

分类号 F252.1
UDC

密级 公开
编号 10741



硕士学位论文

论文题目 基于共同配送策略的城市物流末端车辆
路径问题研究

研究生姓名: 李士伟

指导教师姓名、职称: 彭会萍 教授

学科、专业名称: 管理科学与工程

研究方向: 物流与供应链管理

提交日期: 2024年5月31日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 李士伟 签字日期： 2024.5.31

导师签名： 彭会萍 签字日期： 2024.5.31

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分內容。

学位论文作者签名： 李士伟 签字日期： 2024.5.31

导师签名： 彭会萍 签字日期： 2024.5.31

Research on the Terminal Vehicle Routing Problem of Urban Logistics Based on Joint Delivery Strategy

Candidate :Li Shiwei

Supervisor: Peng Huiping

摘 要

我国物流产业发展多年,仍存在诸多问题制约其纵深发展。随着近些年共享经济兴起,物流企业共同配送走进了人们的视野。2021年商务部等9部门印发的《商贸物流高质量发展专项行动计划(2021-2025年)》中提到:鼓励物流相关企业加强信息共享;推广共同配送等集约化配送模式。在当前市场环境下,研究如何降本增效的促进现代物流产业的发展具有重要意义。针对以上问题及背景,本文尝试在城市物流末端配送运用共享经济的思维设计城市物流末端共同配送以实现物流业的降本增效。具体主要研究内容为:

(1) 研究设计了多家物流企业采取城市末端共同配送运营策略的方案。独立配送时物流企业只为企业所属客户提供物流配送服务。共同配送后物流企业之间通过资源共享满足该区域的城市配送服务需求。据此设计出两种不同的共同配送策略:MDVRP式共同配送与划分聚类式共同配送。并基于此考虑了当多家企业存在共同客户时的共同配送模式。在考虑相关的配送约束下构建出相关车辆路径模型,模型优化目标为总配送成本最低。

(2) 设计了效果较好的车辆路径求解算法。MDVRP式共同配送为多中心配送问题。划分聚类式共同配送对客户进行聚类再进行路径规划,此时为多个单中心配送问题。进行车辆路径求解时,设计一种引入了节约里程算法的遗传算法进行求解,将节约里程算法得到的可行解作为遗传算法的初始解进行后续求解,并利用公开数据集Solomon数据集进行算法性能测试,验证了所设计的算法在求解时的高效性。最大限度的保证了在配送路径求解时能够精确计算出车辆路径。

(3) 通过案例仿真验证共同配送有效性。通过进行仿真对多企业不同环境下的独立配送和两种共同配送策略的结果进行对比分析。结果表明,无论是否存在共同客户采用共同配送方式都是一种明显降低总配送成本的方式。随后,对车辆固定成本及燃油价格进行灵敏度分析,分析资源单价发生变化时决策者对共同配送策略的选择倾向。最后,为保证物流企业合作稳定确定最优联盟加入序列。

关键词: 共同配送 遗传算法 车辆路径问题 末端配送 节约里程算法

Abstract

China's logistics industry has developed for many years, and there are still many problems restricting its in-depth development. With the rise of the sharing economy in recent years, the common distribution of logistics companies has entered people's field of vision. In 2021, the Ministry of Commerce and other 9 departments issued the "Special Action Plan for the High-quality Development of Trade and Logistics (2021-2025)", which mentions that logistics-related enterprises are encouraged to strengthen information sharing, and intensive distribution models such as joint distribution are promoted. In the current market environment, it is of great significance to study how to reduce costs and increase efficiency to promote the development of modern logistics industry. In view of the above problems and backgrounds, this paper attempts to use the thinking of sharing economy to design the common distribution of urban logistics at the end of urban logistics to reduce costs and increase efficiency in the logistics industry. Specifically, the main research contents are as follows:

(1) The scheme of adopting the common distribution operation strategy of the city end of a number of logistics enterprises was studied and designed. In the case of independent distribution, the logistics company only provides logistics and distribution services for the customers of the enterprise. After joint distribution, logistics companies can meet the urban distribution service needs of the region through resource sharing. Based on this, two different co-distribution strategies are designed: MDVRP co-distribution and clustered co-distribution. Based on this, the common distribution model when multiple companies have common customers is considered. Considering the relevant distribution constraints, the relevant vehicle routing model is constructed, and the optimization goal of the model is to minimize the total distribution cost.

(2) A better vehicle path solving algorithm was designed. MDVRP-style co-distribution is a multi-center distribution problem. Divide clustered common distribution to cluster customers and then carry out path planning, which is a problem of multiple single-center distribution. When solving the vehicle path, a genetic algorithm with the introduction of the mileage saving algorithm was designed to solve the problem, and the feasible solution obtained by the mileage saving algorithm was used as the initial solution of the genetic algorithm for subsequent solving, and the performance test of the algorithm was carried out by using the public dataset Solomon dataset, which verified the efficiency of the designed algorithm in the solution. This ensures that the vehicle route can be accurately calculated when solving the distribution route.

(3) The effectiveness of co-distribution is verified through case simulation. The results of independent distribution and two common distribution strategies in different environments of multiple enterprises are compared and analyzed through simulation. The results show that the use of co-distribution is a significant way to reduce the total distribution cost regardless of whether there are joint customers or not. Subsequently, the sensitivity analysis of vehicle fixed cost and fuel price is carried out to analyze the choice tendency of decision-makers to the common distribution strategy when the unit price of resources changes. Finally, in order to ensure the stability of logistics enterprise cooperation, the optimal alliance joining sequence was determined.

Keywords: Joint delivery; Genetic algorithm; Vehicle routing problem; End delivery; Mileage saving algorithm

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的和意义.....	2
1.2.1 研究目的.....	2
1.2.2 研究意义.....	2
1.3 相关研究现状.....	3
1.3.1 共同配送研究现状.....	3
1.3.2 车辆路径问题研究现状.....	4
1.4 研究内容及结构.....	7
1.5 主要创新点.....	9
1.6 本章小结.....	9
2 相关理论基础	10
2.1 城市末端配送网络.....	10
2.1.1 城市配送网络构成.....	10
2.1.2 末端配送.....	10
2.1.3 末端配送存在的问题.....	11
2.2 共同配送相关理论.....	12
2.2.1 共同配送概念及模式.....	12
2.2.2 共同配送优势.....	13
2.3 算法理论.....	14
2.3.1 k-means 聚类算法	14
2.3.2 节约里程法.....	16
2.3.3 遗传算法.....	17
3 共同配送策略及模型构建	18
3.1 共同配送策略.....	18
3.1.1 策略描述.....	18
3.1.2 MDVRP 式共同配送	19
3.1.3 划分聚类式共同配送.....	20
3.2 考虑共同客户的配送策略.....	21
3.2.1 存在共同客户的独立配送.....	21
3.2.2 存在共同客户的共同配送.....	22
3.3 成本模型构建.....	23
3.3.1 问题描述及假设.....	23
3.3.2 参数说明.....	23
3.3.3 成本分析.....	24
3.3.4 模型构建.....	25
3.4 本章小结.....	27
4 改进遗传算法设计及性能测试	28
4.1 算法设计.....	28

4.1.1 染色体编码、解码.....	28
4.1.2 初始种群生成.....	28
4.1.3 适应度函数.....	29
4.1.4 选择算子、交叉及变异操作.....	29
4.1.5 终止迭代准则.....	31
4.2 Gurobi 精确求解	32
4.3 算法性能测试.....	32
4.4 本章小结.....	35
5 算例测试及结果分析	36
5.1 实验准备.....	36
5.1.1 数据集.....	36
5.1.2 实验参数设定.....	37
5.2 共同配送策略仿真.....	38
5.2.1 独立配送仿真.....	38
5.2.2 MDVRP 式共同配送仿真	40
5.2.3 划分聚类式共同配送仿真.....	43
5.2.4 共同配送模式分析.....	46
5.3 考虑共同客户的共同配送策略仿真.....	47
5.3.1 考虑共同客户的共同配送仿真.....	47
5.3.2 考虑共同客户的共同配送模式分析.....	48
5.4 共同配送参数灵敏度分析.....	48
5.4.1 配送车辆固定成本的灵敏度分析.....	48
5.4.2 燃油价格的灵敏度分析.....	49
5.4.3 车辆固定成本及燃油价格线性回归分析.....	51
5.5 确定最优联盟加入序列.....	53
5.6 本章小结.....	57
6 结论与展望	58
6.1 研究结论.....	58
6.2 未来展望.....	59
参考文献	60
攻读硕士学位期间发表论文及科研情况	65
致谢.....	66
附录 1 算法性能测试结果	67
附录 2 测试集	69
附录 3 客户聚类结果	71
附录 4 考虑共同客户的共同配送策略仿真结果	72

1 绪论

1.1 研究背景

随着我国数字经济的发展,电商平台迅速扩张,与此对应的商品配送需求日益旺盛。国家邮政局统计数据显示,2022年邮政行业寄递业务量完成1390.9亿件,其中快递业务量完成1105.8亿件,年人均快件量近80件。邮政行业业务收入完成13509.6亿元。2023年《全球快递发展报告》中提到,中国市场业务量自2014年起稳居世界第一,预计2023年全球快递包裹业务量突破2000亿件,业务收入将达4.3万亿元,庞大的业务量推动城市配送领域朝着高质量方向发展。

随着现代物流业发展不断加速,物流配送企业迎来了前所未有的发展机遇。全国快递服务业务量与快递业务收入如图1.1所示逐年递增,庞大的小批量、高频次的配送需求给城市物流末端配送环节造成较大压力,研究如何进一步降本增效是企业需要考虑的问题。目前存在的物流配送成本高、配送效率低、信息共享程度低以及缺乏有效的合作机制等问题成为制约物流配送企业进一步发展的瓶颈。“社会物流费用占GDP比重”被作为国际上衡量一个国家或地区物流业发展水平的重要指标^[1]。我国这一指标远高于欧美国家,说明我国物流业发展水平和物流效率与欧美国家相比还存在较大差距。为降低配送成本、减少碳排放并促进快递产业与城市协调发展,需对配送策略及配送模式进行优化和创新。

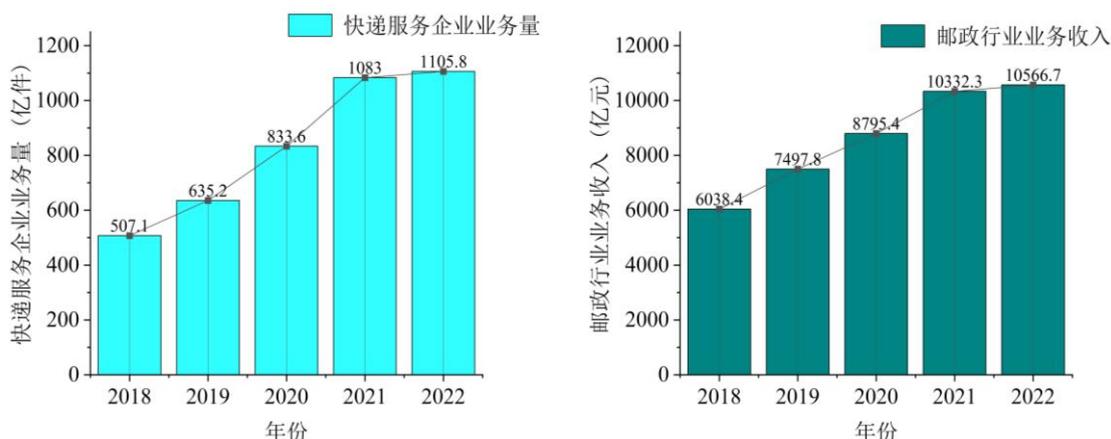


图 1.1 全国快递服务业务量与收入

2021年商务部等9部门为促进商贸物流服务和效率进一步提升、健全商贸物流网络、加快推进区域物流一体化印发了《商贸物流高质量发展专项行动

计划（2021-2025年）》，其重点任务中提到：促进自营物流与第三方物流协调发展；推广共同配送等集约化配送模式；鼓励物流企业实行共同配送以达到健全商贸物流网络及促进物流业降本增效的目的。此外，实施合理的共同配送模式已被证明可以缓解城市交通压力，减少城市环境污染，实现城市物流绿色低碳可持续发展^[2]。樊东方等^[3]认为科技水平对社会物流成本具有显著影响，随着我国科技水平不断提高、共享经济领域和大数据的发展，物流配送企业通过共享相关信息实施共同配送成为可能，有望帮助企业降低成本、提高配送效率及客户满意度。

1.2 研究目的和意义

1.2.1 研究目的

本文以城市物流末端配送环节为主要的研究对象，通过运用运筹学、最优化理论与方法并以计算机仿真为支撑，对物流企业在不同配送模式下的车辆路径问题进行理论与应用研究，将共同配送策略应用在实际运作层面上优化当前城市末端配送路径来提高配送效率。为物流企业的决策者提供针对不同配送策略下的求解算法、配送方案的选择。对部分配送资源价格进行灵敏度分析，帮助企业决策者应对配送资源变化。

1.2.2 研究意义

本文以总配送成本最低为目标对城市物流末端配送路径问题进行研究，并设计一种高效车辆路径求解算法求解该问题，为物流企业共同配送后的车辆路径问题研究提供科学的路径规划体系。本论文的研究意义包括以下两个方面：

（1）理论意义

本文对城市物流末端配送进行研究，设计出两种不同的共同配送策略，并基于此考虑了当多家企业是否存在共同客户时的情况。在总配送成本考虑时将车辆固定成本、行驶成本以及碳交易成本及共同配送后的转运成本计算在内，构建相关车辆路径模型，设计一种高效求解算法对设计的模型问题及其衍生问题进行求解，丰富了共同配送以及车辆路径求解算法方面的相关理论。

（2）现实意义

明确物流企业的每级节点在城市物流配送网络中的布局及承担的任务。通过仿真对比共同配送策略实施前后总配送成本及车辆装载率等变化情况,证实了两种共同配送策略与各企业独立配送时相比能够降低企业配送成本、提高车辆利用率。对部分配送资源价格进行灵敏度分析,揭示其变化对物流配送企业的影响程度。为物流企业决策者选择何种共同配送策略、进行车辆路径安排、应对配送资源价格变化提供思路,帮助决策者做出最优抉择来提高配送效率和经济效益。

1.3 相关研究现状

1.3.1 共同配送研究现状

共享经济逐渐成为现代经济发展的主导理念,其共享理念推动了服务业结构优化,同时也为物流行业带来了新的发展契机。共同配送作为一种基于共享理念的物流模式正在逐步取代传统物流行业的主导地位。共同配送通过整合多企业的配送任务,有利于发挥配送的规模效益,从而降低单个企业的配送成本。因此近些年对共同配送的研究成为了学术界关注的热点。范文晶^[4]曾在电商企业、物流企业、客户角度及社会效益分析建立城市末端共同配送体系带来的收益,认为共同配送有利于降低配送成本、提升配送效率,是一种可以改变传统城市配送的经营理念和管理模式的方式。Hong 等^[5]认为共同配送有快递企业联盟和第三方联合配送中心两种形式,并基于成本利润理论和 Shapley 值法构建了快递企业末端共同配送的成本分摊模型。魏强^[6]研究了两家提供全程服务的物流企业采取城市共同配送运营策略的可行性与经济性,对比外包第三方配送以及企业共同配送的利润后发现物流企业选择合作进行共同配送能够实现整体运营绩效的提升。吴鑫^[7]对当前城市配送特征与问题进行梳理分析,并对企业、顾客、政府和社会三方之间的诉求进行交叉分析凝练,通过案例仿真表明共同配送模式具有优异的实际应用效果。曹巍^[8]设计了一个基于电商企业、快递企业和便利店所组成的物流配送系统,通过理论推演和数值分析选择出适合的电商物流系统的决策模型。任腾等^[9]提出了一个共同配送策略:多个配送中心在为电商企业客户进行货物配送过程中可以对同城个人客户的订单进行货物的取送。赵广华^[10]为农村电商提出了基于资源要素、O2O 平台+共享物流、4PL+X 契约性大众分包和村镇电商集配站+

智能自提柜等四种共同配送运作模式，不同的运作模式各自有其适用性。Chu X 等^[11]将区块链技术应用到“最后一公里”的共同配送，解决了实施共同配送后的道德风险问题。Liu G 等^[12]将共同配送应用到冷链物流行业中，并引入碳交易机制，通过实验验证了冷链物流企业之间通过资源共享进行共同配送可以提升经济效益和环境效益。

物流企业的运作模式、网点数量、车辆配送路径安排直接影响着其物流成本及配送效率。对于实施共同配送后的车辆路径问题研究方面，任腾等^[9]设计了一种新的改进遗传算法求解考虑同时取送货的城市物流共同配送问题，结果表明能够提升交通资源利用率和运输效率。王勇等^[13]研究了多中心共同配送开闭混合式的车辆路径优化问题并利用其提出的遗传-粒子群混合优化算法有效降低了物流运营成本和提高资源利用率。随后王勇等^[14]研究了基于资源共享的多中心共同配送电动车辆路径优化问题，并设计了 3D-K-means 时空聚类的 CW-MOPSO 混合算法有效降低了物流运营总成本。李珍萍等^[15]结合共同配送的特点设计自适应大邻域搜索算法求解其设计的两层级共同配送选址-路径问题，为解决共同配送的物流网络构建和优化问题提供了决策依据。

通读文献可知，共同配送相关文献多数停留在理论层面。实施共同配送后的车辆路径问题研究主要针对于多个配送中心的配送路径考虑多种影响因素进行路径优化研究，并结合多种角度来分析解决如何节约配送成本以及提高客户满意度等问题。针对多家物流企业实行基于资源共享的共同配送策略下的车辆路径问题的研究较为匮乏。综上问题和特点，本研究假设多家快递企业进行末端配送网点共享，建立以总配送成本最低为目标的问题模型，通过仿真分析共同配送策略执行前后的成本变化验证其有效性。

1.3.2 车辆路径问题研究现状

(1) 单配送中心问题

在构建出车辆路径模型后，车辆路径求解算法的设计是解决该模型问题的核心。Dantzig 和 Ramser^[16]在 1959 年提出了车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)，其内涵是车辆由配送中心出发通过规划合理的车辆路径，在满足所有客

户需求的前提下,实现路径最短化、配送成本最小化等目标。此后较长一段时期的 VRP 问题研究主要围绕单配送中心问题进行,学者们基于 VRP 问题通过考虑不同角度的因素进行了深入研究。程亮等^[17]以服装产品为研究对象,将碳排放成本、车辆运输成本和顾客满意度等考虑进优化目标,建立多目标绿色车辆路径问题模型,帮助快时尚企业科学规划车辆配送方案,实现经济效益与环境效益的最佳平衡。裴小兵等^[18]针对易变质产品配送路径优化问题提出一种改进人工蜂群算法求解,并验证了该算法具有良好的全局收敛能力及较好的求解效果。葛显龙等^[19]研究了带软时间窗的电动车辆路径优化问题,建立了以最小化路径成本、时间窗惩罚成本以及车辆使用成本为目标函数的数学模型,并设计改进的禁忌搜索算法进行求解。Xu 等^[20]设计了一种用于解决多种商品和多次访问的非配对取货问题的精确求解方法,以工厂资源调度数据进行实验,结果表明该精确算法比切割算法的改进方法表现更好。Rahul 等^[21]针对易腐烂产品的配送路径规划进行研究,通过纳入交通和能耗特征并将其转化为聚合车辆路径问题 (AVRP),并利用 X-means 聚类找到配送最佳路线,降低运营成本。Ouertani 等^[22]将运输医疗废物路线上的危险废物与非危险废物分开处理,提出一种基于总体前后统计检验结果的自适应遗传算法。在基准实例和真实数据实例上进行实验,实验结果优于已知最佳结果。Sze 等^[23]考虑实时路线交通信息来重新优化原有配送路线,设计两阶段的 VNS 方法在常用的 VRP 数据集上进行测试得到了高质量的解决方案。

从上述研究中可以发现学者们在车辆路径问题的创新点主要集中在求解算法的设计以及模型的考虑因素,通过界定问题的研究主体进行模型构建、算法设计。考虑的因素主要有车型、客户时间窗、碳排放、客户满意度等。求解算法主要是围绕经典算法进行改进以达到理想的算法性能,少量研究者提出全新的算法作为求解算法。

(2) 多配送中心问题

最初的 VRP 问题研究中,通常研究单配送中心问题,随着物流水平的提高及研究问题的深入,多配送中心车辆路径问题 (Multi Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP) 渐渐变成学者们研究的重点问题。陈沿伊等^[24]针对生鲜配送问题中产品时效要求高和配送时间不确定的特点,通过考虑客户时间窗及路网拥

堵时空特征构建出综合模糊时间窗和速度时空系数的多车场多车型生鲜配送路径优化模型,利用设计的传统蚁群遗传算法求解该模型可以较好解决关于配送时间的问题,为生鲜产品精益配送提供新思路。王勇等^[13]研究了多中心共同配送开闭混合式车辆路径问题,并提出了多中心共同配送联盟优化策略,为资源集成共享的多中心共同配送网络优化问题提供了新的研究思路。WANG 等^[25]设计了一种改进遗传算法求解客户需求拆分以及时间窗约束下的多仓库共同接送车辆路径问题。路世昌等^[26]设计了基于两阶段的量子遗传算法求解多配送中心选址-多车型路径问题。邓忆瑞等^[27]改进了客户满意度的表达规则并利用改进 ALNS 算法和算例仿真对多配送中心同时集散货物车辆路径问题进行研究,认为车辆数应当成为最终决策制定的影响因素。张歆悦等^[28]将车辆行驶时间成本纳入目标函数,研究表明在时间依赖情况下选择合理的出发时间能使车辆总行驶时间减少。闫淼等^[29]考虑不同车型的特点对城市配送进行研究,结果表明在城市冷链物流配送中运用不同车型中可以有效降低配送成本。张颖钰等^[30]设计了混沌变异头脑风暴算法求解带时间窗的多中心半开放式同时送取货的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup, VRPSDP)问题,拓展了车辆路径类的模型,减少了路径数量。于江霞等^[31]根据客户的消费行为将客户分为不同类别设置不同的时间窗成本,构建出基于客户分类的即时配送路径优化模型,从战略角度为企业寻求更多潜在效益。杜琛等^[32]结合了交通拥堵延时指数研究考虑关于客户满意度和生鲜最小损耗的路径问题。王涛等^[33]构造了智能水滴遗传混合算法用于求解混合时间窗的车辆路径问题,其求解效果较好。Nagy 和 Salhi^[34]针对多配送中心送取货车辆路径问题(Multi Depot Vehicle Routing Problem with Delivery and Pickup, MDVRPDP),构建了表示车辆实时载重的约束条件,并提出了几种集成算法用于求解 MDVRPDP。Sombuntham 等^[35]提出了基于多种社会学习结构的粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)求解 MDVRP,以减少物流网络中车辆的数目和行驶里程。Oberscheider 等^[36]以最小化运输距离和碳排放量为目标建立了 MDVRP 数学模型,并提出了一种新的迭代求解方法来解决该模型。Subramanian 等^[37]建立了考虑运营成本和环境影响的 MDVRP 优化模型,并提出了一种集划分公式和迭代局部搜索的混合算法求解该

问题。Kim 等^[38]建立了以运营成本最小为目标函数的数学模型，并将预处理算法、划分算法和拉格朗日松弛算法结合形成一个近似精确算法的方法用于求解 MDVRP。Gansterer 等^[39]针对 MDVRP 问题，设计了分支定价算法、Benders 分解算法和列生成算法等三种精确算法来求解该问题。Dragomir 等^[40]提出了考虑多属性的 MDVRP 问题，并建立了相关的数学模型求解该问题。Soriano 等^[41]将 MDVRP 问题分解成三个子问题，并提出了针对每个子问题设计相关的自适应大邻域搜索算法，研究结果表明所提出的算法优于常规的自适应大邻域搜索算法。

通读文献可知，与多配送中心有关的文献较多为针对于单个企业的多个配送中心的配送路径考虑多种影响因素进行路径优化研究，并结合多种角度来分析解决如何节约配送成本以及提高客户满意度等问题。本文研究假设的多家快递企业进行实行 MDVRP 共同配送策略后的问题模型可理解为多中心配送问题。企业独立配送时及划分聚类后的共同配送为单配送中心问题。

1.4 研究内容及结构

通过对当前末端配送模式现状进行梳理，采取理论分析、构建模型、实验仿真、结果分析的逻辑对城市物流末端共同配送的车辆路径问题进行研究。首先，设计了两种城市共同配送策略，并将其运输产生的碳排放考虑在内。其次，设计了一种基于节约里程算法的改进遗传算法对相关模型进行求解，采用数据集案例验证了算法的有效性。最后，针对提出的若干具有可行性的共同配送模式，采用构造的数据集进行实验仿真分析。据此逻辑确定本文研究技术路线图 1.2。

根据研究技术路线确定本文的研究内容及论文结构如下：

第一章：绪论。阐述研究背景、研究目的与意义，梳理相关研究现状并介绍主要研究内容及创新点。

第二章：介绍有关配送及算法相关理论。分析城市末端配送网络，介绍共同配送相关理论及使用的算法，包括 K-means 算法、节约里程算法及遗传算法。

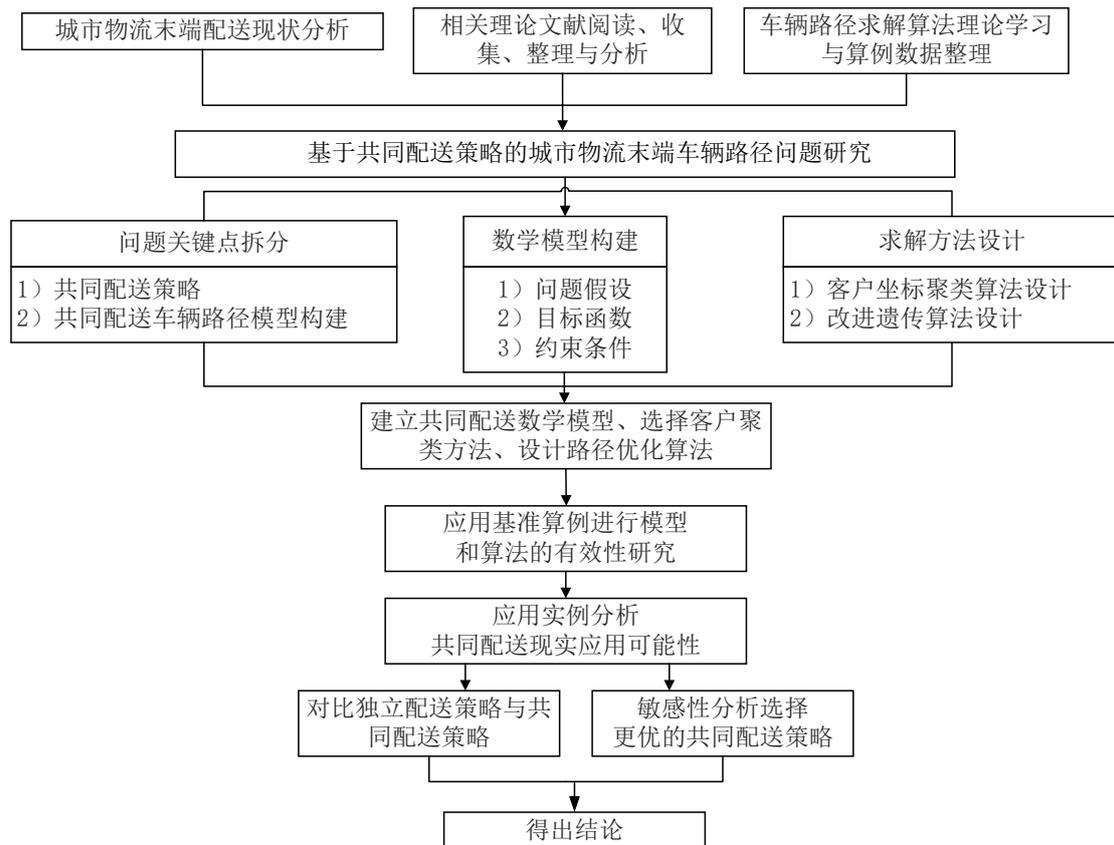
第三章：进行共同配送策略设计及模型构建。在考虑是否存在共同客户的基础上提出两种共同配送策略，一种是将该区域视为包含多个末端配送网点的整体来面向客户提供配送服务。另一种是首先利用 K-means 聚类方法将该区域按照

网点数量进行区域划分，每个网点承担聚类划分范围后的配送服务。以总配送成本最低为优化目标构建模型。

第四章：车辆路径问题求解算法设计。在遗传算法的基础上引入节约里程算法，将节约里程算法的解作为遗传算法的初始解进行后续求解，利用 Python 和公开 Somolon 数据集仿真模拟配送过程。对 Gurobi、传统 GA 和本文设计的改进遗传算法（Clarke-Wright-Genetic Algorithm, CWGA）的结果及迭代过程进行比较分析，验证所设计的改进遗传算法的有效性。

第五章：不同配送模式下城市末端配送路径仿真分析。利用设计的 CWGA 算法对多企业独立配送和共同配送后的路径进行求解，进行成本计算和对比分析，验证了共同配送相较于传统独立配送的优越性。对部分参数进行灵敏度分析探究其对总成本的影响程度。最后，为保证物流企业合作稳定确定最优联盟加入序列。

第六章：总结和展望。得出研究结论，讨论将来可进一步研究的主要方向。



1.5 主要创新点

目前针对多物流企业实行共同配送的车辆路径问题的研究较少,本文研究设计了基于现实情形的城市物流末端共同配送策略。所设计的两种共同配送分为 MDVRP 式及划分聚类式。对各个末端配送网点的设施存储能力以及客户信息进行共享,将该区域配送网络、配送路径进行重新规划。仿真结果表明共同配送能够节约企业的总配送成本,具有一定的创新性。并基于实际情况构建出符合本文研究的车辆路径问题模型,在总配送成本构成加入了碳交易成本。设计了一种引入节约里程算法作为初始解的遗传算法,将节约里程算法得出初始解编码复制为种群规模的数量作为遗传算法可读取的初始染色体种群进行后续求解。通过算法性能测试对比常用的求解算法,验证了设计的 CWGA 算法在车辆路径求解方面有着更好的性能。针对不同配送模式下城市末端配送路径问题利用该算法求解,能够获得高效的配送方案。

1.6 本章小结

本章首先讨论了目前有关共同配送、车辆路径问题的研究现状,并总结主要的研究进展。阐述对多家物流企业实行共同配送策略下的车辆路径问题研究的必要性。最后,对论文主要研究内容及技术路线、创新点进行详细描述。

2 相关理论基础

2.1 城市末端配送网络

2.1.1 城市配送网络构成

在城市物流配送中，常见的物流企业会将城市配送业务流程分为三级，每级的功能和任务不同。既有的城市配送网络将物流节点划分为：分拨中心、物流配送中心、末端配送网点^[42]。分拨中心位于配送网络的最顶层，所有包裹均要通过分拨中心进入后续运输环节。配送中心是快递配送网络的中心节点，具有承上启下的作用。末端配送网点是快递配送网络的基层节点，基本职能是管理片区内的包裹配送揽收作业、作为包裹临时储存场所、承担售后服务等功能^[43]。参考实际情形得出既有的城市物流配送网络的节点分级情况和城市物流配送网络的构建与组织形式如图 2.1 所示。

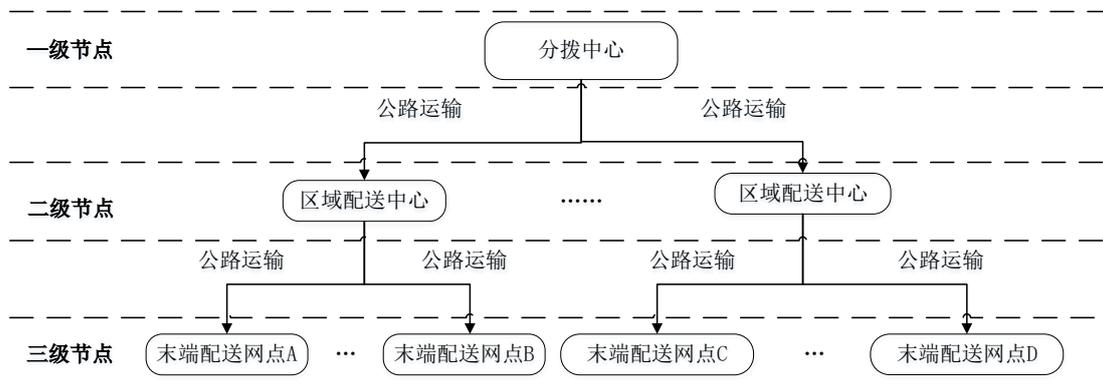


图 2.1 城市物流配送网络组成

2.1.2 末端配送

末端配送承接了将用户包裹从配送网点配送到客户手中的任务，不同于干线运输的大规模、大批量形式，末端配送的任务更为细化。王苏^[44]将末端配送定义为“将顾客所购买的商品，按照顾客要求送达指定地点和收件人的物流配送服务”。欧阳玉子^[45]将末端配送可以界定为“以解决物流配送终端用户(客户)需要为直观目的，将物品送到客户手里的行为”。由此可见末端配送作为物流配送企业直接面向客户的一级，物流配送企业如何提高末端配送环节的用户体验尤为重要。本

研究的末端配送指：末端配送网点将客户的商品或他人寄送的包裹及时地配送到客户位置（家、小区或者学校等）的服务，在此基础上设计共同配送策略。

随着快递业务量的增加和行业技术进步，快递企业在不断摸索适宜的配送模式，各企业拥有各具特色的末端配送方式。常见的城市物流末端配送方式见图 2.2。

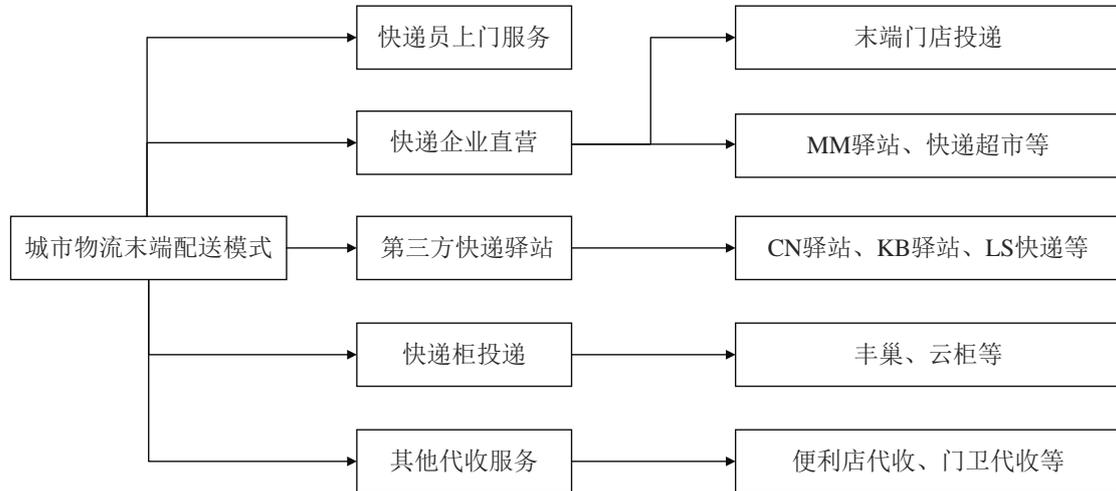


图 2.2 城市物流末端配送方式

各种末端配送模式为客户提供了不同的取件方式，其优缺点见表 2.1。

表 2.1 各末端配送模式优缺点

末端配送模式	优点	缺点
送货上门	建立良好物流企业品牌形象、直面客户问题反馈，提高客户满意度。	配送成本较高、效率较低。客户时间窗等要求较难协调。
快递企业直营	无需专员派送，节约配送成本。	覆盖不完全，客户选择概率低。
第三方快递驿站	降低物流企业与校园、小区等对接的交易成本。客户无需被动接受包裹快递服务的时间限制。	品牌区分度较低，需要对第三方进行利润分成。
自提柜	无需专人看守或派送，降低人力成本。客户可以在任意时间取件。	设备成本投入、后期维修成本高，快递柜容积和数量有限制。
其他代收服务	前期投入成本较低，利用便民门店覆盖大部分客户的优势，快速扩张业务范围、减轻快递员负担。	无法获得客户的问题反馈信息，且代收服务人员容易忽视非主要的快递业务。物流公司需要向其支付一定的佣金。

2.1.3 末端配送存在的问题

传统的城市末端配送环节存在诸多问题，末端配送网点是物流配送网络构成的基本单位，快递企业在建设末端配送网点时多数从自身角度进行考虑，尚未形

成规范管理的城市快递配送节点体系^[46]。根据《2021 年中国快递发展指数报告》显示，2021 年全国共建成末端公共服务站达 16.1 万个。同时，在末端分拣环节和配送环节中均有很多重复操作存在，影响着整个末端配送环节的效率。

两家物流企业进行城市物流独立配送情形如图 2.3 所示。两家物流企业拥有各自的分拨中心、配送中心、网点和客户。近年来由于快递业务量迅速增长，物流企业纷纷建设大量配送中心和末端网点，这种末端网点建设模式在一定程度上存在盲目性，造成了城市配送网络、布局不合理与资源冗余等问题。

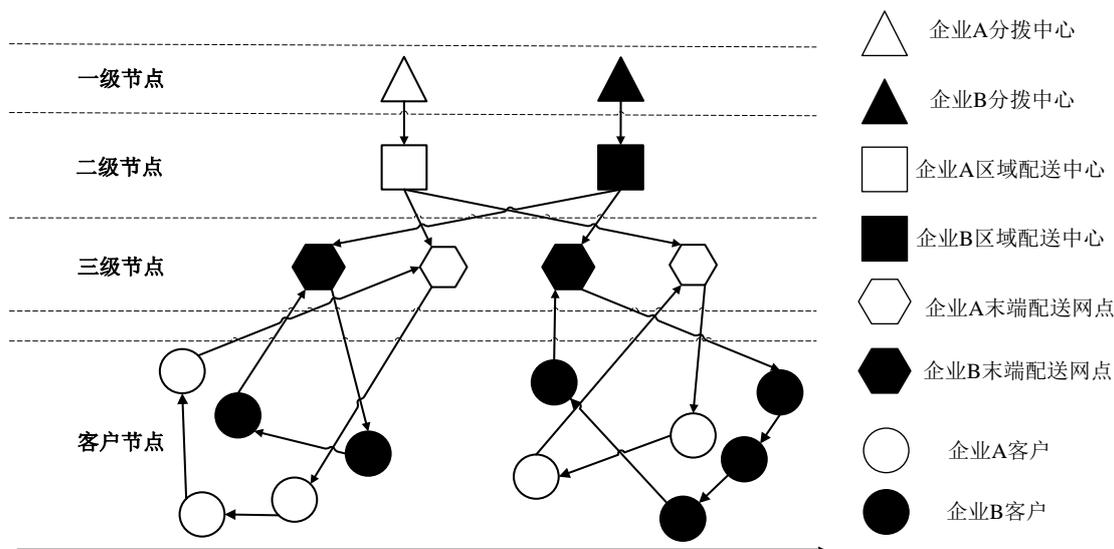


图 2.3 城市物流企业独立配送示意图

2.2 共同配送相关理论

2.2.1 共同配送概念及模式

我国 2021 年发布的《物流术语》^[47]中将共同配送定义为：由多个企业或其他组织整合多个客户的货物需求后联合组织实施的配送方式。本文所研究的共同配送是指多个物流运输企业形成配送联盟，通过共享客户的配送信息及仓储资源，合理安排配送路线将产品送至客户需求点。常见的不同模式的共同配送有：

(1) 同产业间的横向共同配送

同类产品的多家企业相互合作利用同一配送中心集中进行产品配送服务。通过制定相关规格，将多家企业货物混载，提高装载率，统一开展配送活动^[48]。对于物流企业的具体做法是：在各企业的配送中心中选取公共配送中心，接收来

自不同物流企业货物，由公共配送中心对不同企业的客户进行统一配送。

(2) 委托第三方物流共同配送模式

利用第三方物流企业专门进行城市内部配送，配送企业只负责城市间的干线运输，表 2.2 为运输和配送的区别。接受委托的第三方物流主要是从事快递的末端配送，只需服务于各家快递企业与客户之间，如图 2.4 所示。

表 2.2 运输和配送的区别

内容	运输	配送
运输性质	干线运输	多支线运输
运输工具	大型货车或铁路运输、水路运输	小型货车
管理重点	效率优先	服务优先
功能类型	功能单一	功能综合

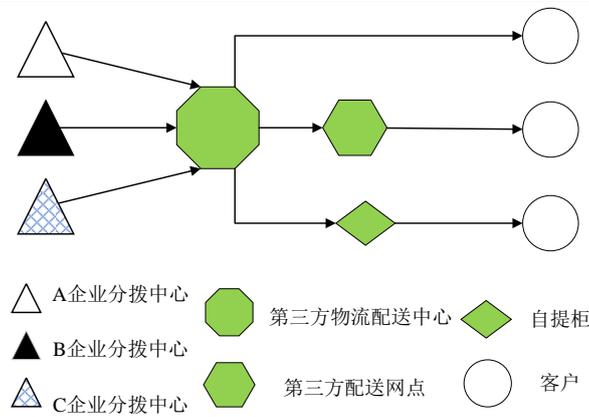


图 2.4 第三方物流共同配送模式

(3) 公共信息平台为主导的共同配送

以公共信息平台为主导的共同配送运作模式^[49]是指政府建立共同配送公共信息平台，对整个区域内的物流配送信息进行整合，实行共同配送。在实现共同配送模式的过程中考虑各物流企业的利益和需求。例如，通过与物流企业建立长期合作关系，实现资源共享和互利共赢。此外，还需要通过信息化技术手段，实现订单信息、配送路线、车辆安排等信息的共享和协同工作来提高配送效率。

2.2.2 共同配送优势

通过将共同配送模式运用到末端配送环节构建城市物流共同配送体系可尝试解决物流企业目前存在的配送成本过高、车辆使用数增加和装载率较低等一系列自身问题，并能够减轻企业物流配送过程对城市社区和生态环境的负担，是推

进物流服务进一步高质量发展的良好方式。共同配送的优势可以总结为以下几点。

(1) 节约配送成本

不同物流企业的配送线路有很大的可能会存在交叉重复。实施共同配送后可以有效减少线路交叉重复问题的出现,降低配送成本且提高配送效率。车辆使用数量降低后还可以减少碳交易成本及碳排放等污染,带来良好的社会效益。

(2) 提升企业市场竞争能力

相比较于企业各自为战的情况,组成共同配送联盟后,物流企业可以扩大市场空间,市场核心竞争力得到增强。同时共同配送也具有灵活的组织形式,在合作过程中,组成共同配送的成员可进行增减或者替换,成员也可根据自身情况决定是否退出联盟寻找新的伙伴组成联盟以增强自身的竞争力。

(3) 提高客户满意度

若客户对多个企业的末端配送网点都有需求,传统的独立配送方式需要客户分别取走每个企业的包裹,不仅增加了客户的取货次数,还可能延长客户的等待时间。采用共同配送的方式,将多家企业的包裹集中到特定网点为客户进行配送。客户可以一次性取完所有包裹,减少等待时间并提高客户满意度。

2.3 算法理论

2.3.1 k-means 聚类算法

K-means 是一种无监督学习算法,它主要用于聚类(Clustering)任务,将数据集中的数据点按照它们之间的相似性分成 k 个不同的簇(Cluster)。一般用欧氏距离作为衡量数据对象间相似度的指标,该算法的核心思想是:预先指定初始聚类数目 k 并在数据集中随机选取 k 个初始聚类中心,根据数据对象与聚类中心之间的距离,不断更新聚类中心的位置,直到聚类中心不再变化或达到最大的迭代次数停止,得到最终结果。

相较于其他的聚类算法,K-means 算法具有效果较好、思想简单、高效率速度快等优点得到了广泛的应用。聚类数目是由用户来决定,针对于本文研究,需要聚类数量和某区域配送网点数目保持一致,通过划分每个网点承担的客户服务范围进行后续研究,因此采用 K-means 算法较为适合。

K-means 算法流程如图所示：

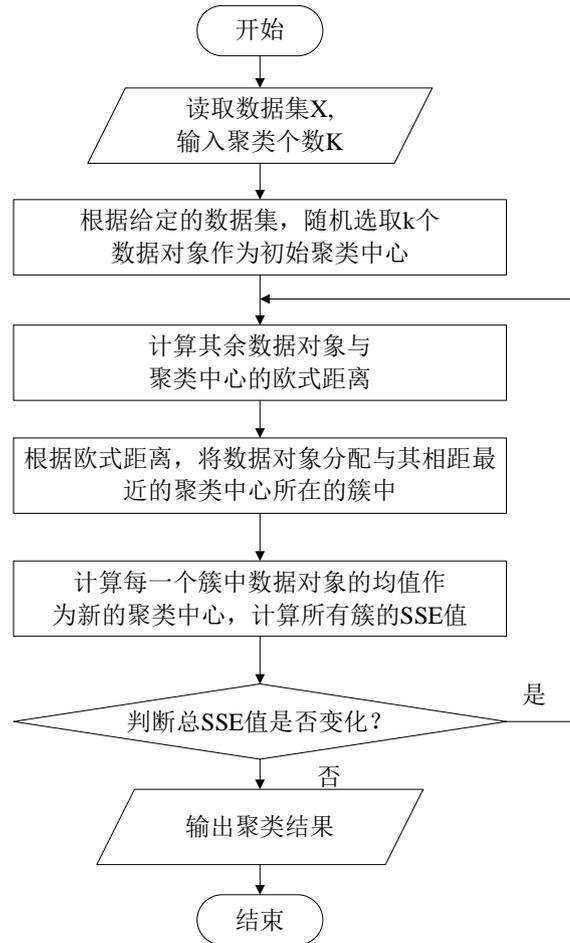


图 2.5 经典 K-means 算法流程图

空间中数据对象与聚类中心间的欧式距离计算公式为：

$$d(x, C_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - C_{ij})^2} \quad (2.1)$$

其中， x 为数据对象， C_i 为第 i 个聚类中心， m 为数据对象的维度， x_j 和 C_{ij} 即 x 和 C_i 的第 j 个属性值。对本研究来说，主要是针对于客户的地理位置进行聚类划分而不考虑客户需求量，只需考虑客户的 x 、 y 坐标，因此数据对象的维度是 2。

对应的欧式距离计算公式为：

$$d(x, C_i) = \sqrt{(x_x - C_{ix})^2 + (x_y - C_{iy})^2} \quad (2.2)$$

整个数据集的误差平方和 SSE 计算公式为：

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |d(x, c_i)|^2 \quad (2.3)$$

2.3.2 节约里程法

节约里程算法又称 CW (Clarke-Wright) 算法, 其主要思想是在运输车辆路线有多种选择情况下, 以最短路径为目标来确定运输问题^[50]。该方法可以缩短运输距离以降低配送成本。节约里程法主要原理是: 首先对客户点派出一辆车进行单独配送作初始配送方案, 每到达一个客户执行完配送任务后便回到配送网点, 完成所有客户的配送。基于三角定理中的两边之和大于三边的原则, 对配送线路进行合并, 计算合并后配送线路所节约的里程, 按节约里程值的大小递减顺序依次排列建立节约里程表, 将两个环路依次组合形成一个新的环路, 使得每次合并后的运输距离下降的水平最大。随即判断这些客户的需求量之和是否满足车辆的最大载重要求, 若满足则可加入到路径中, 若不满足则按照节约里程顺序取下一个路径, 直至路径的车辆载重量达到最大载重要求, 最终要确保所有客户都在最终路径方案中。节约里程法路线合并示意图见图 2.6。

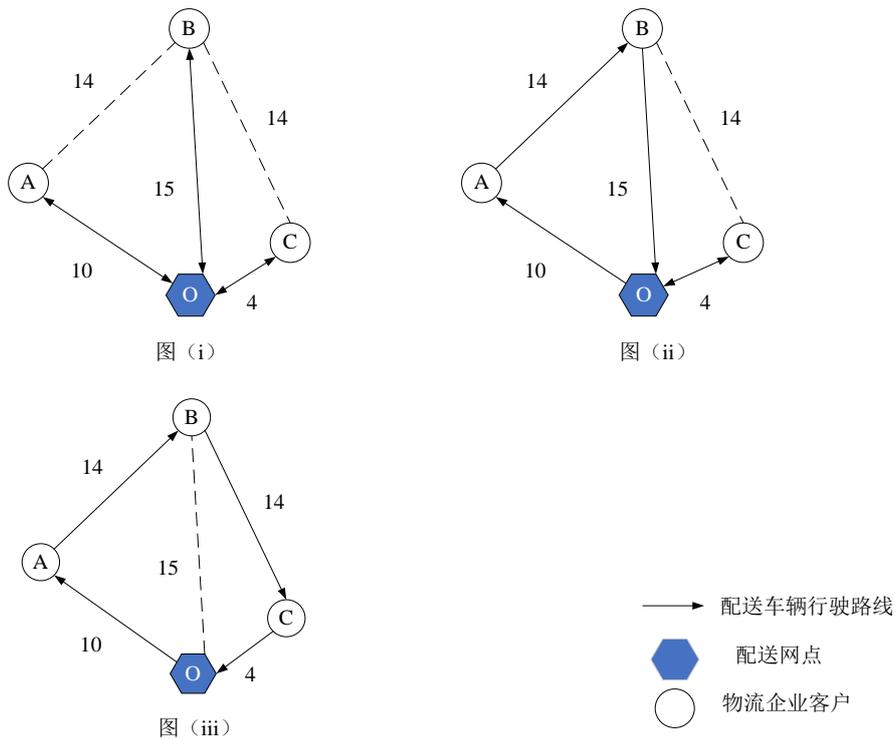


图 2.6 节约法路线合并示意图

配送网点 O 为 A、B、C 三个客户进行包裹配送, 首先派车三辆车进行配送, 车辆路线安排如图 (i) 所示。考虑车辆返程的总配送距离为 $(10+15+4) * 2 = 58$ 。基于三角定理计算节约里程, $\Delta M_1 = 10 + 15 - 14 = 11$, $\Delta M_2 = 15 + 4 - 14 = 5$, $\Delta M_1 > \Delta M_2$,

所以将线路 O-A-O 与线路 O-B-O 合并为线路 O-A-B-O，如图 (ii) 所示。此时节约距离为 $58 - (10 + 14 + 15 + 4 * 2) = 11$ 。继续进行合并线路操作， $\Delta M_3 = 15 + 4 - 14 = 5$ ，将线路 O-A-B-O 与线路 O-C-O 合并为线路 O-A-B-C-O，如图 (iii) 所示。此时节约距离为 $58 - (10 + 14 + 14 + 4) = 16$ 。最终利用节约里程法节约了 16 的里程。如此重复运作直到车辆达到载重量限制，随后用同样的方法对下一辆车进行操作。

2.3.3 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究，由约翰·霍兰德 (J·Holland) 教授于 1975 年首先提出，是一种基于生物遗传和进化机制的适合于复杂系统优化的自适应概率优化的技术。与精确算法相比，遗传算法能够计算更加复杂的问题。与其他经典启发式算法相比，遗传算法不易陷入局部最优、计算速度快和容易操作等特点^[51]。

由于遗传算法不需要对决策变量本身进行操作，有利于选择、交叉、变异算子等进程的进行，具有能够快速得到比较复杂问题最优解的特点。遗传算法在求解的过程中从多个染色体构成的种群多个点同时开始搜索，求解时不易陷入局部最优。此外，遗传算法在计算时无需其他辅助信息，搜索最优解的依据是适应度函数，且函数定义域设定随意，易与求解模型结合。遗传算法流程如图 2.7 所示：

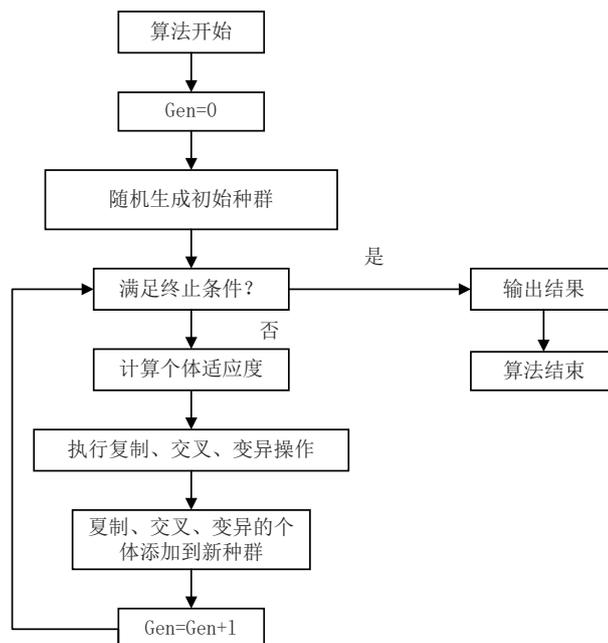


图 2.7 标准遗传算法流程图

3 共同配送策略及模型构建

3.1 共同配送策略

3.1.1 策略描述

城市末端配送物流网络由多家物流企业的多个末端配送网点以及其对应的大量的客户组成。在该物流网络中，末端配送网点为客户提供“最后一公里”的配送服务，即末端配送网点将货物按照客户需求进行配送。该物流网络中的客户需求量小，客户分布范围较广。针对该区域提出共同配送策略：各个末端配送网点的设施存储能力以及客户信息（包括客户的位置分布信息，需求量信息等）在参与资源共享的企业网点之间可以充分共享，网点间通过包裹转运可以为其他网点的客户提供包裹配送服务。

图 3.1 为在城市末端配送物流网络中，某区域四家物流企业的 4 个末端配送网点采取独立配送策略时的配送路线示意图。不考虑各个企业间存在共同客户时，配送网点在进行配送时只承担归属客户的配送任务。独立配送时车辆行驶距离较远及未进行设施存储能力、客户信息共享是引起物流网络成本较高的主要原因，直接降低了该物流网络的运输效率。

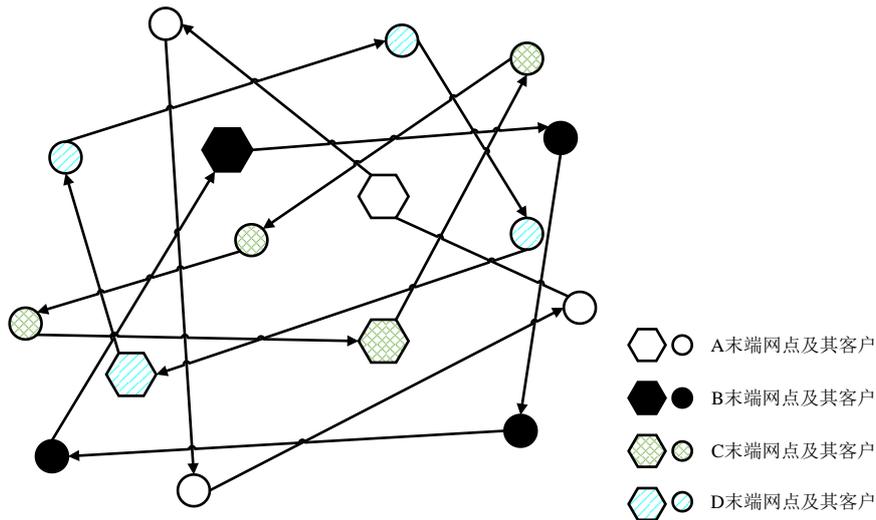


图 3.1 独立配送线路

图 3.2 为在城市末端配送物流网络中，某区域四家物流企业的 4 个末端配送网点采取共同配送策略时的车辆路径图。当各物流企业合作实施共同配送策略时，

对车辆路线进行重新配置,避免了车辆长距离服务或行驶的不合理车辆调度情况,物流配送网络通过各个网点采取共同配送策略得到了优化。通过整合各个网点的设施存储资源和共享客户信息,各个网点的新的配送任务转变成为附近多个网点客户提供配送服务,提高物流网络的运输效率。

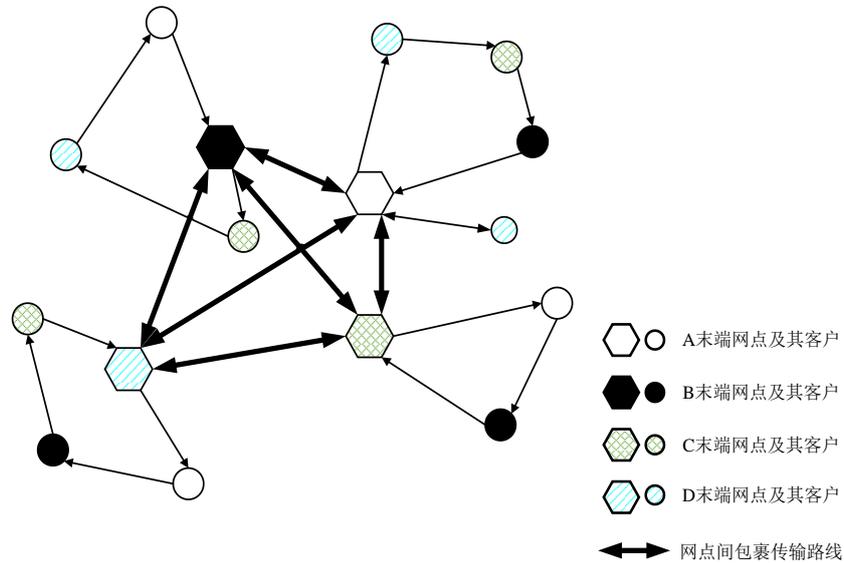


图 3.2 共同配送后线路规划

当各个末端网点间进行共同配送时,区域配送中心发来的货物存放到同企业末端配送网点,各末端配送网点间安排车辆进行转运,转运的目的是为使除自身外的其他网点能够取得其所承担的配送范围内的客户包裹来进行后续配送任务,转运路线见图 3.2。转运完成后各末端配送网点安排车辆执行配送任务,车辆结束本次服务客户路线后返回其出发网点。

3.1.2 MDVRP 式共同配送

共同配送后每个末端网点承担的配送任务发生变化,由先前的只承担自己客户的配送任务到现在的可以承担该区域其他企业客户的配送任务,将该区域视作整体,作为 MDVRP (多配送中心车辆路径) 问题进行处理。由多家网点配送转化为多个网点形成的一个联盟整体配送网络的多中心配送问题。

客户点需求量不同时有可能得出不同的车辆路线安排。其对应的现实含义为:共同配送策略实施后每个网点承担的服务客户范围会由于客户需求量的变化而变化。图 3.3 为 MDVRP 式共同配送后的可能路径安排。

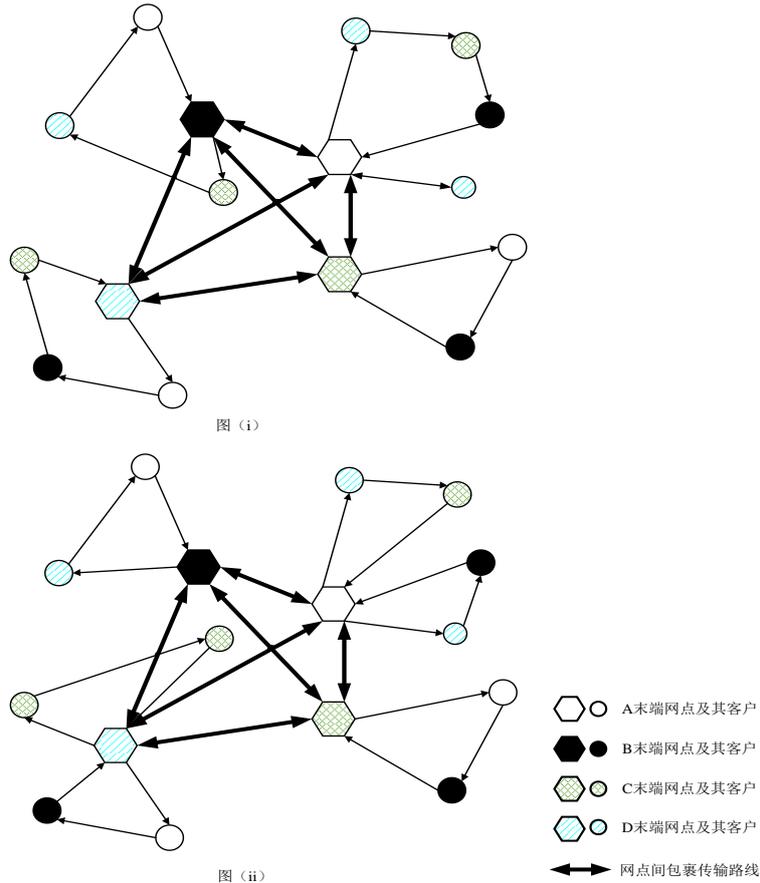


图 3.3 MDVRP 式共同配送后的可能路径安排

3.1.3 划分聚类式共同配送

划分聚类式共同配送首先需要将客户基于其地理位置分布信息进行客户聚类，将客户分配给就近且合适的配送网点，配送网点则成为该部分客户的特定服务网点。此时每个网点承担的配送任务量并不会出现较大差异，且网点每天服务的客户不发生变化，为后续可能的物流增值服务提供便利。

图 3.4 为某区域四家物流企业的 4 个末端配送网点采取划分聚类式共同配送策略时的车辆路径图。利用 K-means 聚类算法规划出每个网点承担的配送范围以及服务的客户，将多中心配送问题转化为多个单中心配送子问题。对车辆路线进行重新配置，末端配送网点间同样安排车辆进行转运。每个末端网点承担的配送客户发生变化，由之前只承担归属客户的配送任务转变为现在的承担特定区域范围内客户的配送任务。

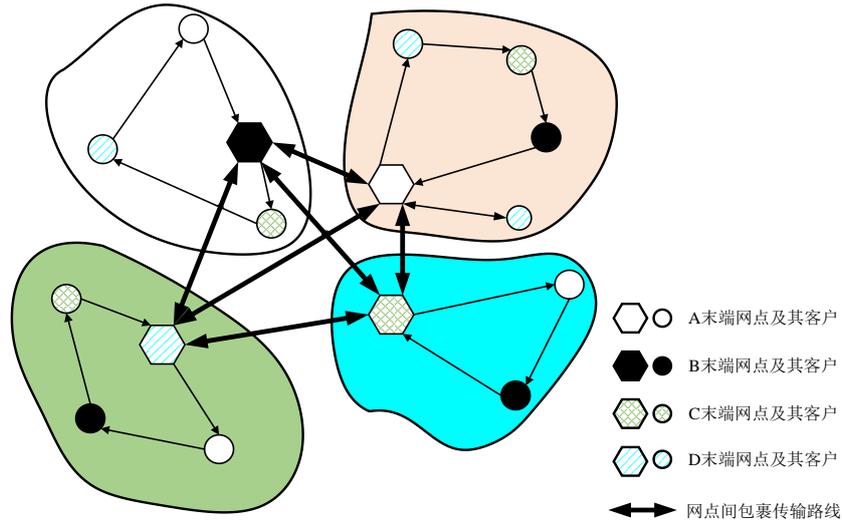


图 3.4 划分聚类式共同配送

3.2 考虑共同客户的配送策略

3.2.1 存在共同客户的独立配送

城市配送物流网络中多个物流企业的客户可能存在重合，不同的配送网点为该区域内的客户提供配送服务，若部分客户对每个配送网点都有需求，即存在共同客户。其现实情形是生活中客户可能会面临一天内收到多家快递配送的包裹的问题。由于各物流企业配送策略、车辆安排和网点分布的不同，导致向客户配送包裹的时间存在较大差异。这种情况下，客户在一天内多次取件，将会浪费客户时间并降低客户体验。

图 3.5 为城市末端配送物流网络中，某区域 2 家企业的 2 个末端配送网点在存在共同客户时为其执行独立配送任务的车辆路径示意图。

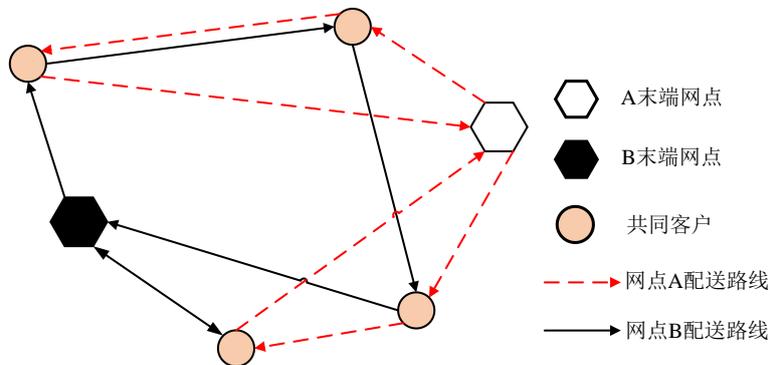


图 3.5 拥有共同客户时的独立配送

3.2.2 存在共同客户的共同配送

为能够满足共同客户尽可能地一次性取走所有快递包裹的需求，本节在 3.1 节的基础上提出了一种考虑共同客户的共同配送模式。将来自不同企业的客户包裹进行整合统一配送，客户只需一次取件便可完成所有包裹的获取，这种共同配送模式可以有效提升客户体验并提高企业配送效率。

当各个物流企业存在共同客户时并采用 MDVRP 共同配送策略时，首先通过网点间的运输线路将多个网点的货物运输至配送网点，一个客户有且只有一个网点承担其配送任务，如图 3.6 所示。

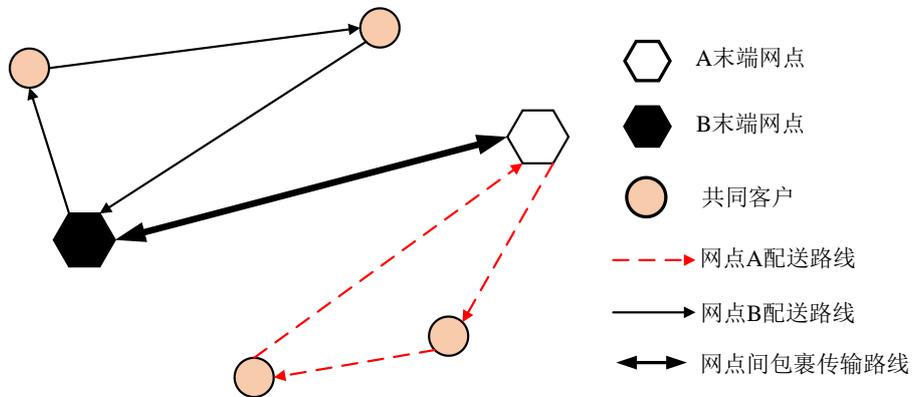


图 3.6 MDVRP 式共同配送后的可能路径

当各个物流企业存在共同客户时并采用划分聚类式共同配送策略时，先对共同客户进行聚类，判断网点承担的客户范围。存在共同客户时的划分聚类式共同配送如图 3.7 所示。

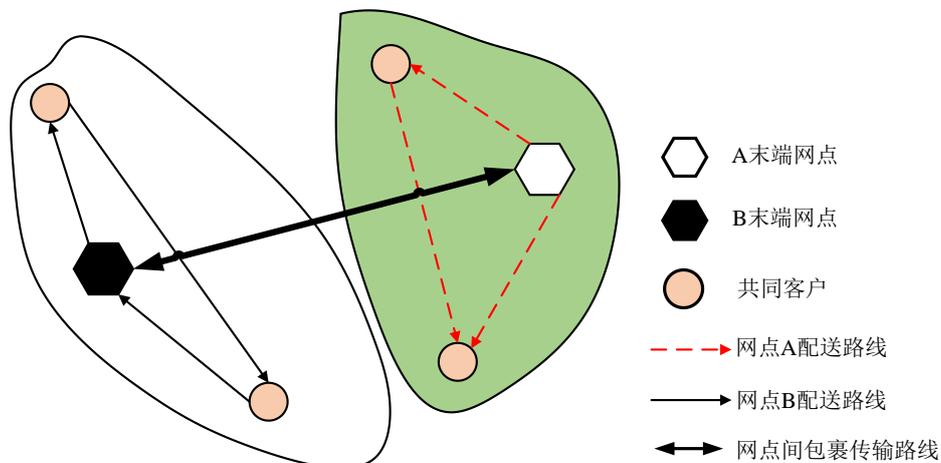


图 3.7 划分聚类式共同配送

3.3 成本模型构建

3.3.1 问题描述及假设

本文主要研究基于共同配送策略下的车辆路径问题,是指由参与共同配送的若干末端配送网点为其所属的该区域客户进行配送的车辆路线安排问题,在总成本的考虑中,结合城市末端配送的特性,以及近年来我国发展绿色物流的呼声越来越高的现状。将碳排放问题考虑在内,在总配送成本中纳入碳交易成本。通过进行仿真分析验证城市物流末端共同配送的经济效益及社会效益,将总成本分为车辆固定使用成本、车辆运输成本、碳交易(碳排放)成本和执行共同配送所必须的转运成本。

为了方便模型求解,做出如下假设:

- (1) 一定时间内,客户的位置信息以及需求量已知,不考虑客户时间窗要求。
- (2) 快递均为经过折算后的标准快递,将快递货物视为同质产品。
- (3) 未成功配送的快递不考虑重新配送。
- (4) 某城市区域内有多个末端配送网点且拥有充足的配送车辆。
- (5) 末端配送服务车辆具有容量限制。
- (6) 考虑为服务对象的收货需求,不考虑寄件需求。
- (7) 每个客户的收货需求量小于车辆容量。
- (8) 每个客户有且只有一辆配送车辆提供服务。
- (9) 独立配送情形下给客户的货物由该客户归属的末端配送网点进行货物配送服务,共同配送情形下可由任意末端配送网点进行货物配送服务。
- (10) 车辆自末端配送网点出发,完成配送任务后回到原末端配送网点。
- (11) 网点间转运车辆为各网点自有车辆,完成转运货物后投入客户配送服务,若无法一次性转运完成则启用下一辆车。
- (12) 客户配送车次同时出发。

3.3.2 参数说明

模型中涉及的参数符号及其含义见表 3.1。

表 3.1 参数符号及其含义

符号	含义
D	末端配送网点, $D \in \{1, 2, \dots, n, \dots\}$
N	客户节点, $N \in \{1, 2, \dots, n, \dots\}$
A	节点集合, $A = D \cup N$
k	使用车辆数量
K	车辆集合, $k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\}$
Z	车辆自重
s_k	车辆 k 在配送线路中服务客户点集合
p	单位碳排放成本, 参考碳交易市场价格
c	二氧化碳排放系数
F	当日使用一辆配送车辆的固定费用
a	单位公里保养费用
b	单位公里折旧费用
O	汽油价格
d_{ij}	节点之间的欧氏距离, $i \in A, j \in A$
Q	车辆容量
q_i	客户需求量, $i \in N$
x_{ij}^k	0-1 变量, $x_{ij}^k \in \{0, 1\}$
y_{ij}	网点间无法一次转运完成需要的额外转运次数, $y_{ij} \in \{1, 2, 3, 4, \dots\}$
u_i^k	车辆 k 经过客户节点 i 后已完成配送的货物数量

3.3.3 成本分析

在城市配送网络中, 物流配送企业有多项成本, 包括但不限于运输成本、仓储成本、信息系统成本、物流服务成本、税费成本及环保成本等。其中配送成本是物流企业运营成本的主要构成, 因此以降低总配送成本为首要目标, 构建以总配送成本最小为目标的优化模型, 包括车辆固定使用成本、车辆运输成本、碳交易成本和转运成本。

车辆固定使用成本主要与车辆使用数目有关, 车辆固定使用成本 C_1 定义如下:

$$C_1 = kF \quad (3.1)$$

配送车辆在向客户运送包裹的过程中, 会产生油耗成本和保养费、折旧费等, 将车辆运送过程中的成本称作行驶成本。利用负载估计法测算油耗量, 油耗主要与车辆载重和行驶距离有关, 保养费、折旧费等费用主要和行驶距离有关。

单位距离油耗函数为:

$$\rho(X) = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Z} X \quad (3.2)$$

其中 ρ_0 为车辆空载时单位距离油耗， ρ^* 指满载时单位距离油耗， Z 为车辆自重， X 为当前车辆载重量。 X_{ij} 为车辆在节点 (i, j) 之间经过时的车辆载重。

车辆行驶成本 C_2 定义如下：

$$C_2 = O \sum_{i,j \in A} d_{ij} x_{ij}^k \rho(X_{ij}) + (a + b) \sum_{i,j \in A} d_{ij} x_{ij}^k \quad (3.3)$$

车辆运输过程中燃烧燃料产生二氧化碳，我国碳交易市场开启时间较短，碳税仍处于调研阶段，因此以碳交易成本代替碳税成本，其成本公式如下：

$$Cost = \text{单位碳交易成本} \times \text{碳排放量} \quad (3.4)$$

根据全国碳排放市场的交易价格，设置碳排放的单价 p ，已知碳排放量与燃油消耗量间存在线性关系，燃油碳排放系数 c 与燃油消耗量的乘积即为燃油产生的碳排放量，因此碳排放成本 C_3 定义如下：

$$C_3 = pc \sum_{i,j \in A} d_{ij} x_{ij}^k \rho(X_{ij}) \quad (3.5)$$

当不同的配送网点在配送不同客户货物时，需要货物在不同配送网点间转移，以满足承运配送网点所需的转移需求。假设任意两个配送网点往返若干次能将客户的需求转移完成，因此，转运成本为车辆往返于配送网点产生的路径成本以及碳排放成本，转运成本 C_4 定义如下：

$$C_4 = 2(a + b) \left(\sum_{i,j \in D} d_{ij} + \sum_{i,j \in D} d_{ij} y_{ij} \right) + 2(O + pc) \left\{ \sum_{i,j \in D} d_{ij} \rho(X_{ij}) + \sum_{i,j \in D} d_{ij} y_{ij} \rho(X_{ij}) \right\} \quad (3.6)$$

3.3.4 模型构建

基于总配送成本最小化为目标建立的数学模型如下：

$$\text{Min} F = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (3.7)$$

s. t.

$$\sum_{j \in A, j \neq i} x_{ij} = 1, i \in N \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in A, i \neq j} x_{ij} = 1, j \in N \quad (3.9)$$

$$u_i^k + q_j = u_j^k, i, j \in A, k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\}, i, j \text{不同时为 } 0 \quad (3.10)$$

$$u_i^k \leq Q, k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\} \quad (3.11)$$

$$q_i \leq u_i^k, k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\} \quad (3.12)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, i, j \in A \quad (3.13)$$

$$x_{D_m i}^{D_m k} = x_{j D_m}^{D_m k} = 1, i, j \in N, m \in D, k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\} \quad (3.14)$$

$$x_{D_m D_n}^{D_m k} = 0, m, n \in D, k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\} \quad (3.15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i, j \in N} x_{ij}^k \leq |S_k| - 1, \forall k \in K, S_k \in N \quad (3.16)$$

式 (3.7) 为目标函数式, 计算最小化的总配送费用, 包括车辆固定成本 C_1 、车辆行驶成本 C_2 、碳排放成本 C_3 以及转运成本 C_4 。式 (3.8) 为车辆驶出约束, 对于任意被服务后的客户节点只可以有一辆车驶出。式 (3.9) 为车辆驶入约束, 对于任意被服务的客户节点只能有一辆车驶入。式 (3.10) 为配送量约束, 当 i, j 节点间有车辆 k 驶过时, 要保证前从 i 节点驶出的车辆货物数量 u_i^k 加上 j 节点的客户需求量 q_j 之和等于 u_j^k , 说明已完成 j 客户的配送任务。式 (3.11) 为车辆容量约束, 对于处于任何位置的车辆, 已经配送的货物数量不能超过车辆总容量。式 (3.12) 客户需求量约束, 完成配送的单个客户需求量小于已经配送的货物数量。式 (3.13) 为 0-1 决策变量, 若 i, j 节点间有车辆 k 通过则 x_{ij}^k 为 1, 否则为 0。式 (3.14) 为车场出入约束, 若车辆 k 在末端配送网点 Dm 出发执行配送任务之后必须再回到末端配送网点 Dm 。式 (3.15) 为车辆路径约束, 任意车辆不能通过末端配送网点 Dm 到达另外一个末端配送网点 Dn 。式 (3.16) 为消除线路子回路约束。

进行独立配送问题模型求解以及执行聚类共同配送策略时, 此时问题为多个单中心配送子问题, 进行单中心配送求解时的问题模型为:

$$\text{Min}F = C1 + C2 + C3 \quad (3.17)$$

$$\sum_{j \in A, j \neq i} x_{ij} = 1, i \in N \quad (3.18)$$

$$\sum_{i \in A, i \neq j} x_{ij} = 1, j \in N \quad (3.19)$$

$$u_i^k + q_j = u_j^k, i, j \in A, k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\}, i, j \text{不同时为 } 0 \quad (3.20)$$

$$u_i^k \leq Q, k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\} \quad (3.21)$$

$$q_i \leq u_i^k, k \in \{1, 2, \dots, n, \dots\} \quad (3.22)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, i, j \in A \quad (3.23)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i, j \in N} x_{ij}^k \leq |S_k| - 1, \forall k \in K, S_k \in N \quad (3.24)$$

式 (3.17) 为目标函数式, 计算最小化的总配送费用。独立配送问题求解时未产生转运成本 C_4 , 执行聚类共同配送策略后由于每个配送网点的服务客户已经确定, 因此网点间转运量同时确定, C_4 可以在确定网点间转运量后进行计算。式 (3.18) - 式 (3.24) 为单中心车辆路径问题模型约束。含义同式 (3.8) - (3.13) 及式 (3.16)。

3.4 本章小结

本章首先对共同配送策略进行了描述: 根据是否存在共同客户划分为两种策略, 每个策略下分为 MDVRP 式共同配送及划分聚类式共同配送, 对共同配送下的车辆路径模型进行了模型假设, 参数说明及成本分析, 构建了以包含车辆固定使用成本、行驶成本、碳排放成本及转运成本等四项成本类型的总配送成本最小为优化目标的数学模型。

4 改进遗传算法设计及性能测试

4.1 算法设计

4.1.1 染色体编码、解码

利用遗传算法进行求解时，第一步是将可行解进行编码染色体。设计染色体编码方案根据本文研究问题的特点，对于车辆路径问题采取顺序整数编码方式，无需进行解码，可以直接得到染色体对应的车辆路线。编码中的客户顺序也代表着客户的服务先后顺序。基因值由末端配送网点编号、客户编号构成，其中 m 为网点数量， n 为客户数量，基因数量为末端配送网点数与客户数量之和。

假设对 15 个客户及 4 个末端配送网点进行编码，1-4 编码设为末端配送网点，5-19 编码为客户，对网点服务客户的需求量进行累加操作，若加上下一个客户基因的需求量超过车辆容量则开启新路径。一条可能的完整的染色体如下所示：

1	6	12	15	11	5	16	2	7	10	8	17	3	13	18	4	9	14	19
---	---	----	----	----	---	----	---	---	----	---	----	---	----	----	---	---	----	----

若网点 1 服务的客户 6、客户 12 和、客户 15 和客户 11 的需求量之和超过了车辆容量，则将客户 6、客户 12 和、客户 15 保存为一条路径，客户 11、客户 5 和客户 16 由新的车辆进行配送，可知该染色体体现的信息为：

表 4.1 染色体对应的车辆路径信息

网点	服务客户编号	车辆安排	车辆使用数目
1	5,6,11,12,15,16	1-6-12-15-1, 1-11-5-16-1	2
2	7, 8, 10,17	2-7-10-8-17-2	1
3	13,18	3-13-18-3	1
4	9,14,19	4-9-14-19-4	1

4.1.2 初始种群生成

在遗传算法中，通过引入节约里程算法的解作为遗传算法的初始解作为初始解生成初始种群，提高遗传算法的搜索性能，从而加速求解过程。节约里程算法输出车辆路径解过程如图 4.1 所示：

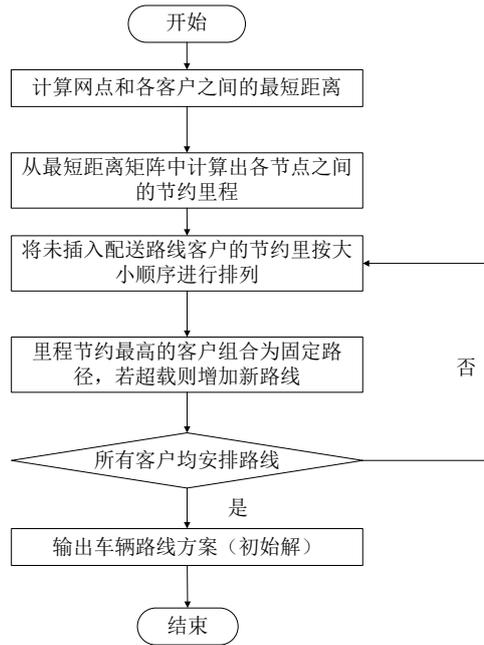


图 4.1 节约里程算法流程

4.1.3 适应度函数

遗传算法的选择是通过适应度的大小来实现, 选择适应度值大的个体进行保留, 随着种群进行不断的迭代, 更多优秀的个体基因遗传给下一代得到适应度更大的后代, 此时得到的解越接近最优解。式 (3.7) 为总配送成本最小函数, 以其倒数作为适应度函数, 当适应度值越大时则总配送成本越低。式 (4.1) 为适应度函数。

$$fitness = \frac{1}{MinF} \quad (4.1)$$

4.1.4 选择算子、交叉及变异操作

选择适应度较大的染色体进行后续迭代, 每一次迭代遗传给下一代的基因更靠近最优解。本文选择轮盘赌法进行选择算子操作, 其概率计算公式如下所示:

$$P_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^N fitness_i} \quad (4.2)$$

$fitness_i$ 即为个体 i 的适应度值, N 为设定的种群里面的个体数目。将个体的适应度函数值与所有个体适应度值相加的比值作为选择该个体的概率 P_i , 个体被选中的概率与其适应度大小成正比, 更易保留下适应度大的优秀个体。

交叉算子与变异算子决定着遗传算法的搜索能力, 对收敛速度及求解质量具

有重要影响。交叉操作选择出的个体两两以交叉概率 p_c 进行随机部分染色体交换，产生新的个体。本文采用顺序交叉法进行交叉，顺序交叉法的具体步骤可以总结如下：首先在两条父代染色体中随机挑选两个位置，作为起始位置和结束位置，然后将一条父代染色体中起始位置和结束位置之间的基因直接复制到子代染色体的同一位置上，最后将另一条父代染色体上的其余缺少基因按顺序补充到子代染色体中，这样一轮顺序交叉操作可以产生两条子代染色体。

其交叉过程如下所示：

Step1:从父代染色体中随机选择一对染色体并随机选择几个基因的起止位置，两条染色体所选基因起止位置相同。例如随机选择一对染色体如下：

Parent1:

1	6	12	15	11	5	16	2	7	10	8	17	3	13	18	4	9	14	19
---	---	----	----	----	---	----	---	---	----	---	----	---	----	----	---	---	----	----

Parent2:

1	14	13	15	6	9	10	16	2	5	8	7	17	3	12	18	4	11	19
---	----	----	----	---	---	----	----	---	---	---	---	----	---	----	----	---	----	----

从 Parent1 中随机选择起点和终点如下：

1	6	12	15	11	5	16	2	7	10	8	17	3	13	18	4	9	14	19
---	---	----	----	----	---	----	---	---	----	---	----	---	----	----	---	---	----	----

Step2:将 Step1 中被选择的基因保留，产生一个新的染色体。生成子代如下：

		12	15	11	5													
--	--	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Step3:在另一条父代染色体中将 Step1 被选择的基因删除，按顺序将余下基因放入 Step2 生成的染色体中。第一步选中的基因在 Parent2 中的位置如下：

1	14	13	15	6	9	10	16	2	5	8	7	17	3	12	18	4	11	19
---	----	----	----	---	---	----	----	---	---	---	---	----	---	----	----	---	----	----

其余基因按照父代染色体中的顺序放入第二步生成的子代中如下：

Child1:

1	14	12	15	11	5	13	6	9	10	16	2	8	7	17	3	18	4	19
---	----	----	----	----	---	----	---	---	----	----	---	---	---	----	---	----	---	----

同理可得 Child2 的操作步骤：

在 Parent2 上选择相同的基因起止位置如下：

1	14	13	15	6	9	10	16	2	5	8	7	17	3	12	18	4	11	19
---	----	----	----	---	---	----	----	---	---	---	---	----	---	----	----	---	----	----

将被选择的基因保留并生成子代：

		13	15	6	9													
--	--	----	----	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

第一步选中的基因在 Parent1 中的位置如下：

1	6	12	15	11	5	16	2	7	10	8	17	3	13	18	4	9	14	19
---	---	----	----	----	---	----	---	---	----	---	----	---	----	----	---	---	----	----

其余基因按照父代染色体中的顺序放入第二步生成的子代中如下：

Child2:

1	12	13	15	6	9	11	5	16	2	7	10	8	17	3	18	4	14	19
---	----	----	----	---	---	----	---	----	---	---	----	---	----	---	----	---	----	----

遗传算法在经过选择、交叉操作过程之后进行变异操作。变异是将染色体的部分基因以小概率 p_m 来进行变异，将染色体内部的基因片段进行交换，从而提高解的多样性。本文采用随机两点互易的方式进行变异，过程如图所示：

原染色体：

1	6	12	15	11	5	16	2	7	10	8	17	3	13	18	4	9	14	19
---	---	----	----	----	---	----	---	---	----	---	----	---	----	----	---	---	----	----

随机选择染色体 9 号位和 14 号位交换位置进行变异操作。

新染色体：

1	6	12	15	11	5	16	2	13	10	8	17	3	7	18	4	9	14	19
---	---	----	----	----	---	----	---	----	----	---	----	---	---	----	---	---	----	----

4.1.5 终止迭代准则

本文采用限制最大迭代次数的终止准则，达到设定的最大迭代次数则停止迭代。输出种群中找到适应度最好的个体对应的路径为最优配送路径。

所设计的 CWGA 算法实施步骤见图 4.2。

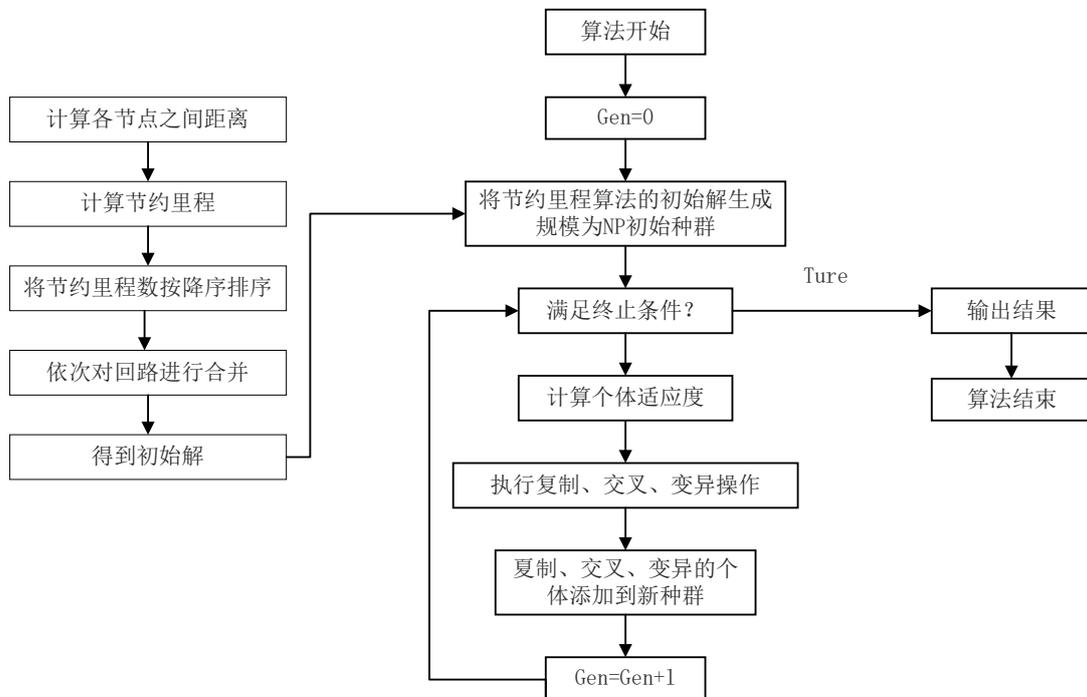


图 4.2 CWGA 算法流程图

4.2 Gurobi 精确求解

Gurobi 是新一代大规模数学规划优化器,它在多个领域中都展现出了出色的优化速度和精度。它的计算结果确定而非随机,能够为用户提供可靠结果。其应用领域包括物流和运输优化、生产计划、资源分配、金融风险管理、电力系统调度等。用户可以对复杂的决策问题建立数学模型,并通过该求解器获得最优或接近最优的解决方案,实验中使用的 Gurobi 是面向学术用户的免费许可证版本。

实验过程中发现 Gurobi 求解器求解效果与求解时间密切相关,当问题规模较大时求解时间较长且容易陷入循环,需要对其增加求解时间限制。统一设定求解器求解时间为 300s,时间达到设定值后即停止求解并输出当前的最优结果。

利用 Gurobi 建模求解过程如下:(1)输入客户坐标、需求量,配送中心坐标、车辆容量等参数信息。(2)进行数据预处理,读取输入的数据并遍历所有坐标生成距离矩阵。(3)Python 调用Gurobi 10.0.1导入gurobipy库,创建模型:`model = Model('CVRP')`(4)完成目标函数的设定后将优化模式为寻找最小值`model.modelSense = GRB.MINIMIZE`。(5)添加车辆驶出驶入、配送量、为车辆容量、消除线路子回路约束等模型约束条件,并通过`vtype = GRB.BINAR`语句定义 0-1 决策变量。(6)设定终止条件为`model.Params.MIPGap = 0.1`或最长求解时间不超过 300 秒`model.Params.TimeLimit = 300`,`MIPGap`即后续解与当前最优解之间的相对误差 GAP。(7)进行优化`model.optimize()`,输出最优车辆路径信息并进行图形化展示。

4.3 算法性能测试

为验证所设计的改进遗传算法的性能,利用标准 Solomon 数据集^①对设计的 CWGA 算法进行性能测试。Solomon 标准测试集共有 C、R、RC 三种类型。C 型测试集,客户聚集分布;R 型测试集,客户随机分布;RC 型测试集,客户半聚集半随机分布。其中每个数据集包含 1 个配送中心以及 100 个客户信息。客户信息中包括坐标信息、需求信息及时间窗信息,本文研究不考虑时间窗要求。

^① 标准 Solomon 数据集 <http://w.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>

在现实物流配送场景中，配送网点当日服务客户点数量并不确定。因此本文选用其中的 R101 数据集分别为客户数量为 50、75 和 100 的小、中、大规模算例进行实验，车辆容量统一设置为 160。采用本文设计的改进遗传算法与传统的遗传算法及 Gurobi 求解器分别求解进行横向对比。

众多学者利用 Solomon 标准测试集进行算法性能测试主要以车辆距离为优化目标，涉及到成本计算时对车辆相关参数采取的数值也不尽相同。因此本节的算法性能测试同样以车辆最短行驶距离为优化目标进行仿真，比较其距离优化效果。在 Intel(R) Core (TM) i5-12450H CPU@2.00GHz、内存 16GB 的 Windows10 平台计算机上利用 Python3.11 在 PyCharm 2022.3.1 环境下进行算法求解。实验中算法及相关参数设置如表 4.2。

表 4.2 算法及相关参数

参数	说明	参数值
M	遗传算法种群规模	500
Itermax	遗传算法最大迭代次数	500
Pc	染色体交叉概率	0.7
Pm	染色体变异概率	0.1
Q	车辆容量	160
TimeLimit	Gurobi 最大求解时间/s	300

算法性能测试结果见附录 1，实验结果统计见表 4.3，表中差值计算公式见式 (4.3) 及式 (4.4)。

表 4.3 求解方法结果比较

数据集	运输距离/km			车辆数量/辆			GAP_1	GAP_2
	Gurobi	GA	CWGA	Gurobi	GA	CWGA		
R101-50	601.30	658.66	608.97	5	5	5	1.28%	-7.54%
R101-75	866.73	1056.23	842.78	8	7	7	-2.76%	-20.21%
R101-100	1135.62	1291.66	979.63	11	10	10	-13.74%	-24.16%

$$GAP_1 = \frac{CWGA - Gurobi}{Gurobi} \quad (4.3)$$

$$GAP_2 = \frac{CWGA - GA}{GA} \quad (4.4)$$

分析 Gurobi、GA、CWGA 在测试集上的实验结果发现：50 个客户时，Gurobi 和 CWGA 求得的最优解差异较小，两者行驶距离明显小于传统 GA；75 个客户时，CWGA 相较于 Gurobi 优化效果提升了 2.76%，运输车辆减少了 1 辆，相较

于 GA 优化效果提升了 20.21%；100 个客户时，CWGA 相较于 Gurobi 及 GA 的优化效果分别提升了 13.74%和 24.16%。分析 R101-75 和 R101-100 的算例结果，可以看到在车辆使用数量 GA 与 CWGA 比 Gurobi 求出的解更优，说明当客户规模较大时无论是传统 GA 或 CWGA 在优化车辆数量方面有着更好的求解效果。

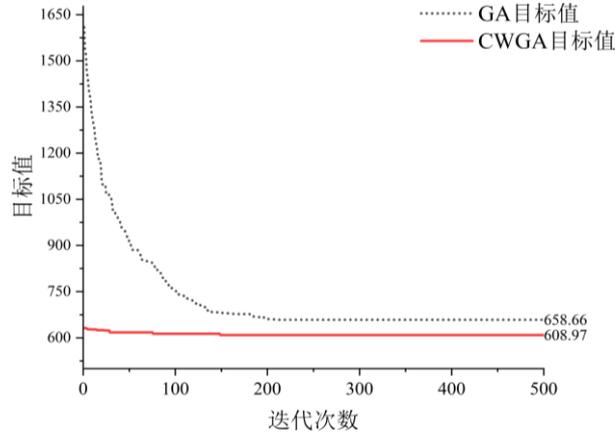


图 (i) 客户数量为 50

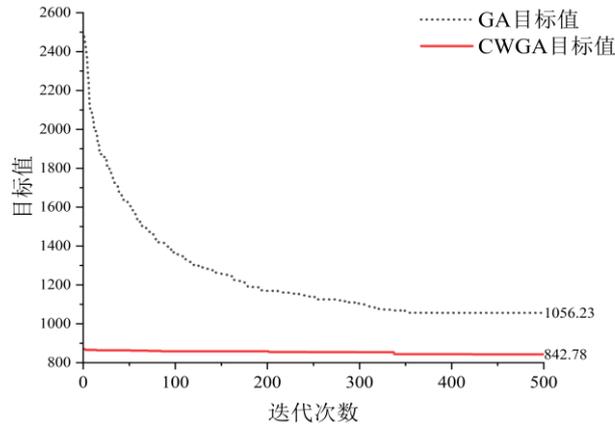


图 (ii) 客户数量为 75

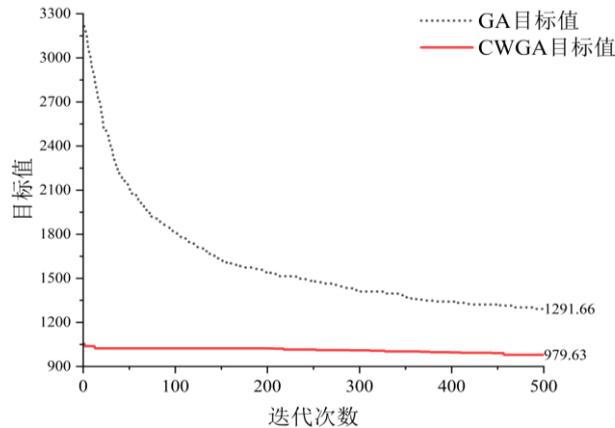


图 (iii) 客户数量为 100

图 4.3 GA 与 CWGA 迭代过程比较

实验中 GA 和 CWGA 的迭代过程对比如图 4.3 所示。可以看出设计的 CWGA 算法的收敛速度和最终结果明显优于传统 GA 算法。从迭代曲线的变化趋势对比

分析，CWGA 算法在迭代初期迅速找到较优解，在迭代 200 次左右趋于收敛；而传统 GA 算法在算法终止后未找到比 CWGA 算法更好的优秀解，在迭代过程一直处于波动状态，收敛速度较慢且收敛结果较差。CWGA 在迭代时往往在初期就可以找到相对优质的解，在后续的迭代过程中变化较小，说明所设计的算法在求解性能上较优。

4.4 本章小结

为求解前文建立的车辆路径模型，设计了一种改进遗传算法，将节约里程算法生成的可行解作为遗传算法的初始解再进行后续计算，并通过算法性能测试验证了所设计的算法的有效性。

5 算例测试及结果分析

5.1 实验准备

5.1.1 数据集

本文所设计的 CWGA 算法及其他算法利用 Python 语言编写，仿真实验均在 Intel(R) Core (TM) i5-12450H CPU@2.00GHz、内存 16GB 的 Windows10 平台的计算机上利用 Python3.11 在 PyCharm 2022.3.1 (Professional Edition)环境下运行。

由于现有研究没有关于多企业共同配送车辆路径问题的标准测试算例，因此本章在标准算例 Solomon R101 的基础上进行改造，根据标准算例去除其中时间窗要求生成适合于独立配送及共同配送车辆路径问题的测试算例，R101 数据集中只有一个坐标为 (35, 35) 的配送中心，为构成多个末端配送网点以及多个客户的城市配送系统算例，在其基础上设置 4 个末端配送网点，算例中 2-101 仍为客户点，其具体信息见附录 2 中测试集 1。设置末端配送网点位置时参考现实网点分布情况：无论多个网点是否属于同一快递公司其网点分布均呈现多数分散，少数聚集的特点。设置的网点坐标信息见表 5.1。

表 5.1 四个企业末端配送网点坐标

末端配送网点	X 坐标	Y 坐标
企业 A 末端配送网点	20	55
企业 B 末端配送网点	45	50
企业 C 末端配送网点	20	30
企业 D 末端配送网点	50	20

某区域物流企业执行独立配送策略时，每个配送网点负责若干客户。具体到算例中每个网点服务 25 个客户，且每个客户只需要由一个网点服务。每个末端配送网点的服务客户标号见表 5.2。

表 5.2 配送网点所对应的服务客户

末端配送网点	服务客户标号
企业 A 末端配送网点	2-26
企业 B 末端配送网点	27-51
企业 C 末端配送网点	52-76
企业 D 末端配送网点	77-101

对各个企业末端配送网点标记为 A, B, C, D。末端配送网点及其服务客户

的地理位置信息见图 5.1，图中展示了其大体分布情况，末端配送网点及其服务客户的地理位置分布不存在明显规律。

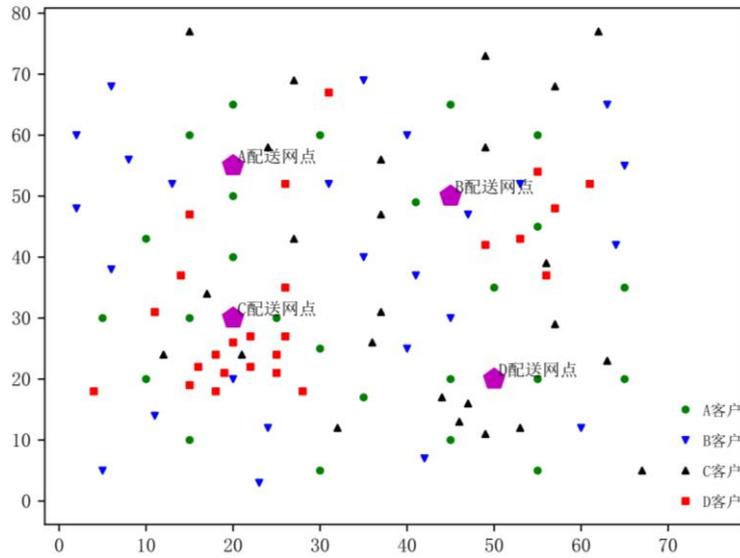


图 5.1 网点及客户散点图

5.1.2 实验参数设定

在 GA 及其改进算法中，合适的参数设置是保证算法运行效果良好的必要条件。为获得合适的算法参数，在正式实验前通过进行多次参数数值实验进行效果比较来取得算法的参数测试，在参数测试时发现，种群规模是影响改进后的遗传算法性能的关键性参数，过小的种群规模不能充分的实现对初始解的后续变化空间的探索，求得最终解的质量一般。当种群规模设置的过大时，一方面优质解被发现的概率较低，另一方面会耗费大量的计算资源，直接影响算法的求解质量和求解速度。通过对种群规模参数进行多次微调测试。最终确定的 CWGA 算法参数见表 5.3:

表 5.3 算法参数设置

参数	含义	参数值
M	遗传算法种群规模	500
Itermax	遗传算法最大迭代次数	500
Pc	染色体交叉概率	0.7
Pm	染色体变异概率	0.1

为方便问题研究，本文不考虑交通堵塞等情况，假定配送车辆是为匀速行驶。车辆容量设定为 160，配送车辆的最大重量包括其车身自重 1.9t 及最大载重量 2.8t 共计为 4.7t，每单位车辆容量代表着 0.0175t 的货物。配送车辆的当日固定

使用成本为 100 元。模型中其他企业配送成本相关参数见表 5.4。二氧化碳排放系数是指单位油耗产生的碳排放量。我国正处于碳税与碳排放交易政策的衔接阶段，单位碳交易成本并不固定，本文选定的单位碳排放成本以北京市碳排放权电子交易平台在 2023 年 12 月 13 日的单位碳交易成本成交均价进行设置。

表 5.4 企业配送成本相关参数

参数	含义	单位	参数值
D	末端配送网点, $D \in \{1, 2, \dots, n, \dots\}$	个	4
N	客户节点, $N \in \{1, 2, \dots, n, \dots\}$	个	100
Z	车辆自重	吨	1.9
ρ^*	配送车辆满载单位距离油耗	升/千米	0.2278
ρ_0	配送车辆空载单位距离油耗	升/千米	0.1255
p	单位碳排放成本	元/千克	0.072
c	二氧化碳排放系数	千克/升	2.8
F	当日使用一辆配送车辆的固定费用	元	100
a	单位公里保养费用	元/km	0.05
b	单位公里折旧费用	元/km	0.03
O	燃油价格	元/L	7.5
Q_z	车辆最大载重	吨	2.8
Q	车辆最大容量	0.0175 吨/单位	160

5.2 共同配送策略仿真

5.2.1 独立配送仿真

独立配送即当前四家企业在该区域的末端配送现状，独立配送下，配送企业拥有各自配送网点、配送车辆等资源，对自身顾客进行独立配送。当前问题可以归纳为四个单中心配送 VRP 子问题，总配送成本构成仅包括车辆固定成本、运输成本、碳排放成本三个部分。利用所设计的 CWGA 算法求解独立配送策略仿真得到的最优配送路径车辆客户服务顺序及车辆信息如表 5.5 所示，其中 Load 为当前车辆的装载量，LR (Load Rate) 指装载率，D (Distance) 指行驶距离。对独立配送过程中车辆路径方案的分析发现，4 家配送企业中，每家企业派出 3 辆车进行配送。多数车辆能达到近满载状态，但是每个网点都存在某个车辆的装载较低的情况。总体来看，有 3 车辆的装载率低于 51%，3 车辆的装载率在 60%-90% 之间，其中 A3 路径上的车辆装载率最低为 17.50%，平均装载率为 75.94%。

表 5.5 服务路线信息

网 点 编 号	路 径 编 号	客 户 服 务 顺 序	Load	LR	D/km
A	A1	A-5-24-16-15-17-18-6-9-20-A	149	93.13%	176.39
A	A2	A-19-7-14-3-23-22-26-25-13-4-10-21-2-8-A	155	96.88%	194.77
A	A3	A-11-12-A	28	17.50%	32.36
B	B1	B-51-28-49-48-37-50-33-B	150	93.75%	115.60
B	B2	B-34-36-35-30-41-40-42-43-44-39-45-38-46-47-B	158	98.75%	263.93
B	B3	B-31-32-29-27-B	81	50.63%	69.31
C	C1	C-62-61-54-59-76-57-68-56-55-69-C	153	95.63%	160.21
C	C2	C-53-63-65-64-67-66-72-52-71-70-60-C	156	97.50%	179.84
C	C3	C-58-75-73-74-C	49	30.63%	69.29
D	D1	D-88-98-97-77-78-82-79-80-81-D	134	83.75%	120.29
D	D2	D-95-90-89-91-83-84-85-87-92-101-93-D	143	89.38%	170.88
D	D3	D-96-100-94-86-99-D	102	63.75%	70.54

每个配送网点的车辆配送路径配送方案如图 5.2 所示。

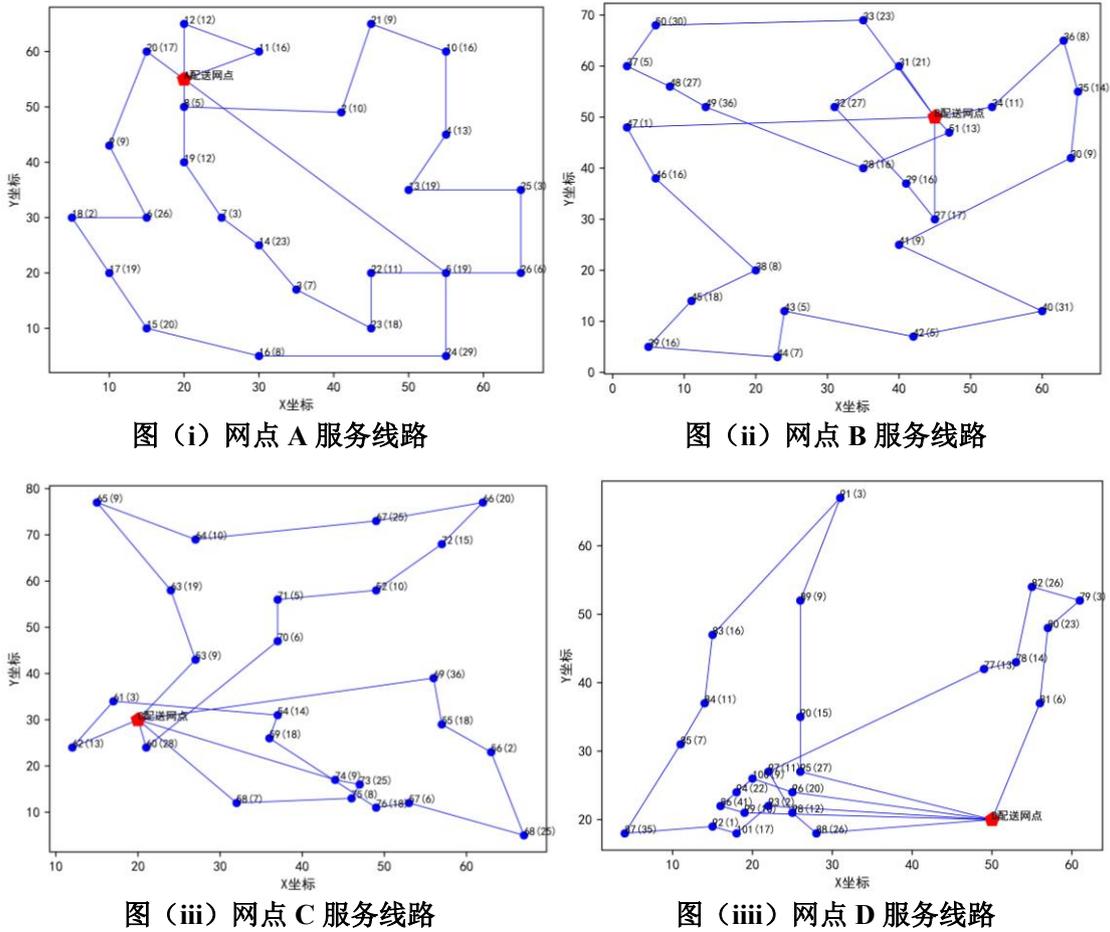


图 5.2 独立配送时网点服务线路图

独立配送时各企业总成本为 3707.48 元，具体各项成本统计数据见表 5.6。

表 5.6 独立配送时成本

网点	路径编号	C1	C2	C3	线路成本	总成本
	A1	100	292.67	7.49	400.16	
A	A2	100	297.27	7.57	404.84	942.11
	A3	100	36.21	0.90	137.11	
	B1	100	171.63	4.36	275.99	
B	B2	100	398.66	10.15	508.81	974.46
	B3	100	87.46	2.20	189.66	
	C1	100	248.81	6.34	355.15	
C	C2	100	292.42	7.47	399.89	940.51
	C3	100	83.37	2.09	185.46	
	D1	100	179.84	4.58	284.42	
D	D2	100	260.79	6.64	367.43	850.39
	D3	100	96.11	2.43	198.54	
累计		1200	2445.24	62.24	3707.48	

5.2.2 MDVRP 式共同配送仿真

本节将对 MDVRP 共同配送模型进行仿真实验。在多次运算结果中选择目标总配送成本最小的值作为最优解进行保留，其路径规划结果如图 5.3 所示。

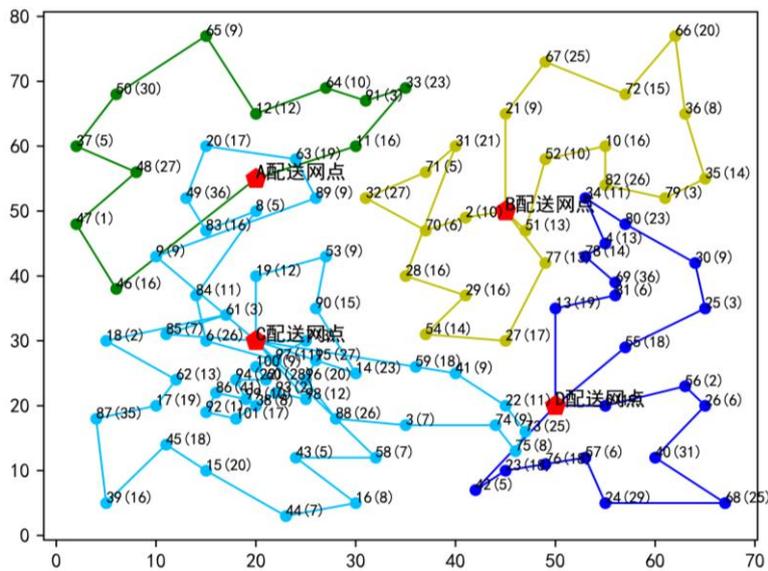


图 5.3 MDVRP 共同配送车辆路径

MDVRP 式共同配送最优配送路径方案及成本信息见表 5.7，由该表可知：不包含转运成本的配送成本为 2455.36 元。配送企业 A 派出 1 辆车执行配送任务，配送企业 B 派出了 2 辆车执行任务，配送企业 C 派出了 5 辆车执行任务，配送企业 D 派出了 2 辆车执行任务，每辆车所服务的客户的数量大约为 4~13 个。

车辆的平均装载率为 91.13%，其中只有一辆最低车辆装载率为 36.88%。其余车辆装载率均在 90%以上，并且有两辆配送车辆的装载率达到了 100%。相较于独立配送时的车辆装载率相比有明显提升。

表 5.7 MDVRP 式共同配送最优配送路径方案及成本信息表

客户服务顺序	Load	LR	D/km	C1	C2	C3	TC
A-46-47-48-37-50-65-12-64-91-33-11-A	152	95.00%	123.16	100	200.47	5.12	305.59
B-51-52-10-82-79-35-36-66-72-67-21-B	159	99.38%	104.35	100	158.56	4.04	262.59
B-77-27-54-29-28-31-71-32-70-2-B	145	90.63%	92.81	100	146.61	3.74	250.35
C-14-90-53-19-C	59	36.88%	47.63	100	57.88	1.45	159.34
C-58-43-16-44-15-45-39-87-17-62-18-61-85-C	160	100.00%	134.70	100	221.33	5.66	326.99
C-59-41-22-73-75-74-3-88-96-95-C	160	100.00%	72.44	100	123.82	3.17	226.99
C-7-100-60-94-99-86-92-101-38-93-98-C	153	95.63%	48.40	100	72.85	1.85	174.70
C-9-89-63-20-49-83-8-84-6-97-C	159	99.38%	102.38	100	174.92	4.48	279.40
D-55-25-30-80-34-4-78-69-81-13-D	152	95.00%	81.78	100	133.07	3.40	236.47
D-5-56-26-40-68-24-57-76-23-42-D	159	99.38%	83.52	100	129.62	3.30	232.93
累计	1458	/	891.17	1000	1419.13	36.23	2455.36

MDVRP 式共同配送后各个配送网点的服务客户对象及服务的客户发生变化，表 5.8 为 MDVRP 式共同配送后的网点客户分配情况。每个网点服务的客户数量差距较大，在企业各自进行独立配送时，每个网点平均服务 25 个客户。在执行共同配送策略后 A 网点服务客户数量为 11，而 C 网点服务客户数量为 48，近一半客户都由 C 网点进行配送，C 网点有较大的配送压力。

表 5.8 MDVRP 式共同配送下的网点客户分配

网点	客户数	分配的客户
A	11	11, 12, 33, 37, 46, 47, 48, 50, 64, 65, 91
B	21	2, 10, 21, 27, 28, 29, 31, 32, 35, 36, 51, 52, 54, 66, 67, 70, 71, 72, 77, 79, 82, 3, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 38, 39, 41, 43, 44, 45, 49, 53, 58,
C	48	59, 60, 61, 62, 63, 73, 74, 75, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101
D	20	4, 5, 13, 23, 24, 25, 26, 30, 34, 40, 42, 55, 56, 57, 68, 69, 76, 78, 80, 81

网点间进行转运以满足其他网点能够取得其承担配送客户范围的包裹来成功执行配送任务，其中转运量大于 160 的因超出车辆容量需要两次转运。网点间转运路线以及转运量见图 5.4。

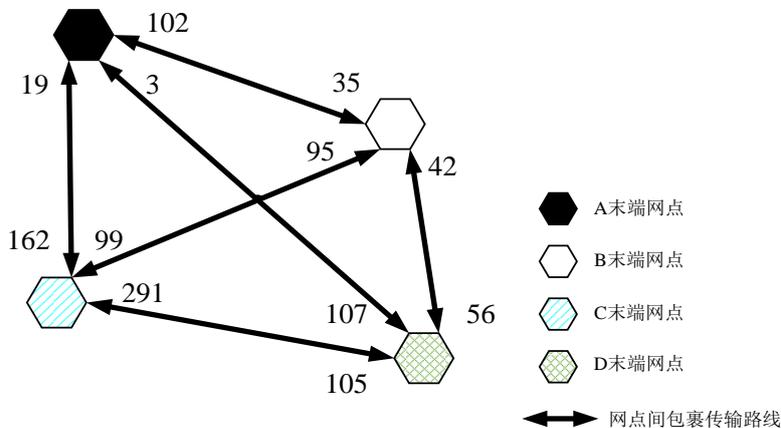


图 5.4 MDVRP 共同配送网点间转运示意图

车辆在执行转运任务时往返均能携带货物。例如 A 网点将 102 容量的货物配送至 B 网点，则在返程时可将 35 容量的货物由 B 网点配送至 A 网点。网点间转运量以及转运成本信息见表 5.9。

表 5.9 网点间转运量以及转运成本

接收网点	转运量				C4
	A	B	C	D	
A	0	102	19	3	765.58
B	35	0	95	42	
C	162	99	0	291	
D	107	56	105	0	

表 5.10 为独立配送与 MDVRP 共同配送的成本比较，从中可以直观的看到这 4 个成本中占比最大的是车辆行驶成本，其次所占比例最大的是车辆固定使用成本。而占比最小的就是碳排放成本，但是碳排放成本随时间进行累计同样不容忽视。共同配送策略增加了配送网点之间的转运成本，但是转运成本的增加量远低于车辆路径成本及车辆固定使用成本的降低，从整体上降低了总配送成本。

表 5.10 独立配送与 MDVRP 共同配送成本比较

配送模式	C1	C2	C3	C4	TC
独立配送	1200	2445.24	62.24	0	3707.48
MDVRP 共同配送	1000	1419.13	36.23	765.58	3220.94

5.2.3 划分聚类式共同配送仿真

对划分聚类式共同配送进行仿真时，利用 K-means 方法根据客户地理位置信息对客户进行聚类操作。客户聚类结果见附录 3，客户聚类分布见图 5.5。

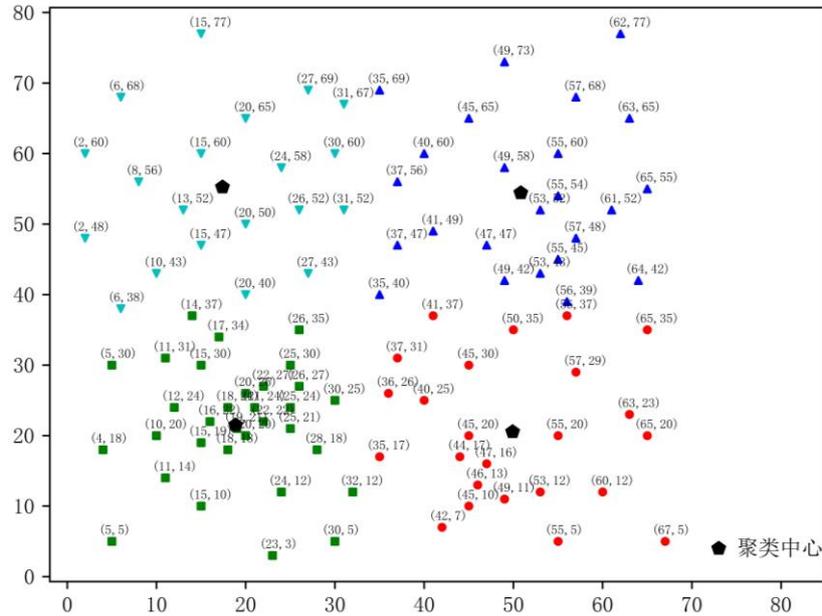


图 5.5 客户聚类结果

依据每个网点位置距离聚类结果中的每个类的聚类中心的远近确定某个聚类范围的客户由具体某个网点承担配送任务。计算后得到的聚类中心及其对应网点见表 5.11：0 号类范围内的客户由 D 网点承担配送任务，1 号类范围内的客户由 C 网点承担配送任务，2 号类范围内的客户由 B 网点承担配送任务，3 号类范围内的客户由 A 网点承担配送任务。

表 5.11 聚类中心位置及其对应网点位置

类	X	Y	对应网点	X	Y
0	49.92	20.54	D	50	20
1	18.88	21.50	C	20	30
2	50.83	54.42	B	45	50
3	17.40	55.25	A	20	55

在采用划分聚类式共同配送策略后，各个配送网点的服务客户对象及服务的客户数由聚类结果确定，划分聚类式共同配送下的网点客户分配情况见表 5.12。分析网点客户分配变化情况发现以下特点：每个网点服务的客户数量分配较为平均，执行划分聚类式共同配送策略后 B 网点服务客户数量最多为 32，D 网点服务客户数量最少为 20。

表 5.12 划分聚类式共同配送下的网点客户分配

网点	客户数	分配的客户
A	20	8,9,11,12,19,20,32,37,46,47,48,49,50,53,63,64,65,83,89,91
B	24	2,4,10,21,28,30,31,33,34,35,36,51,52,66,67,69,70,71,72,77,78,79,80,82
C	32	6,7,14,15,16,17,18,38,39,43,44,45,58,60,61,62,84,85,86,87,88,90,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101
D	24	3,5,13,22,23,24,25,26,27,29,40,41,42,54,55,56,57,59,68,73,74,75,76,81

对各网点承担的配送范围进行图形化展示，见图 5.6。

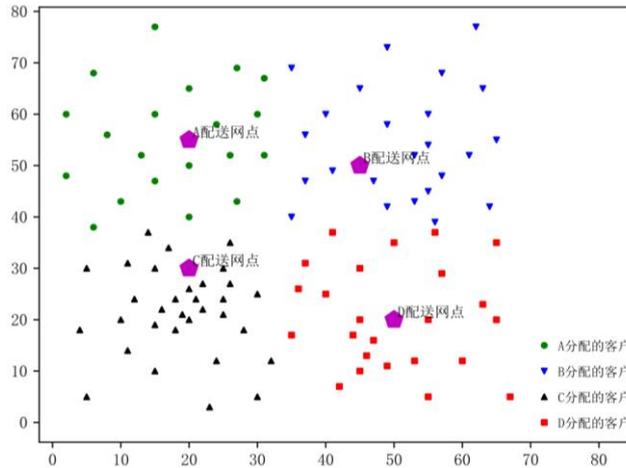


图 5.6 划分聚类式共同配送后各网点承担的配送范围

对划分服务范围后对各网点需执行的配送任务进行求解，得到每个配送网点车辆配送路径配送方案如图 5.7 所示。

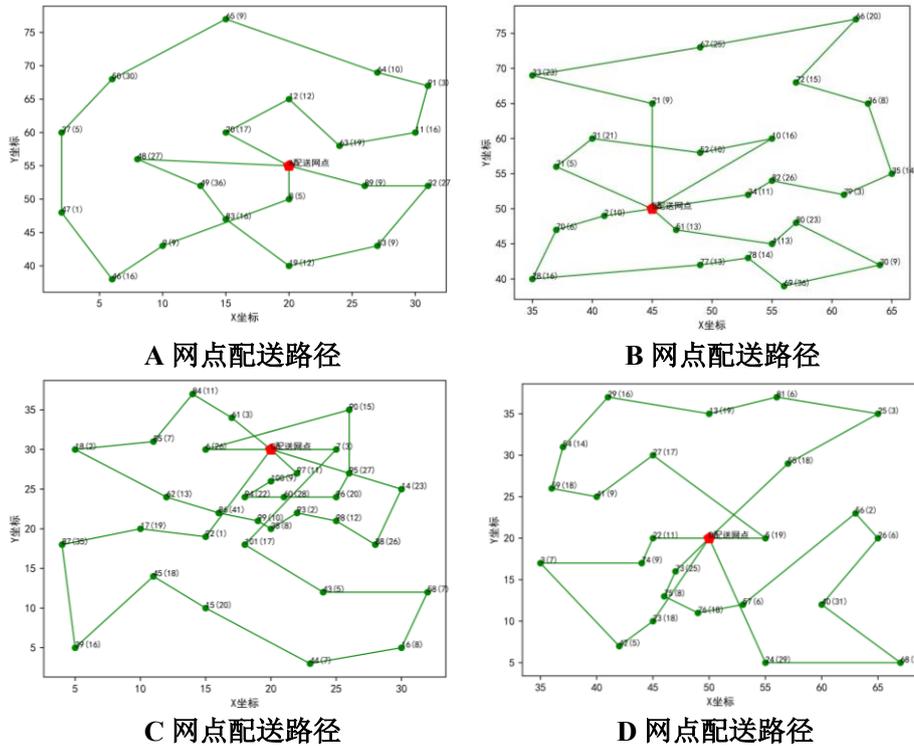


图 5.7 划分聚类式共同配送后各网点配送路径

表 5.13 为划分聚类式共同配送最优配送路径方案及成本信息表。不包含转运成本的配送成本为 2435.24 元。配送企业 A 派出 2 辆车执行配送任务，配送企业 B 派出 3 辆车执行任务，配送企业 C 派出 3 辆车执行任务，配送企业 D 派出 3 辆车执行任务，每辆车所服务的客户的数量同样大约为 4~13 个。有两辆车辆的装载率为在 50%以下，其余车辆装载率均在 85%以上。

表 5.13 划分聚类式共同配送最优配送路径方案及成本信息表

车辆路径	L	LR	D/km	C1	C2	C3	LC
A-8-9-46-47-37-50-65-64-91-11-63-12-20-A	152	95.00%	122.55	100	201.87	5.16	307.03
A-48-49-83-19-53-32-89-A	136	85.00%	61.61	100	90.91	2.31	193.22
B-34-82-79-35-36-72-66-67-33-21-B	154	96.25%	103.53	100	153.45	3.90	257.35
B-51-4-80-30-69-78-77-28-70-2-B	153	95.63%	72.36	100	109.44	2.79	212.22
B-10-52-31-71-B	52	32.50%	44.69	100	54.31	1.36	155.68
C-7-101-43-58-16-44-15-45-39-87-17-92-C	156	97.50%	113.59	100	187.61	4.80	292.41
C-14-88-98-93-38-99-86-62-18-85-84-61-C	158	98.75%	69.00	100	104.11	2.65	206.76
C-6-90-95-96-60-94-100-97-C	158	98.75%	43.92	100	73.77	1.89	175.66
D-55-25-81-13-29-54-59-41-27-5-D	139	86.88%	88.81	100	140.41	3.58	243.99
D-24-68-40-26-56-57-76-75-73-D	150	93.75%	81.51	100	131.69	3.36	235.05
D-23-42-3-74-22-D	50	31.25%	44.79	100	54.50	1.37	155.87
累计	1458	-	846.34	1100	1302.06	33.18	2435.24

表 5.14 为划分聚类后网点间转运量及转运成本信息。其中由 D 网点发往 C 网点路径的转运量为 266，超出车辆容量，需额外增加一次转运。

表 5.14 网点间转运量以及转运成本

接收网点	转运量				C4
	A	B	C	D	
A	0	142	47	28	739.77
B	48	0	117	79	
C	101	54	0	266	
D	112	78	143	0	

表 5.15 为独立配送与划分聚类式共同配送的成本比较，共同配送后降低 1 车辆使用数量，行驶成本降低了 1143.18 元，总配送成本节约了 14.36%。

表 5.15 独立配送与划分聚类式共同配送成本比较

成本类型	C1	C2	C3	C4	TC
独立配送	1200	2445.24	62.24	0	3707.48
划分聚类式共同配送	1100	1302.06	33.18	739.77	3175.01

5.2.4 共同配送模式分析

通过仿真实验的结果对 MDVRP 式共同配送、划分聚类式共同配送与独立配送的各项数据进行比较分析，表 5.16 为三种情形下的配送数据以及各成本结果对比表，其中 ALR (Average Load Rate) 代表车辆平均装载率。无论采用何种共同配送，转运成本的增加量远小于共同配送后 C1 以及 C2 的减小量之和。总配送成本也相较于独立配送时有明显下降。因此采用共同配送可以说是降低物流企业配送成本的有效途径。MDVRP 式共同配送与划分聚类式共同配送相比，平均装载率较高，代表车辆得到了充分的使用，但是其运输距离、C2、C3、C4 及总成本也高于后者。若以总配送成本作为决策者优化目标，则划分聚类式共同配送的优势更为明显。

表 5.16 独立配送与共同配送比较

配送方式	ALR	D/km	C1	C2	C3	C4	TC
独立配送	75.94%	1623.41	1200	2445.24	62.22	0	3707.48
MDVRP 式共同配送	91.13%	891.17	1000	1419.13	36.23	765.58	3220.94
划分聚类式共同配送	82.84%	846.34	1100	1302.06	33.18	739.77	3175.01

独立配送与共同配送成本比较见图 5.8。

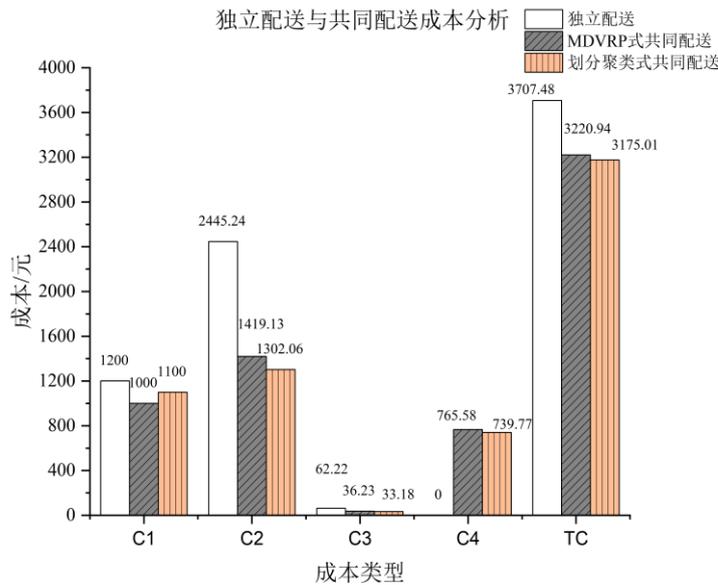


图 5.8 独立配送与共同配送成本分析

5.3 考虑共同客户的共同配送策略仿真

5.3.1 考虑共同客户的共同配送仿真

在标准算例的基础上构造出存在共同客户时的客户测试集见附录 2 测试集 2，配送网点信息同表 5.1。存在共同客户时，共同配送后的网点只需要为共同客户进行一次服务即可满足该客户需求，其现实意义为：共同客户由原来的需要多次进行包裹拿取操作转变为仅需一次就可以完成所有网点的货物获取。

表 5.17 为进行仿真实验后得到存在共同客户时的各配送模式下的网点车辆路径结果。本节涉及的仿真图形结果见附录 4。

表 5.17 各配送模式下的网点车辆路径结果

独立配送	MDVRP 式共同配送	划分聚类式共同配送
A-5-6-13-2-3-9-20-10-A	A-10-11-A	A-19-7-A
A-18-8-17-16-14-15-4-12-1-A	A-7-19-A	A-18-8-A
A-19-11-7-A	B-1-20-B	A-11-10-A
B-3-4-2-5-18-19-11-10-B	B-3-B	B-9-12-B
B-7-8-17-16-14-15-6-13-12-1-B	B-9-B	B-3-1-B
B-20-9-B	C-15-13-C	B-20-B
C-18-10-11-19-7-8-17-16-5-C	C-16-14-C	C-16-14-C
C-6-13-14-15-2-4-12-3-9-20-1-C	C-5-17-C	C-5-17-C
D-5-18-8-7-19-11-10-1-D	C-6-C	C-6-C
D-15-14-16-17-6-13-2-4-D	C-8-18-C	D-13-15-D
D-12-20-9-3-D	D-2-D	D-2-D
/	D-4-12-D	D-4-D

表 5.18 为各个配送网点的服务客户分配情况，MDVRP 式共同配送后的各网点服务客户数量之间差距较大，而划分聚类式共同配送较为平均。

表 5.18 共同配送后的网点客户分配表

网点	MDVRP 式共同配送		划分聚类式共同配送	
	客户数	分配的客户	客户数	分配的客户
A	4	7,10,11,19	6	7,8,10,11,18,19
B	4	1,3,9,20	5	1,3,9,12,20
C	9	5,6,8,13,14,15,16,17,18	5	5,6,14,16,17
D	3	2,4,12	4	2,4,13,15

表 5.19 为网点间转运量以及转运成本信息，MDVRP 共同配送后网点 D 与网点 C 间因转运量超过车辆容量需要进行多次转运，因此其转运成本高于划分聚类式共同配送的转运成本。由于划分聚类式共同配送的转运成本更低，转运量

也更加均衡，长期来看其成本优化效果更好，转运更加便利。

表 5.19 网点间转运量以及转运成本

转运接收网点	MDVRP 式共同配送					划分聚类式共同配送				
	A	B	C	D	C4	A	B	C	D	C4
A	0	75	66	67		0	94	108	106	
B	85	0	47	101	700.05	112	0	54	124	643.66
C	140	118	0	175		64	55	0	105	
D	65	56	57	0		81	86	74	0	

5.3.2 考虑共同客户的共同配送模式分析

表 5.20 为存在共同客户时的独立配送与共同配送成本对比表，尽管共同配送后的车辆使用数量增加，但 MDVRP 式共同配送与划分聚类式共同配送的车辆路径成本下降为独立配送时的 27.49%、28.31%，节约了近 3/4。总配送成本相较于独立配送分别降低了 22.73%、23.95%，是非常有效的成本节约。因此在存在共同客户时采用共同配送策略同样是降低物流企业配送成本的有效途径。

表 5.20 存在共同客户时的独立配送与共同配送成本

配送方式	C1	C2	C3	C4	TC
A 独立配送	300	504.03	12.83	0	816.86
B 独立配送	300	532.32	13.54	0	845.87
C 独立配送	200	448.65	11.42	0	660.07
D 独立配送	300	571.97	14.58	0	886.56
独立配送累计	1100	2056.97	52.38	0	3209.36
MDVRP 式共同配送	1200	565.39	14.36	700.05	2479.80
划分聚类式共同配送	1200	582.31	14.78	643.66	2440.75

5.4 共同配送参数灵敏度分析

5.4.1 配送车辆固定成本的灵敏度分析

物流配送企业每天的使用的配送车辆数目及车辆路径安排会随着客户需求量发生变化，在进行参数灵敏度分析时为避免外部环境影响，对不考虑共同客户时求得的不同配送模式下的车辆路径结果进行保留，在当前车辆路线安排的基础上对车辆使用成本进行多次参数设置设定进行灵敏度分析。

图 5.9 为各配送模型下总配送成本随着车辆固定成本的变化趋势。从图中可

可以看出,随着车辆固定成本的增加,三种策略下总配送成本都呈上升趋势,而两种共同配送策略相比独立配送策略始终较低,且差值随着车辆固定成本的增加而逐渐增大。当车辆成本为 140 元/辆时,两种共同配送策略的总配送成本最为接近。当车辆成本为小于 140 元/辆时,划分聚类式共同配送的总配送成本比 MDVRP 式共同配送更低。当车辆成本为大于 140 元/辆时,MDVRP 式共同配送成本优化效果更好,这是由于 MDVRP 式共同配送使用的车辆数量更少,因此随着车辆固定成本的增长采用 MDVRP 式共同配送策略可以更有效地节省成本。

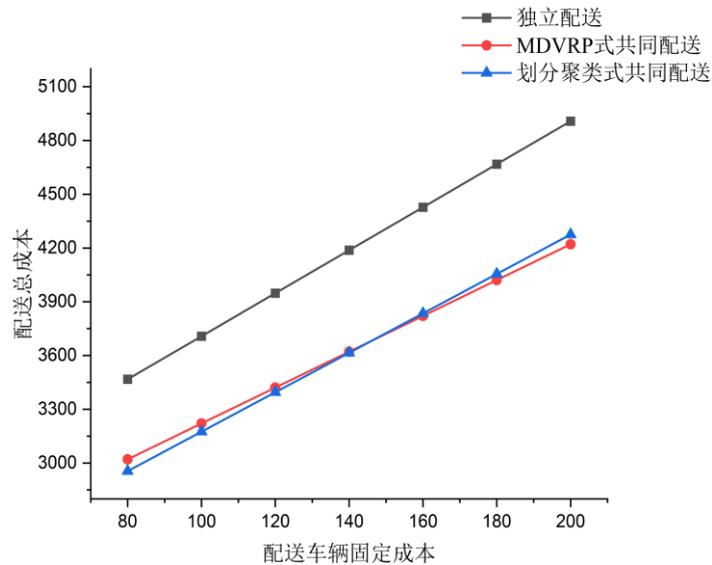


图 5.9 车辆固定成本敏感性分析

5.4.2 燃油价格的灵敏度分析

对上文总配送成本中各个子成本的占比分析,可以看出车辆行驶成本在总成本中占据相当大的比重,燃油价格的波动对于共同配送的效益具有重要影响。近些年来由于国际动荡,油价并不是特别稳定,因此研究燃油价格变化对于决策者选择配送策略倾向的影响,为决策者在应对外部资源价格变化时如何选择适合的配送策略时提供参考依据。

对燃油价格进行灵敏度分析,上文将燃油的价格设置为 7.5 元/L,此处将配送时的燃油价格设置为[7,10]元之间并以 0.5 元为一个递增单位。配送成本对燃油价格的灵敏度分析如图 5.10 示。由图可知,划分聚类式共同配送总成本始终最低。油价在 7 元/升时,两种共同配送策略的总成本较为接近。当油价达到 10

元/升时，两种共同配送策略总成本差距被拉大。这是由于聚类算法可以将相近的配送需求集中在一起，在油价较高时，划分聚类共同配送策略可以通过减少配送车辆的运输里程来降低总配送成本。在油价较低时，车辆行驶成本占总配送成本比例较低，由于 MDVRP 式共同配送可以有效降低车辆使用数量，降低了车辆固定使用成本，其总成本与划分聚类式共同配送总成本差距缩小。

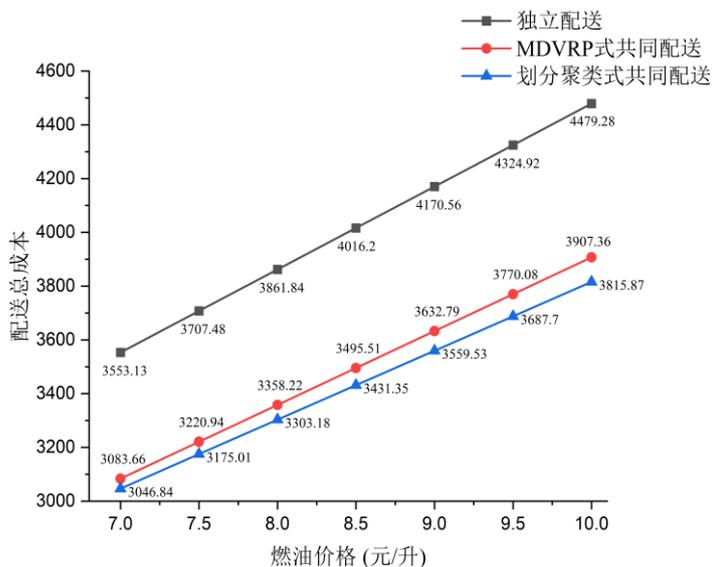


图 5.10 燃油价格敏感性分析

图 5.11 为两种共同配送在不同油价下的总配送成本相较于独立配送时的优化效果对比图，油价在 7-10 元/升的区间内，划分聚类式共同配送的优化效果始终比 MDVRP 式共同配送要好，且随着燃油价格的增长两者差距不断增大。

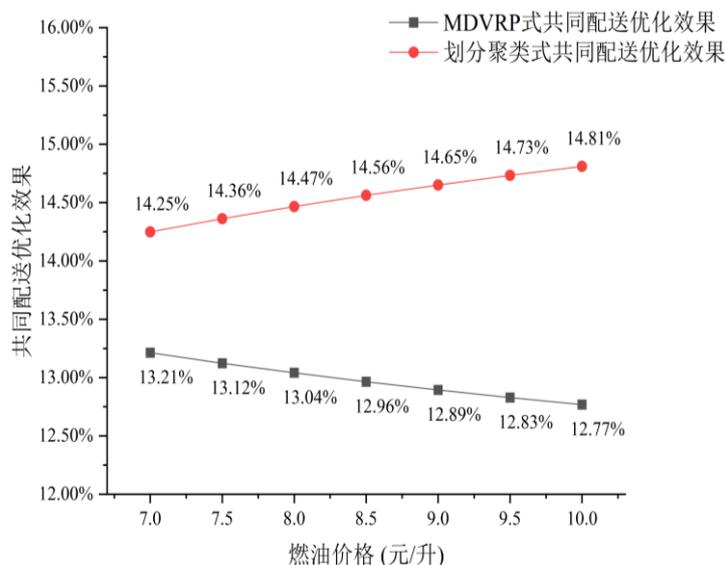


图 5.11 共同配送总成本优化效果

5.4.3 车辆固定成本及燃油价格线性回归分析

上文分析可知车辆固定成本及燃油价格与总配送成本有显著的影响关系,为分析两者对总配送成本的影响程度进行线性回归分析,令被解释变量为总配送成本,解释变量为车辆固定成本以及燃油价格,构建出线性回归方程进行分析。表 5.21 为车辆固定使用成本、燃油价格两种因素不同水平下的总配送成本,基于该表进行线性回归分析。

表 5.21 车辆固定使用成本、燃油价格两种因素不同水平下的总配送成本

车辆固定成本	燃油价格	各配送模式成本/元		
		独立配送	MDVRP	划分聚类
100	7.5	3707.48	3220.94	3175.01
100	8	3861.84	3358.22	3303.18
100	8.5	4016.2	3495.51	3431.35
100	9	4170.56	3632.79	3559.53
100	9.5	4324.92	3770.08	3687.7
100	10	4479.28	3907.36	3815.87
120	7.5	3947.48	3420.94	3395.01
120	8	4101.84	3558.22	3523.18
120	8.5	4256.2	3695.51	3651.35
120	9	4410.56	3832.79	3779.53
120	9.5	4564.92	3970.08	3907.7
120	10	4719.28	4107.36	4035.87
140	7.5	4187.48	3620.94	3615.01
140	8	4341.84	3758.22	3743.18
140	8.5	4496.2	3895.51	3871.35
140	9	4650.56	4032.79	3999.53
140	9.5	4804.92	4170.08	4127.7
140	10	4959.28	4307.36	4255.87
160	7.5	4427.48	3820.94	3835.01
160	8	4581.84	3958.22	3963.18
160	8.5	4736.2	4095.51	4091.35
160	9	4890.56	4232.79	4219.53
160	9.5	5044.92	4370.08	4347.7
160	10	5199.28	4507.36	4475.87
180	7.5	4667.48	4020.94	4055.01
180	8	4821.84	4158.22	4183.18
180	8.5	4976.2	4295.51	4311.35
180	9	5130.56	4432.79	4439.53
180	9.5	5284.92	4570.08	4567.7

续表 5.21 车辆固定使用成本、燃油价格两种因素不同水平下的总配送成本

车辆固定成本	燃油价格	各配送模式成本/元		
		独立配送	MDVRP	划分聚类
180	10	5439.28	4707.36	4695.87
200	7.5	4907.48	4220.94	4275.01
200	8	5061.84	4358.22	4403.18
200	8.5	5216.2	4495.51	4531.35
200	9	5370.56	4632.79	4659.53
200	9.5	5524.92	4770.08	4787.7
200	10	5679.28	4907.36	4915.87

对表 5.21 数据进行三维图绘制，绘制结果见图 5.12。独立配送时总成本一直大于两种共同配送策略，两种共同配送总成本的面存在一条交叉线，车辆固定使用成本、燃油价格坐标处于这条线上时两种共同配送总成本相同，考虑总配送成本时两种共同配送策略没有差异。两种因素坐标处于交叉线的左侧时划分聚类式共同配送成本更低，处于交叉线的右侧时 MDVRP 式共同配送成本更低。

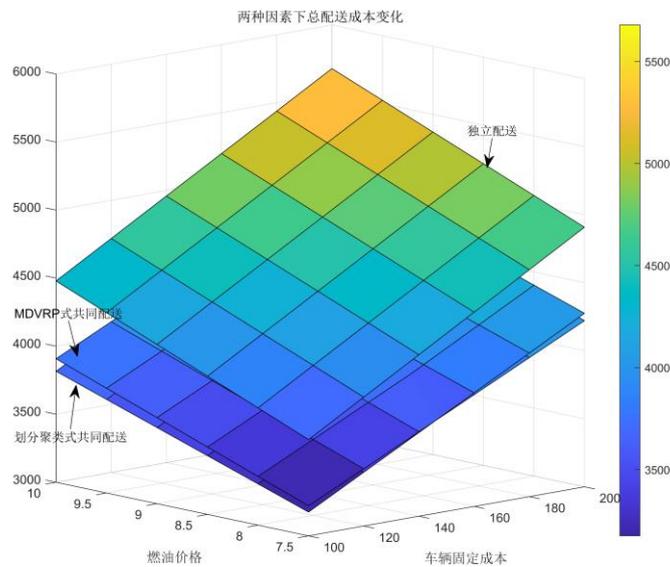


图 5.12 车辆固定使用成本、燃油价格两种因素不同水平下的总配送成本结果

表 5.22 为回归系数显著性检验的结果。根据该表分析可以得到独立配送、MDVRP 式共同配送及划分聚类式共同配送下的回归方程分别为：独立配送总配送成本=192.08+12*车辆固定成本+308.72*燃油价格、MDVRP 式共同配送总配送成本=161.67+10*车辆固定成本+274.57*燃油价格、划分聚类式共同配送总配送成本=152.42+11*车辆固定成本+256.35*燃油价格。这些方程揭示了总配送成本与车辆固定成本及燃油价格的线性关系。其现实含义为：当车辆固定成本增加 1 元时，三种配送模式的总配送成本分别增加 12、10 和 11 元；当燃油价格增加 1

元时，三种配送模式的总配送成本分别增加 308.72、274.57 和 256.35 元。由此可知，划分聚类式共同配送策略在三种策略中对燃油价格最不敏感，说明该配送策略成本优化效果最好。燃油价格对总成本的影响大于车辆固定成本对总成本的影响。因此，在城市物流末端配送中为提高配送效率和减少成本，物流配送企业决策者应对燃油价格格外关注，尽量在燃油价格较低时及时补充车辆燃油。

表 5.22 系数

模型	未标准化系数		标准化系数	t	显著性	共线性统计	
	B	标准错误	Beta			容差	VIF
1	(常量)	192.080	.000		0		
	车辆固定成本	12.000	.000	0.841	0	1	1
	燃油价格	308.720	.000	0.541	0	1	1
a.因变量：独立配送总配送成本							
1	(常量)	161.670	.005		34710.117	0	
	车辆固定成本	10.000	.000	.824	820825.438	0	1
	燃油价格	274.569	.000	.566	563433.342	0	1
a.因变量：MDVRP 式共同配送总配送成本							
1	(常量)	152.420	.005		32723.940	0	
	车辆固定成本	11.000	.000	0.864	902901.739	0	1
	燃油价格	256.345	.000	0.503	526032.898	0	1
a.因变量：划分聚类式共同配送总配送成本							

5.5 确定最优联盟加入序列

合理的利润分配能够维持联盟长久合作，将参与共同配送的网点视为联盟 S ， D 为末端配送网点集合， $c(i)$ 为独立配送时末端配送网点 i 的配送成本， $c(S)$ 为 S 联盟共同配送的后的总配送成本，共同配送后降低的成本为联盟 S 的收益 $v(S)$ 。

$$v(S) = \begin{cases} c(i) - c(S), & S = i, |S| = 1, i \in D, S \in D \\ \sum_{i \in D} c(i) - c(S), & |S| > 1, i \in D, S \in D \end{cases} \quad (5.1)$$

利用 Shapley 值法对 MDVRP 式共同配送后所获利润进行分配，Shapley 值的内涵为：参与人所分配的收益等于该参与人在合作联盟中的边际贡献平均值^[52]。利用 Shapley 值法进行分配时，联盟 S 的收益 $v(S)$ 需要满足 3 个条件：式(5.2)表示没有企业网点参与合作共同配送时收益值为 0；式(5.3)表示当共同配送联盟 S_1 和 S_2 两个联盟产生的收益应不大于联盟 $S = S_1 \cup S_2$ 获得的收益。式(5.4)表示当所有网点加入共同配送联盟后的总收益大于各网点独立配送时获得的累计收益。

$$v(\phi) = 0 \tag{5.2}$$

$$v(S_1 \cup S_2) \geq v(S_1) + v(S_2) \tag{5.3}$$

$$v(D) \geq \sum_{i=1}^n v(\{i\}) \tag{5.4}$$

表 5.23 利用 Shapley 值法计算网点 A 的收益

S	A	A,B	A,C	A,D	A,B,C	A,B,D	A,C,D	A,B,C,D
V(S)	0	191.67	174.15	108.01	307.95	203.41	441.09	486.54
V(S\{A1})	0	0	0	0	212.27	114.78	0	233.72
V(S) - V(S\{A1})	0	191.67	174.15	108.01	95.68	88.63	441.09	252.82
W(S)	1/4	1/12	1/12	1/12	1/12	1/12	1/12	1/4
q _A (V)	154.81							

表 23 为 A 网点在联盟 { A, B, C, D } 中的计算收益方式, q_i(V) 即为网点 i 在联盟 S 中所分配的收益, 式 (5.5) 为其计算公式。

$$q_i(V) = W(|S|) * (V(S) - V(S\{q_i})) \tag{5.5}$$

同理用 Shapley 值法求得不同联盟下各网点收益分配方案见表 23。在联盟 S={C,D} 时计算得到的收益为负, 说明在这两种联盟下, 进行共同配送比进行独立配送时的成本高, 其主要原因为 D 客户主要集中在 C 网点附近, 导致网点间转运成本较高, 此时两者独立配送为最佳选择, 将对应联盟的收益修正为 0。

表 5.24 收益分配方案

合作策略	c(S)	c(i)	v(S)	收益分配
{A}	942.11	942.11	0	(0, *, *, *)
{B}	974.46	974.46	0	(*, 0, *, *)
{C}	940.51	940.51	0	(*, *, 0, *)
{D}	850.39	850.39	0	(*, *, *, 0)
{A, B}	1724.90	1916.57	191.67	(95.84, 95.84, *, *)
{A, C}	1708.47	1882.62	174.15	(87.08, *, 87.08, *)
{A, D}	1684.49	1792.50	108.01	(54.01, *, *, 54.01)
{B, C}	1702.70	1914.97	212.27	(*, 106.14, 106.14, *)
{B, D}	1710.07	1824.85	114.78	(*, 57.39, *, 57.39)
{C, D}	1804.93	1790.90	0	(*, *, 0, 0)
{A, B, C}	2549.13	2857.08	307.95	(92.86, 111.92, 103.16, *)
{A, B, D}	2563.55	2766.96	203.41	(79.49, 82.88, *, 41.05)
{A, C, D}	2291.92	2733.01	441.09	(194.06, *, 140.05, 106.98)
{B, C, D}	2531.64	2765.36	233.72	(*, 132.42, 75.03, 26.28)
{A, B, C, D}	3220.94	3707.48	486.54	(154.81, 93.17, 150.34, 88.22)

应用严格单调路径(SMP)的方法分析各配送网点进入合作联盟的序列, SMP

指联盟成员收益增加百分比随着其他联盟成员的加入而严格递增^[53]。根据联盟成员进入顺序和 SMP 规则计算联盟成员进入序列见表 5.25-表 5.28。

表 5.25 以 A 为初始联盟成员的严格单调路径序列 (%)

{A, B, C, D}					{A, B, D, C}				
序号	A	B	C	D	序号	A	B	D	C
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	10.17	9.84	-	-	2	10.17	9.84	-	-
3	9.86	11.49	10.97	-	3	8.44	8.51	4.83	-
4	16.43	9.56	15.98	10.37	4	16.43	9.56	10.37	15.98
{A, C, B, D}					{A, C, D, B}				
序号	A	C	B	D	序号	A	C	D	B
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	9.24	9.26	-	-	2	9.24	9.26	-	-
3	9.86	10.97	11.49	-	3	20.60	14.89	12.58	-
4	16.43	15.98	9.56	10.37	4	16.43	15.98	10.37	9.56
{A, D, B, C}					{A, D, C, B}				
序号	A	D	B	C	序号	A	D	C	B
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	5.73	6.35	-	-	2	5.73	6.35	-	-
3	8.44	4.83	8.51	-	3	20.60	12.58	14.89	-
4	16.43	10.37	9.56	15.98	4	16.43	10.37	15.98	9.56

表 5.26 以 B 为初始联盟成员的严格单调路径序列 (%)

{B, A, C, D}					{B, A, D, C}				
序号	B	A	C	D	序号	B	A	D	C
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	9.84	10.17	-	-	2	9.84	10.17	-	-
3	11.49	9.86	10.97	-	3	8.51	8.44	4.83	-
4	9.56	16.43	15.98	10.37	4	9.56	16.43	10.37	15.98
{B, C, A, D}					{B, C, D, A}				
序号	B	C	A	D	序号	B	C	D	A
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	10.89	11.29	-	-	2	10.89	11.29	-	-
3	11.49	10.97	9.86	-	3	13.59	7.98	3.09	-
4	9.56	15.98	16.43	10.37	4	9.56	15.98	10.37	16.43
{B, D, A, C}					{B, D, C, A}				
序号	B	D	A	C	序号	B	D	C	A
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	5.89	6.75	-	-	2	5.89	6.75	-	-
3	8.51	4.83	8.44	-	3	13.59	3.09	7.98	-
4	9.56	10.37	16.43	15.98	4	9.56	10.37	15.98	16.43

表 5.27 以 C 为初始联盟成员的严格单调路径序列 (%)

{ C, A, B, D }					{ C, A, D, B }				
序号	C	A	B	D	序号	C	A	D	B
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	9.26	9.24	-	-	2	9.26	9.24	-	-
3	10.97	9.86	11.49	-	3	14.89	20.60	12.58	-
4	15.98	16.43	9.56	10.37	4	15.98	16.43	10.37	9.56
{ C, B, A, D }					{ C, B, D, A }				
序号	C	B	A	D	序号	C	B	D	A
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	11.29	10.89	-	-	2	11.29	10.89	-	-
3	10.97	11.49	9.86	-	3	7.98	13.59	3.09	-
4	15.98	9.56	16.43	10.37	4	15.98	9.56	10.37	16.43
{ C, D, A, B }					{ C, D, B, A }				
序号	C	D	A	B	序号	C	D	B	A
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	0	0	-	-	2	0	0	-	-
3	14.89	12.58	20.60	-	3	7.98	3.09	13.59	-
4	15.98	10.37	16.43	9.56	4	15.98	10.37	9.56	16.43

表 5.28 以 D 为初始联盟成员的严格单调路径序列 (%)

{ D, A, B, C }					{ D, A, C, B }				
序号	D	A	B	C	序号	D	A	C	B
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	6.35	5.73	-	-	2	6.35	5.73	-	-
3	4.83	8.44	8.51	-	3	12.58	20.60	14.89	-
4	10.37	16.43	9.56	15.98	4	10.37	16.43	15.98	9.56
{ D, B, A, C }					{ D, B, C, A }				
序号	D	B	A	C	序号	D	B	C	A
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	6.75	5.89	-	-	2	6.75	5.89	-	-
3	4.83	8.51	8.44	-	3	3.09	13.59	7.98	-
4	15.98	9.56	16.43	10.37	4	15.98	9.56	10.37	16.43
{ D, C, A, B }					{ D, C, B, A }				
序号	D	C	A	B	序号	D	C	B	A
1	0	-	-	-	1	0	-	-	-
2	0	0	-	-	2	0	0	-	-
3	12.58	14.89	20.60	-	3	3.09	7.98	13.59	-
4	15.98	10.37	16.43	9.56	4	15.98	10.37	9.56	16.43

根据 SMP 法的规则,表 5.25-表 5.28 各个联盟成员进入序列均存在违反 SMP 法规则的情形,最终确定{A, C, B, D}的联盟成员为最优进入序列。此联盟序

列中 D 加入 {A, C, B} 后形成大联盟 {A, C, B, D} 后 B 的成本下降比有所降低, 降低程度低于其他联盟序列, 且 A 作为初始联盟成员能够在联盟形成时获得最高的成本节约。联盟 {A, C, B, D} 中首先 A 与 C 进行合作, 此时联盟成员的成本下降比分别为 9.24% 和 9.26%, 然后 B 进入联盟, 此时联盟成员的成本下降比分别为 9.86%, 10.97% 和 11.49% 最后 D 进入联盟, 其成本下降比分别为 16.43%, 15.98%, 9.56% 和 10.37%。

5.6 本章小结

本章节主要对前文的共同配送策略以及所构建的模型进行仿真。在企业独立配送的基础上, 研究物流企业在是否存在共同客户时采取不同配送模式的车辆路径问题。总配送成本中主要考虑了车辆固定成本、运输成本、碳排放成本以及转运成本等 4 种成本。通过对车辆固定成本以及燃油价格进行灵敏度分析及回归分析, 探究其对总配送成本的影响程度。最后对最优联盟加入序列进行确定。

6 结论与展望

6.1 研究结论

网购平台的发展带动物流配送需求飞速上升。当前物流企业各自为战造成较多资源浪费,通过引入共同配送策略有望帮助物流企业提高配送效率以及后续的长久高效发展。本文通过结合现有独立配送相关研究设计两种共同配送策略,并分析其对总配送成本的影响进行综合评价,得出主要如下结论:

第一,本文依据当前城市末端多企业共同配送的现有研究成果,以多个物流配送企业同一区域内进行配送的物流活动为研究对象,在此基础上设计了共同配送策略。在进行车辆路径问题模型构建时,将我国碳交易制度进行成本转化计入总配送成本优化目标中,构建出关于共同配送的车辆路径问题模型。通过仿真证明本文提出的共同配送策略作为一种整合末端资源进行配送的现代化配送方式,可以有效地减少配送车辆的运输里程、运输成本以及碳排放成本,从而降低总配送成本,设计的共同配送策略具有一定的合理性。

第二,在考虑求解算法时,选择引入节约里程法的遗传算法进行求解,解决了传统遗传算法运行效率低及不易找到最优解的问题。通过对 CWGA 算法进行详细步骤说明和相关算法参数测试,确定所设计的 CWGA 算法是求解车辆路径问题的一种有效改进方法,在求解性能上较优。

第三,对以总配送成本最低为优化目标的求得的最优配送方案进行总配送成本和各成本进行对比,随后对相关资源价格进行灵敏度分析。帮助企业决策者应对配送资源变化,能够在相关配送资源价格变化时及时做出调整来降低总配送成本。本文构建的模型和求解算法对物流企业后续发展方向具有一定的参考价值。

6.2 未来展望

本文对于城市物流末端共同配送问题具有一定程度的参考价值，所构建的车辆路径模型基于部分设定的假设和约束，研究内容还存在不足。对物流末端共同配送问题还具有继续扩展研究的空间，未来可继续从以下几个方面进行研究：

1) 客户时间窗方面，本文假设不考虑客户时间窗要求，实际情况中，部分客户可能无法在物流企业配送时或者当天接收包裹。物流企业需要进行二次配送，会产生额外的二次配送成本，并对下一次配送时的车辆配送路径产生影响。所以在考虑客户时间窗要求方面值得进一步研究。

2) 本文在进行独立配送或共同配送车辆路径仿真时，只考虑了一种配送车型，实际配送场景中可能会存在多种车型。随着电动汽车行业的持续发展，其环保性较为优秀，车辆行驶成本也较低，未来会出现以电动汽车作为配送车辆的情况，今后可进一步研究电动汽车、充电桩位置、多车型的共同配送车辆路径问题。

3) 对共同配送的规模效应进行研究，本文研究了设定 4 家物流企业在某区域实施共同配送前后的成本变化，若能有更多企业参与共同配送，可以实现更大范围的资源整合形成更加完善的物流网络从而降低单位成本。通过分析每增加一个配送网点参与共同配送时所节约的总配送成本变化情况。研究何时规模效应可以达到最优。规模效应并不是无限的，在达到一定规模后，可能会出现规模不经济的现象，即规模的进一步扩大可能反而导致成本上升、效率下降。因此，对物流企业的共同配送的规模效进行研究具有现实意义。

4) 通过对兰州市城关区调研发现，末端配送网点在向小区、高校等客户众多、需求量较大的区域进行配送时，首先会在上午安排配送人员驾驶携带包裹的小型车辆停在该位置，等待客户取货。当天上午网点收到的该区域的包裹会在每天中午或下午安排大型车辆对这些区域进行新包裹的配送。下午收到的包裹会安排到次日进行配送，未来可以考虑物流企业遵循此种批次配送模式进行共同配送相关研究。

参考文献

- [1] 殷滕晨.基于TDABC的DF国际物流公司成本核算及客户盈利能力分析[D].苏州大学,2018.
- [2] 汪传雷,陈娇,万一获.现代规模经济视角下城市共同配送模式研究[J].西安财经学院学报,2017,30(03):82-87.
- [3] 樊东方,靳志宏.中美物流成本评价指标的影响因素分析及分解研究[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(02):32-39.
- [4] 范文晶.共同配送理论在城市末端配送中的应用分析[J].北京城市学院学报,2014(01):55-58.
- [5] Hong S, Lv R, Hong P. Cost sharing of terminal joint distribution of express industry[J]. Iet Intelligent Transport Systems, 2018, 12: 730–734.
- [6] 魏强.物流企业城市共同配送合作决策模型研究[D].西南财经大学,2019.
- [7] 吴鑫.网购物流城市共同配送多级网络选址-路径规划研究[D].重庆大学,2021
- [8] 曹巍,刘南.终端网点参与下电子商务物流外包的协调策略研究[J].管理工程学报,2015,29(04):194-204.
- [9] 任腾,罗天羽,谷智华,胡芷菁,贾彬彬,邢立宁.考虑同时取送货的城市物流共同配送路径优化[J].计算机集成制造系统,2022,28(11):3523-3534.
- [10] 赵广华.基于共享物流的农村电子商务共同配送运作模式[J].中国流通经济,2018,32(07):36-44.
- [11] Chu X, Wang R, Ren L, Li Y, Zhang S. Enabling joint distribution with blockchain technology in last-mile logistics[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 187: 109832.
- [12] Liu G, Hu J, Yang Y, Xia S, Lim M K. Vehicle routing problem in cold Chain logistics: A joint distribution model with carbon trading mechanisms[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 156: 104715.
- [13] 王勇,罗思好,周雪,等.多中心共同配送开闭混合式的车辆路径优化问题[J].系统管理学报,2023,32(02):215-232.

- [14]王勇,李慧星,罗思好,等.资源共享模式下多中心共同配送电动车辆路径优化问题[J].系统管理学报,2023,32(06):1119-1141.
- [15]李珍萍,赵雨薇,张煜炜等.共同配送选址-路径问题及大邻域搜索算法[J].系统仿真学报,2021,33(10):2518-2531.
- [16]Dantzig G B,Ramser J H . The Truck Dispatching Problem[J].Management Science, 1959, 6(1):80-91.DOI:10.1287/mnsc.6.1.80.
- [17]程亮,干宏程,李尚卿等.碳排放影响下快时尚产品的配送路径优化[J].上海海事大学学报,2023,44(01):30-37.
- [18]裴小兵,于秀燕.基于改进人工蜂群算法的易变质产品配送问题研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(02):261-266.
- [19]葛显龙,竹自强.带软时间窗的电动车辆路径优化问题[J].工业工程与管理,2019,24(04):96-104+112.
- [20]Xu D, Zhen L, Chan H K, Wang J, Cui L. An exact algorithm for unpaired pickup and delivery vehicle routing problem with multiple commodities and multiple visits[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 160: 104488.
- [21]Rahul J K, Chakraborty S, Khayer N, Uddin M F, Haque M R. Designing an Energy-Efficient Transportation Network to Transport Perishable Crops: An Aggregated VRP and X-means Clustering Approach[J]. Heliyon, 2023, 9(9): e19692.
- [22]Ouertani N, Ben-Romdhane H, Nouaouri I, Allaoui H, Krichen S. A multi-compartment VRP model for the health care waste transportation problem[J]. Journal of Computational Science, 2023, 72: 102104.
- [23]Sze J F, Salhi S, Wassan N. An adaptive variable neighbourhood search approach for the dynamic vehicle routing problem[J]. Computers & Operations Research, 2024, 164: 106531.
- [24]陈沿伊,侯华保.考虑时空拥堵和时间窗的多配送中心路径优化[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(10):26-34.

- [25] WANG Y, LI Q, GUAN X Y, et al. Collaborative multi-depot pickup and delivery vehicle routing problem with split loads and time windows. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 231: 107412.
- [26] 路世昌, 邵旭伦, 李丹. 基于两阶段启发式算法的低碳物流选址-多车型路径问题研究[J]. *制造业自动化*, 2023, 45(03): 202-207.
- [27] 邓忆瑞, 郑瑶, 姜明月等. 带模糊工作时间的多配送中心同时集散货物车辆路径问题[J]. *管理评论*, 2022, 34(10): 258-269.
- [28] 张歆悦, 靳鹏, 胡笑旋, 等. 时间依赖型多配送中心带时间窗的开放式车辆路径问题研究[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(01): 146-157.
- [29] 闫淼, 初良勇. 不同车型新能源车在城市冷链物流配送中的路径优化[J]. *上海海事大学学报*, 2022, 43(04): 51-59.
- [30] 张颖钰, 吴立云, 贾胜钦. 带时间窗的多中心半开放式VRPSDP问题研究[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(11): 2464-2475.
- [31] 于江霞, 杜红亚, 罗太波. 基于客户分类的即时配送路径优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(04): 202-208.
- [32] 杜琛, 李怡靖. 基于客户满意度和最小损耗的冷链配送路径问题研究[J]. *工业工程与管理*, 2020, 25(06): 163-171.
- [33] 王涛, 倪静. 改进智能水滴算法求解混合时间窗车辆路径问题[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(11): 246-253.
- [34] Nagy G, Salhi S. Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 162(1): 126-141.
- [35] Sombuntham P, Kachitvichyanukul V, Ao S I, et al. Multi-depot Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery Requests[C]/AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2010, 1285(1): 71-85.
- [36] Oberscheider M, Zazgornik J, Henriksen C B, et al. Minimizing driving times and greenhouse gas emissions in timber transport with a near-exact solution approach[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, 28(5): 493-506.

- [37] Subramanian A, Uchoa E, Ochi L S. A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems[J]. *Computers Operations Research*, 2013, 40(10): 2519-2531.
- [38] Kim S J, Lim G J, Cho J, et al. Drone-Aided healthcare services for patients with chronic diseases in rural areas[J]. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 2017, 88(1): 163-180.
- [39] Gansterer M, Hartl R F, Salzman P E H. Exact solutions for the collaborative pickup and delivery problem[J]. *Central European Journal of Operations Research*, 2018, 26(2): 357-371
- [40] Dragomir A G, Nicola D, Soriano A, et al. Multidepot pickup and delivery problems in multiple regions: a typology and integrated model[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2018, 25(2): 569-597.
- [41] Soriano A, Gansterer M, Hartl R F. The two-region multi-depot pickup and delivery problem[J]. *OR Spectrum*, 2018, 40(4): 1077-1108.
- [42] 邓宇君. 面向北京“外集内配”模式的公铁联运枢纽选址布局研究[D]. 北京交通大学, 2020.
- [43] 徐俊杰, 曹曦. 城市快递共同配送的演进动力与网络组织研究[J]. *现代城市研究*, 2020(06): 26-32.
- [44] 王苏. 快递末端共配网点布局规划研究[D]. 北京交通大学, 2020.
- [45] 欧阳玉子. 城市末端共同配送网点布局规划研究[D]. 北京交通大学, 2019.
- [46] 王冰怡. 资源共享下城市快递网点模式及布局研究综述[J]. *综合运输*, 2020, 42(05): 99-103.
- [47] GB/T 18354-2021, 物流术语[S]. 全国物流标准化技术委员会(SAC/TC 269)(2021). 国家市场监督管理总局; 国家标准化管理委员会.
- [48] 史家禹. 基于合作博弈理论的共同配送联盟利润分配策略优化研究[D]. 渤海大学, 2017.
- [49] 宾厚, 王芬, 王欢芳. 生态城市共同配送生成机理与运作模式研究[J]. *湖南社会科学*, 2016(04): 132-135.
- [50] 贾冰新. 电子商务下物流公司配送系统优化问题研究[D]. 郑州大学, 2018.

- [51]王雪兵.基于遗传算法的Y物流公司配送路径优化研究[D].中北大学,2021.
- [52]刘霖. 基于共同配送的城市冷链物流路径及利益分配研究[D].重庆大学,2021.
- [53]Wang Y, Ma X, Xu M, Wang L, Wang Y, Liu Y. A Methodology to Exploit Profit Allocation in Logistics Joint Distribution Network Optimization[J]. CHOI T-M. Mathematical Problems in Engineering, 2015: 827021.

攻读硕士学位期间发表论文及科研情况

参与课题：

- [1] 甘肃省科技厅软科学课题：丝绸之路背景下甘肃物流集散能力研究（20CX4ZA059）；
- [2] 甘肃省电子商务技术与应用重点实验室，甘肃特色农产品跨境电商物流问题研究（2018GSDZSW63A12）。

发表论文及相关成果：

- [1] 彭会萍,李士伟,孙宏进等.基于改进遗传算法的末端共同配送车辆路径优化[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2024,40(01):45-51.
- [2] Zhang Kehong,Li Shiwei. Research on The Integration of Business Intelligence and Innovation and Entrepreneurship Education for Computer Science[C]:Association for Computing Machinery,2022:212-216.
- [3] 参与撰写《中国智慧物流》，出版时间，2022.3，出版社：中国财政经济出版社.
- [4] 物流信息管理系统 V1.0.软件著作权,2022, 登记号: 2022SR0561109.
- [5] 多中心物流配送规划系统 V1.0.软件著作权,2023, 登记号: 2023SR1580912.

致谢

写论文时才思枯竭，写到致谢更是无从下手。研究生三年的求学经历了太多太多，无法用短短的话总结。感谢在这三年的时间里，帮助我进步的每一个人。

首先我要对我的导师彭会萍教授表示衷心的感谢，作为我研学道路上的领路人，她在我的论文撰写过程中给予了无数指导和帮助；每次组会上都能提出很多新奇的想法开阔我们的视野，让研究的问题更加贴近现实具有实际意义。生活上，彭老师对于我们的近期状况都密切关注，暑假期间我遇到了一些困难，彭老师了解到后给了我及时的帮助。她的言行举止让我深刻领悟到了言传身教的真正含义。其次，还要感谢我们实验室的曹晓军老师，曹老师治学严谨、专业素养深厚，每次组会都会提前到来并询问大家最近在学习上遇到的困难，并提出有效可行的方法指导我们后续的研究方向。让我记忆犹新的是，在疫情风险严重时，曹老师打来电话问我们状况如何，听到没事才放下心来。同时，我还要感谢我们实验室的张克宏老师，张老师知识渊博，我在很多方面都需要向他请教，每次他都会不厌其烦的进行答疑解惑。还有实验室的王国兴老师、张明军老师、张军玲老师、赵爽老师，每周的组会都能从各位老师身上学到很多的知识，祝愿各位老师身体健康、科研顺利，祝愿我们实验室今后发展越来越好。

感谢我的同门孙宏进，三年来在他身上我看到了很多优秀的品质，他的乐观精神、拼搏精神值得我永远学习，祝他事业有成！感谢我的室友孙梦泽、宋思良，每一次的深夜畅谈都能让人心情愉悦；还要感谢实验室的师兄、师姐们，让我明白如何进行科研学习；还要感谢实验室的师弟们、师妹们，让我明白这个世界的丰富多彩，祝愿他们以后的日子中科研顺利。也感谢我的好朋友任俊浩，刘喜富，从大学到研究生，从同校到异地，七年来你们陪我并肩走了太长的路，每次找你们倾吐时，你们的调侃或安慰都能让我暂时忘却烦恼，感谢有你们。感谢我的爸爸妈妈还有妹妹，感谢你们对我的无私奉献和帮助，每次都说只要我自己觉得对那就去做吧，家里人永远都支持你！每次看着你们送我踏上行程的背影我心中都五味杂陈，有了你们的支持我才能轻装上阵做出成绩。最后感谢买辣椒也用券和一直没有放弃的平庸和笨的自己，这一路上走走停停，以爱之名，我还愿意！

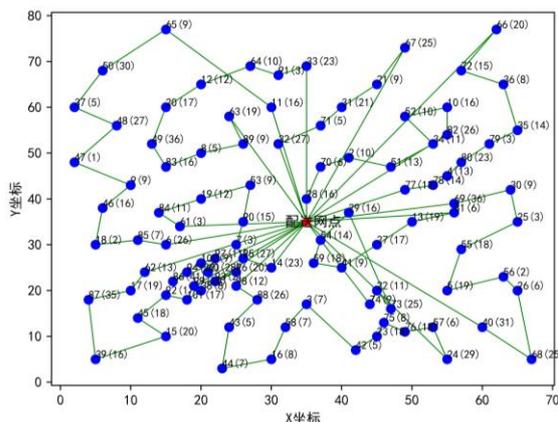


图 7 R101-100Gurobi (计算结果 1135.62km)

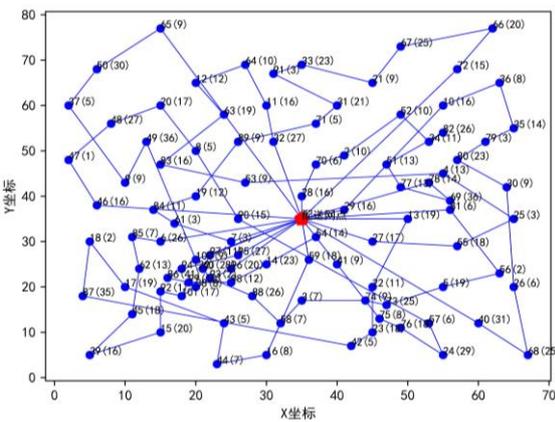


图 8 R101-100GA (计算结果 1291.66km)

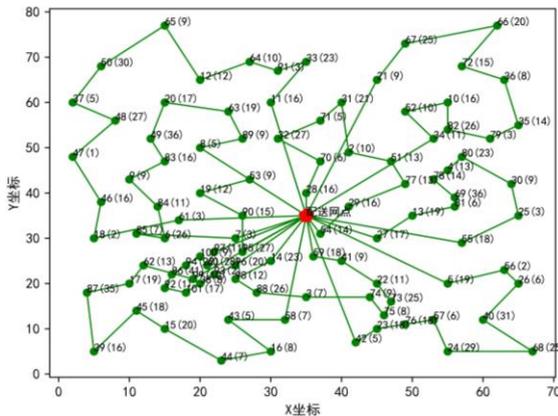


图 9 R101-100CWGA (计算结果 979.63km)

附录 2 测试集

测试集 1:

id	x	y	c	id	x	y	c	id	x	y	c	id	x	y	c
1	35	35	0	26	65	20	6	51	47	47	13	76	49	11	18
2	41	49	10	27	45	30	17	52	49	58	10	77	49	42	13
3	35	17	7	28	35	40	16	53	27	43	9	78	53	43	14
4	55	45	13	29	41	37	16	54	37	31	14	79	61	52	3
5	55	20	19	30	64	42	9	55	57	29	18	80	57	48	23
6	15	30	26	31	40	60	21	56	63	23	2	81	56	37	6
7	25	30	3	32	31	52	27	57	53	12	6	82	55	54	26
8	20	50	5	33	35	69	23	58	32	12	7	83	15	47	16
9	10	43	9	34	53	52	11	59	36	26	18	84	14	37	11
10	55	60	16	35	65	55	14	60	21	24	28	85	11	31	7
11	30	60	16	36	63	65	8	61	17	34	3	86	16	22	41
12	20	65	12	37	2	60	5	62	12	24	13	87	4	18	35
13	50	35	19	38	20	20	8	63	24	58	19	88	28	18	26
14	30	25	23	39	5	5	16	64	27	69	10	89	26	52	9
15	15	10	20	40	60	12	31	65	15	77	9	90	26	35	15
16	30	5	8	41	40	25	9	66	62	77	20	91	31	67	3
17	10	20	19	42	42	7	5	67	49	73	25	92	15	19	1
18	5	30	2	43	24	12	5	68	67	5	25	93	22	22	2
19	20	40	12	44	23	3	7	69	56	39	36	94	18	24	22
20	15	60	17	45	11	14	18	70	37	47	6	95	26	27	27
21	45	65	9	46	6	38	16	71	37	56	5	96	25	24	20
22	45	20	11	47	2	48	1	72	57	68	15	97	22	27	11
23	45	10	18	48	8	56	27	73	47	16	25	98	25	21	12
24	55	5	29	49	13	52	36	74	44	17	9	99	19	21	10
25	65	35	3	50	6	68	30	75	46	13	8	100	20	26	9
												101	18	18	17

测试集 2:

客户编号	X	Y	A 需求量	B 需求量	C 需求量	D 需求量	总需求量
1	41	49	5	15	13	22	55
2	35	17	24	22	28	25	99
3	55	45	27	19	16	29	91
4	55	20	14	20	22	25	81
5	15	30	11	15	10	27	63
6	25	30	11	11	18	6	46
7	20	50	18	25	17	7	67
8	10	43	6	8	19	22	55
9	55	60	28	20	13	28	89
10	30	60	9	16	16	10	51
11	20	65	28	6	18	21	73
12	50	35	27	14	7	23	71
13	30	25	19	22	18	17	76
14	15	10	13	8	7	28	56
15	30	5	24	22	6	14	66
16	10	20	15	5	28	26	74
17	5	30	14	16	12	18	60
18	20	40	27	11	23	17	78
19	15	60	19	28	15	29	91
20	45	65	25	26	5	22	78

附录 3 客户聚类结果

类	ID	X	Y	类	ID	X	Y	类	ID	X	Y	类	ID	X	Y
0	3	35	17	1	7	25	30	1	96	25	24	2	77	49	42
0	5	55	20	1	14	30	25	1	97	22	27	2	78	53	43
0	13	50	35	1	15	15	10	1	98	25	21	2	79	61	52
0	22	45	20	1	16	30	5	1	99	19	21	2	80	57	48
0	23	45	10	1	17	10	20	1	100	20	26	2	82	55	54
0	24	55	5	1	18	5	30	1	101	18	18	3	8	20	50
0	25	65	35	1	38	20	20	2	2	41	49	3	9	10	43
0	26	65	20	1	39	5	5	2	4	55	45	3	11	30	60
0	27	45	30	1	43	24	12	2	10	55	60	3	12	20	65
0	29	41	37	1	44	23	3	2	21	45	65	3	19	20	40
0	40	60	12	1	45	11	14	2	28	35	40	3	20	15	60
0	41	40	25	1	58	32	12	2	30	64	42	3	32	31	52
0	42	42	7	1	60	21	24	2	31	40	60	3	37	2	60
0	54	37	31	1	61	17	34	2	33	35	69	3	46	6	38
0	55	57	29	1	62	12	24	2	34	53	52	3	47	2	48
0	56	63	23	1	84	14	37	2	35	65	55	3	48	8	56
0	57	53	12	1	85	11	31	2	36	63	65	3	49	13	52
0	59	36	26	1	86	16	22	2	51	47	47	3	50	6	68
0	68	67	5	1	87	4	18	2	52	49	58	3	53	27	43
0	73	47	16	1	88	28	18	2	66	62	77	3	63	24	58
0	74	44	17	1	90	26	35	2	67	49	73	3	64	27	69
0	75	46	13	1	92	15	19	2	69	56	39	3	65	15	77
0	76	49	11	1	93	22	22	2	70	37	47	3	83	15	47
0	81	56	37	1	94	18	24	2	71	37	56	3	89	26	52
1	6	15	30	1	95	26	27	2	72	57	68	3	91	31	67

附录 4 考虑共同客户的共同配送策略仿真结果

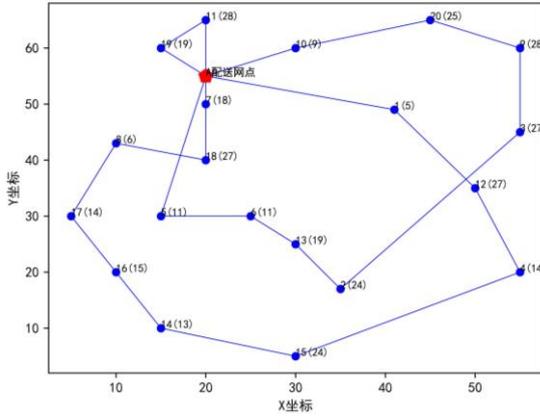


图 1 存在共同客户时 A 独立配送

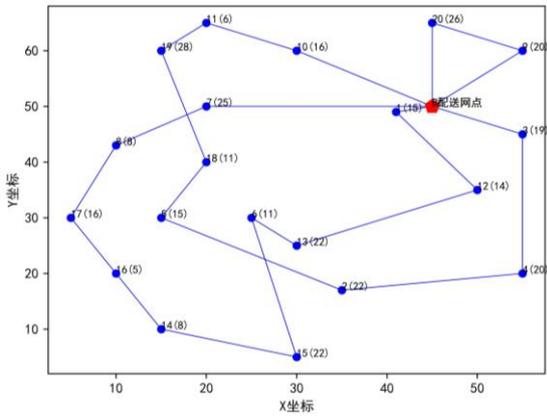


图 2 存在共同客户时 B 独立配送

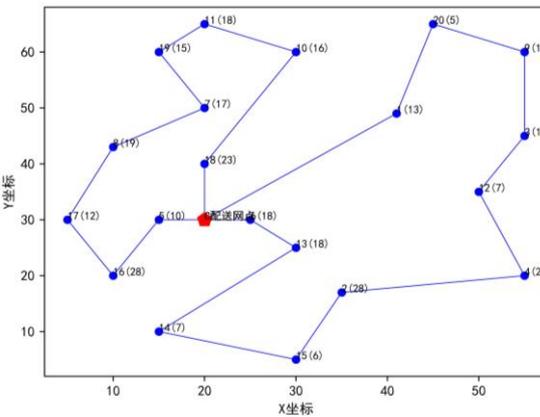


图 3 存在共同客户时 C 独立配送

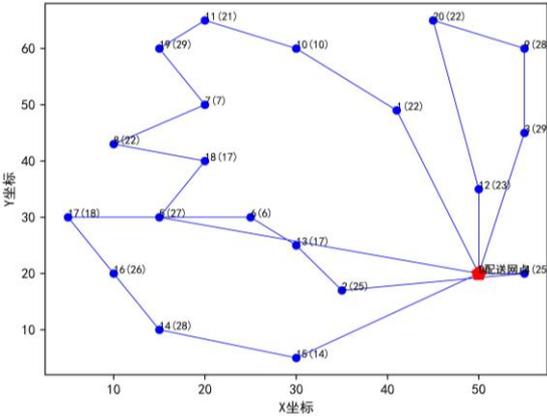


图 4 存在共同客户时 D 独立配送

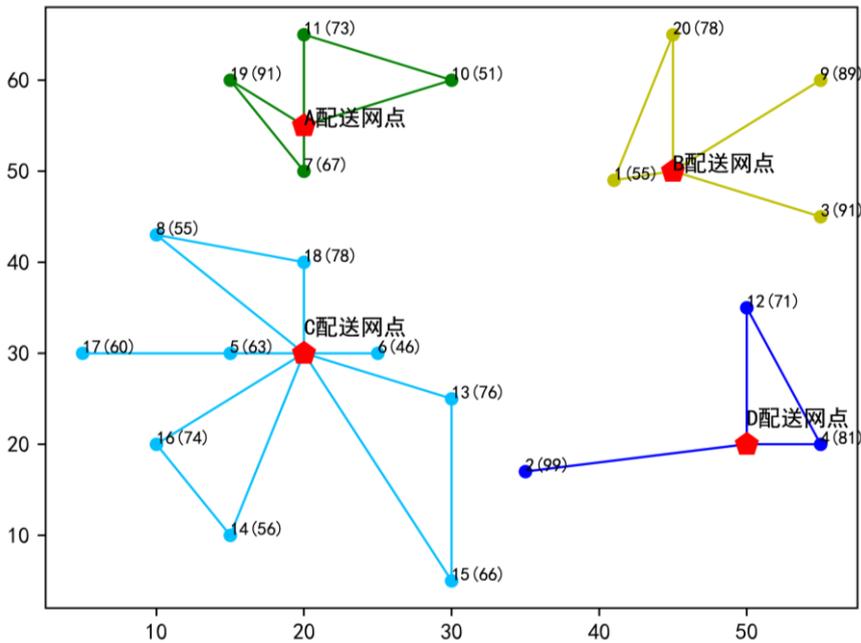


图 5 存在共同客户时 MDVRP 共同配送仿真结果

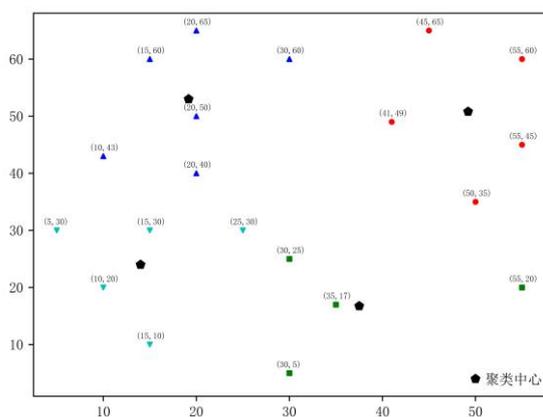


图 6 存在共同客户的聚类结果

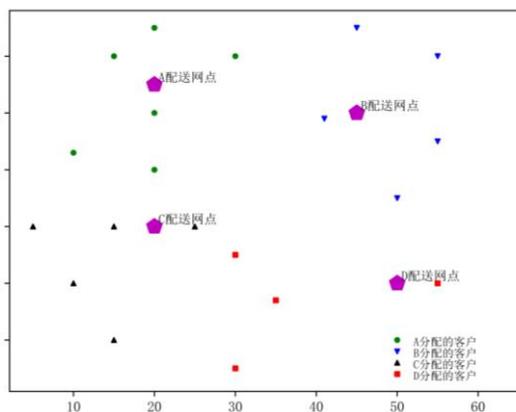
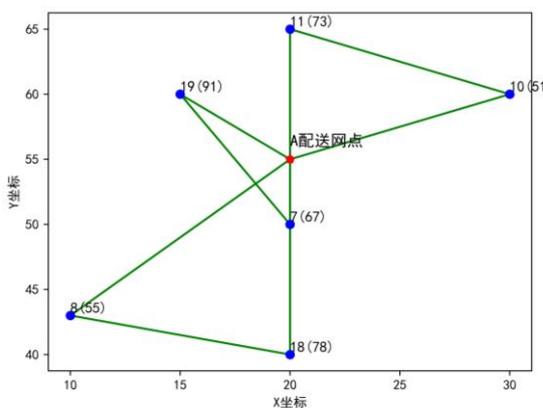
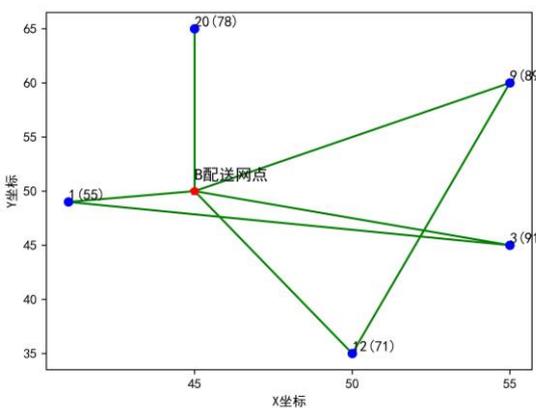


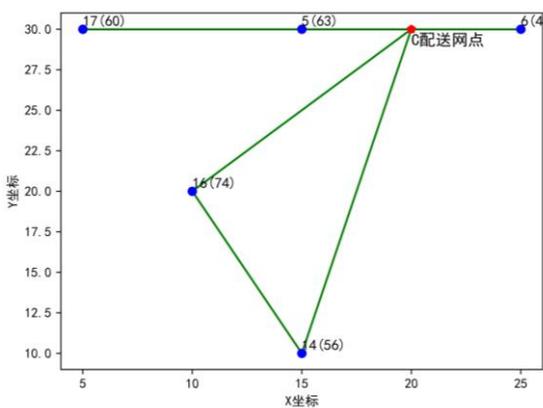
图 7 各网点服务客户范围



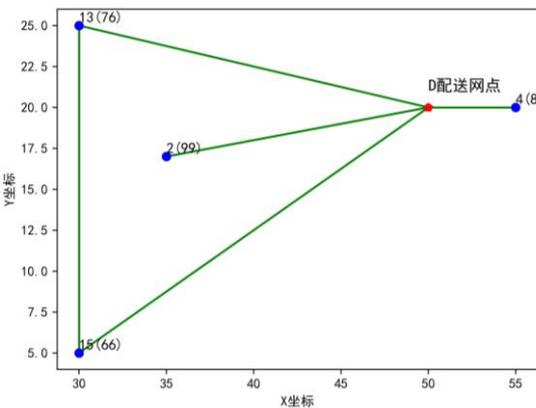
图(i)A 网点配送路径



图(ii)B 网点配送路径



图(iii)C 网点配送路径



图(iii)D 网点配送路径

图 8 划分聚类式共同配送后各网点配送路径