

城市交通微循环网络设计优化模型

史峰¹, 王英姿^{1,2}, 陈群¹

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 定义了交通微循环概念, 建立了交通微循环网络设计双层优化模型, 上层问题为在满足路段饱和度约束及最大改造能力约束的条件下使得交通微循环对环境影响最小、交通效率最高及投资最省; 下层问题采用用户均衡交通分配来描述驾驶员的路径选择行为, 运用功效系数法构造了多目标规划的评价函数, 并通过遗传算法建立了模型的求解算法。算例表明, 通过求解双层规划模型可同时确定交通微循环网络构成及各条道路改造后的通行能力。

关键词: 交通微循环; 网络设计; 双层规划; 功效系数法
中图分类号: U 491; U 121 **文献标识码:** A

Optimization Model for Traffic Micro-circulation Network Design

SHI Feng¹, WANG Yingzi^{1,2}, CHEN Qun¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The idea of traffic micro-circulation was proposed, and the bi-level programming model were constructed for the traffic micro-circulation network design. The upper-level problem was to minimize the total cost and adverse influence on environment and to maximize traffic efficiency under the constraints of saturation and reconstruction space of road links; the low-level problem adopted the user equilibrium traffic assignment to describe drivers' route choice behaviors. With the efficacy coefficient method, an evaluation function of the multi-objective programming was found and the genetic algorithm for this model was proposed. A numerical example shows that the structure of the traffic micro-circulation network and the capacity of each of the selected branch road can both be determined by solving the bi-level programming model.

Key words: traffic micro-circulation; network design; bi-

level programming; efficacy coefficient method

近年来交通拥堵成为许多大中城市面临的突出问题。解决交通拥挤采用的策略主要有发展大容量公交、建立智能交通系统、进行交通需求管理、合理交通组织、完善现有路网等^[1-3]。近些年, 北京、昆明、长沙等城市利用局域支、次道路网组织交通微循环以疏解主干路交通拥挤取得了成效^[4]。其实, 在很多城市, 拥堵一般体现在主干道路上, 而很多支、次道路却利用率低下甚至被闲置, 城市有限的道路资源没有得到充分利用。交通微循环利用干道与干道之间的局域支、次道路网分流干道上的交通, 缓解干道上的交通拥挤, 提高了整个城市路网的容量。组织交通微循环首先要设计交通微循环网络, 使之对居民的生活与环境影响最小、交通效率最高、成本最省。本文即对此问题展开讨论。

1 问题分析

1.1 交通微循环含义与实施条件

在城市街区, 通常由主(次)干道作为其周边道路, 街区由若干的小区组成, 在小区的周边, 通常又有一些支路或支路雏形。如果能够将这些城市支路改造并与干道连接成网, 一方面可以增加小区向外的通达性, 另一方面在一定程度上可以为干道分流, 降低干道的交通压力。城市交通中交通流一般集中在干道上, 一旦到了交通高峰期间干道就显得异常拥堵, 此时, 若是在“堵点”附近设计“交通微循环”的话则可以达到对干道进行交通分流的目的, 一部分车流可经微循环道路通过, 这样可有效避开干道拥堵路段。

收稿日期: 2010-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(50908235); 湖南省科技计划项目(2009FJ3013); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20070533111)

第一作者: 史峰(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通运输系统优化。E-mail: shifeng@csu.edu.cn

通讯作者: 陈群(1977—), 男, 副教授, 博士后, 主要研究方向为城市交通规划与设计。E-mail: chenqun631@mail.csu.edu.cn

交通微循环一般在干道经常拥堵的地方设置,旁边要有足够密度的支、次道路,且具备开辟交通微循环的安全条件与通行条件.对于通行条件,一般来说,道路过窄、改造拓宽难度很大的道路不宜作为交通微循环道路.安全条件是微循环道路选择的重要考虑因素,如交通微循环一般应避开密集居民区、中小学、医院等地点,避开人流密集的区域.环境要求是分析车辆可能对小区造成的污染,这种污染主要包括车辆噪音污染、车辆尾气污染等.

1.2 交通微循环网络设计优化目标

(1) 由于交通微循环主要作用是缓解主干道路交通压力,所以第一个目标就是主干道路饱和度小于某种水平.但是饱和度也不必很小,否则干道交通能力不能得到充分发挥.

(2) 交通效率最高目标就是在规划交通微循环网络之后,使所有车辆总的通过时间最少.

(3) 环境影响最小目标.由于交通微循环是利用区域支、次道路来组织交通,因此势必会对区域内人们的生活、工作带来影响.其中最显著的影响就是车辆废气对环境的影响.

(4) 改造成本尽可能小.改造成本与改造的线段长度和改造程度有关.此外,还拟考虑交通微循环用地最小化以减少微循环交通对区域的干扰.

2 城市交通微循环网络设计优化模型

道路网络 $N = (V, A \cup B)$, V 为节点集, A 为干道路段集, B 为备选改造的交通微循环支线路段集.交通需求为 $(q_{rs})_{n \times n}$, 其中 q_{rs} 为节点 r 至节点 s 的流量.路段改造前通行能力为 $C(a)$, $a \in A \cup B$, 改造后通行能力为 $X(a)$, $a \in B$.显然, $X(a) \geq C(a)$, $a \in B$.一般来说,每条道路都包含正反两个方向的路段,且两个方向通行能力相等.对每条备选支线路段 a , $a \in B$, $e(a)$ 为 1 表示选择此道路, $e(a)$ 为 0 表示不选择该道路. $e(a)$, $X(a)$ 为优化变量.

2.1 多目标构造

一般地,备选路段 a 的通过能力由 $C(a)$ 改造至 $X(a)$ 的单位长度平均造价可表示为

$$p(a) = Z_a(C(a), X(a)), a \in B \quad (1)$$

单位长度造价 $p(a)$ 为改造程度(要达到的通行能力 $X(a)$) 的函数,备选路段 a 的通过能力由 $C(a)$ 改造至 $X(a)$ 的造价为

$$l(a)p(a) = l(a)Z_a(C(a), X(a)) \quad (2)$$

式中: $l(a)$ 为备选路段 a 的长度.由此可得交通微循环路网改造总费用目标,即

$$\min \sum_{a \in B} e(a)l(a)Z_a(C(a), X(a)) \quad (3)$$

交通微循环虽然可分流干道交通,但是这些分流的过境交通流会对区域内部造成干扰,考虑交通微循环用地(以用地费用形式表示)是希望交通微循环占地(包括路线长度、路宽、数量)最少以减少对区域的干扰.对备选路段 a , $a \in B$, 改造后单位长度用地成本为

$$h(a) = Q_a(X(a)) \quad (4)$$

$h(a)$ 为 $X(a)$ 的增函数.一般来说,对支线路段 a , 改造后通行能力 $X(a)$ 越大,路面宽度越宽,则 $h(a)$ 越大.所以,备选路段 a , $a \in B$ 改造的交通用地为

$$l(a)h(a) = l(a)Q_a(X(a)) \quad (5)$$

由此可得交通微循环路网改造总用地成本这一优化目标,即

$$\min \sum_{a \in B} e(a)l(a)Q_a(X(a)) \quad (6)$$

因此,由式(3), (6)得到总的成本最小化目标为

$$\min \sum_{a \in B} e(a)l(a)[Z_a(C(a), X(a)) + Q_a(X(a))] \quad (7)$$

其次,考虑环境影响最小目标,分析路网改造可能对沿街造成的废气污染.路段交通尾气排放量等于标准小汽车单位里程的排放量乘以该路段交通量再乘以该路段长度^[5].交通流量处于平衡状态下,路段 a , $a \in B$ 上的交通尾气污染物总排放量 E_a 为

$$E_a = \rho_a x(a)l(a), a \in B \quad (8)$$

式中: ρ_a 为尾气排放因子; $x(a)$ 为路段 a , $a \in B$ 上的交通流量.那么,交通微循环对区域内环境所产生的总的废气污染 E_s 为所有交通微循环道路上尾气污染总排放量之和.

$$E_s = \sum_{a \in B} \rho_a x(a)l(a) \quad (9)$$

由此得到交通微循环对区域内环境影响最小的目标为

$$\min \sum_{a \in B} \rho_a x(a)l(a) \quad (10)$$

然后,是交通效率最大化目标,即使得总的行驶时间最小.

$$\min \sum_{a \in A \cup B} x(a)t(a) \quad (11)$$

式中: $t(a)$ 为车辆在路段 a 上的行驶时间.当设计交通微循环后会增加一些主路与交通微循环支线的交叉点,这些交叉点会引起主路交通额外时间消耗.

因此总的交通效率最大化目标为

$$\min \sum_{a \in A \cup B} x(a) t(a) + \sum_i T_i \quad (12)$$

式中: T_i 为第 i 个交叉点上的时间延误, 等于每辆车的平均延误乘以交通量。

2.2 评价函数建立

采用功效系数法^[6]进行多目标函数优化。

不考虑其他目标, 仅对目标一(式(7))进行优化得到最小成本为 P_{\min} , 此时取 P_{\min} 的功效系数为 1; 设最大投资成本上限为 P_{\max} (P_{\max} 由实际投资预算决定), 对应功效系数为 0. 由此建立线性功效函数为

$$d_1 = \frac{1}{P_{\min} - P_{\max}} (P - P_{\max}) \quad (13)$$

式中: P 为总的成本。

对于目标二(式(10)), 可结合环境标准^[5]、区域内建筑类型、区域大小等拟定合理的上限 $E_{s, \max}$, 其对应的功效系数为 0; 结合实际情况给出一个较理想的、对环境不利影响极其微小的 $E_{s, \min}$ 值, 其对应的功效系数为 1. 由此建立线性功效函数

$$d_2 = \frac{1}{E_{s, \min} - E_{s, \max}} (E_s - E_{s, \max}) \quad (14)$$

式中: E_s 为所产生的总的废气污染。

对于目标三(式(12)), 计算总的客流平稳快速通过(无拥挤堵塞)时间 T_{\min} , 其对应的功效系数为 1; 若不设计交通微循环, 车流通过所需的时间计为 T_{\max} , 其对应的功效系数为 0.

$$d_3 = \frac{1}{T_{\min} - T_{\max}} (T - T_{\max}) \quad (15)$$

式中: T 为总的时间。

由此, 可建立评价函数为

$$D = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3} \quad (16)$$

优化的总目标为

$$\max \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3} \quad (17)$$

2.3 约束条件

首先是主干道路的饱和度约束. 交通微循环要实现的目标就是分流主干道路的交通压力, 使得主干道路饱和度降低到某个容许值之下。

$$u(a) = \frac{x(a)}{C(a)} < U(a) \quad a \in A \quad (18)$$

式中: $u(a)$, $x(a)$, $a \in A$ 为主干道路的计算饱和度与流量; $U(a)$ 为最大容许饱和度上限。

区域内微循环支线道路也必须满足饱和度限制以防止在区域内支线道路上发生交通拥挤。

$$v(a) = \frac{x(a)}{X(a)} < V(a), \quad a \in B \quad (19)$$

式中: $v(a)$, $x(a)$, $a \in B$ 为支线道路的计算饱和度与流量; $V(a)$ 为支线道路的最大容许饱和度。

另外还有一约束是各交通微循环支线道路根据现状及容许条件、可实施条件(包括用地、两侧建筑物约束等)等能改造的最大程度约束。

$$C(a) \leq X(a) \leq X_0(a), \quad a \in B \quad (20)$$

式中: $X_0(a)$ 为可改造得到的最大通行能力值。

2.4 下层配流模型

上面各式构成交通微循环网络设计优化模型的上层规划, 其中的路段流量 $x(a)$, $a \in A \cup B$ 可采用用户平衡分配模型求解获得. 下层规划模型为

$$\min \sum_{a \in A \cup B} \int_0^{x(a)} t_a(w) dw \quad (21)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^{L(r,s)} f_k^{rs} = q_{rs}, \quad r, s = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$x(a) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \sum_{k=1}^{L(r,s)} f_k^{rs} \delta_{ak}^{rs} \quad (23)$$

$$a \in A \cup B$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad r, s = 1, 2, \dots, n$$

$$k = 1, 2, \dots, L(r, s) \quad (24)$$

在上述规划中, $t_a(w)$ 为路阻函数, 采用美国道路局 BPR 函数; $L(r, s)$ 为 OD(起讫点)对 (r, s) 间路径数; f_k^{rs} 为 OD 对 (r, s) 间的第 k 条路径流量; δ_{ak}^{rs} 为 0—1 变量, 如果路段 a 在点对 (r, s) 第 k 条路径上 δ_{ak}^{rs} 为 1, 否则为 0.

3 模型求解算法

对各支线道路, 其现状通行能力为 $C(a)$, $a \in B$. 对被选择道路, 将其通行能力改造提高值离散化(如 $0, \sigma, 2\sigma, 3\sigma, \dots$); 未被选择的道路其变量值记为 -1 . 这样就将两组变量转化成了一组(其取值为: $-1, 0, 1, 2, \dots$). 对正值, 结果处理的时候再乘以 σ 即得到通行能力改造提高值. 令:

$$\lambda(a) = \begin{cases} -1 & \text{不选择支线道路 } a, \text{ 此时 } e(a) = 0 \\ 0 & \text{选择 } a, \text{ 通行能力改造提高值为 } 0, \\ & \text{此时 } e(a) = 1, X(a) = C(a) \\ 1 & \text{选择 } a, \text{ 通行能力改造提高值为 } \sigma, \\ & \text{此时 } e(a) = 1, X(a) = C(a) + \sigma \\ 2 & \text{选择 } a, \text{ 通行能力改造提高值为 } 2\sigma, \\ & \text{此时 } e(a) = 1, X(a) = C(a) + 2\sigma \\ 3 & \text{选择 } a, \text{ 通行能力改造提高值为 } 3\sigma, \\ & \text{此时 } e(a) = 1, X(a) = C(a) + 3\sigma \\ \vdots & \vdots \end{cases}$$

则要优化的变量即是 $\lambda(a)$, $a \in B$, 确定了 $\lambda(a)$ 值即同时确定了 $e(a)$ 和 $X(a)$ 的值.

模型的求解为一个双层规划的求解问题, 本文采用遗传算法进行求解. $\lambda(a)$, $a \in B$ 为优化变量, 采用实数编码, 将 $\lambda(a)$, $a \in B$ 代入下层模型求解, 计算每条路段流量 x_a , $a \in A \cup B$, 然后返回上层模型计算个体适应度及约束情况, 如果到达最大迭代次数, 则满足约束条件的适应度排名最大的个体即为最优解, 否则继续进行选择、交叉、变异操作.

4 算例

如图 1, 四周粗线表示主要道路, 区域内细线表示备选的支线道路, 节点间每条边包含正向与反向两条路段且两个方向通行能力相同. 高峰时段交通需求分布见表 1.

表 1 交通需求 OD 分布
Tab.1 Traffic demand OD distribution

节点	veh · h ⁻¹			
	1	2	3	4
1	0	600	2 000	600
2	600	0	500	1 000
3	2 000	500	0	800
4	600	1 000	800	0

主要道路双向通行能力均为 2 000 辆 · h⁻¹. 各备选支线道路现状通行能力均为 200 辆 · h⁻¹, 单位长度改造成本函数均为 $p(a) = X(a) - 200$ 万元 · km⁻¹, 交通用地成本函数均为 $h(a) = 0.5X(a)$, 各支路改造后可达到的最大通行能力均为 600 辆 · h⁻¹. 图 1 中每条纵向路段长度为 1.0 km, 横向路段长度为 1.5 km. 各道路要求饱和度小于 1. 主要道路每条纵向路段自由流行驶时间均为 1.0 min, 而横向路段均为 1.5 min; 各支线道路每条纵向路段自由流行驶时间均为 1.1 min, 而横向路段均为 1.6 min. 1→2, 1→4, 2→3, 3→4 之间主干路与支线道路相交处车辆平均延误时间为 15 s. 支线道路上单辆车尾气污染排放因子 $\rho_a = 82.4$ g · km⁻¹, $E_{s, \max} = 10\ 000$ kg · h⁻¹.

(1) 求 P_{\max} , P_{\min} , $E_{s, \max}$, $E_{s, \min}$, T_{\max} , T_{\min}

P_{\max} 已知为 15 000 万元.

P_{\min} 为不考虑其他目标仅对目标一进行优化得到的最小成本. 遗传算法迭代 50 次后最终优化结果为 8 600 万元.

$E_{s, \max}$ 已知为 10 000 kg · h⁻¹.

通过计算, 不考虑其他目标仅对目标二(式(10))进行优化得到的最小污染排放 $E_{s, \min}$ 为 7 065 kg · h⁻¹, 这里取 $E_{s, \min} = 7\ 000$ kg · h⁻¹.

不设计交通微循环, 仅在主干道路上配流, 计算得所有车辆总时间 T_{\max} 为 112 630 min.

T_{\min} 为总的客流平稳快速通过的时间. 假设主干道路上饱和度为 0.9, 所有车流在主干道路上通过的时间为 94 160 min. 此处取饱和度为 0.9 时所需时间说明不必过于追求时间最短(由于只是解决局部区域拥堵, 只要不拥堵通过时间都不会太长).

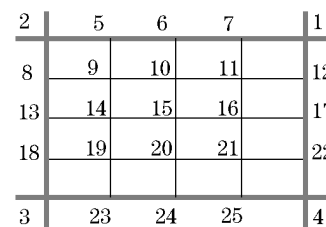


图 1 初始路网结构

Fig.1 Initial road network

(2) 评价函数的建立及优化

优化目标为 $\max \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}$.

按文中所述求解算法求解双层模型, 将优化变量 $e(a)$ 和 $X(a)$ 的求解转换为求解一组变量 $\lambda(a)$, $a \in B$. 令 $\sigma = 100$, 则 $\lambda(a)$ 的取值集合为 $\{-1, 0, 1, 2, 3, 4\}$. 编写遗传算法程序, 迭代次数取 50, 种群数取 300, 交叉率 0.7, 变异率 0.1, 优化结果为总成本为 9 600 万元, 总的污染排放为 7 094 kg · h⁻¹, 所有车辆总时间为 103 640 min. 功效系数 d_1, d_2, d_3 分别为 0.843 8, 0.968 8, 0.486 8, 评价函数 $D = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3} = 0.735 5$. 从结果可知, 目标一(总成本)和目标二(总污染排放)都具有较大的功效系数.

所选择的支线道路如图 2 所示.

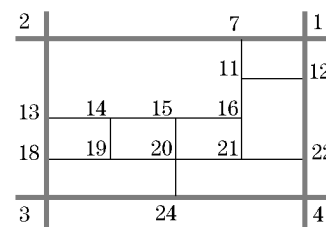


图 2 交通微循环路网

Fig.2 Road network of traffic micro-circulation

主干道路饱和度均在 1 以下, 选择的支线道路及其通行能力、流量及饱和度结果见表 2.

其他所有条件及 OD 不变, 只利用主干道路而没有交通微循环支线网络的配流结果见表 3. 从表 3 可

知,没有支线道路分流的情况下,各主要道路饱和度均大于 1,将产生交通拥挤.

表 2 各选择支路及其通行能力、流量与饱和度

Tab.2 Capacities,flows and saturations of selected branch roads

路段	通行能力/ (辆·h ⁻¹)	流量/ (辆·h ⁻¹)	饱和度/ %
7→11	400	319	79.8
11→7	400	319	79.8
11→12	200	188	94.2
11→16	400	348	87.1
12→11	200	188	94.2
13→14	300	272	90.5
14→13	300	272	90.5
14→15	300	270	89.9
14→19	200	121	60.5
15→14	300	270	89.9
15→16	300	240	79.9
15→20	200	173	86.4
16→11	400	348	87.1
16→15	300	240	79.9
16→21	200	109	54.3
18→19	300	236	78.7
19→14	200	121	60.5
19→18	300	236	78.7
19→20	300	238	79.3
20→15	200	173	86.4
20→19	300	238	79.3
20→21	300	246	81.9
20→24	600	391	65.2
21→16	200	109	54.3
21→20	300	246	81.9
21→22	400	354	88.6
22→21	400	354	88.6
24→20	600	391	65.2

表 3 各主干道道路流量与饱和度

Tab.3 Flows and saturations of arterial roads

路段	流量/(辆·h ⁻¹)	饱和度/%
1→2	2 200	110.0
1→4	2 056	102.8
2→1	2 200	110.0
2→3	2 044	102.2
3→2	2 044	102.2
3→4	2 200	110.0
4→1	2 056	102.8
4→3	2 200	110.0

5 结论

(1) 交通微循环利用干道与干道间的支、次道路网分流交通,在合理规划与设计的前提下,可充分利用城市闲置的道路资源,解决城市交通拥堵.

(2) 分析了交通微循环网络设计的功能目标,运用功效系数法构建了多目标规划的评价函数,构造了交通微循环网络优化设计的双层规划模型,在解决交通拥堵同时,对居民的生活与环境影响最小,交通效率最高,成本最少.

(3) 构造了模型的求解算法,将两组变量(一组离散型、一组连续型)通过合理构造转化成一组离散型变量,然后再用遗传算法进行求解.

参考文献:

[1] 杨成国,李英子.我国大城市交通拥堵问题对策研究[J].北京建筑工程学院学报,2007,23(4):62.
YANG Chengguo,LI Yingzi. Research on traffic congestion of big cities in our country[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2007,23(4):62.

[2] 谈晓洁,周晶,盛昭瀚.城市交通拥挤特征及疏导决策分析[J].管理工程学报,2003,17(1):56.
TAN Xiaojie, ZHOU Jing, SHENG Zhaohan. Analysis of characteristic and decision making for management of urban traffic congestion [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management,2003,17(1):56.

[3] 周彤梅,杨继辉.解决城市道路交通拥堵问题的方法研究[J].中国人民公安大学学报:自然科学版,2005,1:98.
ZHOU Tongmei, YANG Jihui. Ways for solving urban traffic congestion[J]. Journal of Chinese People's Public Security University: Science and Technology,2005,1:98.

[4] 李德慧,刘小明.城市交通微循环体系的研究[J].道路交通与安全,2005,5(4):17.
LI De hui, LIU Xiaoming. Research on urban transportation micro-circulation[J]. Road Traffic & Safty,2005,5(4):17.

[5] 王伟,项乔君,李铁柱.城市交通系统能源消耗与环境影响分析方法[M].北京:科学出版社,2003.
WANG Wei, XIANG Qiaojun, LI Tiezhu. Urban traffic systems energy resource consumption and environmental influence analysis[M]. Beijing: Science Press,2003.

[6] 钱颂迪.运筹学[M].修订版.北京:清华大学出版社,1990.
QIAN Songdi. Operation research [M]. Revised ed. Beijing: Tsinghua University Press,1990.