

区域交通微循环支线网络交叉口无冲突 交通流组织优化^{*}

陈群, 刘嘉晖

(中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 城市交通网络错综复杂, 线路交叉繁杂, 交叉口众多, 车辆在交叉口由于等待或让行会增加延误和安全风险。文中针对区域支线网络平行或垂直线路较多、车辆行驶路线选择机会较多的特点, 设计在交叉口上无冲突交通流组织的优化模型。在分析典型十字形交叉口和 T 形交叉上车流冲突特征的基础上, 以总的车流时间最小为目标并限制各交叉口上不能有冲突车流(部分车流通过迂回到目的地), 以各交叉口上各进口道是否禁直、禁左为优化变量, 考虑驾驶员路径选择行为, 建立区域微循环支线网络交叉口无冲突交通流组织优化双层规划模型, 采用遗传算法对模型进行求解, 并通过算例验证了模型与算法的有效性。

关键词: 城市交通; 交叉口; 区域微循环支线网络; 交通流组织优化; 无冲突

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0019-05

道路网络包含城市交通网络与公路交通网络。公路交通网络一般相互交叉的道路较少, 高等级公路交叉采用互通或不互通的立交设计, 低等级公路相交通常采用信号控制交叉口(流量较大时)或无信号控制交叉口(流量较小时)。相比于公路交通网络, 城市交通网络中各种干道、次干道、支路相互交叉, 交通复杂, 大、小交叉口众多, 互相冲突的交通流在交叉口通过信号灯作时间上的分离(对于交通量小的次要交叉口作优先控制或无控制), 车辆在交叉口由于等待而浪费大量时间。据估计, 车辆通过交叉口的时间占整个通行时间(交叉口、路段通行总时间)的 30%~40%, 而且交叉口通常是行车事故多发地。

为减少车流在交叉口的冲突, 通常采用路段单向行驶和交叉口禁左、禁直等交通流组织方式, 使车辆通过迂回的方式避免在交叉口上互相冲突。但这些交通组织方式有适用范围, 在干道上实施可能引起车流过大的迂回, 而且有时并不具备单行、禁行的交通组织条件。相对来说, 如果是在城市局部的某个区域内, 该区域互相平行或垂直交叉的微循环道路较多, 车辆可选择的路径较多, 组织某些线路单行、某些交叉口禁直或禁左则有利于整个车辆的流通, 减少车流在交叉口的冲突与延误。该文针对某个区域路网的交通组织优化, 通过路段单行和交叉

口进口道上禁直、禁左等交通组织方式的选择优化, 使总的车流运行效率最大。

1 优化模型

一定区域内路网由许多路段及路段相交的交叉口组成, 若每个交叉口上各进口道车流无交通管理措施, 会有直行、右转、左转 3 种选择。在交叉口, 右转车流一般不会与其他车流相冲突, 主要是各进口道的直行、左转车流互相冲突和干扰而产生干扰延误。因此, 如果对交叉口各进口道上车流实施禁直或禁左优化, 可使任意两股车流在交叉口上都无冲突, 并按优化后的线路行驶。同理, 在路段上同时实施单向行驶或双向行驶, 进行一体化优化。

将整个区域网络上路段与交叉口整体考虑, 则各交叉口各进口道是否实施禁直或禁左、支路路段上实施单向或双向行驶为决策变量, 整个网络车流运行效率可通过各车流 OD 在网络上的总运行时间来衡量, 考虑的约束为交叉口上任意两股车流都无冲突(这样即可不用考虑对两股相冲突的车流进行时间上的隔离, 可减少延误和冲突)。因此, 优化问题的目标为总的 OD 车流行驶时间最小, 并满足任意交叉口上任意两股方向的车流都无冲突。

图 1 为区域路网示意图。对于给定的区域道路网络($V, A(y) \cup B(z)$), 其中 V 为节点集, 记 $n =$

^{*} 基金项目: 湖南省社会科学基金资助项目(12YBB274)

$|V|$, $A(y)$ 为交叉口上直行与左转连接边集合, $B(z)$ 为路段集合。 y, z 为决策变量组成的向量, 其中“1”表示该路段(或交叉口连接边)被选择, “0”表示不选。

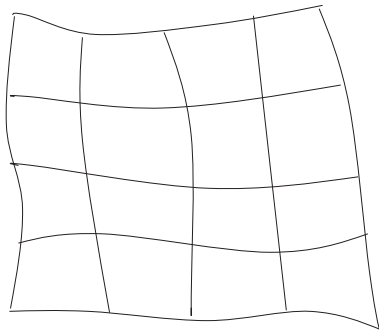


图1 区域路网示意图

十字形交叉口车流冲突情况见图2、图3, T形交叉口车流冲突情况见图4~6。

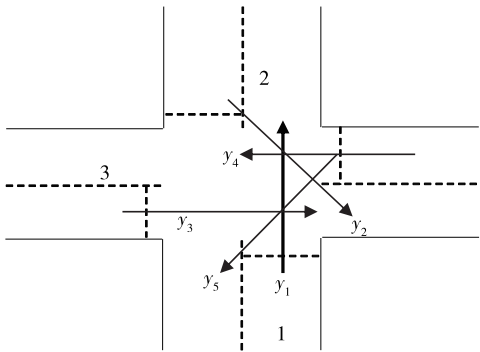


图2 十字形交叉口上与某进口道直行相冲突的车流分析

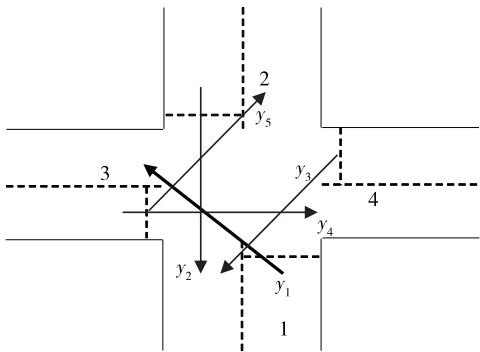


图3 十字形交叉口上与某进口道左转相冲突的车流分析

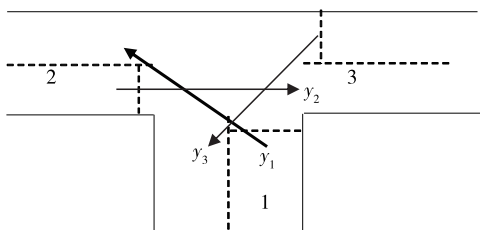


图4 T形交叉口上与侧边进口道左转相冲突的车流分析

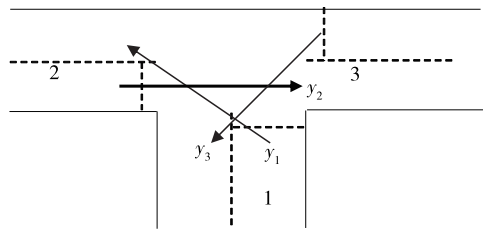


图5 T形交叉口上与主边进口道直行相冲突的车流分析

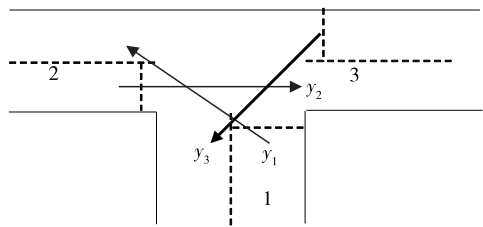


图6 T形交叉口上与主边进口道左转相冲突的车流分析

根据图2, 如果 $y_1=1$, 那么 $y_2=0, y_3=0, y_4=0, y_5=0$ 。根据图3, 如果 $y_1=1$, 那么 $y_2=0, y_3=0, y_4=0, y_5=0$ 。根据图4, 如果 $y_1=1$, 那么 $y_2=0, y_3=0$ 。根据图5, 如果 $y_2=1$, 那么 $y_1=0, y_3=0$ 。根据图6, 如果 $y_3=1$, 那么 $y_1=0, y_2=0$ 。

基于图4~6的分析, 若T形交叉口满足 $y_1 + y_2 + y_3 \leq 1$, 可避免在T形交叉口上的车流冲突。

对于区域内支路路段($B(z)$), 2个节点之间包含相反方向的2条路段, 当某个方向的路段对应的决策变量为1时表示该方向的路段被选择, 否则不被选择; 如果2个方向的路段对应的决策变量都为1, 则2个节点之间车流双向行驶。一般来说, 如果实施单向通行, 由于消除了对向车流的干扰, 其通行能力大于双向行驶时2个方向总的通行能力。

对于交叉口连接边($A(y)$), 如果 $y_a=1, a \in A$, 则表示连接边 a 存在; 如果 $y_a=0$, 则表示该连接边不存在。

对于路段或交叉口连接边, 自由流行驶时间为 $t_a^{(0)}$, 路段或交叉口连接边流量为 x_a , 通行能力为 c_a , 阻抗函数为 $t_a(x_a) = t_a^{(0)} [1 + \alpha (x_a/c_a)^\beta]$, $a \in (A(y) \cup B(z))$, α, β 为常数。

交通需求 OD 为 $(q_{rs})_{n \times n}$, 其中 q_{rs} 为节点 r 至节点 s 的流量。系统优化目标为各车流 OD 在网络上总的行驶时间费用最小, 即车辆运行效率最大。

$$\min \sum_a x_a \cdot t_a, a \in (A(y) \cup B(z)) \quad (1)$$

x_a, t_a 可通过交通分配得到。约束条件为各交叉口上无车流之间的冲突(见图2~6)。

x_a 可由下层(用户均衡交通分配模型)求出:

$$\min \sum_{a \in (A(y) \cup B(z))} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_k f_k^{rs} = q_{rs}; \forall r, s \\ x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}; \forall a \in A \\ f_k^{rs} \geq 0; \forall r, s, k \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_k^{rs} 为 OD 点对 (r, s) 间第 k 条路径的交通流量; $\delta_{a,k}^{rs} = \begin{cases} 1, & \text{若路段 } a \text{ 在 } (r, s) \text{ 间第 } k \text{ 条路径上} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$ 。

2 求解算法

上述模型为双层规划模型,多以启发式算法为主进行求解。但由于该模型中变量种类较多(路段单行或双行;交叉口进口道上禁直、禁左等),难以直接应用已有的数值算法,拟采用遗传算法对模型进行求解。

约束的处理:对于 T 形交叉口,满足 $y_1 + y_2 + y_3 \leq 1$ 。对于十字形交叉口,可设计阻抗函数 $t_1 = t_1^{(0)}(1 + \alpha(V_1/C_1)^\beta) + M(V_2 + V_3 + V_4 + V_5)$,其中 M 为任意大的正数, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 分别为 1、2、3、4、5 方向上的流量。通过这种阻抗函数设计,得到的解只能是:如果方向 1 上连接边被选择,则只能是方向 1 上有流量,其他方向 2~5 不能有流量(否则,阻抗无穷大,这样的解肯定不符合总阻抗最小的优化目标)。

上述模型是有约束的 0-1 规划模型,可采用遗传算法的 0-1 编码进行求解。 N 为所有路段及交叉口连接边的总数目。对以 $[y, z]$ 为决策变量的向量进行 0-1 编码,其中“1”表示该路段(或连接边)被选择,“0”表示不选。

运用遗传算法进行模型优化求解的算法流程如下:1) 初始化。设定遗传算法的交叉概率、变异概率、种群数目、最大进化代数。2) 采用 0-1 编码,随机产生初始种群。3) 利用用户最优均衡交通分配算法计算路段及交叉口连接边流量,返回上层计算个体适应度。4) 对所有个体进行排序选择操作(满足约束的可行解按适应度由高到低排在前面,不可行解按超出约束的大小由小到大接着往后排),选择新种群。5) 按交叉概率对随机配对个体进行交叉操作;6) 按变异概率对种群内个体进行变异操作,位置为 0 的变成 1,位置为 1 的变成 0。7) 判断是否达到迭代总数,若没有,则转入步骤 3;否则,输出最佳个体。

3 算例分析

如图 7 所示(包含路段及交叉口连接边),1-2、2-4、3-4、4-1、1-5、1-6、2-41、2-19、3-35、3-49、4-52 和 4-55 路段均为双向行驶,且单向通行能力为 600 辆/h;其他任何一条路段,若双向通行则单方向通行能力为 300 辆/h,若单向通行则通行能力为 800 辆/h。支路每条路段的自由流行驶时间均为 40 s;干道 1-2、3-4 的自由流行驶时间为 200 s,2-4、1-3 的自由流行驶时间为 160 s;交叉口连接弧段通行时间忽略不计。对于路段阻抗函数, $t_a(x_a) = t_a^0 \{1 + 0.5 [(x_a / (0.8C_a))]^4\}$, $a \in (A(y) \cup B(z))$,这里通行能力的 0.8 倍表示当路段流量超过通行能力的 0.8 倍时通行时间将显著增加,对应于城市支路、次干道上有行人与自行车的干扰时通行能力将折减、通行时间将增加。交通需求分布见表 1。优化的决策变量为各路段及各交叉口的车流行驶方向(即单行、双行、禁直、禁左)。

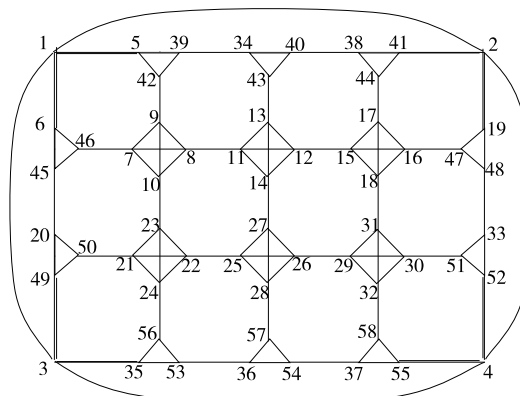


图 7 区域网络结构

表 1 起终点 OD 交通分布 辆/h

OD	1	2	3	4
1	0	400	400	300
2	300	0	400	300
3	300	400	0	300
4	300	400	400	0

以遗传算法求解该双层规划模型,种群数取 300 个,交叉率为 0.7,变异率为 0.1,程序运行 30 代得到优化结果。迭代过程见图 8,车流组织优化方案见图 9,图中无车流流向标识的支路上没有车流。目标函数为 1 680 700 s,各路段及交叉口转向边上的流量见表 2。

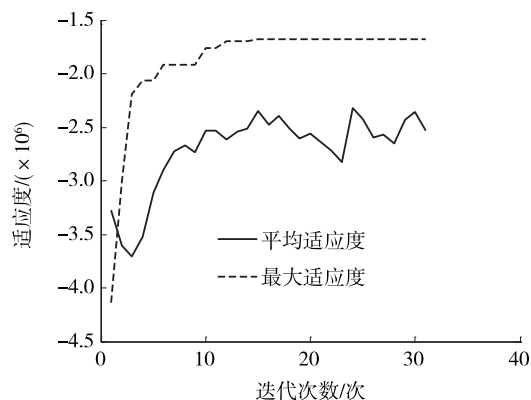


图8 适应度随迭代次数的变化

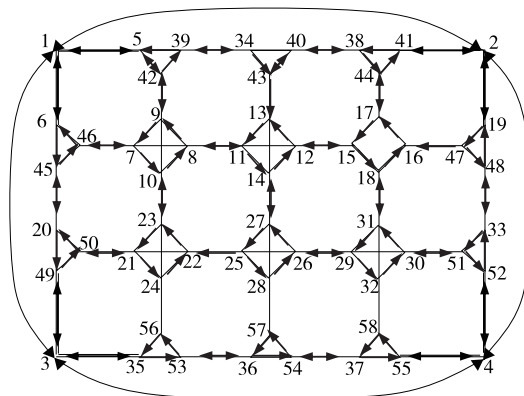


图9 车流组织方案

表2 各路段(连接边)的流量

路段(连接边)			路段(连接边)			路段(连接边)			路段(连接边)		
起点	末点	流量/ (辆·h ⁻¹)	起点	末点	流量/ (辆·h ⁻¹)	起点	末点	流量/ (辆·h ⁻¹)	起点	末点	流量/ (辆·h ⁻¹)
1	2	158	11	14	225	27	25	383	43	13	126
1	3	333	12	13	212	28	26	130	43	40	63
1	5	330	12	15	34	29	26	231	44	17	114
1	6	348	13	11	338	29	32	179	44	41	93
2	1	227	14	12	72	30	31	188	45	20	255
2	4	284	14	27	191	30	51	179	45	46	271
2	19	297	15	12	173	31	18	68	46	6	263
2	41	321	15	17	0	31	29	280	46	7	175
3	1	272	15	18	161	31	30	0	47	16	147
3	4	169	16	17	216	32	30	179	47	48	195
3	35	222	17	15	300	33	48	234	48	19	234
3	49	431	17	44	30	33	51	383	48	33	195
4	2	293	18	16	68	34	39	197	49	3	427
4	3	243	18	31	161	34	43	189	49	50	431
4	52	423	19	2	188	35	3	290	50	20	311
4	55	290	19	47	343	35	53	222	50	21	347
5	1	265	20	45	120	36	53	290	51	30	188
5	42	330	20	49	427	36	54	222	51	52	375
6	1	205	20	50	18	37	54	290	52	4	375
6	45	406	21	24	347	37	55	222	52	33	423
7	10	355	21	50	209	38	40	236	53	36	222
7	46	166	22	23	601	38	44	177	53	56	290
8	9	235	23	2	625	39	5	197	54	37	222
8	11	77	23	10	44	39	34	149	54	57	290
9	7	347	23	21	209	40	34	236	55	4	222
9	10	0	24	22	347	40	38	63	55	58	290
9	42	69	25	22	253	41	2	63	56	35	290
10	8	122	25	28	130	41	38	351	57	36	290
10	23	278	26	27	231	42	5	69	58	37	290
11	8	191	26	29	130	42	9	181			
11	12	0	27	14	39	42	39	149			

4 结语

针对区域支线网络,设计了在交叉口上无冲突交通流组织的双层规划模型及采用遗传算法对模型进行求解的算法。通过求解模型,得到区域支线网络上各交叉口上禁直或禁左决策方案,并实现总的车流运行时间最小化的目标,算例验证结果表明该模型与算法有效。

参考文献:

- [1] 陆化普.交通规划理论与方法[M].北京:清华大学出版社,1998.
- [2] 晏克非.城市交通需求管理研究[M].上海:同济大学出版社,2000.
- [3] 王炜,过秀成.交通工程学[M].南京:东南大学出版社,2000.
- [4] 黄海军.城市交通网络平衡分析:理论与实践[M].北京:人民交通出版社,1994.
- [5] 史峰,王英姿,陈群.城市交通微循环网络设计优化模型[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(12):1795-1799.
- [6] MENG Q, YANG H. Benefit distribution and equity in road network design[J]. Transportation Research Part B(Methodological), 2002, 36(1): 19-35.
- [7] YANG H. Heuristic algorithms for the bilevel origin-

destination matrix estimation problem[J]. Transportation Research Part B(Methodological), 1995, 29(4): 231-242.

- [8] YANG H, MENG Q. A note on highway pricing and capacity choice in a road network under a build-operate-transfer scheme[J]. Transportation Research Part A(Policy and Practice), 2002, 36(7): 659-663.
- [9] YANG H, ZHANG X. The multi-class network toll design problem with social and spatial equity constraints[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128: 420-428.
- [10] YANG H, HUANG H J. The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem[J]. Transportation Research Part B(Methodological), 2004, 38(1): 1-15.
- [11] 卢凯明,郭斌,蔡晓禹,等.基于多源轨迹数据的信号交叉口运行评价研究[J].公路与汽运,2019(3):24-32.
- [12] 王小平,曹立明.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.
- [13] 米凯利维茨 Z.演化程序:遗传算法和数据编码的结合[M].北京:科学出版社,2000.
- [14] 晏克非,陈群,文雅.基于遗传算法的停车诱导(PGIS)信息显示设施定位优化研究[J].土木工程学报,2006,39(7):104-108.

收稿日期:2020-04-20

(上接第7页)

- [2] YUEN P K P, VILLAIRE W, BECKETT J. Automotive materials engineering challenges and solutions for the use of ethanol and methanol blended fuels[R]. SAE Paper 2010-01-0729, 2010.
- [3] NAKATA K, UTSUMI S, OTA A, et al. The effect of ethanol fuel on a spark ignition engine[R]. SAE Paper 2006-01-3380, 2006.
- [4] VANCOILLIE J, DEMUYNCK J, SILEGJEM L, et al. Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline-engine efficiency study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 37(99): 14-24.
- [5] JI C W, YANG J X, LIU X L, et al. A quasi-dimensional model for combustion performance prediction of an SI hydrogen-enriched methanol engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(39): 17676-17686.

- [6] 康见见,刘波,张超,等.基于不同标准工况的甲醇发动机排放特性测试研究[J].客车技术与研究,2019(1): 49-51.
- [7] 程前,刘延,曾建,等.车用甲醇燃料发动机整机性能研究[EB/OL]. [2020-07-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1205.T.20200721.1403.002.html>.
- [8] 曾建.高压缩比甲醇燃料发动机整机性能仿真研究[D].宜昌:三峡大学,2020.
- [9] 陈昊,李亚鹏,祁东辉,等.ZH1105W柴油机燃用生物柴油-柴油-甲醇的性能研究[J].公路与汽运,2012(5):22-25.
- [10] 文醉,吴迪,梁聪,等.燃料电池发动机性能测试若干问题探讨[J].客车技术与研究,2017(2):53-55.
- [11] 李翔宇,王建军,解方喜,等.利用分层EGR提高甲醇发动机燃烧性能的研究[J].拖拉机与农用运输车,2015,42(4):46-50.

收稿日期:2020-07-07