

文章编号: 2095-2163(2020)09-0113-08

中图分类号: U491

文献标志码: A

基于双层网络优化模型的紧急状况下交通疏散管理

罗翔勇, 柴晓冬

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201600)

摘要: 现有文献缺乏先进的模型来确定疏散网络中用于实施不间断流量和信号控制策略的最优交叉口集, 而最后交叉口集能够产生最大的疏散运行效率和最大利用有限成本。本文针对这种情况提出的网络优化模型, 有助于解决在应急规划过程中长期困扰交通主管部门的诸多关键问题: (1) 采用信号和断流措施的交叉口的数量; (2) 交叉口集的最优位置的确定; (3) 对于不间断交通的交叉口, 如何合理设计转弯限制方案。本文提出的模型包括双层框架。上层通过最小化总疏散时间来确定不间断交通和信号交叉口的最佳位置以及相应的转弯限制计划; 下层则根据 SUE 原则来处理疏散交通的路线分配。该模型采用基于遗传算法的启发式算法求解。在不同疏散需求和预算水平下的广泛分析表明, 不间断交通和信号交叉口的位置选择在应急交通的疏散管理中起着关键作用。通过显著减少总疏散时间(高达 39%), 模型在将有限资源优先分配到最合适的控制点方面大大优于现有实践。

关键词: 连续流交叉口; 信号交叉口; 转弯限制; 疏散管理; 网络优化

Traffic management strategies for emergency evacuation based on a bi-level network optimization model

LUO Xiangyong, CHAI Xiaodong

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

[Abstract] The problem to be addressed in this paper is the lack of an advanced model in the literature to determine the optimal set of intersections in the evacuation network for implementing uninterrupted flow and signal control strategies, respectively, which can yield the maximum evacuation operational efficiency and the best use of available budgets. A network optimization model, proposed in response to such needs, contributes to addressing the following critical questions that have long challenged transportation authorities during emergency planning, namely given the topology of an evacuation network, evacuation demand distribution, and a limited budget, (1) how many intersections should be implemented with the signals and interrupted flow strategies, respectively; (2) what their most appropriate locations are; and (3) how turning restriction plans should be properly designed for those uninterrupted flow intersections. The proposed model features a bi-level framework. The upper level determines the best locations for uninterrupted flow and signalizes intersections as well as the corresponding turning restriction plans by minimizing the total evacuation time, while the lower level handles routing assignments of evacuation traffic based on the SUE principle. The proposed model is solved by a GA-based heuristic. Extensive analyses under various evacuation demand and budget levels have indicated that the location selection of uninterrupted flow and signalized intersections plays a key role in emergency traffic evacuation management. The proposed model substantially outperforms existing practices in prioritizing limited resources to the most appropriate control points by significantly reducing the total evacuation time (up to 39%).

[Key words] uninterrupted flow intersection; signalized intersection; turning restriction; evacuation management; network optimization

0 引言

交通信号在交通管理中起着关键作用。大多数文献要么假设交叉口的信号规划过于简单, 要么对正常交通条件应用标准信号优化实践, 但要求很高。为了弥补这一缺陷, 刘等为紧急疏散期间的动脉信号控制策略设计开发了混合整数模型^[1]。该模型应用了临界交叉口的概念, 最大限度地提高主要疏散干道的效率, 但不会引起过多的等待时间和路边

的排队。但是, 该模型仅适用于假设关键交叉口只有两个阶段的单个道路; Liu 和 Chang 开发了一个适用于发生回流和堵塞的过饱和和交叉口的动脉信号优化模型, 但尚未将其应用于疏散^[2]。

近年来, 研究人员意识到疏散过程中交叉口信号过多的缺点, 建议通过适当设置转弯限制, 将信号交叉口转换为不间断交通。Cova 和 Johnson 提出了一种新颖的基于车道的网络路由策略, 为减少交叉

作者简介: 罗翔勇(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 大数据可视化、运筹优化、仿真; 柴晓冬(1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 通信与信息工程、故障诊断。

通讯作者: 柴晓冬 Email: cxdyj@163.com

收稿日期: 2020-05-21

口的交通延误提供了一种有效可行的方法^[3]。在该研究中,通过禁用现有的交通控制设备,在入口应用转弯限制消除交通冲突,将具有中断流条件的交叉口转化为不间断流设施。重新设置不停行交通管制,扩大了交叉口通行能力;Kalafatas 和 Peeta 以及 Xie 和 Turnquist 在该开创性工作的启发下,通过将交叉冲突消除和逆流设计相结合,进一步扩展了评估网络的容量,实践证明,这是更好地利用疏散网络容量的有效策略。

尽管这些冲突消除策略在减少交叉口布局方面很有效,但由于交叉口某些转弯运动的限制,特别是在大规模疏散网络中,这些策略可能会导致疏散人员的绕道次数大幅增加。在大型网络中,交叉口消除冲突非常耗时,且需要大量的人员和资源(例如路障或圆锥体),可能无法在实际疏散中实现。因此,考虑到疏散人员的可接受性和疏散管理机构资源的有限性,应限制冲突消除交叉口的数量。

本文提出的网络优化模型有助于确定疏散网络中用于实施交通交叉口消除和信号控制策略的最优间隔集,该模型可以产生最大的疏散操作效率,最佳利用率控制和管理资源。该模型解决了应急规划中长期以来对交通主管部门提出的以下关键问题:给定疏散网络的拓扑结构、疏散需求分布和有限的预算:

- (1) 采用信号灯交叉口的数量及其最适宜的位置;
- (2) 不间断交通交叉口应采用信号灯实施的数量及其最适宜的位置;
- (3) 对于不间断交通交叉口,合理设计转弯限制。这些信息对于应急管理将有限的资源分配给最合适的控制点至关重要。

1 网络描述

给定一个连通网络,有 N 个和一个代表节点和链路,本研究采用了 3 种不同类型的子网络,即信号交叉子网络、不间断流交叉子网络和路段子网络来描述信号交叉口的运行特性,城市疏散网络中的不间断交通交叉口和道路连接。信号交叉子网由允许通过交叉口的交通运行设置,包括信号配时、通行能力和饱和度、相互冲突的弧组成,而不允许包含不间断交通交叉子网的弧之间冲突,电弧起着无阻抗连接器的作用。路段子网中的弧是受其相应容量和交通流组成约束的定向连接体。

为了更好地说明网络表示概念,描述由不间断流交叉口、双向路段和信号交叉口组成的示例路段,

其中实线表示路段连接,虚线表示不间断流和信号子网中的弧,如图 1 所示。不同位置的交叉口只能通过路段子网相互连接,在信号交叉口和不间断交通交叉口子网中,点和破折号中的链路分别表示相应交叉口内上下游链路之间的连通性和旅行成本。

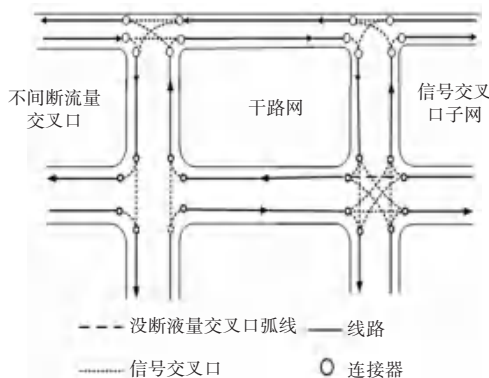


图 1 子网络示意图

Fig. 1 Sub-network representation

2 优化模型制定

网络优化模型具有两层方案,上层确定信号交叉口和不间断交通交叉口的最佳集合以及相应的转弯限制方案;下层处理疏散交通需求的路径分配问题,双层模型的结构如图 2 所示。上层描述决策者或规划者为最小化总疏散成本而采取的行为,该模型确定了信号交叉口和不间断交通交叉口的最优位置;低层反映了疏散人员在选择疏散路线时的行为。为了便于模型展示,表 1 总结了本文使用的符号。

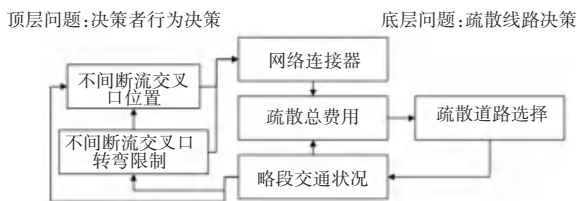


图 2 双层模型结构

Fig. 2 Structure the proposed bi-level model

2.1 顶层问题描述

顶层问题旨在使给定疏散网络的总疏散时间最小。本文假设在疏散网络中有一个单一的超级目的地(疏散庇护所),当被疏散者经由无阻抗连接到与超级目的地相连的出口节点时,会察觉到安全。总疏散时间可以用链路上的流量总和乘以相应的行程时间来表示,公式(1)如下:

$$\min \sum_{a \in A} \sum_{r \in N_R, s \in N_S} \sum_{z \in Z^{rs}} t_a f_{a,z}^{rs} \quad (1)$$

其中, $f_{a,z}^{rs}$ 是与路径 z 相关联的线路 a 上从原点 r 到目的地 s 的流量; t_a 是线路 a 上的旅行时间; N_R 、

NS 和 Zrs 分别表示原点节点集、目的地节点集和路由集。

表1 关键模型参数和变量的表示

Tab. 1 Notation of key model parameters and variables

集合	
N	点集, $N = N_r \cup N_m \cup N_s$
$A, a \in A$	线路集
$N_r, r \in N_r$	疏散起点集
$N_s, s \in N_s$	疏散终点集
$N_m, m \in N_m$	交叉口集
$Z_{rs}, z \in Z_{rs}$	从 r 到 s 路径集
$\Gamma_a^{-1}, \Gamma_a^{-1} \subset A$	与 a 连接的下游路段集
参数和变量	
φ_a	连通性指示器(如果 A 的下游是不间断流量交叉口,则为1;否则为0)
$q^{rs}, r \in N_r, s \in N_s$	从 r 到 s 的交通需求量
$f_a, c_a, a \in A$	路段 a 的流量及容量
f_z^s	路段 z 从 r 到 s 的流量
$f_{a,z}^s$	路段 z 从 r 到 s 相关的路段 a 的流量
f_{ab}	线路 a 到 b 的流量
$f_{a,T}, f_{a,R}, f_{a,L}, f_{a,opp}$	线路 a 的直行,右转,左转反向流量
t_a	线路 a 的走行时间
t_a^0	路段 a 的自由通行时间
d_{ab}	路段 a 到 b 的延迟
X_{ab}	从 a 到 b 的冲突点集
M	定义一个极大值
$C_m, m \in N_m$	信号交叉口 m 的信号周期
$g_{ab,m}^p$	交叉口 m 在信号阶段 p 从 a 到 b 有效绿灯时间
B	预算
$B_m, m \in N_m$	交叉口 m 的运营成本
决策变量	
$x_m, m \in N_m$	交叉口 m 有信号为1; 否则为0。
$y_{ab}, a, b \in A$	从 a 到 b 可以通行行为1,否则为0。

线路 a 上的行程时间取决于其下游的分段类型;信号流或不间断流。在城市道路网中,由于不间断的车流间隔或信号流的反向流动而造成的延迟会对路线选择产生重大影响。对这种延迟的低估可能导致业务分布的不现实性。为了提供可靠的行程时间计算,简化模型公式,本文首先采用了 Horowitz 开发的通用 BPR 函数,计算不间断交通交叉口上游路段的潜在转弯延误。如果线路的下游交叉口被信号

化,采用流量加权法来考虑转向延误。线路 a 上的行程时间由公式(2)~(4)给出:

$$t_a = T_a^c + T_a^n, \quad (2)$$

$$T_a^c = t_a^0 [1 + \alpha \cdot$$

$$\left(\frac{f_{a,T} + \varphi_{a,R} \cdot f_{a,R} + \varphi_{a,L} \cdot f_{a,L} + \varphi_{a,opp} \cdot f_{a,opp}}{c_a} \right)^\beta] \varphi_a, \forall a \in A. \quad (3)$$

$$T_a^n = [t_a^0 (1 + \alpha \left(\frac{f_a}{c_a} \right)^\beta) + d_a] (1 - \varphi_a). \quad (4)$$

式(2)由二部分组成:(1) T_a^c 表示接近不间断交通交叉口时 a 链路上的行程时间;(2) T_a^n 表示 a 链路上到达信号交叉口的行程时间。 φ_a 为二元指示器(如果 a 是不间断流交叉口的上游,则等于1,否则为0); t_a^0 是路段 a 的自由流行程时间; f_a 是路段 a 的流量; $f_{a,T}, f_{a,R}$ 和 $f_{a,opp}$ 分别是路段 a 的通过流、右转流、左转流和对向流; $\varphi_{a,T}, \varphi_{a,R}$ 和 $\varphi_{a,opp}$ 分别为右转、左转和反向交通流的转换系数; C_a 是路段 a 的通行能力; α 和 β 是函数参数; d_a 是由于下游交叉口的信号而导致的路段 a 的延误,由式(5)给出:

$$d_a = \frac{\sum_{b \in \Gamma_a^{-1}} d_{ab} f_{ab}}{f_a} \quad \forall a, b \in A. \quad (5)$$

其中, f_{ab}, d_{ab} 分别表示从线路 a 到线路 b 的流量和延迟; d_{ab} 可根据《公路通行能力手册》(2000)中的延迟公式(6)估算:

$$d_{ab} = 0.5C_m (1 - g_{ab,m}^p / C_m)^2 / [1 - \min(1, X_m) g_{ab,m}^p] \quad \forall a, b \in A, m \in N_m. \quad (6)$$

其中, C_m 是信号交叉口 m 的循环长度; $g_{ab,m}^p$ 是信号交叉口 m 的 p 相 a 到 b 的有效绿灯时间; X_m 是交叉口 m 的饱和度。

顶层模型受以下约束:

容量约束,式(7):

$$\sum_{r \in N_r, s \in N_s, z \in Z_{rs}} f_{a,z}^s \leq c_a \quad a \in A. \quad (7)$$

冲突消除约束,式(8):

$$y_{ab} + \sum_{cd \in X_{ab}} y_{cd} \leq 1 + Mx_m$$

$$\forall a, b \in A, b \in \Gamma_a^{-1}, d \in \Gamma_c^{-1}, m \in N_m. \quad (8)$$

其中, y_{ab} 和 y_{cd} 二元决策变量(1表示允许从 a 到 b 或从 c 到 d 的流量;0表示不允许); x_m 二元决策变量,表示 m 交叉口是否有信号(1表示交叉口,0表示不间断流量); x_{ab} 表示 a 到 b 交叉口流量的冲突流集合;如果交叉口 m 是有信号的($x_m = 1$),则式(8)的右侧变为一个大数字,表示允许交叉口处的冲突

移动;如果交叉口 m 是中断流 ($x_m = 0$), 式(8) 的右侧变为 1, 限制了任何冲突运动集 ($cd \in X_{ab}$) 只允许单向流动。式(8) 保证转弯限制仅在被确定为不间断流的交叉口实施。

预算约束, 式(9):

$$B \geq \sum_m B_m(1 - x_m) \quad \forall m \in N_m. \quad (9)$$

其它约束, 式(10):

$$\phi_a = 1 - x_m \quad \forall m \in N_m, a \in A. \quad (10)$$

式(10) 确保如果 m 是不间断流交叉口, 则其所有入站链路必须具有 $\phi_a = 1$, 否则, $\phi_a = 0$ 。

2.2 底层 SUE 问题描述

信号交叉口和不间断交叉口的实施将影响疏散网络中的交通流模式。不当的设置可能会加剧网络拥塞, 并通过延长旅客的延误和旅行距离增加旅客的阻抗。因此, 下层用于指定疏散交通的路线分配, 考虑信号交叉口的影响和上层产生的转弯限制设置。传统上用来描述网络设计问题中的路由选择行为的适当条件是假设所有的旅行者都是基于网络状况的完美信息来进行路由选择的。然而, 疏散是一个非经常性事件, 疏散人员在观察其路线成本时会遇到困难, 而且由于信息不完善, 在决策过程中可能会出现观测误差。因此, 用 SUE 原则来描述撤离人员在撤离情况下的路径选择行为要优于应有原则。在此, 本文采用 Ying 等人提出的 SUE 非线性公式来解决较低层次的问题^[4], 给出式(11):

$$F_{ab}(f, y) = f_{ab} - \sum_{r \in N_R, s \in N_S, z \in Z^r} q^r \frac{\partial W_z^{rs}}{\partial c_z^{rs}} \delta_{ab,z}^{rs} = 0 \quad \forall a, b \in A, b \in \Gamma_a^{-1}. \quad (11)$$

其中, f_{ab} 是连接 a 到连接 b 的流量; q^r 是起点 r 到终点 S 之间的交通需求; $\delta_{ab,z}^{rs}$ 是一个二元指标 (如果连接 a 和 b 都在 OD 对 rs 和 0 之间的 z 路线上, 则它等于 1); W^r 是满足函数, 定义为从 r 到 S 的预期最小感知出行成本, 式(12):

$$W^r = E[\min_{z \in Z^r} \{c_z^r\}]. \quad (12)$$

其中, c_z^r 是 OD 对 R 之间 z 路线上的感知旅行成本, 由式(13) 给出:

$$c_z^r = \sum_{a \in z} t_a + \sum_{a \in z} \sum_{b \in \Gamma_a^{-1}} M(1 - y_{ab}) \quad \forall r \in N_R, s \in N_S, b \in z. \quad (13)$$

其中, M 是一个大的正常数, 表示对乘坐限制转弯的旅客的额外惩罚。

上述 SUE 公式可应用于各种路径选择模型中, 以描述对满足函数施加的不同条件。本文满意度函

数采用一般的 logit 形式, 由式(14) 给出:

$$W_z^{rs} = \frac{-1}{\theta} \ln \sum_z \exp(-\theta c_z^{rs}) \quad \forall r \in N_R, s \in N_S, z \in Z^r. \quad (14)$$

Long 等人提出的一种基于路径的算法^[5]。本文采用其方法来解决较低层次的起诉问题。路线选择概率由满意度函数相对于路线行程成本的偏导数给出, 式(15):

$$P_z^{rs} = \frac{\partial W_z^{rs}}{\partial c_z^{rs}} \quad \forall r \in N_R, s \in N_S, z \in Z^r. \quad (15)$$

将式(14) 代到式(15) 中, 得到逻辑 SUE, 式(16):

$$P_z^{rs} = \frac{\partial W_z^{rs}}{\partial c_z^{rs}} = \frac{\exp(-\theta c_z^{rs})}{\sum_l \exp(-\theta c_l^{rs})} \quad \forall r \in N_R, s \in N_S, z, l \in Z^r. \quad (16)$$

可通过式(17) ~ 式(20) 确定路线流量 f_z^r 和线路流量 f_{ab} :

$$f_z^r = P_z^{rs} q^r \quad \forall r \in N_R, s \in N_S, z \in Z^r, \quad (17)$$

$$f_{ab} = \sum_{rs} \sum_z P_z^{rs} q^r \delta_{ab,z}^{rs} \quad \forall r \in N_R, s \in N_S, z \in Z^r. \quad (18)$$

$$f_{a,z}^{rs} = \sum_{b \in \Gamma_a^{-1}} f_{ab} \quad \forall a, b \in z, a, b \in A, \quad (19)$$

$$f_a = \sum_{b \in \Gamma_a^{-1}} f_{ab} \quad \forall a, b \in A. \quad (20)$$

应用简单的下降方向 $\sum_{rs} \sum_z P_z^{rs} q^r \delta_{ab,z}^{rs} - f_{ab}$ 来解决给定位置集和转弯限制计划的问题。

3 启发式求解方法

层规划问题的难点在于如何对给定的二元位置模式向量和转向约束决策变量向量 (由下层随机用户平衡问题定义的隐式向量函数) 的平衡流模式进行评价。基于遗传算法 (GA) 的启发式算法已经被成功地证明能够在合理的时间段内产生一系列两级优化问题的可行和次优解。本文开发了一种基于遗传算法 (GA) 的启发式算法, 能够在合理的时间段内产生可行的近似最优解。

3.1 遗传染色体编码

遗传算法搜索最优解的一个重要步骤是对染色体有效编码, 以捕捉解结构的特征。在外部模块中, 生成一个二进制字符串 ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$), 其中 x_m 表示交叉点 m 的类型; 对于内部模块中的解决方案, 使用一系列二进制字符串 ($l_1, l_2, l_3, \dots, l_m$), 其中 $m = N_m$ 是二进制字符串表示交叉点 m 处应用的转向限制的状态。如果 $xm = 1$ (即交叉点 m 是一个

有信号的交叉口),字符串 lm 被设置为包含所有的字符串,表示在交叉口 m 没有实施转弯限制。

3.2 无可行解处理方式

模块中的候选解可能违反约束(9)。因此,计算外部模块中每个候选解 X_j 的不可行值(指示某个解违反给定约束的程度;具有较大不可行值的候选解在 GA 中的下一代中被选择的概率较低),式(21)用于选择新种群和消除具有最大不可行值的解,以保持种群的大小:

$$f(X_j) = 1/\{\alpha_0[\sum_m (1 - x_m)B_m - B] + F(X_j)\} \quad \forall m \in N_m \quad (21)$$

其中, α_0 为违反约束(9)处罚的参数, $F(X_j)$ 为候选 X_j 的总疏散时间。在外部模块中的每一个遗传算法生成处的最佳解可以定义为在不违反预算约束(9)的情况下产生最小总疏散时间的解,由式(22)给出:

$$\{\text{Min}F(X) \mid B \geq \sum_m B_m(1 - x_m)\} \quad \forall m \in N_m. \quad (22)$$

对于内部模块,如果在外部模块中 X_m 被确定为零,则可能违反交叉消除约束集(8)。为了解决这个问题,放松了交叉消除约束(8),并通过在原始目标函数中添加一个惩罚项来补偿,由式(23)给出:

$$f(L_j) = \sum_{a \in A} \sum_{r \in N_R, s \in N_S, z \in Z^s} t_a^{rs} + \sum_m M(1 - x_m) \cdot \text{Max}[0, y_{ab} + \sum_{cd \in X_{ab}} y_{cd} - 1] \quad \forall r \in N_R, s \in N_S, z \in Z_{rs}, a, b \in A, b \in \Gamma_a^{-1}, d \in \Gamma_c^{-1}, m \in N_m. \quad (23)$$

其中, L_j 是内部模块中的候选解决方案。

3.3 收敛准则

准则 1:由式(24)给出

$$\frac{\min_g h(T) - \min_{g+1} h(T)}{\min_g h(T)} \leq 0.1. \quad (24)$$

g 为代数,即在一定的连续迭代中,相邻两代种群列表中的最小目标值之差小于 0.1%;

准则 2:遗传算法的进化不会超过预设的最大代数。其中, T 表示内部或外部模块提供的解; $h(T)$ 表示与某个解 T 对应的目标函数值。对于外部和内部模块中的每一代,检查准则(1)和(2)。如果其中任何一个满足,那么停止并为相应的模块提供最优解。

4 案例分析

为了说明所提出的模型和算法的有效性和适用

性,对安徽省淮北市的一个紧凑型城市中心网络进行了案例分析研究。

4.1 网络测试

如图 3 所示,测试网络由 41 个双向链路和 26 个节点组成(节点 12 和 13 被指定为超级目的地节点)。其余 24 个节点均表示为交叉口和疏散起点。目的地节点是安全区域或庇护所,没有信号或转弯限制,将被明确建模。节点 1、6、22、26 和 17 表示自然避免交通冲突的两路交叉口,可以从交叉口列表中排除,以实现信号或不间断流量策略。在试验道路网中,粗体线表示通行能力较高的干道,其他线表示次要道路。

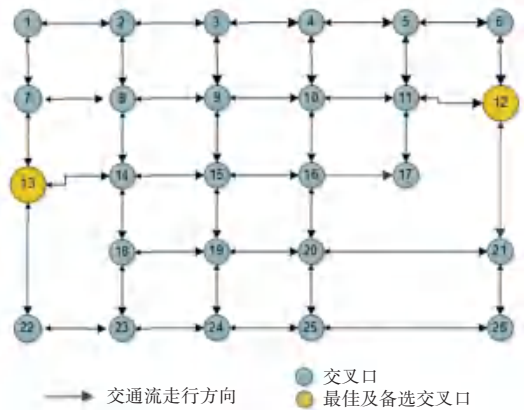


图 3 测试网络

Fig. 3 The test network

4.2 模型关键参数

模型关键参数,包括 BPR 功能参数、转弯限制参数和求解算法参数,设置如下:在 BPR 函数中, α 、 β 设为 0.15 和 4;根据 Horowitz (1997), $\phi_{a,T}$ 、 $\phi_{a,R}$ 和 $\phi_{a,opp}$ 分别设置为 1.0、1.0 和 0.4;将足够大的正整数 M 和惩罚分别设置为 10000 和 1000;外部模块和内部模块的变异概率均为 0.03;外部模块和内部模块的概率大小分别设置为 200 和 300;外部模块和内部模块的交叉概率均设置为 0.2;将外部模块和内部模块的最大生成数分别设置为 100 和 200;如果连续 5 次迭代的两次相邻迭代之间的差异小于 0.1%,则终止外部模块和内部模块的算法。值得注意的是,遗传算法中使用的参数是从广泛的数值实验中调整的,以最适合案例研究网络。这些参数可能需要经过重新校准和更新过程才能在其他网络上使用。

4.3 模型评估

本研究设计了各种方案来评估拟议模型的性能,包括 4 个级别的可用预算 (A - \$ 10000、B -

\$ 20000、C- \$ 30000 和 D- \$ 40000) 和 3 个级别的总疏散交通需求 (I-10000vph、II-20000vph 和 III-30000vph)。假设实施一个不间断流量交叉口的平均成本为 5000 美元,则在预算计划 A、B、C 和 D 下,不间断流量交叉口的最大数量分别为 2、4、6 和 8。

将在 12 个方案 (3×4) 下对拟议模型进行评估,并将其性能与当局在实践中通常采用的替代交通管理策略 (表示为“替代-I”) 进行比较。该策略通常在主要疏散干道和次要道路之间的交叉口实施不间断流动,以防止次要街道的流动中断主要疏散方向 (例如,次要道路上的流动不允许通过或左转)。

为了使所提出的模型与方案一之间的比较公平,应用所提出的转弯限制优化方法对方案一选择的交叉口的方案进行微调,从比较中可以看出,不间断流交叉口位置选择的重要性。

该模型在一台采用英特尔奔腾双核 1.80ghz 处理器和 6gb RAM 的 PC 机上用 MATLAB 实现。表 2 总结了该模型在不同需求和预算水平下的计算性能。图 4 示出了预算计划 I 和需求水平 I 的 GA 的收敛过程。

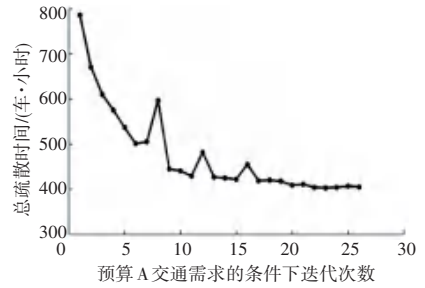


图 4 预算内计划 I 和需求水平 I 的遗传算法收敛过程
Fig. 4 Convergence process of the GA for under budget plan I and demand level I

表 2 模型在不同需求和预算水平下的计算性能

Tab. 2 Computational performance of the proposed model under various demand and budget levels

	预算 A		预算 B		预算 C		预算 D	
	迭代	时间/min	迭代	时间 /min	迭代	时间/min	迭代	时间/min
1	26	12.17	28	18.07	29	23.84	29	24.56
2	28	12.53	31	18.56	30	24.23	31	24.89
3	29	13.36	31	19.24	32	25.03	33	25.72

注:计算性能在配备英特尔奔腾双核 1.80 GHz CPU 和 6 GB RAM 的 PC 上进行评估。

表 3 总结了拟议模型与备选方案一的比较结果,包括不间断流量交叉口的的位置和总疏散时间。

不同需求和预算水平下的总疏散时间,如图 5 所示。

表 3 不同情景下的最优疏散方案及性能

Tab. 3 Optimal evacuation plans and performance under various scenarios

预算 s	需求 I	不间断流交叉口位置 (Node ID)		总疏散时间 (veh * hr)		总体改善-I/%
		最佳计划	改善方案-I	模型 I	改善方案-I	
A	I	14, 16	8,10	423	465	9.9
	II	8, 9	8,10	855	1124	31.4
	III	8, 20	10,15	1674	2274	35.8
B	I	8,14,16,20	8,10,15,19	372	442	18.8
	II	8,9,16,20	8,11,15,19	764	978	28.0
	III	9,11,16,20	8,15,19,24	1352	1877	38.8
C	I	2,4,8,9,16,20	3,7,8,10,15,19	324	396	22.2
	II	3,8,9,16,19,20	7,8,10,11,15,19	618	794	28.4
	III	3,8,9,16,19,20	7,8,10,11,15,19	1157	1542	33.3
D	I	3,8,9,16,19,20,24,25	3,7,8,10,11,15,19,24	298	355	19.1
	II	3,8,9,16,19,20,24,25	3,7,8,10,11,15,19,24	584	752	28.8
	III	3,8,9,16,19,20,24,25	3,7,8,10,11,15,19,24	978	1358	38.9

如表 3 和图 5 所示,所提出的模型和备选方案-I 之间的不间断流动区间的位置存在显著差异。这

种差异将导致它们在总疏散时间上的差异。研究结果表明,在预算有限的情况下,不间断交通和信号交

叉口的位置选择在疏散规划中起着关键作用。在各种情况下,该模型的总疏散时间均优于方案一,说明了该模型在疏散过程中对最合适控制点的资源优先排序的有效性。此外,在所有预算计划的高需求情况下,所提出的模型比替代方案 I 有更高的改进,即在需求水平较高时,适当的位置和转弯限制计划对疏散系统的性能更为关键。

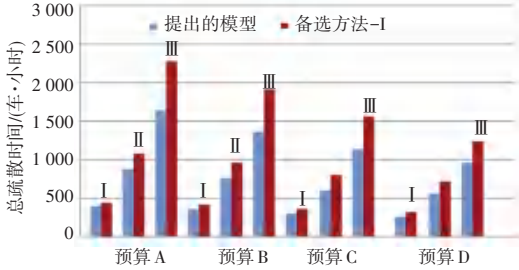


图 5 不同需求水平和预算方案下的总疏散时间比较

Fig. 5 Comparison of the total evacuation times under various demand levels and budget plans

图 6 和图 7 分别示出了预算计划 B 和需求水平 III 下的拟议模型和备选方案 I 的最优位置和转弯限制计划的示例。

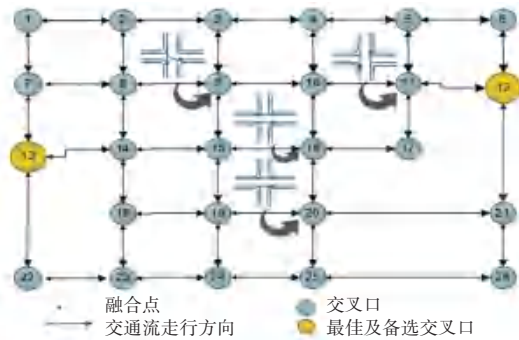


图 6 模型的方案 (预算计划 B 和需求水平 III)

Fig. 6 Plans from the proposed model (Budget Plan B and Demand Level III)

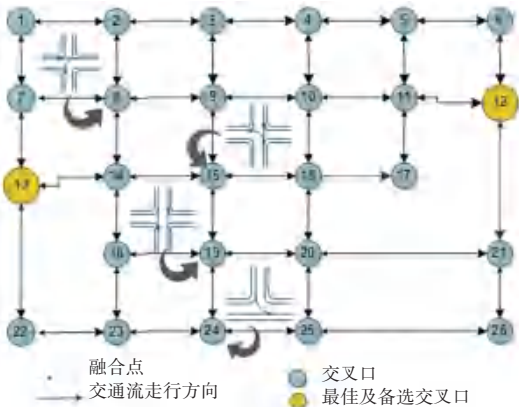


图 7 备选方案 I (预算计划 B 和需求水平 III)

Fig. 7 Plans from the Alternative-I strategy (Budget Plan B and Demand Level III)

在给定的预算方案下,由该模型生成的最优选址方案似乎对需求水平不敏感。例如,根据预算计划 C,不间断交通交叉口的的位置不会随着需求水平的增加而改变;不管预算计划是什么,一些节点(如 8、9、16 和 20)都应该始终转换为不间断的设施。研究表明,该模型的选址方案在规划层面的应用是相对稳定的,特别是在可预测的突发事件的规划方面。

4.4 敏感性分析

为了研究断流交叉口数量对疏散性能的影响,本研究进一步进行了敏感性分析。图 8 总结在不同的预算计划对每个需求层次的疏散网络性能的影响。在任何给定的需求水平下,总疏散时间单调地随着不间断流量交叉口数量的增加而减少。研究表明,实施更多的无人干扰过流交叉口,可以有效地扩大疏散网络容量,提高疏散运行性能。

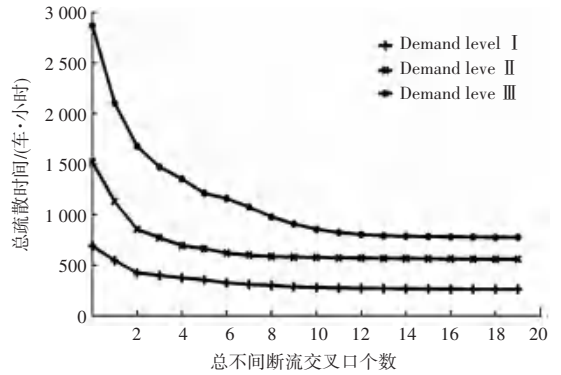


图 8 不间断路口数对疏散网络性能的影响

Fig. 8 Impact of the number of uninterrupted flow intersections on evacuation network performance

5 结束语

本文提出了一个城市紧急疏散网络中信号交叉口和不间断交通交叉口优化选址的双层网络优化模型,解决了交通主管部门在应急规划中长期面临的几个关键问题。针对组合选址和转弯约束设计中的组合复杂性问题,采用遗传算法,设计了一个包含外部模块和内部模块的启发式求解框架,将整个问题分解为简单的部分。外部模块负责信号交叉口和不间断交通交叉口的的位置选择,而内部模块负责通过交通分配过程优化和评估目标函数来优化转弯限制方案。

模型和算法的数值试验表明:

- (1) 不间断交通交叉口的实施有效地扩展了疏散网络的容量,提高了疏散的运行效率;
- (2) 不间断交通和信号交叉口的的位置选择起