

基于滚动时域控制的动态外卖配送问题优化

张玉州,叶 亮,郑军帅

(安庆师范大学 计算机与信息学院,安徽 安庆 246133)

摘要:为降低外卖配送过程中的运输费用和提高客户的满意度,现以外卖配送服务总延误时间最短为研究目标,设计了一种基于滚动时域控制的外卖配送问题模型。该模型将一段时间内的外卖生成订单,按多个时间窗口进行划分,并采用最近邻域算法对订单的位置进行路径搜索,在配送服务中,结合多种状态下利用滚动时域控制策略最大程度地筛选出存在动态干扰的订单,优化配送服务路径。最后,以某餐饮商户的外卖服务自负配送模型作为算例,对比了两种经典算法 FCFS 和 NN。仿真实验结果表明,该模型在拥挤、正常、非拥挤、高频率扰动、低频率扰动等五种状态下均能够显著降低配送的总延误时间,缩短外卖配送距离,可为外卖平台商户改善配送服务质量和提升客户满意度提供决策支持。

关键词:外卖配送;滚动时域控制;最近邻域算法;车辆路径规划问题

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)10-0083-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.10.018

Optimization of Dynamic Takeaway Distribution Problem Based on Receding Horizon Control

ZHANG Yu-zhou, YE Liang, ZHENG Jun-shuai

(School of Computer and Information, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

Abstract: In order to reduce the transportation cost and improve customer satisfaction in the delivery process, a delivery problem model based on receding horizon control is designed to minimize the total delivery delay. The model will be a period of time of delivery to generate orders and divide them into several time windows. The nearest neighbor algorithm is used to search the location of the order. In distribution services, receding horizon control strategy is used to select the order with dynamic disturbance to the greatest extent and optimize the distribution service path. Finally, a catering businesses delivery service self-conceited distribution model is taken as an example to compare two classical algorithms, FCFS and NN. The simulation shows that the model can significantly reduce the total delay time of delivery and shorten the delivery distance under five conditions: congestion, normal, non-congestion, high-frequency disturbance and low-frequency disturbance, which can provide decision-making support for take-out platform merchants to improve service quality and customer satisfaction.

Key words: delivery distribution; receding horizon control; nearest neighbor algorithm; vehicle routing problem

0 引言

外卖 O2O(online to offline)^[1]已成为现代客户依赖的主流消费方式,外卖配送实质是车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)的实际应用案例。VRP最早由 Dantzig 和 Ramser^[2]于 1959 年提出,国内外学者对 VRP 问题进行了大量的研究,许多与时间相关的车辆调度问题都可归纳为 VRP 的一类重要拓展,称为带时间窗限制车辆路线问题(vehicle routing problems

with time windows, VRPTW)^[3],如邮件投递、应急物资配送等。启发式算法是求解此类拓展问题的主要方法,例如节约法^[4]、捕食搜索算法^[5]、最近邻域算法(nearest neighbor algorithm, NN)^[6]、遗传算法^[7-8]、禁忌搜索算法^[9]等。启发式算法的优点为具有全局搜索能力,求解效率高,如 Kwon 等^[10]运用禁忌搜索算法求解 VRP 问题,求解数在 50~100。

近年来,人工智能方法^[11-12]在解决组合优化问题

收稿日期:2018-10-24

修回日期:2019-02-26

网络出版时间:2019-06-26

基金项目:安徽省自然科学基金面上项目(1808085MF173);安徽省高校省级自然科学研究重点项目(KJ2016A438);安徽省高等学校省级质量工程项目(2017jyxm0302)

作者简介:张玉州(1976-),男,副教授,硕导,研究方向为智能交通和进化算法;叶 亮(1993-),男,硕士研究生,研究方向为组合优化和进化算法。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190626.0823.004.html>

上得到了充分应用,张建强等^[13]利用遗传算法求解物流配送路径优化问题,戴韬等^[14]利用 VRP 理论考虑了船舶航线规划问题,郭月^[15]、杨博文^[16]等对外卖市场配送发展进行了分析。滚动时域控制 (receding horizon control, RHC) 作为一种动态下在线优化控制策略,国内外学者也设计了基于 RHC 的算法对动态优化问题进行求解^[17-20],验证了基于 RHC 策略的合理性和有效性。

综上所述,随时间窗推移而发生的动态干扰外卖配送问题研究仍然较少。以降低外卖配送总延误时间为主要目标,文中设计了一种基于 RHC 的 NN 算法 (RHC-NN) 对问题模型进行求解。实验结果证明了订单在五种不同动态干扰下用新算法解决问题的有效性,可为平台商户节约成本和提升客户满意度提供决策支持。

1 外卖问题建模

1.1 问题描述

针对动态干扰变化下的某平台商户的午餐外卖配送车辆路径问题,利用滚动时域策略降低动态干扰,目标是送餐员沿途配送每一位客户的订单,并在满足订单量需求、配送车辆的承载限制和客户的预期时间等约束条件下,缩短配送服务延误时间,最后在完成所有配送服务后,返回中心。

1.2 模型建立

1.2.1 模型参数

涉及的主要参数如下:

Q : 一辆车的车载量;

M_i : 每位顾客订单的需求量;

T_n : 车辆配送的最大行驶时间;

E_n : 客户订单的最早到达时间;

F_n : 客户订单最晚到达时间;

N : 配送点个数,其订单需求记为 $M_i (i = 1, 2, \dots, N)$;

c_{ij} : 表示从点 i 到点 j 的运输成本;

x_{ij} : 表示车辆从 i 到 j 的配送过程发生, $x_{ij} = 1$;

任务 i 最早开始服务时间为 ET_i , 任务最晚时间为 LT_i 。

1.2.2 约束条件

结合外卖配送的问题特点,可对变量描述如下:

(1) 只考虑单站点单人单摩托车的配送,单次行驶距离最大为 L , 配送速度为 V ;

(2) 配送路径优化的目标是行使成本最低,即总延误时间最小,距离较短;

(3) 每辆车的服务总需求量在该车的承载能力 Q 以内,车辆保持匀速行驶。

1.2.3 建立模型

根据上述问题描述,动态外卖 VRP 优化总成本最小化的模型和目标函数如下:

$$\min Z = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^N c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N} M_i y_i \leq Q, i, j = 0, 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} - \sum_{i \in N} x_{ji} = 0, i, j = 0, 1, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = y_j, i, j = 0, 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = y_i, i, j = 0, 1, \dots, N \quad (5)$$

$$ET_i \leq t_i \leq LT_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$x_{ij}, y_{ij} \in (0, 1), i, j = 0, 1, \dots, N \quad (7)$$

式 1 为目标函数配送的车辆运输费用最小;式 2 为车辆容量约束,车辆载重货物总量不得超出承载能力;式 3 保证整个路径中不存在局部多余的路径;式 4、式 5 确保每个顾客都会被配送;式 6 为需求时间约束;式 7 为决策变量。

2 基于 RHC 的最近邻域算法

2.1 基本思路

FCFS (first come first service) 是一种按照订单产生顺序,分配预期配送时间的策略,忽略了配送路线的交叉、往返等问题,配送效率不高,尤其订单出现随机变化时,如服务时间的更改,缺陷更加凸显。鉴于此,引入滚动时域控制策略,将整个配送时域分成若干等长的时间窗口,根据最新订单的时间顺序截取客户进入当前窗口,采用某一优化策略进行路径规划、配送,持续该过程直到所有客户服务完毕。考虑到进入窗口内的决策客户数一般较少,所以文中选取一种性能较好的启发式算法—NN 对订单进行排序,RHC 与 NN 进行结合构成 RHC-NN 算法,对整个时域中的订单进行排序,以实现运输费用的最小化。

2.2 RHC

RHC 策略将配送时间域 H 划分为 NW 优化配送时间窗口,窗口大小为 H/NW 。将服务时间落在窗口内的订单组成决策对象集合,对集合内需要服务的决策对象进行优化、排序。若决策后对象的服务时间落在当前时域中,则安排配送,否则留至下一时域窗口等待决策、服务。当前窗口的订单处理结束后,则继续进行新时域窗口的在线优化,此过程持续至所有订单均被服务。实时更新排序如图 1 所示。

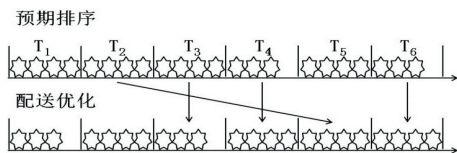


图 1 基于 RHC 的外卖配送全过程

2.3 NN

NN 是一种求解速度快的启发式算法,以路线距离邻域最小为最优的配送算法能够拓展当前解的搜索空间。首先是任取一出发点,依次取最近的点加入当前路线,直至形成回解,其具体步骤如下:

第一步:从待决策对象集合 $S = \{c_1, c_2, \cdots, c_p\}$ 中任选一对象 c_i , 以其为起点,其中 p 为当前决策对象数。令 $r \leftarrow c_i$, 且 $S = S \setminus \{c_i\}$ 。

第二步:在 S 中搜索距离 r 最近的对象 c_j , 即 $\text{dis}(r, c_i)$ 为 r 与 S 中所有剩余对象距离的最小值,也就是 $\text{dis}(r, c_i) = \underset{c_i \in S}{\operatorname{argmin}} \{ \text{dis}(r, c_k) \}$ 。令 $r \leftarrow c_i$, 且 $S = S \setminus \{c_i\}$ 。

第三步:若 $S \neq \varnothing$, 则转第二步继续执行,否则结束当前搜索。

该策略无法对动态扰动的订单做出应急处理,抗动态干扰能力较弱,如订单被要求提前或延迟配送,单一的 NN 算法无法处理动态干扰。

2.4 RHC-NN

以最近邻域算法作为时域上路径排序的在线优化算法,从而基于 RHC-NN 的具体步骤如下:

第一步:假设已知 NW 外卖订单到达时间,设置时间间隔长度 T 与时域上时间间隔总数 NW , 初始化时域序号 $q = 1$ 。

第二步:根据当前外卖订单信息,由所有计划到达时间位于 $[t(q), t(q) + NT]$ 的外卖,构成当前时域上的待排序外卖订单集合 $S(q)$ 。

第三步:使用最近邻域算法 NN 对 $S(q)$ 中的外卖优化排序,筛选出存在动态扰动的订单,重新排序。

第四步:根据优化后的排序,给 $S(q)$ 中的外卖配送服务时间,将当前时域窗口中的订单进行配送,其余动态干扰的订单分配到后续窗口中进行配送。

第五步:若所有外卖订单已送达,则结束算法。

第六步:更新外卖订单的相关信息, $q = q + 1$, 转第二步继续执行。

3 仿真与结果分析

为验证模型与设计算法的真实有效性,对初始订单分静态和动态进行实验,静态包括正常配送、拥挤配送、非拥挤配送三种状态;动态包括高频率扰动和低频率扰动两种状态,并在每种状态下使用 FCFS、NN 和 RHC-NN 算法分别对算例进行仿真。

3.1 三种状态的仿真实验

其中 ON 表示初始订单号、ET 表示预期配送时间、AT 表示实际配送时间、TW 表示时间间隔,三种算法在三种状态下的仿真结果如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 Normal 状态下各算法配送结果

FCFS				NN				RHC-NN			
ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW
1	41	79	0	15	21	21	0	2	97	3.07	3.07
2	97	84.91	84.91	7	81	115	0	10	9	11.94	2.94
3	98	90.29	22.29	5	100	115.99	46.99	15	21	21	0
4	98	95.57	14.57	3	98	116.44	48.44	22	24	52	0
5	100	99.41	30.41	1	41	117.03	38.03	21	27	56.79	5.79
6	93	104.72	11.72	22	24	118.04	66.04	5	100	69	0
7	81	115	0	20	21	121.81	36.81	3	98	69.45	1.45
8	96	121.94	25.94	10	9	123.69	114.69	1	41	79	0
9	111	123.71	52.71	18	92	131.9	39.9	14	66	84.87	18.87
10	9	135.48	126.48	11	28	134.71	56.71	11	28	86.05	8.05
11	28	144.26	66.26	6	93	135.12	42.12	13	66	88.53	22.53
12	110	151.84	41.84	2	97	135.3	135.3	18	92	92	0
13	66	152.77	86.77	19	81	136.04	55.04	19	81	95.07	14.07
14	66	155.3	89.3	12	110	137.19	27.19	6	93	95.66	2.66
15	21	160.01	139.01	13	66	138.12	72.12	4	98	97.4	16.4
16	119	164.04	56.04	9	111	139.74	68.74	8	96	100.19	4.19
17	58	174.13	117.13	8	96	141.51	45.51	9	111	101.96	30.96
18	92	180.48	88.48	21	27	143.09	92.09	7	81	115	0
19	81	186.34	105.34	16	119	144.09	36.09	16	119	118.06	10.06
20	21	194.01	109.01	4	98	144.46	63.46	12	110	121.4	11.4
21	27	201.94	150.94	14	66	145.76	79.76	17	58	124.11	67.11
22	24	206.73	154.73	17	58	156.46	99.46	20	21	85	0

注:FCFS、NN、RHC-NN 的总延误分别为 1 573.88 min、1 264.49 min、219.55 min,总距离分别为 64 193.04 m、26 080.09 m、47 880.42 m。

表 2 Crowd 状态下各算法配送结果

FCFS				NN				RHC-NN			
ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW
1	19	19	0	15	23	23	0	1	19	19	0
2	24	24.92	0.92	7	51	51	0	8	18	26.07	8.07
3	58	53	0	5	29	51.99	22.99	15	23	23	0
4	59	59	0	3	58	53	0	5	29	29	0
5	29	62.84	33.84	1	19	53.59	34.59	22	29	30.06	1.06
6	32	68.15	36.15	22	29	54.6	25.6	16	32	34.25	2.25
7	51	72.48	21.48	20	50	58.37	8.37	21	34	35.25	1.25
8	18	79.42	61.42	10	16	60.25	24.25	14	25	36.6	11.6
9	38	81.19	25.19	18	28	68.46	40.46	2	24	37.37	13.37
10	16	92.96	56.96	11	43	71.27	39.27	6	32	37.55	5.55
11	43	101.74	69.74	6	32	71.68	39.68	11	43	37.95	5.95
12	40	109.32	76.32	2	24	71.86	47.86	19	20	38.53	18.53
13	32	110.25	78.25	19	20	72.6	52.6	12	40	39.69	6.69
14	25	112.78	87.78	1	40	73.76	40.76	7	51	51	0
15	23	117.49	94.49	13	32	74.68	42.68	3	58	53	0
16	32	121.53	89.53	9	38	76.3	20.3	20	50	56.2	6.2
17	57	131.61	77.61	8	18	78.07	60.07	10	16	58.08	22.08
18	28	137.96	109.96	21	34	79.65	45.65	18	28	65.46	37.46
19	20	143.82	123.82	16	32	80.65	48.65	4	59	59	0
20	50	151.49	101.49	4	59	81.02	22.02	13	32	62.81	30.81
21	34	159.42	125.42	14	25	82.32	57.32	9	38	64.43	8.43
22	29	164.22	135.22	17	57	93.02	39.02	17	57	67.4	13.4

注:FCFS、NN、RHC-NN 的总延误分别为 1 405.59 min、712.14 min、192.7 min,总距离分别为 64 193.04 m、26 080.09 m、35 161.05 m。

表 3 Slow 状态下各算法配送结果

FCFS				NN				RHC-NN			
ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW
1	2	3.29	1.29	15	86	53	0	3	17	17	0
2	167	158	0	7	21	54.99	33.99	1	2	17.59	15.59
3	17	163.38	146.38	5	118	139	0	7	21	21	0
4	40	168.66	128.66	3	17	139.45	122.45	10	27	27	0
5	118	172.5	33.5	1	2	140.05	138.05	15	86	53	0
6	25	177.8	124.8	22	43	141.05	98.05	18	45	55.87	10.87
7	21	182.14	161.14	20	114	144.82	32.82	6	25	59.1	6.1
8	23	189.08	166.08	10	27	146.7	119.7	14	108	59.94	1.94
9	87	190.85	115.85	18	45	154.91	109.91	4	40	61.24	21.24
10	27	202.62	175.62	11	156	157.73	69.73	8	23	64.04	41.04
11	156	211.4	123.4	6	25	158.13	105.13	22	43	43	0
12	108	218.98	175.98	2	167	158.31	0.31	12	108	50.29	7.29
13	160	219.91	115.91	19	106	159.05	45.05	9	87	75	0
14	108	222.43	164.43	12	108	160.21	117.21	11	156	88	0
15	86	227.15	174.15	13	160	161.13	57.131	19	106	114	0
16	85	231.18	109.18	9	87	162.76	87.76	13	160	115.95	11.95
17	115	241.27	94.27	8	23	164.52	141.52	20	114	125.57	13.57
18	45	247.62	202.62	21	134	166.1	5.1	5	118	139	0

续表 3

FCFS				NN				RHC-NN			
ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW
19	106	253.48	139.48	16	85	167.1	45.1	16	85	143.05	21.05
20	114	261.15	149.15	4	40	167.48	127.47	2	167	158	0
21	134	269.08	108.08	14	108	168.77	110.77	17	115	162.43	15.43
22	43	273.87	230.87	17	115	179.47	32.47	21	134	161	0

注:FCFS、NN、RHC-NN 的总延误分别为 2 840.84 min、1 599.72 min、166.07 min,总距离分别为 64 193.04 m、26 080.09 m、56 264.03 m。

对比三种状态下总配送距离发现:FCFS 的总距离保持不变,为 64.2 公里;NN 总距离为 26.1 公里;新优化算法 RHC-NN 的总距离分别是 47.9 公里、35.2 公里、56.3 公里。其中 TD、TD-r 表示总延误时间和总延误时间降低率,单位是 min。以 FCFS 算法为计算基础,经对比发现,NN 总延误时间降低率分别为 19.7%、49.3%、43.7%;RHC-NN 分别为 86.1%、86.3%、94.2%,降低率尤为显著,具体如表 4 所示。

表 4 三种状态的下的仿真实验结果对比

算法	Normal		Crowded		Slow	
	TD	TD-r	TD	TD-r	TD	TD-r
FCFS	1 573.88		1 405.59		2 840.84	
NN	1 264.49	19.7%	712.14	49.3%	1 599.72	43.7%
RHC-NN	219.55	86.1%	192.7	86.3%	166.07	94.2%

3.2 两种频率的实验

条件相同,算例在两种频率下的仿真结果如表 5、表 6 所示。在 $P = 40\%$ 和 $P = 10\%$ 的动态扰动下,FCFS 和 NN 算法均无法对于干扰下的订单进行实时的路径优化和排序,算法的总配送距离仍然不变;新优化算法 RHC-NN 的总配送距离为 50.5 公里和 42.1 公里。

表 5 High 频率下各算法配送结果

FCFS				NN				RHC-NN			
ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW
1	64	68	0	15	70	24	0	18	86	12	0
2	97	92	0	7	42	80	0	6	23	15.22	13.22
3	0	97.38	97.38	5	81	80.99	9.99	16	17	17.04	0.04
4	24	102.66	78.66	3	0	81.44	81.44	3	0	21.23	21.23
5	81	106.5	35.5	1	64	82.04	14.04	15	70	24	0
6	23	111.8	109.8	22	55	83.04	28.04	4	24	27.69	3.69
7	42	116.14	36.14	20	39	86.81	19.81	22	55	55	0
8	68	123.08	82.08	10	37	109	0	19	60	61.17	7.17
9	51	124.85	32.85	18	86	117.21	105.21	13	61	63.12	7.12
10	37	136.62	27.62	11	47	120.03	19.03	8	68	66.07	25.07
11	47	145.4	44.4	6	23	120.44	118.43	5	81	71	0
12	53	152.98	78.98	2	97	120.61	28.61	1	64	71.79	3.79
13	61	153.91	97.91	19	60	121.36	67.36	20	39	74.57	7.57
14	80	156.44	47.44	12	53	122.51	48.51	12	53	83.37	9.37
15	70	161.15	137.15	13	61	123.43	67.43	7	42	80	0
16	17	165.18	148.18	9	51	125.06	33.06	2	97	92	0
17	104	175.27	114.27	8	68	126.83	85.83	9	51	94.92	2.92
18	86	181.62	169.62	21	72	128.4	12.4	17	104	97.89	36.89
19	60	187.48	133.48	16	17	129.4	112.4	11	47	101	0
20	39	195.15	128.15	4	24	129.77	105.77	14	80	109	0
21	72	203.08	87.08	14	80	131.07	22.07	21	72	116	0
22	55	207.87	152.87	17	104	141.77	80.78	10	37	109	0

注:FCFS、NN、RHC-NN 的总延误分别为 1 839.56 min、1 060.21 min、138.08 min,总距离分别为 64 193.04 m、26 080.09 m、50 531.75 m。

表 6 Low 频率下各算法配送结果

FCFS				NN				RHC-NN			
ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW	ON	ET	AT	TW
1	30	30	0	15	40	40	0	3	1	2.9	1.9
2	119	119	0	7	48	48	0	19	18	18	0
3	1	124.38	123.38	5	87	113	0	16	35	35	0
4	112	129.66	17.66	3	1	113.45	112.4	6	24	36.82	12.82
5	87	133.5	20.5	1	30	114.05	84.05	12	31	38.41	7.41
6	24	138.8	114.8	22	53	115.05	62.05	17	28	41.13	13.13
7	48	143.14	95.14	20	52	118.82	62.82	15	40	40	0
8	44	150.08	106.08	10	119	120.7	1.7	7	48	48	0
9	78	151.85	73.85	18	62	128.91	66.91	22	53	53	0
10	119	163.62	44.62	11	45	131.73	86.73	1	30	54	24
11	45	172.4	127.4	6	24	132.13	108.13	20	52	56.78	0.78
12	31	179.98	148.98	2	119	132.31	13.31	11	45	63.91	18.91
13	74	180.9	106.9	19	18	133.05	115.05	18	62	62	0
14	64	183.44	119.44	12	31	134.21	103.21	14	64	65.87	1.87
15	40	188.15	148.15	13	74	135.13	61.13	21	102	67.22	10.22
16	35	192.18	157.18	9	78	136.76	58.76	8	44	68.8	24.8
17	28	202.27	174.27	8	44	138.52	94.52	9	78	78	0
18	62	208.62	146.62	21	102	140.1	83.1	13	74	79.62	5.62
19	18	214.48	196.48	16	35	141.1	106.1	4	112	112	0
20	52	222.15	166.15	4	112	141.47	29.48	2	119	119	0
21	102	230.08	173.08	14	64	142.77	78.77	5	87	124.1	11.14
22	53	234.87	181.87	17	28	153.47	125.47	10	119	128.2	9.16

注:FCFS、NN、RHC-NN 的总延误分别为 2 442.55 min、1 453.74 min、141.76 min,总距离分别为 64 193.04 m、26 080.09 m、42 138.68 m。

对比发现,NN、RHC-NN 算法对订单总延误时间的影响如表 7 所示。NN 的总延误时间降低率分别为 42.4%、40.5%;RHC-NN 的总延误时间降低率分别达到了 92.5%、94.2%。

表 7 两种频率的下的仿真实验结果对比

算法	High		Low	
	TD	TD-r	TD	TD-r
FCFS	1 839.56		2 442.55	
NN	1 060.21	42.4%	1 453.74	40.5%
RHC-NN	138.08	92.5%	141.76	94.2%

4 结束语

针对外卖配送中配送路径规划排序问题进行建模和算法设计,将配送服务时间分解为多个时间域窗口,并能从中筛选出存在着动态扰动的订单,利用求解算法 RHC-NN 进行重新优化排序。仿真实验结果证明了模型中 RHC-NN 优化的有效性和稳定性,更适宜得到应用和决策。该研究为动态扰动的外卖问题求解提供了一种新思路和可行的策略,但仍需进一步在大规模问题上研究,也为今后求解实时动态大规模、复杂 VRPTW 问题提供借鉴。

参考文献:

[1] 王 帅,赵来军,胡青蜜. 随机旅行时间的外卖 O2O 配送车辆路径问题[J]. 物流科技,2017,40(1):93-101.

[2] DANTZIG G B,RAMSER J H. The truck dispatching problem[J]. Management Science,1959,6(1):80-91.

[3] FAVARETTO D,MORETTI E,PWLLEGRINI P. Ant colony system for a VRP with multiple time windows and multiple visit[J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics,2007,10(2):263-284.

[4] 郑 静,程幼明. 基于时间约束的节约里程法配送路径优化研究[J]. 物流工程与管理,2010,32(10):89-90.

[5] 张顶学,关治洪,刘新芝. 基于捕食搜索策略的遗传算法研究[J]. 计算机应用研究,2008,25(4):1006-1007.

[6] 王 征,张 俊,王旭坪. 多车场带时间窗车辆路径问题的变邻域搜索算法[J]. 中国管理科学,2011,19(2):99-109.

[7] 张丽萍,柴跃进. 车辆路径问题的改进遗传算法[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(8):79-84.

[8] 谢秉磊,李 军,郭耀煌. 有时间窗的非满载车辆调度问题的遗传算法[J]. 系统工程学报,2000,15(3):290-294.

[9] 刘 霞,齐 欢. 带时间窗的动态车辆路径问题的局部搜索算法[J]. 交通运输工程学报,2008,8(5):114-120.