

文章编号:1672-9331(2018)03-0021-06

# 基于区间路网信息的机场定制巴士路径优化

郭亚然, 周和平, 彭 巍

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为了满足旅客个性化和多样化的接驳需求,提出了一种需求响应型的机场定制巴士,并在区间路网信息下对机场定制巴士的路径优化进行了研究。在综合考虑乘客和运营企业的利益后,以需求满足最大化、车辆行驶成本和乘客时间成本最小化以及终点时间偏差最小化为目标,构建了区间路网信息下的机场定制巴士路径优化模型,并设计出一种模拟退火和遗传混合的算法进行模型求解。最后采用模拟机场定制巴士数据的方法来对构建的路径优化模型和算法进行了验证。研究结果表明,模型和算法合理有效,可操作性强。

**关键词:** 机场定制巴士; 区间路网阻抗; 区间最短路径; 路径优化; 定制需求; 混合模拟退火遗传算法

中图分类号: U491

文献标识码: A

## Airport custom bus route optimization based on interval road network information

GUO Ya-ran, ZHOU He-ping, PENG Wei

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology,  
Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to satisfy passengers' personalized and diversified connection requirements, a demand-responsive airport-customized bus was proposed, and the optimization of the airport's customized bus route was studied under the regional road network information. After comprehensively considering the interests of passengers and operating companies, this paper aims to maximize the demand for satisfaction, minimize the cost of driving and passengers, minimize the time cost of passengers, and establish a path optimization model under the information of regional road network. A simulated annealing and genetic mixing algorithm was used to solve the model. The model and algorithm of path optimization are validated by simulating the customized bus data of the airport. The results show that the model and algorithm are reasonable and effective, and the operability is strong.

**Key words:** airport customized bus; impedance of interval network; interval shortest path; route optimization; custom requirements; hybrid simulated annealing genetic algorithm

随着航空运输的迅猛发展,机场数目和旅客人数不断增加,航空运输陆侧交通面临的压力越

来越大。与机场相衔接的道路客运由于接驳模式单一、缺乏灵活性,加上日益拥堵的城市交通,道

收稿日期:2018-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178061)

通讯作者:周和平(1971-),男,湖北监利人,长沙理工大学副教授,主要从事交通运输规划与管理方面的研究。E-mail:154180776@qq.com

路交通表现出的不确定性,使得航空旅客整体出行效率变低,因此作者提出需求响应型的机场定制巴士。它依照不同乘客的特殊要求,兼顾道路交通情况的不确定性,灵活地定制线路、运营时间和服务站点<sup>[1]</sup>。为了提高接驳运输组织的效率,提升接驳服务水平,有必要对机场定制巴士路径优化进行研究,为加强城际运输联系提供理论支持。

机场定制巴士的路径优化问题属于动态的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem,简称VRP)。对于动态VRP的研究,葛显龙等<sup>[2]</sup>引入了时间轴,将动态问题转换为静态,成功地解决了动态联合配送问题;Goodson等<sup>[3]</sup>率先想出了基于补货的铺展运营策略,解决了需求随机和等待时间约束的VRP问题。针对VRP的求解,国内外学者提出了多种算法,主要分为精确算法和启发式算法两类<sup>[4]</sup>。黄刚等<sup>[5]</sup>对带时间窗的IVRP-PD问题采用混沌免疫克隆选择算法求解。董蕊等<sup>[6]</sup>利用禁忌搜索算法来求解有时间窗约束的累积性VRP问题。张文博等<sup>[7]</sup>采用模拟退火算法对基于动态需求的带软时间窗的VRP问题进行了求解。Erbao Cao等<sup>[8]</sup>研究了一类基于区间需求的车辆路径问题(VRPID),基于区间数容忍可能度的概念,建立了非线性区间规划的车辆路径规划模型,并提出了一种人工免疫混合算法。Oscar等<sup>[9]</sup>提出了一种整合模拟退火和新型交叉算子的模型算法。SHI Jian等<sup>[10]</sup>设计了一种改进的迭代局部搜索算法,将构造算法、局部算子及摄动机制的分割交付考虑进来,以解决车辆路径问题。

目前,对车辆路径优化的研究大多没有充分考虑路网的不确定性,而现实中的路网由于交通拥堵、交通控制策略的改变以及天气等多种因素的影响,而具有区间不确定性的特点。因此,区间路网信息下机场定制巴士路径优化问题实质上是一个不确定性车辆路径问题。此外,由于机场定制巴士的行驶路网阻抗考虑的是区间阻抗,两需求点之间车辆具体行驶路径的不同将直接造成乘客在等候站点的等待时间以及上车后的在途时间存在较大的差异,最终会导致乘客对机场定制巴士满意度的变化。这一问题可以通过鲁棒最短路来解决,因此作者结合鲁棒最短路模型<sup>[11,12]</sup>来对区间阻抗下的路径进行优化。

## 1 机场定制路径优化模型

为了更好地建立模型求解结果,依照机场定制巴士的需求量、区间路网信息以及乘客的期望到站时间等要素,构建机场定制巴士的路径优化模型。考虑路网采用的是区间数,模型以预排班和发车为临界,分为发车前预排班和发车前动态优化两个阶段,总结两个阶段的特点构建出统一的模型。

### 1.1 决策变量

$y_{uvk}^h$  和  $z_{ik}^h$  为模型的决策变量,其表达式为:

$$y_{uvk}^h = \begin{cases} 1; \text{车辆 } k \text{ 第 } h \text{ 趟从需求点 } u \text{ 前} \\ \text{往下一需求点 } v \text{ 接驳} \\ 0; \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

$$z_{ik}^h = \begin{cases} 1; \text{订单 } i \text{ 与车辆 } k \text{ 第 } h \text{ 趟匹配} \\ 0; \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 目标函数

模型属于带时间窗约束的VRP问题,在当天控制中心开始服务后,控制系统发车前  $m$  h 产生的所有订单进行排班,系统的目标是在满足约束条件下给乘客规划出一条最优的线路,使得定制巴士的行驶成本最少、乘客的时间成本最小、终点时间窗偏差最小、定制巴士满足需求最大。通过权重函数将其转化为如下的单目标优化模型:

$$\begin{aligned} \min W = & \alpha \cdot \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L (b_{uv} y_{uvk}^h - x_{0tk}^h) C_k + \\ & \beta \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L z_{ik}^h o_i (R_i C_{R_i} + T_i C_{T_i}) + \\ & \mu \cdot \left[ C_1 \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L \frac{\max(E_k^h - t_k^{h-}, 0)}{t_k^{h+} - t_k^{h-}} + \right. \\ & \left. M \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L \max(t_k^{h+} - L_k^h, 0) \right] - \\ & \gamma \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L z_{ik}^h o_i C_o. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $o_i$  为第  $i$  个订单中的同行人数; $C_o$  为满足一个需求运营公司可以获得的收益; $K$  为定制巴士的数量; $L$  为定制巴士的运行趟数; $N$  为总的订单数; $C_k$  为车辆  $k$  行驶的单位鲁棒时间成本价值; $R_i$  为订单  $i$  的车内鲁棒时间成本,其中, $R_i = f(y_{uvk}^h)$ ,其需要依据车辆的路径计算得到; $C_{R_i}$  为订单  $i$  的乘客单位车内鲁棒时间成本价值; $T_i$  为

中间站点启停时间;  $C_{Ti}$  为订单  $i$  的乘客中间站点启停时间成本;  $C_1$  为定制巴士早于到达机场的惩罚系数;  $M$  为定制巴士晚于到达机场的惩罚系数;  $x_{0tk}^h$  为在特定的情景下从起点 0 到终点  $t$  车辆  $k$  第  $h$  趟走过的最短路, 是一个随  $y_{uvk}^h$  变量取值而定的变量, 当路网中  $y_{uvk}^h$  取值全部完成后, 能够得到 1 条由  $y_{uvk}^h$  取值为 1 的路径, 该路径上的路段区间阻抗取上界值, 其他路段区间阻抗取下界值。

$[E_k^h, L_k^h]$  为第  $k$  辆车第  $h$  趟乘客的期望到达时刻,  $E_k^h$  和  $L_k^h$  分别为乘客期望最早到达时刻和最晚到达时刻。

$[t_k^{h-}, t_k^{h+}]$  为第  $k$  辆车第  $h$  趟定制巴士的预计到达机场的时间,  $t_k^{h-}$  和  $t_k^{h+}$  分别为第  $k$  辆车第  $h$  趟定制巴士的预计到达机场的最早时间和最晚时刻:

$$t_k^{h-} = \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V (x_{uvk}^h a_{uv}) + w_k^h + G_k^h. \quad (4)$$

$$t_k^{h+} = \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V (x_{uvk}^h b_{uv}) + w_k^h + G_k^h. \quad (5)$$

式中:  $w_k^h$  为机场定制巴士第  $k$  辆第  $h$  趟停靠点启停总等待时间;  $G_k^h$  为机场定制巴士第  $k$  辆第  $h$  趟的起点发车时刻;  $a_{uv}$  和  $b_{uv}$  分别为区间阻抗值下、上界。

鲁棒优化方法是解决区间不确定型决策的有效方法, 由于路段阻抗为区间值, 因此在求解时, 通过鲁棒偏差方法求得的鲁棒解能够使得其所有的情景下, 该解的目标值和最佳目标值的差值的最大值是最小的, 鲁棒偏差一般采用的是最小最大后悔值。

### 1.3 约束条件

1) 车辆接送能力约束。约束保证在工作时间内定制巴士的上座率不能超出车辆的额定载客量。

$$\sum_{i=1}^N z_{ik}^h o_i \leq Q_k; \forall k \in \{1, 2, \dots, K\},$$

$$h \in \{1, 2, \dots, L\}. \quad (6)$$

式中:  $Q_k$  为第  $k$  辆定制巴士的额定载客限额。

2) 车辆—订单匹配约束。为了鼓励乘客提前预定定制公交, 对于提前 4 h 预定并且进入预排班阶段的乘客必须保证其得到服务。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L z_{ik}^h = 1; \forall i \in D. \quad (7)$$

式中:  $D$  为进入预排阶段的订单。

3) 对于后续没有进入预排班阶段的订单, 由于时间和车载量的限制, 可能会出现拒绝服务该订单的情况, 因此最多只有 1 辆定制巴士和该订单匹配。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L z_{ik}^h \leq 1; \forall i \notin D. \quad (8)$$

4) 定制巴士的车辆流量守恒约束。该约束保证车辆进入和离开临时停靠站点的定制巴士的数目要保持一致。

$$\sum_{u=1}^U \sum_{h=1}^L y_{uvk}^h = \sum_{v=1}^V \sum_{h=1}^L y_{uvk}^h = \sum_{h=1}^L z_{ik}^h;$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, k \in \{1, 2, \dots, K\}. \quad (9)$$

5) FIFO 原则约束。定制巴士采用“先到先服务”的原则, 以激励乘客提早预定定制巴士。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L z_{ik}^h \geq \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L z_{jk}^h;$$

$$\forall i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, j \geq i. \quad (10)$$

6) 车队能力限制约束。在运营过程中, 不能无限地供给车辆, 它一方面会造成资源的浪费, 另一方面也与实际的情况不相符, 因此定制巴士的行驶车辆不能超过车队运力。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^L z_{0k}^h = K \leq K_{\max}. \quad (11)$$

式中:  $K_{\max}$  为机场定制巴士的最大车辆数目。

7) 定制巴士路径绕行约束。区间路网下的机场定制巴士的便捷性可以通过控制定制巴士的绕行时间来控制, 由于路网的信息是区间值, 所以限制乘客乘坐定制巴士到达机场的时间不大于经过起点到终点区间最短路径鲁棒成本的  $(1+\theta)$  倍, 否则会造成乘客的绕行时间过长。

$$\sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V (b_{uv} y_{uvk}^h - x_{0tk}^h) \leq (1+\theta) \min R_{ot}. \quad (12)$$

式中:  $\theta$  为绕行系数;  $\min R_{ot}$  为起点到终点的区间最短路径的鲁棒成本。

8) 车辆停靠次数约束。机场定制公交运送的乘客都是前往机场, 巴士的临时停靠次数不宜过多, 否则无法体现出定制公交的高效和快捷。

$$P_k^h \leq P_{\max}. \quad (13)$$

式中:  $P_k^h$  为第  $k$  辆第  $h$  趟的停靠次数;  $P_{\max}$  为定制巴士允许的最大停靠次数。

9) 路径有效性约束。为了保证  $x$  变量和  $y$  变量一致, 模型通过判定边  $(u, v)$  是否在车辆行驶

的鲁棒路径上来对  $x_{oi}^k$  进行不同的约束。

$$x_{ovk}^h \leq x_{ouk}^h + a_{uv} + (b_{uv} - a_{uv})y_{uvk}^h. \quad (14)$$

## 2 算法

考虑车辆路径问题模型求解的复杂性,作者设计出一种将模拟退火和遗传混合的算法。将模拟退火算法中的 Metropolis 接受准则嵌入到遗传算子中的交叉、变异操作过程,通过 Metropolis 接受准则来增强父代和子代之间的竞争,利用模拟退火的概率突跳来避免遗传算法的解陷入局部最优解。

模拟退火的局部寻优的关键环节是利用状态接受函数来进行降温过程,状态接受函数一般采用 Metropolis 接受准则,计算新解的转移概率  $P_x$ , 计算公式为:

$$P_x = \begin{cases} \exp\left\{\frac{f_x' - f_x}{t_k}\right\}; & f_x' < f_x \\ 1; & f_x' \geq f_x \end{cases}. \quad (15)$$

式中:  $f_x'$  表示交叉或变异后得到的新染色体的适应度函数值;  $f_x$  为父代染色体的适应度函数值, 为目标函数值的倒数。

算法的操作步骤如下。

步骤 1: 给定算法参数。参数有种群规模、迭代次数、交叉和变异系数、初始温度、降温系数、温度阈值、订单需求、各停靠站点间的鲁棒最短路区间阻抗值、各类费用等。

步骤 2: 生成初始种群。

步骤 3: 选择操作。计算种群中每条染色体的适应度函数值, 先采取最佳保留策略, 将适应度函数最大的染色体直接复制保留到下一代, 其他染色体用改进的轮盘赌法计算选择概率。

步骤 4: 交叉操作。在温度  $t_k$  时, 任意一对染色体  $x$  和  $y$  进行交叉操作, 得到子代染色体  $x'$  和  $y'$ , 计算子代染色体  $x'$  和  $y'$  的适应度函数值  $f_{x'}$  和  $f_{y'}$ 。对于子代染色体  $x'$ , 判断其和对应父代染色体适应度函数值的大小, 如果  $f_{x'} > f_x$ , 那么就选择接受子代染色体  $x'$ ; 如果  $f_{x'} \leq f_x$ , 则依照 Metropolis 接受准则判断是否接受该子代染色体, 如果不接受则保留父代染色体  $x$ 。对于另一染色体  $y'$ , 也做相同的处理, 得到新的种群。

步骤 5: 变异操作。对步骤 4 中产生的种群进

行变异操作, 变异后的染色体与步骤 4 中方法类型进行判断, 得到新的种群。

步骤 6: 终止条件。判断迭代次数是否满足设定的终止条件, 如果满足, 则给出算法计算出该问题的解; 如果不满足, 则按照  $t_k + 1 = \alpha t_k$  更新温度, 转至步骤 3。

## 3 算例分析

### 3.1 参数设置

假设一个如下的机场定制性灵活线路接驳系统: 机场定制巴士的车场位于机场(站点编号为 0), 运营时间为: 5:00—23:00, 对于生成的订单(如图 1 所示), 根据订单的位置信息和航班信息, 将一定范围内的部分订单聚集到一个地方, 机场定制巴士的车辆采用 16 座中型巴士。表 1 是模型的输入参数。

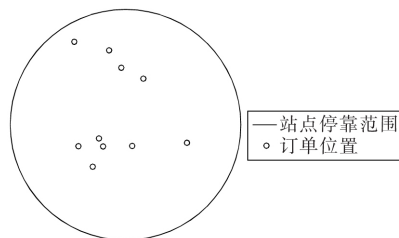


图 1 订单聚类示意图

Fig. 1 Orders clustering diagram

表 1 模型输入参数

Table 1 Model input parameters

参数	参数值	参数	参数值
停靠接送点数量	25	最多停靠次数	3
$C/(\text{元}/\text{人})$	30	$C_k/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	5
$C_R/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	2	$T_i/\text{min}$	1
$C_{Ti}/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	4	$C_1/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	10
$Q_k/(\text{人}/\text{辆})$	16	$K/\text{辆}$	10
$\theta$	0.5	$P_{\max}/\text{次}$	3
$\alpha$	0.2	$\beta$	0.3
$\mu$	0.1	$\gamma$	0.4

### 3.2 算例求解

根据相关文献, 作者利用 MATLAB 编程多次调试, 种群规模设为 50, 最大的进化代数 300 次, 交叉概率和变异概率采用的是自适应函数, 其参数为:  $k_1 = 0.6, k_2 = 0.9, k_3 = 0.5, k_4 = 0.05$ 。采

用模拟退火的局部寻优阶段,其算法参数设置为:初始温度  $T_0=300$ ,降温系数  $v=0.86$ 。

解比较好。选取目标函数最好的解作为预排班阶段的最优解。

采用混合模拟退火的遗传算法对预排班阶段求解 10 次,得到目标函数的满意解如表 2 所示。

由表 3 可知,在预排阶段,车辆的满载率平均在 84%,但是还有车辆存在座位空余的情况。因此,这些有空余座位的车辆将在动态优化阶段进行优化,以提高车辆的上座率,避免运力浪费。绘制出的车辆运行线路如图 2 所示。

从表 2 可以看出,对预排班阶段的订单随机运行了 10 次,有 3 次得到了最小的目标值,10 次计算结果的目标函数平均值为 141.44,所得到的

表 2 预排班阶段算法计算结果

Table 2 Pre-schedule stage algorithm calculation result

	计算次数									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
目标函数	145.9	134.7	151.2	134.7	146.7	134.7	150.3	142.7	138.4	135.2

表 3 机场定制巴士预排班阶段车辆排班安排表

Table 3 Schedule of scheduled vehicles for airport custom bus arrangements

编号	运行线路	服务人数	航班起飞时间	满足订单编号	车辆旅行时间/min	车辆发车时间	满载率/%
1	20-17-13-0	13	9:00	(4,13,43,44,47)	[69,102]	6:00	81.25
2	16-12-0	14	9:00	(1,2,12,14,29,33,40)	[41,65]	6:33	87.50
3	1-3-7-0	13	9:30	(9,11,19,21,27,56)	[68,107]	6:20	81.25
4	11-10-0	14	9:30	(10,18,23,52,53)	[41,65]	7:23	87.50
5	2-4-9-0	14	10:00	(6,32,34,51,55,59)	[85,130]	6:47	87.50
6	5-6-0	13	10:30	(31,37,42,45,49)	[35,56]	8:22	81.25
7	15-14-13-0	15	11:00	(3,5,7,16,17,25,36,46,48,50)	[66,105]	8:02	93.75
8	19-18-13-0	13	11:30	(8,15,20,28,30,38,39,41)	[59,100]	8:37	81.25
9	8-9-0	12	11:30	(22,24,26,35)	[72,116]	9:02	75.00

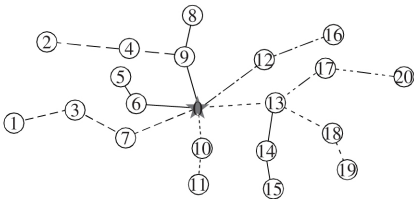


图 2 机场定制巴士运行线路图

Fig. 2 Operational route of the airport custom bus line

在车辆发车前的动态优化阶段,调度系统处理的是紧急订单。在动态优化阶段,由于座位和车辆运行时间的限制,可能会拒绝部分紧急订单。在实时动态优化阶段共增加了 19 个紧急订单,采用混合模拟退火的遗传算法计算得到的最优解目标函数值为 114.09,其对应发车前的动态优化阶段的车辆排班安排如表 4 所示。

从表 4 的排班结果可以看出,机场定制巴士在动态优化阶段接受了 16 个紧急订单,拒绝了 3

个紧急订单,绘制出动态优化阶段调整的车辆运行路线如图 3 所示。

从求解结果可知,机场定制巴士车辆调度系统对 71,74,75 号订单(该订单分别位于图 2 中的 22,23,25 停靠站点处)进行了拒绝服务。分析其具体原因,发现 71,74 号订单预定的时间为 7:40 和 8:40,这两订单分别对应 9:00 和 9:30 的航班,此时对应接送车辆已经发出,且不能安排到下一班次的排班中,因此予以拒绝;75 号订单的预定时间为 8:10,对应航班为 11:00,但是与之对应的 7 号线路去接送该订单会使该线路的运营车辆的乘客出现延误,因此该订单被拒绝。通过对订单分析可知,调度系统满足了新到来的 16 个订单,并且为 21 号停靠站点的 62,67 号订单和 24 号停靠站点的 66,68,72 号订单分别改变了 6 号线路和 9 号线路,并且对车辆的发车时间进行了调整。

表4 机场定制巴士动态优化阶段车辆排班安排表

Table 4 Schedule of scheduled buses for airport customization

编号	运行线路	服务 人数	航班起 飞时间	满足订单编号	车辆旅行 时间/min	车辆发 车时间	满载率/ %
1	20-17-13-0	15	9:00	(4,13,43,44,47,57,58)	[69,102]	6:00	93.75
2	16-12-0	16	9:00	(1,2,12,14,29,33,40,54)	[41,65]	6:33	100.00
3	1-3-7-0	15	9:30	(9,11,19,21,27,56,60)	[68,107]	6:20	93.75
4	11-10-0	16	9:30	(10,18,23,52,53,63,64)	[41,65]	7:23	100.00
5	2-4-9-0	15	10:00	(6,32,34,51,55,59,61,69)	[85,130]	6:47	93.75
6	21-5-6-0	16	10:30	(31,37,42,45,49,62,65,67)	[35,56]	7:48	100.00
7	15-14-13-0	16	11:00	(3,5,7,16,17,25,36,46,48,50,70)	[66,105]	8:02	100.00
8	19-18-13-0	15	11:30	(8,15,20,28,30,38,39,41,73)	[59,100]	8:37	93.75
9	24-8-9-0	16	11:30	(22,24,26,35,66,68,69,72)	[72,116]	8:26	100.00

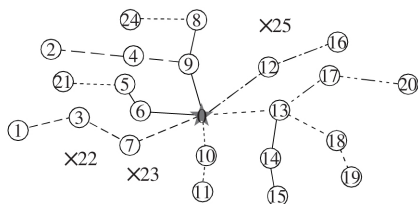


图3 机场定制巴士调整线路后的运行路线图

Fig. 3 Operational route of the airport custom bus adjustment line

## 4 结论

作者从实际的角度出发,在考虑路网的交通阻抗为不确定的区间数的情况下,对机场定制巴士的路径优化进行了优化研究。通过算例的求解分析,得出以下结论。

1) 在充分考虑路网不确定的情况下,以车辆—订单匹配约束、定制巴士路径绕行约束、路径有效性约束等为约束条件,构建的机场定制巴士路径优化模型不仅能够充分满足乘客需求最大化、企业利益最大化的目标,还能使乘客出行时间的不确定性降到最小,最大程度地满足了乘客及企业的利益要求。

2) 混合模拟退火局部寻优的遗传算法能够有效解决遗传算法的早熟和模拟退火算法收敛速度慢的问题,它具有两种算法各自的优点,极大地提高了模型求解的速度。

本研究提出的方法对解决车辆路径优化问题

有一定的意义,可以和大数据结合,使得路网信息更加合理。同时可以建立相应的机场定制巴士服务公司,并将构建的模型和算法用于开发相应的机场定制巴士车辆路径优化软件,实现其真正的应用价值。

## 〔参考文献〕

- [1] 卢小林,张娴,俞杰,等.灵活型定制公交系统综合评价方法研究[J].公路交通科技,2015(5):135-140.  
LU Xiao-lin,ZHANG Xian,YU Jie,et al.Research of a comprehensive evaluation method for customized flexible transit system[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2015(5):135-140.
- [2] 葛显龙,王旭,邓蕾.基于联合配送的开放式动态车辆路径问题及算法研究[J].管理工程学报,2013,27(3):60-68.  
GE Xian-long,WANG Xu,DENG Lei.Research on open and dynamic vehicle routing problems based on joint distribution[J].Journal of Industrial Engineering Management,2013,27(3):60-68.
- [3] Goodson J,Thomas B,Ohlmann J W.Restocking -bsaed rollout policies for the vehicle routing problem with stochasatic demand and duration limits[J].Transportation Science,2015(8):1-17.
- [4] Gilbert Laporte.What you should know about the vehicle routing problem[J].Naval Research Logistics,2007(54):811-819.

(下转至第 63 页)

- ho. Evaluation of the distribution of local pressures and the real contact area between the tyre and the road surface[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 16(9): 832–841.
- [7] 李友云, 蔡彰. 沥青路面结构数值计算模型的最优尺寸研究[J]. 交通科学与工程, 2016, 32(4): 16–21.  
LI You-yun, CAI Zhang. Research on the optimal size of the numerical calculation model for asphalt pavement structure[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2016, 32(4): 16–21.
- [8] 任瑞波, 祁文洋, 李美玲. 移动荷载作用下饱和沥青路面动力响应三维有限元分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(9): 11–16.  
REN Rui-bo, QI Wen-yang, LI Mei-ling. Analysis on dynamic response of saturated asphalt pavement under moving vehicle loads by 3D finite element method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(9): 11–16.
- [9] 颜可珍, 游凌云. 横观各向同性沥青路面结构力学行为分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(4): 1–6.  
YAN Ke-zhen, YOU Ling-yun. Analysis of structural mechanical behavior of transverse isotropic asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(4): 1–6.
- [10] 周艳. 考虑层间状态的沥青路面动力响应有限元分析[J]. 交通科技, 2017(4): 13–15.  
ZHOU Yan. Finite element analysis of asphalt pavement dynamic responses considering interface interaction[J]. Transportation Science and Technology, 2017(4): 13–15.
- [11] 胡迪, 李友云. 双圆轮载作用下沥青路面的荷载影响区域范围研究[J]. 北方交通, 2015(11): 56–57.  
HU Di, LI You-yun. Research on impact area of asphalt pavement under the double circular loads[J]. Northern Communications, 2015(11): 56–57.
- 
- (上接第 26 页)
- [5] 黄刚, 蔡延光, 汤雅连. 带取送货的关联运输调度问题的优化[J]. 东莞理工学院学报, 2013, 20(5): 37–43.  
HUANG Gang, CAI Yan-guang, TANG Ya-lian. The optimization of incident vehicle route problem with pickup and delivery[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2013, 20(5): 37–43.
- [6] 董蕊, 刘冉, 江志斌, 等. 具有时间窗约束累积性车辆路径问题的禁忌搜索优化算法[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(1): 49–55.  
DONG Rui, LIU Ran, JIANG Zhi-bin, et al. A tabu search algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem with time window [J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(1): 49–55.
- [7] 张文博, 苏秦, 程光璐. 基于动态需求的带时间窗的车辆路径问题[J]. 工业工程与管理, 2016, 21(6): 68–74.  
ZHANG Wen-bo, SU Qin, CHENG Guang-lu. Vehicle routing problem with time windows based on dynamic demands [J]. Industrial Engineering and Management, 2016, 21(6): 68–74.
- [8] Erbao Cao, Ruotian Gao, Mingyong Lai. Research on the vehicle routing problem with interval demands [J]. Applied Mathematical Modelling, 2017(54): 332–346.
- [9] Oscar M González, Carlos Segura, S Ivvan Valdez Peña. A parallel memetic algorithm to solve the capacitated vehicle routing problem with time windows[J]. International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics, 2018, 9(1): 35–45.
- [10] 石建力, 张锦. 行驶时间和服务时间随机的集配货一体的分批配送车辆路径优化[J]. 控制与决策, 2018, 33(4): 0657–0670.  
SHI Jian-li, ZHANG Jin. Optimization on simultaneous pick-up and delivery vehicle routing problem with split delivery and stochastic travel and service time[J]. Control and Decision, 2018, 33(4): 0657–0670.
- [11] 周和平, 王芳, 成军. 区间阻抗下的多路径交通分配[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2014, 11(3): 2–3.  
ZHOU He-ping, WANG Fang, CHENG Jun. Multipath traffic assignment under interval-valued impedance[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 11(3): 2–3.
- [12] R Montemanni, L M Gambardella, A V Donati Istituto. A branch and bound algorithm for the robust shortest path problem with interval data[J]. Operations Research Letters, 2004(32): 225–232.