

城市交通多线路协调优化仿真模型研究

李晓东, 曾凡智, 陈广义, 丁伟雄

(佛山科学技术学院 计算机系, 广东 佛山 528000)

摘 要: 为缓解城市交通拥堵, 提高道路利用率, 提出一种新的简单实用的城市交通多线路协调优化控制模型及时空相位演化方法, 并给出了改进的遗传优化算法。通过仿真系统的开发, 实现了城市交通的多线路优化控制仿真并获得了满意的效果。对比优化前后的数据, 优化后调度线路上的车流以最少平均停车次数和最短平均延迟时间到达目的地。利用本优化模型可以实现以较小的代价成本疏导城市交通, 提高城市道路通行能力。

关键词: 城市交通控制; 交通优化控制模型; 改进遗传算法; 时空相位演化方法

中图分类号: TP399; U491

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)08-2995-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.08.048

Research of multi-line optimal simulation model for urban traffic control

LI Xiao-dong, ZENG Fan-zhi, CHEN Guang-yi, DING Wei-xiong

(Dept. of Computer, Foshan University, Foshan Guangdong 528000, China)

Abstract: In order to alleviate urban traffic congestion and improve road utilization, this paper proposed a new utility multi-line optimal model and time-space-phase evolution (TSPE) method for urban traffic control. And gave a genetic optimization algorithm based on the model. With the simulation system developed to realize multi-line optimization of urban traffic control, obtained satisfactory results. Comparing with data before and after optimization, the urban vehicles on the routes reached the destinations with minimum average number of stops and shorter average delay time. The model would ease city traffic and improve the urban road traffic capacity with the minimum price and costs.

Key words: urban traffic control; optimal model for traffic control; improved genetic algorithm; time-space-phase evolution method

近年来,我国各大城市的机动车数量快速增加,城市道路交通拥堵日益严重。对车流疏导的智能交通系统 ITS 成为目前交通领域研究的热点问题。国外以 VISSIM 和 VISSUM 等为代表的交通仿真(模拟)软件功能比较成熟^[1~3],但它们的控制结构复杂,实施费用很高,并不完全适合我国城市交通的实际情况。

智能交通系统优化的手段主要有动态交通诱导(dynamic route guidance, DRG)和交通信号控制(traffic signal control, TSC)。其中,DRG 用于改变车流在空间上的分布;TSC 用于改变车辆在时间上的分布,从而达到优化城市交通目的。目前国内在交通信号控制优化方面,交通信号配时优化是研究的热点课题,也取得了许多比较好的成果^[1],而对交通灯相位差优化研究得相对较少,尽管国外有了一些比较成熟的线路协调控制系统,如 MAXBAND、PASSERII 和 CORSIM 等,但其模型还主要集中在干线最大带宽(maximal bandwidth)优化的研究方面。目前在国内,城市交通主干路相位差优化研究^[4~8]实际上也是主干路双向绿波带带宽优化的研究。此外,朱文兴提出的大路口的概念^[6]以相邻的 2、3 个路口作为研究对象,揭示了相邻路口的相位差关系,但尚未能对更多复杂路口的相位关系进行全面的分析。交通优化仿真是一项比较困难复杂的工作,涉及到的问题非常多,为了简化问题,本文以多条城市主干路的快速

通行为目标,提出一种简单实用的城市交通多线路协调控制优化模型,并采用改进的遗传算法实现对城市多条线路的控制信号相位差优化。

1 城市交通多线路优化基本模型

1.1 道路路网及交通路口模型

在仿真系统中,道路路网模型必须反映城市路网的拓朴关系,还需对各种道路的几何关系进行描述,如图 1 所示。为准确地描述城市路网,需要定义路口、路段、车道和线路等对象。

a)路口,即表示车辆的入/出口或交叉路口,是城市道路中可以设置交通信号的节点。路口通常有“X”型路口和“T”型路口。对于一路段中间的交通信号控制点,称为“一”字型路口。

b)路段,即连接两路口的一段有向道路,每个路段还可以为单车道或多车道。

c)车道,即车辆行驶的通道,通常包含车道类型、限速、转向规则等属性。任何车辆必属于某一车道,车辆在此车道内排队。

d)线路,由一系列彼此相邻的路段按一定顺序连接而成。在本仿真模型中它是系统优化的主要研究对象,称为优化线

收稿日期: 2010-01-19; 修回日期: 2010-02-24

作者简介: 李晓东(1968-),男,讲师,硕士,主要研究方向为人工智能和智能控制、仿真等(fosu_computer@163.com);曾凡智(1964-),男,副教授,博士,主要研究方向为人工智能及数据挖掘;陈广义(1962-),男,教授,主要研究方向为智能控制;丁伟雄(1970-),男,高级实验师,硕士,主要研究方向为计算机仿真技术。

路。不同的优化线路可以包含相同的路段。

1.2 路口通行规则模型

通行规则是车辆通过路口必须遵循的交通规则,即在某信号相位期间,允许或禁止某些方向的车辆通行的规则。考虑到一般性,假定路口都为“X”型路口,同时假定每个路口的通行时间分成四个相位(每个相位的时间可以随意设定)。因此,每路口共包括 12 个不同的通行方向(图 2),并可根据实际需要分别为这 12 个通行方向设定不同的通行相位(表 1)。对于“T”型路口或“一”型路口可以看成是十字路口的特殊情况,并可通过设定对应通行相位时间为 0 来实现。对于更复杂的路口不予考虑,但也可以通过人为将其分割为两个路口来分别处理。

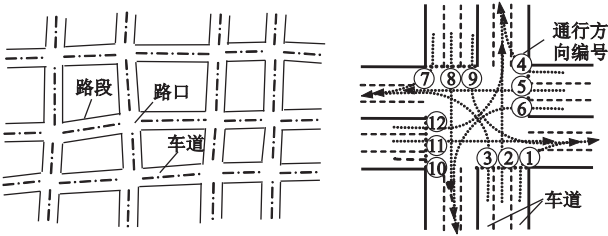


图1 路网结构示意图

图2 路口通行方向示意图

表 1 路口通行规则表

方向编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A 相	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B 相	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
C 相	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
D 相	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

注:0 表示禁止通行,1 表示可以通行

1.3 车辆生成模型

在城市交通仿真系统中,城市交通中车辆具有很强的随机性和突发性,建立准确的车辆生成模型存在一定困难。目前可采用的车辆生成模型有泊松(poisson)分布模型、二项(binomial)分布模型、负二项(negative binomial)分布模型等。在本系统中,在发车周期内采用泊松分布模型,泊松分布模型是按照概率 $p(x)$ 产生车辆:

$$p(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!}$$
 (1)

其中: $p(x)$ 为计数周期内到达 x 辆车的概率; m 为计数周期内平均到达(产生)的车辆数。由于车辆不能同时进入路口的同一车道,同时到达的车辆需按照等时距间隔进入线路。

1.4 车辆跟驰模型

在车辆行驶过程中,车辆行驶受到同一车道中前面车辆的行驶情况的影响。为了安全,后车必须与前车保持一定的安全距离。在交通仿真中,可采用的车辆跟驰模型比较多,本文采用安全距离模型(也称防撞模型)。此模型最初由 Kometani 和 Sasaki 提出,当后车与前车间距大于此安全距离时,即使前车采取一个意想不到的操作也不会发生碰撞。

1988 年 Leutzbach 建立了一个比较简单实用的安全距离模型:

$$d_j = l_j + Tv + v^2/(2\mu g)$$
 (2)

其中: l_j 表示车长, μ 表示路面摩擦系统, g 表示重力加速度, v 表示车速, T 表示驾驶员刹车所需的反应时间。由于此模型比较简单,控制参数少,在交通仿真中应用比较广泛。

若考虑到前车未停止,以上模型需要作如下调整:

$$d_j = l_j + T(v - v_{前}) + (v^2 - v_{前}^2)/(2\mu g)$$
 (3)

可以看出,该模型距离比 Leutzbach 模型小一些,有利于提高城市道路通行量。

1.5 延误模型及其算法

1.5.1 延误模型

当车辆到达路口时受交通信号的控制,可能需要排队并产生延误。Webster 根据理论研究和数值模拟方法,建立了交叉口延误的近似模型并被广泛应用。它是对某路口各车总延误的近似估计,不能精确计算各车的精确延误值。同样,在 CORSIM 等系统中也采用平均延误的概念。在文献[6,7]中,通过车辆排队长、红绿灯的相位差及放行车辆数来计算路口某车道车辆的平均延误。由于 OD 很难获得,并且车辆在路口并非匀速行驶,用于每车的延误计算并不合适,误差比较大。在本仿真模型中,提出时空相位演化(time-space-phase evolution)方法(以下简称 TSPE),可以比较精确地计算各车的延误时间及停车次数。

如果车辆到达路口刚好是绿灯,则不需要停车等待,即延误为 0,否则需要分别计算各车在路口的延误时间。假设队列中某车(第 i 辆车)在路口加速或减速的加速度都为 a_i (与行车习惯和道路摩擦系数有关),则可通过以下方法计算其延误:

a) 如果队列中的第 i 辆车在某路口停车一次即能通过,其停车和加速过程如图 3(a)所示,则其延误时间可表示为

$$t_i = t_{si} + t_{di} + \frac{v_i}{a_i}$$
 (4)

其中: t_{si} 为停车时间, t_{di} 为驾驶员反应时间, v_i 为其正常行车速度。

b) 如果队列中的第 i 辆车需在某路口停车排队 m 次才能通过,其停车和加速如图 3(b)所示,则其延误时间可表示为

$$t_i = t_{si} + mt_{di} + \sum_{k=1}^{m-1} (\sqrt{2(l_i^{(k)} - l_i^{(k+1)})/a_i}) + \frac{v_i}{a_i}$$
 (5)

其中: $l_i^{(k)}$ 和 $l_i^{(k+1)}$ 分别为第 i 辆车先后两次等候绿灯时的停车队列位置。若不考虑车辆在同一路口多次启动—停车时间,则上式可简化为

$$t_i \approx t_{si} + m t_{di} + \frac{v_i}{a_i}$$
 (6)

由此,可得某线路车辆到达目标的平均延误时间:

$$\bar{t} = (\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N t_i)/N$$
 (7)

其中: M 、 N 分别为线路中路口数和车辆数。

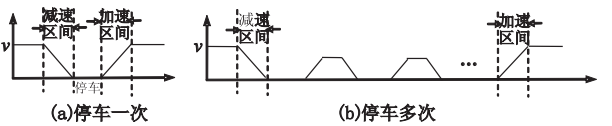


图3 路口停车和加速过程

1.5.2 时空相位演化方法(TSPE)

计算各车的延误时间,需要计算式(4)(5)中停车时间 t_i 和停车次数 m 。TSPE 方法用计算机模拟各车的行驶过程来获取每一辆车的总运行时间 t_{sum} 、停车时间 t_s 、排队停车次数 m_1 和路口停车次数 m_2 。基本思路是:系统按一定时间间隔 Δt ,即演化步长(演化步长不等于计算机仿真时的刷新周期),不断演化;分别计算各车在演化过程中的空间位置及各

交通信号的相位,通过车的空间位置与交通信号相位关系等判定车的行驶状态,计算各车的停车时间及停车次数。基本算法如下:

a) 初始化各车的 $t_{\text{sum}} = 0, t_s = 0, m_1 = 0, m_2 = 0$ 以及各车初始位置 $\{x, y\}$, 置 $\text{stopflag} = \text{false}$; 初始化各路口信号灯相位状态。 Δt , 启动演化循环。

b) 对每车进行如下计算:

(a) 若 $\text{stopflag} = \text{false}$ 且同排队队列有前车, 计算与前车的距离 $d = \sqrt{(x - x_{\text{前}})^2 + (y - y_{\text{前}})^2}$ 。若 d 大于跟驰模型式(2)计算的安全距离 $d_{\text{安}}$, 则直接计算每车演化后的坐标: $x = x + v \Delta t \times \cos(\varphi)$, $y = y + v \Delta t \times \sin(\varphi)$, φ 为行驶路段与 x 轴夹角; 否则车将减速直到等于前车速度。此时, 若 $v_{\text{前}} \neq 0$, 则要求 $v \Delta t - \frac{1}{2} a \Delta t^2 \leq d$ 且 $t = (v - v_{\text{前}}) / a \leq \Delta t - t_d$, 其中 t_d 为驾驶员反应时间, v 为本车速度, $v_{\text{前}}$ 为前车速度, a 为加速度, 有 $x = x + \Delta s \times \cos(\varphi)$, $y = y + \Delta s \times \sin(\varphi)$, $\Delta s = vt - \frac{1}{2} a t^2 + v_{\text{前}}(\Delta t - t)$, 则延误时间 $t_s = t_s + \Delta t - \Delta s / v$; 若 $v_{\text{前}} = 0$ 时, 则 $\Delta s = d$, 延误时间 $t_s = t_s + \Delta t - d / v$, 停车次数 $m_1 = m_1 + 1$, $\text{stopflag} = \text{true}$ 。

(b) 若 $\text{stopflag} = \text{false}$ 且队列无前车, 则计算与下一路口停车线的距离 $d = \sqrt{(x - x_{\text{路口}})^2 + (y - y_{\text{路口}})^2} - d_0$ (d_0 为停车线到路口中心距离)。若 d 大于跟驰模型式(2)计算的安全距离, 则直接计算各车演化后的坐标 $x = x + v \Delta t \times \cos(\varphi)$, $y = y + v \Delta t \times \sin(\varphi)$; 若 d 小于等于式(2)计算的安全距离, 则读取交通信号相位, 并根据将到达的下一路段和通行规则及交通灯相位判断是否允许通行。若允许通行, 则车辆出前路段队列, 入下一路段对应车道队列, 并设 $\text{stopflag} = \text{false}$, 计算其新位置 $x = x + v \Delta t \times \cos(\varphi)$, $y = y + v \Delta t \times \sin(\varphi)$ (φ 表示在路口停车线到路口中心之间为前一路段方向, 在路口中心之后为下一路段方向); 否则车减速直到 0, $x = x + d \times \cos(\varphi)$, $y = y + d \times \sin(\varphi)$ (φ 为当前路段方向), $t_s = t_s + \Delta t - d / v$, 停车次数 $m_2 = m_2 + 1$, $\text{stopflag} = \text{true}$ 。

(c) 若车辆到达停车线, 则判断车辆是否到达终点, 若到达终点则直接出队列。

(d) 若 $\text{stopflag} = \text{true}$ 且车辆到达停车线, 则读取路口交通信号相位, 并根据将到达的下一路段和通行规则及交通灯相位判断是否允许通行。若允许通行, 则 $\text{stopflag} = \text{false}$, 计算车辆下一位置(方法同前); 否则状态、位置不变, $t_{\text{sum}} = t_{\text{sum}} + \Delta t$ 。若 $\text{stopflag} = \text{true}$ 且队列中有车辆, 则读取前车状态, 若前车 $\text{stopflag} = \text{false}$ 则车启动, $\text{stopflag} = \text{false}$ 并计算新位置坐标: $x = x + \Delta s \times \cos(\varphi)$, $y = y + \Delta s \times \sin(\varphi)$, 其中, $\Delta s = \frac{1}{2} a (\min(\Delta t - t_d, v/a))^2$, $t_s = t_s + \Delta t - \Delta s / v$ 。

c) 转步骤 b), 直到所有车道排队队列为空(即所有车到达目标路口)。

d) 记录各车运行总时间、停车总时间、停车总次数等数据, 计算车辆平均停车率、平均延误率。

1.6 仿真优化模型

城市交通多线路协调优化实际上是一个多目标优化问题, 要求通过优化使得各线路车辆平均停车率和平均延误率最小。为了简化问题, 构造如下的目标函数:

$$Q = \sum_{i=1}^L [\mu_i \times \sum_{k=1}^{N_i} (\lambda_1 S_k + \lambda_2 D_k) / N_i] \quad (8)$$

其中: L 为参与调度的线路数; N_i 为第 i 条线路中车辆总数; μ_i 为第 i 条线路的等级系数, 它与道路的级别有关; S_k 为车 k 在线路 i 上的停车率; D_k 为车 k 在线路 i 上的延误率; λ_1 和 λ_2 分别为停车因子和延误因子。

2 改进的遗传优化算法

模型的核心是计算各调度线路上各车的延误时间、停车次数和运行总时间等指标及调整各路口交通信号灯初始状态, 使该目标函数值近似最小。

在进行系统遗传算法(GA)优化之前, 为了保证优化算法的效率, 需要设定一些固定分布的车辆单元作为优化时的车辆对象。为了能进行 GA 优化, 将每个交通灯相位按一定间隔(演化步长)分成若干个子相位, 并给每个子相位一个编号(每个相位值必须是演化步长的整数倍), 然后对此编号进行遗传编码, 此编码称为基因片段, 每个路口对应一个基因片段。将所有路口的基因片段按一定顺序组合起来, 则构成了一个染色体。实际上, 每个染色体就代表了所有路口的一个初始相位状态, 初始相位状态实际上就反映了各路口的相位差关系。

在本仿真优化模型中, 由于染色体数量与路口、信号周期、演化步长有关系, 当路口数较多时, 染色体规模非常大。设路口总数为 n , 路口交通信号周期为 T , 步长为 Δt , 则采用二进制编码时每染色体的位数为

$$B = n \times \lceil \log_2(T/\Delta t) \rceil \quad (9)$$

若取 $n = 100, T = 160 \text{ s}, \Delta t = 5 \text{ s}$, 则 $B = 500$ 位。显然, 如果采用传统的遗传算法, 需要大量的进化迭代时间才能得到优化解, 并很容易陷入局部最小点, 因此需要改进传统遗传算法。

改进的核心思想是: 将传统遗传算法中对染色体的操作改为对染色体基因片段进行操作, 并每次随机选择多个基因片段进行遗传、变异和交叉操作, 从而使每个路口的状态都能有较多的进化机会。在不同的初始相位状态下, 各线路车辆通行的延误代价值是不同的。通过状态空间搜索可找到最优初始相位状态, 使目标函数值最小。算法步骤描述如下:

a) 随机产生 N 个初始相位状态, 得到 N 个染色体组成的初始种群。

b) 对每个染色体, 分别完成以下计算:

(a) 随机产生一定数量的车辆, 使这些车辆从不同线路的起点出发;

(b) 使每个路口当前相位状态与车辆行驶时间同步演化;

(c) 计算各车在各线路的停车次数、停车时间及运行时间;

(d) 计算此染色体对应状态下的代价值;

(e) 计算该染色体的适应度;

(f) 检测是否达到目标或达到最大进化世代数, 达到则转步骤 d)。

c) 按以下步骤产生新的种群:

(a) 按适应度(概率)选择染色体, 并在其中同时随机选择多个基因片段;

(b) 对对应的基因片段按交叉率、变异率进行交叉或变异操作, 产生新的基因片段, 并构成新的染色体;

(c) 检验新染色体是否合法, 否则转上一步(b);

(d)复制新染色体到初始种群中,并转至步骤 b)。

d)输出代价值最小的染色体,解码出此相位状态并作为各路口相位控制信号。

在以上优化进化过程中,需要不断为系统产生新的车辆。为了保证系统的稳定性,在进化过程中,要求每次产生的车辆数量与分布规律相同。实际这样操作获得了比较好的效果。

3 仿真结果及分析

在以上模型的基础上,笔者开发了城市智能交通仿真优化系统。选择佛山市某城区交通地图为基础,建立了 72 个交通控制路口,设置了 8 条不同的线路(线路可随意设置),并对不同的路口设置不同的交通规则。同时为了简化模型,假定:a)仿真时所有车辆以相同的加速度启动与刹车;b)车辆行驶过程中不改变车道;c)各种车辆在同一车道上行驶速度相同(不允许超车);d)各车长度相同;e)GA 优化时,车辆产生采用均匀分布,演化仿真时采用泊松分布。采用改进遗传算法对其进行相位差优化,对比优化前后的仿真结果如表 2 所示。

表 2 优化前后的仿真结果对比

数据项	GA 优化前		GA 优化后		进化仿真条件
	平峰时	高峰时	平峰时	高峰时	
随机产生的车辆数量/辆	117	142	126	164	群体大小:50
每车平均通过路口数	11.803 4	12.838 0	13.158 7	13.280 5	变异率:0.05
平均停车次数	7.948 7	33.359 2	4.730 2	13.530 5	交叉率:0.3
每车每路口平均停车次数	0.760 5	2.602 2	0.409 3	1.102 8	世代数:500
每车平均停车时间/steps	29.170 9	48.767 6	12.634 9	23.414 6	$\mu_t=1.0$
每车平均运行时间/steps	289.478 6	317.591 5	269.190 5	285.390 2	$\lambda_1=0.6$
代价函数均值	0.495 8	1.619 7	0.263 8	0.692 9	$\lambda_2=0.4$

注:平峰是指仿真时路口未出现大量车辆排队的情况,高峰是指仿真时路口出现大量车辆排队的情况

表 2 数据是仿真系统在相同路网、相同线路结构、相同路口通行规则下仿真得到的结果。从表中可以看出,优化前车辆平均路口停车次数多,平均停车时间长;经过相位优化后车辆平均路口停车次数减少,平均停车时间缩短。尽管优化时产生的车辆具有相同的时空分布,但仿真可按不同方式随机产生车辆,大量仿真表明,优化效果仍然明显,

基本结论不变。

4 结束语

对于城市交通这一复杂系统,通过建立多线路协调优化控制模型,揭示了多条交通线路上车辆与交通信号复杂的时空相位关系,使车辆在此线路上通行时平均停车次数、停车时间有明显减少。可见,通过对各交通路口信号相位差优化,可大大提高现有道路的通行效率。在本模型基础上,采用 TSPE 方法开发了直观的交通仿真系统。相对于国外大型的交通仿真系统模型,本模型具有结构简单、规模小、投资少和实用等特点,有利于用最小的代价成本疏导城市交通,提高城市道路通行能力。由于影响城市交通的因素非常复杂,本文虽然对模型进行了一些简化处理,但在此模型中并没有考虑车辆变道和驾驶员的驾车习惯等问题,模型也未能结合信号配时优化及实时在线检测技术等。这些方面还需要进一步的研究与完善。

参考文献:

[1] 刘智勇.智能交通控制理论及其应用[M].北京:科学出版社,2003.

[2] 全永渠.城市交通控制[M].北京:北京人民交通出版社,2004.

[3] 臧志刚,陆锋,李海峰,等.7种微观交通仿真系统的性能评价与比较研究[J].交通与计算机,2007,25(1):66-70.

[4] 朱文兴,贾磊.主干路交通信号控制仿真研究[J].系统仿真学报,2005,17(12):3060-3064.

[5] 朱文兴,贾磊.城市交通主干路相位差优化研究[J].计算机工程与应用,2005,41(20):212-214.

[6] 朱文兴.城市交通系统智能优化控制研究[D].济南:山东大学,2006.

[7] 李晓红.城市干线交通信号协调优化控制及仿真[D].大连:大连理工大学,2007.

[8] 孟维伟,曹从咏.改进时空步长一维交通流的数值模拟[J].交通与计算机,2006,24(3):14-16.

[9] 董超俊,刘智勇,邱祖廉.城市交通控制智能优化配时及仿真[J].系统仿真学报,2005,17(2):472-475.

[10] YANG Li-cai, LIN Jie, WANG De-wei, et al. Dynamic route guidance algorithm based on artificial immune system[J]. Journal of Control Theory and Applications,2007,5(4):385-390.

[11] WEN W. A dynamic and automatic traffic light control expert system for solving the road congestion problem[J]. Expert Systems with Applications,2008,34(4):2370-2381.

(上接第 2961 页)

[6] GRACE P, LAGASSE B, TRUYEN E, et al. A reflective framework for fine-grained adaptation of aspect-oriented compositions[C]//Proc of the 7th International Symposium on Software Composition. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 215-230.

[7] MONDÉJAR R, GARCÍA P, PAIROT C, et al. Building a distributed AOP middleware for large scale systems[C]//Proc of Workshop on NAOMI. New York: ACM Press, 2008:17-22.

[8] MONDÉJAR R, GARCÍA P, PAIROT C, et al. Designing a distributed AOP runtime composition model[C]//Proc of the 24th Annual ACM Symposium on Applied Computing. New York: ACM Press, 2009: 539-540.

[9] WANG Bin, DING Jian, SHENG Jin-fang. Research on model of dual core aspectual middleware & dynamic weaving technology[C]//Proc

of the 9th International Conference for Young Computer Scientists. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 1035-1040.

[10] WANG Bin, WEN Chun-yan, ZHU Wei, et al. AWright-ADL for aspectual component composition platform[C]//Proc of the 2008 International Symposium on Computer Science and Computational Technology. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 383-386.

[11] 王斌,谭云桥,桂卫华,等.方面化双核中间件模型[J].计算机工程与科学,2008,30(3):142-144.

[12] 王斌,周亮,谭云桥,等.基于类修改和反射的动态方面编织模型[J].计算机工程与应用,2008,44(7):82-85.

[13] 王斌,周亮,桂卫华.方面编织策略研究进展及图形化方面编织框架[J].计算机工程与应用,2007,43(33):92-97.