



江西财经大学
JIANGXI UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

学校代码 _____

密 级 _____

中图分类号 _____

UDC _____

硕士学位论文

MASTER DISSERTATION

论文题目 带时间窗的医药物流配送路径优化问题研究
(中文)

论文题目 Research on Optimization of Pharmaceutical Logistics
(英文) Distribution Problem Based on Time Window

作 者 胡剑玫 导 师 万龙 副教授

申请学位 工程硕士 培养单位 信息管理学院

学科专业 物流工程 研究方向 物流决策与绩效评价

二〇二〇 年 六 月

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，也不包含为获得江西财经大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。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。

签名： 胡剑政 日期： 2020.6.9

关于论文使用授权的说明

本人完全了解江西财经大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

签名： 胡剑政 导师签名： 王书 日期： 2020.6.9

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究综述	3
1.2.1 国外研究综述	3
1.2.2 国内研究综述	4
1.3 研究内容及研究方法	7
1.3.1 研究内容	7
1.3.2 研究方法	8
第 2 章 相关理论研究	9
2.1 医药物流的基本理论及其特点	9
2.1.1 医药物流的概念	9
2.1.2 医药物流的特点	9
2.1.3 药品冷链运输的特点	11
2.2 车辆路径问题的定义和研究	12
2.2.1 车辆路径问题的定义	12
2.2.2 车辆路径问题的分类	13
2.3 求解车辆路径问题的常用算法	14
2.3.1 精确算法	14
2.3.2 启发式算法	14
2.4 本章小结	15
第 3 章 带有时间窗的医药物流配送路径问题数学模型	16
3.1 普通药品的物流配送问题	16
3.1.1 普通药品配送问题描述	16
3.1.2 普通药品配送成本分析	17
3.1.3 普通药品物流配送模型的建立	18
3.2 冷链药品的物流配送问题	19
3.2.1 冷链药品配送问题描述	19
3.2.2 冷链药品质量函数的构建	20
3.2.3 冷链药品配送成本分析	21
3.2.4 冷链药品物流配送模型建立	21
3.2.5 目标函数的处理	23
3.3 本章小结	24
第 4 章 基于配送路径优化模型的遗传算法	25
4.1 选择遗传算法的原因	25
4.2 遗传算法概述	25
4.3 遗传算法设计	26
4.3.1 编码方式设计	26
4.3.2 适应度函数设计	27
4.3.3 选择	27
4.3.4 交叉	28

4.3.5 变异.....	29
4.3.6 算法的结束条件.....	30
4.3.7 算法流程.....	30
4.4 本章小结.....	32
第5章 算例求解及分析.....	33
5.1 普通药品的物流配送问题求解.....	33
5.1.1 普通药品配送问题的基本数据及参数设定.....	33
5.1.2 种群规模对普通药品算例结果的影响.....	35
5.1.3 最大迭代次数对普通药品算例结果的影响.....	36
5.1.4 普通药品配送问题实验结果分析.....	37
5.2 冷链药品的物流配送问题求解.....	39
5.2.1 冷链药品配送案例介绍.....	39
5.2.2 冷链药品配送案例的基本数据及参数设定.....	40
5.2.3 种群规模对冷链药品算例结果的影响.....	41
5.2.4 最大迭代次数对冷链药品算例结果的影响.....	42
5.2.5 冷链药品配送案例实验结果分析.....	43
5.3 本章小结.....	46
第6章 总结与展望.....	47
6.1 总结.....	47
6.2 展望.....	48
参考文献.....	49
致谢.....	53

Content

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background and Significance	1
1.1.1 Research Background	1
1.1.2 Research significance	2
1.2 Summary of domestic and foreign research	3
1.2.1 Overview of Foreign Studies	3
1.2.1 Summary of Domestic Research	4
1.3 Research Content and Research Methods	7
1.3.1 Research Content	7
1.3.2 Research Methods	8
Chapter 2 Related Theoretical Studies	9
2.1 Basic Theory and Characteristics of Pharmaceutical Logistics	9
2.1.1 Concept of Pharmaceutical Logistics	9
2.1.2 Characteristics of Pharmaceutical Logistics	9
2.1.3 Characteristics of Cold Chain Transportation of Medicine	11
2.2 Definition and Research of Vehicle Routing Problems	12
2.2.1 Definition of Vehicle Routing Problem	12
2.2.2 Classification of Vehicle Routing Problems	13
2.3 Common Algorithms for Solving Vehicle Routing Problems	14
2.3.1 Exact algorithms	14
2.3.2 Heuristics	14
2.4 Chapter Summary	15
Chapter 3 Mathematical Models for Pharmaceutical Logistics Distribution Routing Problems with Time Windows	16
3.1 Logistics Distribution of General Medicines	16
3.1.1 Description of General Medicine Delivery Issues	16
3.1.2 Analysis of General Medicine Distribution Costs	17
3.1.3 Establishment of General Drug Logistics Distribution Model	18
3.2 Logistics and Distribution of Cold Chain Medicine	19
3.2.1 Description of Refrigerated Medicine Distribution Issues	19
3.2.2 Construction of Quality Function of Refrigerated Drugs	20
3.2.3 Cost Analysis of Cold Chain Medicine Distribution	21
3.2.4 Establishment of Cold Chain Medicine Logistics Distribution Model	21
3.2.5 Processing of Objective Function	23

3.3 Chapter Summary.....	24
Chapter 4 Genetic Algorithm Based on Distribution Route Optimization Model	25
4.1 Reasons to Choose Genetic Algorithms.....	25
4.2 Overview of Genetic Algorithms.....	25
4.3 Genetic Algorithm Design.....	26
4.3.1 Coding Mode Design.....	26
4.3.2 Fitness Function Design.....	27
4.3.3 Selection.....	27
4.3.4 Crossover.....	28
4.3.5 Mutation.....	29
4.3.6 End conditions of the algorithm.....	30
4.3.7 Algorithm Flow.....	30
4.4 Chapter Summary	32
Chapter 5 Solution and Analysis	33
5.1 Solving General Drug Logistics Distribution Problems.....	33
5.1.1 Basic Data and Parameter Settings for General Medicine delivery problems.....	33
5.1.2 The Effect of Population Size on the Results of Common Medicines..	35
5.1.3 Impact of the Maximum Number of Iterations on the Results of Ordinary Pharmaceutical Studies.....	36
5.1.4 Analysis of Experimental Results of General Drug Delivery Problems	37
5.2 Solving Cold Chain Drug Logistics Distribution Problems.....	39
5.2.1 Case Study of Cold Chain Drug Delivery.....	39
5.2.2 Basic data and parameter setting of cold chain medicine distribution case.....	40
5.2.3 Effect of population size on results of cold chain medicines.....	41
5.2.4 Influence of Maximum Iterations on the Results of Cold Chain Medicines.....	42
5.2.5 Analysis of the Experimental Results of the Cold Chain Drug Delivery Case.....	43
5.3 Chapter Summary.....	46
Chapter 6 Summary and Outlook	47
6.1 Summary.....	47
6.2 Outlook.....	48
References	49
Acknowledgements	53

摘 要

医药产业是国民经济的重要组成部分，也是关系国家安全的重要领域。近年来，在市场经济和国家政策的推动下，我国医药产业快速发展，医药物流企业迎来了巨大的机遇。但是，我国的医药物流还处于成长期，依旧存在技术落后、管理体系尚不完善、政策法规与标准化体系不健全等问题，这些问题也直接导致我国医药物流企业运营成本居高不下，药品流通安全得不到保障。在这种背景下，发展高效率、高质量的医药物流体系迫在眉睫。

研究药品配送路径优化问题，不仅能够有效降低医药物流企业的配送成本，提升客户满意度，还可以促进我国医药物流建设，保障国家药品安全。本文以配送路径问题为核心，结合药品配送的实际特点进行建模和求解。

本文首先对国内外医药物流和车辆路径问题的研究现状进行了详细的阐述，并列举了车辆路径问题的通用算法。其次分析了医药物流的概念、特点，将医药物流和普通商品物流作对比，并阐述了冷链物流的严格性，凸显出医药物流在贮存、运输方面的特殊性。然后本文根据普通药品的配送特点和冷藏药品的配送特点，分别建立了带时间窗的医药物流配送模型。在进行车辆调度安排时，普通药品的配送成本仅考虑固定成本和运输成本，而冷链药品的配送成本不仅需要考虑固定成本和运输成本，还需要考虑能耗成本。普通药品的配送模型考虑的时间窗为硬时间窗，且仅考虑成本这一个目标。而在配送冷链药品时，药品的质量更为重要，而质量与时间有关，所以冷链药品的物流配送模型考虑的时间窗为单边硬时间窗，且必须同时考虑药品质量和成本这两个目标，为了使问题更加具体，本文以血液为案例来进行问题的说明。在求解模型时，本文将血液质量作为优化的第一目标，将配送成本作为第二目标，为了方便求解，通过转换质量函数将双目标函数变成单目标函数，并引入两个权重系数来表示两个目标的重要程度。最后，本文设计遗传算法对两个模型进行算例验证，在进行具体的验证之前，通过实验确定了遗传算法的最优种群规模和最大迭代次数。设置好各个参数之后，本文得到了两个模型的最优解。

关键词：医药物流；物流配送路径优化问题；遗传算法；时间窗

Abstract

The pharmaceutical industry is an important part of the national economy and an important area related to national security. In recent years, driven by the market economy and national policies, China's pharmaceutical industry has developed rapidly, and pharmaceutical logistics companies have ushered in huge opportunities. However, China's pharmaceutical logistics is still in its growth stage. There are still problems such as backward technology, incomplete management systems, and incomplete policies, regulations and standardization systems. These problems also directly lead to high operating costs for pharmaceutical logistics companies in China and safe drug distribution no guarantee, etc. In this context, it is urgent to develop an efficient and high-quality pharmaceutical logistics system.

Studying the optimization of pharmaceutical logistics distribution problem can not only effectively reduce the distribution cost of pharmaceutical companies and improve customer satisfaction, but also promote the construction of pharmaceutical logistics in China and ensure the safety of national drugs. This article focuses on the distribution route problem, and combines the actual characteristics of drug distribution to model and solve.

The article firstly elaborates on the current situation of medical logistics and vehicle routing problems at home and abroad, and lists general algorithms for vehicle routing problems. Secondly, it analyzes the concept and characteristics of pharmaceutical logistics, compares pharmaceutical logistics with general commodity logistics, and elaborates the strictness of cold chain logistics, highlighting the speciality of pharmaceutical logistics in storage and transportation. Then, based on the distribution characteristics of ordinary medicines and the distribution characteristics of refrigerated medicines, this paper establishes pharmaceutical logistics distribution models with time windows. When arranging vehicle routes, the distribution cost of ordinary medicines only considers fixed costs and transportation costs, while the distribution costs of cold chain medicines need to consider not only fixed costs and transportation costs, but also energy consumption costs. The time window considered in the general drug distribution model is a hard time window, and only the goal of cost is considered. When distributing cold-chain medicines, the quality of the medicines is

more important, and quality is time-dependent. Therefore, the time window considered in the logistics distribution model of cold-chain medicines is a unilateral hard time window. In order to make the problem more specific, this article uses blood as a case to explain the problem. When solving the model, this article takes the blood quality as the first goal of optimization and the distribution cost as the second goal. In order to facilitate the solution, the dual objective function is converted into a single objective function by transforming the quality function, and two weight coefficients are introduced to represent the importance of both goals. Finally, this paper designs a genetic algorithm to verify the two models with examples. Before performing specific verification, the optimal population size and maximum number of iterations of the genetic algorithm are determined through experiments. After setting all the parameters, we obtain the optimal solutions of the two models.

Keywords: Pharmaceutical logistics; Distribution route optimization problem; Genetic algorithm; Time Window

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近些年来,随着我国经济快速发展以及一系列医疗政策的支持,人们对健康的重视程度日益增加,对医药产品的需求逐步上升,国内医药行业保持快速增长,中国已经成为世界第二大药品市场。据统计,到2019年底,我国医药行业营业收入已经达到23908.6亿元,预计到2023年中国医药市场规模将占据全球市场30%的份额。

医药物流作为医药产业中的一个全新领域也逐渐被人们关注和重视,且已经成为医药流通领域的一个热点问题。物流作为企业的第三利润源,已成为众多公司的商战利器,是实现医药公司稳定经营的依托。

我国医药物流起步较晚,但发展速度很快,迅速成为物流行业的热点。但是不可否认的是,我国医药物流依然处于成长期,企业利润水平低、经营成本高、物流人力资源短缺、难以形成集约化发展等诸多问题成为医药物流快速发展的瓶颈。在进行药品的物流活动时,不仅要保障药品移动的低成本运作,而且要保障药品的质量,实现面向客户的高效率服务,而在物流活动的众多环节中,物流的配送环节在满足现代化的物流需求方面起到了决定性的作用。但是,调查显示,中国医药物流行业的运输成本占总销售额的比例高达10%,而美国的物流运输成本仅占总销售额的2.6%。

在冷链物流方面,据有关资料显示,目前我国疫苗、酞剂、注射剂、外用药品、血液制品等冷链药品的销售额约占全国医药行业总销售额的10%,在中国有着巨大的市场空间。但是,相比其他国家,中国的冷链医药物流业依旧存在基础设施落后、医药冷链物流的相关企业投入不足、监管体系落实不到位等问题,如今,国内药品冷链物流的覆盖率仅为百分之十左右。近年来,频发的药品安全事件暴露了中国医药冷链物流的薄弱现状,药品安全直接关系到国计民生和社会稳定,这对于我国的物流供应链,尤其是冷链物流提出了更高的要求。

目前,越来越多的外国医药物流企业涌入中国,这势必会带来残酷的竞争。因此,我国的医药物流企业若想提升市场竞争力,必须致力于降低药品的运输成本,提高药品的运输效率,提高客户满意度。药品配送作为医药物流的重要环节

之一，直接影响着医药物流企业的利润率和客户对医药物流企业的信任程度。因此，越来越多的企业开始寻找合适的方法，从不同角度优化车辆配送环节，确保药品的质量，减少成本浪费，提升客户满意度。

1.1.2 研究意义

如今，我国医药物流发展迅速，但是仍然普遍存在信息化程度和现代化管理程度水平低、物流基础设施落后、经营成本高等问题。配送在整个物流体系中是极其重要的一环，研究药品配送优化问题，有利于降低药品的配送成本，提升配送效率。因此，本文以医药物流为研究对象，根据医药物流的特性建立合适的路径优化数学模型，并且对该路径优化数学模型进行求解，具有明显的理论意义和实践意义。

本文的理论意义为：

本文在研究内容上有单目标车辆路径问题、多目标车辆路径问题以及医药物流配送问题等理论基础。基于时间窗、载重等约束条件，根据配送药品的不同种类分别构建普通药品配送模型和冷链药品配送模型。为了更贴近事实，普通药品配送问题仅考虑配送成本这一因素。而冷链药品配送问题综合考虑药品质量与物流配送成本两个因素，为了减少物流配送成本，提高药品质量，就需要选择最优路径来降低物流成本，提高配送效率。在研究方法上，本文采用多目标规划法，将不同量纲、不同方向的函数进行统一的处理，以及将药品质量最大化与配送成本最小化两目标进行规划，丰富了物流研究手段。

本文的实际意义为：

（1）降低医药物流公司的配送成本，这是在激烈的医药物流市场竞争中提升企业竞争实力的关键。

（2）提高配送时效性，满足客户需要准时送达的要求，提高客户满意度，增加客户对医药物流公司的信任度、依赖度，只有为客户提供的物流配送服务是安全、精准、灵活的，才能提升医药物流企业在行业竞争中的优势，增强医药物流企业的核心竞争力。

（3）本文研究了冷链药品的质量问题，这为完善医药物流公司的冷链药品运输提供了一定的参考。

1.2 国内外研究综述

1.2.1 国外研究综述

在日本以及欧美等发达国家,医药物流发展较早,因此在长期的市场竞争中不断改进,优化选择,进而发展得愈发完善。由于已经形成较大规模且趋于系统,在这种规模的前提下,药品的生产、配送、分销和医院的供应链等均实现了一体化。同时又因为 IT 技术的发展,使医疗电子商务系统形成了一个巨大的信息处理平台,数据处理能力不断提高,真正的实现了供应链的集成。

国内外学者对于配送路径优化问题的研究成果主要集中在对车辆路径问题的研究上。国外车辆路径问题的研究可以分为两个阶段:第一个阶段为 1959 年 Dantzig 和 Ramser 提出车辆路径问题至 20 世纪 80 年代末,在这个阶段,学者们主要是利用简单的数学规划方法求解车辆路径问题和进行经典启发式算法的设计。

第二个阶段为 20 世纪 80 年代至今,在这个阶段,学者们研究的重点是现代启发式算法。Ombuki 等(2002)^[1]采用遗传算法和禁忌搜索方法相结合的方法来求解车辆调度问题,其用遗传算法优化配送车辆的数目,用禁忌搜索算法优化车辆行驶路程,最终将采用该混合算法所得到的结果和采用单一算法所得到的结果进行对比。Nikolakopoulou 等(2004)^[2]将整个网络划分为若干子网络,然后通过子网络中规划车辆配送路线的方式构造了一个启发式算法来求解 VRP 问题。Escobar 等(2013)^[3]提出了一种两阶段混合的启发式算法来求解以总成本最低为目标的选址-路径优化问题。

然而,上述研究只针对一般的车辆路径优化模型。在实际应用中,越来越多的车辆路径优化研究无法避开时间的限制,因此学者们提出了基于时间窗约束的车辆路径问题(即 VRPTW),并受到了诸多学者的广泛研究。Lau 等(2003)^[4]构建了限制车辆数目的 VRPTW 模型,在模型中引入迟到惩罚的概念来放宽时间限制,同时采用禁忌搜索算法对该模型进行求解。Azi 等(2007)^[5]对带时间窗的配送问题进行研究时,设计了一种基于最短路径算法的两阶段精确算法,并用该算法求得问题最优解。Kallehauge(2008)^[6]在研究 VRP 时考虑了时间窗问题,建立了时间窗的惩罚函数,并采用精确算法与启发式算法对问题进行求解。Brito 等(2009)^[7]针对带有模糊时间窗的车辆路径问题,设计了混合变邻域搜索和贪婪随机自适应搜索的求解方法。Oliveira 等(2010)^[8]以总距离最小为主要

目标,研究了带时间窗的车辆路径问题,并采用模拟退火算法和爬山算法对模型进行求解。Kim 等(2010)^[9]研究了带有时间窗的基于交通现状的车辆调度问题,设计了考虑交通状况的车辆调度模型,最后用混合遗传算法求解,目的是使配送的总时间最少。Ceschia 等(2011)^[10]针对软时间窗约束的异构车辆路径问题,设计了一种基于禁忌搜索和邻域关系组合的元启发式方法进行求解。Figliozzi 等(2011)^[11]在研究带时间窗的车辆路径优化模型时,综合考虑分析了车速、车辆载重等因素的变化对路径优化的影响。Song 等(2016)^[12]等人探讨了易腐食品的配送问题,以顾客满意度最大化为目标建立模型,并求解。

在医药物流配送方面,Liu 等(2012)^[13]人针对家庭卫生保健物流中遇到的问题构造了以成本最小为目标的模型,并用混合遗传算法对模型进行求解。Kergosien 等(2014)^[14]考虑了医院中的后勤问题,设计了双层车辆路径问题模型,并用遗传算法和禁忌搜索算法进行求解。

1.2.2 国内研究综述

与国外医药物流相比,中国的医药物流还处于成长期。国内的多数医药物流物流企业规模小,难以形成物流集约发展模式,而且物流成本很高。因此,对于医药物流企业而言,物流成本的有效控制意味着总成本的降低和利润率的提高。目前,国内学者们对医药物流成本的研究较少,更多的是对企业物流成本管理的分析和研究。宋则和常东亮(2005)^[15]认为物流成本核算除了固定费用、运输费用、人工费用等传统费用之外,所有隐性和显性的物流成本都需要被包含进去。陈正林(2011)^[16]阐述了企业物流成本的内涵和生成机理,并分析某公司在物流成本控制方面的优点和不足,最后进一步探讨企业深化改革中的物流成本控制问题。

相比于国外,国内对于配送路径优化问题的研究起步较晚。国内学者中最早从事 VRP 研究的是郭耀煌教授,他在 1989 年出版的《车辆优化调度》一书,是国内对 VRP 研究的第一本专著。虽然我国对路径优化问题的研究起步较晚,但也取得了不错的成就。对于传统 VRP 的研究,因为车辆路径优化问题的求解过程比较复杂,所以目前的研究趋势是采用各种算法对 VRP 进行求解。杨珺等(2015)^[17]研究了电动汽车的配送问题以及充电站的选址问题,提出了一个整数规划模型,并用两阶段启发式算法来进行问题的求解。向婷和潘大志(2016)^[18]研究了没有时间窗约束的需求可拆分车辆路径优化问题,并设计求解该模型的聚类算法。

对于带时间窗约束的车辆路径问题（即 VRPTW），李宁等（2004）^[19]针对带时间窗的车辆路径问题构造了车辆路径问题的粒子表达方法，在此基础上建立该问题的粒子群算法，并与遗传算法作了比较，研究表明粒子群算法可以较好地求解带时间窗的车辆路径问题。霍佳震和张磊（2006）^[20]分析并构建了基于时间窗的配送\收集旅行商问题模型，利用修正的 C-W 算法和最邻近算法进行插入式的排序来求解该问题。杨宇栋等（2006）^[21]对带时间窗的车辆路径问题建立了数学模型，并根据带时间窗的车辆路径问题的特点构造了一种改进的模拟退火算法用于求解该问题。祁文祥等（2010）^[22]研究了以成本最小为目标的带软时间窗的车辆运输问题，并利用启发式节约算法得到最优配送路线。黄敏等（2013）^[23]通过一个无向多重图描述第四方物流路径问题，并建立了第四方物流路径问题模型，然后基于多重图转化为简单图的思想设计和声搜索算法求解了不同规模的问题。李珍萍等（2015）^[24]利用智能水滴算法求解了多时间窗车辆路径问题，并与用遗传算法求解的结果进行对比，通过仿真实验证明了智能水滴算法在求解多时间窗车辆路径问题上有较好的效果。郭咏梅等（2017）^[25]在蚁群算法的基础上提出了改进的人工鱼群-蚁群算法，并用该算法来解决应急物流车辆路径问题，验证了算法的有效性。任亮等（2018）^[26]在考虑客户时间偏好的前提下，以最大化总运输时间的前景值为目标，建立考虑客户时间偏好的数学模型，并采用蚁群算法对模型进行求解，最后用数值算例验证了算法的有效性。

上述带时间窗的车辆路径问题研究都是基于单目标的，但是学者们在研究车辆路径优化问题时，常常需要考虑多种目标，因此许多文献的模型的目标都是多种目标相混合的方式。刘长石和寇纲等（2015）^[27]以地震发生后的物资配送时间最小和成本最小为目标，构建了定位-路径优化模型，并设计了混合启发式算法来进行求解。邵举平等（2015）^[28]针对新鲜农产品对时间的敏感性，构建带模糊时间窗的多目标函数，并设计改进的遗传算法对其进行求解。赵锐等（2015）^[29]以配送成本最小、配送时间最短以及客户满意度最大为目标，建立了网购物流配送模型，并采用极差法对三个量纲不统一的目标函数进行无量纲化处理，再通过三个目标进行加权的方式将多目标问题转换为单目标问题。殷亚和张惠珍（2017）^[30]以派车数目最小和车辆行驶距离最小为目标，建立了带硬时间窗的多目标车辆路径问题模型，并设计了适用于模型的多种混合蝙蝠算法来进行求解。楼振凯（2017）^[31]以车辆使用数目最小、运输总里程最短以及客户不满意度最小为目标构建多目标车辆路径问题模型，基于功效系数原理将三个目标进行无量纲

化处理,然后根据三个目标的重要程度分别为它们分配权重,将多目标函数转化为单目标函数进行求解。葛显龙等(2018)^[32]研究了包括成本、碳排放量、运输距离等因素的多目标车辆路径问题,在模型中引入时间窗惩罚函数和碳交易费用函数,并设计混合遗传算法对模型进行求解。

我国在医药物流路径优化研究方面也有一定的成果。王恪铭等(2013)^[33]针对突发状况下的血液转运问题,构建了使转运血液所产生的费用最小为目标的车辆路径模型,并通过算例仿真验证了模型的有效性。邓旭东和姚璐(2013)^[34]构造了医药物流多中心配送模型,为了将问题简单化,将多中心问题转化为单中心问题,然后针对该医药物流模型设计了改进的蚁群算法。田宇(2013)^[35]分析了云南白药股份公司的配送问题,并针对这些问题建立了医药物流车辆路径问题模型,采用蚁群算法对该问题进行求解,最终得出车辆路径优化的最佳方案。李云娜(2013)^[36]在研究医药物流调度问题时,建立目标为总成本最小的车辆路径问题,并在模型中加入了客户最大时间惩罚成本的约束条件来界定客户可接受的时间范围,模型的求解算法为节约算法。王恪铭等(2013)^[37]构建了灾后不同阶段的血液调度模型,并用遗传-禁忌混合算法来求解该模型。蒋杰辉和马良(2016)^[38]研究了应急事件发生时的物资运送问题,首先根据传染病模型进行每个疫区的药品需求量预测,然后基于药品的需求量构建了双目标应急物流配送模型,两个目标分别为使配送时间最短和使运输成本最小,最后用改进的智能水滴算法进行模型的求解。刘聪(2017)^[39]建立了闭合式与开放式的 O2O 药品配送选址-路径问题的双层规划模型,并设计了求解该双层规划模型的遗传-蚁群算法。

以往的大部分学者对于配送路径问题的研究主要集中于算法的创新,对于医药物流的配送路线规划,主要也是基于普通的药品,而对于需要进行特殊处理的药品配送,例如冷链药品配送方面的研究较少。本文在以往学者研究常温药品配送路径优化问题的基础之上,研究带时间窗的普通药品配送问题和冷链药品配送问题,在构建模型时,考虑固定、运输、能耗等成本。在研究普通药品配送情况时,本文考虑的是带硬时间窗的单目标问题,而在研究冷链药品的配送情况时,本文考虑的是带单边硬时间窗的双目标问题,利用 java 进行编码求解,并通过实例来验证模型的有效性和可行性,以期在药品运输方面为医药物流行业提供一点思考。

1.3 研究内容及研究方法

1.3.1 研究内容

论文的研究线路如图 1.1 所示。

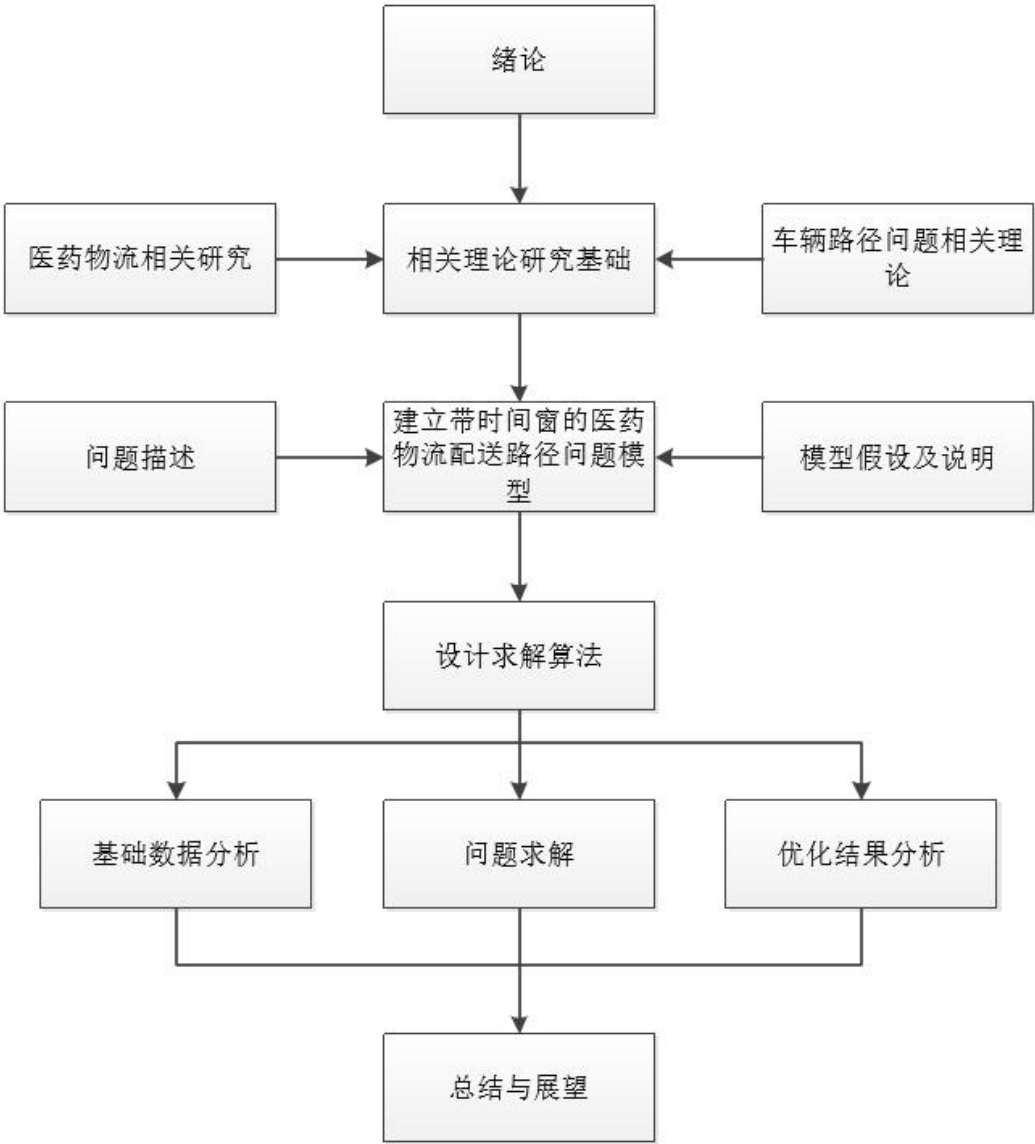


图 1.1 论文研究线路图

本文的主要研究内容可分为以下六个章节。

第一章，绪论。对本文的研究背景和意义做一个较为详细的阐述，对国内外医药物流相关研究以及物流配送线路问题的相关研究现状进行综述，提出自己的研究思路。

第二章，相关理论研究。介绍医药物流和车辆路径问题的基本概念和特点，罗列出车辆路径问题的基本类型以及求解车辆路径问题的常用算法，并对冷藏药品运输的特殊性做一个阐述。

第三章，带有时间窗的医药物流配送路径问题数学模型。分别考虑普通药品和冷藏药品的配送特性，对基于时间窗约束的医药物流配送路径优化问题进行描述，并建立目标函数，最后得出相应的数学模型。

第四章，基于配送路径优化模型的遗传算法。对选择遗传算法的原因进行一个简单地概述，针对两种情况下的医药物流配送模型设计遗传算法，包括编码方式的设计、适应度函数的选择、染色体的选择、染色体的交叉、染色体的变异等。

第五章，算例求解及分析。针对医药物流配送的两种情况分别设计了两个算例，用遗传算法进行求解。在对算例进行求解的过程中，通过实验得到的数据确定了遗传算法的最优种群规模和最大迭代次数。设置好各个参数后，分别求得了两个模型的最优解。

第六章，总结与展望。总结研究内容，指出研究结论，并对未来研究的方向及领域予以展望。

1.3.2 研究方法

文献研究法：通过阅读相关文献了解医药物流的特点，了解现有研究成果，对理论研究现状和实际应用进行充分的了解和掌握。借鉴国内外关于车辆路径问题的研究经验，建立一个合适的配送路径问题模型。

遗传算法：遗传算法是一种智能启发式算法，该算法通过模拟自然进化过程搜索最优解，可以自动获取搜索过程并将搜索空间的信息记录下来，自动调节和控制求解的全过程，然后找到最佳的解决方案。

第2章 相关理论研究

2.1 医药物流的基本理论及其特点

2.1.1 医药物流的概念

如今,药品市场的快速发展带动了整个医药物流行业的发展,医药物流在经济生活中的作用越来越大。

相较于欧美等发达国家,我国的医药物流起步较晚,医药物流体系仍处于成长期,其相关理论方面的研究还不够充分,也没有提出统一的医药物流的概念。目前,业界的学者普遍认为,医药物流并非单纯的进行药品购进、销售、存储或配送,医药物流是指依托一定的物流设备、技术以及完备的物流管理系统,有效整合营销渠道上下游资源,通过优化药品供销配送环节的验收、存储、分拣、配送等作业过程,提高订单处理能力,降低货物分拣差错,缩短库存及配送时间,减少物流成本,提高服务水平和资金使用效益,从而最终实现自动化、信息化和效益化^[40]。

2.1.2 医药物流的特点

医药领域一直是人类努力探求的领域,也深刻影响着我们的生活。鉴于药品的特殊性,企业在进行药品的生产、储存、运输和使用的过程中都有着十分严格的标准。与其他行业不同,国家强制规定医药企业必须通过《药品经营质量管理规范》(简称GSP)认证,以确保药品流通的安全性。医药物流的特点主要有如下几点:

(1) 药品的库存管理要求十分严格。药品是一种种类繁多的特殊商品,很多品种的药品性质不稳定,其生物活性容易受到外界的影响,因此,为了保证药品的质量,保障消费者的安全,必须将按照不同类别划分的药品保存在符合要求的仓库中。根据2015年版《中华人民共和国药典》(简称《中国药典》),药品的贮藏对温度一般有四种类型的要求,分别为常温保存、冷处保存、凉暗处保存以及阴凉处保存,且相对湿度均应保持在45%~75%之间。因此,有的药品必须用冷库冷藏,有的常温保存即可。除了温度之外,许多药品由于容易受到外界环境的影响还必须置于容器中存储,并根据药品自身的特性与外界环境进行不同

程度的隔离处理，包括遮光、密闭、密封、熔封或者严封。

表 2.1 药品的贮藏条件

贮藏条件类型	储存要求	适用药品
常温	0~30℃	外用乳膏类药物等
冷处	2~10℃	疫苗（大部分需储存在2~8℃）、卡莫司汀注射液等
凉暗处	不超过 20℃ 且需避光	头孢他啶、注射用青霉素、维生素 AD 制剂等
阴凉处	不超过 20℃	复方锌布颗粒、复方锌布颗粒等
遮光	用不透光的容器包装，如棕色容器或黑纸包裹的无色透明、半透明容器	易受光线影响而变质药品（如双氧水、普罗碘铵）
密闭	将盛放药品的容器密闭，以防止尘土及异物进入	某些液体药品（如醋酸奥曲肽注射液、中性胰岛素注射液）
密封	将盛放药品的容器密封以防止风化、吸潮、挥发或异物进入	具有强挥发性的药品（如乙醇）、具有吸湿性的药品（如酵母片）、易风化的药品（如酸酸阿托品）等
熔封或者严封	将盛放药物的容器熔封或用适宜的材料严封，以防止空气与水分的侵入并防止污染	直接制备成注射用无菌粉末地原料药，以及需要减压或充氮保存的药品

（2）医药配送管理要求十分严格。药品在配送过程中一般需要满足以下三个要求。第一，对于需要温度控制的药品，医药物流公司必须使用冷藏车或者冷冻车对其进行运输，并且对其进行实时观测，以防药品的药性受到温度的影响，从而使药品变质。第二，由于药品的种类繁多，不同的药品具有不同的性质，为防止药品之间相互影响而造成二次污染，必须将药品进行分类配送，不能将药品混放。第三，医药配送需要高度的安全性。药品与人们的健康息息相关，在配送过程中必须保障药品不受损坏、不受潮、不被污染等，以免造成药品失效。

（3）具有较高程度的应急性。如今，由于物流行业的迅速发展，客户对送

货的时间要求越来越高。医药行业本身就是一个时效性极强的特殊行业，药品的季节性、周期性变换也快，若发生流行病，对治疗药物的需求就会增加，药品流通速度会加快，一些特殊药品甚至会出现断货的情况，因此，药品物流配送的准时性尤为重要。

2.1.3 药品冷链运输的特点

冷链是指为了保持药品、食品等产品的品质，从生产到消费过程中，始终使其处于恒定低温状态的一系列整体冷藏解决方案、专门的物流网络和供应链体系。冷链最先被运用在食品行业，在明朝，有人六月天用冷藏技术快递鲥鱼，经三千里路到长安，鱼身还“带雪寒”。食品产业作为现代冷链物流的起源产业，有着巨大的市场价值，其种类繁多，对冷链有不同温度层的需求，表 2.2 列出了不同温度范围内的冷库类型。

表 2.2 按照温度进行划分的冷库类型

冷库类型	温度范围	适用情况
保鲜库	一般为 0℃~5℃	一般应用于水果以及蔬菜的保鲜
冷藏库	一般为 - 18℃~ - 15℃	一般用于储存肉类以及水产品
低温库	一般为 - 28℃~ - 23℃	一般用于储存冰淇淋等低温产品
速冻库	一般为 - 30℃以下	一般用于速冻肉、速冻水饺、等速冻食物
气调库	一般为 0℃~8℃	一般应用于水果以及蔬菜的保鲜,且气调库的保鲜时间比保鲜库的保鲜时间更长

同样的，医药行业也对冷链有不同温度层的需求。除了前文提到过的需要在冷处保存的药品之外，还有许多特殊的药品需要在更低的温度下进行保存，比如新鲜冰冻血浆必须保存在 - 30℃ 以下，低温冷冻红细胞必须保存在 - 65℃ 以下等。但是，在冷链运输方面，药品的运输较之于食物的运输更加复杂，主要表现在以下两个方面。

(1) 药品冷链运输的操作难度大。冷藏冷冻食品虽然也有其最佳保存温度，但是在一定范围内的温度波动并不会对食品的质量造成影响，仅仅可能是口感上的微小差异。所以相对于药品冷链运输来说，食品冷链运输的容错性更高，其操作难度也更低。以疫苗为例，大部分疫苗需要置于 $2^{\circ}\text{C}\sim 8^{\circ}\text{C}$ 的环境下进行保存，这主要是因为经过多次试验证明在此温度内保存，疫苗效力比较稳定。如果温度升高，疫苗的有效成分会加速分解，效力也就随之降低。同样的，如果温度降低也会使效力不可逆的降低，且 $2^{\circ}\text{C}\sim 8^{\circ}\text{C}$ 这个温度区间间隔较小，十分接近于冰点，稍有不慎则会出现“超温”或者“低温”的情况，这无疑增大了运输难度，对操作人员和冷藏车设备都具有十分严格的要求。而冷藏冷冻食品虽然也有其最佳保存温度，但是在一定范围内的温度波动并不会对食品的质量造成影响，仅仅可能是口感上的微小差异。所以相对于药品冷链运输来说，食品冷链运输的容错性更高，其操作难度也更低。

(2) 药品的验收困难。冷藏冷冻食物的验收环节相对来说较简单，以冷冻肉为例，验收时主要是观察肉的外表、肉味是否正常，是否按标准部位分割，检查外包装有无破损，是否有生产日期。冷藏、冷冻药品到货时，必须对冷藏车、车载冷藏箱或保温箱的温度进行检查，并对运输过程和货物到达时的温度记录进行检查和保存。药品在进行验收时，必须明确不同药物的验收时间，对每次到货的药品都必须进行逐批抽样验收，此外，整个验收过程必须在规定的验收时间内完成，验收人员应逐一检查并核对药品的外观，包装，标签和使用说明，对于不符合验收标注的药品应当拒收，并报质量管理部门处理。由此可见，冷藏冷冻药品的验收环节十分严格。

2.2 车辆路径问题的定义和研究

2.2.1 车辆路径问题的定义

医药物流配送路径问题本质上是车辆路径问题，车辆路径问题（VRP）是运筹学里的一个重要问题，它是指一定数量的客户，各自有不同数量的货物需求，配送中心向这些客户提供货物，由一个车队负责运送货物，组织适当的行车路线，目标是使得客户的需求得到满足，并能在满足一定的约束条件（如时间约束、车辆载重约束、可运载品种约束等）下，达到诸如客户满意度最大、耗费时间最少、碳排放量最少、成本最小等目的。

车辆路径问题是一类在现实生活中被应用得十分广泛的优化调度问题,例如在食品配送方面,配送员为了保持食材的新鲜,要用最短的时间将食品运送到不同客户处;在危险品回收方面,危险品运送车的行驶路线必须在一定程度上加以限制,从而保障运输物品、危险品运送相关人员以及运输过程中车辆经过的道路周围居民、设施、周边环境的安全;在交通运输方面,公交车的路线制定需要参考沿线客流及道路状况,从而方便该地居民的出行。

2.2.2 车辆路径问题的分类

在车辆路径问题的实际研究中,研究人员倾向于根据不同的研究需求对其进行分类。以下是不同角度下几种常见的 VRP 分类。

(1) 根据配送车辆完成配送任务后是否必须返回配送中心以及返回的形式,可将问题分为闭合式和开放式两大类。若车辆完成运输任务之后必须返回配送中心,则称该问题为闭合式车辆路径问题;若不要求车辆完成任务后返回配送中心,则称该问题为开放式车辆路径问题。

(2) 根据配送中心数量,可将问题分为单中心问题和多中心问题。单中心问题指一个配送系统仅有一个配送中心;多中心问题指一个配送系统有两个或两个以上的配送中心。

(3) 根据配送车辆的车型,可将问题分为单车型问题和多车型问题。在单车型问题中,配送车辆的型号只有一种;在多车型问题中,配送车辆的型号有多种。

(4) 根据信息是否确定,可将问题分为静态问题和动态问题。静态问题指所有与配送相关的信息是已知的,即客户的需求信息以及位置信息、运送车辆信息、路况信息都是事先确定且不会随着时间的变化而变化;动态问题指所有与配送相关的信息是不确定的,且会发生动态的变化。

(5) 根据优化目标的个数,可将问题分为单目标问题和多目标问题。单目标车辆路径问题是指车辆路径问题的目标只有一个;多目标车辆路径问题是指车辆路径问题的目标有多个,必须同时对其进行优化。

(6) 根据车辆路径问题所包含的约束条件,可将问题分为带装载能力的 VRP (即 CVRP)、带路程长度的 VRP (DCVRP)、带时间窗的 VRP (即 VRPTW) 等问题。CVRP 是 VRP 中最基本的类型,该类问题对车辆有装载限制,即车辆单次配送的货物量不能超过车辆的最大容量值;在 DCVRP 中,既对车辆装载量

有限制，又对车辆行驶的路程长度有限制；VRPTW 除了规定车辆有装载能力的限制，而且规定车辆必须在相应的时间窗内到达客户点并对客户进行服务。

2.3 求解车辆路径问题的常用算法

国内外的研究者们将求解 VRP 的方法分为两大类，一类为精确算法，一类为启发式算法。

2.3.1 精确算法

精确算法的发展历史十分的悠久，其最大的优点就是能够找到所求问题的全局最优解，但是求解规模较大的问题时，其计算量会变得很大，从而出现求解困难的现象。鉴于此，精确算法一般在规模较小的问题中才能发挥它的优势。常见的精确算法有动态规划法、分支定界法等。

(1) 动态规划法通常被用于求解某种最优性质的问题。该方法的基本思想是将原始问题分解成若干个子问题，先求解子问题，再通过这些子问题的解得到原问题的解。

(2) 分支定界法是一种求解整数规划问题的最常用算法。分支是将一组解分为几组子解，定界是建立这些子组解的目标函数的边界。该算法将原始问题分解，产生一组子问题，如果有子组的解超过了边界，就将这些子组舍弃（剪枝），其余的子组则继续分解，直到找出可行解为止。

2.3.2 启发式算法

在求解大规模问题时，精确算法由于无法避免指数爆炸问题，从而使问题的求解受到限制。由此，学者们将研究重点偏向于更为高效的启发式算法。启发式算法分为经典启发式算法和现代启发式算法两大类。

常见的经典启发式算法有节约里程法、扫描法等。

(1) 节约里程法是用来解决运输车辆数目不确定问题的启发式算法。用节约里程法解决 VRP 时，依次将 VRP 中的两个回路合并成一个回路，每次最大程度地减小合并后的总运输距离，直到达到一辆车的装载极限，再进行下一辆车的优化。

(2) 扫描法的特点是先计算出要访问的节点的极坐标，并根据角度的大小按升序对它们进行排序，然后在满足可行性条件的前提下依次将节点归并到不同

的子路径中，直到达到一辆配送车辆的容量。重复执行这些步骤，直到所有节点都被安排为止。

常见的现代启发式算法有遗传算法、蚁群算法、人工蜂群算法等。

(1) 遗传算法的背景是达尔文的进化论，算法的求解就是一个不停地繁衍、遗传、淘汰、进化的过程。该算法在进行搜索的过程中可以自动获取并记录相关搜索空间的知识，自动的调节和控制整个寻求过程，进而求得问题的最优解。

(2) 蚁群算法是一种基于种群的模拟进化算法。蚂蚁在觅食时，会在路径留下一叫信息素的分泌物，蚂蚁们通过这种信息素交流觅食信息，从而快速找到目标。蚁群算法的运行机制就是通过模拟蚂蚁间信息素的交流来找到 VRP 的最优解。

(3) 人工蜂群算法通过模仿蜜蜂觅食的过程，将被优化的变量比喻成蜜源，将蜂群分为两大类，一类是雇佣蜂，一类是非雇佣蜂，非雇佣蜂又分为跟随蜂和侦查蜂。首先雇佣蜂前去蜜源进行探蜜，随后跳摇摆舞，通过摇摆舞的持续时间等来表现食物源的收益率，跟随蜂根据收益率高低来选择蜜源。侦察蜂的任务是在蜂房附近随机寻找新的蜂蜜来源并对其进行记录，从而寻找从蜂房到蜜源的最佳路线。

2.4 本章小结

本章首先介绍了医药物流的概念，然后对医药物流的特点以及冷链药品的运输特点进行说明。接着，概述了车辆路径问题的含义、以及常见的拓展类型，最后介绍了求解车辆路径问题的常用算法，为下面具体的应用做铺垫。

第3章 带有时间窗的医药物流配送路径问题数学模型

3.1 普通药品的物流配送问题

3.1.1 普通药品配送问题描述

假设某地一医药配送中心 O 向 n 家合作医院进行日常的普通药品配送, $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ 表示各个节点的集合, $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 表示医院所在点的集合, 0 表示医药配送中心。每家医院的药品需求量为 $q_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。该配送中心一共有 l 辆可提供配送的医药配送车, 每一辆配送车运输货物的最大载货量是相同的, 均为 Q 。车辆在运输药品时经过的每一段路程都会产生运输成本。在时间窗方面, 由于药品有救治的特殊性, 对时间要求较高, 所以本文采用时间窗为硬时间窗, 硬时间窗对车辆配送服务的最早开始时间和最晚开始时间均有明确的规定, 如果车辆到达需求点的时间早于服务的最早开始时间, 则车辆需要等待, 而如果车辆的到达时间晚于服务的最晚开始时间, 则服务就会受到客户的投诉, 所以一定要保证车辆在规定的时间范围内到达并进行客户服务。综上, 配送中心必须满足各个合作医院的需求以及在各个合作医院所规定的时间段内完成药品送达的任务, 并且在此基础上使得配送药品所产生的各种成本最小。

为了更好地将问题抽象成数学模型, 本文对该医药配送中心的配送问题做出以下的假设:

- (1) 运输车辆始终保持匀速行驶;
- (2) 车辆的运输费用只与行驶里程有关, 且与行驶里程呈线性正相关关系;
- (3) 所有配送车辆的类型一致, 即配送车辆的载重负荷均相等;
- (4) 本文研究的问题为静态问题;
- (5) 车辆配送费用主要来自于固定费用、运输费用, 即其它损耗费用忽略不计。

此外, 带有时间窗的普通药品物流配送问题还需要满足以下约束条件:

- (1) 每一辆配送车均从医药配送中心出发, 且在完成药品的配送任务后需返回到该配送中心;
- (2) 每辆配送车的载货量不能超过其最大载重量;
- (3) 一家医院的服务只能由一辆车完成;
- (4) 一辆车可以服务多家医院, 但是对每家医院最多只能服务一次;

(5) 每家医院只在时间窗 $[ET_i, LT_i]$ 内接受服务, 若配送车辆到达医院 i 的时间早于 ET_i , 则必须等待到 ET_i 才能开始服务。若配送车辆到达医院 i 的时间晚于 LT_i , 则医院可以拒收货物。

该问题中需要用到的参数以及相关变量定义如下:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{配送车辆 } k \text{ 从节点 } i \text{ 行驶到节点 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{医院 } i \text{ 的配送任务由车辆 } k \text{ 完成} \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$: 整个配送网络中的所有集合;

$N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$: 各家医院所在点的集合;

$K = \{1, 2, 3, \dots, l\}$: 可供配送的车辆的集合;

a : 单辆配送车的固定成本;

p : 单位行驶里程内车辆所产生的运输成本;

d_{ij} : 表示医院 i 到医院 j 的距离;

q_i : 表示医院 i 的货物需求量;

ET_i : 表示医院 i 能接受的最早服务时间;

LT_i : 表示医院 i 能接受的最晚服务时间;

a_{ik} : 表示车辆 k 在医院 i 开始服务的时间;

s_{ik} : 表示车辆 k 为医院 i 服务的时间;

t_{ij} : 表示从医院 i 行驶到医院 j 所需要花的时间;

M : 表示一个正无穷大的数。

3.1.2 普通药品配送成本分析

(1) 车辆的固定成本

固定成本是指配送中心派出车辆完成一次配送任务时的固定支出, 主要包括配送员的工资以及车辆的固定损耗费用, 这个部分的成本仅和所派车辆的数目有关。本文用 Z_1 表示固定成本, 用 a 表示单辆配送车的固定成本, 则所有配送车辆完成一次配送任务所需要花费的固定成本为:

$$Z_1 = a \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{0,jk} \quad (3.1)$$

(2) 车辆配送过程中的运输成本

车辆在运输方面所消耗的成本主要包括油耗成本和轮胎损耗成本,在运输途中,可将车辆所消耗的成本近似地看成与车辆行驶里程呈正相关。本文用 Z_2 表示运输成本,用 p 表示配送车辆每行驶一公里所需要消耗的运输费用,则车辆配送过程中的运输成本为:

$$Z_2 = p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} d_{ij} \quad (3.2)$$

3.1.3 普通药品物流配送模型的建立

综合上文,本文的问题可以用如下模型进行描述:

$$\min Z = a \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{0jk} + p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} d_{ij} \quad (3.3)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n q_i y_{ik} \leq Q, k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{k=1}^l y_{ik} = 1, i \in N \quad (3.5)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} = y_{jk}, j \in N, k \in K \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijk} = y_{ik}, i \in N, k \in K \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1, k \in K \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = 1, k \in K \quad (3.9)$$

$$a_{ik} + s_{ik} + t_{ij} \leq a_{jk} + (1 - x_{ijk})M, i \in N, j \in N, k \in K \quad (3.10)$$

$$ET_i \leq a_{ik} \leq LT_i, i \in N \quad (3.11)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, i \in V, j \in V, k \in K \quad (3.12)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, i \in N, k \in K \quad (3.13)$$

公式(3.3)为目标函数公式,目标是使运输药物所产生的成本最小;公式(3.4)为载重约束,表示每一辆车的载重量不能超过其最大的容量;公式(3.5)表示每一家医院只能由一辆车提供服务;公式(3.6)、(3.7)表示对于任一家医院,只允许某一辆车到达一次和出发一次;公式(3.8)、(3.9)表示配送车辆从医药配送中心出发,且为指定医院完成相应的配送任务之后必须返回配送中心;公式(3.10)表示医院 j 接受服务的时间一定比医院 i 接受服务的时间晚;公式(3.11)表示医院只在一定的时间段内接受服务;公式(3.12)、(3.13)为变量约束。

3.2 冷链药品的物流配送问题

冷链药品是指对药品贮藏、运输有冷藏、冷冻等温度要求的药品,常见的冷链药品有血液制品、生物制品等,这些药品的有效期通常较短且性质很不稳定,容易受到温度的影响,且在配送过程中,药品的颠簸以及气压波动等因素也会增加冷链药品的变质速率,从而影响冷链药品的药效。本节针对冷链药品配送的车辆路径决策问题,考虑冷链药品的运输特性,建立了一个多目标车辆路径问题模型。

3.2.1 冷链药品配送问题描述

假设某地一医药配送中心定期向 n 家医院供应冷链药品,配送中心根据各医院的药品需求量用冷藏车进行冷链药品的配送。由于冷链药品的质量关系到救治效果,所以冷链药品配送模型的第一目标是使冷链药品的质量最高。其次,由于受到人力、物力和财力的限制,也需要适度考虑成本,所以该问题的第二目标为运输成本最小。 $K' = \{1, 2, 3, \dots, l\}$ 表示可供配送的冷藏车辆的集合。 $V' = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ 表示各个节点的集合,其中, $N' = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 表示冷链药品需求点所在的集合,0表示配送中心。由于冷链药品的质量和运输时间有关,为了使冷链药品尽快送到各个医院,本文把该问题的时间窗设置为 $[0, LT_i]$,该时间窗表示到达各个需求点 i 的最晚时间不能超过其规定时间 LT_i 。冷链药品配送问题模型中的其他参数符号依旧沿用普通药品配送问题模型的参数符号。

本文对该医药配送中心的配送问题做出以下的假设:

- (1) 运输车辆始终保持匀速行驶;
- (2) 配送时冷链药品的质量随着时间的增加呈指数性下降;

(3) 冷藏车辆的运输费用只与行驶里程有关，且与行驶里程呈线性正相关关系；

(4) 配送中心的冷藏配送车辆类型一致，即配送车辆的载重负荷相等；

(5) 本文研究的问题为静态问题；

(6) 车辆配送费用主要来自于固定费用、运输费用以及能耗费用，即其他损耗费用忽略不计。

此外，带有时间窗的冷链医药物流配送问题还需要满足以下约束条件：

(1) 每一辆配送车辆均从配送中心出发，待配送完成后需返回到该配送中心；

(2) 每辆配送车的载货量不能超过其最大载重量；

(3) 一家医院的服务只能由一辆车完成；

(4) 一辆车可以服务多家医院，但是对每家医院最多只能服务一次；

(5) 每家医院能接受的的最晚服务时间为 LT_i 。

该问题中需要用到的参数定义如下：

c_1 ：单位运输时间内车辆所产生的能耗成本；

c_2 ：单位卸货时间内车辆所产生的能耗成本；

3.2.2 冷链药品质量函数的构建

由于冷藏药品的质量直接影响救治效果，因此在进行冷链药品配送时，不仅要满足各个医院对冷链药品数量的需求，也应该尽量提升冷链药品的质量。由于实际配送过程中，造成冷链药品变质速率加快的因素较为复杂，为了简化研究，本文借鉴易变质产品随时间呈指数性变质的假设^[41]，构造冷链药品质量随时间的变化函数：

$$F = fe^{-\alpha b_{ik}} \quad (3.14)$$

式 (3.14) 中， F 表示冷链药品的质量， f 表示配送中心待配送的冷链药品的质量， α 表示冷链药品的变质速率， α 的取值越大，冷链药品的变质速度也就越快， b_{ik} 表示车辆 k 由配送中心出发至医院 i 并对医院 i 进行卸货服务的总时间。本文假设冷链药品的最高质量为 1，冷链药品完全变质后的质量为 0，即冷链药品的质量 F 取值介于 0 到 1 之间。

基于式 (3.14)，本文构造所有医院接收冷链药品的平均质量函数：

$$F_r = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l q_i f e^{-\alpha b_{ik}} y_{ik}}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (3.15)$$

3.2.3 冷链药品配送成本分析

(1) 车辆的固定成本

与普通药品配送情况一样,完成一次冷链药品的配送任务也需要固定的支出,因此所有配送车辆完成一次配送任务所需要花费的固定成本为:

$$Z_1 = a \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{0jk} \quad (3.16)$$

(2) 车辆配送过程中的运输成本

配送冷链药品的运输成本为:

$$Z_2 = p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} d_{ij} \quad (3.17)$$

(3) 车辆配送过程中的能耗成本

由于冷藏药品必须保存在一定的冷藏温度环境中,如果在运输过程中出现任何超温的情况都会导致药品的损失,因此在配送的整个过程中都必须保证药品在规定的低温环境里。在车辆配送过程中由于制冷而产生的能源消耗成本称为能耗成本,本文主要研究两个阶段的能耗成本,第一个阶段为冷藏车辆的运输阶段,第二阶段为卸货阶段,能耗成本主要和制冷系统的能耗量有关系。由于车辆在运输过程中,车体的内外环境相对稳定,因此可以忽略其他因素对制冷能耗成本的影响,将车辆的能耗成本和时间看成正相关关系。冷藏车在到达需求点进行卸货工作时,车厢门只需要打开一次即可完成配送服务,则装卸阶段的能耗成本也可近似地看成与时间呈正相关。本文用 Z_3 表示能耗成本,则车辆配送过程中的能耗成本为:

$$Z_3 = c_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} t_{ij} + c_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} s_{ik} \quad (3.18)$$

3.2.4 冷链药品物流配送模型建立

该问题可用如下模型进行描述:

$$\text{Max } F_r = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l q_i f e^{-ab_{ik}} y_{ik}}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (3.19)$$

$$\min Z = a \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{0jk} + p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} d_{ij} + c_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} t_{ij} + c_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} s_{ik} \quad (3.20)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n q_i y_{ik} \leq Q, k \in K' \quad (3.21)$$

$$\sum_{k=1}^l y_{ik} = 1, i \in N' \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} = y_{jk}, j \in N', k \in K' \quad (3.23)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijk} = y_{ik}, i \in N', k \in K' \quad (3.24)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1, k \in K' \quad (3.25)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = 1, k \in K' \quad (3.26)$$

$$a_{jk} = \sum_{i=0}^n (a_{ik} + s_{ik} + t_{ij}) x_{ijk}, j \in N', k \in K' \quad (3.27)$$

$$0 \leq a_{ik} \leq LT_i, i \in N' \quad (3.28)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, i \in V', j \in V', k \in K' \quad (3.29)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, i \in N', k \in K' \quad (3.30)$$

公式 (3.19) 为目标函数，目标是使运送车辆将冷藏药品运送到各需求点的平均质量最大；公式 (3.20) 为目标函数，目标是使运输冷藏药品所产生的成本最小；(3.21) 为载重约束，表示每一辆车的载重量不能超过其最大的容量；公式 (3.22) 表示对于每一个需求点，都有一辆运输车为其运送药品；公式 (3.23)、(3.24) 表示对于任一需求点，只允许某一辆车到达一次和出发一次；公式 (3.25)、

(3.26) 表示配送车辆从配送中心出发, 且为指定医院完成相应的配送任务之后必须返回配送中心; 公式 (3.27) 表示运送车辆 k 从需求点 i 到需求点 j 的时间关系; 公式 (3.28) 表示车辆的到达时间不能超过节点的最晚需求时间; 公式 (3.29)、(3.30) 为变量约束。

3.2.5 目标函数的处理

冷链药品的物流配送问题为多目标问题, 多目标问题的求解有许多的方法, 本文采用多目标优化转化为单一目标优化的多目标问题处理方式。具体的处理步骤如下:

(1) 本文求解的两个目标方向不一致, 一个求解其最大值, 一个求解其最小值, 由于药品质量的值介于 0 到 1 之间, 为了使两个目标相匹配, 本文将式 (3.19) 最大化冷链药品质量转化为式 (3.31) 最小化冷链药品的变质程度。

$$\text{Min } N_r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l q_i f e^{-\alpha b_{ik}} y_{ik}}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (3.31)$$

(2) 两个目标值的数量级相差成千上万倍, 为了避免两个目标由于量纲不同对结果造成影响, 本文引入敏感系数 λ 来增加冷链药品质量目标在总目标中的比重。

(3) 考虑到本文的问题为药品配送问题, 在该问题中, 药品的质量在救治情况下起着至关重要的作用, 冷链药品的质量为本文主要考虑的目标, 所以, 本文引入权重系数 ω_1 和 ω_2 , 其中, ω_1 表示药品质量的权重, ω_2 表示配送成本的权重。这两个权重系数的数学关系为: ω_1 和 ω_2 均大于零; ω_1 与 ω_2 的和为 1; ω_1 的值比 ω_2 大。

基于上述操作, 本文得到如下单目标函数:

$$\begin{aligned} \min NZ = & \omega_1 \left(\lambda \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l q_i f e^{-\alpha b_{ik}} y_{ik}}{\sum_{i=1}^n q_i} \right) \right) + \omega_2 \left(a \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{0jk} + p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} d_{ij} + c_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} t_{ij} \right. \\ & \left. + c_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijk} s_{ik} \right) \end{aligned} \quad (3.32)$$

3.3 本章小结

本章针对不同种类药品的配送问题,分别建立普通药品的配送模型和冷链药品的配送模型,在建立普通药品配送模型时,考虑最小化成本目标。考虑冷链药品配送问题时,不仅考虑成本,而且还需重点考虑药品的质量,并将模型的时间窗设置为单边硬时间窗,以此突出时间的紧迫性。

第4章 基于配送路径优化模型的遗传算法

4.1 选择遗传算法的原因

本文需要求解一个单目标物流配送问题和一个双目标物流配送问题,这两个问题均属于复杂的组合优化问题,而遗传算法非常适用于处理一些复杂的、非线性的问题。与其他优化方法相比,遗传算法有如下优点:首先,遗传算法是群体寻优,不是单点搜索,降低了陷入局部最优的风险;其次,遗传算法不需其他推导和附属信息,通过确定适应度函数来选择优良种群,因而对问题的依赖性较小,鲁棒性高;最后,遗传算法对所求解的优化问题没有太多的数学要求,由于它的进化特性,搜索过程中不需要问题的内在性质,对于任意形式的目标函数和约束,无论是线性的还是非线性的,离散的还是连续的都可处理。

综上所述,本文选择遗传算法来求解医药物流配送问题。

4.2 遗传算法概述

遗传算法(Genetic Algorithm),简称 GA,是启发式算法中很经典的一种算法,最早是由 John Holland 提出的。它受到自然界和生物界的启迪,通过模拟大自然中种群在选择压力下的演化来得到问题的一个近似解。遗传算法将需要解决的问题里的参数进行特定的编码,即基因,若干个基因可构成一条染色体。在遗传算法中,我们需要对染色体进行多次的选择、交叉、变异,从而产生新的、更优良的个体。

生物遗传学中的名词在遗传算法里的解释如下。

- (1) 个体:表示所求问题的解。
- (2) 种群:种群是由个体所构成的集合,解的个数即为种群的规模。
- (3) 基因:基因在生物学中被定义为储存遗传信息的遗传单位,可以用来表示个体的特征。在遗传算法中,基因对应的是解的编码中的每一个元素。
- (4) 染色体:在生物学中,染色体是遗传物质的载体,一条染色体上有许多的基因。在用遗传算法求解实际的算例时,染色体对应的是问题的解的编码,在本文,一条染色体代表的是医药物流配送问题的一组可行解。
- (5) 适应度:在生物界中,适应性越强的个体,其存活率越高。在遗传算法中,用一个函数或者一个给定的值来表示适应度,适应度是用于区分群体中个

体好坏的标准。

(6) 适者生存：目标值比较大的解被选择的可能性相对也较大。

(7) 选择：选择是将种群中较优秀的个体组成新一代种群的操作，由于适应度越高的个体越优秀，从而适应度越高的个体更有可能被选中并遗传给下一代，反之，适应度越低的个体越容易被淘汰。

(8) 交叉：指交换两个染色体的部分基因片段以产生两个新染色体的过程。

(9) 变异：指染色体上的一个或多个基因发生变化形成新的染色体的过程。

遗传算法求解过程所需要用到的运行参数解释如下：

(1) 交叉率：在遗传算法中，交叉率是指两个染色体进行交叉的概率。交叉率一般较高，以使各代染色体充分交叉，从而增加获得全局最优解的可能性。但交叉率也不能太高，否则会使得算法变成随机算法，失去意义。

(2) 变异率：变异率是指染色体中特定基因产生变异的概率。变异率一般取值较小，因为太大的变异率可能会破坏某些优良个体。

(3) 种群规模：任何一代种群中的个体总数称为种群规模。种群规模的取值会对算法的运算效率和全局搜索能力造成影响，过大的种群规模会增加计算负担，而过小的种群规模则可能会降低种群的多样性。

4.3 遗传算法设计

4.3.1 编码方式设计

实现遗传算法的第一步就是明确对求解问题的编码方法。对于函数优化问题，通常有两种编码方法，一种是使用二进制编码，另一种是使用实数编码。二进制编码是遗传算法中最常用的一种编码方式，编码符号由二进制符号 0 和 1 组成，这种编码方式使得编码、解码操作简单易行，可用于很多的数值计算和非数值的优化问题上。但是该种编码方式比较难以理解，且需要解码，所以不太适用于描述车辆路径问题的特征。为了使解的形式更加容易让人理解，本文用实数来进行编码。

参考前文在建立药品配送问题模型时所涉及到的参数，本文将配送中心的编号设置为 0，将各医院的编号分别设置为 1,2,3,..., n 。这样就可以通过染色体的基因排列顺序直接得到路线方案。因为本文设定车辆的出发点和终点均是配送中心，所以在一条染色体上，两个相邻的 0 以及这两个 0 之间的编码组成一条子路

径。

假设某染色体的基因排列顺序为 0-2-7-5-0-1-6-8-3-4-9-0，这组序列表示配送中心派出了两辆车对 9 家医院进行配送服务，第一辆车由配送中心出发，依次经过医院 2、医院 7、医院 5，然后返回配送中心；第二辆车由配送中心行驶至医院 1，然后依次经过医院 6、医院 8、医院 3、医院 4、医院 9，最后返回配送中心。

4.3.2 适应度函数设计

遗传算法的适应度函数是用于判断整个种群中个体的优劣程度的指标，根据所求问题的目标函数来进行评估，个体的适应度越大，则表示它越好，被选择遗传给下一代的几率越大，反之，个体的适应度越小，则表示它越差，被选择遗传给下一代的几率也越小。

由于本文所要求解的两个模型的目标函数值均为最小值，与适应度函数值的变化趋势相反，因此需要将目标函数转换成与适应度值变化方向一致的形式。本文把目标函数的倒数设置为适应度函数，具体设计如下。

(1) 普通药品物流配送问题的适应度函数为：

$$F = \frac{1}{Z} \quad (4.1)$$

(2) 冷链药品物流配送问题的适应度函数为：

$$F = \frac{1}{NZ} \quad (4.2)$$

4.3.3 选择

本文采用锦标赛选择和精英保留相结合的选择策略。在锦标赛选择中，首先从种群中随机地、有放回地选择一定数量的个体，然后在这些个体中选出适应度值最高的一个个体作为生成下一代的亲代。被选择的个体数目越少，运行效率就越高，但是也不能过小，因为过小的规模会导致竞争压力变低，从而可能选到更多适应度不高的个体。

每一代种群都会有适应度高的个体，这些个体成为全局最优的概率会远远大于其他适应度低的个体，由于交叉和变异可能会破坏优良个体的结构，所以本文用精英保留策略来保护适应度高的优良个体。首先，将种群中的个体按照适应度大小进行排序，然后，将适应度最大和适应度第二大的两个个体作为精英个体，

精英个体不需要参与交叉和变异，直接完整地复制到下一代。

4.3.4 交叉

交叉是遗传算法的关键操作，两个个体进行交叉后得到的子代不仅具有亲代的一些特点，而且也有自身的特点。交叉的方法有很多种，如一点交叉、两点交叉、顺序交叉，其中最基本的交叉方法为一点交叉，一点交叉是指在个体的基因串中随机地设置一个交叉点，进行交叉操作时，根据交叉点交换两个亲代个体的基因块（交换的部分是交叉点的后面部分），然后产生两个新的子代个体。两点交叉是指在个体的基因串中随机地设置两个交叉点，在进行两点交叉操作时，两个亲代个体的基因交换部分为这两个交叉点之间的部分。

一点交叉和两点交叉的优点是可以保留基因间的相对位置，但是这两种交叉方法很容易产生非法解，比如通过这种方法进行交叉所产生的子代个体可能会出现基因重复的情况，这在车辆路径问题模型中意味着运输车辆经过了某一个需求点两次，这不符合本文车辆路径问题的约束条件。为了解决这个问题，本文使用顺序交叉方法。

顺序交叉法的第一步是通过上文所述的选择操作选出两条不同的染色体（亲代），然后利用 *rand* 函数生成一个范围在 $[0,1]$ 的随机数，若该数小于交叉率，则意味着这两条染色体可以进行交叉。

确定了两条交叉亲代之后，在亲代 1 上随机选择两个交叉点，然后将两个交叉点之间的基因片段复制到子代染色体的同等位置上，接着，从选取的基因片段的结束位置开始，把亲代二中子代所没有的基因依次添加到子代。

以图 4.1 所选取的长度为 9 的两条亲代染色体为例，亲代 1 上两个箭头所指的位置即为两个交叉点位置。首先将两个交叉点之间的基因片段复制到子代中，然后从亲代 2 的基因 5 开始，检测子代中是否存在该基因。从图中可以看出，子代中并没有基因 5，因此将其添加到子代染色体的第一个位置。同样的，子代中也没有基因 1 和基因 8，于是将它们分别置于子代染色体的第二个和第三个位置。此时，检测位置已经到达染色体末端，下一步需将检测位置移到染色体的第一个位置，即基因 7 所在的位置，基因 7 不在子代中，所以将基因 7 添加到子代的第七个位置。接着，检测基因 4 和基因 6，由于子代中能找到这两个基因，所以跳过这两个基因，检测这两个基因后面的位置。接下来的基因 3 和基因 2 也都没在子代中，所以将基因 3 添加到子代的第 8 个位置，将基因 2 添加到子代的第九个

位置。

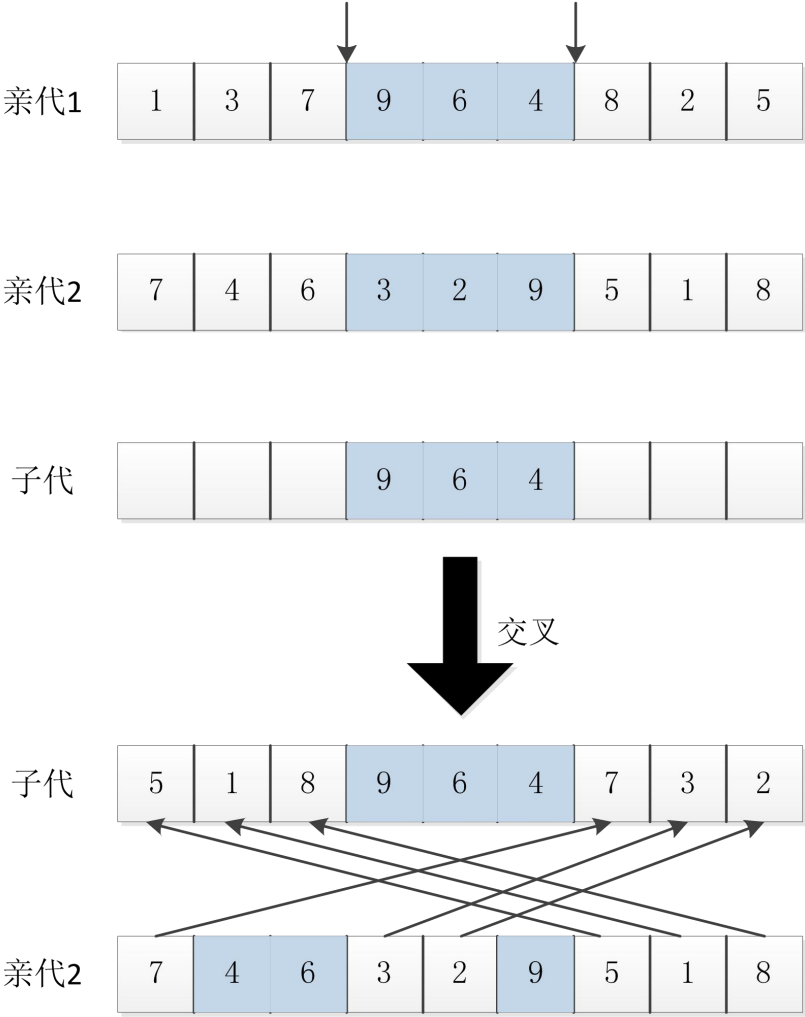


图 4.1 顺序交叉示意图

4.3.5 变异

为了提高种群的多样性、增加算法的局部寻优能力，遗传算法对基因进行变异操作。这个过程是按照一定的变异概率来进行的，变异率的取值通常较小，接近于 0，本文取 0.01。变异的方法有很多，但有的变异方法可能会导致基因在染色体中重复出现，例如位点变异，因此为了防止这种现象出现，本文采用互换变异法。

互换变异法的具体操作步骤是：首先根据变异率对染色体上的基因进行循环遍历，随机产生两个变异位置，然后将这两个位置的基因进行交换。图 4.2 详细的展示了这一过程。

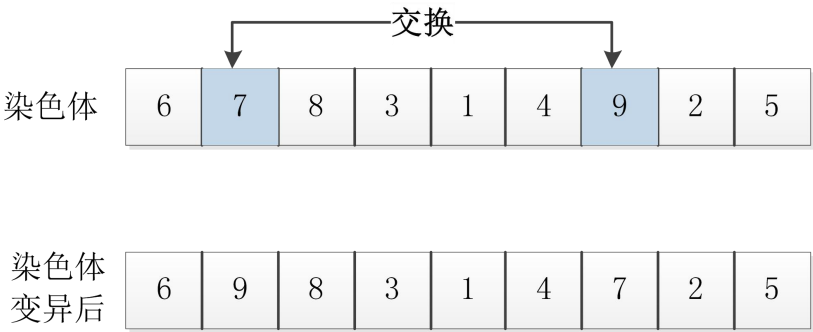


图 4.2 染色体的变异过程

4.3.6 算法的结束条件

遗传算法的结束条件是指算法停止进行循环迭代的条件，当算法的迭代满足停止条件时，算法会停止运算，输出最优解。以下是几种常见的算法结束条件：

- （1）循环到达预设的最大迭代次数；
- （2）最优个体的适应度达到给定的阈值；
- （3）当整个种群中染色体的适应值相同且不再变化时，或者当适应值的范围很小时。

本文在用遗传算法计算 VRP 时，设置最大迭代次数作为算法的结束条件，并分别设置不同的最大迭代次数对两个问题进行实验对比，最终得到最合适的最大迭代次数，具体实验步骤见本文第五章。

4.3.7 算法流程

本文使用遗传算法的算法流程为：

- （1）读入实际问题的原始数据；
- （2）设置问题的参数，如锦标赛规模、精英数、种群规模、最大迭代次数、交叉率、变异率等；
- （3）生成初始种群，令其为当前种群；
- （4）根据适应度函数，计算当前种群中每个个体的适应值；
- （5）根据终止条件判断当前算法是否需要停止运算，若算法已经满足停止进行循环迭代的条件，则输出结果，否则进行下一步；
- （6）采用锦标赛选择和精英保留相结合的选择策略来选择个体；

- (7) 按照设置好的交叉概率在种群中选择个体进行两两配对交叉操作;
- (8) 按照设置好的变异概率在种群中选择个体进行变异操作;
- (9) 返回到判断算法是否终止的步骤, 进行下一个循环, 当算法满足终止条件时, 算法停止运算。

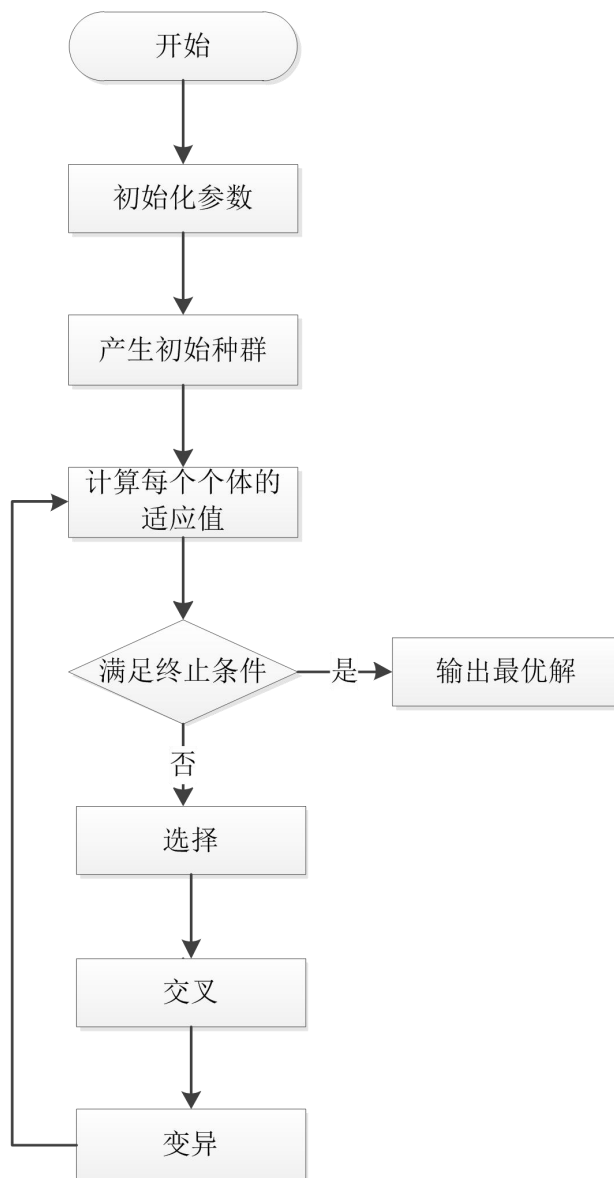


图 4.3 遗传算法的流程

图 4.3 为遗传算法进行问题求解的流程图。

通过上述迭代搜索, 本文获得了种群中最优染色体相应的配送路径, 将其作为最终的优化结果输出, 从而完成了带有时间窗的车辆路径问题的自动寻优过程。

4.4 本章小结

本章通过设计遗传算法来解决医药物流配送问题，遗传算法主要包括编码、设计适应值函数、交叉、变异、设计终止条件等，本章内容为第五章的实例分析提供理论与技术支持。

第 5 章 算例求解及分析

5.1 普通药品的物流配送问题求解

5.1.1 普通药品配送问题的基本数据及参数设定

本节以一个固定的单一配送中心 O 配送普通药品为例, 该医药配送中心为其 23 个合作医院提供药品配送服务。配送中心的编号为 0, 坐标为 (50, 50), 各个合作医院的坐标、药品需求量以及服务时间如表 5.1 所示。

表 5.1 各合作医院的坐标、需求量以及服务时间

医院编号	X 坐标	Y 坐标	需求量 (吨)	服务时间(小时)
1	12	47	0.29	0.2
2	23	6	0.16	0.15
3	47	32	0.21	0.2
4	65	100	0.53	0.5
5	30	109	0.32	0.3
6	16	90	0.37	0.25
7	52	9	0.36	0.5
8	47	112	0.43	0.5
9	110	59	0.15	0.2
10	61	70	0.34	0.3
11	101	66	0.2	0.3
12	34	79	0.3	0.35
13	86	21	0.35	0.4
14	91	102	0.25	0.3
15	77	37	0.52	0.5
16	106	40	0.36	0.3
17	67	25	0.15	0.2
18	70	61	0.1	0.1
19	6	22	0.61	0.5
20	53	86	0.27	0.35
21	97	52	0.36	0.5
22	23	65	0.2	0.2
23	25	27	0.1	0.1

医院和配送中心的空间位置分布如图 5.1 所示，图中的白色圆点表示配送中心，黑点表示各医院。

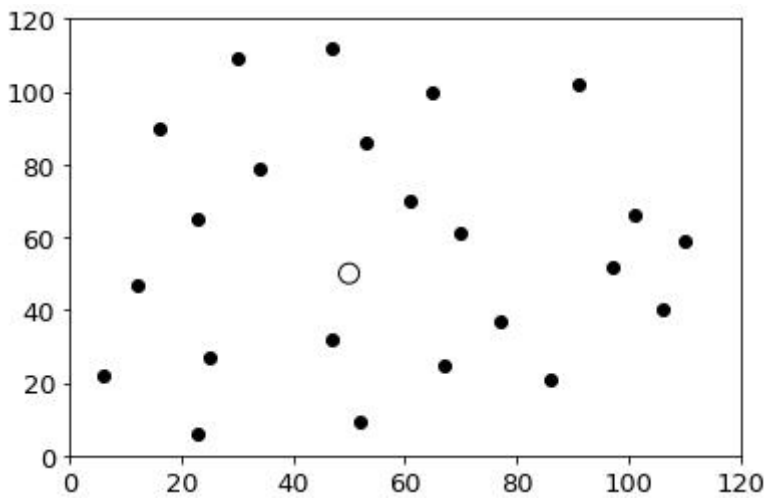


图 5.1 医院和配送中心的空间位置分布图

医药物流配送模型的基本参数如表 5.2 所示。

表 5.2 模型中的参数值

参数符号	含义	参数值	单位
a	单辆配送车辆的固定成本	100	元 / 辆
p	单位行驶里程内车辆所产生的运输成本	1.5	元 / 公里
Q	配送车的最大载重量	3	吨
v	配送车的平均行驶速度	30	千米 / 小时

在日常情况下，各医院根据自身运作情况规定了接收药品的时间窗，配送车辆必须在医院规定的时间窗内到达，否则将进行二次配送，表 5.3 为各医院的具体时间窗要求。

表 5.3 普通药品配送情况下各合作医院的时间窗要求

编号	接受服务的开始时间	接受服务的结束时间
1	1	5
2	2	6
3	0.5	3

续表

4	0.5	3
5	1	4
6	2	7
7	3	6
8	3.5	9
9	2	7
10	3	9
11	3.5	10
12	1.5	9
13	0.5	5
14	1	5
15	1.5	6
16	1.5	7
17	2	6
18	1	9
19	3	9
20	1	6
21	2	9
22	1.5	5
23	0.5	3

5.1.2 种群规模对普通药品算例结果的影响

在利用遗传算法求解车辆路径问题时，种群规模的大小会影响遗传算法的寻优性能，因此，在进行最终求解之前，本文将分别对种群规模大小为 50、100、150、200 的情况用 Eclipse 编写 Java 程序来进行运算分析，算法在每种情况下分别执行 10 次。在求解时，将交叉率设置为 0.9，变异率设置为 0.01，最大迭代次数设置为 3000 代，并计算出不同种群规模下所得到的 10 个数值的平均值，对于平均值来说，平均值越小，那么总配送成本就越低，该方案就越适用。得到的运算结果如表 5.4，表中的数值均保留两位小数。

表 5.4 不同种群规模下的运算结果

种群规模	平均值（元）	平均运算时间（秒）
50	1533.56	3.72
100	1490.39	6.27

续表

150	1446.11	11.41
200	1445.16	19.31

由运算结果可以看出，随着种群规模的增大，算法的平均运算时间也逐渐增大，且增加幅度也越来越大。

从平均值的大小来看，当种群规模为 50 和 100 时，由于种群规模较小导致遗传算法的搜索空间范围也较小，从而使得目标值函数值的平均值较大，当种群规模由 50 增加至 200 时，平均值也逐渐减小。当种群规模为 150 时，目标函数的平均值大小仅比种群规模为 200 时的平均值大小高 0.95，而运行时间却缩短了近一半，因此，考虑到求解时间和求解精度两个因素，本文将种群规模设置为 150。

5.1.3 最大迭代次数对普通药品算例结果的影响

本节分别以 500、1000、1500、2000、2500、3000 作为最大迭代次数来进行实验对比，观察不同迭代次数对目标值的平均值和程序运算时间的影响，从而判断比较合适的最大迭代次数，在求解时，将交叉率设置为 0.9，变异率设置为 0.01，种群规模设置为 150，得到的运算结果如表 5.5 所示。

表 5.5 不同迭代次数下的运算结果

最大迭代次数（单位：次）	平均值（元）	平均运算时间（秒）
500	1635.37	3.09
1000	1493.41	4.70
1500	1479.23	6.43
2000	1447.38	7.51
2500	1451.79	9.29
3000	1446.11	11.41

由表 5.5 的运算结果可以看出，随着最大迭代次数的增大，需要的运算时间也越多。当最大迭代次数为 500 次时，得到的结果最大，说明算法的寻优次数太少，没有找到最优解或者近似最优解。然后将最大迭代次数由 1000 次逐渐增加至 2000 次，算法的平均目标值逐渐降低，最大迭代次数分别为 2000、2500、3000 次时，算法得到的平均目标值相差不大，由此可见，将最大迭代次数设置为 2000 次已经足以保证算法的寻优性能了，再提高最大迭代次数反而会增加运行时间。综上所述，本文将最大迭代次数设置为 2000 次，即算法在种群繁衍 2000 代之后停止运算。

5.1.4 普通药品配送问题实验结果分析

根据所设定的遗传算法的操作参数，即种群规模设置为 150，最大迭代次数设置为 2000 次，交叉率设置为 0.9，变异率设置为 0.01，精英数设置为 2，锦标赛规模设置为 5，本文最终获得普通情况下最佳车辆路径行驶方案，运行程序的结果如下图 5.2 所示。

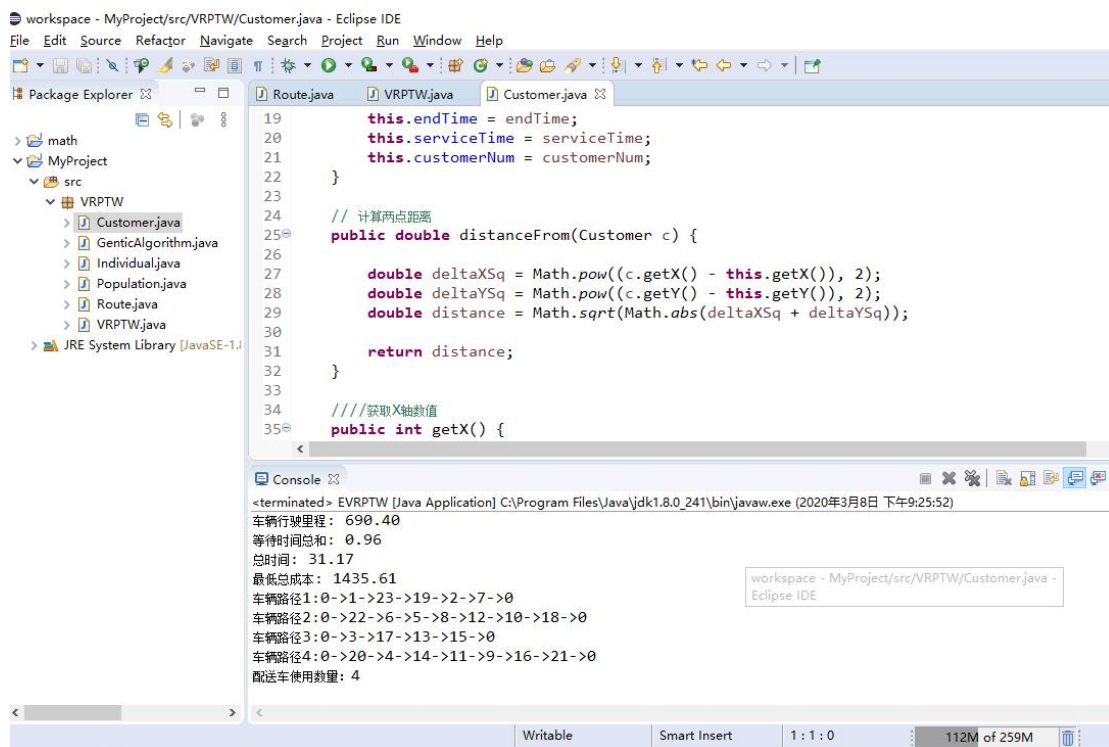


图 5.2 程序运行结果

表 5.6 列出了每条路径的总行驶里程、总成本、总花费时间以及总等待时间。

表 5.6 配送普通药品情况下医药配送车的最优路线情况

车辆编号	配送子路径	行驶里程 (千米)	成本 (元)	花费时间 (小时)	等待时间 (小时)
1	0-1-23-19-2-7-0	175.17	362.76	7.29	0
2	0-22-6-5-8-12-10-18-0	197.19	395.79	9.04	0.47
3	0-3-17-13-15-0	107.18	260.77	5.36	0.48
4	0-20-4-14-11-9-16-21-0	210.86	416.29	9.48	0

配送普通药品情况下的每条子路径的具体配送过程如表 5.7、表 5.8、表 5.9

以及表 5.10 所示。

表中的行驶里程表示上一节点到该节点的行驶路程，行驶时间表示上一节点到该节点的行车时间，到达时间和离开时间分别表示配送车到达该节点的时间和离开该节点的时间，以下计算结果均保留两位小数。

表 5.7 配送普通药品情况下车辆路径 1 的具体配送情况

	客户 1	客户 23	客户 19	客户 2	客户 7	配送中心
行驶里程	38.12	23.85	19.65	23.35	29.15	41.05
行驶时间	1.27	0.80	0.65	0.78	0.97	1.37
到达时间	1.27	2.27	3.02	4.30	5.42	7.29
离开时间	1.47	2.37	3.52	4.45	5.92	

表 5.8 配送普通药品情况下车辆路径 2 的具体配送情况

	客户 22	客户 6	客户 5	客户 8	客户 12	客户 10	客户 18	配送中心
行驶里程	30.89	25.96	23.60	17.26	35.47	28.46	12.73	22.83
行驶时间	1.03	0.87	0.79	0.57	1.18	0.95	0.42	0.76
到达时间	1.03	2.57	3.61	4.48	6.16	7.46	8.18	9.04
离开时间	1.70	2.82	3.91	4.98	6.51	7.76	8.28	

表 5.9 配送普通药品情况下车辆路径 3 的具体配送情况

	客户 3	客户 17	客户 13	客户 15	配送中心
行驶里程	18.25	21.19	19.42	18.36	29.97
行驶时间	0.61	0.71	0.65	0.61	1.00
到达时间	0.61	1.52	2.85	3.86	5.36
离开时间	0.81	2.20	3.25	4.36	

表 5.10 配送普通药品情况下车辆路径 4 的具体配送情况

	客户 20	客户 4	客户 14	客户 11	客户 9	客户 16	客户 21	配送中心
行驶里程	36.12	18.44	26.08	37.36	11.40	19.42	15.00	47.04

续表

行驶时间	1.20	0.61	0.87	1.25	0.38	0.65	0.50	1.57
到达时间	1.20	2.16	3.53	5.08	5.76	6.61	7.41	9.48
离开时间	1.55	2.66	3.83	5.38	5.96	6.91	7.91	

普通药品的配送路径在二维空间的具体表示如下图 5.3 所示，图中的白色圆点表示配送中心，黑点表示各医院。

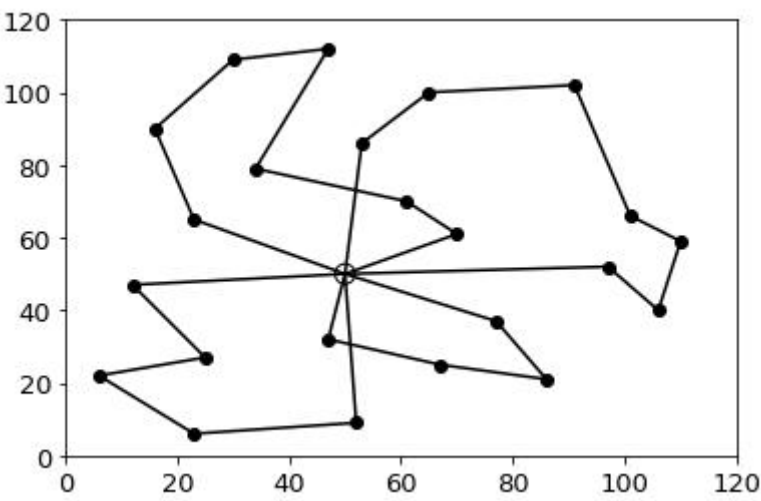


图 5.3 普通药品的配送路径图

5.2 冷链药品的物流配送问题求解

5.2.1 冷链药品配送案例介绍

由于不同种类的冷链药品的保质期、变质速率以及药性均不同，为了使问题更加具体，本文以血液制品的配送为案例来进行问题的说明。

血液是流动在人体内的一种不透明的红色粘稠液体。血液由血浆和血细胞组成，其中血细胞包括红细胞、白细胞、血小板。目前，临床上常用的血液制品有十多种，如红细胞悬液、洗涤红细胞、普通冰冻血浆等。

在日常状态下，各医疗机构可以根据历史用量和未来需要的手术数量来确定血液需求量，并提前将血液需求量告知血站，血站根据医院上报的血液需求定

期地为医院血库补充库存。储存在医院血库的血液和患者的血液必须进行交叉配血试验，待交叉配血实验成功后，才能给患者进行输血。

血液的运输主要依靠冷藏运输车或将血液盛装于血液运输箱内通过飞机、汽车等交通工具进行。汽车运输最灵活，在血液运输中应用最广泛。

大部分血液制品只有较短保质期，比如红细胞悬液和全血在 2~6℃ 的储存条件下仅能保存 35 天。血液的质量会随着时间的增大而下降。在救治新生儿、急性失血伤员以及待输血的伴有心、肺、肝、肾功能障碍的患者时，均应选用高质量血液，因此在运输血液时，应尽量降低血液的损失。

5.2.2 冷链药品配送案例的基本数据及参数设定

本节以一个固定的单一血站 O 配送血液为例，该血站为其 23 家合作医院提供血液配送服务。血站的编号为 0，坐标为 (50,50)。本文在考虑冷链药品配送问题时，更加看重冷链药品的质量，而冷链药品的质量和配送时间相关，因此为了减少配送时间，提高配送效率，本文把时间窗设置为单边硬时间窗，即配送车辆必须在每家医院的最晚接受时间之前将药品送达，且对运输车辆早到达需求点的时间要求没有限制条件，运输药品的车辆越早到达目的地越好，本节采用的时间窗数据为 5.1 节的单边时间窗数据，每家医院的卸货时间也沿用 5.1 节的数据，各医院的需求量、规定时间窗以及服务时间如表 5.11 所示。

表 5.11 配送血液情况下各医院的需求量以及时间窗要求

编号	配送需求 (U)	最晚到达时间	服务时间 (小时)
1	169	5	0.2
2	100	6	0.15
3	139	3	0.2
4	360	3	0.5
5	190	4	0.3
6	193	7	0.25
7	290	6	0.5
8	265	9	0.5
9	100	7	0.2
10	176	9	0.3
11	156	10	0.3
12	179	9	0.35

续表

13	210	5	0.4
14	125	5	0.3
15	360	6	0.5
16	260	7	0.3
17	115	6	0.2
18	92	9	0.1
19	396	9	0.5
20	119	6	0.35
21	210	9	0.5
22	102	5	0.2
23	90	3	0.1

医药物流配送模型的基本参数如表 5.12 所示。

表 5.12 模型中的参数值

参数符号	含义	参数值	单位
a	单辆配送车辆的固定成本	100	元 / 辆
p	单位行驶里程内车辆所产 生的运输成本	1.5	元 / 公里
c_1	单位运输时间内车辆所产 生的能耗成本	5	元 / 小时
c_2	单位卸货时间内车辆所产 生的能耗成本	6	元 / 小时
Q	配送车的最大载重量	1500	U
v	配送车的平均行驶速度	30	千米 / 小时
λ	敏感系数	10000	
α	血液的变质率	0.01	
f	血站的血液质量	0.9	

5.2.3 种群规模对冷链药品算例结果的影响

本节同样对种群规模大小为 50、100、150、200 的情况用 Eclipse 编写 Java 程序来进行运算分析，算法在每种情况下分别执行 10 次。由于本节需要求解的问题为双目标问题，所以在实验过程中比较的目标值为两个目标值加权后相加的值，目标值质量的权重系数为 0.7，目标值成本的权重系数为 0.3。在求解时，依

旧先将交叉率设置为 0.9，变异率设置为 0.01，最大迭代次数设置为 3000 代，得到的运算结果如表 5.13，表中的平均值为程序在不同种群规模情况下运行十次后所得到的结果。平均值以及平均运算时间的数值均保留两位小数。

表 5.13 不同种群规模的运算结果

种群规模	平均值（元）	平均运算时间（秒）
50	1473.77	4.70
100	1457.27	7.76
150	1446.69	13.75
200	1446.14	21.72

由结果可以看出，平均运算时间随着种群规模的增大而增大，且增长速度越来越快。

从平均值来看，当种群规模为 50 时，得到的平均值最大，当种群规模由 50 逐渐增加到 200 时，目标值的平均值呈下降趋势。当种群规模取 150、200 时，目标函数值的平均值没有发生明显改变，因此，从算法的运行效率考虑，种群规模的取值为 150。

5.2.4 最大迭代次数对冷链药品算例结果的影响

本节分别以 500、1000、1500、2000、2500、3000 作为最大迭代次数来进行实验对比，算法在每种情况下分别执行 10 次，比较求得的目标值大小和平均运算时间，本节的目标值取值依旧为两个目标值加权后相加的值，目标值质量的权重系数为 0.7，目标值成本的权重系数为 0.3。在求解时，将交叉率设置为 0.9，变异率设置为 0.01，种群规模设置为 150，运行程序后得到的结果如表 5.14 所示。

表 5.14 不同迭代次数下的运算结果

最大迭代次数（次）	平均值	平均运算时间（秒）
500	1491.71	4.11
1000	1456.03	6.95
1500	1443.79	8.39
2000	1447.13	9.57
2500	1447.86	11.91
3000	1446.69	13.75

由实验结果可以看出，当最大迭代次数为 500 次时，目标值的平均值最大，为 1491.71。将最大迭代次数由 500 次逐渐增加至 1500 次时，目标值也逐渐变小，

当最大迭代次数为 1500 次时，遗传算法得到的平均目标值最优，为 1443.79。继续增大最大迭代次数至 2000 次和 2500 次，所获得的结果与最大迭代次数为 1500 次所获得的结果相差不大，基于运行时间长短的考虑，本节选取的最大迭代次数为 1500 次。

5.2.5 冷链药品配送案例实验结果分析

根据前文，本节在利用遗传算法求解血液物流配送问题时，将种群规模设置为 150，最大迭代次数设置为 1500 次，此外，将交叉率设置为 0.9，变异率设置为 0.01，精英数设置为 2，锦标赛规模设置为 5，将血液质量目标的权重系数 ω_1 设置为 0.7，将成本目标的权重系数 ω_2 设置为 0.3。基于此，本文获得血液配送的最佳车辆路径行驶的方案，运行程序的结果如下图 5.4 所示。

```

160     }
161
162     //在服务时间窗内，服务开始
163     else if(countTime <= route[cityIndex + 1].getEndTime() ){
164
165         countTime += this.route[cityIndex + 1].getServiceTime();
166
167         quantity += 0.9*this.route[cityIndex + 1].getQuantity()
168                 *Math.exp(-0.01*countTime);
169
170         totalDistance += temp;
171     }
172
173 }
174
175

```

```

<terminated> VRPTW (4) [Java Application] C:\Program Files\Java\jdk1.8.0_241\bin\javaw.exe (2020年3月24日 下午2:05:01)
最优目标函数值: 1439.46
血液质量: 0.871
最低总成本: 1788.20
最短路径距离: 747.00
车辆路径1:0->10->20->4->14->18->0
车辆路径2:0->23->2->19->1->0
车辆路径3:0->22->6->5->8->12->0
车辆路径4:0->15->13->16->9->11->21->0
车辆路径5:0->7->3->17->0
配送车使用数量: 5

```

图 5.4 程序运行结果

配送血液时，每条路径的总行驶里程、行驶时间、配送总成本以及花费时间如表 5.15 所示，表中结果均保留两位小数。每条子路径的具体配送过程如表 5.16、表 5.17、表 5.18、表 5.19 以及表 5.20 所示，表格中的血液质量表示客户收到血液时的血液质量。行驶里程表示上一节点到该节点的行驶路程，行驶时间表示上一节点到该节点的行车时间，到达时间和离开时间分别表示到达该节点的时间和

离开该节点的时间，表中血液质量的结果保留三位小数，其他计算结果均保留两位小数。

表 5.15 配送血液时医药配送车的最优路线情况

车辆编号	配送子路径	行驶里程（千米）	成本（元）	花费时间（小时）
1	0-10-20-4-14-18-0	154.12	366.17	6.69
2	0-23-2-19-1-0	142.24	342.77	5.69
3	0-22-6-5-8-12-0	166.30	386.76	7.14
4	0-15-13-16-9-11-21-0	168.33	393.75	7.81
5	0-7-3-17-0	116.01	298.75	4.77

表 5.16 配送血液时车辆路径 1 的具体配送情况

	客户 10	客户 20	客户 4	客户 14	客户 18	血站
行驶里程	22.83	17.89	18.44	26.08	46.07	22.83
行驶时间	0.76	0.60	0.61	0.87	1.54	0.76
到达时间	0.76	1.66	2.62	3.99	5.83	6.69
离开时间	1.06	2.01	3.12	4.29	5.93	
血液质量	0.891	0.882	0.872	0.862	0.848	

表 5.17 配送血液时车辆路径 2 的具体配送情况

	客户 23	客户 2	客户 19	客户 1	血站
行驶里程	33.97	21.1	23.35	25.71	38.12
行驶时间	1.13	0.70	0.78	0.86	1.27
到达时间	1.13	1.94	2.86	4.22	5.69
离开时间	1.23	2.09	3.36	4.42	
血液质量	0.889	0.881	0.870	0.861	

表 5.18 配送血液时车辆路径 3 的具体配送情况

	客户 22	客户 6	客户 5	客户 8	客户 12	血站
行驶里程	30.89	25.96	23.60	17.26	35.47	33.12
行驶时间	1.03	0.87	0.79	0.58	1.18	1.10
到达时间	1.03	2.10	3.13	4.01	5.69	7.14
离开时间	1.23	2.35	3.43	4.51	6.04	
血液质量	0.889	0.879	0.870	0.860	0.847	

表 5.19 配送血液时车辆路径 4 的具体配送情况

	客户 15	客户 13	客户 16	客户 9	客户 11	客户 21	血站
行驶里程	29.97	18.36	27.59	19.42	11.40	14.56	47.04
行驶时间	1.00	0.61	0.92	0.65	0.38	0.49	1.57
到达时间	1.00	2.11	3.43	4.38	4.96	5.74	7.81
离开时间	1.50	2.51	3.73	4.58	5.26	6.24	
血液质量	0.887	0.878	0.867	0.860	0.854	0.846	

表 5.20 配送血液时车辆路径 5 的具体配送情况

	客户 7	客户 3	客户 17	血站
行驶里程	41.05	23.54	21.19	30.23
行驶时间	1.37	0.78	0.71	1.01
到达时间	1.37	2.65	3.56	4.77
离开时间	1.87	2.85	3.76	
血液质量	0.883	0.875	0.867	

血液的配送路径在二维空间的具体表示如下图 5.5 所示，图中的白色圆点表示血站，黑点表示各医院。

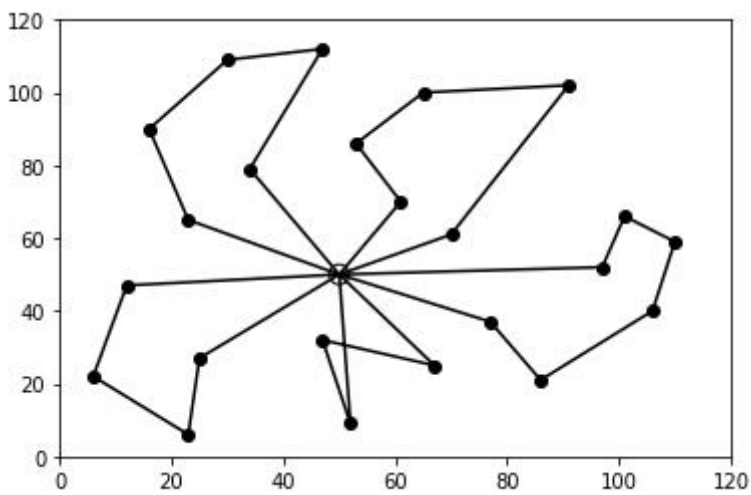


图 5.5 血液的配送路径图

若继续增大血液质量的权重，让其取值 0.9，并设置配送成本的权重为 0.1，得到的血液新鲜度值为 0.877，总成本为 2395.21 元，冷藏车的使用数量为 7 辆。相比将血液质量权重设置为 0.7，将成本权重设置为 0.3 时的优化结果，血液的新鲜度增加了 0.6%，而成本增加了 607.01 元，冷藏车的使用数量增加了两辆。

由此可以看出，通过调整目标函数的权重系数可以优化计算结果，使调剂方案更符合决策者的期望。更改权重之后的运行结果图如下图 5.6 所示。

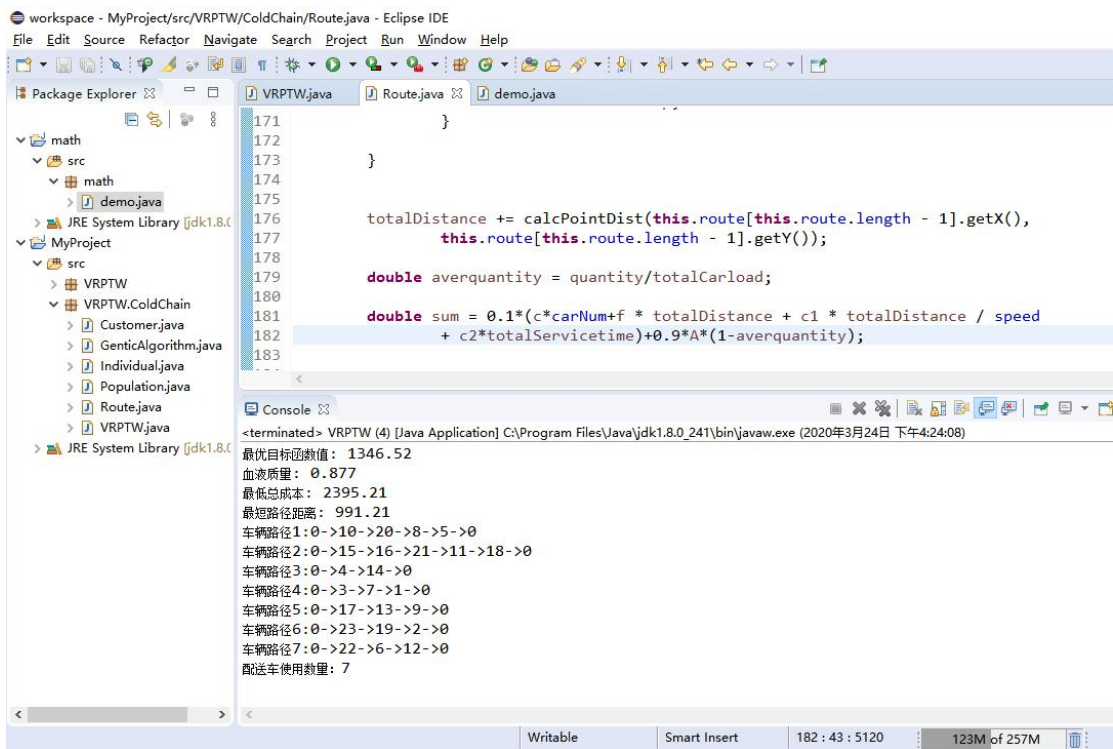


图 5.6 更改权重后的程序运行结果

5.3 本章小结

本章利用构建的模型和设计的算法进行算例仿真分析，在进行运算之前，本章首先针对遗传算法的种群规模和最大迭代次数的变化对运算结果的影响做了相关实验，通过实验来确定这两个遗传参数的具体取值。设置好各个参数值之后，本文通过运算分别得到了两种不同情况下的最优路径。在配送普通药品的情况下得到了四条配送路径。在配送冷链药品的情况下得到了五条配送路径，在增加质量的权重之后，质量得到了提升，但同时成本也升高了，说明通过调节目标函数的权重系数能够对计算结果进行优化。

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文根据医药物流的现状，分析了医药物流行业的配送特点，根据不同类型药品的特征建立了符合实际应用的医药物流路径优化模型，本文的主要工作和研究成果如下。

(1) 本文在研究基本医药物流理论的基础上，分析了医药物流的特殊性，将医药物流和普通商品的物流特征做了一个对比。然后，本文还对需要冷藏运输的特殊药品做了研究，基于上述研究可以看出药品的存储和运输都比其他普通商品更加特殊且更加要求严格。

(2) 本文分析了车辆路径问题的研究现状，详细地阐述了车辆路径问题模型的分类和特点，并且列举了求解车辆路径问题的通用算法。

(3) 考虑到时间对医药物流的重要性，本文在基本车辆路径问题的模型上引入了时间窗，在有时间窗要求的基础下，本文分析了普通药品的物流配送特点和冷链药品的物流配送特点，并分别对其建立模型，在建立普通药品的物流配送模型时，考虑的时间窗为双边硬时间窗，且仅考虑成本这一目标，其成本由固定成本和运输成本构成。而在建立冷链药品物流配送模型时，本文在以往学者研究常温药品配送路径优化的基础之上，研究冷藏药品路径优化问题，在安排配送路径时，考虑固定、运输、能耗等成本。为了使问题更加具体，本文以血液制品的配送为案例来进行问题的说明。由于冷链药品的质量会影响救治的效果，所以药品质量的重要程度是高于物流成本的，基于此，将药品质量作为要优化的第一目标，将成本作为第二目标。而质量与运输时间有关，所以冷链药品的配送问题考虑的时间窗为单边时间窗。这两个模型的建立为当前医药物流配送问题的研究提供了一点思路。

(4) 本文设计了一种适合于求解这两个模型的遗传算法，并通过算例进行验证。在用算例进行验证的过程中，本文通过实验得到的数据分析确定了遗传算法的最优种群规模和最大迭代次数，设置好各个参数后，用遗传算法分别求得了两个模型的最优解。

6.2 展望

药品的配送问题仅是复杂的医药物流体系中的一个环节,本文在研究中由于主客观原因存在一些不足之处,总结如下。

(1) 本文在进行实例分析时,并没有充分考虑到路况的实际环境,在建模时假设配送车辆在运输时的行驶速度为匀速,而实际上,配送车辆的速度会受到天气、交通管制等某些特殊情况的影响,因此在今后的研究中,可以将天气、路况等动态因素考虑到模型中。

(2) 本文考虑的是配送时间以及需求量一定的状况,然而在实际情况,有可能会出现一些临时的动态性的变化,尤其是在紧急情况下,更容易出现配送时间和需求量频繁变动的情况,因此今后的研究可以考虑动态时间和动态需求量的配送情况,由此进一步完善医药物流配送模型。

(3) 本文考虑的是单一配送中心,下一步研究可以考虑更多的配送中心和更多的配送点的配送情况。

参考文献

- [1] Ombuki B M, Nakamura M, Osamu M. A hybrid search based on genetical algorithms and tabu search for vehicle routing[J]. Brock University Technical Report, 2002(5):1-7.
- [2] Nikolakopoulou G, Kortesis S, Synefaki A. Solving a vehicle routing problem by balancing the vehicles time utilization[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 152(2):520-527.
- [3] Escobar J W , Linfati R , Toth P . A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(1):70-79.
- [4] Lau H C, Sim M, Teo K M. Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 148(3):559-569.
- [5] Azi N, Gendreau M, Potvin J Y. An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 178(3):755-766.
- [6] Kallehauge B. Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows[J]. Computers & Operations Research, 2008, 35(7):2307-2330.
- [7] Brito J, Martínez F J, Moreno J A. A GRASP - VNS Hybrid for the Fuzzy Vehicle Routing Problem with Time Windows[C]. Computer Aided Systems Theory-eurocast. 2009.
- [8] Oliveira H C B D , Vasconcelos G C . A hybrid search method for the vehicle routing problem with time windows[J]. Annals of Operations Research, 2010(80):125-144.
- [9] Kim K T, Jeon G. A vehicle routing problem considering traffic situation with time windows by using hybrid genetic algorithm[C]. International Conference on Computers & Industrial Engineering. 2010.
- [10] Ceschia S , Gaspero L D , Schaefer A . Tabu search techniques for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows and carrier-dependent

- costs[J]. Journal of Scheduling, 2011, 14(6):601-615.
- [11] Figliozzi M A. The impacts of congestion on time-definitive urban freight distribution networks CO emission levels: Results from a case study in Portland, Oregon[J]. Transportation Research Part C, 2011, 19(5):766-778.
- [12] Song B D , Ko Y D . A vehicle routing problem of both refrigerated- and general-type vehicles for perishable food products delivery[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169:61-71.
- [13] Liu R , Xie X , Augusto V. Heuristic approaches for a special simultaneous pickup and delivery problem with time windows in home health care industry[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(6):345-350.
- [14] Kergosien Y , Lenté, Ch, Billaut J C , et al. Metaheuristic algorithms for solving two interconnected vehicle routing problems in a hospital complex[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(10):2508-2518.
- [15] 宋则, 常东亮. 中国物流成本前沿问题考察报告(上)[J]. 财贸经济, 2005(8): 58-62.
- [16] 陈正林. 企业物流成本生成机理及其控制途径——神龙公司物流成本控制案例研究[J]. 会计研究, 2011(2): 66-71.
- [17] 杨珺, 冯鹏祥, 孙昊,等. 电动汽车物流配送系统的换电站选址与路径优化问题研究[J]. 中国管理科学, 2015, 23(9): 87-96.
- [18] 向婷, 潘大志. 求解需求可拆分车辆路径问题的聚类算法[J]. 计算机应用, 2016, 36(11): 3141-3145.
- [19] 李宁, 邹彤, 孙德宝. 带时间窗车辆路径问题的粒子群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(4): 130-135.
- [20] 霍佳震, 张磊. 求解配送\收集旅行商问题的启发式算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006(01): 138-142.
- [21] 杨宇栋, 朗茂祥, 胡思继. 有时间窗车辆路径问题的模型及其改进模拟退火算法研究[J]. 管理工程学报, 2006, 20(3): 104-107.
- [22] 祁文祥, 陆志强, 孙小明. 带软时间窗的集货与送货多车辆路径问题节约算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2): 99-103.
- [23] 黄敏, 薄桂华, 谢大叶. 带时间窗的 4PL 路径优化问题的两阶段求解[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(02): 182-185.

- [24] 李珍萍, 赵菲, 刘洪伟. 多时间窗车辆路径问题的智能水滴算法[J]. 运筹与管理, 2015, 24(6): 1-10.
- [25] 郭咏梅, 胡大伟, 陈翔. 改进蚁群算法求解带时间窗的应急物流开环车辆路径问题[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(6): 105-112.
- [26] 任亮, 黄敏, 王兴伟. 考虑客户时间偏好的第四方物流路径优化问题[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(12): 197-206.
- [27] 刘长石, 寇纲. 震后应急物流系统中的定位-路径问题[J]. 系统工程, 2015, 26(9): 67-71.
- [28] 邵举平, 曹倩, 沈敏燕, 等. 生鲜农产品配送中带时窗的 VRP 模型与算法[J]. 工业工程与管理, 2015(1): 122-127.
- [29] 赵锐, 胡雄, 何红弟. 考虑客户满意度的网购物流配送路径优化[J]. 上海海事大学学报, 2015(3): 68-74.
- [30] 殷亚, 张惠珍. 求解带硬时间窗的多目标车辆路径问题的多种混合蝙蝠算法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3632-3636.
- [31] 楼振凯. 带模糊时间窗的配送问题多目标优化研究[J]. 模糊系统与数学, 2017, 31(3): 183-190.
- [32] 葛显龙, 谭柏川, 吴宁谦. 基于碳交易机制的带时间窗车辆路径问题与算法研究[J]. 管理工程学报, 2018, 32(4): 141-148.
- [33] 王恪铭, 马祖军, 周愉峰. 应急救援中积压血液的转运[J]. 系统工程, 2013, 31(4): 109-115.
- [34] 邓旭东, 姚璐. 医药物品配送路径优化的一种改进蚁群算法[J]. 物流技术, 2013, 32(9): 168-170.
- [35] 田宇. 云南白药公司物流配送路径优化问题研究[D]. 辽宁: 大连海事大学, 2013.
- [36] 李云娜. 基于客户时间满意度的医药物流车辆调度研究[D]. 辽宁: 东北大学, 2013.
- [37] 王恪铭, 马祖军, 周愉峰. 突发事件应急血液调剂问题的两阶段决策方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013(01): 173-182.
- [38] 蒋杰辉, 马良. 多目标应急物资路径优化及其改进智能水滴算法[J]. 计算机应用研究, 2016(12): 3602-3605.
- [39] 刘聪. 基于双层规划的 O2O 药品配送选址路径问题研究[D]. 北京: 北京交

通大学, 2017.

[40] 倪婧妍. 论医药物流管理[J]. 中医药管理杂志, 2005, 13(5): 11-14.

[41] Nahmias S. Perishable Inventory Theory: A Review[J]. Operations Research, 1982, 30(4): 680-708.

致 谢

自 2018 年 9 月入学以来，回顾在江西财经大学的学习过程，感受颇丰。经过半年多的潜心研究，我的硕士毕业论文也终得完稿，在完成论文的过程中，我收获了很多，也得到许多同学和老师的关心和帮助。感谢老师们的答疑解惑和热情的同学们的相互支持，祝所有关心过我、帮助过我的老师、同学和朋友们一切顺利！

首先，我要感谢我的导师万龙老师。在撰写论文时，遇到过许多不懂的地方，多亏了老师的指导，我的论文才能如此顺利地完成。在此，我再次表示感谢！

其次，我要感谢在这两年里一直支持我的同学们，他们在学习和研究上的努力都深深地影响了我。

然后，我要特别的感谢我的家人，感谢他们在我整个学习生涯中对我的支持。这份支持将会激励我脚踏实地，一路向前。

最后，我要向耐心审稿的老师和专家们表示衷心的感谢，也要向在百忙之中参与论文答辩的答辩委员会成员和老师表示衷心的感谢！

