Operations Research and Fuzziology 运筹与模糊学, 2024, 14(4), 607-619
Published Online August 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/orf
https://doi.org/10.12677/orf.2024.144429

Hans汉斯

基于遗传算法的集散型外卖配送服务网络设计研究

王　凯，钱　颖

上海理工大学管理学院，上海

收稿日期：2024年7月16日；录用日期：2024年8月16日；发布日期：2024年8月23日

摘　要

外卖配送时间窗短，目前采用零工经济模式，由配送员直接到商家取货并送至客户处。随着外卖市场规模扩大，或遇突发事件等订单激增的情况，会出现运力不足，等待时间大幅延长。研究了集散型网络在外卖配送中的应用，划分商家和客户群体，建立路径优化模型，求解集散型配送网络的最优路径并计算其成本。与零工经济模式下的配送网络进行对比，结果表明集散型网络在订单达到一定规模时更有效，可以使用较少配送员完成配送任务，同时具有明显的成本优势。当订单小于一定规模时，两种网络对配送员数量的需求相似，但集散型网络依然存在成本优势。

关键词

外卖配送，集散型网络，遗传算法，零工经济

Research on Distributed Delivery Service Network Design Based on Genetic Algorithm

Kai Wang, Ying Qian

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 16th, 2024; accepted: Aug. 16th, 2024; published: Aug. 23rd, 2024

Abstract

Takeout delivery has a short delivery window and currently adopts the gig economy model, in which delivery workers pick up goods directly from merchants and deliver them to customers. As the food delivery market grows in size, or in the event of a surge in orders such as emergencies, there is a shortage of capacity and waiting times lengthen significantly. This paper studies the ap-

文章引用: 王凯, 钱颖. 基于遗传算法的集散型外卖配送服务网络设计研究[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(4): 607-619.
DOI: 10.12677/orf.2024.144429

plication of distributed network in takeout delivery, divides merchant and customer groups, establishes a path optimization model, solves the optimal path of distributed distribution network and calculates its cost. Compared with the distribution network under the gig economy model, the results show that the distributed network is more effective when the order reaches a certain scale, which can use fewer delivery workers to complete the distribution task, and has obvious cost advantages. When the order is smaller than a certain size, the two networks have similar demands for the number of deliverers, but the distributed network still has cost advantages.

Keywords

Takeaway Delivery, Distributed Network, Genetic Algorithm, Gig Economy

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在全球电子商务的发展和数字支付技术的普及下，线上外卖服务需求迎来显著增长，据统计，全球外卖配送服务的市场规模从 2019 年的 1074.4 亿美元增长至 2023 年的 1543.4 亿美元，年增长率为 11.51% [1]。随着以食品为主的外卖配送市场趋于饱和，近年来外卖平台开始提供药品、日用百货等配送服务以提高竞争力[2]。现阶段外卖配送主要采用零工经济模式服务客户，外卖平台将订单快速匹配给附近的配送员配送，将商品从商家送至客户指定地点。在零工经济模式下，配送员需要配送的订单数量和行使路线具有较强的自主性，并对商品的完好性全程负责。这种模式存在较大的安全风险，配送员为了避免超时或提高收入，会采取一些不安全行为，如超速、逆向行驶等，根据上海交警部门的统计，2024 年全市快递外卖行业日均交通违法记录达到 2462 起。当遇到订单激增的情况，会出现运力不足，等待时间大幅延长。在 COVID-19 大流行期间，政府强制关闭或限制线下餐饮服务的同时，外卖平台推出“非接触式配送”功能使消费者接触病毒的风险降低，居民对线上外卖配送服务需求激增，依赖零工经济的配送网络无法按时满足客户的需求[3] [4]。

网络设计是提升物流配送效率的重要环节[5] [6]，目前许多学者从不同的角度对如何提高城市物流配送效率进行了研究，李锐[7]等研究带硬时间窗的 4PL 多到多网络设计问题，设计迭代局部搜索算法求解，最小化物流总成本。Dayarian [8]等提出了一种基于循环的启发式方法用于设计城市内和部分城市间包裹配送的发车频率和商品路径，通过确定成本最低的周期集以确定最优时刻表，保证了较高的准点率。Crainic [9]等建立了考虑设施资源限制的二级城市物流服务网络设计模型，可以用于确定用户选择合适的车队，路线与时间表。杨从平[10]等改变以往学者基于轴辐式网络理论的快递网络优化方法，基于复杂网络理论对快递网络进行优化。Zhao [11]等采用两层轮辐结构来构建城市内地铁物流网络，建立熵加权 TOPSIS 模型选择枢纽节点和辐条节点，缓解城市交通拥堵和环境污染问题的可持续解决方案。

在上述城市物流网络设计研究中，研究问题大多聚焦在同城配送领域，其配送范围覆盖整座城市，配送时效性较差，对配送资源的统筹规划策略不适用于时效性要求较强的外卖配送服务网络。Nguyen [12]等为了提高线上外卖订购平台满足客户需求的能力，提出一种新的算法用于计算配送员在满足时间与空间约束时每个配送员的可行订单分配，并提出一种新的网络可靠性指标用于评估外卖配送网络的性能。徐蓉蓉[13]研究了派单模式下专送运力的餐饮外卖即时配送运力调度问题，设计了鲸鱼群算法求解订单分

配和配送路径的联合优化。He [14]等提出餐饮外卖市场的众多独立餐厅正在通过外卖订购平台竞争顾客，而餐厅的食品质量和地理位置是两个主要考虑因素，并探究了不同配送策略对餐厅食品质量和选址决策的影响。Correa [15]等通过收集供应商与客户之间全部可能的交通路线，评估交通状况对在线送餐服务关键绩效指标的影响，发现交通状况对交易量和交货时间的履行没有实际影响。

上述针对外卖配送网络的研究仍然建立在以零工经济为基础的网络框架内，研究内容包括控制成本，提高客户满意度，设施选址等。目前较少有文献研究集散型网络在外卖配送中的应用，以提高外卖订单的配送效率。本文通过研究集散性配送网络在城市外卖配送系统中的使用场景，在不同订单规模背景下与传统零工经济模式进行比较，分析不同配送模式下的成本优势，达到整合配送资源控制配送成本，提高配送效率的目的。

2. 问题描述

集散型网络的配送区域可以区分两种配送活动，取货活动和送货活动，外卖配送网络需要满足的特殊性要求是配送员必须先在商家取到商品，才能对顾客进行送货服务，且配送员要为多个商家进行联合配送。集散型配送网络的商品配送时间等于取货时间和送货时间之和，且不超过规定的配送时间窗。

针对所研究的配送区域商家与客户的地理分布特征，可以将地理位置比较接近的商家划分成一个商家群体，同理也可以划分出若干客户群体。本文设$G(V,A,B)$表示研究区域的配送网络，其中$\{V_1,V_2,\cdots,V_n\}$是商家群集合，$\{V_{n+1},V_{n+2},\cdots,V_{n+m}\}$是客户群集合，配送站点是取货员与送货员交接商品的地点，$A\{a_1,a_2,\cdots,a_n\}$是连接商家群与配送站点之间的链路集合，$B\{b_1,b_2,\cdots,b_m\}$是连接客户群与配送站点之间的链路集合。如图 1 所示说明了集散型外卖配送服务网络的设计结构。

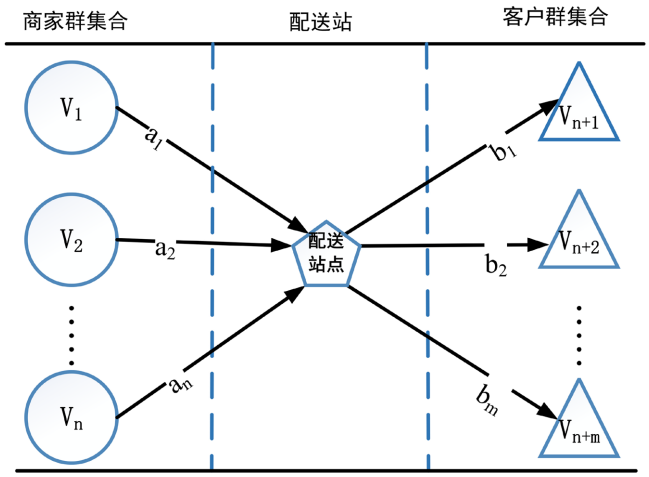

Figure 1. Design structure of distributed takeout delivery service network
图 1. 集散型外卖配送服务网络设计结构

3. 数学模型构建

在城市外卖配送活动中，配送平台会根据人口密度，城市布局，交通便利程度等因素建设配送站点，配送区域内的服务对象(包括商家聚集区，市民住宅区，商业办公区)的地理位置分布相对固定，配送员数量可以根据地区常驻人口数量合理分配。通过对区域内商家节点与客户节点的分布状况提前聚类，将配送员限制在某一商家群内或客户群内活动，可以避免配送员选择较远的订单配送，最大限度缩短配送员行使路程，提高整个网络配送效率。

3.1. 节点群体划分模型

3.1.1. 样本空间定义

由于集散型配送网络的配送员不能同时服务商家和客户，所以网络节点群体划分需要将商家节点和客户节点分离出来，分别做聚类分析。设商家样本集合用 X 表示，假设有 n 个节点样本，每个节点有 m 个属性，则商家样本集合可以用矩阵 X 表示为：

$$X=\left[x_{ij}\right]_{m*n}=\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \tag{1}$$

集散型外卖配送网络中，商家节点包含的属性有商家坐标值、商家取货时间窗、商家出货时间、商家订单数量、商家订单对应的客户坐标等。聚类的核心是根据节点的相似度划分类，节点的相似度是根据节点具有的属性定义的，选择不同的节点属性作为相似度的定义得到的聚类结果是不同的[16]。本文假设所有商家的外卖出货时间，订单数量一致，因此本文中配送员的行使距离越短，配送时间就越短，配送效率就越高，选择商家坐标值作为聚类属性。同理客户节点也用客户坐标值进行聚类分析。

3.1.2. K 均值聚类数学模型

K 均值聚类的策略是通过误差平方和的最小化对样本空间选取最优的划分[17]，式(2)采用欧式距离的平方作为节点之间的距离 $d\left(x_i,x_j\right)$，式(3)定义节点与所属簇中心之间的距离总和为误差平方和 WCSS。本节设 K 均值聚类的目标是将样本分为 k 个类，第 μ 个类的簇中心用 $\overline{x}_{\mu}$ 表示。$C\left(i\right)=\mu$ 是指示函数，若节点 i 属于类 μ 取值为 1，否则取值 0。

$$d\left(x_i,x_j\right)=\sum_{k=1}^{m}\left(x_{ki}-x_{kj}\right)^2=\left\|x_i-x_j\right\|^2 \tag{2}$$

$$\mathrm{WCSS}=\sum_{\mu=1}^{k}\sum_{C(i)=\mu}\left\|x_i-\overline{x_{\mu}}\right\|^2 \tag{3}$$

K 均值聚类的数学模型即求解最优化问题：

$$C^{*}=\arg\min_{c}\mathrm{WCSS}=\sum_{\mu=1}^{k}\sum_{C(i)=\mu}\left\|x_i-\overline{x_{\mu}}\right\|^2 \tag{4}$$

3.2. 配送路径优化模型

3.2.1. 相关假设

为了保证问题的可行性和有效性，对集散型外卖配送服务网络的路径规划问题作如下假设和说明：

(1) 外卖配送的服务区域已知，配送速度恒定，最大载重量已知不变。

(2) 假设每件外卖的重量和体积一致，因此用外卖取送的数量表示车辆目前的载重量。

(3) 配送站点，客户，商家节点的位置坐标已知，假设所有节点之间的行使时间与距离成正比，本文取各节点间的距离为欧式距离。

(4) 在取货环节，每件外卖订单只能由一位配送员取货；同理在送货环节每件外卖只能有一位配送员送货。

(5) 客户时间窗为软时间窗，允许提前送达的订单不影响客户满意度，但是延迟送达订单会降低客户满意度，需要考虑惩罚函数。

(6) 假设所有订单均送到外卖柜，并设置有服务等待时间。

3.2.2. 符号说明

本文符号定义见表 1。

Table 1. Symbol definition
表 1. 符号定义表

集合	
$M:\{1,2,\cdots,m\}$	取货配送员集合
$N:\{1,2,\cdots,n\}$	送货配送员集合
$R:\{1,2,\cdots,r\}$	商家节点集合
$C:\{1,2,\cdots,c\}$	客户节点集合
$\Omega:\{1,2,\cdots,g\}$	订单集合
参数	
l_{ij}	节点 i 与节点 j 之间的距离
t_{ij}	配送员从节点 i 到节点 j 的旅行时间
$[a_i,\infty]$	商家节点 i 的时间窗
$[0,b_j]$	客户节点 j 的时间窗
$[E,L]$	配送中心的时间窗
t_{wait}^{i}	节点 i 的服务等待时间
$s_{i^{\varphi}}$	取货员配送订单 i^{φ} 到达商家节点 i 的时刻
$s_{j^{\varphi}}$	送货员配送订单 j^{φ} 到达客户节点 j 的时刻
Q_m 、 Q_n	最大载重量
$0,r+1,c+1,g+1$	配送中心节点
D_k	第 k 个配送员的配送路径
n_k	第 k 个配送员拜访商家客户节点的总数量
i^{φ}	商家 i 的第 φ 个订单
j^{φ}	客户 j 的第 φ 个订单
决策变量	
x_g^k	订单 g 由取货员 k 配送取 1，否则取 0
y_g^k	订单 g 由送货员 k 配送取 1，否则取 0

3.3. 数学模型

基于上述分析，集散型外卖配送服务网络设计及路径优化模型可表示如下：

$$\min F=\sum_{k=1}^{m}\sum_{i=1}^{r+1} l_{d_{k(i-1)}d_{ki}}+\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c+1} l_{d'_{k(i-1)}d'_{ki}} \tag{5}$$

$$\text{s.t. } t_{ij}=\frac{l_{ij}}{v} \tag{6}$$

$$D_k=\left\{d_{ki^{\varphi}} \mid d_{ki^{\varphi}}\in\{0,1,2,\cdots,g,g+1\}, i=0,1,\cdots,n_k, k\in M\right\} \tag{7}$$

$$D'_k=\left\{d'_{kj^{\varphi}}\mid d'_{kj^{\varphi}}\in\{0,1,2,\cdots,g,g+1\},j=0,1,\cdots,n_k,k\in N\right\} \tag{8}$$

$$S_{d_{k(i-1)}}+t_{wait}^{d_{k(i-1)}}+t_{d_{k(i-1)}d_{ki}}=S_{d_{ki}},i=1,2,\cdots,r+1,k\in M \tag{9}$$

$$S_{d'_{k(j-1)}}+t_{wait}^{d'_{k(j-1)}}+t_{d'_{k(j-1)}d'_{kj}}=S_{d'_{kj}},\ j=1,2,\cdots,c+1,k\in N \tag{10}$$

$$E\le S_{d_{ki}}\le L,\forall k\in M,i=0,r+1 \tag{11}$$

$$E\le S'_{d_{kj}}\le L,\forall k\in N,\ j=0,c+1 \tag{12}$$

$$t_{wait}^{i}=\max\left\{a_i-S_i+0.5,0.5\right\},i=1,2,\cdots,r \tag{13}$$

$$t_{wait}^{j}=0.5 \tag{14}$$

$$S_j\le b_j,j=1,2,\cdots,c \tag{15}$$

$$\sum_{k\in M}x_g^k=1,\forall g\in\Omega \tag{16}$$

$$\sum_{k\in N}y_g^k=1,\forall g\in\Omega \tag{17}$$

$$\sum_{g\in\Omega}x_g^k\le Q_m,\forall k\in M \tag{18}$$

$$\sum_{g\in\Omega}y_g^k\le Q_n,\forall k\in N \tag{19}$$

$$x_g^k\in\{0,1\},\forall g\in\Omega,k\in M \tag{20}$$

$$y_g^k\in\{0,1\},\forall g\in\Omega,k\in N \tag{21}$$

式(5)是目标函数，表示最小化全局配送员行使总路程，包括取货行程和送货行程；式(6)表示配送员行使时间计算公式；式(7)和式(8)表示配送员 k 的取货路径集合和送货路径集合，其中的元素 $d_{ki^{\varphi}}$ 和 $d'_{kj^{\varphi}}$ 分别表示第 k 条路径的第 i^{φ} 个取货顺位和第 j^{φ} 个送货顺位，d_{k0} 表示配送中心且 $d_{k0}=0$；式(9)和式(10)是时间流平衡约束，其中式(9)表示取货环节中，第 k 个取货员到达商家节点 $i-1$ 的时刻加上在 $i-1$ 节点的等候服务时间再加上前往商家节点 i 的旅行时间等于到达商家节点 i 的时刻；式(10)同理为送货环节送货员到达客户节点 j 的时刻；式(11)和式(12)表示配送员 k 从配送中心出发的时间和返回配送中心的时间必须在配送中心的左右时间窗之间；式(13)表示若取货员早于出货时间 a_i 到达商家节点 i，则总等待时间为等待出货时间 a_i-S_i 加上 0.5 分钟的固定服务时间(如排队，整理包裹等)；式(14)表示送货服务时间为 0.5 分钟，这里假设外卖允许提前送达并放置在外卖柜；式(15)表示送货员不得晚于客户最晚要求的送达时间；式(16)和式(17)表示每件外卖订单必须得到服务并且要求取货服务一次，送货服务一次；式(18)和式(19)表示配送员的装载容量约束；式(20)和式(21)为决策变量。

4. 基于 K-Means 聚类与遗传算法的模型求解

集散型外卖配送网络问题涉及到商家群体与客户群体的划分以及订单配送过程中配送员的订单分配与路径规划问题。因此，该问题属于时间与容量约束下的路径－分配组合优化问题[18]-[20]。本文使用 K-means 聚类算法和带有局部搜索策略的遗传算法分两阶段求解集散型外卖配送网络。

4.1. 聚类算法求解步骤

K-means 聚类需要分两个阶段的算法完成：第一阶段利用手肘法确定聚类类别数 k。在手肘法中，聚

类结果的质量可以用类中每个点到簇中心的距离平方和(WCSS)来衡量。在算法第二阶段选择 k 个数据点作为初始簇中心，然后将离初始簇中心较近的数据节点划分到此簇中心所属的类别，再针对每个已经划分好的类别重新计算簇中心，使节点到簇中心的误差平方和最小。本文采用如下流程，使用 Python 求解器求得最优 k 值和聚类结果：

Step 1 数据初始化　导入 sklearn 聚类数据库，绘图数据库；将商家与客户节点经纬度坐标转化为平面直角坐标数据导入。

Step 2 计算 WCSS 数据　根据式(3)计算 k 取值 1 到 11 时的类中每个点到簇中心的距离平方和(WCSS)并记录。

Step 3 绘制肘部图　绘制 k 取不同值时 WCSS 数值的变化趋势图，取变化率最大的拐点作为最优 k 值。

Step 4 初始化数据中心点　随机选择 k 个数据点作为初始簇中心。

Step 5 划分初始群体　将每个数据节点分配到与其最近的中心点所属的类别。

Step 6 迭代优化　对于每个类别，根据式(4)重新计算中心点位置，使 WCSS 最小。

Step 7 输出聚类结果　分别得到配送区域内商家节点划分结果与客户节点划分结果。

4.2. 遗传算法求解步骤

4.2.1. 染色体编码

本文使用了一种带有局部搜索策略的遗传算法求解配送员的订单分配与路径规划问题。在遗传算法中每条染色体代表一个配送员，其标记了订单的配送顺序。如图 2 所示，与传统零工经济模式下的外卖配送染色体编码方式不同，集散型配送网络的染色体编码只需要区分取货人员和送货人员，取货人员只经过商家节点，送货人员只经过客户节点。

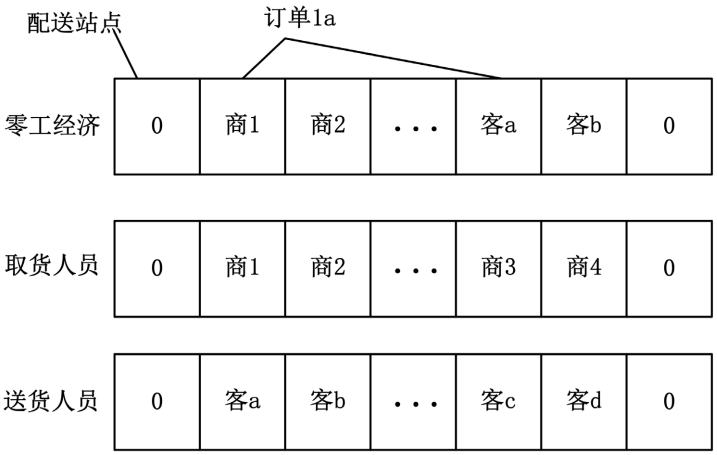

Figure 2. Coding diagram
图 2. 编码示意图

4.2.2. 构建适应度函数

集散型外卖配送服务网络路径优化模型的适应度函数(见公式 23)包括两个部分：配送员行使总距离 F_1 和违反时间窗约束的惩罚函数 F_2。其中式(5)表示了配送员的行使总距离，式(22)表示配送员只有晚于右时间窗到达客户节点才算违反约束。式(23)中，a_1 和 a_2 分别为 F_1 和 F_2 的权重系数，可以根据各自在总的目标函数中所占的重要性来设定。本文根据所研究的外卖配送网络的实际情况，并采用实际数据模拟之后将权重设置为 $a_1=1$，$a_2=100$ 较为合理。

$$F_2 = \sum_{j=1}^{c}\left(S_{j^{\varphi}} - b_j\right) \tag{22}$$

$$Min\ F = a_1F_1 + a_2F_2 \tag{23}$$

4.3. 局部搜索策略

在局部搜索操作中，可以破坏当前迭代子种群中的部分染色体并进行修复，以进一步提高种群质量[21]。算法流程如下：

Step 1 输入当前子代个体，计算子代染色体适应度值 CF。

Step 2 移除当前染色体中某一节点元素。

Step 3 将此元素重新插入当前染色体其它位置。

Step 4 计算重新插入元素后当前染色体的适应度值 RCF。

Step 5 如果 RCF > CF，则重新将此元素插入其它位置，并设置最大重新插入次数为 $Q_m - 1$ 或 $Q_n - 1$，即不超过配送员的最大载重数量。

Step 6 如果 RCF < CF，则替换原子代个体形成新种群。

5. 仿真案例分析

5.1. 案例数据生成

本文选取某平台 2019 年 12 月 7 日的实际运营数据作为预设场景进行案例分析，订单信息包括订单产生时间，订单出货时间，预期送达时间，商家坐标和客户坐标。

因为外卖订单具有连续产生的特点，集散型外卖配送网络需要取货环节和送货环节配合进行。因此本案例仿真通过规范配送员的取货时间窗和送货时间窗，以保证每个订单在规定时间窗内取货和送货。配送时间窗划分如图 3 所示，以 11:00~11:10 分产生的订单为例，外卖取货人员需要在时间段 11:00~11:25 内完成取货任务并返回配送中心，外卖送货人员需要在时间段 11:25~11:50 内完成订单的配送任务并返回配送中心。案例通过模拟 10 分钟产生的订单分配与路径优化结果推算 90 分钟的高峰时段所需配送员数量和成本，减少了模型计算复杂度和运算时间。

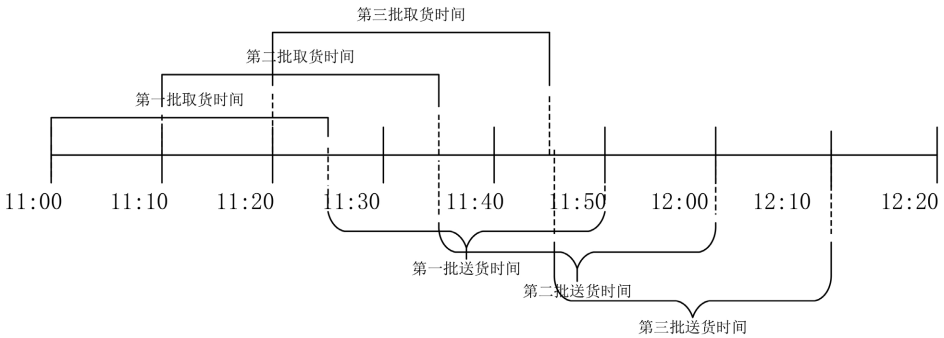

Figure 3. Order delivery time window
图 3. 订单配送时间窗

仿真案例的实验参数设计如下：根据已有文献的调查，外卖快递配送人员的每小时使用成本为 5 元；零工经济模式下使用二轮电动摩托车配送每公里运营成本是 0.2 元；外卖配送站点的覆盖半径在 5 公里以内，城市内配送速度为 30 公里每小时；商家和客户节点的服务时间均设置为 0.5 分钟。为保证实验结果的有效性，零工经济模式和集散型配送网络均使用相同的参数。

仿真案例中使用的不同订单规模信息见表 2。其中订单规模指的是每 10 分钟产生订单数量。

Table 2. Scale of the case
表 2. 案例数据规模

订单规模	商家节点数	客户节点数
20	15	20
30	20	30
40	23	40
55	27	55
70	31	70
80	35	80
90	36	90
100	38	100
110	40	110
120	41	120
130	43	130

5.2. 案例仿真实验结果

5.2.1. 案例节点聚类结果

首先对 43 个商家节点的聚类结果进行分析，商家群体 1 和商家群体 3 节点分布较为密集，商家间距较短，仿真过程中使用较少的配送员便可完成配送任务，有利于体现集散型网络的规模效应。商家群体 3 中商家间距较长，配送员配送耗时较长，但是由于节点数量较少，订单规模不大，仿真过程中使用较少的配送员也可以完成配送。如图 4 所示为仿真案例中商家节点的聚类结果。

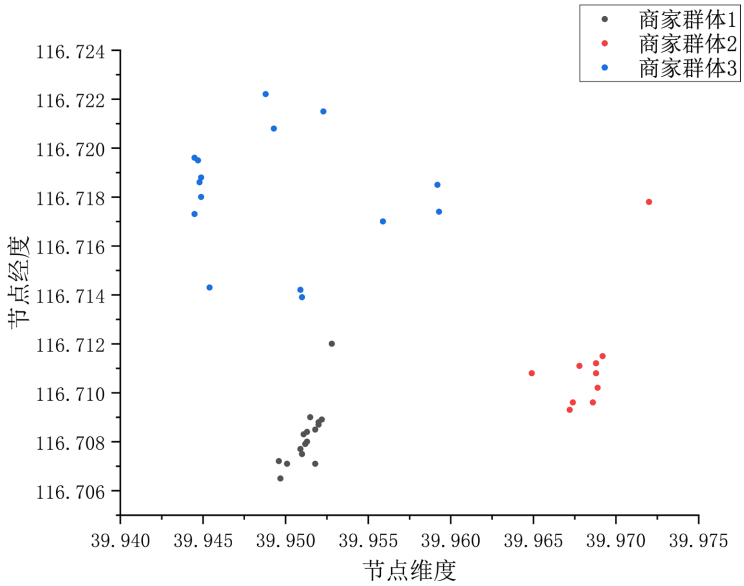

Figure 4. Clustering results of merchant nodes
图 4. 商家节点聚类结果

5.2.2. 案例订单分配与路径优化结果

本文列举订单规模为 20 单时分别采用零工经济配送网络和集散型配送网络求得的算法结果，见表 3 所示。其中客户节点用数字 1~20 表示，商家节点用数字 21~40 表示。数组(21, 1)表示一个订单从商家 21 送到客户 1。从仿真结果可以看出，在满足配送时间窗的约束下，订单均能在 40 分钟以内送达，同时集散型网络需要更多的配送资源，但是每个配送员的行使里程大幅缩短。

Table 3. Comparison of case simulation data under two distribution modes
表 3. 两种配送模式下的案例仿真数据对比

配送模式	配送员	配送路线	配送耗时 min	行使距离 km
集散型配送网络	取货 1	0-24-29-37-30-28-36-32-21-0	8.17	1.39
	取货 2	0-39-25-31-22-33-40-0	14.01	3.67
	取货 3	0-35-34-27-26-23-38-0	21.45	6.15
	送货 1	0-1-17-16-12-2-0	13.68	7.45
	送货 2	0-5-15-4-8-18-19-0	12.60	6.40
	送货 3	0-20-10-13-9-0	16.81	9.87
	送货 4	0-3-14-6-7-11-0	20.29	11.86
零工经济配送网络	配送 1	0-31-24-38-18-27-4-33-7-11-13-0	39.92	23.28
	配送 2	0-35-29-33-9-40-34-15-14-20-12-0	37.94	21.96
	配送 3	0-39-22-26-28-6-23-3-2-19-8-0	38.83	22.55
	配送 4	0-25-21-36-30-37-10-17-16-1-5	25.49	13.66

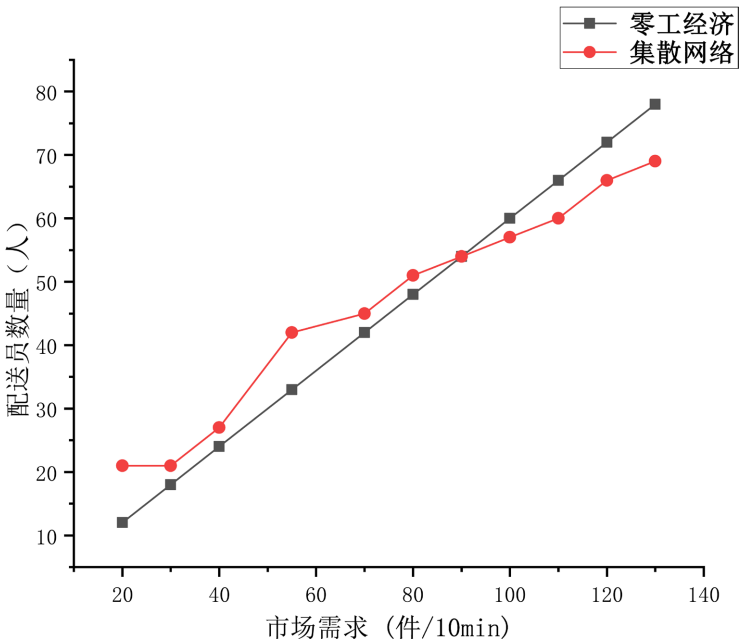

Figure 5. Trend of the number of deliverymen under different order sizes
图 5. 不同订单规模下配送员人数变化趋势

图 5 是不同订单规模下两种外卖配送模式所需配送员人数趋势变化。集散型外卖配送网络在订单规

模小于 90 件/10min 时，所需的配送员人数略高于传统零工经济模式，这是由于集散型网络在划分客户群体之后，需要保证每个群体内都有配送员可以提供服务，并且为了保证较高的配送效率，集散型网络不允许配送员跨群体服务商家客户，即使某些配送员仍然有多余的运力可以提供。在订单规模大于 90 件/10min 时，集散型网络所需配送资源明显小于传统零工经济网络，在高峰时期配送资源不足的情景下集散型网络具有明显优势。

5.3. 每公里运营成本对网络设计的影响

外卖配送成本包括两部分配送人员使用成本和人员运营成本。其中人员使用成本 = 单位人员使用成本 * 所需配送员数量；人员运营成本 = 每公里运营成本 * 配送员行使总里程。图 6 是两种配送模式下配送成本的对比。

当两种配送模式的单位运营成本均为 0.2 元/公里时，随着市场需求的不断增加，集散性配送网络与零工经济模式下的配送成本差距不断增大，因此集散型网络具有明显的成本优势。原因在于集散型网络限制了配送员的行动路线和活动区域，比零工经济模式更有效的缩短了行驶里程，减少了运营成本，同时订单规模超过一定的阈值，可以使用较少的配送员，人员使用成本也有所下降。

为了更深入分析单位运营成本的变化对配送总成本的影响，本节将集散型配送网络的运营成本提高至 0.4 元/公里，0.6 元/公里和 0.8 元/公里，并同现有零工经济模型下的配送成本对比研究发现，在运营成本提高至原来的 3 倍时，集散型网络就不再具有明显的成本优势。因此，外卖配送平台采用集散型配送网络，可以通过提高配送员载货量，采用更先进，速度更快的外卖配送车辆以提高配送效率，由此造成的运营成本增加控制在 0.6 元/公里以内是较为经济的。

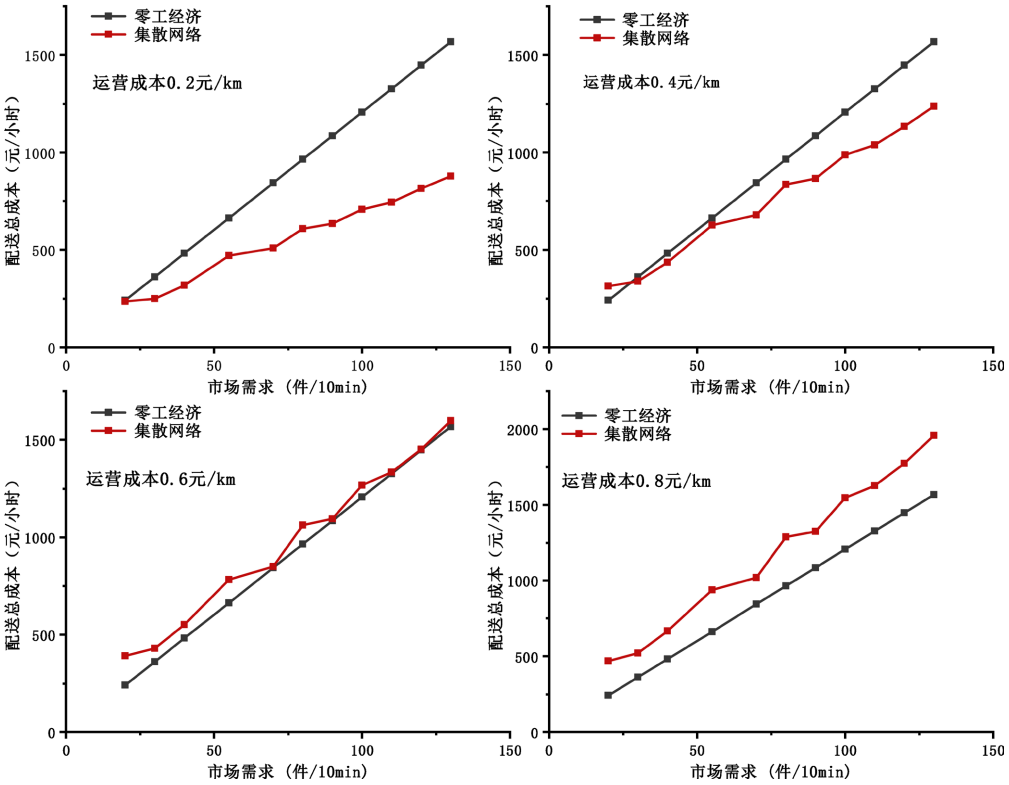

Figure 6. Comparison of distribution cost change trends of the two distribution modes
图 6. 两种配送模式的配送成本变化趋势对比

6. 总结

集散型网络并不是一个全新的概念，在物流配送领域尤其是同城配送领域具有广泛的研究和使用，然而在小范围内的外卖配送领域较少有研究和使用。此类网络设计的核心是对提前对配送区域内的商家和客户进行群体划分，让配送员尽可能在所划分好的群体内部进行配送活动，并通过路径优化尽可能减少配送员行走重复路线，达到缩短配送行使里程，控制成本的目的。在客观上限制配送员的服务区域，便于管理配送员的行驶路线，从网络设计层面提高了配送活动的安全性。

本文通过案例仿真验证了集散型网络在外卖配送服务网络中使用的可行性，但是本文案例中使用的客户节点分布较为均匀，不适合聚类分析，因此仅对商家群体进行了划分，为进一步评估集散型网络的性能特点，未来可以结合实际情况，分析仅对客户群体进行聚类划分，同时对商家群体和客户群体进行聚类划分等不同情景下集散型网络的适用条件。

基金项目

国家社会基金一般项目：新冠疫情中“信息疫情”的形成机理及应对策略研究(项目编号：22BGL240)。

参考文献

[1] Shankar, A., Jebarajakirthy, C., Nayal, P., Maseeh, H.I., Kumar, A. and Sivapalan, A. (2022) Online Food Delivery: A Systematic Synthesis of Literature and a Framework Development. *International Journal of Hospitality Management*, **104**, Article ID: 103240. https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2022.103240

[2] Yeo, V.C.S., Goh, S. and Rezaei, S. (2017) Consumer Experiences, Attitude and Behavioral Intention toward Online Food Delivery (OFD) Services. *Journal of Retailing and Consumer Services*, **35**, 150-162. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2016.12.013

[3] Hong, C., Choi, H., Choi, E. and Joung, H. (2021) Factors Affecting Customer Intention to Use Online Food Delivery Services before and during the COVID-19 Pandemic. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, **48**, 509-518. https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2021.08.012

[4] Andruetto, C., Bin, E., Susilo, Y. and Pernestål, A. (2023) Transition from Physical to Online Shopping Alternatives Due to the COVID-19 Pandemic—A Case Study of Italy and Sweden. *Transportation Research Part A*: *Policy and Practice*, **171**, Article ID: 103644. https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103644

[5] Jiang, X., Bai, R., Atkin, J. and Kendall, G. (2016) A Scheme for Determining Vehicle Routes Based on Arc-Based Service Network Design. *INFOR*: *Information Systems and Operational Research*, **55**, 16-37. https://doi.org/10.1080/03155986.2016.1262580

[6] 张宇鑫, 黄敏, 蒋松辰, 等. 基于IVNS-ASPSO算法激增需求下第四方物流网络设计[J]. 控制工程, 2021, 28(11): 2252-2260.

[7] 李锐, 黄敏, 孙福明. 带硬时间窗的第四方物流多到多网络设计[J]. 控制工程, 2018, 25(10): 1927-1933.

[8] Dayarian, I., Rocco, A., Erera, A. and Savelsbergh, M. (2022) Operations Design for High-Velocity Intra-City Package Service. *Transportation Research Part B*: *Methodological*, **161**, 150-168. https://doi.org/10.1016/j.trb.2022.05.002

[9] Crainic, T.G. and Sgalambro, A. (2013) Service Network Design Models for Two-Tier City Logistics. *Optimization Letters*, **8**, 1375-1387. https://doi.org/10.1007/s11590-013-0662-1

[10] 杨从平, 郑世珏, 党永杰, 等. 基于配送时效和连接成本的快递网络优化[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(8): 1983-1992.

[11] Zhao, L., Zhou, J., Li, H., Yang, P. and Zhou, L. (2021) Optimizing the Design of an Intra-City Metro Logistics System Based on a Hub-and-Spoke Network Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **116**, Article ID: 104086. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104086

[12] Nguyen, T., Lin, Y. and Chiu, Y. (2023) Investigate Exact Reliability under Limited Time and Space of a Multistate Online Food Delivery Network. *Expert Systems with Applications*, **213**, Article ID: 118894. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118894

[13] 徐蓉蓉. 餐饮外卖即时配送运力调度研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.

[14] He, Z., Han, G., Cheng, T.C.E., Fan, B. and Dong, J. (2019) Evolutionary Food Quality and Location Strategies for

Restaurants in Competitive Online-to-Offline Food Ordering and Delivery Markets: An Agent-Based Approach. *International Journal of Production Economics*, **215**, 61-72. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.05.008

[15] Correa, J.C., Garzón, W., Brooker, P., Sakarkar, G., Carranza, S.A., Yunado, L., *et al*. (2019) Evaluation of Collaborative Consumption of Food Delivery Services through Web Mining Techniques. *Journal of Retailing and Consumer Services*, **46**, 45-50. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2018.05.002

[16] 李航. 统计学习方法[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2019.

[17] 郭克难. 基于融合改进 K-Means 聚类算法的数据检测技术[J]. 电子设计工程, 2024, 32(5): 41-45.

[18] Yan, Y., Shang, W., Yan, J., Liao, Q., Wang, B., Song, H., *et al*. (2022) Logistic and Scheduling Optimization of the Mobilized and Distributed Battery in Urban Energy Systems. *Resources, Conservation and Recycling*, **187**, Article ID: 106608. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106608

[19] Wang, Z. and Lin, W. (2017) Incorporating Travel Time Uncertainty into the Design of Service Regions for Delivery/Pickup Problems with Time Windows. *Expert Systems with Applications*, **72**, 207-220. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.11.003

[20] Ruß, M. and Gust, G. (2023) Reliable Route Planning and Time Savings in Real-World Urban Intermodal Transportation Networks: Evidence from Hamburg, Germany. *Expert Systems with Applications*, **227**, Article ID: 120196. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120196

[21] 徐建有, 王丹敬. 多目标双代理单机调度的变邻域搜索算法[J]. 控制工程, 2018, 25(8): 1403-1408.