

**毕业设计（论文）**

基于区域聚类的多无人机与物流车路径优化算法研究

专 业 计算机科学与技术

学　　 号 1143730210

学 生 周昊天

指 导 教 师 曲明成

答 辩 日 期

**摘 要**

车辆路径问题自1959年提出以来，由于其应用的广泛性和[经济](http://wiki.mbalib.com/wiki/%E7%BB%8F%E6%B5%8E" \o "经济)上的重大价值，一直受到国内外学者的广泛关注。带容量的车辆路径问题（CVRP）作为传统车辆路径问题中的一个重要分支，经过几十年的研究已经有了较为成熟的启发式算法优化方案。随着无人机技术的逐渐成熟以及在物流运输中的出众表现，带无人机的路径优化问题（UVAVRP）成为当前学术和工程界亟待解决的崭新问题。本文在考虑无人机与物流车协同配送这一现实场景下，对带无人机的CVRP进行了创新性的研究，结合使用改进后的聚类算法和禁忌搜索算法，对复杂问题进行预处理、全局CVRP求解、局部CVRP求解这三个阶段的分解，最终构建出用于解决该场景问题的三阶段混合算法，通过合理规划物流车与无人机的协同配送，有效地降低了运行成本和时间成本，从理论层面上创新性地解决了物流车与无人机协同配送这一难题。

关键词：带容量的车辆路径问题 ； 无人机 ； 协同运输 ；三阶段混合算法 ；聚类算法 ； 禁忌搜索算法 ； 局部分治

**Abstract**

Since its introduction in 1959, the vehicle routing problem has attracted widespread attention from scholars at home and abroad due to its extensive application and significant economic value. The capacity-carrying vehicle routing problem (CVRP) is an important branch of the traditional vehicle routing problem. After decades of research, there have been more mature heuristic algorithm optimization solutions. With the gradual maturity of UAV technology and outstanding performance in logistics and transportation, the path optimization problem (UVAVRP) with drones has become a new problem to be solved in the current academic and engineering world. In this paper, considering the cooperative scenario of unmanned aerial vehicle and logistics vehicle coordinated delivery, an innovative research is conducted on CVRP with drones, and the improved clustering algorithm and tabu search algorithm are combined to preprocess complex problems. , Global CVRP solution, local CVRP solution to these three stages of decomposition, the final construction of a three-stage hybrid algorithm to solve the problem of the scene, through the rational planning of logistics vehicles and unmanned aerial vehicles cooperative distribution, effectively reducing the operating costs and Time cost, from the theoretical level, innovatively solved the problem of collaborative delivery of logistics vehicles and drones.

**Keywords:** CVRP , UAV , cooperative transportation , three-stage hybrid algorithm , clustering algorithm , tabu search algorithm , local governance

英文摘要与中文摘要的内容应一致，在语法、用词上应准确无误。关键词间用逗号相连。

**（内容及关键词用Times New Roman 小4号字）**

目录

[1.1 课题背景及研究的目的和意义 - 1 -](#_Toc515304849)

[1.2问题场景描述 - 2 -](#_Toc515304850)

[1.3路径规划算法及其相关理论的发展概况 - 2 -](#_Toc515304851)

[2.1 问题场景描述 - 3 -](#_Toc515304852)

[2.2 数学符号定义 - 3 -](#_Toc515304853)

[2.3 数学模型构建 - 3 -](#_Toc515304854)

[3.1 算法思想总述 - 4 -](#_Toc515304855)

[3.2 算法分块详解 - 4 -](#_Toc515304856)

[3.2.1 预处理模块 - 4 -](#_Toc515304857)

[3.2.2 CVRP全局解模块 - 4 -](#_Toc515304858)

[3.2.3 CVRP局部解模块 - 4 -](#_Toc515304859)

[3.2.4 代价计算模块 - 4 -](#_Toc515304860)

[3.2.5 显示模块 - 4 -](#_Toc515304861)

[3.3算法总流程详解（附生成中间件） - 4 -](#_Toc515304862)

[启发式算法受数据个数影响较大，作为程序的底层实现思想，设计的测试集分为50，150，250，350个点集,每个点集内分别测试轻重件比例、无人机数量、模拟真实路网， - 5 -](#_Toc515304863)

[4.1 50点数据 - 5 -](#_Toc515304864)

[4.2 150点数据 - 5 -](#_Toc515304865)

[4.3 250点数据 - 5 -](#_Toc515304866)

[4.4 350点数据 - 5 -](#_Toc515304867)

10

**第1章 绪 论**

## 1.1 课题背景及研究的目的和意义

9月5日，2017中国快递“最后一公里”峰会在北京举行，峰会指出中国快递业从2010年的10亿件发展到现在的400亿件。在快递业务量飞速增长，快递物流在人们的日常生活中扮演着十分重要的角色。

而快递运输中的“最后一公里”相关问题尤其突出：“最后一公里物流”是物流配送的最后一个环节，是指客户寄出的包裹，被运输到配送点后，由物流企业通过一定的运输工具将货物从最近的分拣中心送到客户手中，实现门到门的服务。物流成本是一种重要的生产经营要素，为了提高“最后一公里”的配送效率，降低配送成本是至关重要的。早在2010年中国物流与采购联合会发布的数据显示，中国物流总费用占国内生产总值比重约18%左右，其中“最后一公里”占到整个物流配送成本30%以上。刘强东在接受美国财经新闻网站CNBC的独家采访时提到，京东就雇佣了七万名快递员，如果能够用机器人（无人机）来送包裹，最后一公里配送的成本将会很低。

其次，最后一公里配送是城市配送环节中与客户直接沟通和接触的环节，这个环节的质量和效率很大程度上决定了客户的满意程度。配送员的众多不确定的个人因素很有可能成为影响客户体验的重要因素。使用无人车与无人机进行准时精确的配送，将毫无疑问提升用户满意度。

本课题组通过研究无人机控制与协同作业管理系统，要实现物流车与无人机协同作业的最后一公里配送自动化系统。该系统控制区域的分拣中心自动分配货物，发出携带无人机的物流车，实现物流车、无人机的协同作业完成区域快件的配送。该系统的完成将极大降低配送成本，提升区域快递最后一公里配送的效率并且提升用户满意度。

我在课题组中负责研究单派送中心多物流车多无人机情况下的路径规划算法的设计，该算法需要在综合考虑快件重量限制、无人车无人机协同工作等复杂条件下，规划出让综合行驶代价和总时间代价尽可能低的快件配送路径。

## 1.2应用场景描述

快件点（轻件点、重件点）：初始生成的快件点只有x坐标，y坐标和重量三个属性，根据无人机的载重进行划分，低于重量阈值的视为轻件点，大于重量阈值的视为重件点，轻件点可以由无人机或者物流车送达，而重件点只能由物流车送达。

模拟真实物流配送场景： 真实的物流配送过程中，快件点的产生总是成局部集聚的趋势（比如在城市中住宅区和商业中心快件点分布密集而公园、广场以及告诉公路沿路快件点稀疏甚至没有），以这个场景为前提，本文实现了模拟真实环境快件点分布的高斯函数模型模拟出了在一片区域中出现数个快件点呈正态分布的集聚中心，这些中心的边缘区域零散分布着少许的快件点。

单快件分发中心： 一片待处理的快件配送区域内只有一个快件分发中心，该中心存有多辆物流车可以并行执行配送任务。

物流车：每辆物流车带有容量限制，每次进行配送任务时能携带的快件重量之和不能超过物流车容量限制。同时每辆车配备多台无人机可以帮助物流车进行协同配送。

无人机：每架无人机也有着容量限制，每次飞行可以携带的轻件重件之和不能超过无人机容量限制。无人机有着作业半径限制，进行轻件点划分的时候将考虑到无人机的作业半径大小。

随着无人机技术的日益发展，众多国内外物流公司开始将无人机技术应用到物流配送行业中。亚马逊谷歌等公司首先将提出研发无人机空管系统的计划[9]。并于2016年利用无人机首次完成货物送达任务[10]。而在2017年首次提出利用地面车辆与空运无人机协同运输的货物运输方式[11]。然而随着无人机配送技术的日益成熟,物流车与无人机进行协同配送将成为可能，在传统的车辆路径问题重引入使用无人机还是一个崭新的领域。目前学术界对于物流车与无人机协同配送算法研究较少,现有的研究成果也都停留在的巡航等遍历问题上，如luo[14]等人采用启发式优化算法对区域内单车载无人机与地面车辆完成巡航任务的路线问题进行了优化方法，Yu[15]等人完成了单无人机与移动充电车辆配合完成区域内点遍历任务的广义旅行商问题（Generalized Traveling Salesperson Problem, GTSP）问题模型向TSP(Traveling Salesperson Problem，TSP）问题模型的转化。这些文献主要停留在完成对区域内点的访问任务，并没有将无人机作为运输载体，应用到物流配送这一场景中。

目前的传统物流配送算法都是只单纯基于车辆的路径规划，物流车有着载重量大的优点，然而配送速度慢、配送成本高并且受道路交通限制很多区域无法送达或者配送代价很大。而无人机虽然容量小，但是速度快运输成本低，不受地形与交通情况限制。如果结合两者的优点，考虑物流车与无人机的协同配送情况，就产生了全新的问题领域：带无人机的路径规划问题（UAV-VRP），本文从这一全新领域入手，创新性地提出了一种基于区域聚类的三阶段物流车与无人机协同配送优化算法，经大量实验证明相比较传统物流配送算法，能够同时有效降低行驶成本与时间成本。

## 1.3路径规划问题及其相关理论的发展概况

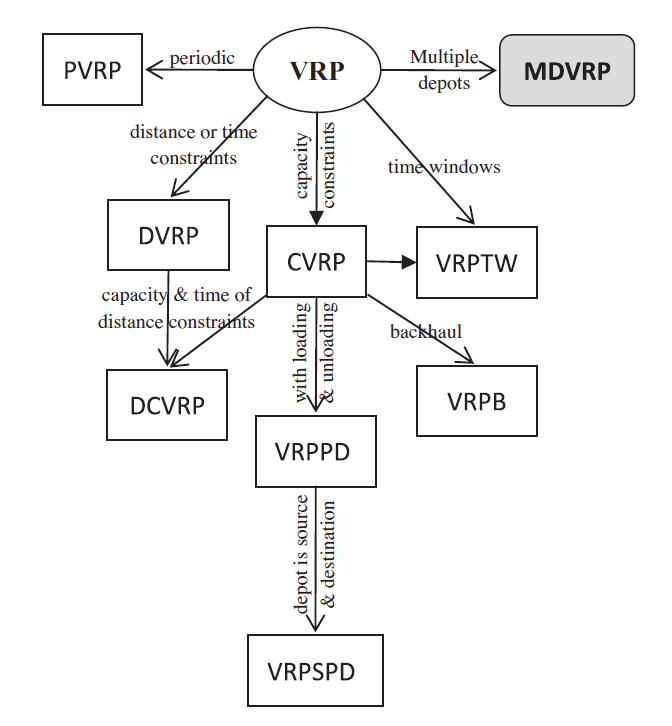
物流配送是物流系统的关键功能之一，涉及从制造工厂或配送中心通过运输网络到消费者的产品流动。运筹学研究文献称之为车辆路径问题（VRP）。 VRP是一种通用名称，指的是一类组合优化问题。其中客户将由多辆车辆提供服务。车辆离开仓库，为客户提供网络服务，并在完成路线后返回仓库。每个客户都有一定的需求。这个问题在Dantzig和Ramser（1959）的文献中首次提出。  
VRP是NP难题（NP-hard） [2]，迄今为止，这类问题中没有一个找到有效算法。学术界目前倾向于接受[NP完全问题](https://baike.baidu.com/item/NP%E5%AE%8C%E5%85%A8%E9%97%AE%E9%A2%98" \t "https://baike.baidu.com/item/NP-hard/_blank)（NP-Complete或NPC）和NP难题（NP-Hard或NPH）不存在有效算法这一猜想，认为这类问题的大型实例不能用[精确算法](https://baike.baidu.com/item/%E7%B2%BE%E7%A1%AE%E7%AE%97%E6%B3%95" \t "https://baike.baidu.com/item/NP-hard/_blank)求解，必须寻求这类问题的有效的[近似算法](https://baike.baidu.com/item/%E8%BF%91%E4%BC%BC%E7%AE%97%E6%B3%95" \t "https://baike.baidu.com/item/NP-hard/_blank)。因此，由于商业求解者需要解决的真实世界VRP的大小和频率，他们倾向于使用启发式算法。   
VRP在工业界有许多显著的应用。因为运输通常是产品成本的重要组成部分（10％）[4] ，VRP优化算法的使用通常可以为大多公司节省5％的成本[3]。事实上，交通运输行业占10％欧盟国内生产总值的百分比。因此，VRP节省的成本，即使不到5％，也是非常重要的。[3]s

https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle\_routing\_problem

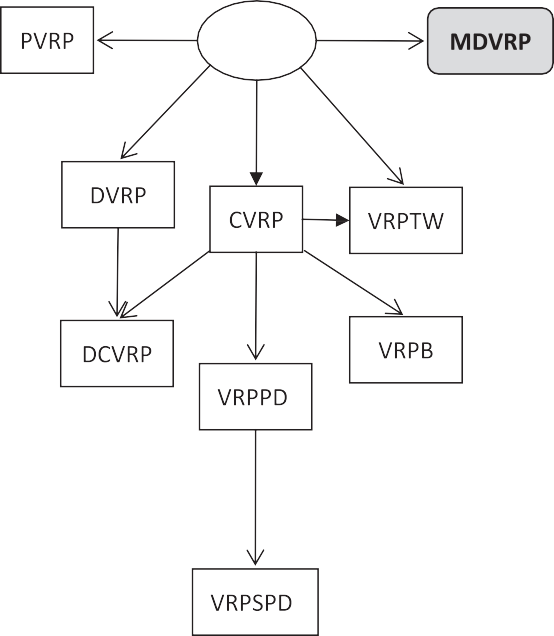
1.3.1路径规划算法的发展

在形式上，经典车辆路径问题（VRP）由有向图G（E，V）表示，其中V = {0,1，...，n}表示节点集合，E是弧。 仓库被为节点j = 0，并且客户端是节点j = 1,2，...，n，每个节点需求dj> 0。每个弧表示从节点i到节点j的路线。 每个弧Cij> 0的权重对应于从节点i到节点j的成本（时间或偶数距离）。 如果Cij = Cji，那么我们正面对对称的VRP，否则问题是不对称的。 从复杂性的角度来看，经典的VRP是NP-hard已知的，因为它推广了旅行商问题（TSP）和Bin包装问题（BPP），它们都是众所周知的NP难题（Garey＆Johnson，1979）。 对经典VRP的数学公式的回顾可以在Laporte（1992）的着作中找到。

车辆路径（VRP）问题的研究起步早，经过50多年的研究，成果丰富。车辆路径问题最早由[1]Dantzig and Ramser(1959)提出，之后大量影响因素在这个问题中被考虑：路径长度（[2]Cordeau, Gendreau, Hertz, Laporte, & Sormany, 2005 ）、距离时间限制（[3]Juan, Faulin, Adelanteado, Grasman, & Montoya Torres 2009）、收取与分发、时间窗问题（[4]Lopez-Castro & Montoya-Torres, 2011）等等。车辆路径问题又根据研究方向不同衍生出 The capacitated VRP ([5]Baldacci, Toth, & Vigo, 2010; [6]Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo, 2007)；Split Delivery vehicle routing problem(SDVRP) ([7]Archetti & Speranza, 2008)；The vehicle routing problem with multiple depots（[8]Jairo R. Montoya-Torres, Julián López Franco, Santiago Nieto Isaza, Heriberto Felizzola Jiméne,& Nilson Herazo-Padilla, 2015）等问题。



虽然VRP问题又来已久，但是涉及两级车（two-echelon vehicle）的VRP问题却是一个崭新的领域，直到今年才刚开始出现相关的研究（[9] Xiaoling Zhong, Siyu Jiang, Hengjie Song, 2017 ;[10] Zhihao Luo , Zhong Liu and Jianmai Shi, 2017），然而这些文献的主要针对目标旨在于完成对区域内点的访问任务，并没有考虑无人机的承载能力和货物运输能力，物流车无人机进行物流协同配送是一块崭新的领域。



periodic

**VRP**

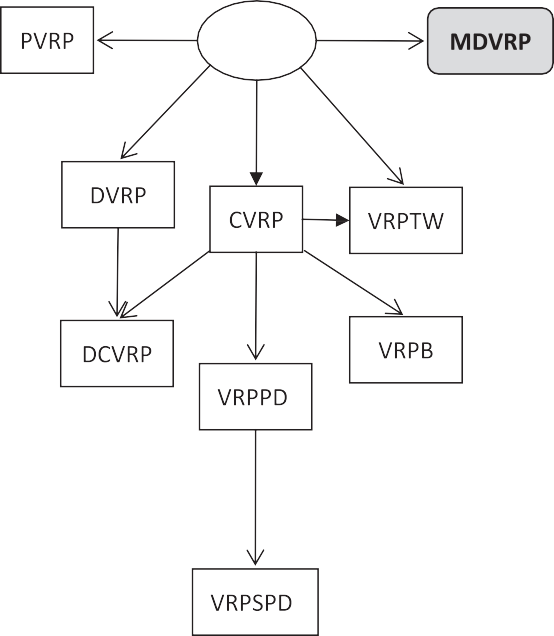
Multiple depots

distance or time constraints

time windows

capacity & time of distance constraints

backhaul



periodic

**VRP**

Multiple depots

distance or time constraints

time windows

capacity & time of distance constraints

backhaul

1.3.2聚类算法与路径规划算法结合

先聚类再规划路径可以通过将快件点预先分类再将每个聚类块视作整体进行路径规划。这种思想可以通过减少每次算法处理的点数来有效降低问题的复杂程度。目前已知的先聚类再规划路径的文献有[14,10,25]。

Gillett 1974 [14]是第一批采用先聚类再规划路径方法来解决VRP的作者。 他们开发了基于扫描的启发式算法，客户根据坐标以及容量大小确定不同的组别。每组数据当作TSP来解决。

Fisher 1981 [10] 提出了解决VRP的两阶段算法：第一个阶段中，根据特定标准筛选出每条路径中的快件点，接着第二阶段进行一个路径优化算法。

Qi 2012 [25] 发表的论文中综合考虑了空间和时间两个维度的信息对快件点进行聚类。他将代表时间和空间代价放到同一个坐标空间进行考虑，并且研究出一种测量两个快件点间时空间综合距离的方法。

## 1.4 本算法特色与创新点

1.4.1 聚类思想在本场景下的适用性改进

综合研究已有的先聚类后路径规划的算法思想之后，我发现由于都是应用在纯物流车配送的场景中，这些算法思想大多是划分完成运送区域后对区域内的所有点进行规划，再整体合并。这种先对小范围区域进行处理的方法，对聚类算法就有着较高的要求，聚类阶段就必须要在考虑到下一阶段整体规划的前提下进行合理划分，否则，先在局部完成该区域的路径规划很有可能会到导致整体性能的下降。

而在我们的应用场景中重件点与轻件点混杂，轻件点尽量使用无人机配送会大大降低配送成本。因此我们场景中的聚类对象为轻件点，聚类限制条件应为无人机覆盖半径。同时也要根据无人机数量对聚类区域的点数进行适当的初步限制。

而在聚类与路径规划的配合方面，与之前的大多数算法思想不同，本算法将采用先整体后局部的方式进行规划：首先对所有轻件点进行聚类，聚类完成后选取聚类中心，把原本的那个轻件点转换成这个类的等价重件点，附上整个类的快件重量。这样生成的等价重件点加入其余重件点中，视为重件点先用改进过的UGV-Tabu-CVRP算法进行一次CVRP求全局最优解，解出每辆物流车应该走的路线，然后再对每个区域内的轻件点进行UAV-Tabu-CVRP求解，解出局部无人机飞行路径的最优解。这样从整体细化到局部，首先保证了物流车代价的最小，其次，完美安排了无人机的最优配送路径，由于无人机配送速度快，区域内可与物流策划并行工作，时间代价主要就是物流车的配送时间。通过本文提出的先整体再局部的聚类-路径规划思想，理论层面上可以将综合代价降低至最小。

1.4.2 三阶段复杂问题分解与整合

本文待解决的应用场景涉及各物流车任务分配、无人机任务分配、物流车无人机容量限制以及物流车无人机协同工作等问题。算法的输入只有所有快件点的坐标和重量，要从简单的输入中提取信息，进行处理从而得到整体的路径规划，就需要对该复杂问题进行分解。我将整体算法主体分为主要三个阶段：数据预处理阶段、CVRP全局解阶段以及CVRP局部解阶段。

数据预处理阶段中，将输入的只有坐标和重量的原始数据先进行轻重件分离，再用改进的K-means聚类算法对所有轻件点进行聚类，并生成等价重件点，最后将在轻件点类内范围内的重件点归入该类。

CVRP全局解阶段中，将数据预处理阶段生成的等价重件点和其他重件点一起导入改进的UGV-Tabu-CVRP解决器中，输出每辆物流车分配的快件点路径。

CVRP局部解阶段中，将之前已经安排好的等价重件点还原成轻件点类，通过路径前后的类内重件点分布进行分类讨论处理先确定起飞点和着陆点，然后根据类内点数决定类内是进行单飞还是进行局部的UAV-Tabu-CVRP，最后输出每个类内的无人机规划好的路径。

1.4.3 引入无人机后的物流车与无人机协同配送方式

目前的无人机配送方式仅是定点起飞定点着陆进行配送，在无人机进行配送的过程中，物流车是停滞不动的，因此浪费了大量等待时间。但是考虑到安全因素以及技术条件限制，移动中无人机的起飞会合是不合理的。因此，受[XX]启发，设计出制定起飞点和着陆回合点的方式，这样能在物流车进行运输的时候尽可能并行派送无人机从而减少总代价。同时改进Tabu-CVRP算法，使其适用于非单点环路（双点单向路：起飞点和着陆点）的情况，实现每架无人机能在载重范围内携带多件快件的UAV-Tabu-CVRP算法。

**第2章 问题模型构建**

## 2.1 问题场景描述

本文的研究场景可以概括为：在仅有一个快件分发中心的区域中，有多辆（数量充足充足）容量为car\_w的物流车对m个快件收货点进行快递分发，且m个快件收货点上需要送达的总重量不同；其中总重量大于给定阈值K的快件收货点可划分为重件点，否则划分为轻件点，统称为快件点。

物流车携带分配给其的快件和n()架无人机从快件分发中心出发，尽可能以最小的行驶代价和最小的总时间成本，使物流车与无人机进行协同运输，将分配的所有轻重件点全部送达，最后回到快件分发中心。

无人机的配送范围要在其最大作业半径R以内，在单次随车配送过程中假设无人机电量充足，且能在物流车上实时充电。

## 2.2 数学符号定义

用到的概念转换为数学符号

|  |  |
| --- | --- |
| 符号 | 描述 |
| car\_w | 无人车最大载重 |
| car\_p | 无人车单位距离行驶成本 |
| car\_s | 无人车速度 |
| disij | 第i个快件点到第j个快件点的距离 |
| K | 无人机最大载重量（轻重件划分阈值） |
| class\_num | 类数量 |
| starti | 类i中的起飞点 |
| endi | 类i中的着陆点 |
| flight\_s | 无人机飞行速度 |
| fi | 无人机在类i中的路径数 |
| flight\_dij | 无人机在类i中第j条路径的飞行的距离 |
| flight\_wij | 无人机在类i中第j条路径上的快件点载重 |
| m | 快件点总数 |
| car\_ri | 给第i辆车分配的快件点集 |
| flight\_r |  |
| wi | 快件点i的快件重量 |
| yij | 物流车直接从快件点i运送到快件点j时置1 |
| cpi | 快件点i由物流车送达时置1 |
| opi | 快件点i由无人机送达时置1 |

## 2.3 数学模型构建

根据2.1中的问题场景描述，运用2.2中给出的符号定义建立本文要解决问题的数学模型：



 (1)

 (2)

 (3)

 (4)

Travel\_cost为物流车与无人机行驶代价之和即总行驶代价，

Time\_cost为物流车与无人机运行完所有快件所需的时间代价。本算法的优化目标就是在加入无人机的情况下尽可能降低这两者的大小。

约束条件（1）表明默认无人机配送速度比物流车快，且物流车配送代价比无人机高；

约束条件（2）表明每架无人机配送任务携带的快件总重必须不大于无人机最大载重量K；

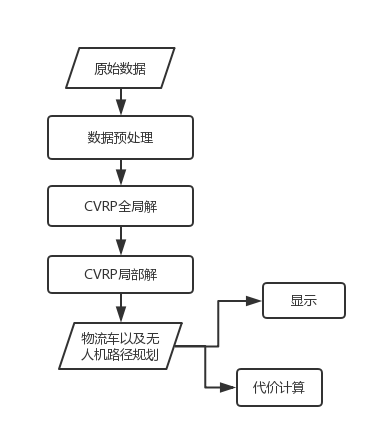
约束条件（3）表明每辆物流车携带的快件总重量必须下雨不大于物流车最大载重量car\_w；

约束条件（4）表明每个快件点都必须送到且只由物流车或者无人机访问一次。

**第3章 问题模型求解**

## 3.1 算法思想总述

本算法解决了单快件中分发中心，多物流车多无人机进行协同工作完成快件配送任务规划的难题。本算法的核心是一个三阶段的混合算法，三个阶段分别独立设计出三个模块，三个不同模块通过生成的中间数据文件连结,前一个阶段的输出转为下一个阶段的输入，最终输出计算好的物流车路径和无人机路径文件。同时设计好的显示模块可以分别显示物流车路径图与无人机路径图，代价计算模块可以根据不同的要求计算出路径代价和时间代价。



## 3.2 算法分块详解

接下来分别对各个模块进行详细地介绍

## 3.2.1预处理模块

预处理模块的功能是先将输入的只有坐标和重量的快件点文件(Datasetx,xlsx)拆分成重件点（HP.xlsx）和轻件点文件(LP.xlse)分别保存,然后运行计算路网矩阵的函数先生成轻件点路网矩阵，接着将所有轻件点数据以及轻件点路网矩阵导入改进后的K-means聚类函数中

## 3.2.2 CVRP全局解模块

## 3.2.3 CVRP局部解模块

## 3.2.4 显示模块

## 3.2.5 代价计算模块

## 3.3算法总流程详解（附生成中间件）

**第4章 实验及结果分析**

## 启发式算法受数据个数影响较大，作为程序的底层实现思想，设计的测试集分为50，150，250，350个点集,每个点集内分别测试轻重件比例、无人机数量、模拟真实路网。

实验平台介绍：

DELL XPS15 9550 CPU : Intel i7-6700HQ 2.6GHz

实验目的 :

启发式算法性能受数据个数影响较大，因此需要设计不同点数的数据集来对其在各种情况下的性能进行测试。此外，轻重件比例变化会对算法的性能产生影响；无人机数量和速度会对第三阶段局部路径规划和最后代价计算产生影响，这两个变量也需要纳入实验测试对象。最后就是真实路网数据的对比测试，不出意料的话算法性能会得到非常大的提升。

实验过程设计：

50点数据测验：

轻重比例：1：4 ； 2：3 ； 4：1；

无人机数量：1，2，3，4，5，6.... 至饱和；

无人机速度（在代价计算模块算下就行了）：2 ， 3 ，4 ... 至饱和；

欧式距离下传统算法与本文算法结果对比

实验结果：

实验结论及结果分析：

## 4.1 50点数据

## 4.2 150点数据

## 4.3 250点数据

## 4.4 350点数据

**结 论**

学位论文的结论作为论文正文的最后一章单独排写，但不加章标题序号。

结论是对整个论文主要成果的总结。在结论中应明确指出本研究内容的创新性成果或创新点（含新见解、新观点），并指出今后进一步在本研究方向进行研究工作的展望与设想，上述各项用（1）.（2）.表述，不要将结论写成论文的摘要。结论字数一般在2000字以内。

**参考文献**

[1] 林来兴. 空间控制技术[M]. 北京：中国宇航出版社，1992：25-42.

[2] 辛希孟. 信息技术与信息服务国际研讨会论文集：A集[C]. 北京：中国科学出版社，1999.

[3] 赵耀东. 新时代的工业工程师[M/OL]. 台北：天下文化出版社，1998 [1998-09-26]. http://www.ie.nthu.edu.tw/info/ie.newie.htm（Big5）.

……

[12] 谌颖. 空间交会控制理论与方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，1992：8-13.

[13] Kanamori H. Shaking Without Quaking[J]. Science，1998，279（5359）：2063-2064.

……

[104] Christine M. Plant Physiology: Plant Biology in the Genome Era[J/OL]. Science，1998，281：331-332[1998-09-23]. http://www.sciencemag.org/cgi/ collection/anatmorp.

……

**哈尔滨工业大学本科毕业设计（论文）原创性声明**

本人郑重声明：在哈尔滨工业大学攻读学士学位期间，所提交的毕业设计（论文）《 》，是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明，其它未注明部分不包含他人已发表或撰写过的研究成果，不存在购买、由他人代写、剽窃和伪造数据等作假行为。

本人愿为此声明承担法律责任。

作者签名： 日期： 年 月 日

**致 谢**

衷心感谢导师×××教授对本人的精心指导。……，他的言传身教将使我终生受益。

感谢×××教授，以及实验室全体老师和同窗们的热情帮助和支持！

本课题承蒙××××基金资助，特此致谢。

…