

考虑交叉口影响的 城市路网信号优化设计问题研究

楼小明

西南交通大学，交通运输与物流学院，成都 610031

摘要：基于城市路网交通间断流特性，本文将微观层面的信号交叉口延误计算方法引入宏观层面的平衡网络信号优化设计问题，构建了一个中观层面的城市路网交叉口信号优化设计双层规划模型，设计了基于遗传操作的优化算法。通过路网算例对模型及算法进行测试，并通过与微观、宏观层面的两种信号优化配时方法进行比较，验证所提出模型的优越性。

关键词：平衡网络；交叉口延误；信号周期；绿信比；双层规划

中图分类号：U491.5*1

文献标识码：A

文章编号：1672-4747(2013)01-0108-06

Urban Road Network Signal Design Optimization Considering the Impact of Intersections

LOU Xiao-ming

School of Transportation and Logistics,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract：Based on the traffic interrupted flow characteristics of a urban road network, this paper introduced the microscopic method of signal intersection delay calculation into the macroscopic theory for equilibrium network signal setting problem, establishing a medium bi-level programming model to optimizing the urban road network intersection signal, devising an optimization algorithm based on the genetic operation. One road network was set to test the model and its algorithm, and the superiority of the model was proved by comparing with the two signal setting methods, which was in microscopic and macroscopic view, respectively.

Key words：Equilibrium network, intersection delay, signal cycle, split green ratio, bi-level programming

收稿日期：2012-02-27.

作者简介：楼小明(1988-),男,汉族,浙江义乌人,西南交通大学硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。

0 引言

城市信号交叉口控制与路网上流量平衡分布两者相互影响,是不可分割的两部分。传统意义上的城市信号交叉口控制是在假设区域流量不变的情况下进行,但考虑到交通网络系统的复杂特性,信号交叉口任何一点微小的扰动都可能引起路网流量分布的大幅度改变。相反的,一般的静态平衡网络配流及在此基础上建立的网络设计模型很少考虑或极大地简化交叉口对出行阻抗的显著影响。因此,有必要将微观层面的交通控制与宏观层面的交通网络平衡配流及网络优化设计结合在一起进行考虑,以更精确地反映城市路网实际情况。

其实,早在1974年,文献[1]就提出信号控制和交通流量分布应该统一进行考虑,并率先尝试进行平衡交通信号优化设置。文献[2]表明了同样的控制策略下,考虑不同的交叉口假设形式会产生不同的模型特性,从而产生完全不同的流量结果。文献[3]在拥挤路网系统中综合考虑了交通配流与信号控制问题,以总车流出行消耗时间最少为优化目标,建立了一个双层规划模型对交叉口设置参数进行优化。文献[4]将信号控制路口的备用能力概念扩展到网络,定义了信号控制网络的备用能力概念。和单个路口类似,在不违背路段能力约束、信号循环时间、最小绿灯开放时间及其他约束条件下,通过对网络中的路口信号设置进行优化,使网络中能容纳的O-D需求量增加。文献[5]将备用能力的定义进一步扩展,认为网络中各个O-D对的需求量乘子 μ 的增加倍数不一定相同,并首次提出了城市交通平衡网络设计中的备用能力模型。

以上文献都将车流交叉口延误进行了简化处理,一定程度上考虑了交叉口对路网流量模式的影响,但距现实情况还有一定差距。对此,文献[6]引入解析公式近似表示车流在信号交叉口、主路优先及全向停车无信号交叉口的延误,更详细地考虑了交叉口对车流路径选择的影响。文献[7]考虑到出行者针对交叉口信号控制延误的路径选择行为,将路段总延误时间

分为路段行程时间和交叉口延误时间,路段行程时间以BPR公式表示,交叉口延误通过引入解析形式的交叉口延误公式来表示,通过信号配时参数的优化,以使路网容量最大。

本论文在前述研究的基础上,将交通工程实践中广泛使用的信号交叉口延误公式引入平衡网络信号优化设置问题,更细致地考虑城市路网信号交叉口几何特性、引道转弯车流、信号控制策略等因素对车流延误的影响,并将其推广到更为一般的城市双向交通网络,用双层规划建立了中观层面的交通路网信号优化设置问题,以分析时段内路网车流总消耗时间最小为目标,综合优化各信号交叉口对应的周期时长和绿信比,设计了结合比例配流的遗传算法求解该问题。最后通过路网算例对模型及算法进行测试,通过与微观、宏观层面的两种信号优化配时方法进行比较,验证所提出模型的优越性。

1 模型的建立

平衡路网信号优化设置问题主要涉及两类参与者,即路网规划管理者与路网使用者。路网规划者通过调整设置交叉口信号参数影响路网使用者的路径选择,而路网使用者的交通行为也会影响规划者信号设置的效果,属于一个典型的主从递阶问题。本论文应用双层规划模型来描述该问题。

模型基本符号定义如下:

A, A' : 路段集合, A 和 A' 分别表示对应的正、反向路段集合, 其中 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$, $A' = \{a'_1, a'_2, a'_3, \dots, a'_n\}$;

X : 路段流量集合, $X = \{x_a | a \in A, A'\}$;

C : 路段容量集合, $C = \{c_a | a \in A, A'\}$;

R : 表示路网起点集合;

S : 表示路网终点集合;

Q : 起点至终点OD交通量集合, $Q = \{q_{rs} | r \in R, s \in S\}$;

K_{rs} : 表示起点 r 至终点 s 的路径集合;

f_k^{rs} : 表示起点 r 至终点 s 在路径 k 上的流量, $k \in K_{rs}$;

$\delta_{a,k}^{rs}$:表示路径-路段关联矩阵。如果路段 a 在连接 O-D 对 $r-s$ 的路径 k 上, 其值为 1; 否则为零;

f_k^a :表示经过路段 a 的路径流量集合, 有 $f_k^a = f_k^{rs} * \delta_{a,k}^{rs} = f_{ks}^a f_{kl}^a f_{kr}^a$, 其中 f_{ks}^a 、 f_{kl}^a 、 f_{kr}^a 分别表示经过路段 a 的直行、左转、右转路径车流量;

I :表示信号控制路口集合, 对任一信号交叉口 i , 有 $i \in I$;

ε_i^a :路段-信号交叉口关联矩阵。如果路段 a 进入信号交叉口 i , 其值为 1; 否则为零;

λ_a :与路段 a 对应的交叉口绿信比参数, 若路段进入的路口非信号交叉口, 则 λ_a 取 1。

1.1 下层平衡网络配流模型

配流问题的前提是确定路段阻抗函数形式。本文将路段时间总阻抗分为路段行驶时间与路段进入交叉口产生的延误时间之和, 即:

$$t_a = t_{ar} + d_a * \varepsilon_i^a \quad a \in A \cup A' \quad (1)$$

式中: t_a 表示路段总时间阻抗; t_{ar} 表示车辆在路段 a 上行驶时间消耗; $d_a * \varepsilon_i^a$ 表示车辆由路段 a 进入信号交叉口 i 产生的延误时间。

路段行驶时间采用广泛使用的 BPR 形式表示如下:

$$t_{ar} = t_{a0} * \left[1.0 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right] \quad a \in A \cup A' \quad (2)$$

式中: t_{a0} 表示路段 a 自由行驶时间; c_a 表示路段容量; α 、 β 表示公式系数。

路段进入信号交叉口产生的延误时间机理复杂, 本论文引用美国道路通行能力手册 (HCM2000) 中建议的类型及相应的修正系数表示如下:

$$d_a * \varepsilon_i^a = d_1 * P + d_2 + d_3 = \frac{0.5C(1-\lambda_a)^2}{1-[\min(1, D_a)\lambda_a]} * \frac{(1-R_p\lambda_a)f_{pA}}{1-\lambda_a} + 900T \left[D_a - 1 + \sqrt{(D_a - 1)^2 + \frac{8KI S_a}{c_a T}} \right] + d_3 \quad (3)$$

式中: d_1 、 d_2 、 d_3 分别表示交叉口统一控制延误, 考虑随机到达和饱和排队的渐增延误以及初始排队

延误; P 表示信号灯联控修正系数, 主要与交叉口对应的排队率 R_p 和补充调整系数 f_{pA} 有关; C 表示信号周期; D_a 表示路段 a 进入交叉口的饱和率; c_{ia} 表示信号交叉口 i 通过控制分配进入路段 a 的通行能力, 其值为 $S_a \lambda_a$; T 表示分析时段。其余参数及更为详细的说明可参考文献[8]。

路段进入交叉口饱和率 D_a 对交叉口延误项影响显著, 因此有必要对其进行更为细致的量化。其值与路段进入交叉口流量和进入交叉口路段的饱和流率等因素有关, HCM2000 中给出了估计交叉口引道饱和流率的公式:

$$S = S_0 N f_w f_{hv} f_g f_p f_{bb} f_a f_{lu} f_{lr} f_{lpb} f_{rpb} \quad (4)$$

式中, S_0 表示单车道的饱和流率; N 表示车道数; f_w 、 f_{hv} 、 f_g 、 f_p 、 f_{bb} 、 f_a 、 f_{lu} 、 f_{lpb} 、 f_{rpb} 分别表示车道宽度调整系数、车流中重型车辆调整系数、坡度调整系数、停车道调整系数、公交车停靠造成的阻塞调整系数、区域类型调整系数、车道利用率调整系数、对左转车的行人调整系数以及对右转车的行人自行车调整系数。在本文中, 对上述系数均不考虑其影响, 均以系数 1 代替, 而只考虑左转车校正系数 f_{lr} 和右转车校正系数 f_{rr} 的影响, 则交叉口引道 a 饱和流率为:

$$S_a = c_a f_{lr} f_{rr} = c_a * \frac{1}{1 + 4.525 P_{lr}} * (1 - 0.15 P_{rr}) \quad (5)$$

式中: c_a 表示路段 a 容量, 在此用它近似路段 a 初始饱和流率; P_{lr} 、 P_{rr} 分别表示路段 a 中左转车流比例和右转车流比例, 式中的相关系数由 HCM2000 依据实际情况测定得出。

P_{lr} 、 P_{rr} 可以通过路网中路段与路径流量的相互关系得到, 将式 (5) 转化为路段、路径流量形式如下:

$$S_a = c_a f_{lr} f_{rr} = \frac{c_a}{1 + 4.525 \left(\frac{f_{kl}^a}{x_a} \right)} (1 - 0.15 \frac{f_{kr}^a}{x_a}) \quad (6)$$

式中: f_{kl}^a 、 f_{kr}^a 分别表示经过路段 a 的左转、右转路径车流量。

则路段 a 进入交叉口的饱和率 D_a 可表示如下:

$$D_a = \frac{x_a}{s_a \lambda_a} = \frac{x_a}{\frac{c_a \lambda_a}{1 + 4.525 \left(\frac{f_{kl}^a}{x_a} \right)} (1 - 0.15 \frac{f_{kl}^a}{x_a})} \quad (7)$$

至此,通过上述步骤将路网各路段的总阻抗时间表示了出来,其中无论是路段行驶时间消耗还是信号交叉口产生的延误时间,都与路段流量值相关,而该值由下层的路网平衡配流过程得到。为与路网平衡配流模型在形式上一致,以路径流量解的形式代替路段流量以反映路段总阻抗时间,而在本文中,平衡配流模型的路径流量解又与路网参数(包括交叉口信号周期及绿信比)有关。在下层的路网平衡配流问题中,由于阻抗函数中 $d_a * \varepsilon_i^a$ 项的存在,使得该问题是一个典型的带非对称阻抗函数的不可分平衡配流问题,对此类问题,无法构建与之等价的极值数学规划问题^[9],但可以应用变分不等式将该平衡配流问题表示成下式:

$$[t_r(f(C, \lambda)^*) + d \cdot \varepsilon(f(C, \lambda)^*)]^T (f(C, \lambda)) - (f(C, \lambda)^*) = 0 \quad (8)$$

$$\Omega = \{f(C, \lambda) | Af(C, \lambda) = q, f(C, \lambda) \geq 0\}$$

式中: C 、 λ 分别表示交叉口信号周期及绿信比变量; $f(C, \lambda)$ 为路径流量向量; $f(C, \lambda)^*$ 为平衡路径流量解; $t_r(f(C, \lambda)^*)$ 为平衡状态路段行驶消耗时间向量; $d \cdot \varepsilon(f(C, \lambda)^*)$ 为平衡状态信号交叉口延误时间向量; Ω 为路径流量可行集。

1.2 上层规划问题

该问题的上层优化目标是使路网在分析时段内总车流消耗时间最少,共包括两部分:一部分为分析时段内所有车流在路段及交叉口的时间消耗;另一部分为分析时段内交叉口信号损失时间(包括部分黄灯时间及全红时间),表现为信号周期内进入交叉口各向车流均不能利用的额外消耗时间。在信号相位设置方案既定的情况下,通常假定每一周期的信号损失时间一定,则第二部分损失时间只与分析时段内包含的信号周期数有关。

1.3 双层规划模型

通过上述分析,该问题的上层目标函数已明确,由此可得该问题的双层规划问题模型如下:

(U.P):

$$\min Z = \sum_a t_a(f(C, \lambda)) x_a(C, \lambda) + \frac{T}{C} \cdot e \cdot \sum_a \sum_i x_a \varepsilon_i^a \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ & \lambda_{\min} \leq \lambda_a \leq \lambda_{\max} \quad \forall a \in A \quad A' \\ & X = \delta f \end{aligned}$$

其中 $f(C, \lambda)$ 通过下层平衡配流问题求得:

(L.P):

$$[t_r(f(C, \lambda)^*) + d \cdot \varepsilon(f(C, \lambda)^*)]^T (f(C, \lambda)) - (f(C, \lambda)^*) = 0 \quad (10)$$

$$\Omega = \{f(C, \lambda) | Af(C, \lambda) = q, f(C, \lambda) \geq 0\}$$

上层问题(9)中,目标函数里的第一项为分析时段内所有车流在路段及交叉口的延误;第二项为分析时段内交叉口信号损失时间; e 表示每一周期的信号损失时间;约束式分别表示信号周期、绿信比变化取值范围以及路段、路径流量向量间的关系;下层问题(10)以路径流量的变分不等形式表示可以证明结果与平衡配流问题等价。

2 模型求解算法

本文所提出的路网信号优化设计问题本质上还是属于平衡网络设计问题^[3,4]。现有文献在算法层面进行了广泛、深入的研究,本文采用遗传算法^[10]予以解决。为便于交叉、变异等遗传操作的进行,算法对染色体采用二进制编码。考虑到本模型目标函数为求最小值,设计适应度函数为上层问题目标函数的倒数,三个基本操作算子设计为:轮盘赌选择、二进制均匀交叉、随机变异。算法具体步骤如下:

第1步:置算法初始进化代数 $k=0$,置选择、交叉、变异概率、种群个数、最大进化代数 \max 等参数,根据问题所需的结果精度要求设定二进制染色体位数,一个二进制码染色体对应一种交叉口周期时长、绿信比设置方案,随机设定一个初始种群作为初始信号设置方案。

第2步:利用解码函数将个体二进制染色体转化为相应实数型的周期、绿信比方案,代入下层平衡配流问题(10),利用平衡配流算法迭代求解,得到平

衡路段、路径流量 X^k 、 f^k ，代入上层问题(9)的目标函数中，依此步骤逐个求得种群各个体对应的适应度函数值，对各个体按适应度进行排序。

第3步：若 $k > \max$ ，转第5步；否则， $k = k + 1$ ，转第4步。

第4步：按照轮盘赌选择方法，将个体适应度按比例转化为个体选中概率，筛选出第 k 代种群，按概率对种群中的个体进行交叉、变异，转第2步。

第5步：算法结束，最终得到适应度最大个体所对应的路网周期、绿信比即为最终的路网信号设置方案。

关于遗传算法解决此类优化问题的有效性，文献[10]进行了详细的分析，在此不再给出。需要注意的是，第2步中的平衡配流算法需要处理带非对称阻抗函数的不可分平衡配流情况，同时需要处理转向车流问题，因此在算法中需要保存路径信息，本文采用增量加载分配法处理，具体步骤可参考文献[9]。

3 算例分析

算例路网结构如图1所示，该算例包括14条路段，4个O-D对(A-F、F-A、C-D、D-C)，2个信号交叉口B、E，其相位设置方案均为：南北相位1，东西相位2。算例输入数据如下：路段1、2、13、14容量为300，5、6容量为200，其余路段容量为150；各路段自由行驶时间1、2、5、6、13、14为12，其余路段为10；O-D出行总量A-F为120，F-A为100，

C-D为90，D-C为80；在A至F方向两信号灯间实行绿波联控，查定文献[8]知对应的系数可取 $R_p = 1.333$ ， $f_{pA} = 1.15$ ，假定联控对F至A方向无影响，其对应系数 $R'_p = 1.000$ ， $f'_{pA} = 1.00$ 。其余系数取值： $\alpha = 0.25$ 、 $\beta = 4.0$ ， $k = 0.5$ ， $d_3 = 0$ ， $T = 0.25$ ， $e = 3$ (s)， $C_{\min} = 30$ ， $C_{\max} = 200$ ， $\lambda_{\min} = 0.1$ ， $\lambda_{\max} = 0.9$ ，遗传操作交叉概率为0.95，变异概率为0.05，种群个数20，最大进化代数200。得到结果：最佳周期取141，交叉口B相位1绿信比取0.56，相位2取0.42；交叉口E相位1绿信比取0.64，相位2取0.34。同时，为了验证本文提出模型的优劣，在最优周期时长不变的情况下，本文分别对常用的微观层面基于交叉口引道等饱和度信号配时方法和宏观层面不考虑交叉口微观影响的平衡网络信号优化设置方法对该算例进行了测试，并与本文提出的模型所得结果进行比较，如表1所示。

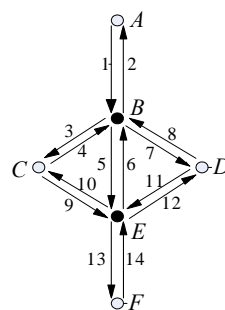


图1 算例路网结构

Fig.1 Road network structure for calculating

表1 本文模型与微观、宏观两种信号优化配时方法结果比较

Tab.1 Result comparison between the presented model and the other two methods separately from the viewpoint of the micro and macro

路段编号	本文模型所得结果			基于等饱和度信号配时所得结果			不考虑信号交叉口微观影响的平衡网络信号优化结果		
	流量	信号交叉口延误	路段对应绿信比	流量	信号交叉口延误	路段对应绿信比	流量	信号交叉口延误	路段对应绿信比
1	120.00	45.22	0.56	120.00	74.04	0.64	120.00	36.57	0.60
2	100.00	—	—	100.00	—	—	100.00	—	—
3	46.50	—	—	85.14	—	—	44.59	—	—
4	51.80	111.65	0.42	41.94	130.31	0.34	50.19	136.32	0.38
5	120.00	23.27	0.64	67.28	138.54	0.34	120.00	13.78	0.68
6	100.00	36.94	0.56	100.0	22.47	0.64	100.00	28.70	0.60
7	51.80	—	—	51.56	—	—	50.19	—	—
8	46.50	93.43	0.42	42.04	130.88	0.34	44.59	111.72	0.38

续 表

路段 编号	本文模型所得结果			基于等饱和度信号配时所得结果			不考虑信号交叉口微观影响的 平衡网络信号优化结果		
	流量	信号交叉 口延误	路段对应 绿信比	流量	信号交叉 口延误	路段对应 绿信比	流量	信号交叉 口延误	路段对应 绿信比
9	38.20	112.17	0.34	91.16	130.99	0.64	39.81	157.40	0.30
10	33.50	—	—	37.96	—	—	35.41	—	—
11	33.50	93.96	0.34	47.58	134.94	0.64	35.41	131.55	0.30
12	38.20	—	—	48.06	—	—	39.81	—	—
13	120.00	—	—	120.00	—	—	120.00	—	—
14	100.00	23.35	0.64	100.00	128.85	0.34	100.00	18.98	0.68
	C=141, Z=54 624.33			C=141, Z=85 766.61			C=141, Z=56 463.39		

由以上结果可以看出,基于交叉口引道等饱和度信号配时方法从均衡进入交叉口各路段交通压力的角度对交叉口绿信比进行设计,引起了路网总效益的损失,相对于本文提出模型的结果,总车流出行消耗时间增加了36.31%;与此相比较,不考虑交叉口微观影响的平衡网络信号优化设置方法所得结果与本文模型所得结果较为接近,总车流出行消耗时间增加了3.26%。通过比较,表明所提出的模型具有明显的优越性。

4 结 论

本文将交通工程微观层面的信号交叉口延误计

参考文献

- [1] Allsop R. E. Some possibilities for using traffic control to influence trip destinations and route choice[A]. In D. J. Buckley (Ed.), Proceedings of the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory[C]. Sydney: Elsevier, Amsterdam, 1974: 345-374.
- [2] Smith M. J. and Van Vuren T. Traffic equilibrium with responsive traffic control [J]. Transportation Science, 1993, 27: 118-132.
- [3] Yang H., Yagar S. Traffic assignment and signal control in saturated road network [J]. Transportation Research, 1995, 29A: 125-139.
- [4] Wong S. C., Yang H. Reserve capacity of a signal-controlled road network [J]. Transportation Research, 1997, 31B:397-402.
- [5] Gao Z. Y., Song Y. F. A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice [J]. Transportation Research, 2002, 36B: 313-323.
- [6] Claudio Meneguzzer. An equilibrium route choice model with explicit treatment of the effect of intersections [J]. Transportation Research, 1995, 29B: 329-356.
- [7] 张 鹏,李文权,常玉林. 考虑交叉口延误的信号控制路网容量模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(4): 863-866.
- [8] Transportation Research Board Highway Capacity Manual[R]. Washington D. C.: National Research Council, 2000.
- [9] Sheffi Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods [M]. New Jersey: Prentice Hall, INC, Englewood Cliffs, 1985.
- [10] 王小平,曹立民. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.

(中文编辑:刘婷婷)