生更为合理的相位序列,所以更适合城域交叉路口的交通控制. 但是,分级模糊控制器依然包括较多的隶属度函数 (Membership Function, MF) 参数,它们往往难以全部由人工经验合理选取,同时在不同的

交通状况下它们通常保持固定不变,而交叉路口的交通流量往往是变化很大的.由于模糊控制在所有参数确定的情况下实质已成为一种确定性控制,所以在输入条件变化而系统参数不作改变时,模糊控制的控制效果就会受到影响.

本文首先提出一种面向城域单交叉路口的两级模糊控制结构,并在此基础上建立一种应用进化策略对模糊隶属度函数进行离线自适应优化的分级模糊控制系统.该系统能合理设置模糊隶属度参数,并且当交叉路口的交通情况出现变化时能对它们实现跟踪调整,从而能够保证控制系统取得较好的控制效果.

2 交叉路口两级模糊控制器结构 (Two-stage fuzzy controller for traffic intersection)

为简单起见,不失一般性,以一个四向孤立交叉口为研究对象.假定该交叉口具有直行和左拐方向的交通流,车辆靠右行走.对该交叉口实行一个四相位的控制,信号灯的一个完整信号周期如图1所示.

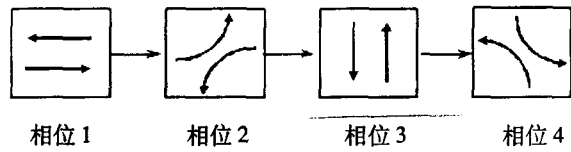


图1 交叉口四相位信号周期

Fig. 1 A four-phase cycle of traffic intersection

构造一种面向该孤立交叉路口的两级模糊控制器,其结构如图2所示.从图中可见,控制器包括第一级和第二级两个子模糊控制器,它们共有三个模糊规则集,其中绿信模糊规则集和红信模糊规则集在第一级,决策模块模糊规则集处在第二级.绿信模块负责根据车道信号检测器检测到的交通信息判断当前绿信方向交通状况,确定当前的绿信繁忙度,并将其传送给决策模块;红信模块负责根据车道信号检测器检测到的交通信息判断当前除绿信外的所有红信方向的交通状况,确定各红信方向等待绿信的紧急度,并且将最为紧急的红信方向及其等待绿信的紧急度传给决策模块;决策模块则负责比较绿信使用的繁忙度和要求最紧急的红信紧急度,决定当前绿信是否应该跳转.

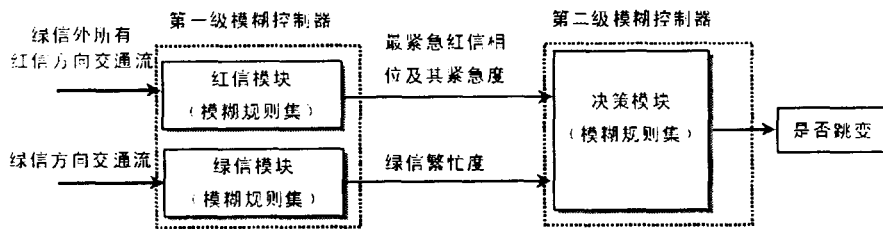


图2 两级模糊控制器结构

Fig. 2 Structure of two-stage fuzzy controller

这种方案与一般的单级模糊控制器的不同之处在于,控制器本身并不直接决定绿信的延长时间,而是定期检测车道传感器传送的信号,决定是否进行信号灯的跳转.这种两级模糊控制器对传统交叉口模糊控制中交通相位必须依次跳变的方式做了改进,每次绿信将给予需求最为紧急的红信相位方向.因为两级模糊控制器对较多的输入参数做了分块分级处理,每一个模糊规则集的输入参数都较少,所以它有利于总结、利用人工交通管理者经验,制订较为合理的模糊决策规则;同时,这种两级模糊控制结构有很大的灵活性,在不需要对模糊规则进行大的修改的情况下可以方便地应用于多相位、多车道、多路口等各种复杂情况.

在本文提出的四相位交叉路口的分级模糊控制

中,绿信模块有两个输入量:一个是处在绿信相位交叉口上游车道上前后端检测器之间准备进入交叉口的车辆数($RemCar$);另一个是绿信相位上游车道驶进交叉口的车辆数($OutRate$).这两个参数表明了当前绿信方向的绿信利用繁忙度.类似地,各红信模块也有两个输入量,即:处于红信相位上游车道上前后端检测器之间正在排队等待通行的车辆数($NumCar$),自上一次绿信跳转时间起的红信持续累计时间($RedTime$),这两个参数表明当前红信方向等待获得绿信的紧急度.绿信模块与红信模块的输出分别是当前绿信繁忙度($Green_Urgency$)和当前最紧急红信方向等待通行的紧急度($Red_Urgency$).它们都是模糊量,同时也是决策模块的两个输入.决策模块根据这两个模糊输入通过推理运算做出是否发生绿

信跳转的模糊决策 (*Decision*), 并且把这个决策反模糊化为一个 0-1 之间的实数值输出. 当该值超过某一阈值时, 绿信就跳转到需求最紧急的红信方向, 否则绿信就保持不变. 本文中可将该阈值取为 0.5.

3 采用进化策略自适应调整隶属度函数 (Using evolution strategy to modify membership functions adaptively)

3.1 采用进化策略调整隶属度函数的背景

上述两级模糊控制器结构有利于运用人工经验形成模糊规则, 较好地处理了输入参数过多情况下规则数激增的问题, 但它的模糊隶属度函数依然较多, 在人工设置这些参数时, 其合理性难以得到保证; 并且, 如果采用不变的隶属度函数描述变化的交通状况, 则模糊控制器的效果也会在一定程度上受到影响. 如果能够自适应地调整模糊控制器的隶属度函数, 使之适合于不同类型的交通状况, 则可以进一步降低车辆在交叉路口的等待时间.

由于城域交叉路口的交通流状态难以用解析数学表达式描述, 同时两级模糊控制器的隶属度函数一般多达数十个, 采用传统的优化方法来优化选取这些隶属度函数会遇到一些困难. 于是, 本文采用了一种启发式的优化方法——进化策略, 来调整两级模糊控制器的隶属度函数. 该方法具有全局特性、并行处理特性和通用性的优点, 对目标函数要求不高, 不需要目标函数的导数信息, 也无需知道目标函数显式数学表达式, 适合于求解多参数、多变量但联通性较差的优化问题^[10]. 采用进化策略调整隶属度函数的交叉口两级模糊控制系统的结构如图 3 所示.

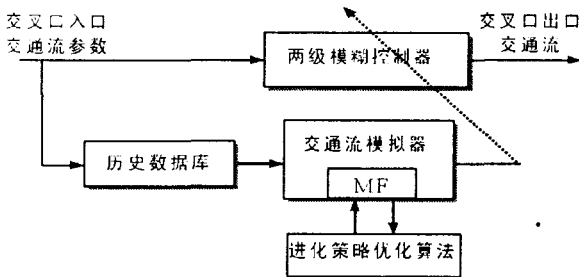


图 3 采用进化策略的交叉口两级控制系统示意图

Fig. 3 Two-stage intersection signal control system using evolution strategy

3.2 采用进化策略优化的两级模糊控制器的工作过程

首先采用由人工初始设置的隶属度函数进行模糊控制, 历史数据库开始积累各时间段的交叉口入口交通流参数. 每经过一定的时间间隔后, 交通流模

拟器利用历史数据库中记忆的历史交通参数进行交通再现模拟, 确定该时间间隔内的交叉路口的车辆通行状况, 同时采用进化策略对交通流模拟器中模糊隶属度函数进行寻优, 找出适合于当前交通流的模糊隶属度函数, 并且将调整后的隶属度函数送入分级模糊控制器加以更新.

3.3 进化策略寻优

在交叉路口的模糊控制中, 模糊集合常常采用易于实现的三角形模糊隶属度函数. 对于每一个三角形模糊隶属度函数, 可以用三角形的三个顶点的横坐标 P_1, P_2, P_3 完全表达. 因此, 两级模糊控制器中各模糊变量的每个模糊隶属度函数的 P_1, P_2, P_3 值构成的序列 $X^a = [x_1^a, x_2^a, \dots, x_n^a]$ 表示了控制器隶属度函数集的一个解. 同时, 为了避免在模糊化时出现无模糊隶属度函数与某一实数值输入对应的代沟现象, 每一个解的分量都定义在有限的区间之上, 即 $x_i^a \in [x_i^-, x_i^+], i = 1, 2, \dots, n$. 进化策略中的适应度函数通常可根据交通优化目标函数确定, 例如总的通行车辆数、车辆停等次数、平均车辆等待时间等. 本文中采用某一时间段内平均车辆等待时间作为适应度函数. 算法采用三种进化算子: 选择、变异、交叉, 同时采用先变异后交叉的步骤. 具体算法如下:

(1) 初始化: 确定种群规模 N 和进化中止准则. 在初始解空间 Ω 中随机生成 N 个个体 $x_i(0) (i = 1, 2, \dots, N)$, 组成初始种群 $X(0) = \{x_1(0), x_2(0), \dots, x_N(0)\}$, 置 $k = 0$.

(2) 变异过程: 由于 Schwefel 变异法^[9]能显著改善算法的计算效率和优化性能, 本文采用 Schwefel 变异. 即:

$$\begin{cases} \sigma(k+1) = \sigma(k) \exp(\zeta) \\ X(k+1) = X(k) + N(0, \sigma(k+1)) \end{cases}$$

其中, σ 为策略参数, $N(0, \sigma)$ 是均值为 0、标准偏差为 σ 的一个独立随机 Gauss 数的向量; $\zeta = \tau'N(0, 1) + \tau N(0, 1)$, ζ 服从正态分布 $N(0, \sqrt{\tau'^2 + \tau^2})$, 其中, $\tau' = \frac{1}{\sqrt{2n}}$, $\tau = \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{n}}$. 如果变异后的 $x_i(k)$ 超出 $[x_i^-, x_i^+]$, 则需要重新采用上式进行变异.

(3) 交叉过程: 采用中间交叉的方式, 即交叉

$$\text{后代}(X, \sigma) = \left(\left(\frac{x_1^i + x_1^j}{2}, \dots, \frac{x_n^i + x_n^j}{2} \right), \left(\frac{\sigma_1^i + \sigma_1^j}{2}, \dots, \frac{\sigma_n^i + \sigma_n^j}{2} \right) \right).$$

其中, i, j 为父本中随机选取的两个个体. 一般地, 交叉比例可选为 0.2.

(4) 选择过程:采用了 $(\mu + \lambda) - ES$ 进化策略。 μ 个父代个体生成 λ 个子代个体,计算每一个子代个体的适应度函数 $f(X^a)$,然后父子两代共 $(\mu + \lambda)$ 个个体按适应度函数进行竞争,选取 μ 个优胜个体组成新一代。

(5) 重复以上步骤(2) ~ (4) 直至中止准则。

4 仿真和结果 (Simulation and results)

为方便起见,本文选择一个孤立的、四相位、四通路、有左转弯交通流的交叉口作为仿真对象,如图 4 示,共有 8 个入口车道和 8 个出口车道。假定每个交叉口入口车道均装有前端和后端两个检测器,且它们之间的距离为 150m。其中前端检测器记录从车道上进入交叉口的车辆数和进入时间,后端检测器记录进入交叉口上游车道的车辆数和进入时间。这些记录的信息反映了当前的交通状况:红信方向排队等候车辆数 ($NumCar$);红灯持续时间 ($RedTime$);绿信方向驶入交叉口的车辆数 ($OutRate$);绿信方向正在准备进入交叉口的车辆数 ($RemCar$)。又假定交叉口的每个入口方向的里侧车道为左转弯车道,外侧车

道为直行车道;交通流为稳态,且服从 Poission 分布;车辆平均行驶速度为 45km/hour。

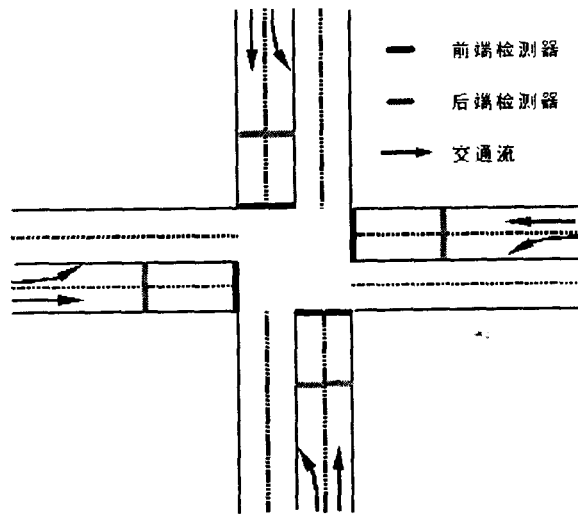
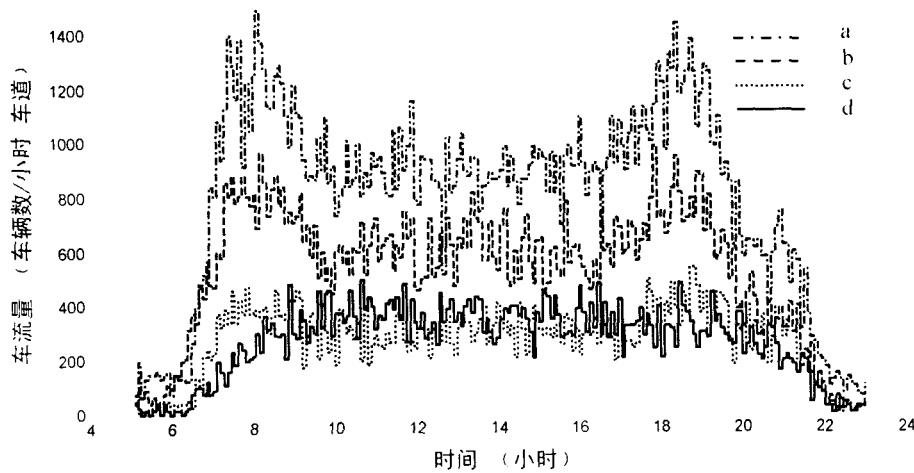


图 4 孤立四通路四相位交叉口

Fig. 4 An isolated four-approach four-phase intersection

考察交叉路口各通行方向一天中交通流量变化的典型情况,时间为早上 6 点至晚上 11 点,其中包括早晨和傍晚的交通高峰期,如图 5 所示。



a 南北向直行车流 b 东西向直行车流 c 南北向左拐车流 d 东西向左拐车流

图 5 交叉口各方向典型交通流

Fig. 5 Typical traffic of an intersection in a day

为了保证进入交叉口的车辆能安全通过交叉口,在每次绿信即将跳换之前,假设有一个 6s 的黄灯间隔时间,此间只允许交叉口出口方向的车辆离开,而任何交叉口入口方向车辆都不能进入交叉口。各车道检测器每两秒钟检测一次交通数据,并将它们传送至分级模糊控制器,控制器根据当前的交通参数决定绿信是否跳变;每隔 10min,计算该时间段通行车辆的平均等待时间,同时利用微观交通仿真

模型和进化策略算法进行一次隶属度函数调整,将优化后的隶属度函数送至分级模糊控制器用以更新,作为下一时间段模糊控制的隶属度函数。

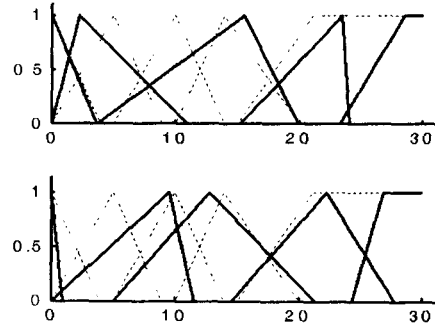
两级模糊控制器的绿信模块共有 25 条模糊规则,红信模块和决策模块各有 20 条模糊规则,部分模糊控制规则如表 1 所示。所有的模糊可调模糊隶属度函数为 21 个,总共可调的参数为 45 个。全部仿真程序均采用 C/C++ 语言编制而成。

表 1 部分模糊规则

Tab. 1 Part of the fuzzy rules

	<i>NumCar</i>	<i>RedTime</i>	<i>Red_Urgency</i>
R1	Zero	Zero	Very Low
R2	Zero	Short	Very Low
R3	Zero	Medium	Very Low
R4	Zero	Long	Very Low
R5	Zero	Very Long	Low
...
	<i>RemCar</i>	<i>OutRate</i>	<i>Green_Urgency</i>
R1	Zero	Zero	Very Low
R2	Zero	Small	Very Low
R3	Zero	Medium	Very Low
R4	Zero	Large	Very Low
R5	Small	Zero	Very Low
...
	<i>Red_Urgency</i>	<i>Green_Urgency</i>	<i>Decision</i>
R1	Very Low	Very Low	No Change
R2	Very Low	Low	No Change
R3	Very Low	Medium	No Change
R4	Very Low	High	No Change
R5	Low	Very Low	Change
...

图 6 表示模糊控制器绿信模块准备进入交叉口的车辆数 (*RemCar*) 隶属度函数, 包括初始人工经验值以及在早晨 8 点和下午 2 点经过进化策略算法择优后设置的值. 进化策略的初始种群数为 50 个, 进化代数数为 60 代.



图中 ---人工经验设置的 *RemCar* 隶属度函数
 上图 — 8 点时的 *RemCar* 隶属度函数
 下图 — 14 点时的 *RemCar* 隶属度函数
 图 6 *RemCar* 隶属度函数

Fig. 6 The membership function of *RemCar*

作为比较, 在此时间段上也对该交叉口分别采用定时控制方式、隶属度函数固定的两级模糊控制方式进行控制. 其中, 定时控制方式中信号周期为 148s, 按图 1 四相位的绿信时间分别为 40s、12s、60s、12s. 各绿信相位间隔也为一个 6s 的黄信时间. 三种控制方式的控制效果如图 7 所示. 在上午 6 点到晚上 11 点的整个时间段内, 采用自适应调整的两级模糊控制、隶属度设置固定的两级模糊控制以及定时控制后的平均通行车辆等待时间分别为 27.06 (秒/车)、33.05 (秒/车) 和 50.52 (秒/车), 前者比后两者分别下降了 18.12% 和 46.43%. 可见, 采用自适应的两级模糊控制能很好地降低平均车辆等待时间.

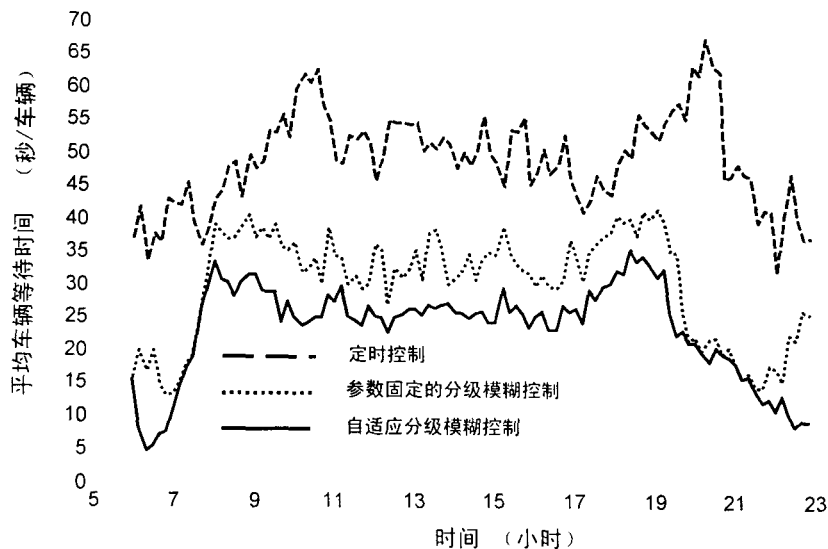


图 7 不同控制方式下交叉口车辆平均等待时间

Fig. 7 Mean waiting time of the intersection under different control methods

5 结论 (Conclusion)

通过以上的分析与仿真结果可见,本文提出的采用进化策略对模糊隶属度函数进行优化的城域交叉路口自适应两级模糊控制,不但具有分级模糊控制的易于提取模糊规则和降低规则数目的优点,同时可以合理设置模糊控制器的模糊隶属度函数,使模糊隶属度函数根据不同的交通情况自适应地变化,因此能够取得比定时控制以及传统的模糊控制更好的控制效果。

参 考 文 献 (References)

- [1] 王 磊, 王为民. 模糊控制理论及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [2] Pappis C P, Mamdani E H. Logic controller for traffic junction [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1977, 7(10): 707 ~ 717.
- [3] 徐东玲, 方建安, 邵世煌. 交通系统的模糊控制及其神经网络实现 [J]. 信息与控制, 1992, 21(2): 74 ~ 79.
- [4] Chiu S, Chand S. Self-organizing traffic control via fuzzy logic [A]. Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control [C]. San Antonio: IEEE Inc., 1993. 1897 ~ 1902.
- [5] 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.
- [6] Niittymäki J. Installation and experiences of field testing a fuzzy signal controller [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(2): 273 ~ 281.
- [7] Trabia M B, Kaseko M S, Ande M. A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals [J]. Transportation Research Part C, 1999, 7(6): 353 ~ 367.
- [8] Lee J H, Hyung L K. Distributed and cooperative fuzzy controllers for traffic intersections group [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics - Part C, 1999, 29(2): 263 ~ 271.
- [9] Schewefel H P. Evolution and Optimum Seeking [M]. Berlin: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [10] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法以及应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

作者简介

李威武(1976 -), 男, 博士研究生. 研究领域为智能控制和智能交通系统等.

王 慧(1959 -), 女, 教授. 研究领域系统建模控制, 优化等.

邹志君(1978 -), 女, 硕士研究生. 研究领域为车辆动力控制和智能交通系统等.

(上接第 292 页)

通过自然语言 and 用户交互, 最大程度地了解用户需求, 从可以获得的网络资源中检索出对用户最有价值的信息. 另外, 还可以将数据挖掘技术应用到智能搜索引擎中, 对搜索引擎返回的结果进行挖掘, 从而为用户提供更为准确的查询结果, 有效地提高查全率和查准率. 但在实践中, 概念语义网络的划分仍是人为进行的, 我们应对语义属性的动态划分做进一步的探讨和研究.

参 考 文 献 (References)

- [1] Brin S. The anatomy of large-scale hypertextual Web search engine [A]. Proceedings of the 7th International World Wide Web Conference [C]. Brisbane, Australian: 1998. 121 ~ 126.
- [2] Ying H. The Takagi-Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rulers are nonlinear variable gain controllers [J]. Automatica, 1998, 34(2): 157 ~ 167.
- [3] Du Y, Li D Y. A method of data source generation for testing data mining algorithm [J]. Journal of Computer Research & Development, 2000, 37(7): 776 ~ 782.
- [4] Li D Y, Di K C, Li D R, et al. Mining association rules with linguistic cloud models [J]. Journal of Software, 2000, 11(2): 143 ~ 158.
- [5] Ying H. Sufficient conditions on uniform approximation of multivariate functions by general Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2001, 36(3): 235 ~ 238.

作者简介

张树瑜(1978 -), 男, 博士研究生. 研究领域为数据挖掘, 智能决策支持系统及数据挖掘等.

翁颖均(1975 -), 男, 博士研究生. 研究领域为智能决策支持系统, 地理信息系统, 数据挖掘等.

朱仲英(1939 -), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为智能空间信息系统和智能空间决策支持系统的理论与应用, 智能控制系统的理论与应用.