

文章编号:1001-9081(2009)01-0139-04

多线路准快速公交调度优化及混合遗传禁忌算法仿真

李志成¹, 吴芳¹, 徐琛¹, 李静²

(1. 兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070; 2. 澳门大学 社科与人文学院, 中国 澳门)

(lizhicheng008@126.com)

摘要:针对多线路准快速公交社会效益及企业运营效益最大化的多目标调度问题建立了优化模型。根据问题的特点设计了组合优化调度问题的混合遗传—禁忌算法,结合深圳市龙岗区公交调查数据对该模型进行了验证,计算结果及分析表明该算法比遗传算法及禁忌算法在求解此类问题时更有更高的效率。

关键词:准快速公交; 公交调度; 多目标; 禁忌算法; 混合遗传算法

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Simulation of hybrid genetic tabu algorithm for quasi-bus rapid transit scheduling optimization with multi-line

LI Zhi-cheng¹, WU Fang¹, XU Chen¹, LI Jing²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China;

2. Faculty of Social Sciences and Humanities, University of Macau, Macau, China)

Abstract: This paper focused on the scheduling problem for Quasi-Bus Rapid Transit with multi-line based on the maximum of the social benefit and enterprise profit. The multi-object math-ematical model of scheduling was established, of which hybrid genetic tabu algorithm was designed for B-asing according to the characteristics of the problem. The model has been validated through surveyed data of the public bus station in Long Gang district of Shenzhen city. The result and analysis show that this algorithm is more efficient than genetic algorithm and tabu search on solving this problem.

Key words: quasi-bus rapid transit; public transit scheduling; multi-objective; tabu search algorithm; hybrid genetic algorithm

0 引言

准快速公交是一种介于常规公交和快速公交之间的公共交通,与快速公交相比它以投资少、技术条件要求低、速度快及运量大等特点,近几年在全国大部分城市得到发展^[1]。然而目前国内对于准快速公交问题缺乏系统研究,尤其对于公交调度问题的研究较少。

本文从社会效益与运输企业效益最大化角度出发,对准快速公交发车点与发车间隔进行研究,建立相应的准快速公交调度多目标数学优化模型。由于公交调度问题是一个典型的组合优化问题^[2-3],目前仍然属 NP-Hard 问题^[4-5],求解难度较大。为了克服前人仅凭借单一算法求解所带来的弊端^[6-7],本文将遗传算法与禁忌搜索算法进行了新的组合,设计了新的混合算法对模型进行求解。

1 准快速公交调度的数学模型

1.1 模型假设

本文所研究的准快速公交调度优化问题,主要以大站快车道为例做以下假设:

1) 准快速公交始发站和终点站为同一站点,即车辆从始发站循环开出;2) 准快速公交线路数量给定,每条线路单位工作日公交运营时间长度给定;3) 准快速公交各条线路站点数确定并且按进行顺序编号;4) 准快速公交采用同一型号的车辆且单位车辆载客量固定;5) 各时段乘客到站服从均匀分布;6) 车辆保持良好状态行驶,行驶途中不存在插队现象。

1.2 模型的建立

1.2.1 乘客候车时间

乘客候车时间分为两部分:一部分是乘客初次乘车候车时间;另一部分是乘客未能搭乘上本班次车需等下班次车所耗费的时间,可以用以下数学公式表示:

$$T_{\text{等}}^l = \sum_i \sum_j \int_{t_{i-1,j}^l}^{t_{i,j}^l} (t^l - t_{i-1,j}^l) \rho_{i,j}^l(t) dt + \sum_i \sum_j \delta_{i,j}^l (W_{i,j}^l - B_{i,j}^l) (t_{i+1,j}^l - t_{i,j}^l) \quad (1)$$

$$\delta_{i,j}^l = \begin{cases} 0, & W_{i,j}^l < B_{i,j}^l, \forall i, j, l \\ 1, & W_{i,j}^l > B_{i,j}^l \end{cases} \quad (2)$$

其中: $T_{\text{等}}^l$ 为线路 l 上等车时间, $t_{i,j}^l$ 为第 i 车到达 j 站的时刻, $W_{i,j}^l$ 为线路 l 在 j 站等待 i 车次的乘客数, $B_{i,j}^l$ 为线路 l 上 i 车在 j 站容纳上车的乘客数, $\delta_{i,j}^l$ 为 0、1 变量。

1.2.2 乘客乘车时间

乘客的乘车时间分为两部分:乘客在乘车区间的车辆运行时间和乘客在区间内各个站点的停靠站下车时间。设单位乘客上、下车所占用的时间均值为 Δt (h/人),可表示为:

$$C_{\text{车内}}^l = \sum_i \sum_j [\theta \tau_{i,j}^l + (t_{i,j}^l - t_{i,j-1}^l) p_{i,j-1}^l]; l = 1, 2, \dots \quad (3)$$

$$\tau_{i,j}^l = p_{i,j-1}^l q_j^l \Delta t; \forall i, j, l \quad (4)$$

其中: $\tau_{i,j}^l$ 为线路 l 上 i 车在 j 站停留时间, q_j^l 为 l 线路 j 站乘客下车比例, θ 是对下车乘客下车时间的修正系数,一般取

收稿日期:2008-07-21;修回日期:2008-09-25。

基金项目:甘肃省高等学校科研项目(0504-07);2008 年兰州交通大学学生创新基金资助项目(DXS2008-017)。

作者简介:李志成(1982-),男,安徽巢湖人,硕士研究生,主要研究方向:城市交通、运筹与智能算法; 吴芳(1966-),女,甘肃天水人,副教授,主要研究方向:城市交通、物流规划、智能算法; 徐琛(1984-),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要研究方向:城市交通、智能算法; 李静(1984-),女,安徽巢湖人,博士研究生,主要研究方向:语言学。

0.5 ~ 0.8, $p_{i,j}^l$ 为第 l 线路 i 车离开 j 站车上的乘客数。

1.2.3 准快速公交线路运营费用

准快速公交线路运营费用由两部分组成:一部分是运营车辆自身的折旧费;另一部分是运营车辆的运营费用,其中包括车辆的燃油费、维修费、司机以及乘务员的工资费用。

1) 运营票价收入。

准快速公交票价是按站点收取,所以公交企业票价收入数学表示如下:

$$B_{票}^l = \sum_i \sum_j \delta_1^l \left[\begin{aligned} &(2 - q_j^l) p_{i,j-1}^l + \\ &\min \left(\int_{t_{i,j-1}^l}^{t_{i,j}^l} \rho_{i,j}^l(t) dt, B_{i,j}^l \right) \end{aligned} \right]; \forall l \quad (5)$$

其中: $B_{票}^l$ 为线路 l 车辆票价总收入, $\rho_{i,j}^l(t)$ 为第 l 线路上 i 车 j 站的上车乘客到达率。

2) 线路总发车次数的确定。

$$N^l = \max \{k \mid \sum_{i=1}^k (t_{i,j}^l - t_{i-1,j}^l) \leq H^l; l = 1, 2, \dots\} \quad (6)$$

其中: N^l 为线路 l 在运营时段内总发车次数, H^l 为线路 l 上单

$$\begin{aligned} \max \{ & \frac{\alpha}{\sum_i \sum_j \sum_{t_{i,j-1}^l}^{t_{i,j}^l} [\theta t_{i,j}^l + (t_{i,j}^l - t_{i,j-1}^l) p_{i,j-1}^l]} + \beta \sum_i \sum_j \sum_{t_{i,j-1}^l}^{t_{i,j}^l} \delta_1^l [(2 - q_j^l) p_{i,j-1}^l + \\ & \min \left(\int_{t_{i,j-1}^l}^{t_{i,j}^l} \rho_{i,j}^l(t) dt, B_{i,j}^l \right)] - \sum_i N^l \delta_2^l - \sum_i \sum_j \sum_{t_{i,j-1}^l}^{t_{i,j}^l} \delta_3^l (t_{i,j}^l - t_{i,j-1}^l) \} \\ \text{s. t. } & \frac{\sum_i \sum_j \sum_{t_{i-1,j}^l}^{t_{i,j}^l} \int (t - t_{i-1,j}^l) \rho_{i,j}^l(t) dt + \sum_i \sum_j \sum_{t_{i,j-1}^l}^{t_{i,j}^l} \delta_{i,j}^l (W_{i,j}^l - B_{i,j}^l) (t_{i+1,j}^l - t_{i,j}^l)}{\sum_i \sum_j \sum_{t_{i-1,j}^l}^{t_{i,j}^l} \int \rho_{i,j}^l(t) dt} \leq W_{\max} \\ & \frac{\sum_i \sum_j \sum_{t_{i-1,j}^l}^{t_{i,j}^l} \int \rho_{i,j}^l(t) dt}{\sum_i C_{\text{定额}}^l N^l} \geq \lambda \\ & T_{\min}^l \leq t_{i,j}^l - t_{i-1,j}^l \leq T_{\max}^l \\ & \alpha + \beta = 1, 1 \leq i \leq N^l, \quad 1 \leq j \leq Z^l \end{aligned} \quad (9)$$

其中: Z^l 为线路 l 站点总数, α, β 表示偏重系数。

2 准快速公交调度问题混合算法的设计

遗传算法是一种全局搜索方法,具有运算简单、鲁棒性强等特点,但收敛速度较慢^[8-9],禁忌算法爬山能力强且搜索速度具有独有的记忆功能^[10-11],将禁忌算法引入遗传算法的搜索过程,将更好地提高遗传算法求解效率。

2.1 编码与初始种群

准快速公交调度优化问题的决策变量为准快速公交线路及各线路的发车间隔即 $x = [\Delta t_{1,j}^l, \Delta t_{2,j}^l, \dots, \Delta t_{M,j}^l, l], \forall j$ 其中 $\Delta t_{i,j}^l = t_{i,j}^l - t_{i-1,j}^l$, 然后对 $\Delta t_{i,j}^l$ 采用二进制值编码,这里发车间隔区间为 $[3, 10]$, 间隔数为 7, 所以 $\Delta t_{i,j}^l, \forall i, j$ 编码长度只需要 3 位, 所以本文对于每个个体编码长度需要 $3N^l - 2$ 位。

种群的初始化,即随机产生初始染色体,组成种群。种群初始化的时候必须满足模型约束条件。

2.2 适应度函数

每一代每个个体的适应度函数定义为 $f = \frac{\alpha \theta}{C_{\text{车丙}}}$ +

$\beta BT_{\text{运营}}$, 目标函数中的参数 α, β 是对目标两个部分不同程度的调整,使模型所得到的最大化的结果与实际相符, θ 为惩罚系数(这里取 1000)。

位工作日的运营时段长度。

3) 线路车辆运营费用。

$$C_{\text{运营}}^l = \sum_i N^l \delta_2^l + \sum_i \sum_j \delta_3^l (t_{i,j}^l - t_{i,j-1}^l) \quad (7)$$

准快速公交运营收益是由票价收入与车辆每日的折旧费及车辆的运营费用的差值,由式(8)表示:

$$\begin{aligned} BT_{\text{运营}}^l = & \sum_i \sum_j \delta_1^l [2 - q_j^l] p_{i,j-1}^l + \\ & \min \left(\int_{t_{i,j-1}^l}^{t_{i,j}^l} \rho_{i,j}^l(t) dt, B_{i,j}^l \right) - \sum_i N^l \delta_2^l - \\ & \sum_i \sum_j \delta_3^l (t_{i,j}^l - t_{i,j-1}^l); l = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $C_{\text{运营}}^l$ 为准快速公交线路 l 上车辆运营费用, $BT_{\text{运营}}^l$ 为准快速公交线路 l 上运营收益, $\delta_1^l, \delta_2^l, \delta_3^l$ 分别表示第 l 线路上准快速公交票价(元/人·站)、车辆每日的折旧费(元/辆·日)、车辆运行成本费用(元/辆·时)

考虑社会效益与企业运营效益综合最大化,将目标函数组合为:

2.3 遗传算子操作

遗传算法操作算子包括选择、交叉和变异三种,是对生物繁衍、进化的模拟过程,它们作用于群体,从而产生新一代群体。

2.3.1 选择操作

选择操作是从种群中选择好的个体进行繁衍后代,本文采用轮盘赌或称蒙特卡罗选择。该方法是一种回放式随机采样方法,按照种群中个体的目标值升序排列,计算各个个体的选择概率和其适应度值成比例。设种群大小为 p_z , 第 i 个体 x_i

被选择的概率为 $p_i = \frac{f(x_i)}{\sum_i f(x_i)} (1 \leq i \leq p_z)$ 。

2.3.2 交叉操作

交叉操作是对生物基因遗传重组的重要过程,也是遗传算法的核心过程。本文主要对个体编码的前 $3N^l - 1$ 个基因位按照一定的交叉概率 μ 随机地选择 $\mu(3N^l - 1)$ 个位置进行两个个体对应位的基因交换,产生新的个体。如果交叉过程中可能产生不满足约束条件的个体,则重新选择交叉点进行或者换一新个体交叉。

2.3.3 变异操作

变异是生物进化过程的重要过程,在本文遗传禁忌算法中变异是按照一定变异概率 η 对个体编码的前 $3N^l - 1$ 个基

因位随机地选择 $\eta(3N^l - 1)$ 个体基因位二进制数取反。

2.4 禁忌规则与特赦条件

基于混合遗传禁忌算法,其禁忌是对遗传算法局部邻域最优解的偏移,对全邻域的解的搜索,避免遗传算法出现早熟现象。

特赦条件:如果当前邻域操作所得到的解与当前最优解的差值在给定的差限内,对该邻域进行解禁,采用该领域为当前邻域。

2.5 算法关键步骤

1) 确定种群大小 pz ,交叉率 μ ,变异率 η ,差限 σ ,迭代次数 n ,线路条数 m ,令 $l = 1$ 。

2) 当 $s = 0$ 初始种群,同时初始化禁忌表,初始化种群 $p(s)$,随机产生 pz 个个体的可行解 x_i 进行编码操作, $1 \leq i \leq pz$ 组成初始种群,赋最优解 f_{op} 初始值。

3) 计算适应函数值进行选择操作,按照遗传算法对选择的个体进行交叉和变异操作。

4) 计算当前邻域中个体的解 $f_{i,s}^*(x_i^l)$, 如果 $k = \min\{i | f_{i,s}^*(x_i^l) - f_{op}^l < 0, 1 \leq i \leq pz\} \neq \emptyset$, 则 $f_{op}^l = f_{i,s}^*(x_i^l)$ 记录最优解,保存个体,按照禁忌规则判断移入、移出禁忌表,如果当邻域最优解系列已被禁忌表禁忌,对所有满足 $k = \min\{i | f_{i,s}^*(x_i) - f_{op}^l < \sigma, 1 \leq i \leq pz\}$ 的 $f_{i,s}^*(x_i^l)$ 的在禁忌表中进行解禁。

5) $s = s + 1$,若 $s \leq n$,转第 3 步;否则进行译码操作并输出线路 l 调度的最优解。

6) $l = l + 1$,若 $l \leq m$,转第 2 步;否则对所有线路收益累加求和,最后结束算法。

3 仿真实验及结果分析

3.1 仿真实例

本文以深圳龙岗区某 2 条准快速公交线路为研究对象,其线路 1 有 8 个大站点,线路 2 有 10 个大站点,每辆车的载客人数 85 人,为了便于计算,各线路票价统一均为 0.5(元/人·站)收取,车辆折旧费 80 元/辆·日,车辆运行车本费 15 元/辆·时,每辆车的单位乘客平均上、下车需要 4 秒/人,发车间隔变化区间为 $[2, 10] \min$, α 取 0.6、 β 取 0.4,设种群规模为 100,交叉概率 μ 取 0.8,对于变异概率 η 取 0.01,车辆的满载率 λ 取 0.75。根据各线路近期历史客流数到达率及下车比例分别如表 1、2,且公交公司每日的运营时间为 7:00 ~ 23:00,即 $H^l = 16 \text{ h}$ 。

3.2 仿真结果

采用遗传、禁忌和混合算法各进行 30 次运算,其结果如表 3 所示。车辆平均满载率为 116%,平均每条线路收益为 8 706.45 元/日,平均总收益为:17 412.9 元/日。

3.3 结果分析

1) 优化前后乘客的平均等车及车内时间等参数比较如表 4 所示。

由表 4 可知,优化后的乘客等待时间、车内时间及乘客滞留率相对优化前明显减少,公交服务质量得到较好的提高,发挥更好的社会效益,优化后车辆数的减少,发车次数的降低给企业带来较好的经济效益。

2) 以线路 1 为例,优化前后车辆发车间隔比较如图 1 所示。

从图 1 可以分析得出:优化前图形呈矩形,为等间隔发车;而优化后的图形呈锯齿形,为不等间隔发车,优化后的发车间隔对变化的客流具有较强的适应性,能够有效节省乘客乘车等待时间,企业服务质量得到了显著提高。

表 1 线路 1 各站点的平均乘客到达率及下车比例

站点	每分钟平均到达人数	平均下车比例/%
1	3	0
2	1	23
3	2	27
4	3	65
5	2	35
6	3	58
7	2	42
8	0	100

表 2 线路 2 各站点的平均乘客到达率及下车比例

站点	每分钟平均到达人数	下车比例/%
1	3	0
2	2	42
3	3	45
4	2	39
5	2	32
6	2	47
7	2	43
8	2	46
9	1	44
10	0	100

表 3 仿真结果比较

算法	线路	计算结果					
		最优解	平均等车时间/min	车辆满载率/%	车内时间/h	运营收益/元	平均收敛时间/s
遗传	线路 1	3 201.2	6.27	92	0.511	6 124.2	107.2
	线路 2	3 445.7	5.31	101	0.472	7 641.3	
禁忌	线路 1	3 087.4	7.06	87	0.531	5 932.9	65.4
	线路 2	3 336.1	6.98	98	0.494	7 001.2	
混合算法	线路 1	3 245.8	5.06	102	0.429	8 114.5	80.7
	线路 2	3 535.2	4.98	130	0.313	9 298.4	

表 4 优化前后各项参数比较

优化前后比较	平均等车时间/min	平均车内时间/h	乘客滞留率/%	车辆平均满载率/%	平均发车次数	需车辆数		每日总收益/元
						线路 1	线路 2	
优化前	6.82	0.462	5.0	97	162	15	18	14 265.70
优化后	5.02	0.371	1.2	116	140	12	16	17 412.90
优化前后百分比/%	-26.39	-1.7	-7.6	19.59	-13.58	-20	-11.1	22.06

注:“-”表示优化后减少的百分比。

4 结语

本文对多线路准快速公交调度的研究是从乘客与运输经营者双赢的角度出发建立的多目标模型,并设计了遗传禁忌

混合算法求解。实验表明此算法对准快速公交调度模型优化效果较为明显,可为今后对准快速公交调度问题研究提供一定的参考依据。

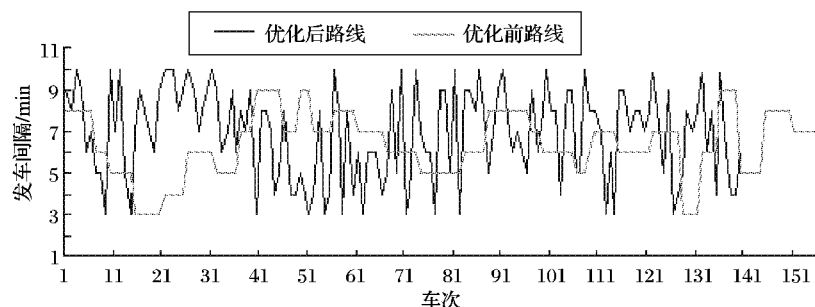


图1 优化前后线路发车间隔

参考文献:

- [1] 胡润州. 城市准快速公交系统的经济优势[J]. 综合运输, 2003 (11): 48-49.
- [2] 李军, 郭耀煌. 车辆优化调度理论与方法[M]. 北京: 中国物资出版社, 2001: 7-10.
- [3] 王伟, 杨新苗, 陈学武. 城市公共交通系统规划方法与管理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [5] SAKAA A. Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas[J]. Journal of transportation Engineering, 2001, 127(3): 195-199.
- [6] JASZKIEWICZ A. On the Performance of multiple-objective genetic local search on the 0/1 knapsack problem: A comparative experiment[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(4): 402-412.
- [7] 白子建, 赵淑芝, 田振中. 公共交通网络优化的禁忌算法设计与实现[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(3): 40-44.
- [8] ELAOU S, LOUKIL T, TEGHEM J. The pareto fitness genetic algorithm: Test function study[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(3): 1703-1719.
- [9] ISHIBUCHI H, MURATA T A. Multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling[J]. IEEE Transactions on systems man and cybernetics part C: 1998, 28(3): 392-403.
- [10] GLOVER F. Tabu search: Part I[J]. ORSA journal on Computing, 1989(1): 190-206.
- [11] GLOVER F. Tabu search II[J]. ORSA Journal on Computing, 1989(2): 4-32.

(上接第 131 页)

仿真时,网络参数设置为 $\rho = 0.65, \beta = 0.05$ 。将 t 时刻目标参数输入网络 F1 层,经网络计算得:

F2 层共创建 3 个神经元(将敌方目标编成了三个群),经学习后的 F1 层到 F2 层连接权值(模板矢量)如表 3 所示。

表 3 F1 层到 F2 层连接权值

F1 层 神经元	F2 层神经元		
	1	2	3
1	(0.76, 0.23)	(0.8000, 0.1600)	(0.9356, 0.0539)
2	(0.74, 0.24)	(0.9500, 0.0500)	(0.8385, 0.1510)
3	(0.86, 0.13)	(0.8175, 0.1088)	(0.9795, 0.0100)
4	(0.95, 0.04)	(0.1580, 0.8035)	(0.6400, 0.3300)
5	(0.56, 0.43)	(0.8209, 0.1605)	(0.6000, 0.3800)
6	(0.81, 0.16)	(0.3990, 0.8500)	(0.9395, 0.0505)

目标编群结果为:将目标 1 单独编为一个群,模板矢量为 F2 层第一个神经元的内星矢量(表 3 中第一列数据);将目标 2、3、6 编为一个群,模板矢量为 F2 层第二个神经元的内星矢量(表 3 中第二列数据);将目标 4、5、7、8 编为一个群,模板矢量为 F2 层第三个神经元的内星矢量(表 3 中第三列数据)。对以上结果的分析比较可知,三个类的模板矢量较合理地描述了各个群的典型特征,目标编群结果是合理的。

仿真实验也证明,改变网络参数将获得不同的编群结果。提高匹配判据 ρ 的值,目标将被分配到多个群中,而更小的匹配判据将会使距离比较小的群合并成一个群。当新的样本矢量被分配到一个现有的类中的时候,学习率 β 的不同取值影响到聚类中心的调整幅度。最后,对编群结果产生重要影响的另一个因素是贴近度的计算方法。合理的贴近度能更精确

地描述输入样本与模板矢量的匹配度,因而影响到目标的群归属。因此,改进贴近度计算方法将进一步提高直觉模糊 ART 神经网络的性能。

4 结语

目标的空间编群对战场态势评估具有极其重要的意义,而在目标编群基础上的群事件对战场态势演变有重要影响。本文描述了态势评估系统中目标编群问题、目标群的处理流程和群事件的检测方法,结合直觉模糊贴近度理论构造了直觉模糊 ART 神经网络,设计了网络的“匹配—委托”机制和直觉模糊权值向量的“快学慢调”机制,并应用于防空作战的目标编群,最后的仿真实验取得了理想的效果。经过实验和理论分析,可以在参数设置和贴近度计算方法方面优化网络性能,提高事件检测效率。

参考文献:

- [1] 孙兆林, 杨宏文, 胡卫东. 基于贝叶斯网络的态势估计方法[J]. 计算机应用, 2005, 25(4): 745-747.
- [2] 郭俊文, 覃征, 贺升平, 等. 机动目标空间合群仿真[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(12): 1398-1382.
- [3] 马云, 王宝树, 李伟生. 数据融合中的态势觉察技术[J]. 计算机工程, 2004, 30(1): 85-87.
- [4] 李伟生, 王宝树. 态势估计的目标编群问题研究[J]. 计算机科学, 2003, 30(18): 136-138.
- [5] 郭俊文, 覃征, 贺升平, 等. 机动目标功能的合群算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(14): 7-10.
- [6] 吉治钢, 蔡利栋. 基于 Fuzzy ART 神经网络的 Linux 进程行为异常检测[J]. 计算机工程, 2005, 31(3): 183-185.
- [7] 雷英杰, 王涛, 赵晔, 等. 直觉模糊匹配的语义距离与贴近度[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2005, 6(1): 69-72.