

文章编号:1671-1637(2014)03-0079-08

行人-公交紧急疏散集成优化模型

潘述亮¹, 俞洁¹, 刘玥²

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 威斯康辛大学密尔沃基分校
土木工程系, 威斯康辛 密尔沃基 53201)

摘要:针对大型公共场所突发事件提出了运用公共交通进行紧急疏散的集成优化模型。模型将紧急疏散问题抽象为行人交通流和公共交通网络的双层优化网络,第1层引导撤离人员从事发地点(建筑物等)到达指定的乘车点(公交站等),第2层优化公交车从场站出发,途经各乘车点,最后运输撤离人员到达安全地点。利用基于禁忌搜索的两阶段启发式算法对模型进行求解和验证。验证结果表明:在一个有328人需要疏散的网络中,共使用8辆公交车完成疏散。目标函数中每一项权重的变化对模型输出结果基本没有影响,模型具有很强的鲁棒性。对比CPLEX优化软件,启发式算法能够在1 h内求解出近似最优解,并且近似最优解与最优解的误差小于15%。模型充分考虑了撤离人员分配与公交路径优化之间的交互影响,实现了在紧急疏散时行人交通流与公共交通网络的组织最优。

关键词:公共交通;突发事件;紧急疏散;行人;集成优化模型;禁忌搜索

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Integrated optimization model of pedestrian-public transit emergency evacuation

PAN Shu-liang¹, YU Jie¹, LIU Yue²

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Department of Civil Engineering and Mechanics, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee 53201, Wisconsin, USA)

Abstract: Aiming at emergent event in large-scale public, an integrated optimization model of emergency evacuation was developed based on public transit. In the model, the problem of emergency evacuation was summarized as a two-level optimization network including pedestrian traffic flow and public transit network. The first-level framework guided evacuees from accident sites (e. g. buildings) to designated pick-up points (e. g. bus stops). The second-level framework properly dispatched and routed a fleet of buses at different transit depots to the pick-up points, and transported evacuees to safe places finally. Integrated optimization model was tested and verified by using a two-stage heuristic algorithm based on tabu search. Verification result indicates that 8 buses are used for the evacuation of all 328 people in the network. The output result of integrated optimization model is not sensitive to the change of weight assignment of objective function, so the model has strong robustness. Comparing with the optimization software of CPLEX, heuristic algorithm can get near optimum solution in 1 h, and the error between near optimum solution and optimal solution is less than 15%. The interactions between

收稿日期:2013-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51108248);山东省自然科学基金项目(ZR2011GQ002);山东大学自主创新基金项目(2011TB019)

作者简介:潘述亮(1986-),男,山东滕州人,山东大学工学博士研究生,从事公共交通运营与管理研究。

导师简介:俞洁(1979-),女,安徽芜湖人,山东大学副教授,工学博士。

evacuees distribution and bus route optimization are fully considered in the model. The pedestrian traffic flow and the public transit network during evacuation process are concurrently optimized. 9 tabs, 5 figs, 21 refs.

Key words: public transit; emergent event; emergency evacuation; pedestrian; integrated optimization model; tabu search

Author resumes: PAN Shu-liang(1986-), male, doctoral student, +86-531-66680117, panshuliang@gmail.com; YU Jie (1979-), female, associate professor, PhD, +86-531-66680118, jie.yu@sdu.edu.cn.

0 引 言

在城市大型公共场所,如体育场、影院等,人员高度聚集,且具有一定的流动性,一旦发生火灾、暴力犯罪等突发事件,将会给群众的生命和财产造成严重损失。如何在第一时间快速、安全地将人员疏散到安全地点,即进行人员的紧急疏散,是减少损失的最佳选择,也是中国各大城市公共场所应急预案所要解决的关键问题。国外在紧急疏散领域早期的研究成果主要是以小汽车作为疏散工具,因而在无小汽车或小汽车无法使用的情况下具有局限性。实际上,包括公交车、校车、需求响应型货车、轨道交通、救护车等大容量交通方式均可作为高效的疏散载体应用于紧急交通疏散。

近年来,公交紧急疏散问题逐步引起学术界重视。研究方法可分为 2 种,其中一种是基于交通仿真工具的公共交通疏散方案的可行性研究,即借助现有仿真工具或研发新的仿真软件或模型来研究公共交通紧急疏散方案的可行性及有效性。胡红等基于 Link-node 仿真对北京奥运的应急交通疏散预案进行了仿真研究^[1];姜长杰等利用 TransCAD 与 TransModeler 对港口突发特事故的应急交通疏散问题进行了仿真研究与论证^[2];Liu 等开发了一个综合疏散模型,并引入无小汽车人员因素^[3-4],但模型中将公交需求转化为客运交通需求;Elmitiny 等利用 VISSIM 仿真软件对比评估了紧急疏散时不同的公交车调度方案^[5];Naghawi 等基于交通仿真评估了多模态交通疏散网络,结果表明,基于公交的紧急疏散方案能够提高受灾人员的转移数量,但同时也造成了一些洲际高速公路部分路段平均排队长度的增加^[6-7];Mastrogiannidou 等基于公共交通疏散模型研发了一套集成微观仿真软件包(VISTA),利用启发式算法在最短时间内将车辆调配到乘车点,并研究了不同车辆数对路径分配的影响^[8]。另一种研究方法是基于数学优化模型求解最佳公共交通乘车点以及疏散路径优化问题。Perkins 等提出了一种紧

急疏散模型,在突发事件时使用公交车作为疏散工具,进行受灾人员(老年人或残疾人)的紧急疏散^[9],但模型的路径规划是静态的,车辆需要沿着预先设定好的行车路径离开影响区域,此外,疏散方案也没有考虑每个疏散点的撤离人数的影响;Sayyady 建立了有容量约束的最小费用流模型,解决了无小汽车人群的疏散问题^[10];Sayyady 等对文献^[10]中的问题进行了更深入的研究,提出一种混合整型线性规划模型来确定公交车的最优疏散路径^[11-12];Margulis 等建立了一个二元整型规划模型,确定公交车到达乘车点以及将人员从受灾区域转移到安全区的最优线路^[13];He 等研究了随机优化模型,确定紧急疏散时利用公交车疏散的人员救援最短线路^[14];Chen 等基于公交车疏散方案提出了一个公交候车点、避难人员乘车点的优化模型,并研究了人口密集区公共交通的疏散效率^[15];Chan 提出了一个两阶段模型以解决无小汽车人员的疏散问题^[16],但模型没有讨论如何引导疏散人员到达指定的乘车点才能提高车辆的利用效率;滕靖等研究了利用公共交通疏散轨道交通客流的应急联动措施,并给出了乘车点的选址方法^[17];王泽等研究了自然灾害下利用公交进行紧急疏散的问题^[18-19]。

然而,以上研究均建立在路径等相关参数的静态化、单一化处理基础上,未将人员撤离的动态引导过程(从建筑物或停车场到乘车点)和公交车路径优化(从乘车点到安全地点)紧密结合,导致公交车疏散效率受到疏散需求、乘车点的疏散人数波动以及可调配公交车数量等多种因素限制。鉴于此,本文提出了一种集成优化模型,将研究问题抽象为行人-公交双层疏散网络,求解行人撤离事发地点并到达公交乘车点的动态引导问题,以及基于乘车点位置与公交车最大载客量约束的行驶路径优化问题。该集成优化模型充分考虑了行人路径引导和公交路径优化的协调,通过两者之间的有效协调显著提高了公交路径适应各乘车点疏散需求分布的性能,并通过动态适应各疏散点的需求分布,最大化可使用公

交车的利用率,从而提高紧急疏散效率。

1 问题描述

为了解决疏散人员引导和公交车疏散路径协调优化的问题,本文将研究问题的现实背景抽象为行人-公交双层疏散网络,见图1。图1中分别用3种不同节点代表疏散过程中的不同地点,其中:圆形节点代表停车场/建筑物,下文简称建筑物;椭圆节点代表疏散人员乘车点;长方形节点代表公交场站。所有2个地点之间可供车辆通行的道路被抽象为图1中节点之间的连线。该模型的目标是在行人-公交双层疏散网络中寻找一个具有最大疏散效率的通行路径。在该抽象网络中,首先需要根据每个乘车点的容量以及撤离人员距乘车点的距离,将疏散人员引导至不同的乘车点。一旦各乘车点的需求已知,下一步便是优化每辆车从公交场站出发,经过乘车点将疏散人员运送到安全区域的路径。考虑到该问题的双层构架特点,可以将其表示为一个需求分配和车辆路径优化问题的集成模型:第1层,引导撤离人员从事发地点建筑物到达指定乘车点,如公交站、地铁站等;第2层,优化公交车从场站出发,途径乘车点,最后到达安全区域的行车路径。

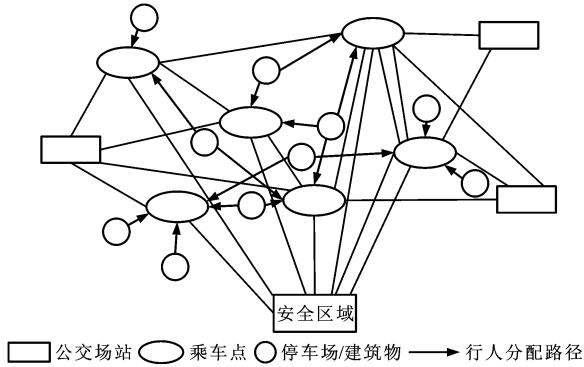


图1 双层疏散网络

Fig. 1 Two-level evacuation network

2 模型建立

2.1 模型假设

为了简化问题,并反映真实情况,提出如下假设。

- (1) 已知撤离人员从建筑物到乘车点的步行时间和公交车到各乘车点间的行程时间。
- (2) 网络中有一个容量足够大的安全区域。
- (3) 已知每个乘车点的位置和容量。
- (4) 已知每辆公交车的最大载客量。
- (5) 公交车将撤离人员运送到安全区域后返回

至原来的场站。

2.2 模型构建

模型的目标函数 Z 为

$$\min Z = w_1 \sum_p \sum_q l_{pq} \sum_k Y_{pqk} - w_2 S \sum_i \sum_p \frac{X_{ip}}{d_{ip}} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k \in K} \sum_{p \in L \cup H_0} Y_{pqk} \geq 1 \quad q \in H_0 \quad (2)$$

$$U_{pk} - U_{qk} + |H| Y_{pqk} \leq |H| - 1 \quad p, q \in H_0 \quad (3)$$

$$\sum_{p \in L \cup H} Y_{pqk} - \sum_{p \in L \cup H_0} Y_{qp k} = 0 \quad q \in L \cup H_0 \quad (4)$$

$$\sum_{p \in L \cup H} \sum_{q \in L \cup H_0} Y_{pqk} \leq 1 \quad (5)$$

$$\sum_k \sum_{p \in L \cup H_0} Y_{pqk} \geq 1 \quad q \in L \quad (6)$$

$$\sum_{p \in H} X_{ip} = D_i \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ip} \leq C_p \quad p \in H \quad (8)$$

$$\sum_{p \in H_0} \sum_{q \in H_0} T_{pqk} \leq Q_k \quad (9)$$

$$T_{pqk} \leq Q_k Y_{pqk} \quad p \in H \cup L, q \in P \quad (10)$$

$$\sum_{p \in L \cup H} \sum_k T_{pqk} - \sum_i X_{iq} \geq 0 \quad q \in H \quad (11)$$

式中: I 为建筑物集合; L 为公交场站集合; H 为乘车点集合; H_0 为乘车点和安全地点集合; K 为公交车集合; d_{ip} 为从建筑物 i 到乘车点 p 的距离; l_{pq} 为乘车点 p, q 间的距离; S 为撤离人员的行走速度; D_i 为建筑物 i 处的疏散需求; C_p 为乘车点 p 的容量; Q_k 为公交车 k 的最大载客量; w_1, w_2 分别为目标函数2个分项所占的权重; X_{ip} 为建筑物 i 中的撤离人员分配到乘车点 p 的人数; X_{iq} 为建筑物 i 中的撤离人员分配到乘车点 q 的人数; T_{pqk} 为 p 和 q 连通时,乘车点 q 处的撤离人员分配到公交车 k 上的人数; U_{pk} 和 U_{qk} 为公交车 k 上消除子环约束的辅助变量; Y_{pqk} 为0-1变量,公交车 k 的行驶路径中包含从 p 到 q 间的路段时为1,否则为0; $Y_{qp k}$ 为0-1变量,公交车 k 的行驶路径中包含从 q 到 p 间的路段时为1,否则为0。

式(1)为目标函数,以使公交车由乘车点至安全区域的总疏散路径最小化和使事发地点至乘车点的疏散人数最大化为优化目标;式(2)限制每个公交场站可调配的车辆数不小于1;式(3)限制了车辆行驶路径中不出现子环;式(4)保证了网络中流量守恒;式(5)限制了一次疏散过程中每辆公交车最多使用一次;式(6)不同于常规的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)约束条件,确保了每条优化路径上至少有一辆公交车,适用于驶向乘车点的

车辆;式(7)为撤离人员分配的约束条件,保证所有的撤离人员均被引导至乘车点,而且总人数不能超过式(8)限制的乘车点容量;式(9)限制了每个乘车点分配的人员数量不超过公交车的最大载客量;式(10)限制只有车辆服务于该线路或乘车点时,撤离人员才能分配给该车辆;式(11)确保所有在乘车点等候的撤离人员均被分配到车辆上并被送至安全区域。

3 模型求解

本文提出的问题可视为一个 NP-hard 问题,对大规模实例建模求解是非常困难的。为了确保该模型适用于实际环境,本文使用基于禁忌搜索的两阶段启发式算法求解该模型:阶段 1 利用元启发算法优化车辆路径,并在此基础上,用松弛模型求解分配到每个乘车点候车的人员数量;阶段 2 利用禁忌搜索算法求解 VRP 的子问题。算法流程见图 2,具体步骤如下。

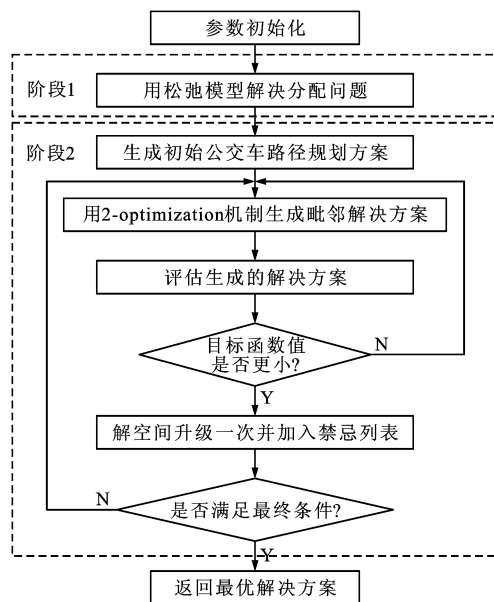


图 2 启发式算法的流程

Fig. 2 Flowchart of proposed heuristic algorithm

3.1 参数初始化

初始化启发式算法中的参数,包括建筑物、乘车点、场站、公交车数量、每辆公交车的最大载客量与禁忌列表的长度。

3.2 利用松弛模型求解分配问题

由于路径优化的约束条件是松弛的,该阶段利用松弛模型解决分配到每个乘车点的候车人数。

3.3 禁忌搜索算法求解 VRP 的子问题

禁忌搜索算法具体流程如下。

Step 1: 生成一个初始解。

Step 1.1: 为每对节点生成一个距离矩阵。

Step 1.2: 找出公交场站与乘车点之间的最短距离。

Step 1.3: 根据每个乘车点候车人数和公交车最大载客量,将撤离人员尽可能多地分配到公交车上。

Step 1.4: 检查公交车是否还有空间容纳更多撤离人员,如果有,转至 Step 1.5,否则转至 Step 1.6。

Step 1.5: 将距离公交车最近的乘车点插入到路径中,然后转至 Step 1.4。

Step 1.6: 将撤离人员送至安全区域,检查乘车点是否还有待撤离人员,如果有,转至 Step 1.2;否则结束。

Step 2: 产生邻域解。搜索解空间需根据现有解生成邻域解。如果新搜索到的解优于现有解,则将新解记录到禁忌列表中,避免已搜索过的同一个点和局部最优解重复。按照定义,如果一个解 S' 为某问题的可行解,而且不在禁忌列表中,那么解 S' 为解 S 的邻域解。禁忌搜索算法可用于局部搜索算法中,以便寻找更优解。

本文的邻域解是根据乘车点的公交车服务顺序或在 2 条不同路径上交换乘车点生成的,这样可能会因为违反车辆最大载客量限制而产生不可行解。因此,为了确保所有邻域解均为可行解,在邻域解加入列表前需检查车辆的可用空间,然后再交换 2 个乘车点。假设有车辆 v_1 、 v_2 ,车辆 v_1 路径上的乘车点为 p_1 ,引导到 p_1 的撤离人员数为 T_1 ,车辆 v_2 线路上的乘车点为 p_2 ,引导到 p_2 的撤离人员数为 T_2 ,若 $T_1 > T_2$,则交换 2 个乘车点, v_1 的路径上将增加另一个乘车点 p_1 ,接载等候在 p_1 的撤离人员。这种方法同样适用于其他案例,以避免启发式算法生成不可行解。

Step 3: 选择策略。选择策略决定了下一个邻域解的选择规则。本文基于第一较优规则搜索邻域解^[20-21],按照预定的顺序获得邻域解,依次判断每个邻域解是否优于当前解。该规则将以第 1 个优于当前解的邻域解作为下一个可行解。

Step 4: 禁忌列表。启发式算法中的当前解经过多次迭代后可能变成劣解,而且可能出现循环。为了防止出现以上问题,使一些最近被检查过的解成为选取下一个解的禁忌(如案例中的公交线路),将禁忌列表 θ 定义为包含禁忌子路径的有限长度列表,该表中存在的每一个子路径都是禁忌采用的。依据选择策略找到较优方案后,将新解加入到禁忌列表中,确保算法不会迂回。由于禁忌列表长度受

L 约束,当 $|\theta|=L$ 时,新解加入时移除最早的解。

Step 5:评价标准。基于第一较优规则,将选取第 1 个优于当前解的邻域解作为更优解,本文定义评价标准为使撤离人员数达到最大,车辆的撤离线路最优,即目标函数取值最小。同时,由于 Step 2 中在产生邻域解的过程中已经加入公交车最大载客量的约束,保证产生的邻域解不会违背该约束,因此,在该评价标准里面无需再考虑该约束。

Step 6:最终标准。算法采用 2-optimization 机制的邻域解构造法进行给定数目的迭代搜索。若当前解的临域中没有搜索到更优解,则选择在候选解中非禁忌的最优解作为新的当前解,即使该最优解无法改进当前状态,这种移动可以称为非改进移动。当给定数目的迭代内均为非改进移动,算法停止并返回所有迭代过程中的最优解。

4 算例分析

4.1 模型输入

利用本文模型进行算例求解,以验证模型的准确性和适用性。模型输入的已知条件见表 1~5。其中,表 5 对角线元素取值为一个很大的数值,是为了避免在求解过程中产生自回路,同时由于网络中往返任意 2 个节点之间的距离不一定相同,因此,该矩阵不是对称矩阵。

表 1 节点和车辆信息

Tab. 1 Node and vehicle information

建筑物个数	乘车点个数	场站个数	车辆数/veh	公交车最大载客量/人
10	6	3	8	45

表 2 每个建筑物中需撤离人数

Tab. 2 Evacuee number at each building

人

建筑物	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
需撤离人数	10	40	36	64	14	10	40	36	64	14

表 3 每个乘车点的容量

Tab. 3 Capacity of each pick-up point

人

乘车点	1	2	3	4	5	6
容量	80	60	70	60	50	80

表 4 建筑物到乘车点的距离

Tab. 4 Distances from buildings to pick-up points

km

节点	乘车点 1	乘车点 2	乘车点 3	乘车点 4	乘车点 5	乘车点 6
建筑物 1	0.3	0.4	0.1	0.2	0.1	0.3
建筑物 2	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1
建筑物 3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
建筑物 4	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3
建筑物 5	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1
建筑物 6	0.3	0.4	0.1	0.2	0.1	0.3
建筑物 7	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1
建筑物 8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
建筑物 9	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3
建筑物 10	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1

表 5 车辆网络的距离矩阵

Tab. 5 Distance matrix of vehicular network

km

节点	乘车点 1	乘车点 2	乘车点 3	乘车点 4	乘车点 5	乘车点 6	公交场站 1	公交场站 2	公交场站 3
乘车点 1	100.0	2.0	3.0	2.0	1.0	3.0	2.0	1.0	1.5
乘车点 2	2.0	100.0	4.0	3.0	1.0	2.0	3.0	4.0	1.5
乘车点 3	3.0	4.0	100.0	1.0	2.0	0.5	1.5	2.5	3.5
乘车点 4	1.0	2.0	3.0	100.0	4.0	2.5	3.5	4.0	4.5
乘车点 5	2.0	1.0	4.0	3.0	100.0	2.5	3.5	4.5	0.5
乘车点 6	2.0	2.0	4.0	3.0	1.0	100.0	3.0	4.0	1.5
公交场站 1	3.0	4.0	1.5	1.0	2.0	0.5	100.0	2.5	3.5
公交场站 2	2.0	4.0	4.0	3.0	1.0	2.0	3.0	100.0	1.5
公交场站 3	1.0	2.0	3.0	4.5	4.0	2.5	3.5	4.0	100.0

4.2 模型输出

以 CPLEX 11.2 软件为计算平台,对该数值案例进行求解,解决撤离人员从建筑物到乘车点的分配问题,以及公交车撤离路径问题。最终案例在疏散过程中,公交车将撤离人员从乘车点送至安全区域,再返回至场站,见图 3。经计算,系统中共需要 8 辆车才能将所有撤离人员运送安全区域,具体计算步骤如下。

Step 1:基于指定乘车点的可达性和容量将撤离人员从建筑物引导至不同的乘车点,具体分配结果见表 6。例如,建筑物 3 处的待撤离人员共 36 人,其中分配至乘车点 2 处 9 人,乘车点 3 处 27 人;乘车点 2 处的容量为 60 人,共分配了 45 人,其中建筑物 3 分配了 9 人,建筑物 4 分配了 3 人,建筑物 7 分配了 33 人。

Step2:求解每辆公交车的疏散路径以及每辆

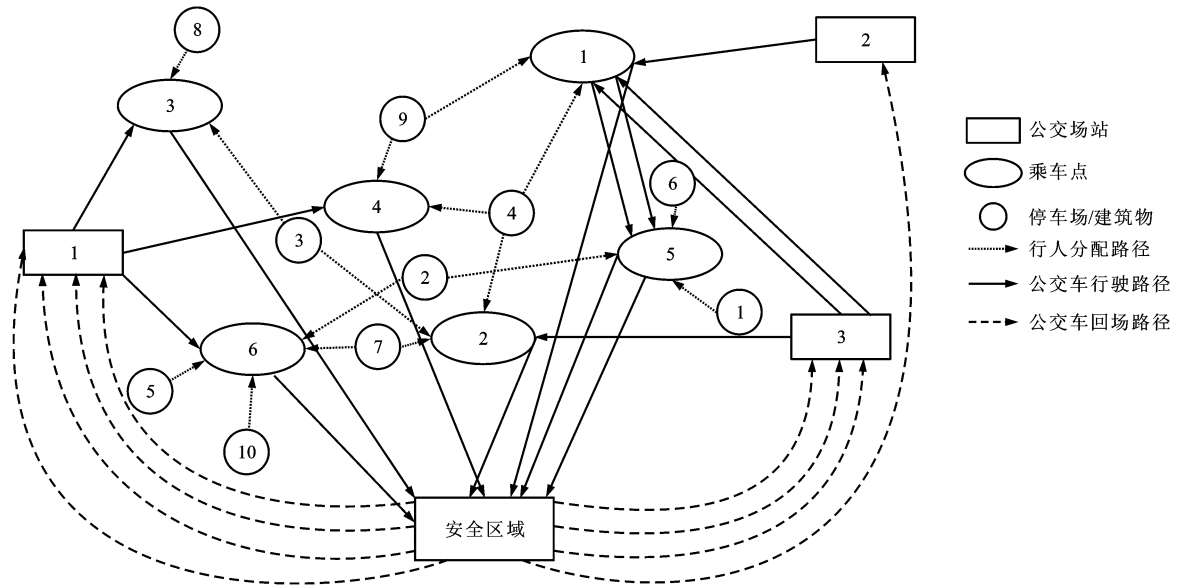


图 3 数值算例结果

Fig. 3 Numerical example results

表 6 分配结果

Tab. 6 Assignment result

人

节点	乘车点 1	乘车点 2	乘车点 3	乘车点 4	乘车点 5	乘车点 6	合计
建筑物 1					10		10
建筑物 2					30	10	40
建筑物 3		9	27				36
建筑物 4	30	3		31			64
建筑物 5						14	14
建筑物 6					10		10
建筑物 7		33				7	40
建筑物 8			36				36
建筑物 9	50			14			64
建筑物 10						14	14
合计	80	45	63	45	50	45	

公交车内的疏散人数,结果见表 7。每条线路分配的
的车辆数由乘车点的待疏散人员数量决定。表 7
中,车辆 4、5 路线相同,因为在乘车点 1 有 80 人等
待疏散,车辆 8 的最大载客量为 45 人,剩余的 35 人
被车辆 4、5 分别运送。模型允许一条路线上分配多
辆公交车。案例中每辆公交车都得到了充分利用。
由表 7 可见,车辆 2、3、6、7、8 已达到最大载客量,而
其余车辆内的疏散人数均小于最大载客量。例如,
车辆 1 仅运送了乘车点 3 剩余的 18 人。

4.3 参数敏感性分析

研究了目标函数不同部分的权重对模型输出结
果和计算时间的影响,表 8 为不同目标函数权重对
总疏散量的影响,可以看出,每项权重的变化对模型

表 7 每辆公交车的疏散路径和总疏散量

Tab. 7 Routing plan and total evacuee number of each bus

公交车	疏散路径	总疏散量/人
1	场站 1→乘车点 3→场站 1	18
2	场站 1→乘车点 4→场站 1	45
3	场站 1→乘车点 6→场站 1	45
4	场站 3→乘车点 1→乘车点 5→场站 3	22+22=44
5	场站 3→乘车点 1→乘车点 5→场站 3	13+28=41
6	场站 1→乘车点 3→场站 1	45
7	场站 3→乘车点 2→场站 3	45
8	场站 2→乘车点 1→场站 2	45

表 8 权重对总疏散量的影响

Tab. 8 Effect of objective weights on total evacuee numbers

权重		目标函数		总疏散量/ 人	时间/s
w_1	w_2	1	2		
1.0	0.0	305	0	328	309
0.9	0.1	305	328	328	567
0.8	0.2	305	328	328	856
0.7	0.3	305	328	328	557
0.6	0.4	305	328	328	392
0.5	0.5	305	328	328	352
0.4	0.6	305	328	340	794
0.3	0.7	305	328	328	1 051
0.2	0.8	305	328	328	734
0.1	0.9	305	328	328	525

输出结果基本没有影响,模型具有很强的鲁棒性,但
是权重对总疏散量造成一定影响。例如在 w_1 为

0.4, w_2 为 0.6 时,总疏散量为 340 人,但案例中在其他权重分配时总疏散量均为 328 人,因此,如果不考虑权重,可能会存在多个有相同目标值的解决方案。

目标函数中不同部分的权重对总疏散量的影响见图 4,每项权重都存在 1 个峰值。当权重 w_1 为 0.4, w_2 为 0.6 时,出现峰值($w_1 + w_2 = 1$),此时,总疏散量最大,为 340 人。在撤离过程中,管理人员可以利用该模型,通过选择适当的权重值,达到预期的疏散效果。

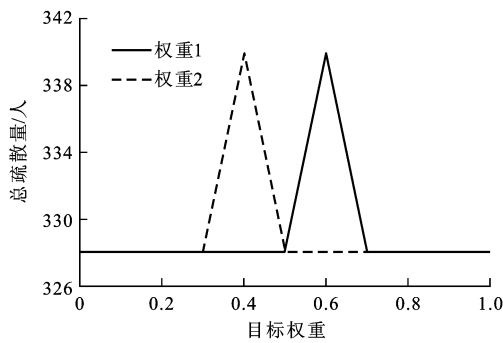


图 4 权重对总疏散量的影响
Fig. 4 Effect of weights on total evacuee numbers

4.4 模型和算法的有效性分析

为了验证算法的求解速度与收敛性,对一个较大网络(表 9 中的情景 4)进行求解,并记录每一次迭代得到的最优目标函数值,得到启发式算法的

迭代收敛曲线,见图 5。从图 5 可以看出,算法仅迭代 6 000 次就收敛到近似的最优目标函数值。

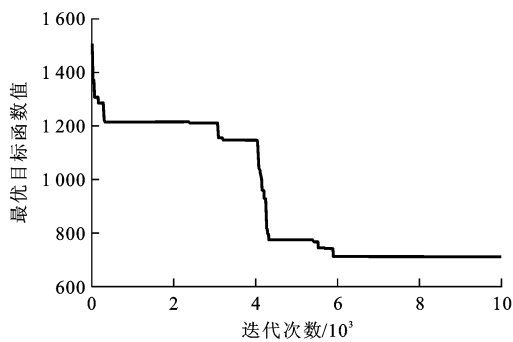


图 5 迭代收敛曲线
Fig. 5 Iterative convergence curve

为进一步验证不同情景下模型的可行性和算法的有效性,利用模型和算法对随机生成的撤离人员需求进行求解,并将结果与 CPLEX 优化软件求解出的最优解进行对比分析,CPLEX 优化软件求解时间上限设定为 3 h,见表 9。从多次求解结果可以看出,各种不同大小的网络启发式算法均能在较短时间内得到一个近似最优解,而 CPLEX 优化软件仅能够对前 4 种情景求解出最优解,其他情景均不能在 3 h 内求得最优解。相比 CPLEX 优化软件,启发式算法能够在 1 h 内求解出全部情景的近似最优解,并且近似最优解与最优解的误差控制在 15% 内。

表 9 不同情景的计算结果
Tab. 9 Calculation results of different scenarios

情景	建筑物个数	乘车点个数	公交场站 个数	车辆数/ veh	公交车载客量/ 人	CPLEX 最优解	启发式算法		差值/%
							近似最优解	求解时间/s	
1	15	6	3	10	145	685	701	640	2.34
2	50	50	1	2	100	431	409	640	-5.10
3	50	50	1	5	50	639	562	620	-12.05
4	100	20	2	50	120	4 155	3 789	3 200	-8.81
5	100	25	1	50	120		4 746	3 400	
6	100	25	2	50	120		3 935	3 419	
7	100	50	1	50	120		4 681	3 520	
8	100	50	2	50	120		4 493	3 482	

5 结 语

针对大型公共场所突发事件发生后以公共交通为载体的人员紧急疏散问题,提出了一种同时考虑行人路径引导和公交路径优化的集成优化模型,并利用基于禁忌搜索的两阶段启发式算法进行方案求解,最后利用算例分析证明了该模型的可行性和适用性。算例分析结果表明,在紧急疏散过程中,疏散

模型能在合理的时间内生成有效的、详细的撤离人员引导方案和公交路径优化方案,同时进行了不同目标函数权重的敏感性分析,发现该模型具有良好的鲁棒性。在高强度开发模式的城区以及城市交通日益拥堵的条件下,本文研究对于快速安全完成人群的紧急疏散提供了理论指导,对完善中国各大城市交通应急管理体系有一定的理论价值。

目前,该模型假设人员分配和线路优化均为静

态的,因此,为了使基于公共交通的紧急疏散模型更真实反映现实世界的交通情况,需要进一步对动态模型进行研究。

参考文献:

References:

- [1] 胡红,蒋光胜,杨孝宽,等. 基于 Link-node 仿真的北京奥运应急交通疏散预案研究[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(11): 1187-1192.
HU Hong, JIANG Guang-sheng, YANG Xiao-kuan, et al. Study on emergency evacuation plan based on link-node simulation for Beijing Olympics[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(11): 1187-1192. (in Chinese)
- [2] 姜长杰,韦献兰. TransCAD 与 TransModeler 在港口突发特重大事故应急交通疏散问题方面的研究与应用[J]. 水运工程, 2008(6): 60-63.
JIANG Chang-jie, WEI Xian-lan. Application of TransCAD and TransModeler to research on traffic evacuation for emergency events in port[J]. Port and Waterway Engineering, 2008(6): 60-63. (in Chinese)
- [3] LIU Y, CHANG G L, LAI X, et al. CAPEVACUATION: the corridor-based emergency traffic evacuation system for Washington DC[C]// Intelligent Transportation Society of America. Proceedings of the 14th World Congress on Intelligent Transportation Systems. Beijing: Intelligent Transportation Society of America, 2007: 1-8.
- [4] LIU Y, CHANG G L, LIU Y, et al. Corridor-based emergency evacuation system for Washington DC: system development and case study[J]. Transportation Research Record, 2008(2041): 58-67.
- [5] ELMITINY N, RAMASAMY S, RADWAN E. Emergency evacuation planning and preparedness of transit facilities: traffic simulation modeling[J]. Transportation Research Record, 2007(1992): 121-126.
- [6] NAGHAWI H, WOLSHON B. Performance of multi-modal evacuation traffic networks: a simulation based assessment[C]// TRB. Proceedings of the 90th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2011: 1-21.
- [7] NAGHAWI H, WOLSHON B. Operation of multimodal transport systems during regional mass evacuations[C]// TRB. Proceedings of the 90th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2011: 22-38.
- [8] MASTROGIANNIDOU C, BOILE M, GOLIAS M, et al. Using transit to evacuate facilities in urban areas: a micro-simulation based integrated tool[C]// TRB. Proceedings of the 88th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2009: 1-15.
- [9] PERKINS J A, DABIPI I K, HAN L D. Modeling transit issues unique to hurricane evacuations: North Carolina's small urban and rural areas[R]. Greensboro: North Carolina A&T State University, 2001.
- [10] SAYYADY F. Optimizing the use of public transit system in no-notice evacuations in urban areas[D]. Starkville: Mississippi State University, 2007.
- [11] SAYYADY F, EKSIOGLU S D. Optimizing the use of public transit system during no-notice evacuation of urban areas[J]. Computers and Industrial Engineering, 2010, 59(4): 488-495.
- [12] EKSIOGLU B, VURAL A V, REISMAN A. The vehicle routing problem: a taxonomic review[J]. Computers and Industrial Engineering, 2009, 57(4): 1472-1483.
- [13] MARGULIS L, CHAROSKY P, FERNANDEZ J, et al. Hurricane evacuation decision-support model for bus dispatch[C]// LACCEI. The Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Mayaguez: LACCEI, 2006: 1-9.
- [14] HE S, ZHANG L, SONG R, et al. Optimal transit routing problem for emergency evacuations[C]// TRB. Proceedings of the 88th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2009: 32-45.
- [15] CHEN C C, CHOU C S. Modeling and performance assessment of a transit-based evacuation plan within a contraflow simulation environment[J]. Transportation Research Record, 2009(2091): 40-50.
- [16] CHAN C P. Large scale evacuation of carless people during short-and long-notice emergency[D]. Tucson: The University of Arizona, 2010.
- [17] 滕靖,徐瑞华. 城市轨道交通突发事件下公交应急联动策略[J]. 铁道学报, 2010, 32(5): 13-17.
TENG Jing, XU Rui-hua. Bus dispatching strategies in urban rail emergent events[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5): 13-17. (in Chinese)
- [18] 王泽. 台风灾害下区域疏散公交集结点选址和车辆路径规划[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WANG Ze. Public transit assembly stations location and vehicle routing plans for regional evacuation under the typhoon disaster[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [19] 徐梁,宋瑞. 自然灾害下的公交疏散路线模型[J]. 物流技术, 2011, 30(6): 147-150, 154.
XU Liang, SONG Rui. Bus evacuation route model in event of natural disaster[J]. Logistics Technology, 2011, 30(6): 147-150, 154. (in Chinese)
- [20] LIAO Fei-xiong, ARENTZE T, TIMMERMAN H. Multi-state supernetworks: recent progress and prospects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 13-27.
- [21] CHAPMAN J R, NOYCE D A. Influence of roadway geometric elements on driver behavior when overtaking bicycles on rural roads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 28-38.