

文章编号:1671-1637(2020)03-0089-11

## 突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化

马昌喜<sup>1</sup>,王超<sup>1</sup>,郝威<sup>2</sup>,刘晶<sup>2</sup>,张兆磊<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 交通运输学院,甘肃 兰州 730070; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**考虑突发公共卫生事件下的疫情防控要求,构建了一种应急定制公交线路优化方法;对城市中已经封闭的小区 and 路段进行筛查,并将这些小区和路段设置为应急定制公交禁行区域;以所有应急定制公交总运行时长最短为目标,以乘客上座率不超过安全阈值为约束,同时考虑供需匹配,构建了突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化模型;设计了遗传算法来求解该模型,采用三段式混合编码方式进行染色体编码,3段染色体分别由定制公交停车场编号、上车站点编号和下车站点编号组成,运用贪婪策略解码染色体;采用模拟案例验证了模型与算法的可行性,并将优化结果与正常情况下基于相同客运任务的定制公交线路优化方案进行了对比。研究表明:在完成相同客运任务的情况下,应急定制公交线路所需车辆数比正常情况下多2辆,车辆的总运行时长也比正常情况下增加6.997 h;正常情况下的定制公交线路优化模型不能直接用于突发公共卫生事件场景,针对应急场景构建的定制公交线路优化模型与算法能从众多备选方案中快速计算得到优化方案,不仅能满足防疫要求,还能满足人们的出行需求。

**关键词:**应急交通;突发公共卫生事件;定制公交;线路;优化;遗传算法

**中图分类号:**U491 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.03.008

## Emergency customized bus route optimization under public health emergencies

MA Chang-xi<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, HAO Wei<sup>2</sup>, LIU Jing<sup>2</sup>, ZHANG Zhao-lei<sup>2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** Considering the requirements of epidemic prevention and control under public health emergencies, an optimization method of emergency customized bus routes was constructed. The closed areas and road sections in the city were screened and set as the emergency customized bus forbidden areas. Taking the occupancy rate of passengers not exceeding the safety threshold as the constraint, and considering the matching of supply and demand, the optimization model of public health emergency customized bus route was constructed by minimizing the total running time of all emergency customized buses. The genetic algorithm was designed to solve the model. The chromosome was encoded by the three-segment hybrid coding method. The three chromosomes were composed of the customized bus parking lot number, boarding station number

收稿日期:2020-03-03

基金项目:国家自然科学基金项目(71861023);教育部人文社会科学研究项目(18YJC630118);中国-黑山科技部国际合作项目(3-2)

作者简介:马昌喜(1979-),男,湖北汉川人,兰州交通大学教授,工学博士,从事交通运输系统优化与设计研究。

通讯作者:郝威(1983-),男,山西太原人,长沙理工大学教授,工学博士。

引用格式:马昌喜,王超,郝威,等.突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化[J].交通运输工程学报,2020,20(3):89-99.

Citation: MA Chang-xi, WANG Chao, HAO Wei, et al. Emergency customized bus route optimization under public health emergencies[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 89-99.

and alighting station number. The chromosomes were decoded by using the greedy strategy. A simulation case was used to verify the feasibilities of the optimization model and algorithm, and the optimization results were compared with the customized bus route optimization scheme based on the same passenger transport task under the normal circumstance. Research result shows that the number of vehicles required for the emergency customized bus route under public health emergencies is 2 more than that under the normal circumstance. The total travel time of vehicles increases by 6.997 h compared with that under the normal circumstance. The customized bus route optimization model under the normal circumstance cannot be directly used in public health emergency scenarios. The optimization model and algorithm of customized bus route based on the emergency scenario can obtain the optimized scheme from many alternatives through the fast calculation. It can not only meet the requirement of epidemic prevention, but also meet people's travel needs under public health emergencies. 9 tabs, 9 figs, 30 refs.

**Key words:** emergency traffic; public health emergency; customized bus; route; optimization; genetic algorithm

**Author resumes:** MA Chang-xi(1979-), male, professor, PhD, machangxi@mail.lzjtu.cn; HAO Wei(1983-), male, professor, PhD, haowei@csust.edu.cn.

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (71861023); Humanities and Social Sciences Research Program of Ministry of Education (18YJC630118); International Cooperation Project of Ministry of Science and Technology of China-Montenegro (3-2)

## 0 引 言

优先发展公共交通是提高城市公交出行比例、缓解交通拥堵的重要方法。传统的公交出行方式存在车厢过度拥挤、乘客等车时间较长、车辆舒适度较低等问题。在这种背景下,定制公交这种高品质的公交出行方式应运而生。定制公交根据需求设定路线,具有定时、定车、定费、定点、定人的特点和一人一座、线路灵活等优势。定制公交线路已在许多城市广泛应用,有效缓解了部分乘客出行难的问题。

近年来,全球各地先后发生了中东呼吸综合征冠状病毒感染、弯曲杆菌感染、新型冠状病毒感染的肺炎等突发公共卫生事件,危及众多人的生命健康安全。重大突发疫情面前,城市公共交通具有保障出行与阻断疫情的双重责任<sup>[1]</sup>。由于定制公交在解决刚性出行需求、回溯乘客乘车信息等方面有重大优势,在突发公共卫生事件下理当发挥其固有优势,承担其专职运送城市居民上下班的重任。而要完成这一重任,需要科学规划定制公交的运营线路。

目前,很多学者针对定制公交线路优化问题展开了研究。王健等<sup>[2]</sup>研究了含乘客出行时间窗约束的多条定制公交线路车辆调度方法,以多辆公交总运营里程最小为目标,考虑乘客的站点约束、公交车容量约束和乘客的出行时间窗,建立了定制公交车

辆调度优化模型,并设计了遗传算法进行求解;郑汉等<sup>[3]</sup>针对需求响应式公交服务质量与运营效率之间存在的问题,提出了一种基于混合车型的需求响应式定制公交优化方法;雷永巍等<sup>[4]</sup>针对互联网定制公交服务模式中存在的路线规划不合理、缺乏成熟的通用模型等问题,以最大需求服务率和最小费用为目标函数,以最大载客量和乘客时间阈值等因素为约束条件,构建了定制公交动态网络调度模型,并设计了基于 Hadoop 平台的并行蚁群算法;胡郁葱等<sup>[5]</sup>构建了考虑多起终点、多车型和乘客混载等运行模式的定制公交线路规划模型,并利用遗传算法改进编码规则,求解了该多目标组合优化问题;王正武等<sup>[6-7]</sup>研究了同时接送模式下需求响应型接驳公交运行路径与车辆调度的协调优化问题,考虑乘客出行时间窗的个性化,构建了发车间隔、车型与车辆路径的一体化优化模型,还研究了同时考虑预定和实时出行需求的车辆路径和调度协调优化问题,提出了一种混合需求条件下多车辆响应的公交线路与调度的两步协调优化方法,建立了车辆运行路线与调度的协调优化模型;Huang 等<sup>[8]</sup>针对需求响应定制公交的网络设计问题,提出了包含静态优化的两阶段优化模型,并根据分支定界法开发了一种精确求解算法;Wang 等<sup>[9]</sup>同时考虑静态和动态乘车请求,构建了定制公交线路多目标优化模型;

Ma 等<sup>[10]</sup>考虑运营成本和社会效益,构建了定制公交网络设计模型,并提出了一种基于分支定界的求解方法;Tong 等<sup>[11]</sup>从时空网络建模的角度出发,提出了一种基于多商品网络流的定制公交线路优化模型;Guo 等<sup>[12]</sup>运用混合整数规划模型求解了多车定制公交线路问题,并采用遗传算法和分支定界算法来求解案例,以验证模型和算法的正确性;Tang 等<sup>[13]</sup>考虑客户生成率、路径行程时间、累积交叉延误、路径距离和路径大小来分析路径选择行为,提出了混合路径 Logit 模型。

在定制公交线路优化过程中,以上文献虽然考虑了出行时间窗、动态网络调度、混合车型以及动态乘车请求等特定要素,但都是基于常规情景下的定制公交线路优化,没有考虑突发情况。部分学者研究了突发情况下公交的应急调度问题,对研究突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化问题具有重要参考价值。徐亚楠<sup>[14]</sup>研究了突发事件下应急接驳公交的疏散方案,分析了突发事件下应急接驳公交的乘客选择行为;潘义强<sup>[15]</sup>研究了城市轨道交通受突发事件影响导致运营中断后的应急公交接驳相关问题,通过地面公交的联动配合来控制突发事件的影响范围,减少乘客的出行延误;姚梦佳<sup>[16]</sup>针对应急疏散时的公交集结点选址和公交线路规划问题展开研究,为大规模区域应急疏散提供了公交运营方案;邢淋丽<sup>[17]</sup>从点-线-面 3 个层面分析了基于公交导向的应急交通组织策略,建立了公交疏散路径多目标规划模型;徐梁等<sup>[18]</sup>研究了自然灾害下的应急交通疏散问题,利用公交作为疏散工具,将公交疏散路线问题归为带时间窗的车辆路径问题,建立了公交疏散路线模型;崔建勋等<sup>[19]</sup>针对城市公交系统应急区域疏散路径规划问题,采用时间扩展网络建模技术表达了疏散公交线网,进而建立了基于公交的疏散路径优化模型,并设计了启发式禁忌搜索算法;段满珍等<sup>[20]</sup>通过描述不确定信息条件下的救援疏散和路径选择问题,构建了以公交疏散问题为基础的应急救援车辆路径选择模型,并将其转化为公交均衡调度问题进行求解;胡华等<sup>[21]</sup>构建了公交车辆多循环应急调度优化模型,将动态系统仿真方法整合到遗传算法中,对优化模型进行了快速求解。

由上可知,突发公共卫生事件下优化应急公交线路十分重要。现有的关于定制公交线路优化问题的研究没有考虑突发公共卫生事件的影响。鉴于此,本文针对突发公共卫生事件下的应急定制公交进行研究,以车辆总运行时间最短为目标,考虑乘客

上座率等关键约束,构建突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化模型,以应对疫情期间居民的出行问题。

## 1 问题描述

某城市有多个应急定制公交停车场和多个乘客上下车站点,且上下车站点分属于不同区域。每个站点可由应急定制公交停车场内的任意一辆定制公交进行服务,但只能由一辆车来服务。一辆应急定制公交可以服务多个站点。由于受到突发公共卫生事件的影响,为保障乘客的出行安全,所载乘客数不能超过安全阈值,且每辆应急定制公交完成一次服务后需回到停车场消毒。停车场中有足够多的车辆来接送乘客。需求出最优的应急定制公交线路方案,以实现路网中所有应急定制公交总运行时间最短为目标,如图 1 所示,路网中共有 3 个定制公交停车场(编号分别为 a、b、c),有 12 个上车站点 1~12 和 12 个下车站点 13~24。由于受到突发公共卫生事件的影响,上车站点 7 及相关路段被封闭,需要在剩余站点和路段中找出最优的运营线路,在确保乘客出行安全的前提下,使车辆总运行时间最短。

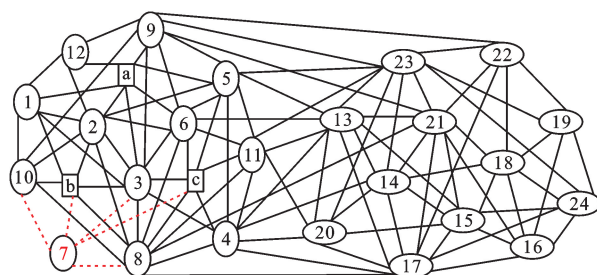


图 1 路网示意

Fig. 1 Schematic of road network

## 2 应急定制公交线路优化模型

### 2.1 模型假设

在构建模型前,为了使模型更容易理解及求解,特做以下假设:现有路网中的应急出行需求大于单辆车容量,需要多辆应急定制公交参与服务;停车场拥有足够多的定制公交;每辆定制公交上座率不得超过安全阈值;考虑突发公共卫生事件的影响,在求解应急定制公交线路优化方案前须筛查备选运营路段,删除高风险路段,即受突发公共卫生事件影响而封闭的小区 and 路段不出现在求解路网中<sup>[22]</sup>;每个出行需求只对应 1 个上车站点和 1 个下车站点,上下车站点不重合,且上下车区域不重合;在一次定制公交运行过程中,1 辆定制公交可服务多个停靠站点,



每个停靠站只被服务 1 次<sup>[23]</sup>。

## 2.2 模型构建

### 2.2.1 优化目标

在突发公共卫生事件下,为了更好地保障乘客的出行安全,尽量减少出行时长,本文在构建应急定制公交线路优化模型时追求所有应急定制公交总运行时长最短,目标函数为

$$\begin{aligned} \min T = & \left[ \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \left( \sum_{i \in P} \sum_{j \in S} d_{ijkp} x_{ijkp} + \right. \right. \\ & \left. \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} d_{ijkp} x_{ijkp} \right) + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \left( \sum_{i \in S} \sum_{j \in D} d_{ijkp} x_{ijkp} + \right. \\ & \left. \sum_{i \in D} \sum_{j \in D} d_{ijkp} x_{ijkp} + \right. \\ & \left. \sum_{i \in D} \sum_{j \in P} d_{ijkp} x_{ijkp} \right) \Big] v^{-1} + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{i \in S \cup D} t m_i y_{ikp} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $P$  为定制公交停车场集合; $S$  和  $D$  分别为上下车站点集合; $T$  为路网中所有应急定制公交车辆的总运行时长; $v$  为定制公交的平均行驶速度; $K$  为定制公交车辆集合; $t$  为乘客平均上下车时间; $m_i$  为第  $i$  个上车站点或下车站点的乘客数; $d_{ijkp}$  为第  $p$  个停车场的第  $k$  辆定制公交从站点  $i$  行驶到站点  $j$  的距离; $x_{ijkp}$  为 0-1 变量,若第  $p$  个停车场的第  $k$  辆定制公交从站点  $i$  行驶到站点  $j$ ,则  $x_{ijkp} = 1$ ,否则  $x_{ijkp} = 0$ ; $y_{ikp}$  为 0-1 变量,若第  $p$  个停车场的第  $k$  辆定制公交服务站点  $i$ ,则  $y_{ikp} = 1$ ,否则  $y_{ikp} = 0$ 。

### 2.2.2 约束条件

应急定制公交线路优化模型中考虑的约束条件主要包括乘客上座率约束和一些特殊约束,具体如下。

(1) 乘客上座率约束,考虑突发公共卫生事件的影响,为更好地保障乘客的出行安全,每辆应急定制公交所载乘客数不超过其安全阈值,即

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{i \in S} y_{ikp} m_i = \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{i \in D} y_{ikp} m_i \leq \alpha C \quad (2)$$

式中: $\alpha$  为突发公共卫生事件下为保障乘客安全而设定的满载率安全阈值系数; $C$  为定制公交的载客容量。

(2) 供需匹配约束,为保障乘客出行,应尽可能地提供足够多的应急定制公交车辆。若由于当前定制公交车辆有限,可提前征集大量常规公交车辆或旅游大巴作为临时应急定制公交车参与运送乘客的任务。需求应不大于供给,即

$$\sum_{i \in S} m_i = \sum_{i \in D} m_i \leq \alpha C Q \quad (3)$$

式中: $Q$  为路网中参与服务乘客的应急定制公交车总数。

(3) 上下车区间约束,限定每辆定制公交只能从上车区域内任意一个上车站点行驶到下车区域内任意一个下车站点,即

$$x_{ijkp} = 1 \quad p \in P, k \in K, i \in S, j \in D \quad (4)$$

(4) 上车站点约束,即

$$y_{ikp} = 1 \quad p \in P, k \in K, i \in S \quad (5)$$

(5) 任意一辆应急定制公交从任意一个停车场出发行驶到第 1 个上车站点,需满足约束

$$x_{ijkp} = 1 \quad p \in P, k \in K, i \in P, j \in S \quad (6)$$

(6) 任意一辆应急定制公交服务完最后一个下车站点后回到其所属的停车场,需满足约束

$$x_{ijkp} = 1 \quad p \in P, k \in K, i \in D, j \in P \quad (7)$$

## 3 算法设计

突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化问题考虑的场景是多对多,即多个上车站点对应多个下车站点。路网中有多个应急定制公交停车场,需要多辆应急定制公交来参与服务,存在的方案众多,很难用常规方法求解。本文尝试采用遗传算法进行求解。

### 3.1 基本步骤

突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化流程如图 2 所示。应急公交线路优化前需要筛查路网中已经封闭的小区及路段,将这些路段设置为应急定制公交禁行路段后再进行公交线路优化。

### 3.2 关键环节

在用程序实现算法的过程中,编码与解码非常重要<sup>[24-27]</sup>。假设某路网中有 4 个定制公交停车场(编号分别为 a~d)、15 个定制公交上车站点(编号分别为 1~15)、15 个定制公交下车站点(编号分别为 16~30),各上车站点的上车人数依次为 23、15、18、30、9、19、36、10、13、28、24、29、31、12 和 31,车辆的载客容量为 40 人·veh<sup>-1</sup>。具体编码与解码过程如下所述。

#### 3.2.1 编 码

本文采用三段式混合编码<sup>[28-30]</sup>方式,每条染色体由 3 段染色体组成,具体包括定制公交停车场段、上车站点段和下车站点段。第 1 段染色体由定制公交停车场编号组成,该段染色体长度为上车站点总数;第 2 段染色体由定制公交上车站点编号组成,其染色体长度也为上车站点总数;第 3 段染色体由定

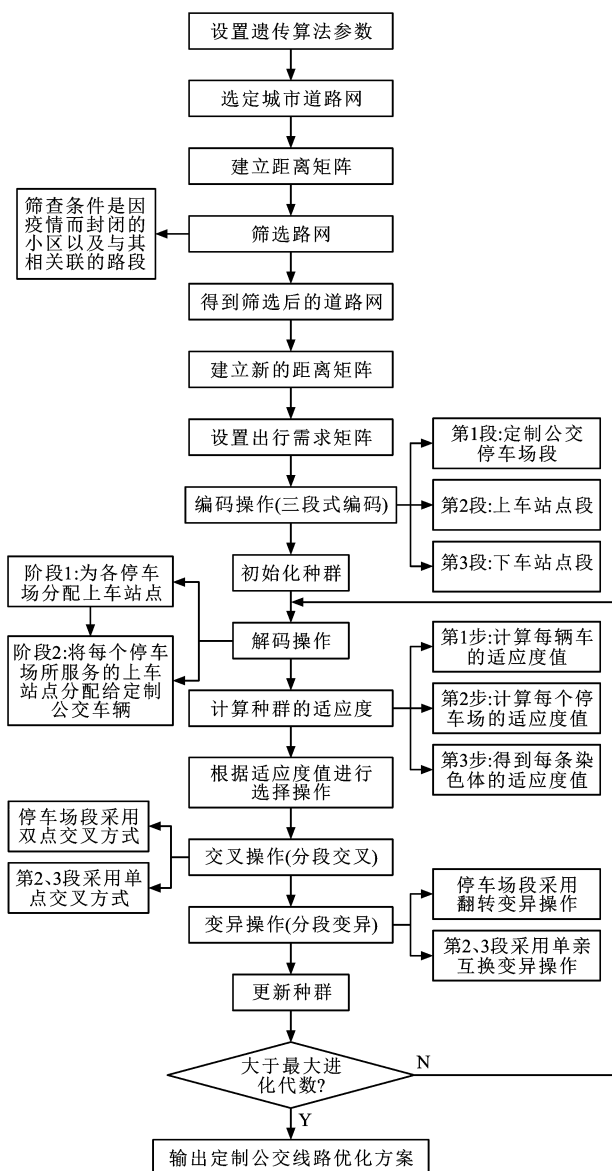


图2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow

制公交下车站点编号组成,其长度为下车站点总数,具体编码操作如下。

(1)第1段染色体编码:定义一个字符数组并初始化;用随机函数随机产生字符数组的下标,即随机产生0~3中的任意一个;采用循环函数根据上车站点总数随机产生第1段染色体。

(2)第2、3段染色体编码:定义2个一维数组,分别存放第2、3段染色体,初始化产生定值序列;随机产生1~15和16~30的随机数;利用交换函数分别交换2个一维数组中与随机数下标对应的数组元素;将交换后的数组元素赋值给一个新的数组,编码完成。

### 3.2.2 解码

采用贪婪策略进行解码操作。解码操作分2步

实现:根据对应关系解码得到每个定制公交停车场所需服务的上车站点;根据定制公交的载客容量,利用贪婪策略进行解码,得到每辆定制公交所需服务的上车站点。

利用计算机随机生成1条三段式混合编码染色体,即c-d-c-b-d-a-b-c-b-c-a-d-a-b-d-4-2-15-8-1-11-5-12-3-9-10-13-7-6-14-30-16-25-17-28-27-18-19-22-20-21-24-26-23-29。解码操作分为两阶段解码:将各上车站点分配给各停车场,解码结果见表1;将每个停车场负责的上车站点分配给定制公交,解码结果见表2。

表1 第1阶段解码结果

Tab. 1 Decoding result of first stage

停车场编号	上车站点
a	11-10-7
b	8-5-3-6
c	4-15-12-9
d	2-1-13-14

表2 第2阶段解码结果

Tab. 2 Decoding result of second stage

停车场编号	车辆编号	上车站点
a	1	11
	2	10
	3	7
b	1	8-5-3
	2	6
c	1	4
	2	15
	3	12
	4	9
d	1	2-1
	2	13
	3	14

## 4 案例

本文以某城市局部路网为研究对象,考虑新冠肺炎疫情影响,对路网进行筛查,删掉封闭小区和相关路段,筛查后的路网示意图见图3。路网中共有44个节点,其中有4个定制公交停车场(编号分别为a~d)、20个上车站点(编号分别为1~20)和20个下车站点(编号分别为21~40)。假设该路网中所有节点连通,各站点信息见表3。

本文采用C++语言,依托CodeBlocks平台编程求解新冠肺炎疫情影响下应急定制公交线路优化

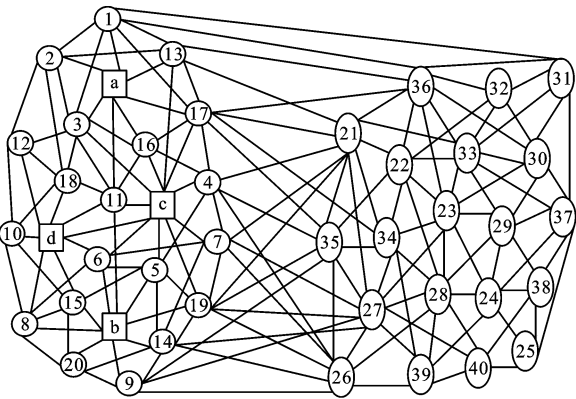


图 3 筛查后的路网示意

Fig. 3 Schematic of road network after screening

问题。设置相关参数为:载客容量为  $40 \text{ 人} \cdot \text{veh}^{-1}$ ,各站点之间的距离由计算机随机生成,遗传算法种群规模为 100,最大进化代数为 100,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1;应急定制公交平均速度为  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,每名乘客的平均上下车时间为 2 min,满载率安全阈值系数为 0.5。

经过程序计算得到的求解结果见表 4,可知考虑新冠肺炎疫情影响下的应急定制公交线路优化方案为:定制公交停车场 a 派出 2 辆定制公交车参与服务;第 1 辆车从停车场出发,首先到达上车站点 11,8 位乘客上车后又到达上车站点 3,这里有 12 位乘客需要上车,乘客上车后车辆依次到达下车站点 28、40,车内所有乘客下车后,该车返回其所属的定制公交停车场;第 2 辆车的服务路径为 a-14-27-a,定制公交停车场 b、c 和 d 均派出 2 辆应急定制公交

表 3 站点信息

Tab. 3 Site information

上车站点编号	下车站点编号	乘客人数
1	38	8
2	24	7
3	28	12
4	21	6
5	32	4
6	37	3
7	34	5
8	25	4
9	23	7
10	39	6
11	40	8
12	22	6
13	26	4
14	27	8
15	31	5
16	33	6
17	29	9
18	30	4
19	35	11
20	36	7

车参与服务,服务路径分别为 b-20-17-5-29-36-32-b、b-18-19-30-35-b、c-4-13-2-21-24-26-c、c-1-8-16-25-38-33-c、d-12-6-7-10-22-39-37-34-d、d-15-9-23-31-d。

表 4 疫情影响下的求解结果

Tab. 4 Solution result under influence of epidemic

公交车编号	途经站点	运行时长/h	乘客数量/人	上座率/%	所有车辆的乘客平均上座率/%	各停车场参与服务的车辆数/veh
1	a-11-3-28-40-a	1.945	20	50.0	40.625	2
2	a-14-27-a	1.303	8	20.0		2
3	b-20-17-5-29-36-32-b	2.195	20	50.0		2
4	b-18-19-30-35-b	1.715	15	37.5		2
5	c-4-13-2-21-24-26-c	1.872	17	42.5		2
6	c-1-8-16-25-38-33-c	1.788	18	45.0		2
7	d-12-6-7-10-22-39-37-34-d	2.195	20	50.0		2
8	d-15-9-23-31-d	1.792	12	30.0		2
总计		14.805	130			8

8 辆应急定制公交运行时间分布见图 4,可知:任意一辆应急定制公交完成本次服务所需最长时间均小于 2.2 h,8 辆车的总运行时长为 14.805 h。

考虑到新冠肺炎疫情的影响,每辆定制公交的

乘客上座率不得超过 50%,求解得到的线路优化方案中每辆车的上座率分布见图 5,可知:参与服务的 8 辆定制公交的乘客上座率均未超过 50%;在满足这一刚性约束的条件下,该线路优化方案中有 3 辆

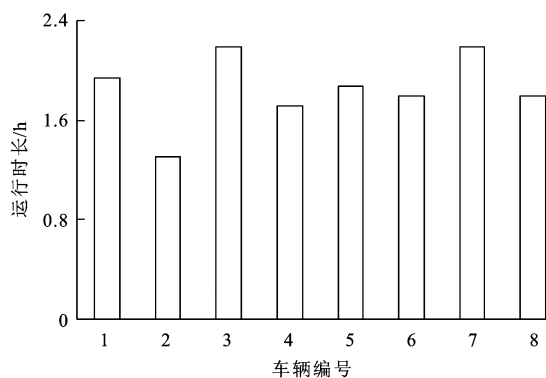


图4 疫情影响下应急定制公交运行时长分布

Fig. 4 Running time distribution of emergency customized buses under impact of epidemic

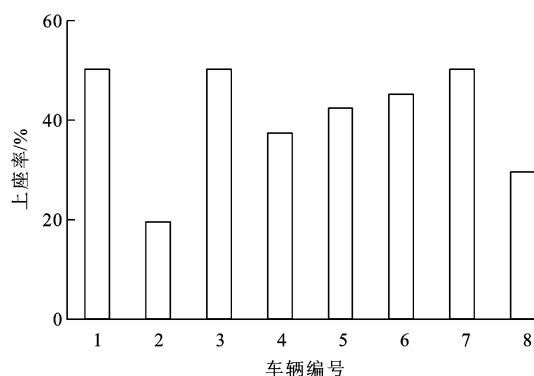


图5 疫情影响下乘客上座率分布

Fig. 5 Distribution of passenger attendance rates under impact of epidemic

车的乘客上座率为50%,有5辆车的乘客上座率超过40%,所有车辆的乘客平均上座率为40.625%,避免了车辆资源浪费。

为了更好地说明突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化问题的特殊性和本文构建的模型和算法的正确性与有效性,基于相同的路网和乘车需求求解正常情况下的定制公交线路优化问题,并与新冠肺炎疫情影响下应急定制公交线路优化问题的求解结果进行对比分析。

正常情况下乘客平均上下车时间设定为0.5 min,且乘客上座率不受限制,求解结果见表5,可知:在相同路网和相同乘车需求情况下,正常情况下的线路优化方案由6辆定制公交组成,其中停车场a、c、d分别派出1辆,停车场b派出3辆。6辆定制公交运行时间分布见图6,可知:6辆车的总运行时长为7.808 h。此线路优化方案中,每辆车的乘客上座率分布见图7,可知:此线路优化方案中有2辆车的乘客上座率接近或达到100%,充分利用了车辆资源。

通过比较上述2种情况的计算结果,发现在完成相同客运任务时,新冠肺炎疫情影响下的应急定制公交线路不同于正常情况,其所需要的车辆数比正常情况下多2辆,车辆的总运行时长也比正常情况下增加6.997 h。可见,正常情况下的定制公交线路优化模型不能直接用于突发公共卫生事件场景。

表5 正常情况下的求解结果

Tab. 5 Solution result under normal circumstance

公交车编号	途经站点	运行时长/h	乘客数量/人	上座率/%	所有车辆的乘客平均上座率/%	各停车场参与服务的车辆数/veh
1	a-17-29-a	0.649	9	22.50	54.167	1
2	b-19-12-7-15-11-35-34-40-31-22-b	2.031	35	87.50		3
3	b-14-1-8-5-16-6-2-25-32-37-24-27-33-38-b	1.914	40	100.00		
4	b-3-4-9-21-23-28-b	1.265	25	62.50		
5	c-13-18-26-30-c	0.933	8	20.00		1
6	d-20-10-39-36-d	1.016	13	32.50		1
总计		7.808	130			6

为了分析满载率安全阈值系数 $\alpha$ 对优化方案的影响,基于相同的客运任务,分别求解了 $\alpha$ 取0.45、0.40、0.35和0.30时的应急定制公交线路优化方案,求解结果分别见表6~9,可见:当 $\alpha$ 取值不同时,计算得到的应急定制公交线路优化方案不同,参与服务的应急定制公交车数量和总运行时长也在发

生变化(图8、9)。由图8、9可知:当 $\alpha$ 不断减小时,所需车辆总数不断增加,说明当定制公交所能乘坐的乘客人数降低时,需要增加定制公交的车辆数才能完成相同的客运任务;适当增加 $\alpha$ ,提高应急定制公交的许可载客人数,在一定程度上能减少车辆的总运行时长。

表 6 疫情影响下  $\alpha=0.45$  时的求解结果Tab. 6 Solution result under influence of epidemic when  $\alpha=0.45$ 

公交车编号	途经站点	运行时长/h	乘客数量/人	上座率/%	所有车辆的乘客 平均上座率/%	各停车场参与服务 的车辆数/veh
1	a-19-18-6-30-37-35-a	2.038	18	45.00	32.500	1
2	b-7-4-34-21-b	1.476	11	27.50		4
3	b-11-17-40-29-b	1.822	17	42.50		
4	b-12-15-16-33-22-31-b	1.797	17	42.50		
5	b-5-32-b	0.964	4	10.00		2
6	c-13-10-26-39-c	1.360	10	25.00		
7	c-3-28-c	1.267	12	30.00		3
8	d-1-9-23-38-d	1.665	15	37.50		
9	d-2-14-24-27-d	1.915	15	37.50		
10	d-20-8-25-36-d	1.401	11	27.50		
总计		15.705	130			10

表 7 疫情影响下  $\alpha=0.40$  时的求解结果Tab. 7 Solution result under influence of epidemic when  $\alpha=0.40$ 

公交车编号	途经站点	运行时长/h	乘客数量/人	上座率/%	所有车辆的乘客 平均上座率/%	各停车场参与服务 的车辆数/veh
1	a-9-14-27-23-a	1.765	15	37.50	32.500	5
2	a-13-4-15-31-26-21-a	1.615	15	37.50		
3	a-1-11-38-40-a	1.681	16	40.00		
4	a-16-33-a	0.871	6	15.00		
5	a-3-28-a	1.442	12	30.00		
6	b-12-6-7-22-37-34-b	1.599	14	35.00		1
7	c-17-8-35-29-c	1.483	13	32.50		1
8	d-19-35-d	1.151	11	27.50		3
9	d-20-10-39-36-d	1.658	13	32.50		
10	d-2-5-18-24-30-32-d	1.615	15	37.50		
总计		14.880	130			10

表 8 疫情影响情况下  $\alpha=0.35$  时的求解结果Tab. 8 Solution result under influence of epidemic when  $\alpha=0.35$ 

公交车编号	途经站点	运行时长/h	乘客数量/人	上座率/%	所有车辆的乘客 平均上座率/%	各停车场参与服务 的车辆数/veh
1	a-15-4-31-21-a	1.301	11	27.50	25.000	4
2	a-8-1-38-25-a	1.467	12	30.00		
3	a-9-6-5-37-32-23-a	1.699	14	35.00		
4	a-18-11-30-40-a	1.492	12	30.00		
5	b-20-16-33-36-b	1.508	13	32.50		4
6	b-13-26-b	0.939	4	10.00		
7	b-3-28-b	1.342	12	30.00		
8	b-12-22-b	0.796	6	15.00		
9	c-17-29-c	1.069	9	22.50		3
10	c-14-7-27-34-c	1.708	13	32.50		
11	c-2-24-c	1.037	7	17.50		
12	d-10-39-d	1.096	6	15.00		2
13	d-19-35-d	1.151	11	27.50		
总计		16.605	130			13



表 9 疫情影响下  $\alpha=0.30$  的求解结果

Tab. 9 Solution result under influence of epidemic when  $\alpha=0.30$

公交车编号	途经站点	运行时长/h	乘客数量/人	上座率/%	所有车辆的乘客 平均上座率/%	各停车场参与服务 的车辆数/veh
1	a-16-8-25-33-a	1.260	10	25.00	23.214	4
2	a-12-22-a	0.846	6	15.00		
3	a-14-27-a	1.303	8	20.00		
4	a-13-1-26-38-a	1.567	12	30.00		
5	b-19-35-b	1.376	11	27.50		2
6	b-17-29-b	1.144	9	22.50		
7	c-9-23-c	0.962	7	17.50		6
8	c-4-21-c	0.996	6	15.00		
9	c-20-36-c	1.087	7	17.50		
10	c-10-15-31-39-c	1.351	11	27.50		
11	c-3-28-c	1.267	12	30.00		
12	c-18-6-37-30-c	1.312	7	17.50		
13	d-2-7-24-34-d	1.517	12	30.00		2
14	d-5-11-40-32-d	1.617	12	30.00		
总计		17.605	130			14

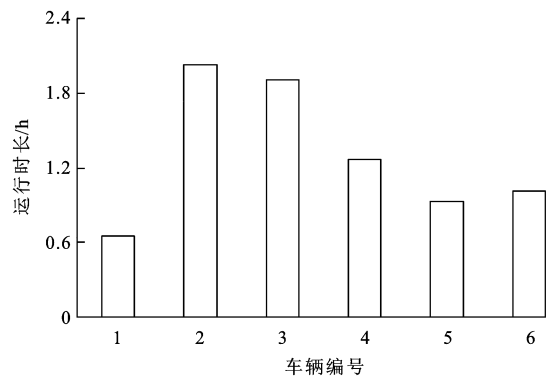


图 6 正常情况下定制公交运行时间分布

Fig. 6 Running time distribution of customized buses under normal circumstance

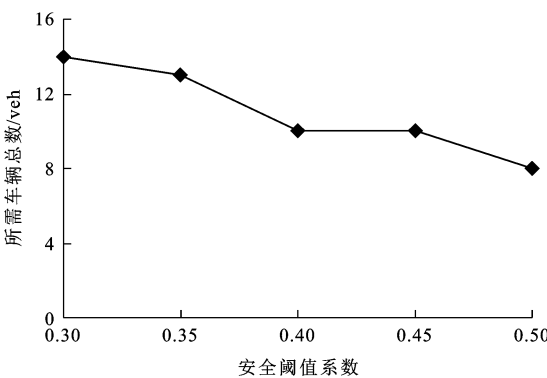


图 8 疫情影响下安全阈值系数与所需车辆总数的关系

Fig. 8 Relationship between safety threshold coefficient and total number of vehicles needed under influence of epidemic

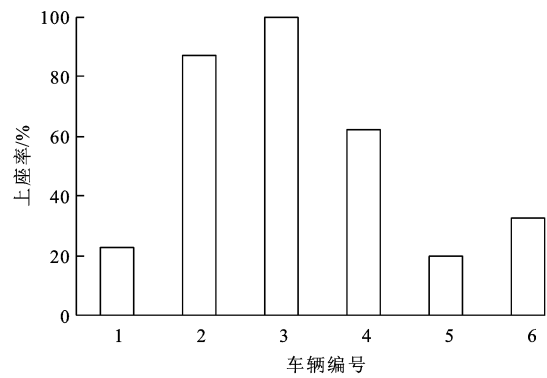


图 7 正常情况下乘客上座率分布

Fig. 7 Distribution of passenger attendance rate under normal circumstance

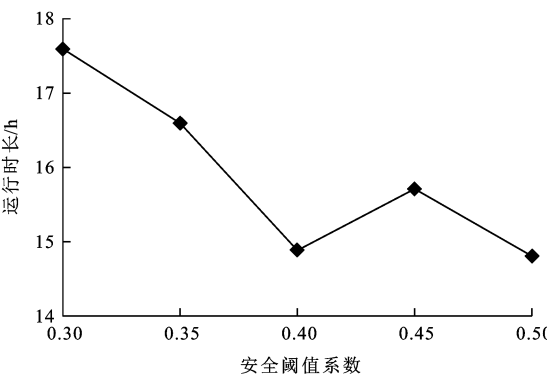


图 9 疫情影响下安全阈值系数与车辆运行时长的关系

Fig. 9 Relationship between safety threshold coefficient and vehicle running time under influence of epidemic

## 5 结 语

(1)以突发公共卫生事件为背景研究了应急定制公交的线路优化问题。在进行具体线路优化前先进行了备选公交站点及运营路段的筛查工作,确定了应急定制公交禁行区域及运营路段。

(2)同时考虑突发公共卫生事件下的防疫要求和人们的出行需求,构建了应急定制公交线路优化模型。通过设置合理的目标函数与约束条件,保证了应急定制公交车辆总运行时间最短、公交满载率低于安全阈值且供需匹配。

(3)设计了基于三段式混合编码的遗传算法,求解了应急定制公交优化模型,得到了同时满足防疫要求和乘客出行需求的线路优化方案。通过对比研究发现,突发公共卫生事件下定制公交系统所需的车辆数比正常情况下多,车辆的总运行时间比正常情况略长。求解了不同 $\alpha$ 取值下应急定制公交线路优化方案,通过对比发现,随着 $\alpha$ 取值的变化,最优方案会发生变化,所需车辆总数及车辆的总运行时长也随之变化;在满足防疫要求的前提下,适当增加应急定制公交的许可载客人数,在一定程度上能减少应急车辆数,缩短车辆的总运行时长。

(4)本文构建的模型和设计的算法可应用于突发公共卫生事件下的应急定制公交线路优化。考虑动态的疫情信息和交通信息,开发出界面友好、运算效率更高的突发公共卫生事件下应急定制公交APP是下一阶段的研究内容。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 周继彪,马昌喜,董升,等.新冠肺炎疫情下城市公共交通非常规防疫策略——以宁波市为例[J].中国公路学报,http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20200306.1450.004.html.  
ZHOU Ji-biao, MA Chang-xi, DONG Sheng, et al. Unconventional prevention strategies for urban public transport in the COVID-19 epidemic: taking Ningbo City as a case study[J]. China Journal of Highway and Transport, http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20200306.1450.004.html. (in Chinese)
- [2] 王健,曹阳,王运豪.考虑出行时间窗的定制公交线路车辆调度方法[J].中国公路学报,2018,31(5):143-150.  
WANG Jian, CAO Yang, WANG Yun-hao. Customized bus route vehicle schedule method considering travel time windows[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(5): 143-150. (in Chinese)
- [3] 郑汉,张星臣,王志美.混合车型需求响应公交服务定制问

- 题研究[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(2):157-163.  
ZHEN Han, ZHANG Xing-chen, WANG Zhi-mei. Design of demand-responsive service by mixed-type vehicles[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2): 157-163. (in Chinese)
- [4] 雷永巍,林培群,姚凯斌.互联网定制公交的网络调度模型及求解算法[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(1):157-163.  
LEI Yong-wei, LIN Pei-qun, YAO Kai-bin. The network scheduling model and its solution algorithm of internet customized shuttle bus[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1): 157-163. (in Chinese)
- [5] 胡郁葱,陈栩,罗嘉陵.多起终点多车型混载的定制公交线路规划模型[J].广西师范大学学报(自然科学版),2018,36(4):1-11.  
HU Yu-cong, CHEN Xu, LUO Jia-ling. Network design model of customized bus in diversified operation of multi-origin-destination and multi-type vehicle mixed load[J]. Journal of the Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(4): 1-11. (in Chinese)
- [6] 王正武,陈涛,宋名群.同时接送模式下响应型接驳公交运行路径与调度的协调优化[J].交通运输工程学报,2019,19(5):139-149.  
WANG Zheng-wu, CHEN Tao, SONG Ming-qun. Coordinated optimization of operation routes and schedules for responsive feeder transit under simultaneous pick-up and delivery mode[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(5): 139-149. (in Chinese)
- [7] WANG Zheng-wu, YU Jie, HAO Wei, et al. Two-step coordinated optimization model of mixed demand responsive feeder transit[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146(3): 04019082.
- [8] HUANG Di, GU Yu, WANG Shuai-an, et al. A two-phase optimization model for the demand-responsive customized bus network design[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111: 1-21.
- [9] WANG Chao, MA Chang-xi, XU Xue-cai. Multi-objective optimization of real-time customized bus routes based on two-stage method[J]. Physica A, 2020, 537: 122774.
- [10] MA Ji-hui, YANG Yang, GUAN Wei, et al. Large-scale demand driven design of a customized bus network: a methodological framework and Beijing case study[J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017: 3865701.
- [11] TONG Lu, ZHOU Lei-shan, LIU Jiang-tao, et al. Customized bus service design for jointly optimizing passenger-to-vehicle assignment and vehicle routing[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 85: 451-475.
- [12] GUO Rong-ge, GUAN Wei, ZHANG Wen-yi. Route design problem of customized buses: mixed integer programming model and case study[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2018, 144(11): 04018069.
- [13] TANG Jin-jun, WANG Yi-wei, HAO Wei, et al. A mixed

- path size logit-based taxi customer-search model considering spatio-temporal factors in route choice[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 21(4): 1-12.
- [14] 徐亚楠. 城市轨道交通应急接驳公交疏散预案研究[D]. 南京:东南大学,2018.
- XU Ya-nan. Study on emergency evacuation plan for urban rail transit[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [15] 潘义强. 城市轨道交通突发中断下的应急公交接驳研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- PAN Yi-qiang. Research on emergency feeder bus service under the disruption of urban rail transit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 姚梦佳. 公交车辆应急疏散集结点选址和路径规划模型[D]. 南京:东南大学,2015.
- YAO Meng-jia. Pick-up location and bus-routing model for bus-based emergency evacuation [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [17] 邢淋丽. 应急交通组织下的公交车辆疏散路径规划模型[D]. 南京:东南大学,2017.
- XING Lin-li. Bus routing model for transit-based evacuation with emergency traffic organization[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [18] 徐 梁,宋 瑞. 自然灾害下的公交疏散路线模型[J]. 技术与方法,2011,30(6):147-150,154.
- XU Liang, SONG Rui. Bus evacuation route model in event of natural disaster [J]. *Techniques and Methods*, 2011, 30(6): 147-150, 154. (in Chinese)
- [19] 崔建勋,安 实,崔 娜. 基于时间扩展网络的区域疏散公交路径规划[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(3): 64-69.
- CUI Jian-xun, AN Shi, CUI Na. Route planning of public transit for regional evacuation based on time-expanded network[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(3): 64-69. (in Chinese)
- [20] 段满珍,陈 光,董 博,等. 不确定信息下应急救援路径选择模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(4):173-181.
- DUAN Man-zhen, CHEN Guang, DONG Bo, et al. Emergency rescue path selection model under uncertain information[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(4): 173-181. (in Chinese)
- [21] 胡 华,高云峰,刘志钢,等. 地铁运营中断下公交衔接疏运车辆应急调度模型及算法[J]. 铁道学报,2018,40(5):31-37.
- HU Hua, GAO Yun-feng, LIU Zhi-gang, et al. Model and algorithm for bridging bus emergency dispatching problem during metro operational disruptions[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40 (5): 31-37. (in Chinese)
- [22] MA Chang-xi, YANG Dong. Public transit network planning in small cites considering safety and convenience[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, 12(1): 1-12.
- [23] 王 超,马昌喜. 基于遗传算法的定制公交多停车场多车线路优化[J]. 交通信息与安全,2019,37(3):109-117.
- WANG Chao, MA Chang-xi. Optimization of parking lot and multi-vehicle route of customized buses based on genetic algorithm[J]. *Traffic Information and Security*, 2019, 37(3): 109-117. (in Chinese)
- [24] HAO Wei, MA Chang-xi, MOGHIMI B, et al. Robust optimization of signal control parameters for unsaturated intersection based on tabu search-artificial bee colony algorithm[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 32015-32022.
- [25] 贺韵竹,杨忠振. 自营货车与公交车协同快件配送优化[J]. 交通运输工程学报,2017,17(6):97-103.
- HE Yun-zhu, YANG Zhong-zhen. Optimization of express distribution by cooperatively using private trucks and buses[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(6): 97-103. (in Chinese)
- [26] 杨忠振,穆 雪,朱晓聪. 交通流变化下的多配送中心-多需求点配送网络优化模型[J]. 交通运输工程学报,2015,15(1): 100-107.
- YANG Zhong-zhen, MU Xue, ZHU Xiao-cong. Optimization model of distribution network with multiple distribution centers and multiple demand points considering traffic flow change[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(1): 100-107. (in Chinese)
- [27] 代存杰,李引珍,马昌喜,等. 时间依赖需求下多车型快速公交发车频率优化[J]. 交通运输工程学报,2017,17(1):129-139.
- DAI Cun-jie, LI Yin-zhen, MA Chang-xi, et al. Optimization of departure frequency for bus rapid transit with multi-type vehicles under time-dependent demand[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(1): 129-139. (in Chinese)
- [28] 马昌喜,何瑞春,熊瑞琦. 基于双层规划的危险化学品配送路径鲁棒优化[J]. 交通运输工程学报,2018,18(5):165-175.
- MA Chang-xi, HE Rui-chun, XIONG Rui-qi. Robust optimization on distributing routes of hazardous materials based on bi-level programming[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(5): 165-175. (in Chinese)
- [29] MA Chang-xi, HAO Wei, HE Rui-chun, et al. Distribution path robust optimization of electric vehicle with multiple distribution centers[J]. *Plos One*, 2018, 13(3): e0193789.
- [30] MA Chang-xi, HE Rui-chun, ZHANG Wei. Path optimization of taxi carpooling[J]. *Plos One*, 2018, 13(8): e0203221.