

## 摘要

近年来,不断出现的重大特大危险品泄露污染事故,对国民经济、人民群众的生命财产和环境造成了巨大的损失。为保证危险货物安全运输,道路危险货物运输中最重要的是如何选取合适的道路危险货物运输路径,尽一切可能减少由于车辆事故等原因而造成对人和环境的危害,实现危险货物运输企业的最大效益。

本文围绕蚁群算法的原理、理论,就如何改进基本蚁群优化算法,蚁群优化算法在道路危险货物运输领域的应用进行了研究。本文的主要研究成果包括:

1、在经典 VRP 模型的运输回路表示形式的基础上,根据道路危险货物运输路线优化特点和道路危险货物运输路线优化原则,提出了有容量约束的危险货物运输 VRP 模型表示形式。

2、阐述路段风险度计算模型及公式表示形式,引入路段加权值的概念,并将路径加权值引入改进蚁群算法的跃迁概率中,使蚂蚁选择路径时考虑道路路段风险度的影响。

在此基础上,用 Matlab 编写基于优化的蚁群算法的危险货物运输路径优化程序,应用于道路危险货物运输路径问题中,因考虑了路段危险货物风险度,从而使道路危险货物运输车辆避开了禁止通行路段和危险货物风险度大的路段。

**关键词:** 危险货物运输、CVRP、改进蚁群算法、路径选择

# Abstract

In recent years, the big dangerous goods reveal and pollution accidents which appear continuously caused great damage to the national economy, peoples' life property and the environment resources. In order to avoid dangerose goods damaging people and geographical environment of highway when the accidents happen and realizes maximal dangerous freight enterprise beneficial result, A main question about transportation of Dangerous Goods by automobile is how to choose the best transportation route of transportation of Dangerous Goods.

The dissertation focuses on the principles and theory of Ant Colony Algorithm, especially, an study on how to improve the basic Ant Colony Algorithm, solving transportation of Dangerous Goods by automobile. The main achievements of this dissertation include:

1、 According to the princple and the character of transportation route optimized about transportation of Dangerous Goods, On the basis of a form abuot classics VRP model transportation circuit, the model CVRP of the transportation of Dangerous Goods by automobile was proposed.

2、 The dissertation expresses the model of formula, analyzes the model of section risk and proposes the conception of the section weighting value. Then lead the section weighting value into the probability of going to the next city of the Ant Colony Algorithm. The purpose is to consider the effects of road section risk when the ant choose the route.

With Matalab language, this dissertation programs the procedures of the route about transportation of Dangerous Goods based on an improved Ant Colony Algorithm, and then apply the procedures to the problem of transportation of Dangerous Goods. With the considering of road section risk, the Vehicle does not choose the section of no entering and the high degree of road section risk.

**Keywords:** transportation of dangerous goods; apacitated Vehicle Routing Problem; improved Ant Colony Algorithm; optimization of transportation route

## 论文独创性声明

本人声明：本人所提交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：张恒海

2007年6月12日

## 论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：张恒海

2007年6月12日

导师签名：张建新

2007年6月12日

# 第一章 绪论

## 1.1 选题背景与意义

改革开放以来,随着国民经济的快速发展,国家对能源和化工产品的需求急速增长,道路运输危险货物的品种越来越多,危险特性越来越复杂,危险程度也越来越高。据世界卫生组织统计,目前仅用于工农业的化工物资就达六十万种,并且每年还要增加三千余种,在这些物资中,有明显或潜在危险的就达三万余种。我国目前有 6000 多种危险货物,其中常用的有 2000 多种。据统计,我国 95%以上的危险货物涉及异地运输问题,例如液氨的年流动量达 80 多万吨,液氯的年流动量达 170 多万吨,其中 80%是通过道路运输<sup>[1]</sup>。这些大量的易燃、易爆、剧毒、腐蚀性的危险货物在全国公路上运输,形成流动的危险源。因此危险货物的安全运输一直是道路运输管理部门重点关注的对象。2002 年以来,为了对减少和避免危险品事故的发生,国务院修订并发布了《危险化学品安全管理条例》;交通部等十部委联合进行了危险品运输安全专项整治。危险货物的运输技术要求高,操作难度大,而且关系道路和人民财产的安全,政府提出“以人为本”的政策后,民众的安全问题已经成为政府关注的重中之重。

虽然社会已认识到危险货物运输的风险性,政府部门也对有害物品运输实施严厉的监管,使道路危险货物运输的事故率比一般物品运输的事故率要低。但低概率、高风险的有害物运输事故仍时有发生。特别是近几年,我国道路危险货物运输事故频繁发生,事故造成的危害程度越来越严重,一次事故就可能有几吨甚至十多吨剧毒或腐蚀性以及其他易燃易爆危险货物泄漏,对生态、环境造成严重破坏和污染,对人民生命财产产生严重威胁,给国家造成严重的经济损失和不良的社会影响。因此,必须特别关注和重视道路危险货物运输安全问题,预防此类事故的发生。

与普通货物运输相比,由于危险货物具有爆炸、易燃、毒害、腐蚀、放射性等特性,在运输过程中稍有不慎,便可能造成人员伤亡、财产损失和环境污染,因此对危险货物运输的安全性要求高:有的危险货物必须采取特殊的安全措施才可以运输:有的危险货物运输必须按有关部门规定的路线、时间运输。因为危险货物运输发生的事故不仅对车辆、人员造成危害,所运输的危险货物可能会对它所在路线的周围环境造成严重的破坏和污染。据统计,近年我国危险货物运输事故呈明显上升趋势,2000 年全年发生事故 514 起,死亡 785 人,到 2003 年发生事故 621 起,死亡 960 人。仅 2005 年就发生了十多起

重大危险货物运输事故。2005年-2006年部分道路危险货物运输事故如表 1.1 2005年-2006年部分道路危险货物运输事故所示，该类事故不仅给人民群众的生命和财产造成损失，也产生了不良的社会影响。

表 1.1 2005年-2006年部分道路危险货物运输事故

事故时间	事故地点	所运货物	事故原因	事故后果
2005.3.29	京沪高速公路 淮安段	液氯	与一货车相撞，导致槽罐车液氯大面积泄漏	29人氯气中毒死亡，456人中毒住院治疗，1867人门诊留治，10500名村民被迫疏散转移，累计经济损失约2000余万元。
2005.6.21	江苏省泰州境内	双乙烯酮	槽罐车顶盖脱落	双乙烯酮液体沿路洒漏了3公里，致使1200多人疑似中毒人员被送往医院救治，123人留院观察，13人中毒症状严重。
2005.9	云南弥勒	硝酸铵	锰铁和水泥残留物导致硝酸铵包装袋破损，并发生作用，使硝酸铵分解爆炸	13人死亡、50人受伤，波及周围5个村寨，17户村民的房屋被夷为平地。
2005.12	北京八达岭高速	电石	一辆装载电石的大货车因制动失灵，追撞上同方向行驶的一辆大客车，翻入道路左侧约20余米处的山沟后，货车内拉载的电石起火，客车随之起火。	24人死亡，1人重伤，2人轻伤，6人轻微伤。
2006.10.28	江苏338省道 镇江丁岗段	苯乙烯	让车时驶出道路，罐体泄漏。	近千村民紧急疏散。

道路危险货物运输事故一旦发生就会对运输路线周围生态环境造成严重污染和破坏，影响到该区域人们生活和生产的正常进行，甚至造成运输路线长时间交通瘫痪和重大人员伤亡，产生灾难性后果。道路危险货物运输事故所造成的危害已经引起了人们的高度重视。故对道路危险货物运输必须开展多层次、多角度的相关研究，以确保人民生命财产安全和生态环境不受影响，包括联合国在内的许多国际组织和政府已经通过立法等措施来引导危险货物安全运输。危险货物运输路线的研究是提高危险货物安全运输水平的重要方面。因此，对危险货物运输路线进行研究，为维护道路和人民财产的安全，

维护社会稳定和经济健康发展，具有重要的现实意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

1952年，联合国危险货物运输专家委员会通过专家委员会和专家小组会议，研究起草《联合国危险货物运输建议书规章范本》。以此规范和指导国际间危险货物生产、运输有序进行，以最大程度节省资源和保障安全。另外，发达国家都制定了本国危险货物运输规定。20世纪60年代以来，随着通信及控制技术发展，相关技术广泛应用于危险货物运输领域，尤其是ITS(智能交通系统)的兴起，为危险货物运输安全提供了可靠技术保障。在危险货物运输车辆上安装GPS系统，对车辆进行实时监控和定位，使得管理中心可以随时掌握车辆运行情况，对驾驶人员发出调度指令，让危险货物运输车辆运行在安全和高效的路线上。

#### 1、欧盟道路危险货物运输研究现状

欧盟国家的道路危险货物运输以德国为典型。德国国内公路非常发达，与周边国家之间是通过许多条高速公路相连的。德国是世界经济发达国家之一，每年需要应用大量的危险物品，该国危险货物主要是通过公路运输完成的，如1997年，德国的公路危险货物运输量占2.71亿吨，占全社会危险货物运输量的62%。

德国建立有完善的公路危险货物运输事故应急系统，有专业的公路危险货物运输事故救灾队伍。同时，从事危险货物运输的司机，必须进行严格的基础课程的培训以及相应的考核，培训的内容分为多个业务类别。基础培训要经过20小时的学习，通过考试后才可获得相应的营运证，有效期为5年。驾驶槽罐式车辆，司机要经过12小时的培训并通过考试，才可获得相应的营运证；如果是运输易爆物品（一级危险品），要继续增加8小时的培训并通过考试，才可获得相应的营运证；运输放射性危险物品，需要再参加8小时的培训并通过考试，才可获得相应的营运证。这些营运证只有在柏林和波恩才能发放，有效期最多为5年，由全德重型卡车局颁发。运输普通危险货物的司机必须每5年进行一次30小时的培训。司机在运输危险货物时，必须配备安全帽、防护镜、铁锹、灭火器等，在集装箱四周必须张贴危险识别标志和国际通用的危险货物代码。利用科技手段强化对司机的管理。

法律规定司机每行驶2小时必须休息20分钟，一天工作时间最长不得超过12小时，不得违反限速规定，比如许多危险货物运输车辆最高速度不得超过90公里/小时。为了

更好地进行检查监督，在德国，所有的危险货物运输车辆都安装了行车记录仪和卫星定位系统，行车记录仪详细记载了车辆出发时间、行驶时间和停顿时间，这些记录将保持两年。交通警察经常抽检司机的行车记录仪，而且对以往的所有记录都可能进行检查，一旦查出司机违反相关规定，就会被记分，达到一定程度就会受到相应的处罚。通过这种科技手段，迫使司机们严格遵守法律的相关规定，从而防止了疲劳驾驶。同时，专门培训的警察负责在路上监管危险货物运输车辆。依法对违章人进行处罚。较严重的违章行为，由法院裁决。判定处罚后，如当事人不接受处罚，将会被判处 1~4 年的监禁。这些都有效地预防了事故的发生。

在英国，20 世纪 80 年代末、90 年代初，英国健康与安全委员会所属的危险物质咨询委员会曾组织力量，对公路运输危险物质的风险进行了为期五年的系统研究。1992 年，Davis 和 Lees 对英国的公路运输环境进行了调查，对不同类型的运输车辆、不同类型的道路在货物运输尤其是危险货物运输过程中事故的频率分布和伤亡人数分布进行了统计分析。

## 2 美国道路危险货物运输研究现状

美国建立了化学品运输安全委员会和国家救援中心。化学品运输安全委员会和国家救援中心相互配合工作。对事故急救人员、承运人、托运人以及办理危险品货物的其他人员提供昼夜 24 小时支援服务。国家救援中心是一个联邦政府机构，凡排放出危险物质时必须向该中心报告。

美国公路安全管理局和美国 Michigan 大学运输研究所分别从 1975 年起和 1980 年起建立了运输事故数据库系统，利用这些数据库系统，可以很容易的对运输事故的频率分布进行统计分析。

在具体的危险货物类别方面，从上世纪 70 年代开始，美国、英国、德国和加拿大等一些发达国家就对液化石油气(LPG)的安全运输问题进行了研究<sup>[2]</sup>，到 80 年代后期其研究更加广泛和深入，并分别于 1984，1986，1990 年先后召开了 3 次以液化气的安全运输技术为专题的国际学术会议，专门讨论了其安全技术方面的研究情况。

随着电子技术、通讯技术、互联网技术的发展和广泛应用，在发达国家已经建立起区域性乃至全国性的道路网络监控、通讯系统。尤其是 ITS(智能运输系统)的建立，GPS(全球定位系统)和 GIS(地球地理信息)在车辆运输中的应用，为保障道路危险货物运输安全提供了先进的科技手段。

## 1.2.2 国内研究状况

危险货物运输安全关系到社会的稳定和人民生命财产安全,长期以来我国政府对此高度重视。自从上世纪八十年代以来,国家有关部门就开始对危险货物运输进行了相关的研究,并积极地采用国际性技术法规,制定了一系列安全管理的法规、标准,从那时起我国危险货物管理开始了立法管理和与其配套的技术管理。道路危险货物运输的立法和技术标准的制定经过近 30 年的发展,道路危险货物运输在法规、标准、行业管理、体制、职能等方面均有了一定的进步。

我国道路危险货物运输的立法在新中国成立以来大致经历了三个阶段<sup>[3]</sup>:

第一阶段:从解放初期到上世纪八十年代中期。交通部门负责全国道路交通管理和制定发展计划、管理法规等,但没有有关道路危险货物运输的部门规章及相应的技术标准出台。

第二阶段:从上世纪八十年代中期到 2000 年。交通部制定并发布了《道路危险货物运输管理规定》、《JT3130 汽车危险货物运输规则》、《JT3145 汽车危险货物运输、装卸作业规程》、《GB1339 道路运输危险货物车辆标志》等;国务院发布了《化学危险品安全管理条例》;水运、公安、铁道、民航、化工等部门陆续发布了危险品管理的法规和标准。

第三阶段:从 2000 年开始至今。在近几年里,国家发布了《安全生产法》并修订发布了《危险化学品安全管理条例》,成立了“全国危险化学品管理标准化技术委员会”。交通部于 2005 年 3 月 1 日实施了《汽车运输危险货物规则》,于 2005 年 8 月 1 日实施《道路危险货物运输管理规定》。于 2005 年 11 月 1 日正式实施的《危险货物分类和品名编号》GB 6944-2005,并且于 2007 年 2 月 28 日印发了《道路运输管理工作规范(征求意见稿)》。

然而由于历史等原因,我国对道路危险货物安全运输研究并不十分理想,道路危险货物运输的法规与标准研究也不尽人意,科研基础比较薄弱。截止 2005 年底,在公路运输方面制定的与危险货物运输安全直接有关的法规、标准只有几个。即交通部发布的《道路危险货物运输规则》、《JT3130-1988 汽车危险货物运输规则》、《JT3145-1991 汽车危险货物运输、装卸作业规程》、《GB13392-1992 道路运输危险货物车辆标志》、《汽车运输危险货物规则》,由此看出,道路危险货物运输的技术法规少,并且有的内容与我国当前危险货物运输实际已不相符,不利于我国道路危险货物安全运输,因而当前应根据实际需要研究制定一批技术法规以提供运输部门使用。



国内在道路危险货物运输方面研究的较少,郭晓林、李军等人对有害物品运输路径风险度量模型进行了研究<sup>[4]</sup>,刘大学等提出了道路危险货物管理信息系统设计<sup>[5]</sup>,在道路危险货物运输路径选择方面的研究也不多,沈小燕、刘浩学等运用模糊综合和层次分析评价相结合的方法对道路危险货物运输优化进行评价分析,最终得出评价结果模型对路危险货物运输路径进行优化选择<sup>[6]</sup>。

随着我国对生态环境保护的加强和“以人为本”理念的提出,道路危险货物运输的安全必然会得到国家的高度重视;另一方面,随着我国科学技术发展,为危险货物运输的安全研究提供了良好的技术条件。总之,随着我国经济和公路交通的发展,对危险货物的需求数量将会越来越多,道路危险货物运输的品种和数量也会不断增加,对危险货物安全运输的研究也将会向深层次发展。

### 1.3 研究内容与步骤

道路危险货物运输路线优化的目的,是在确保道路危险货物安全运输的前提下,满足社会对道路危险货物运输的需求,同时获得良好的经济效益和社会效益;给主管机关和运输企业提供科学、经济、实用的运输管理模式,促进道路危险货物运输良性发展。本文针对道路危险货物运输路线进行研究,分析道路危险货物运输特点,确定了影响道路危险货物运输安全的主要因素,建立道路危险货物运输问题的数学模型。在改进蚁群算法的基础上,借助 Matlab 编程获得道路危险货物运输路径的较好方案,研究方法如下:

(1)查阅大量的相关文献和资料,了解国内外道路危险货物运输路线研究状况。

(2)对道路危险货物运输路径优化影响因素进行定性及定量分析,同时对这些影响因素的大小进行客观地评价。

(3)通过对相关文献的分析和总结,从车辆路径问题(VRP)的基本理论出发,阐述了 VRP 问题的相应分类,深入分析了经典 VRP 模型的运输回路表示形式及经典 VRP 模型的运输成本表示形式,总结出危险货物运输优化路径模型。

道路危险货物运输路线优化的影响因素很多,各因素之间既互相联系又互相影响,就运输路线安全而言,这些因素主要包括生态环境、运输道路状况、人口密集区等。本文是在分析这些因素的基础上,根据危险货物运输风险度计算,提出危险货物运输的路段加权值的概念,并引入到蚁群算法的转移概率中。

## 第二章 道路危险货物运输路径分析

### 2.1 道路危险货物运输分析

#### 2.1.1 道路危险货物特点

##### 1 道路危险货物分类

###### (1) 危险货物定义

根据 GB 6944-1986《危险货物分类和品名编号》的表述, 所谓危险货物是指: “凡具有爆炸、易燃、毒害、腐蚀、放射性等性质, 在运输、装卸和贮存保管过程中, 容易造成人身伤亡和财产损毁而需要特别防护的货物<sup>[7]</sup>。”

根据 GB 6944-2005《危险货物分类和品名编号》的表述, 危险货物是指: “具有爆炸、易燃、毒害、感染、腐蚀、放射性等特性, 在运输、储存、生产、经营、使用和处置中, 容易造成人身伤亡、财产毁损和环境污染而需要特别防护的物质和物品<sup>[8]</sup>。”

新标准的表述增加了具有“感染”特性的物质和物品; “环境污染”, 将原适用范围从“运输、装卸和贮存保管过程中”改成了“运输、储存、生产、经营、使用和处置中”; 强调了“环境污染”, 并将“货物”改为“物质和物品”。可以看出新标准中的定义更加全面, 更加完善, 更符合实际情况, 有利于加强危险货物运输管理, 提高危险货物运输安全。

###### (2) 危险货物分类的必要性和原则

危险货物是一个总称, 包括很多品种。《危险货物运输规则》中列出的危险货物就有 3000 多种。在这众多的危险货物中, 性质各不相同, 危险程度大小不一。有的危险货物常温下是气态, 与空气混合能形成易燃、易爆的混合气体; 有的危险货物是固态或液态, 暴露在空气中遇明火极易燃烧; 有的危险货物具有毒性和放射性等。因此为了安全运输, 有必要根据各种危险货物的主要特性进行分类。

如根据货物的物理性质、化学性质, 或者结合货物的物理和化学性质, 或者根据货物对人身伤害的情况, 将危险货物进行分类。在分类时把在运输的危险中居主导地位的性质作为危险货物的分类标准。但是上述的分类标准, 并不相互排斥。大多数危险货物都兼有两种以上的性质, 因此在注意到某种货物主要特性的同时, 也必须注意到该货物的其他性质。

###### (3) 危险货物分类

为贯彻实施《危险化学品安全管理条例》，更好地与国际接轨，于 2005 年 11 月 1 日正式实施的《危险货物分类和品名编号》GB 6944-2005（替代 GB 6944-1986）把危险货物按其具有的危险性或最主要的危险性分为 9 个类别，有些类别再分成项别（如表 2.1 道路危险货物分类表<sup>[8]</sup>所示）。类别和项别的号码顺序为 GB 6944-2005 种道路危险货物分类顺序。

表 2.1 道路危险货物分类表<sup>[8]</sup>

类 别		项 别	
1	爆炸品	1.1	有整体爆炸危险的物质和物品
		1.2	有迸射危险,但无整体爆炸危险的物质和物品
		1.3	有燃烧危险并有局部爆炸危险或局部迸射危险或这两种危险都有,但无整体爆炸危险的物质和物品
		1.4	不呈现重大危险的物质和物品
		1.5	有整体爆炸危险的非常不敏感物质
		1.6	无整体爆炸危险的极端不敏感物品
2	气体	2.1	易燃气体
		2.2	非易燃无毒气体
		2.3	毒性气体
3	易燃液体	3.1	闪点温度时放出易燃蒸气的液体或液体混合物;溶液或悬浮液中含有固体的液体;温度等于或高于其闪点温度提交运输的液体;液态在高温条件下运输或提交运输、并在温度等于或低于最高运输温度下放出易燃蒸气的物质。
		3.2	液态退敏爆炸品
4	易燃固体、易于自燃的物质、遇水放出易燃气体的物质	4.1	易燃固体
		4.2	易于自燃的物质
		4.3	遇水放出易燃气体的物质
5	氧化性物质和有机过氧化物	5.1	氧化性物质
		5.2	有机过氧化物
6	毒性物质和感染性物质	6.1	毒性物质
		6.2	感染性物质
7	放射性物质	7.1	低比活度放射性物质 (LSA)
		7.2	表面污染物 (SCO)
		7.3	裂变物质
		7.4	特殊形式的放射性物质
		7.5	其它形式的放射性物质
8	腐蚀性物质	8	化学作用使生物组织接触时造成严重损伤、或渗漏时严重损害甚至毁坏其他货物或运载工具的物质
9	杂项危险物质和物品	9.1	危害环境物质
		9.2	高温物质
		9.3	经过基因修改的微生物或组织

## 2 危险货物特性

在分类的基础上为了对危险货物运输进行有效的运输，还必须对危险货物的特性有全面正确的了解<sup>[9]</sup>。

### (1) 爆炸品的特点

爆炸品一般由易燃、易分解的化合物组成，化学性质非常活泼。一般认为下列三个因素有一个符合的货物为爆炸品：感度在 2%以上(落锤 10kg，落高 25cm 的爆炸率)；爆发点在 350 摄氏度以下；爆速在 3000m/s 以上。决定爆炸品爆炸性能强弱的指标主要有感度(亦称敏感度)、威力与猛度和安定性(稳定性)。其中感度和安定性是衡量货物起爆的难易程度，而威力和猛度则关系到一旦发生爆炸所产生的破坏效果。感度及爆炸能力过强的物品，不能运输。这类物品在生产厂中制造出来以后，要经过注入水、酒精等钝感剂的方式进行处理，以降低其感度，使其能安全地进行运输。

常运的爆炸品有：火药、炸药及起爆药；火工品及引信；烟花爆竹等。

### (2) 气体的特性

本类气体指：在 50℃时，蒸气压力大于 300 kPa 的物质或 20℃时在 101.3 kPa 标准压力下完全是气态的物质。此类物质的主要特性是受热膨胀，或在撞击、摩擦、强烈震动条件容易造成容器泄漏，甚至爆炸。因此，一般封装于能经受一定压力的金属容器(瓶、桶、罐)中运输。

本类包括压缩气体、液化气体、溶解气体和冷冻液化气体、一种或多种气体与一种或多种其他类别物质的蒸气的混合物、充有气体的物品和烟雾剂。

### (3) 易燃液体的特性

易燃液体指：在其闪点温度（其闭杯试验闪点不高于 60.5℃，或其开杯试验闪点不高于 65.6℃）时放出易燃蒸气的液体或液体混合物；在溶液或悬浮液中含有固体的液体；在温度等于或高于其闪点的条件下提交运输的液体；以液态在高温条件下运输或提交运输、并在温度等于或低于最高运输温度下放出易燃蒸气的物质；液态退敏爆炸品。易燃液体的的具体特性指：

①易挥发性。液体物质在任何温度下都会蒸发。液体在低于沸点温度下的蒸发现象称为挥发。

②易燃性。当液体温度超过闪点温度后，达到放出的蒸气量足以维持燃烧的温度，这个温度称为燃点（着火点）。一般燃点比闪点高出 1℃~5℃。现在世界各国都是以闪点作为衡量液体易燃程度的标准。

③密度和溶解性。大部分易燃液体的密度比水小。若不溶于水的某易燃液体发生火灾。如其密度大于 1，水能够覆盖在易燃液体上面，使之与空气隔绝起到灭火的作用，可以用水扑救。如其密度小于 1，因为它会浮在水面上，随水流动而使火灾蔓延，则不可用水扑救。当能溶于水的某易燃液体发生火灾，则不论其密度大小都可以用水扑救。

#### ④电阻率大，容易积聚静电

易燃液体的着火能量较小，往往容易被静电火花点燃。通常运输的部分为易燃液体中的烃、芳香烃或氯化烃，在运输、装卸过程中，由于震动摩擦的作用，极易积聚静电，特别是汽车罐车运输在灌装时的流速过快也极易积聚静电，一旦发生静电放电，就可能引起可燃性蒸气的燃烧爆炸，后果严重。

常运的易燃液体有：苯( $C_6H_6$ )，二硫化碳( $CS_2$ )，汽油，油漆等。

#### (4) 易燃固体、易于自燃的物质、遇水放出易燃气体的物质的特性

该类物品一般燃点、自燃点较低，对高温、明火反应敏感。按其燃烧危险性的不同性质分为易燃固体、自燃物品和遇湿易燃物品 3 项。其中遇湿易燃物品具有遇湿(水)后产生易燃蒸汽，遇明火或自身温度升高而燃烧的特性。

常运的易燃固体有：赤磷(又名红磷)及磷的硫化物，硫磺；常运的易于自燃的物质有：黄磷，又称白磷，油浸的麻、棉、纸等及其制品；常运的遇水放出易燃气体的物质有：钠、43003 钾等碱金属，电石等。

#### (5) 氧化性物质和有机过氧化物的特性

氧化性物质是本身不一定可燃，但通常因放出氧或起氧化反应可能引起或促使其他物质燃烧的物质。有机过氧化物是分子组成中含有过氧基的有机物质。有机过氧化物具有热不稳定性，可能发生放热的自加速分解。

常运的氧化性物质：硝酸钾(又称钾硝石、火硝)，氯酸钾；常运的有机过氧化物：过氧化二苯甲酰，过氧化甲乙酮等。

#### (6) 毒性物质和感染性物质的特性

毒性物质是经吞食、吸入或皮肤接触后可能造成死亡或严重受伤或健康损害的物质。毒性物质的毒性分为急性口服毒性、皮肤接触毒性和吸入毒性。分别用口服毒性半数致死量 LD50、皮肤接触毒性半数致死量 LD50，吸入毒性半数致死浓度 LC50 衡量。

感染性物质含有病原体的物质，包括生物制品、诊断样品、基因突变的微生物、生物体和其他媒介，如病毒蛋白等。

常运的毒性物质有:氢氰酸及 61001 氰化物, 砷及其化合物, 四乙基铅, 生漆等。

#### (7) 放射性物质的特性

GB 11806-2004《放射性物质安全运输规程》中规定: 凡放射性比活度大于  $7.4 \times 10^4 \text{Bq/kg}$  的物质均属于放射性物质。其特性是自发和连续地发射出各种射线。过量射线照射可能会引起肌体损伤。因此放射防护是放射性物质安全运输的关键。在射线的危险效应中, 有些放射性物质本身具有极强的化学毒性。例如超铀镅-241 就属于剧毒物质。因此在出现放射性内容物质外逸时, 必须特别注意其化学毒性。

#### (8) 腐蚀性物质的特性

腐蚀性物质指与完好皮肤组织接触不超过 4 小时, 在 14 天的观察期中发现引起皮肤全厚度损毁, 或在温度  $55^\circ\text{C}$  时, 对 S235JR+CR 型或类似型号钢或无覆盖层铝的表面均匀年腐蚀率超过  $6.25 \text{ mm/a}$  的物质。

#### (9) 杂项危险物质和物品的特性

杂项危险物质和物品的特性指具有其它类别未包括的危险的物质和物品, 如危害环境物质、经过基因修改的微生物或组织等多种物品。因此其特性无法详细阐述。

### 2.1.2 道路危险货物运输特点

#### 1、业务专营

只有符合规定资质并办理相关手续的经营者才能从事道路危险货物运输经营业务。国务院及交通部对道路危险货物运输的经营者作了不同于普通货物运输经营者的特别规定。国务院发布的《危险化学品安全管理条例》第三十五条规定, 国家对危险货物的运输实行资质认定制度; 未经资质认定, 不得运输危险货物。交通部 2007 年 2 月 28 日印发的《道路运输管理工作规范(征求意见稿)》中规定, 凡申请从事营业性道路危险货物运输的单位, 及已取得营业性道路运输经营资格需增加危险货物运输经营项目的单位, 均须按规定向设区的市级道路运输管理机构提出书面申请, 经其审核, 符合规定基本条件的, 发给加盖道路危险货物运输专用章的《道路运输经营许可证》和《道路运输证》, 方可经营道路危险货物运输。同时还规定, 凡从事道路危险货物运输的单位, 必须拥有能保证安全运输危险货物的相应设施设备。从事营业性道路危险货物运输的单位, 自有专用车辆 5 辆以上配有相应的专业技术管理人员, 并已建立健全安全操作规程、岗位责任制、车辆设备保养维修和安全质量教育等规章制度。

#### 2、车辆专用

装运危险货物的车辆不同于普通货物运输的车辆,《道路运输管理工作规范(征求意见稿)》对装运危险货物的车辆技术状况和设施作出了特别的规定。这些规定明确了道路危险货物运输车辆和设施必须符合特定的要求,普通货物运输车辆和不符合条件的车辆都不得装运危险货物。

### 3、人员专业

《道路运输管理工作规范(征求意见稿)》中规定,道路运输管理机构应当审核道路危险货物运输驾驶员符合严格的限制条件。

道路运输管理机构应当审核从事道路危险货物运输,装卸管理的装卸管理人员和押运工作的押运人员符合严格的限制条件。

### 4、安全运输

安全运输是危险货物运输的出发点,是区别于其他普通运输的标志。“安全性”有两层含义:一是在危险货物运输中,一定要把安全工作放在首位,一切以安全为重,危险货物运输工作都必须在安全的前提条件下进行;二是必须合法、规范地进行危险货物运输,危险货物由于自身特性各异,事故隐患可能出现在运输过程的任何环节,如果在运输过程中不能按照规范,一丝不苟的执行,违反了危险货物运输的相关规定,那么可能会由于疏忽给社会带来危害和损失,对人类与环境造成危险和伤害。

#### 2.1.3 道路危险货物运输风险影响因素

道路危险品道路运输系统是由人(运输人员、随从人员、管理者和延线影响人员)、机(运输车辆、容器及设备)、环境(道路特征、天气状况、交通状况和自然地理条件等)以及危险品构成的交互影响体系,各因素协调发展,一旦出现能量意外释放或受危险因素诱发就会导致事故发生<sup>[10]</sup>。危险品道路运输系统风险影响因素多,随机性和不确定性大,其风险影响因素可以看作是运输网、运输风险源和影响区域三者相互影响的结果,如图 2.1 危险货物运输风险影响因素所示。

1、道路运输网。道路运输网由路段和节点组成,根据节点划分数个路段,影响路段的因素如下:

- 1) 运输路段的地理位置,多采用参考坐标系的形式。
- 2) 运输网路段类型,如高速路、单车道、多车道等。
- 3) 事故频率,用该路段在某段时间发生交通事故的次数表示。事故率通常是取决于道路类型,如万车事故率、百万专用车辆一公里事故率等,可以从历史事故数据中获

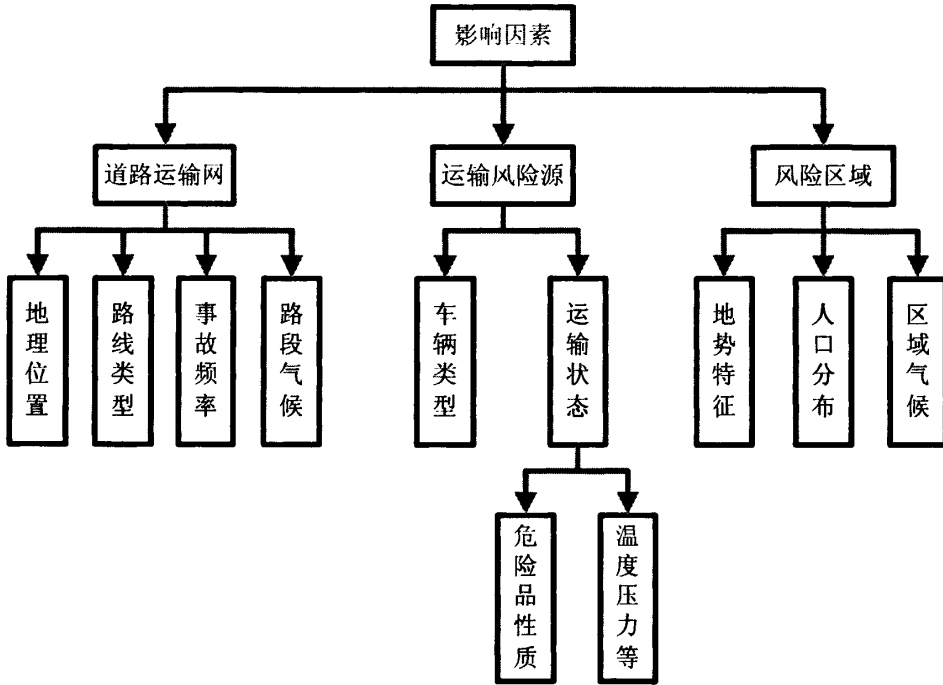


图 2.1 危险货物运输风险影响因素<sup>[11]</sup>

得。

4) 路段气候。路段气候影响该路段的交通事故频率，如路段气候恶劣，路段的交通事故频率则有上升的趋势。

2、运输风险源。危险品运输事故可能发生在路线的任意位置，运输车辆通常看做点风险源，且运输事故率和泄漏概率与运输车辆类型、道路特征、季节、气象状况和风向特征有关。运输风险源主要包括如下：

1) 运输危险品的特性和运输状态，如运输车辆或容器内的温度、压力以及运输总量等；

2) 运输车辆可能的泄漏孔径，与泄漏率和泄漏量有关；

3) 运输车辆可能的泄漏后果类型，如毒气云、爆炸、池火、喷射火等；

4) 运输车辆事故后果概率，由具体孔径的泄漏率和可能的泄漏后果类型概率确定。泄漏危险货物的环境扩散主要依赖于气象条件，如帕斯奎尔稳定等级、温度、风速等。

3、风险区域。危险品运输事故的风险区域特征与可能的事故后果影响因素和影响人员分布有关。事故后果的影响因素包括运输道路特征、气象条件等，主要考虑风向、风速、大气稳定性、温度、湿度等对运输事故后果的影响。路径沿线的气象条件影响了危险货物的扩散，主要随地点、月或季变化，可以从当地最近的气象站获得。风险区域



的暴露人口包括路上和路外人口，如当地居民、乘车人员等可以依据人口普查、当地人事流动数据等获得。

危险货物运输道路的路段固有特征、气象条件、交通状况和人口密度分布因素可划分为 8 类，如表 2.2 路线因变量风险扩大和减缓因素<sup>[11]</sup>所示。

表 2.2 路线因变量风险扩大和减缓因素<sup>[11]</sup>

影响因素	次因素		相对权重
路段固有特征	$F_1$	高速公路	0.8
		一级公路	1.0
		二级公路	1.5
		三级公路	2.0
		四级公路	2.5
	$F_2$	直路	1
		弯路（半径>200m）	1.3
		弯路（半径<200m）	2.2
	$F_3$	平路	1
		斜坡（坡度<5%）	1.1
		陡坡（坡度>5%）	1.2
		下坡（坡度<5%）	1.3
		陡下坡（坡度>5%）	1.5
	$F_4$	每向双车道	1.8
		双车道和应急车道	1.2
3 车道和应急车道		0.8	
$F_5$	桥	1.2	
气象条件	$F_6$	大气状况良好	1
		雨/雾	1.5
		雪/冰雹	2.5
交通状况	$F_7$	低密度（<500 辆/h）	0.8
		中密度（<1250 辆/h, 重型专用车辆<125 辆/d）	1.0
		高密度（>1250 辆/h）	1.4
		高密度（>1250 辆/h, 重型专用车辆>125 辆/d）	2.4
人口分布	$F_8$	山区，单个房屋，没有居民	0.8
		乡村，分散房屋，小居民群	1.0
		郊区，较多房屋，不太拥挤居民群	1.5
		城市，众多房屋，拥挤居民群	2.5

## 2.2 道路危险货物运输路径模型建立

### 2.2.1 道路危险货物运输路径优化基本概念

道路危险货物运输路径优化是车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)一部分，1959 年 Darting 和 Ramser 提出车辆路径问题(VRP)，车辆路径问题(VRP)一般可以描述

如下：对一系列装货点或（和）卸货点，组织适当合理的行车路线，在满足一定的约束条件（如货物需求量、发送量，交发货时间，车辆容量、数目限制，车辆行驶里程、时间限制等）下，达到一定的目标（如最短路程、最小费用、最短时间、最少车辆等）<sup>[12]</sup>。

同时，在 VRP 的基础上，车辆路径问题在学术研究和实际应用上产生了许多不同的延伸和变化型态<sup>[13]</sup>：

1) 多车场车辆路径问题 (Multiple-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP)：所谓的多配送中心的车辆路径问题，就是顾客点的配送工作不再仅由一个配送中心发出的车辆完成配送，而是由分散的多个配送中心供给的一种形式。

2) 分离递送车辆路径优化问题(SDVRP)：所谓的可分离，即顾客点货物配送不再限制只由一辆车一次配送满足，而是可以将配送货物分成几份，由不同的车辆多次配给。此类车辆路径问题增加了运输的灵活性，降低了车辆的空驶率，充分利用汽车的资源。

3) 随机需求车辆路径问题(Stochastic Vehicle Routing Problem,SVRP)：某些值，如客户的数目、客户的需求、客户的服务时间不是事先确定的，而是随机变化的。SVRP 又可以根据随机因素的不同分为：顾客的需求概率是随机的，需求量已知或为单位需求，属于随机顾客的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem With Stochastic Customers ,VRPSC)；每个顾客的需求概率是确定的，顾客的需求量是随机的，属于随机需求的 VRP (Vehicle Routing Problem With Stochastic Demand,VRPSD)；顾客的需求概率和需求量都是随机的，属于随机顾客和需求的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem With Stochastic Customers And Demand,VRPSCD)；需求量是已知的，车辆行驶时间是随机的，属于随机旅行时间的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem With Stochastic Travel Time,VRPST)。

4) 带有时间窗的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem With Time Window)：给定了配送中心和若干顾客点，要求配送中心派出车辆对每个顾客点送货一次且仅一次，并尽可能(或必须)在规定的一定时间范围内到达顾客点(当然有时配送中心也有时间范围限制)，否则将因停车等待或配送延迟而产生损失，目的是设计最小成本的配送路线方案。其中时间范围即时间窗，此问题即为时间窗 VRP 问题。比较而言，时间窗 VRP 除了必须实现经典 VRP 的要求，还要考虑访问时间的限制，这样才能找到合理方案。根据时间约束的严格与否，VRPTW 分为两类：软时间窗的 VRP 和硬时间窗 VRP 问题。软时间窗 VRP 要求车辆尽可能在规定时间内访问需求点，否则将产生等待或延迟损失，从而求得成本最小的运输路径；硬时间窗 VRP 则要求车辆必须在给定的时间范围内访

问需求点，如果超出这个时间范围，所得到的配送路径为非可行解。

5) 配送和收集 VRP：与经典车辆路径问题比较，车辆除了需要完成顾客点货物配给之外，还必须将各顾客点的某些货物回运到配送中心。此类问题分成两种，一种是先配送再收集车辆路径问题(VRPB)，在所有的顾客点的配送任务完成之后，再进行货物回收，其实可以将此问题大略可分解成为两个经典车辆路径问题的叠加。另一种是收集与配送穿插结合的配送\收集车辆路径问题(URPPD)[33]，在配送途中同时收集货物，此类问题车辆容量的约束变的比较复杂，需要同时考虑车内货物的加减问题。

此外，还有路径重复 VRP 以及非遍历的 VRP 等。

## 2.2.2 道路危险货物运输路径优化原则与依据

在 2005 年 3 月 1 日实施的《汽车运输危险货物规则》中规定：“运输危险货物的车辆不得在居民聚居点、行人稠密地段、政府机关、名胜古迹、风景游览区停车。如需在上述地区进行装卸作业或临时停车，应采取安全措施；运输爆炸物品、易燃易爆化学物品以及剧毒、放射性等危险物品，应事先报经当地公安部门批准，按指定路线、时间、速度行驶。”<sup>[14]</sup>

在 2004 年 5 月 1 日起施行的《中华人民共和国道路交通安全法》第四十八条规定：“机动车载运爆炸物品、易燃易爆化学物品以及剧毒、放射性等危险物品，应当经公安机关批准后，按指定的时间、路线、速度行驶，悬挂警示标志并采取必要的安全措施。”

由此可见，确保道路危险货物运输安全是法规明文规定的。因此，危险货物运输应在保证安全的前提下，酌情考虑运输效率，不致使运输资源大量浪费，是进行路线优化的最终目的。

### 1、道路危险货物运输路线优化特点

与普通货物运输一样，道路危险货物运输总是在一定时空域内进行的，为了保障运输安全，必须使其满足一定的运输条件。

道路危险货物运输由于装载的危险货物具有爆炸、放射性、剧毒等特性，对人类生活、生产及自然环境构成潜在的严重危险，因此决定了它的运输与普通道路货物运输所要求条件不同。在进行道路危险货物运输路线优化时首先考虑在道路危险货物运输过程中或车辆发生事故时，不会发生危险货物泄漏、爆炸和挥发或者即使发生上述事故时对其所运输路线的周边环境造成的后果降到最低。所以找到一条较优的行车路线是使危险货物运输的危险性降低到最小程度的重要保证。

## 2、道路危险货物运输路线优化的原则

为全面科学的分析道路危险货物运输路线优化应遵循以下原则:

(1) 以国家制定的有关危险货物运输法律和规章为依据,从可能影响危险货物运输的空间、时间和对象出发,客观地考察有利和不利影响,分析能全面反映道路危险货物运输优化的影响因素;

(2) 深入社会调查,详细考察道路危险货物运输路线及路线周边环境,遵循科学依据;

(3) 道路危险货物运输路线优化为交通管理部门提供指定运输路线时参考,并指导道路危险货物运输企业运输实践。

## 3、道路危险货物运输路径优化目标

明确危险货物运输路线的优化目标是确定货物运输路线的前提。危险货物运输路线的优化目标的选择根据运输的具体要求及客观条件而定,有以下几种情况:

(1) 最低成本:当成本和配送路线之间有密切关系、且成本对最终效益起决定作用时,在确保道路危险货物安全运输的前提下,采用以成本为最低目标比较实用可行。

(2) 较高准时性:在确保道路危险货物安全运输的前提下,建立在控制成本的基础上,以准时性为目标确定货物运输路线就是要将各客户的时间要求和到达各客户点的先后顺序进行协调安排。

(3) 最短路程:如果成本和路程相关性较强,而和其他因素是微相关时,如不考虑道路条件、道路收费对成本的影响,在确保道路危险货物安全运输的前提下,则可以选择路程最短为目标,可以避免许多不易计算的影响因素,大大简化计算。

(4) 合理运力利用:当不需外租或新购车辆时,在确保道路危险货物安全运输的前提下,充分运用现有运力,也可以运力安排为目标,确定配送路线。

针对不同的路径选择问题,要根据具体情况选择优化目标。根据研究的危险货物运输问题的特点,将优化目标设定为:安全运输、路程短、合理运力利用。

## 4、道路危险货物运输路线优化条件

道路危险货物运输优化的目的是保障安全运输,在满足安全运输条件下使运输效益最高。在实际道路危险货物运输中,运输危险货物品种多,不同的危险货物性质差别很大:有的危险货物具有危险性很大的剧毒、爆炸、放射性等特性,有的危险货物多种危险特性。路线的等级也差别很大,既有高速公路、一级公路等运输条件良好的道路,又有三、四级公路等运输条件差的道路。因此,实际中的道路危险货物运输复杂性给运输

路线优化带来很大困难，同时也造成道路危险货物运输路线优化指标选取的不确定性，为了便于问题的解决，并且使问题更具有一般性，提出以下几点假设：

(1)主要考虑影响道路危险货物运输安全因素，包括道路运输路线的生态环境、人口密集区和道路交通状况，假定与危险货物运输安全有关的车辆性能、驾驶员等因素符合有关国家法规标准。

(2)主要考虑有代表性和一般的危险货物运输的危险货物品种，不讨论非常特殊的危险货物运输。汽车运输危险货物分为根据《危险货物分类和品名编号》(GB 6944-2005)。

(3)对于道路危险货物的运输路线，本文所考虑运输路线一般是指国道，国道运输在我国运输中发挥重要作用，具有代表性的意义。

### 2.2.3 道路危险货物运输路径优化模型建立

#### 1、道路危险货物运输路径模型建立的基本理论

有容量约束的道路危险货物运输 VRP 模型是有容量约束的车辆路径问题(Capacitated Vehicle Routing Problem, 简记为 CVRP)中的一种特殊形式。模型的建立与容量约束的车辆路径问题(Capacitated Vehicle Routing Problem, 简记为 CVRP)大体相同。

#### (1) 经典 VRP 定义

所谓经典车辆路径问题，是在车辆路径的调度中，仅仅考虑最基本的货车载重量约束(或容量约束)的最一般化的运输问题，即有容量约束的车辆路径问题(Capacitated Vehicle Routing Problem, 简记为 CVRP)。经典的 VRP 是由一个服务中心(或称为仓库、车场)的车辆向多个服务需求点(客户或顾客点)进行配送服务，在已知等待服务的客户和出发点的位置、顾客需求及车辆的最大负荷的前提下，设计车辆配送路径，规划设计方案，使运输成本最小化，即总代价最小(车辆尽量少，行车总距离尽量短)。并满足以下条件<sup>[15]</sup>：

- 1)客户点位于配送区域内，且单个客户需求量都小于车载重量；
- 2)每个客户都能及时得到配送服务，且只能由一辆汽车访问一次；
- 3)每辆车只能服务一条线路，配送车辆都始发或终止于配送中心；
- 4)每条配送线路上各个客户的需求量之和不超过汽车载重量。

经典 VRP 问题的配送中心位置、客户点位置和道路状况已知，所考虑的费用包括车辆的运行费用及时间、路程等相关费用。充分考虑上述问题的约束条件和优化目标，建立经典 VRP 问题的模型。

## (2) 经典 VRP 模型

一个典型的 VRP 模型可以用回路表示，也可以把时间、路程、花费等转化成运输成本来表示，其基本原理都是相同。

### 1) 经典 VRP 模型的运输回路表示形式

#### a. 基本条件

现有  $m$  辆相同的车辆同时停在物流中心  $P$  点，它需要给  $n$  个顾客提供货物，顾客为  $v_1, v_2, \dots, v_n$ 。并且  $P$  点和客户的坐标(或各点之间的距离)已知。

#### b. 模型目标

确定所需要车辆的数目  $N$ ，并指派这些车辆到一个回路中，同时包括回路内的路径选择，使得运输总距离  $s$  最小。

#### c. 约束条件

①  $N \leq m$ ;

②  $Q_j$  表示第  $i$  辆车在其子回路上对应的第  $j$  个客户的需求量。设单个客户需求数量  $Q_j$  不超过车的载重量。因此，设每个客户同一时刻只能接受一辆车的服务。一个子回路对应一辆车，设每条回路上的客户数为  $l_i$ ， $l_i$  是车辆对应的编号，由集合  $c_i$  表示第  $i$  辆车对应的路径， $c_{ij}$  表示第  $i$  辆车对应的子回路中顺序为  $j$  的客户点。而  $l_i=0$ ，则表示车没有参加服务。由此可知  $\sum_{i=1}^N l_i = n$ 。

③ 车辆完成任务之后都要回到源点  $v_0$ 。

④ 车辆不能超过最大载重量  $W_i$  和最大行驶长度  $L_i$  的限制。

#### d. 数学模型

假设  $d_{i(j-1)j}$  表示第  $i$  辆车对应的路线中顺序排列的第  $j-1$  个客户和第  $j$  个客户之间的距离； $d_{i(l_i)X_0}$  表示第  $i$  辆车对应的路线中第  $l_i$  个客户与源点  $v_0$  之间的距离。由此可以建立如下的数学模型：

$$\min s = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{l_i} d_{i(j-1)j} + d_{i(l_i)X_0} \cdot \text{sign}(l_i) \right) \quad (2.1)$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^{l_i} Q_{ij} \leq w_i \quad i=1, \dots, N \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^{l_i} d_{i(j-1)j} + d_{i(l_i)0} \cdot \text{sign}(l_i) \leq L_i \quad (2.3)$$

$$0 \leq l_i \leq n \quad (2.4)$$

$$\sum_{i=1}^N l_i = n \quad (2.5)$$

$$c_i = \{c_{ij} \mid c_{ij} \in \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, j=1, 2, \dots, l_i\} \quad (2.6)$$

$$c_i \cap c_j = \emptyset \quad \forall i \neq j \quad (2.7)$$

$$\text{sign}(l_i) = \begin{cases} 1 & l_i \geq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$N \leq m \quad (2.9)$$

模型中:

(2.1)为目标函数, 使车辆在完成配送任务时的总运行距离最短;

(2.2)为车辆的能力约束, 每个子回路中客户的需求总量不超过车辆的最大载重量, 保证某辆车所访问的全部客户的需求量不能超过车辆本身的载重量;

(2.3)表示每个子回路中车辆的运行长度不超过其最大行驶里程;

(2.4)表示每辆车对应的客户数不超过总的客户数;

(2.5)表示所有参与运行的车, 其所服务的客户总数与实际的客户数相等, 即保证每个客户都得到服务;

(2.6)表示每辆车服务的对应客户集合;

(2.7)表示每个客户在同一时刻只能由一辆车来进行服务;

(2.8)表示第*i*辆车是否参与服务;

(2.9)表示不超过所提供的最大车辆数的限制。

## 2) 经典 VRP 模型的运输成本表示形式

设某配送中心可用车辆集合为  $q_k (k=1, 2, \dots, m)$ ,  $q_k$  为车辆的载重量, 用户为  $i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  (假定配送中心的代码为 0),  $g_i$  为用户  $i$  的货运量。由于是可混装的运输, 因此

有  $\max g_i < \max q_k$ 。设  $d_{ij}$  表示用户  $i$  与用户  $j$  之间的最短距离，设  $t_{ij}$  为车辆从用户  $i$  行驶到用户  $j$  的时间。 $C_{ij}$  为目标函数的成本系数，当它为用户  $i, j$  之间的距离  $d_{ij}$  时，则目标为使车辆的总运距最短；当它为用户  $i, j$  的运输时间  $t_{ij}$  时，则目标为使车辆的总运行时间最短。

这里引用文献<sup>[25]</sup>提出的数学模型，为了构造数学模型方便，将车场编号 0，任务编号 1, ..., n，任务及车场均以点  $i$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ) 来表示。首先定义如下变量：

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{客户 } i \text{ 的配送由车辆 } k \text{ 完成} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 从客户点 } i \text{ 行驶到客户点 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2.11)$$

则经典 VRP 运输成本表示形式模型如下：

$$\min \quad z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^m c_{ij} x_{ijk} \quad (2.12)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^n g_i y_{ik} \leq q_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2.13)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2.14)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{0k} = m \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} = y_{jk} \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2.16)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijk} = y_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2.17)$$

$$X = (x_{ijk}) \in S \quad (2.18)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1 \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2.19)$$

模型中，式(2.12)表示费用极小的目标；

式(2.13)表示车辆  $k$  承担的任务量之和不大于车辆的容量；

式(2.14)表示任务  $i$  只能由一辆车完成；



式(2.15)表示由物流中心 0 发出  $m$  辆车;

式(2.16)和式(2.17)表示两个变量之间的关系;

式(2.18)为支路消去约束, 能够避免出现与危险货物物流中心相分离的线路;

式(2.19)为变量的取值约束。

## 2、道路危险货物运输路径模型的建立

有容量约束的道路危险货物运输 VRP 是有容量约束的车辆路径问题(Capacitated Vehicle Routing Problem, 简记为 CVRP)中的一种特殊形式。模型的建立与有容量约束的车辆路径问题(Capacitated Vehicle Routing Problem, 简记为 CVRP)大体相同。因此, 在有容量约束的车辆路径问题(Capacitated Vehicle Routing Problem, 简记为 CVRP)模型的基础上, 根据道路危险货物运输路径优化原则, 建立有容量约束的道路危险货物运输 VRP 模型。

### (1)基本条件

现有  $m$  辆相同的车辆同时停在物流中心  $P$  点, 它需要给  $n$  个顾客提供货物, 顾客为  $v_1, v_2, \dots, v_n$ 。并且  $P$  点和客户的坐标(或各点之间的距离)已知。

### (2)模型目标

在确保危险货物安全运输的前提下, 确定所需要车辆的数目  $N$ , 并指派这些车辆到一个回路中, 同时包括回路内的路径安排和调度, 使得运输总距离  $s$  最小。

### (3)约束条件

a.  $N \leq m$ ;

b.  $Q_{ij}$  表示第  $i$  辆车在其子回路上对应的第  $j$  个客户的需求量。设单个客户需求数量  $Q_{ij}$  不超过车的载重量。因此, 设每个客户同一时刻只能接受一辆车的服务。一个子回路对应一辆车, 设每条回路上的客户数为  $l_i$ ,  $l_i$  是车辆对应的编号, 由集合  $c_i$  表示第  $i$  辆车对应的路径,  $c_{ij}$  表示第  $i$  辆车对应的子回路中顺序为  $j$  的客户点。而  $l_i=0$ , 则表示

车没有参加服务。由此可知  $\sum_{i=1}^N l_i = n$ 。

c. 车辆完成任务之后都要回到源点  $v_0$ 。

d. 车辆不能超过最大载重量  $W_i$  和最大行驶长度  $L_i$  的限制。

e. 若某一路段为禁止通行路段，则该路段的长度为  $\infty$ 。

#### (4)数学模型

假设  $d_{i(j-1)j}$  表示第  $i$  辆车对应的路线中顺序排列的第  $j-1$  个客户和第  $j$  个客户之间的距离； $d_{i(l_i)\chi_0}$  表示第  $i$  辆车对应的路线中第  $l_i$  个客户与源点  $v_0$  之间的距离。由此可以建立如下的数学模型：

$$\min s = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{l_i} d_{i(j-1)j} + d_{i(l_i)\chi_0} \cdot \text{sign}(l_i) \right) \quad (2.20)$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^{l_i} Q_{ij} \leq w_i \quad (2.21)$$

$$\sum_{j=1}^{l_i} d_{i(j-1)j} + d_{i(l_i)\chi_0} \cdot \text{sign}(l_i) \leq L_i \quad (2.22)$$

$$0 \leq l_i \leq n \quad (2.23)$$

$$\sum_{i=1}^N l_i = n \quad (2.24)$$

$$c_i = \{c_{ij} \mid c_{ij} \in \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, j = 1, 2, \dots, l_i\} \quad (2.25)$$

$$c_i \cap c_j = \emptyset \quad \forall i \neq j \quad (2.26)$$

$$\text{sign}(l_i) = \begin{cases} 1 & l_i \geq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$N \leq m \quad (2.28)$$

$$d_{i(j-1)j} = \infty \quad (2.29)$$

模型中:(2.20)为目标函数，使车辆在完成配送任务时的总运行距离最短；

(2.21)为车辆的能力约束，每个子回路中客户的需求总量不超过车辆的最大载重量，保证某辆车所访问的全部客户的需求量不能超过车辆本身的载重量；

(2.22)表示每个子回路中车辆的运行长度不超过其最大行驶里程；

(2.23)表示每辆车对应的客户数不超过总的客户数；

(2.24)表示所有参与运行的车，其所服务的客户总数与实际的客户数相等，即保证每个客户都得到服务；

(2.25)表示每辆车服务的对应客户集合;

(2.26)表示每个客户在同一时刻只能由一辆车来进行服务;

(2.27)表示第  $i$  辆车是否参与服务;

(2.28)表示不超过所提供的最大车辆数的限制;

(2.29)表示第  $j-1$  个客户和第  $j$  个客户之间的路段为禁止通行路段,则该路段的长度为  $\infty$ 。

### 2.3 小结

1、根据道路危险货物的分类情况,分别介绍了每类危险货物的危险特性,并分析了危险货物运输业务专营、车辆专用、人员专业和安全运输四个特点,为道路危险货物的安全运输提供参考。

2、根据道路危险货物运输系统的组成,把道路危险货物运输影响因素看作是运输网、运输风险源和风险区域三者相互影响的结果,并分别对其进行分析。

3、分别介绍了经典 VRP 模型的运输回路表示形式和运输成本表示形式,根据道路危险货物运输路线优化特点和道路危险货物运输路线优化的原则,在经典 VRP 模型的运输回路表示形式的基础上,提出了有容量约束的道路危险货物运输 VRP 模型表示形式。

## 第三章 蚁群算法的改进

### 3.1 基本蚁群算法背景介绍

蚁群算法是受到人们对自然界中真实蚁群的集体行为的研究成果的启发而提出的一种基于种群的模拟进化算法,属于随机搜索算法,由意大利学者 M.Dorigo 等人首先提出。M.Dorigo 等人首次提出该方法时,充分利用了蚁群搜索食物的过程与著名的旅行商问题(TSP)之间的相似性,通过人工模拟蚂蚁搜索食物的过程,即通过个体之间的信息交流与相互协作最终找到从蚁穴到食物源的最短路径来求解 TSP<sup>[16]</sup>。

蚁群算法通过由候选解组成的群体的进化过程来寻求最优解,特别适合于在离散优化问题的解空间进行多点非确定性搜索,已应用于车辆路线问题(VRP)、旅行商问题(TSP)、作业安排调度问题(JSP)等多个经典离散组合优化问题<sup>[17,18,19,20,21]</sup>。

目前对蚁群算法的研究,不仅有算法意义上的研究,还有从仿真模型角度的研究,并且不断有学者提出对蚁群算法的改进方案:有的将蚁群算法同遗传算法相结合:蚁群系统加入变异特征;最大最小蚁群算法(MMAS)等。现阶段对蚁群算法的研究还只是停留在仿真阶段,尚未能提出一个完善的理论分析,对它的有效性也没有给出严格的数学解释。但是,从以前模糊控制所碰到的情况看,理论上的不完善并不妨碍应用,有时应用还会超前于理论,并推动理论研究,蚁群算法也是如此。

蚁群算法原型本身就是一个寻找最短路径的模型,因此它在路径优化方面有着天然的优势,目前已经有不少蚁群算法在 TSP 问题中成功运用的例子。属于物流配送路径优化问题的道路危险货物运输路径优化问题和 TSP 问题相比有共同点——都是寻找遍历所有客户点的较短路径的问题,也有其特性——有更多更复杂的约束条件和优化目标。本文就是要研究一种基本蚁群算法的优化路径算法,使该算法在危险货物路径优化问题中有较好的实际效果。

蚁群优化算法最初用于解决旅行商问题。自从在著名的旅行商问题(TSP)和工件排序问题上取得成效以来,已经陆续渗透到其他领域中,如图着色问题,大规模集成电路设计、通讯网络中的路由问题以及负载平衡问题、CVRP 等。CVRP 问题是 VRP 问题的一种情况,也是 VRP 问题中最基本的问题。因此把蚁群算法运用于 VRP 问题时,首先求解 CVRP 问题也变得理所当然的。CVRP 属于 NP-hard 问题,因为 TSP 问题属于 CVRP 问题的子问题,即 CVRP 问题的一种特殊情况。实际上, CVRP 问题比 TSP 问题更难于

求解。CVRP 问题包含两种子问题：bin-packing 问题(背包问题)，目标是在每辆车子承载量规定的前提下，使所有顾客进行分组组合，使每辆车子达到或接近最大承载量；最短路径问题，目标是对于每辆车子而言，访问车内所有顾客的路径达到最小，这就类似于求解一个 TSP 问题。

## 3.2 基本蚁群算法模型

### 3.2.1 蚁群算法原理

蚁群系统(Ant System)是由意大利学者 Marco Dorigo (1991)等人于 20 世纪 90 年代初提出的一种基于蚂蚁种群的新型优化算法，它通过模拟自然界蚂蚁寻食过程中通过信息素 (Pheromone) 的相互交流从而找到由蚁巢至食物的最短路径的现象，提出了一种基于信息正反馈原理的蚁群优化算法并用于解决了一系列组合优化问题。

根据昆虫学家的观察，发现自然界的蚂蚁虽然视觉不发达，但它可以在没有任何提示的情况下找到从食物源到巢穴的最短路径，并且能在环境发生变化(如原有路径上有了障碍物)后，自适应地搜索新的最佳路径。蚂蚁在走过的路上会释放一种特殊的分泌物—信息素(Pheromone)，使得一定范围内其它的蚂蚁能够觉察到并由此影响他们的行为，当一条路上的信息激素越来越多（随时间的推移信息激素会逐渐减弱）选择这条路的蚂蚁也越多。

图 3.1 中蚂蚁正在连接食物源和巢穴的最短路径上移动。我们假设 A 点是蚂蚁的巢穴，而 E 点是食物。

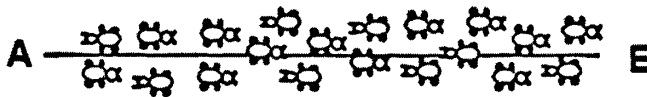


图 3.1 无障碍的蚁群觅食

蚂蚁为了形成和保持这条路径所使用的主要方法是信息素轨迹。蚂蚁在行走期间投下一定量的信息素(外激素)，每只蚂蚁在概率上更喜欢跟随信息素多的方向。当突然出现意想不到的障碍物阻断了初始路径后，从 A 点到 E 点的蚂蚁就必须在 B 点决定应该往左还是往右走。而从 E 点到 A 点的蚂蚁也必须在 D 点决定选择哪条路径。这种决定会受到各条路径上以往蚂蚁留下的信息素浓度(即残留信息浓度)的影响。如果向 C 方向的路径上的信息素浓度比较大，那么向 C 方向的路径被蚂蚁选中的可能性也就比较大。

些(见图 3.2)。

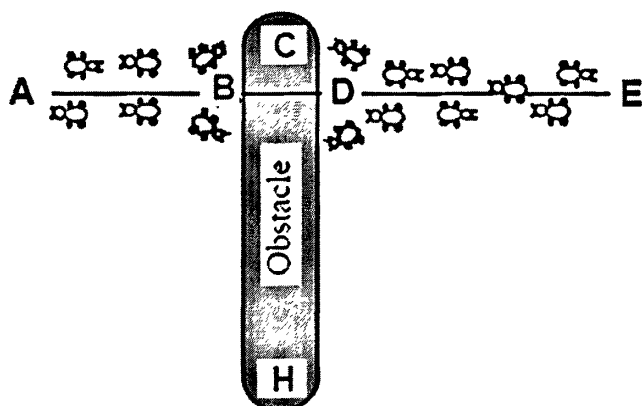


图 3.2 突然加入障碍的蚁群觅食

对障碍出现后第一个到达 B 点或 D 点的蚂蚁而言，因为没有信息素的影响，所以它们选择向 C 方向或者向 H 方向的可能性是一样的(见图 3.3)

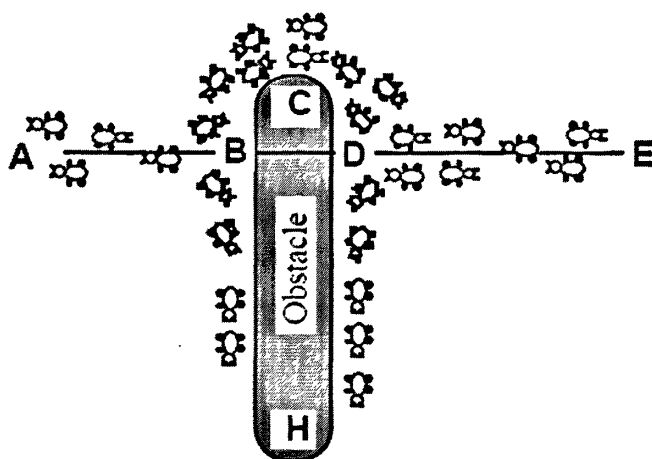


图 3.3 有障碍的蚁群觅食

以从 A 点到 E 点的蚂蚁为例进行说明，对于从 E 点到 A 点的蚂蚁而言过程基本是一样的。由于路径 BCD 比路径 BHD 要短，因此选择 BCD 路径的第一只蚂蚁要比选择 BHD 的第一只蚂蚁早到达 D 点。此时，从 D 点向 B 点看，指向路径 DCB 的信息素浓度要比指向路径 DHB 的信息素浓度大。因此从下一时刻开始，从 E 点经 D 点达到 A 点的蚂蚁选择 DCB 路径比选择 DHB 路径的可能性要大得多。从而使路径 BCD(或 DCB)上信息素浓度与路径 BHD(或 DHB)上信息素浓度的差变大。而信息素浓度差变大的结果是选择路径 BCD(或 DCB)路径的蚂蚁进一步增加，这又导致信息素浓度差进一步加大。

那些偶尔选择了障碍物附近较短路径的蚂蚁与选择较长路径的蚂蚁相比，将会更快地重新组成被阻断的信息素轨迹。因此，在单位时间内较短的路径会接收到数量较多的信息素，这将依次引起更多数量的蚂蚁选择这条较短的路径。由于这个正反馈(自动催化)过程，很快所有蚂蚁将选择这条较短的路径(见图 3.4)。

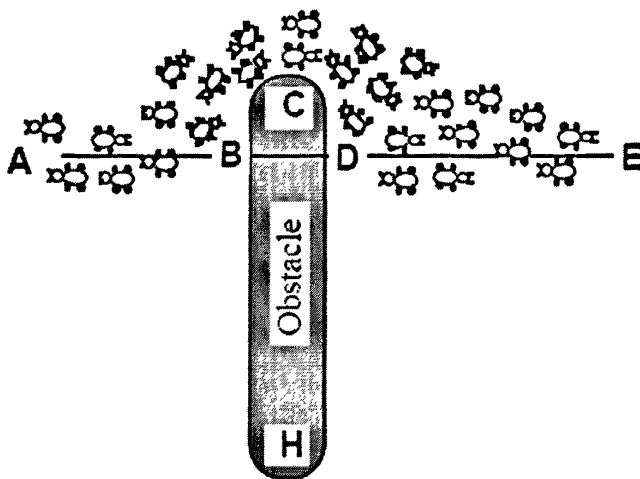


图 3.4 有障碍的蚁群觅食最终路径

蚁群算法是受到对真实蚁群行为研究的启发提出来的，这里所说的“蚁群算法”更恰当的名称应为“人工蚁群算法”。上边是一个人工蚁群系统寻找最短路径的例子。下面我们用这个例子来具体说明蚁群算法的原理<sup>[16]</sup>。

如图 3.5-a 所示:路径 DH, BH 和 BCD 的路程长度  $d$  为 1; C 是路径 BCD 的中点假设在每个单位时间内，有 30 只蚂蚁从 A 来到 B, 30 只蚂蚁从 E 来到 D。每只蚂蚁单位时间内行进路程为 1。蚂蚁行进过程中在单位时间内留下 1 个浓度单位的信息素，1 个浓度单位的信息素在一个时间段  $(t, t+1)$  结束后瞬间完全挥发。

如图 3.5-b 所示:  $t=0$  时，在 B 和 D 点各有 30 只蚂蚁，由于此前路径上没有信息素，它们随机地选择路径，在 DH, DC, BH 和 BC 上各有 15 只蚂蚁。

如图 3.5-c 所示:  $t=1$  时，又有 30 只蚂蚁到达 B，它们发现在 BH 上的信息素浓度为 15, BC 上信息素浓度为 30(是由 15 只 BC 走向和 15 只 CB 走向的蚂蚁共同留下的)，因此选择 BC 路径的蚂蚁数的期望值是选择 BH 蚂蚁数的 2 倍。所以，20 只蚂蚁选择 BC，10 只蚂蚁选择 BH。同样的情况发生在 D 点。这个过程一自持续下去，自到所有人上蚂蚁最终选择最短路径 BCD (或 DCB)。

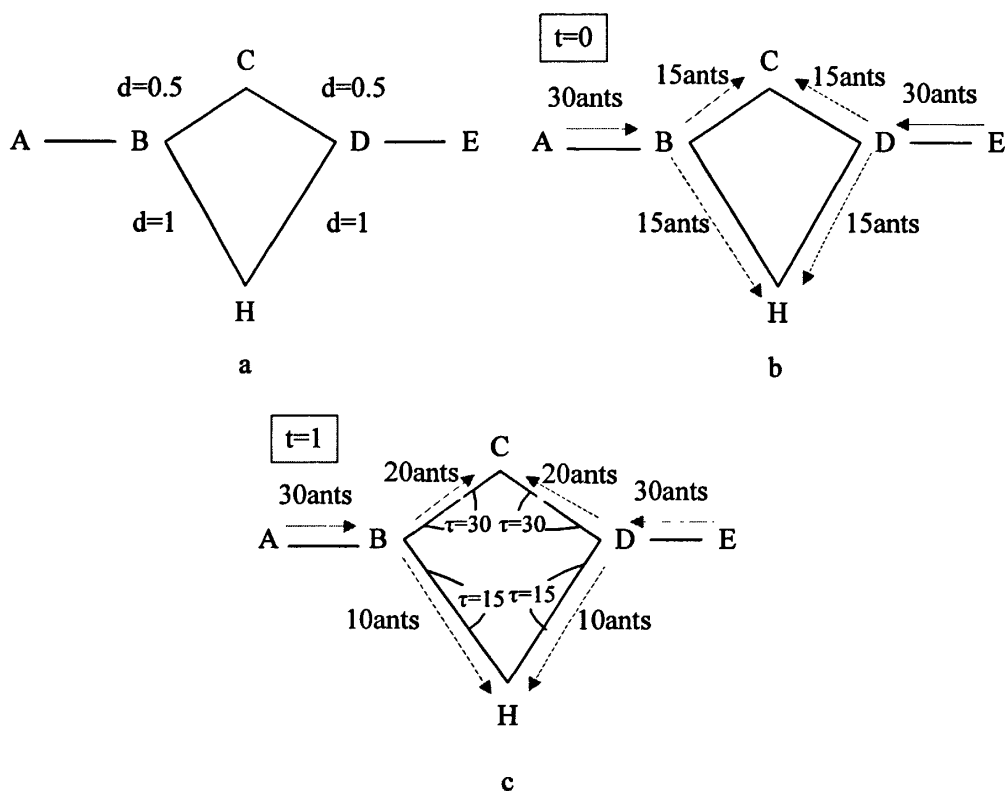


图 3.5 人工蚁群的寻优过程

可以看出人工蚂蚁生活在离散的时空中。经过改进，人工蚂蚁与真实蚂蚁相比主要有以下几点区别。

(1) 人工蚂蚁具有记忆能力，而真实蚂蚁没有记忆能力。人工蚂蚁可以记住曾经走过的路径或访问过的节点，这样对提高算法效率是有益的。

(2) 人工蚂蚁不像真实蚂蚁那样是完全“瞎”的。人工蚂蚁可以根据一些启发信息来指导自己的选择。

(3) 人工蚂蚁“生活”在一个离散时间的环境中，而真实蚂蚁生活在连续时间的环境中。这一点对于解决分步骤的优化问题是十分重要的。

人工蚁群系统正是有了这些不同于真实蚂蚁的特性，才使得该系统具有更高的智能性，在寻优过程中具有更高的效率，适合于解决更多类型的问题。

人工蚂蚁寻找最优路径的方法就是根据上面的真实蚂蚁寻找最优路径的方法提出的，即让人工蚂蚁根据路径上的相当于信息素的数字信息量的强度选择路径，并在所经过的路径上留下相当于信息素的数字信息量，然后随着时间的推移，最优路径上的数字信息量将积累得越来越大，从而被选择的概率也越来越大，最终所有人工蚂蚁将趋向于



选择该路径。这种模拟蚁群搜索食物的过程与著名的旅行商问题非常相似，因而最初人工蚁群算法被提出用于求解旅行商问题。

### 3.2.2 蚁群算法基本模型

在使用蚁群算法求解现实问题时，首先生成具有一定数量蚂蚁的蚁群，让每一只蚂蚁建立一个解或解的一部分，然后每只蚂蚁从问题的初始结点出发，根据路径上信息素的浓度来选择下一个要转移到的结点，直到建立起一个解，每只蚂蚁根据所找到的解的好坏程度在所经过的路径上释放与解的质量成正比例的信息素。之后，每只蚂蚁又开始新的求解过程，直到寻找到满意解。

由于蚁群算法最早提出是结合 TSP 问题建立模型的，所以我们以求解  $n$  个城市的 TSP 问题为例说明蚁群系统模型。随机生成  $n$  个城市结点，将  $m$  只蚂蚁分别放在每一个城市上去，每只蚂蚁通过“状态转移规律”选择下一个要访问的城市，每只蚂蚁趋向于访问具有较高信息素浓度的路径。当所有的蚂蚁完成了一次巡回后，即启动全局信息素更新机制及信息素挥发机制，而每只蚂蚁在它走过的路径的每一条弧上释放与它所找到的路径长度成反比的信息素。之后，每只蚂蚁又开始新的巡游，直到满足停止条件为止。

为模拟实际蚂蚁的行为，我们首先引入如下的记号：

$m$ ——蚁群中蚂蚁数量；

$b_i(t)$ —— $t$  时刻位于城市  $i$  的蚂蚁个数  $m = \sum_{i=1}^n b_i(t)$ ；

$d_{ij}$ ——两城市  $i$  和  $j$  之间的距离；

$\eta_{ij}$ ——路径  $(i, j)$  的能见度，反映由城市  $i$  转移到城市  $j$  的启发程度；

$\tau_{ij}$ ——路径  $(i, j)$  上的信息素轨迹强度；

$p_i^k$ ——蚂蚁  $k$  的转移概率， $i$  是已访问的城市， $j$  是尚未访问的城市；

$\alpha$  : 轨迹的相对重要性 ( $\alpha \geq 0$ );  $\beta$  : 能见度的相对重要性 ( $\beta \geq 0$ )

$(i, j=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m)$

每只蚂蚁在系统中的循环特征：

(1) 在从城市  $i$  到城市  $j$  的运动过程中或是在完成一次循环后，蚂蚁在路径  $(i, j)$  上释放一种物质，称为信息素轨迹；

(2)蚂蚁以某一概率选择下一个将要访问的城市,这个概率是两城市间距离和连线两城市的路径上的信息素轨迹量的函数;

(3)为了满足问题的约束的条件,在完成一次循环以前,不允许选择已经访问过的城市。

初始时刻,各条路径上的信息素量相等,设  $\tau_{ij}(0)=C$  ( $C$  为常数)。蚂蚁  $k(k=1, 2, \dots, m)$  在运动过程中根据各条路径上的信息素量和自己的判断决定转移方向。蚂蚁系统所使用的状态转移规则被称为随机比例规则,它给出了位于城市  $i$  的蚂蚁  $k$  选择移动到城市  $j$  的概率。在  $t$  时刻,蚂蚁  $k$  在城市  $i$  选择城市  $j$  的转移概率  $p_{ij}^k$  为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta} & j \in allowed_k \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3.1)$$

其中,  $allowed_k$  表示蚂蚁  $k$  下一步允许选择的城市。由上式可知,转移概率  $p_{ij}^k$  与  $[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta$  成正比,  $\eta$  为能见度因数,  $\alpha$  和  $\beta$  为两个参数,分别反映蚂蚁在运动过程中所积累的信息和启发信息在蚂蚁选择路径中的相对重要性。与真实的蚂蚁不同的是人工蚂蚁系统具有记忆功能。为了满足蚂蚁必须经过所有  $n$  个不同的城市这个约束条件,为每只蚂蚁都设计了一个数据结构,称为禁忌表(tabu list)。禁忌表记录了在  $t$  时刻蚂蚁已经走过的城市,不允许该蚂蚁在本次循环中再经过这些城市。当本次循环结束后,禁忌表被用来计算该蚂蚁当前所建立的解决方案。之后,禁忌表被清空,该蚂蚁又可以自由地进行选择。

在蚁群系统中其状态的转移规则采用伪随机比例规则,按如下所示:

$$s = \begin{cases} \max \left\{ \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in allowed} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, j \in allowed \right\} & \text{if } q \leq q_0 \\ s & \text{others according to (3.1)} \end{cases} \quad (3.2)$$

式中:  $q$  是一个在  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数,  $q_0$  是一个参数 ( $0 \leq q_0 \leq 1$ ),  $S$  为根据式 3.1 给出的概率分布所选出的一个随机变量。参数  $q_0$  的大小决定了利用先验知识与探索新路径之间的相对重要性: 每当一只位于城市  $i$  的蚂蚁选择下一个将要到达的城市

S 时，它选取一个随机数  $0 \leq q_0 \leq 1$ 。如果  $q \leq q_0$ ，根据先验知识选择最好的边，否则按式(1)概率选择一条边。

当经过  $n$  个时刻，蚂蚁完成一次循环，各路径上的信息素量根据下式调整：

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (3.3)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (3.4)$$

其中：

$\Delta\tau_{ij}^k$  表示第  $k$  只蚂蚁在本次循环中留在路径  $(i,j)$  上的信息素量，它的值视蚂蚁表现的优劣程度而定，路径越短，信息素释放得就越多；

$\Delta\tau_{ij}$  表示在本次循环中路径  $(i, j)$  上的信息素量的增量；

$\rho$  为是信息素残留率 ( $0 < \rho < 1$ )，表示轨迹持久性（设置系数  $0 < \rho < 1$  来避免各路径上的信息素轨迹量的无限累加；

为计算信息素量的增量，M. Dorigo 提出下列三种算法<sup>[22]</sup>：

蚁周模型(Ant-Cycle System)：

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{如果第k个蚂蚁经过该路径} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (3.5)$$

蚁密模型(Ant-Density System)：

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q & \text{如果第k个蚂蚁经过该路径} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (3.6)$$

蚁量模型(Ant-Quantity System)：

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{d(i,j)} & \text{如果第k个蚂蚁经过该路径} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (3.7)$$

其中， $Q$  为一个常量， $L_k$  为蚂蚁  $k$  此次走过的路径长度， $d(i,j)$  是城市  $i$  和城市  $j$  的距离。

蚁周系统、蚁密系统和蚁量系统的差别在于  $\Delta\tau_{ij}$  的计算表达式不同。在蚁密系统模型中，一只蚂蚁在经过的路径  $(i, j)$  上释放的信息素量为每单位长度  $Q$ ；在蚁量系统模

型中，一只蚂蚁在经过的路径 $(i, j)$ 上释放的信息素量为每单位长度 $\frac{Q}{d(i,j)}$ 。从定义中

我们可以很清楚地看出，在蚁密系统模型中，一只蚂蚁从 $i$ 向着 $j$ 移动的过程中路径 $(i, j)$ 上信息素轨迹强度的增加与 $d(i,j)$ 无关。而在蚁量系统模型中，它与 $d(i,j)$ 成反比。也就是说，在蚁量模型中短路径对蚂蚁将更有吸引力，因而进一步增加了转移概率等式中能见度因数 $\eta_{ij}$ 的值。

这三种模型的区别在于前者利用的是全局信息，而后两种模型中利用的是局部信息。实验结果表明，蚁周系统算法的效果最好，这是因为它用的是全局信息 $\frac{Q}{L_k}$ ；而其余

两种算法用的是局部信息 $\frac{Q}{d(i,j)}$ 和 $Q$ 。蚁周系统的更新方法很好地保证了残留信息不至

于无限积累，如果路径没有被选中，那么上面的残留信息会随时间的推移而逐渐减弱，这使算法能“忘记”不好的路径，即使路径经常被访问也不至于因为 $\tau_{ij}$ 的积累，而产生 $\tau_{ij} \gg \eta_{ij}$ 使期望值的作用无法体现。

### 3.2.3 蚁群算法参数设置

蚁群算法中 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 等参数对算法性能有很大的影响。 $\alpha$ 值的大小表明留在每个结点上的信息量受重视的程度， $\alpha$ 值越大，蚂蚁选择以前经过的路线的可能性越大，但过大会使搜索过早陷于局部最小解； $\beta$ 的大小表明启发式信息受重视的程度， $\beta$ 值越大，蚂蚁选择离它近的城市的可能性也越大； $\rho$ 表示信息素的保留率，如果它的值取得不恰当，得到的结果会很差。根据以上分析，研究参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 的最佳配置，对发挥蚁群算法在实际问题中的作用有很重要的意义。

Dorigo M 等最早对 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 、 $m$ 等参数的选择进行了初步研究；Botee HM 等<sup>[23]</sup>用遗传算法求得 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 、 $m$ 的最优组合，但是这种用遗传算法求解组合参数的方法比较麻烦；随后，段海滨等<sup>[24]</sup>詹士昌等<sup>[25]</sup>、叶志伟等<sup>[26]</sup>在蚁群算法的参数分析和优化组合方面进行了大量有成效的研究上作。

### 1、信息素残留率 $\rho$ 的设置

在蚁群算法中，人工蚂蚁是具有人类记忆功能的，随着时间的推移，以前留下的信息将要逐渐消逝。在算法模型中用参数  $\rho$  表示信息残留程度。蚁群算法存在着收敛速度慢、易于陷入局部最优等缺陷。而信息素保留率  $\rho$  的大小直接关系到蚁群算法的全局搜索能力及其收敛速度。由于信息素保留率  $\rho$  较大，当要处理的问题规模比较大时，会使那些从来未被搜索到的路径(可行解)上的信息量减小到接近于 0，因而降低了算法的全局搜索能力。而且当  $\rho$  过小时，以前搜索过的路径被再次选择的可能性过大，也会影响到算法的随机性能和全局搜索能力；反之，通过增大信息素保留率  $\rho$  虽然可以提高算法的随机性能和全局搜索能力，但又会使算法的收敛速度降低<sup>[27]</sup>。关于蚁群算法中信息素保留率  $\rho$  对算法性能的影响及其在实际应用中的选择，可以通过计算机仿真实验来分析和确定。通过下面的仿真实验来分析。

实验：求解经典 VRP 问题实例 St70，在客户的配送需求及运行参数值不变的情况下，通过修改  $\rho$  的值，观察对算法性能的影响（如表 3.2 所示），以便找到  $\rho$  与近似最优解的规律（ $Q=100$ 、 $m=50$ 、 $\alpha=1$ 、 $\beta=5$ ）。

表 3.1 参数  $\rho$  对算法性能的影响实验

$\rho$ 值	0.3	0.6	0.67	0.8	0.95
配送总距离	678.59	677.10	681.21	677.19	680.76

从表 3.1 可以看出，参数  $\rho$  取值在[0.5, 0.9]之间，能够求得较优解。这与参考文献<sup>[28]</sup>中的结论相同。

### 2、蚂蚁数量 $m$ 的设置

蚁群算法是一种随机搜索算法，与其它模拟进化算法一样，通过多个候选解(可行解的一个子集)组成的群体的进化过程来寻求最优解，在该过程中既需要每个个体的自适应能力，更需要群体的相互协作。蚁群在搜索过程中之所以表现出复杂而有序的行为，个体之间的信息交流与相互协作起着至关重要的作用。对于 VRP 问题，单只蚂蚁在一轮循环中所移动的路径，表现为问题可行解集中的一个解， $m$  只蚂蚁在一次循环中所移动的路径，则表现为可行解集的一个子集。因此，子集越大（蚂蚁数目多），可以提高

蚁群算法的全局搜索能力与算法的稳定性,但蚂蚁数目过多时,会使大量的曾被搜索过的解(路径)上的信息素浓度的变化比较均匀,正反馈的作用减弱,搜索的随机性虽然得到了加强,但是收敛速度减慢。子集较小(蚂蚁数目少),则当要处理的问题规模比较大时,从未被搜索到的解(路径)上的信息素浓度减小到接近于 0,全局搜索的随机性减弱,虽然收敛速度加快,但是算法的全局性能降低,算法的稳定性差,容易出现过早停滞现象<sup>[25]</sup>。

在实际 VRP 问题中如何选择合适的蚂蚁数目  $m$ , 通过仿真实验来分析和确定。Dorigo<sup>M</sup><sup>[28]</sup>的实验得出的结论是  $m$  的理想值就是 VRP 的客户规模。

### 3、启发因子 $\alpha$ 、 $\beta$ 的设置

信息启发因子  $\alpha$  反映蚂蚁在运动过程中所积累的信息量(即残留信息量  $\tau_{ij}(t)$ )在指导蚁群搜索中的相对重要程度,期望值启发因子  $\beta$  反映蚂蚁在运动过程中启发信息(即期望值  $\eta_{ij}$ )在指导蚁群搜索中的相对重要程度。而信息启发因子  $\alpha$  的大小则反映了蚁群在路径搜索中随机性因素作用的强度,其值越大,蚂蚁选择以前走过的路径的可能性越大,搜索的随机性减弱,当  $\alpha$  值过大也会使蚁群的搜索过早陷于局部最优;期望值启发因子  $\beta$  的大小反映了蚁群在路径搜索中先验性、确定性因素作用的强度,其值越大,蚂蚁在某个局部点上选择局部最短路径的可能性越大,虽然搜索的收敛速度得以加快,但蚁群在最优路径的搜索过程中随机性减弱,易于陷入局部最优<sup>[25]</sup>。

蚁群算法的全局寻优性能,要求蚁群的搜索过程必须有很强的随机性;而蚁群算法的快速收敛性能,又要求蚁群的搜索过程必须要有较高的确定性。因此,两者对蚁群算法性能的影响和作用相互配合、密切相关的。

$\alpha$ 、 $\beta$  的取值越大,计算量也越大,计算时间就越长,所以,在能获得满意解的情况下,建议  $\alpha$ 、 $\beta$  取相对较小的值。表是利用蚁群算法对参数  $\alpha$ 、 $\beta$  进行试验,得到的一组试验结果<sup>[25]</sup>,见表 3.2。

从上面试验结果可以看出,当  $\alpha$ 、 $\beta$  均过小时,搜索到的结果较差,但结果不易较早出现停滞;当  $\alpha$ 、 $\beta$  均较大时,则结果容易出现较早停滞现象。这与文献[16]结论相同,

表 3.2 参数  $\alpha$ 、 $\beta$  不同组合对蚁群算法的影响

参数 $\alpha$	参数 $\beta$	最优解	搜索循环系数
0.1	0.1	379.8	194
0.1	0.5	337.1	75
0.5	1.5	325.4	9
1.0	1.5	325.4	6
3.0	1.5	325.3	5
5.0	1.5	325.4	4
10.0	5.0	325	2
10.0	10.0	325	2

参数  $\alpha$ 、 $\beta$  需要适当的选择。一般情况下,要想得到较好的结果, $\alpha$ 、 $\beta$  的取值范围一般为  $\alpha=1\sim 5$ ,  $\beta=1\sim 5$ 。

#### 4、参数 Q 设置

Q 为蚂蚁一轮循环以后释放在路径上的信息素总量。一般认为 Q 越大,则在蚂蚁已遍历路径上信息素的累积越快,这可以增强蚁群算法的正反馈性能,加快蚁群算法的收敛速度。实际上,蚁群算法中各个参数的作用是紧密相关的,其中对算蚁群法性能起着主要作用的是信息启发式因子  $\alpha$ 、期望启发式因子  $\beta$  和信息素残留率  $\rho$  等。Q 对算法性能的影响则有赖于上述三个参数的设置,以及算法模型的选取。Q 对算法性能的影响,论文通过下面的仿真实验来分析<sup>[29]</sup>。实验中经典 VRP 问题实例(St70, Att48, Ei1101, d493, d1291)及其基础数据,都来源于通用 TSPLIB (<ftp://ftp.iwr.uni-heidelberg.de/iwr/comopt/soft/TSPLIB95/TSPLIB.html>),这些虽然是 TSP 数据,但如果一个 VRP 问题满足了客户都无时间上的要求及客户的需求量都小于车载重量等约束条件,利用 TSP 与 VRP 的相似性,可以大大简化实验计算。

实验 求解经典 VRP 问题实例 St70,在客户的配送需求及运行参数值不变的情况下,通过修改 Q 的值,观察对算法性能的影响(如表 3.3 参数 Q 对算法性能的影响所示),以便找到 Q 与相对最优解的规律( $\rho=0.6$ 、 $m=50$ 、 $\alpha=1$ 、 $\beta=5$ )。

表 3.3 参数 Q 对算法性能的影响

Q	1	10	100	1000	10000
配送总距离	677.10	682.65	677.19	677.10	684.06

从表 3.3 参数 Q 对算法性能的影响可以看出, Q 的取值对蚁群算法的性能有一定的影响。在实际应用时一般取  $Q=100$ 。

通过一系列的仿真实验, 论文对蚁群算法有关算法参数的性能、作用, 以及最佳取值原则进行了初步的研究。仿真实验表明: 蚁群算法中最优的算法参数组合为  $m=VRP$  问题的客户数,  $\rho$  取值在  $[0.5, 0.9]$  之间,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 5$ ,  $Q=100$ 。蚁群算法在参数取上述值时, 对 VRP 问题能够快速求得全局最优解, 且很少出现搜索的过早停滞现象或陷入局部最优问题。

### 3.2.4 蚁群算法描述

AS 算法的伪代码如下:

1. 初始化

置  $t := 0$ ; {t 为计时器}

置  $NC := 0$ ; {NC 为迭代计数器}

对每条边  $e(i, j)$  设置  $\tau_{ij}(t) = C$ ,  $\Delta\tau_{ij}(t) = 0$ ; {C 为任一常数}

将  $m$  只蚂蚁放到  $n$  座城市上。

2. 置  $s := 1$ ; {s 为禁忌表的索引}

for  $k := 1$  to  $m$  do

将蚂蚁  $k$  的起点城市加入其禁忌表  $tabu_k$ 。

end for

3. repeat until 禁忌表  $tabu_k$  已满

设置  $s := s + 1$ ;

for  $k := 1$  to  $m$  do

按 (3.1) 式计算转移概率  $p_j^t$ , 根据赌轮方式选择下一个要到的城市  $j$ ; {在时刻  $t$ ,

蚂蚁  $k$  在城市  $i = tabu_k(s-1)$ }

蚂蚁  $k$  移到城市  $j$ ;



将城市  $j$  加入  $tabu_k(s)$ 。

end for

end repeat

4. for  $k:=1$  to  $m$  do

蚂蚁  $k$  从  $tabu_k(n)$  移到  $tabu_k(1)$ ;

计算蚂蚁  $k$  走过的周游长度  $L_k$ ;

更新当前的最优路径。

end for

for 每条边  $e(i, j)$

for  $k:=1$  to  $m$  do

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{if } e(i, j) \in tabu_k; \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases};$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \Delta\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^k。$$

end for

end for

5. for 每条边  $e(i, j)$ , 按 (3.2) 式计算  $\tau_{ij}(t+n)$ ;

置  $t:=t+n$ ;

置  $NC:=NC+1$ ;

for 每条边  $e(i, j)$ , 置  $\Delta\tau_{ij}:=0$ 。

6. if ( $NC < NC_{MAX}$ ) and (没有出现停滞情况) then

清空所有禁忌表;

goto step 2

else

打印最优路径;

算法停止。

end if

图 3.2 为基本蚁群算法流程图:

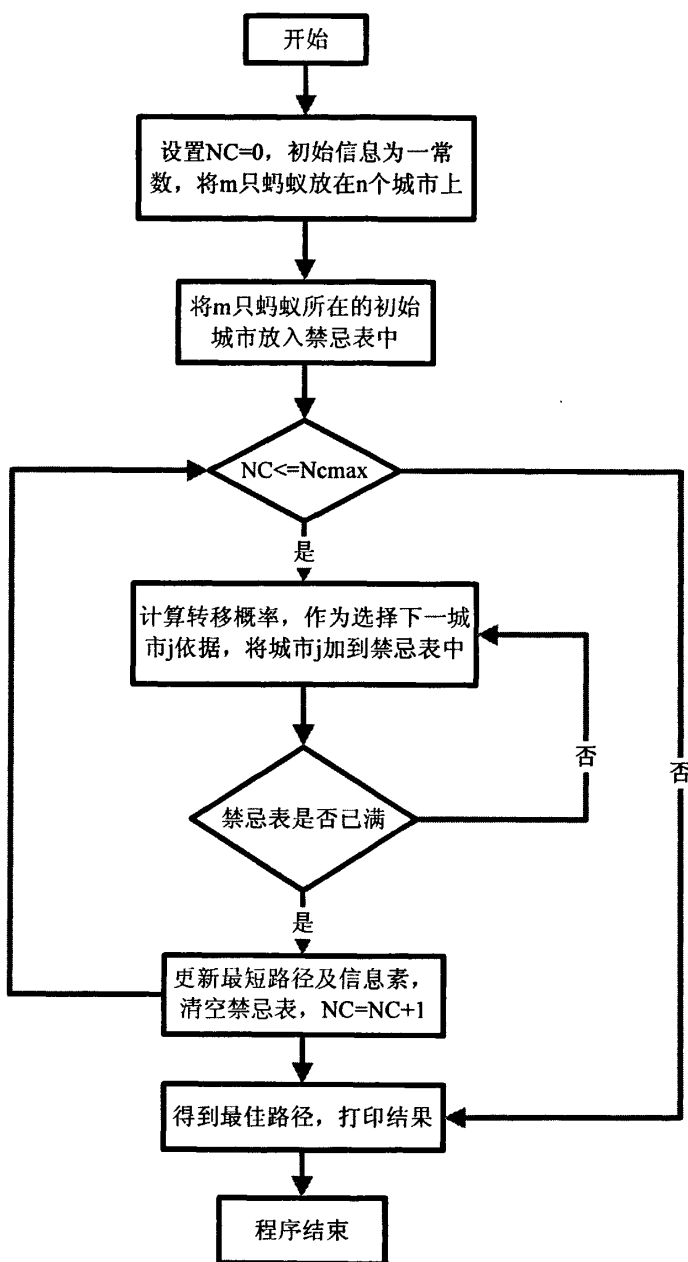


图 3.6 蚁群算法流程图

### 3.3 改进蚁群算法模型

#### 3.3.1 基本蚁群算法的优点与缺点

基本蚁群算法是正反馈原理与启发式算法相结合的一种算法。在选择路径时，蚂蚁利用了原有路径上的残留信息素，还利用了两个结点之间的距离倒数作为启发式因子。可以总结出基本蚁群算法具有以下一些优点<sup>[30,31,32]</sup>：

1、良好的鲁棒性：该系统不仅可以解决经典 TSP 问题，对其基本模型稍加修改就可以应用于其它多种问题，如 VRP 问题以及基于 VRP 问题的各种改进问题。相对于其它算法，蚁群算法对初始路线要求不高，即蚁群算法的求解结果不依赖于初始路线的选择，而且在搜索过程中不需要进行人工的调整。

2、并行分布式计算：蚁群算法是一种基于模拟生物种群生态性的进化算法，从本质上具有并行性，可进行并行计算。每只蚂蚁搜索的过程相对独立，仅通过信息激素进行通信。它在问题空间的多点同时开始进行独立的解搜索，不仅增加了算法的可靠性，也使得算法具有较强的全局搜索能力。

3、正反馈性：蚁群之间是通过信息素来进行交流的，这种信息素的交流方式就是一种正反馈。从真实蚂蚁的觅食过程中我们不难看出，蚂蚁能够最终找到最短路径，直接依赖于最短路径上信息素的堆积，而信息素的堆积却是一个正反馈的过程。对蚁群算法来说，初始时刻在环境中存在完全相同的信息素，给予系统一个微小扰动，使得各个边上的轨迹浓度不相同，蚂蚁构造的解就存在了优劣，算法采用的反馈方式是在较优的解经过的路径留下更多的信息素，而更多的信息素又吸引了更多的蚂蚁，这个正反馈的过程使得初始的不同得到不断的扩大，同时又引导整个系统向最优解的方向进化。因此，正反馈是蚂蚁算法的重要特征，它使算法演化过程得以进行。可以在一定程度上加快解的进化过程，从而可以发现相对较好的解。

4、一种自组织的算法：在系统论中，组织可以分为自组织和它组织，其区别在于组织力或者组织指令是来自于系统的内部还是来自于系统的外部，来自于系统内部的是自组织，来自于系统外部的是他组织，如果系统在获得空间、时间或者功能结构的过程中，没有外界的特定干预，我们便说系统是自组织的。在抽象意义上讲，自组织是没有外界作用使得系统熵增加的过程(即系统从无序到有序的变化过程)。蚁群算法即充分体现了这个过程。以蚂蚁群体优化为例，在算法初期，单个的人工蚂蚁无序的寻找解，算法经过一段时间的演化，人工蚂蚁间通过信息素的作用，自发的越来越趋向于寻找到接近最优解的一些解，这就是一个无序到有序的过程。

5、易于与其它方法结合：蚁群算法的参数数目少，设置简单，针对蚁群算法的一些弱点，它可以与其它一些启发式算法相结合，从而提高算法性能。例如蚁群算法可以与遗传算法相结合，借鉴遗传算法中杂交算子的思想，来更新信息素。

6、易于实现性：蚁群算法是一个基本递归算法，其实现相对于其它启发式算法较为简单。

但基本蚁群算法同时也存在以下一些缺陷<sup>[33,34,35]</sup>:

1、容易陷入局部最优解，从算法解的性质而言，蚁群算法也是在寻找一个比较好的局部最优解，而不强求是全局最优解。

2、易于出现早熟停滞现象。在蚁群算法中，蚁群的转移是由各条路径上留下的信息素浓度和城市间距离来引导的，蚁群运动的路径总是趋向于信息素最强的路径。但是由于各路径上的初始信息素相同，蚁群创建第一条路径的引导信息主要是城市间的距离信息，这样蚁群在所经过的路径上留下的信息素就不一定能反映出最优路径的方向，不能保证蚁群创建的第一条路径能引导蚁群走向全局最优路径。随着算法的进行，信息素都积累在这条局部最优的路径上，使该条路径上的信息素浓度远远大于其它路径上的信息浓度，导致所有的蚂蚁都集中到这条局部最优的路径上，不能继续对解空间进一步进行搜索，出现停滞现象，从而不利于发现全局最优解。

3、需要较长的搜索时间。蚁群中各个体的运动是随机的，虽然通过信息素交换能够向着最优路径进化，但是当群体规模较大时，很难在较短的时间内从大量杂乱无章的路径中找出一条较好的路径。这是因为在进化的初期，各个路径上的信息素差别不大，通过信息正反馈，使得较好路径上的信息素逐渐增大，经过较长一段时间，才能使得较好路径上的信息素明显高于其它路径，随着这一过程的进行，差别越来越明显，从而最终收敛，这一过程一般需要较长的时间。与其他求解组合优化问题的算法相比，蚁群算法在迭代次数和解的质量上都有一定的优势，但搜索时间上明显落后于其它算法。

### 3.3.2 改进蚁群算法设计

由于基本蚁群算法中存在的诸多缺陷，本文针对蚁群算法容易出现陷入局部最优解而停滞这一现象结合参考文献<sup>[36,37,38]</sup>对蚁群算法进行了一系列改进，从而有效地克服了基本蚁群算法中容易陷入局部最优解的问题。具体改进措施如下所示:

#### 1、信息素的全局更新

通过对基本蚁群算法模型的进一步分析可知，该算法在计算过程中，蚂蚁的状态转移与各条路径上留下的信息素浓度和城市之间的距离有关。每一只蚂蚁所选择的下一条路径总是趋近于信息素浓度最高的路径。对蚁群算法的实际研究表明，不论是真实蚁群系统还是人工蚁群系统，在一般情况下，信息素浓度最高的路径与实际所需要的最优路径比较接近。但也多次出现过信息素浓度最高的路径不是所需要的最优路径这种情况，而且在人工蚁群系统中，这种现象经常出现。出现这种情况主要是由于在蚁群算法的初

始计算中,各条路径上的初始信息量都设定为相同的浓度,每一只蚂蚁创建的第一条路线所根据的信息素浓度就是城市之间的距离信息(一般取为两个城市之间距离的倒数)。在这种初始情况下的蚁群算法就类似于贪心算法,蚂蚁在所经过的路径上留下的信息素浓度就不一定能反映出最优路径的方向,特别是当蚁群中蚂蚁数量较少时或者当所需要计算的城市路径组合较多时,蚁群算法就不能保证蚂蚁创建的第一条路径能引导整个蚁群找到全局最优路径。当所有蚂蚁的第一次循环结束后,每一只蚂蚁所留下的信息会因正反馈的作用使这条不是最优而且可能是离最优解相差较远的路径上的信息素浓度得到增强,从而使蚂蚁在以后的循环中难于发现更好的全局最优解。信息素的浓度不仅在第一次循环所创建的路径中可能对蚂蚁产生误导,在任何一次循环中只要这次循环所利用的信息较为平均地分布在各个方向上,则该次循环所产生的路径就有可能会对以后蚂蚁的选择产生错误的引导信息,从而造成大量的无效搜索,使整个系统最终出现停滞现象。因此,在蚂蚁的全局更新过程中,蚂蚁所找出的最优解就需要通过一定的方法来增强,使蚂蚁所留下的信息尽可能地不对以后的蚁群产生误导。

针对以上这些问题,对基本蚁群算法的全局更新规则进行了如下改进:

修改蚂蚁的全局更新公式。在原有的基本蚁群算法中,全局更新公式是当所有蚂蚁完成一次循环后,只有生成了全局最优解的蚂蚁(即从一开始到现在构建了最短路径的蚂蚁)才有机会进行全局更新,其更新公式如式(3.7)所示:

$$\tau(r,s) = \begin{cases} \rho \tau(r,s) + \Delta\tau & \\ 0 & \end{cases} \quad (3.8)$$

其中,  $\rho$  表示信息素残留率,  $\rho$  的取值范围在  $(0, 1)$  之间。  $\Delta\tau = 1/L$ ,  $L$  为该算法已求出的最优路径长度(指此次循环中的最优路径)。

在这个公式中,只有对最优蚂蚁经过的所有路径上的信息素进行了全局更新,而不属于最优蚂蚁走过的路径,其信息素更新为 0。

在改进的全局更新公式中,保留对最优蚂蚁路径的全局更新公式,同时新增加对最差蚂蚁所经过的路径的全局更新。结合蚁群算法中的局部信息素更新公式,增加对所有蚂蚁所经过的路径的信息素更新。可以在一定程度上加快整个蚁群的进化过程,有利于在迭代初期发现较好解,从而对最优解进行了一定方法的增强,避免了后期大量的无效搜索。

对最差蚂蚁的全局更新公式如下:

若  $(r, s)$  为最差蚂蚁路径中的一段弧，且不属于最优蚂蚁所走路径中的弧，则该弧上的信息量调整见式(3.9):

$$\tau(r,s) = \begin{cases} \rho \cdot \tau(r,s) - \delta L_b / L_w \\ 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

其中， $\rho$  表示信息素残留率， $\rho$  的取值范围在  $(0, 1)$  之间。 $\delta$  为参数调节因子，可动态调节  $L_b$  与  $L_w$  之间的系数。 $L_b$  表示在当前循环中最优蚂蚁所走的路径长度， $L_w$  表示在当前循环中最差蚂蚁所走的路径长度。

在式 (3-8) 中，只有对最差蚂蚁经过的所有路径上的信息素进行全局更新，而对于那些既属于最优蚂蚁走过的路径又属于最差蚂蚁走过的路径其信息素更新为 0。对所有蚂蚁的全局更新公式如下：

若  $(r, s)$  为蚂蚁  $k$  所走路径中的一段弧，则该弧上的信息量调整见式(3.11):

$$\tau(r,s) = \begin{cases} \rho \cdot \tau(r,s) + 1 / L_k \\ 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

其中， $\rho$  表示全局信息素的保留率， $\rho$  的取值范围在  $(0, 1)$  之间。 $L_k$  表示在当前循环中蚂蚁  $k$  所走的全部路径长度。

由以上可知，在改进蚁群算法的全局更新公式中共有三个步骤，第一步实现最优蚂蚁的全局信息素更新，第二步实现最差蚂蚁的全局信息素更新，第三步实现对所有蚂蚁的全局信息素更新。当三个步骤完成之后，则表示所有蚂蚁一次循环的结束，进而判断循环次数，若循环次数没有达到最大值，则所有蚂蚁开始进行下一次的循环。

### 3.3.3 改进蚁群算法的实现

计算机实现过程可以用伪代码描述如下：

**Step1:** 初始化参数，获取客户信息，设迭代次数  $NC$ ，最大迭代次数  $NC_{max}$ ，蚂蚁数为  $M$ ，客户数为  $N$ ，完成任务的蚂蚁数量为  $l$ ， $tabu$  (禁忌表) 为蚂蚁所走过的结点集合， $allowed$  为蚂蚁可选的所有下一个结点的集合， $Ph(i, j)$  为边  $(i, j)$  上的信息素总量， $T\_Ph(i, j)$  为边上的临时信息素量，最优解为  $R\_best$ ;

**Step2:** 迭代过程

**While** ( $NC < NC_{max}$ )

{将 tabu 每个蚂蚁所走过的结点集合置空;

将 allowed 蚂蚁在某一结点处可选的所有下一个结点的集合置空;

将 M 个蚂蚁, 随机放在 N 个客户点上;

While ( $l \sim M$ )

{每一只蚂蚁从原有结点  $i$  移动到下一个结点  $j$ ;

For  $i=1$  to M do

{确定蚂蚁可移动的下一结点的集合 allowed;

产生随机数  $r$ , 按照转移策略确定下一转移结点  $j$ ;

将结点  $j$  放入蚂蚁的禁忌表中;

将蚂蚁所经过的边  $(i, j)$  上产生的信息素放入边  $(i, j)$  的临时信息素集合 T\_Ph

$(i, j)$  中;

If 结点全部在禁忌表中

then  $l=l+1$ ; }

按式  $Ph(i, j) = Ph(i, j) + T\_Ph(i, j)$  更新规则更新各边的信息素; }

寻找本次计算的最优解、最差解与全局最优解从 tabu 中获得每一只蚂蚁所走的回路  $R_k$ , 得到解集  $R(NC) = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ ;

求本次循环的最优解  $R\_best(NC)$  和最差解  $R\_worse(NC)$ ;

求本次循环全局最优解  $R\_best = \min\{R\_best(NC), R\_best\}$ ;

对本次最优解中各边的信息素按全局信息素更新规则更新;

按式  $\tau(r, s) = \begin{cases} \rho \cdot \tau(r, s) + \Delta \tau & \text{更新本次最优蚂蚁所走的路线 } R\_best(NC); \\ 0 & \end{cases}$

对本次最差解中各边的信息素按全局信息素更新规则更新

按式  $\tau(r, s) = \begin{cases} \rho \cdot \tau(r, s) - \delta \cdot L_b / L_w & \text{更新本次最差蚂蚁所走的路线 } R\_worse(NC); \\ 0 & \end{cases}$

对本次所有蚂蚁解中各边的信息素按全局信息素更新规则更新;

按式  $\tau(r, s) = \begin{cases} \rho \cdot \tau(r, s) + 1 / L_k & \text{对所有蚂蚁所走的路线 } R_k(NC) \text{ 更新;} \\ 0 & \end{cases}$

$NC = NC + 1$ ; }

Step3: 终止算法, 输出  $R\_best$ ;

### 3.4 基本蚁群算法与改进蚁群算法的仿真应用比较

如果针对 TSP 问题提出的某种算法能够取得比较好的实算效果, 那么对其进行修改, 就可以应用于其它类型的组合优化问题并取得良好的效果。TSP 问题是测试新算法的标准问题, 因此用基本蚁群算法与改进蚁群算法在 TSP 问题上仿真。比较两种算法的优劣性。

对 TSP 问题仿真所用的数据库是 TSPLIB 典型 51 城市的数据, 具体的坐标数据如表 3.4 所示。

表 3.4 TSPLIB 典型 51 城市坐标数据

序号	X 轴	Y 轴	序号	X 轴	Y 轴	序号	X 轴	Y 轴
1	37	52	18	17	33	35	62	63
2	49	49	19	13	13	36	63	69
3	52	64	20	57	58	37	32	22
4	20	26	21	62	42	38	45	35
5	40	30	22	42	57	39	59	15
6	21	47	23	16	57	40	5	6
7	17	63	24	8	52	41	10	17
8	31	62	25	7	38	42	21	10
9	52	33	26	27	68	43	5	64
10	51	21	27	30	48	44	30	15
11	42	41	28	43	67	45	39	10
12	31	32	29	58	48	46	32	39
13	5	25	30	58	27	47	25	32
14	12	42	31	37	69	48	25	55
15	36	16	32	38	46	49	48	28
16	52	41	33	46	10	50	56	37
17	27	23	34	61	33	51	30	40

#### 1、基本蚁群算法解决 TSP 问题

根据以上分析, 将运行参数设为: 蚂蚁数  $M=51$ , 循环次数  $NC_{max}=60$ ,  $\rho=0.6$ ,  $\alpha=1$ ,  $\beta=5$   $Q=100$ , 对 51 个城市的路径进行优化, 如图 3.7 所示。



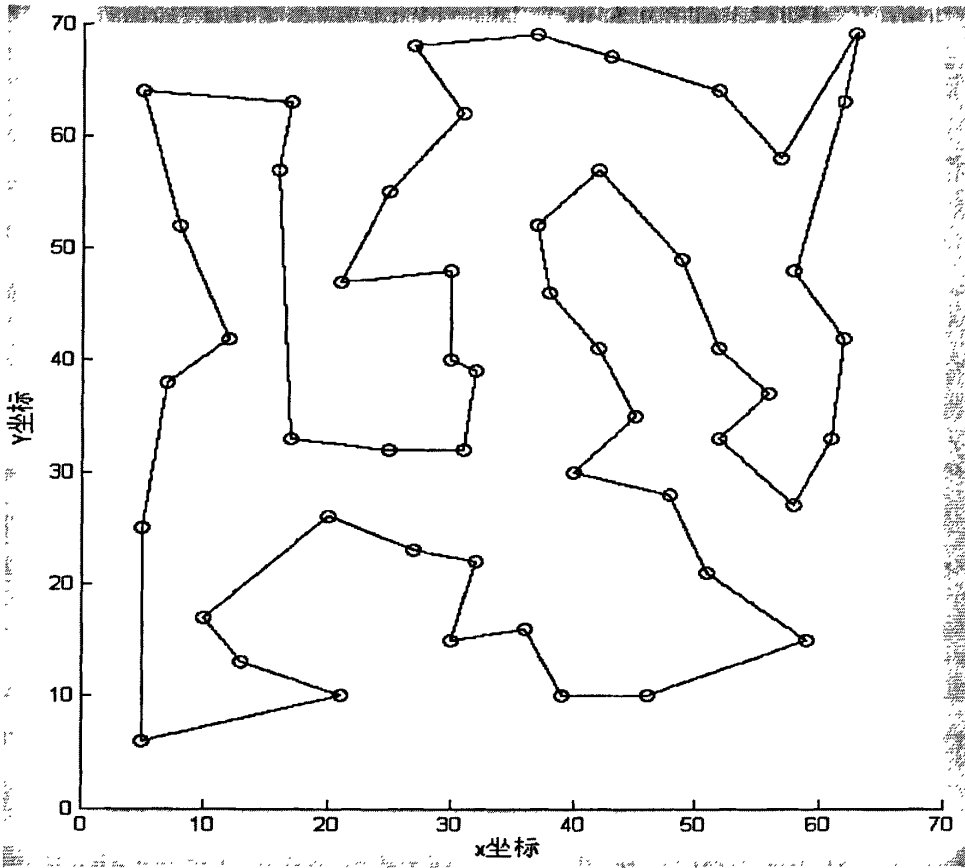


图 3.7 基本蚁群算法在 51 个城市路径优化中的仿真

最优路径为  $L=454.8529$ ;

最优路线为 1 → 22 → 2 → 16 → 50 → 9 → 30 → 34 → 21 → 29 → 35 → 36 → 20 → 3 → 28 → 31 → 26 → 8 → 48 → 6 → 27 → 51 → 46 → 12 → 47 → 18 → 23 → 7 → 43 → 24 → 14 → 25 → 13 → 40 → 42 → 19 → 41 → 4 → 17 → 37 → 44 → 15 → 45 → 46 → 39 → 10 → 49 → 5 → 38 → 11 → 32。

## 2、改进蚁群算法解决 TSP 问题

运行参数设为：蚂蚁数  $M=51$ ，循环次数  $NC_{max}=60$ ， $\rho=0.6$ ， $\alpha=1$ ， $\beta=5$ ， $Q=100$ ，

对 51 个城市的路径进行优化，如图 3.8 所示。

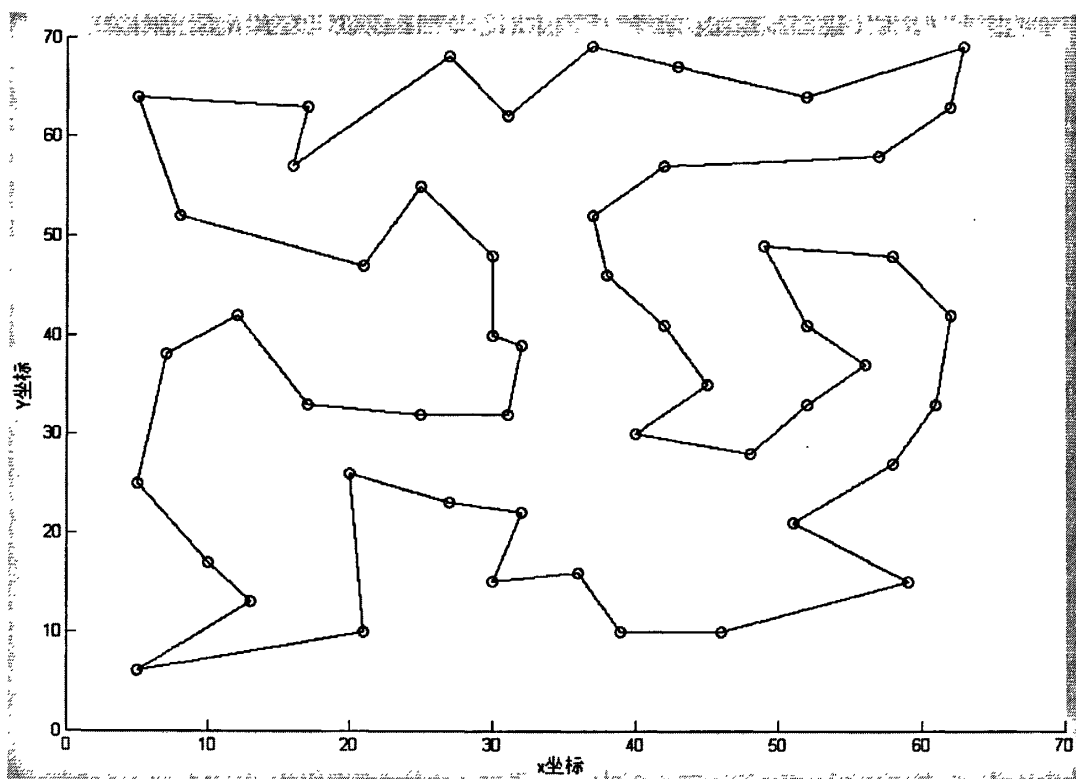


图 3.8 改进蚁群算法在 51 个城市中的路径仿真

最优路径为  $L=441.6532$ ;

最优路线为 19→41→13→25→14→18→47→12→46→51→27→48→6→24→43→7→23→26→8→31→28→3→36→35→20→22→1→32→11→38→5→49→9→50→16→2→29→21→34→30→10→39→33→45→15→44→37→17→4→42→40。

### 3、结果分析

从表 3.5 可以看出，改进后的蚁群算法的全局最优路径的搜索能力极强，减少了迭代次数，得到的最优结果比基本遗传算法的最优结果好。试验表明，改进的蚁群算法可以很好的解决 TSP、VRP 等问题。

表 3.5 基本蚁群算法与改进蚁群算法实验结果对比

算法名称	迭代次数	最优结果
基本蚁群算法	51	454.8529
改进蚁群算法	30	441.6532

### 3.5 小结

1、阐述了基本蚁群算法产生的背景，介绍了蚁群算法的原理及模型。在实验的基础上讨论了蚁群算法中 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 等参数设置，并用伪代码的形式描述了基本蚁群算法程序。

2、总结了蚁群算法的优点与缺点，根据蚁群算法的缺点，对蚁群算法程序进行设计改进，并用伪代码的形式描述了改进的蚁群算法程序。

3、将基本蚁群算法和改进的蚁群算法用于 TSP 仿真中，从仿真结果可以看出改进的蚁群算法收敛速度快，减少了迭代次数，其结果比基本蚁群算法的仿真结果更好。

## 第四章 改进蚁群算法对危险货物运输路径问题的研究

### 4.1 路段加权值

#### 1、路段风险度计算模型<sup>[39]</sup>

为了进行风险大小的比较,人们常常用期望值替代概率分布,或选用某种或某些算子对有关的量进行数学组合。这种风险的定量表达被称为风险度。因为对风险的定义不同,相应风险度的表达也有一些差异。以下为不同学者提出的风险度表达式:

(1)风险度(Risk)=危险度(Hazard)+易损度(Vulnerability)[Maskery,1989];

(2)风险度(Risk)=危险度(Hazard)×易损度(Vulnerability)[联合国,1991];

(3)风险度(Risk)=概率(Probability)×损失(Loss)[Smith,1996];

(4)风险度(Risk)=概率(Probability)+易损度(Vulnerability)[Tobin&Montz,1997];

(5)风险度(Risk)=危险度(Hazard)×结果(Consequence) [Deyle&Hurst,1998]

本文采用以下模型计算风险度:

风险度(Risk)=危险度(Hazard)×结果(Consequence)

#### (1)危险度的确定

危险度的确定有两种方法:一种是用历史发生的危险货物运输事故来描述危险度;另一种是以大量交通事故来确定危险货物运输发生事故的率。第一种方法的优点是可以准确表达危险的量度,缺点是这种数据难以统计,极少有这类专业系统的统计数据可供使用。第二种方法中的交通事故数据虽不能准确反映风险的量,但这些数据很容易搜集到,可以较为满意的用于沿线运输风险评价。

本文以危险货物运输的事故率  $A_{ij}$  (单位公里)来表示危险度。则危险度如下列公式表示:  $A_{ij} = F_{ij} \times V_{ijh}$

其中:  $F_{ij}$  表示在  $(i, j)$  路段上的商用运输车辆事故率(每年),  $V_{ijh}$  就表示在  $(i, j)$  路段上的  $h$  种危险货物每年运输的往返次数。

#### (2)结果的确定

潜在受影响人群的数量是最重要、最常用的一个用来描述事故后果的指标。具体包括两个部分:运输沿线的常住人口和路上车辆中的司乘人员。

综合以上分析,风险度的计算模型可用公式表示为:

$$R_{ijh} = \sum_{h=1}^n [F_{ij} \times V_{ijh} \times (r_{ijh} + z_{ij})] \quad (4.1)$$

式中:

$h=1,2,\dots,n$ ,危险货物的种类数目;

$i, j=1, 2, \dots,m$ , 为路段( $i, j$ );

$R_{ijh}$ , 在( $i, j$ )路段上运输  $h$ 类危险货物的风险值;

$F_{ij}$ , 在( $i, j$ )路段上的年商用运输车辆事故率;

$V_{ijh}$ , 在( $i, j$ )路段上的  $h$ 类危险货物每年的往返次数;

$r_{ijh}$ , ( $i, j$ )路段上的  $h$ 类危险货物威胁的居住人口的数量;

$z_{ij}$ , ( $i, j$ )路段上受事故影响的行驶车辆上的人数。

## 2、路段加权值的引入

危险货物运输公司在进行危险货物运输时,除了遵循国家对道路危险货物运输的有关法律法规进行安全运输外,同时也以获得最大的经济效益为目的。为更好的协调国家的法律法规和公司本身的经济效益,本文引入路段加权值的概念

路段加权值  $w$  为道路路段风险度的倒数。如式:

$$w_{ij} = 1/R_{ijh} \quad (4.2)$$

其中,  $w_{ij}$  表示( $i, j$ )路段上的路段加权值;

$R_{ijh}$  表示( $i, j$ )路段上的路段风险度。都为无量纲。

在蚁群算法的跃迁概率中引入路段径加权,使用的方法是建立带权邻接矩阵表(Weigh—Tables),以此为每条路段赋权值。此时蚂蚁增加一个选择路断的启发因素权值。

将路径加权值  $w$  引入蚁群算法的跃迁概率中,则改进后的跃迁概率见式 4.3:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta [w_{ij}(t)]^\gamma}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta [w_{is}(t)]^\gamma} & j \in allowed_k \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (4.3)$$

其中:  $k(1, 2)$ 表示两只蚂蚁,  $\gamma \geq 1$ , 通过实验确定其合适值。跃迁概率和道路路段风险度成反比,即道路路段风险度越大,路径加权值越小,从而跃迁概率概率越小。

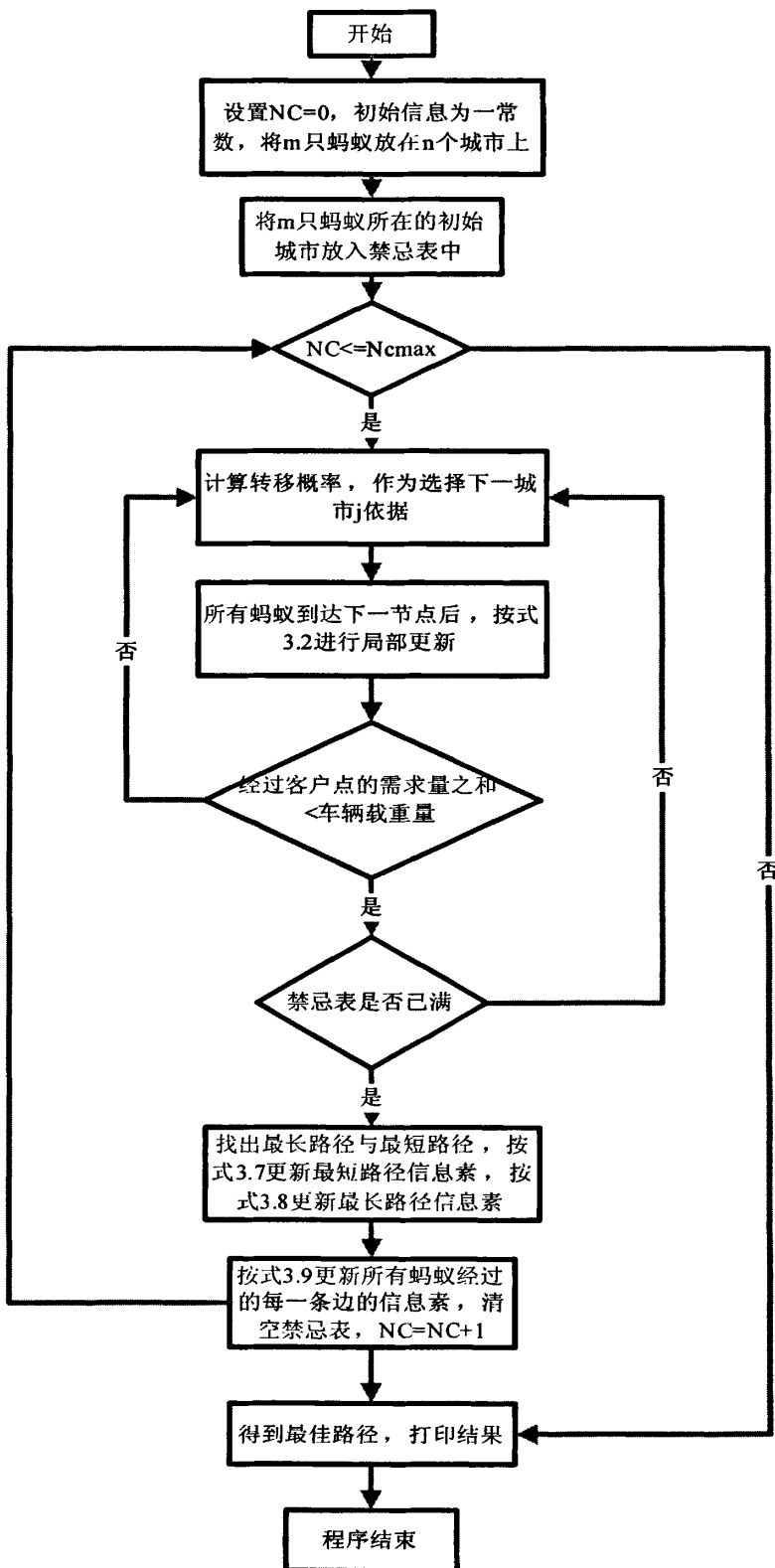


图 4.1 危险货物运输路径算法模型

蚂蚁选择该路段的概率越小。如当该路段为国家或省市规定危险货物运输禁止通行的路段(如隧道)时,  $R_{ij}$  的取值为很大的一个值, 实际系统中可以为其赋一个经过试验得出的较大的值, 使跃迁概率尽可能的小, 从而使危险货物运输车辆不通过该路段。

## 4.2 设计流程算法模型

基于蚁群算法的危险货物运输路径优化流程如上图 4.1 危险货物运输路径算法模型所示。

## 4.3 Matlab 编程实现路径优化

Matlab 是以矢量和矩阵为基本运算单元, 利用 Matlab 编写危险货物运输路径优化问题的蚁群算法, 具有编程简单、容易实现等特点。在 Matlab 的图形窗口下可以方便地给出点阵其分析结果更具一般性。经过计算找到最小费用(或最短路径)后, 有 Matlab 强大绘图功能的支持, 将所得路径标注出来非常直观。

基于 Matlab 的危险货物运输路径优化问题的蚁群算法程序流程中, 有如下几个关键的程序块: 生成距离矩阵、随机选择起点、路权生成、计算转移概率、约束计算、计算局部最短和最常路径、更新信息素、计算全局最短路径。

### 1、距离矩阵生成

(1)以危险货物物流中心编号为 0, 各个客户点编号  $i=1,2,\dots,n$  为矩阵行列标的方法, 根据各点与点的坐标, 生成任意两个点与点的距离。用矩阵  $D(i, j)$  表示。矩阵中的元素  $D(i, j)$  代表第  $i$  个点到第  $j$  个点的距离, 有  $D(i, j) = D(j, i)$ ,  $D(i, i) = \infty$ 。

$$D(i, j) = \sqrt{(x(i) - x(j))^2 + (y(i) - y(j))^2} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

(2) 如果已知危险货物物流中心、各个客户点相互之间的实际路线长度  $A_{ij}$ , 则两点间的距离用实际路线长度表示为:  $D(i, j) = A_{ij}$ ,  $D(i, i) = \infty$ 。

### 2、随机选择起点(客户点)

设置随机矩阵。 $r = \text{int32}(\text{unifrnd}(1, n, NC \max, m))$  其中  $n$  表示点数目,  $NC \max$  为最大循环次数,  $m$  为蚂蚁个数。若  $r = \text{int32}(\text{unifrnd}(1, 8, 50, 8))$  表示随机生成 1~8 之间  $50 \times 8$  维整形矩阵, 每一行代表一次循环中个蚂蚁的  $m$  个起点。每次循环时  $m$  个蚂蚁随

机选择  $m$  个为起点，这种随机性能更有效检验算法，并有利于找到最优解。

```
Randpos =int32(unifrnd (1,8 ,50 ,8))
```

```
Tabu(:,1)=(Randpos(1,1:m))';
```

### 3、路权生成

在危险货物运输路径优化中引入路权的概念，充分考虑运输的潜在危险性，最大限度地降低在发生事故的情况下所带来的危害性。

%路权计算

```
for i=1:n
```

```
    for j=1:n
```

```
        if i~j
```

```
            H(i,j)=1./ E(i,j);%H 为路权，这里设为路线危险度 E(i,j)的倒数
```

```
        else
```

```
            H(i,j)=eps;
```

```
        end
```

```
            H(j,i)=H(i,j);
```

```
    end
```

```
end
```

### 4、转移概率计算

蚂蚁通过转移概率寻找要走的下一个点，转移概率采用 4.2 公式。

%下面计算待选城市的概率分布

```
for k=1:length(J)
```

```
    P(k)=(Tau(visited(end),J(k))^Alpha)*(Eta(visited(end),J(k))^Beta)*(H(visited(end),J(k)))^
```

```
    Gama;
```

```
    end
```

```
    P=P/(sum(P));
```

%按概率原则选取下一个城市

```
    Pcum=cumsum(P);
```

```
    Select=find(Pcum>=rand);
```

```
    .....
```

### 5、约束处理计算



本论文所讨论的危险货物运输路径优化问题是容量约束的车辆路径问题 (Capacitated Vehicle Routing Problem, 简记为 CVRP) 中的一种特殊形式。即本文讨论的是具有容量约束的危险货物运输路径优化。

在一次循环中第  $m$  只蚂蚁从  $i$  点选择了转移概率最大的  $J(k)$  点, 接着判断蚂蚁到达  $J(k)$  点时的容量是否超过车辆容量  $Q$ , 若超出车辆容量  $Q$ , 则  $\text{allowed}(m, J(k))=0$ , 并记录  $J(k)$  点; 否则, 在  $\text{allowed}(k, j)=0$ , 并记录  $j$  点, 将  $j$  点加入到  $\text{path}$  矩阵中。

%约束处理

```
sum_g= sum_g+sum_g(J(k))      %sum_g 为线路上的总货运量
if sum_g<=Q
    count=count+1;
    path(count)= J(k);
    .....
else
    allowed(m, J(k))=0;
    count_1= count_1+1;
    .....
end
```

#### 6、记录本次迭代最长、最短路径路线

每一次循环完成后  $m$  只蚂蚁对应的  $m$  条路径存放在禁忌表矩阵中, 第  $m$  只蚂蚁的路径对应第  $m$  行, 这样局部寻优路径只要对  $\text{tabu}$  矩阵上一点到下一点距离累加即可求得第  $m$  只蚂蚁的路径距  $L\_best$  矩阵表示。若  $L_{ant}(5)=89$ , 则表示本次循环中第 5 只蚂蚁的距离为 89 比较  $L\_best$  各个元素, 找到其最小值, 再对相应的禁忌表矩阵即可找到本次循环的最短路径。若  $L\_best(1)$  为其矩阵最小值, 表示第一只蚂蚁走过距离最短, 则最短路径为禁忌表矩阵第一行。下面给出求解一次循环后  $k$  只蚂蚁得到的最佳路径。

%本次迭代最长、最短路径路线

```
L=zeros(m,1);
for i=1:m
    R=Tabu(i,:);
    for j=1:(n-1)
        .....
```

```

end
L_best(NC)=min(L);
L_worst(NC) =max (L);
pos_1=find(L==L_best(NC));
.....

```

## 7、更新信息素

第一步实现最优蚂蚁的全局信息素更新，第二步实现最差蚂蚁的全局信息素更新，第三步实现对所有蚂蚁的全局信息素更新。

```

Delta_Tau=zeros(n,n);
for j=1:(n-1)          %最优蚂蚁的全局信息素更新
    Delta_Tau(Tabu(pos_1(1),j),Tabu(i,j+1))= (1 - ρ) Delta_Tau(Tabu(pos_1(1),j),Tabu(i,j
    +1))+ ρ / L_best(NC);
    .....
for j=1:(n-1)          %最差蚂蚁的全局信息素更新
    Delta_Tau(Tabu(pos_2(1),j),Tabu(i,j+1))= (1 - ρ) Delta_Tau(Tabu(pos_2(1),j),Tabu(i,j
    +1))+ ρδ L_best(NC)/ L_worst(NC);
    .....
for i=1:m              %对所有蚂蚁的全局信息素更新
    for j=1:(n-1)
        Delta_Tau(Tabu(pos_1(1),j),Tabu(i,j+1))= (1 - ρ) Delta_Tau(Tabu(pos_1(1),j),Tabu(i,j
        +1))+ ρ / L (i);
    end
    .....

```

## 8、计算全局最短路径

```

Shortest_Route=R_best(Pos_1(1),:);
Shortest_Length=L_best(Pos_1(1));

```

## 4.4 应用实例

采用文献<sup>[40]</sup>中的例子有 7 个客户点的普通货物运输车辆路径问题, 各任务点坐标及货运量见表 4.1 个发货点坐标及货运量。

表 4.1 个发货点坐标及货运量

序号	0	1	2	3	4	5	6	7
坐标	(18,54)	(22,60)	(58,69)	(71,71)	(83,46)	(91,38)	(24,42)	(18,40)
货运量( $g_i$ )	0	0.89	0.14	0.28	0.33	0.21	0.41	0.57

0 表示中心仓库, 设车辆容量为  $q=1.0$ , 由 3 辆车完成所有任务。

根据上述研究, 实验参数设置如下:

$\alpha=1$ ,  $\beta=5$ ,  $\rho=0.1$ ;  $Q=100$ ;  $NC_{\max}=50$ ;  $m=8$ ;  $m$  表示蚂蚁个数,  $NC_{\max}$  表示最大循环次数,  $NC$  表示循环代次。所用车辆数 3 辆, 仿真试验如图 4.2 普通货物运输车辆路径问题试验仿真图所示。

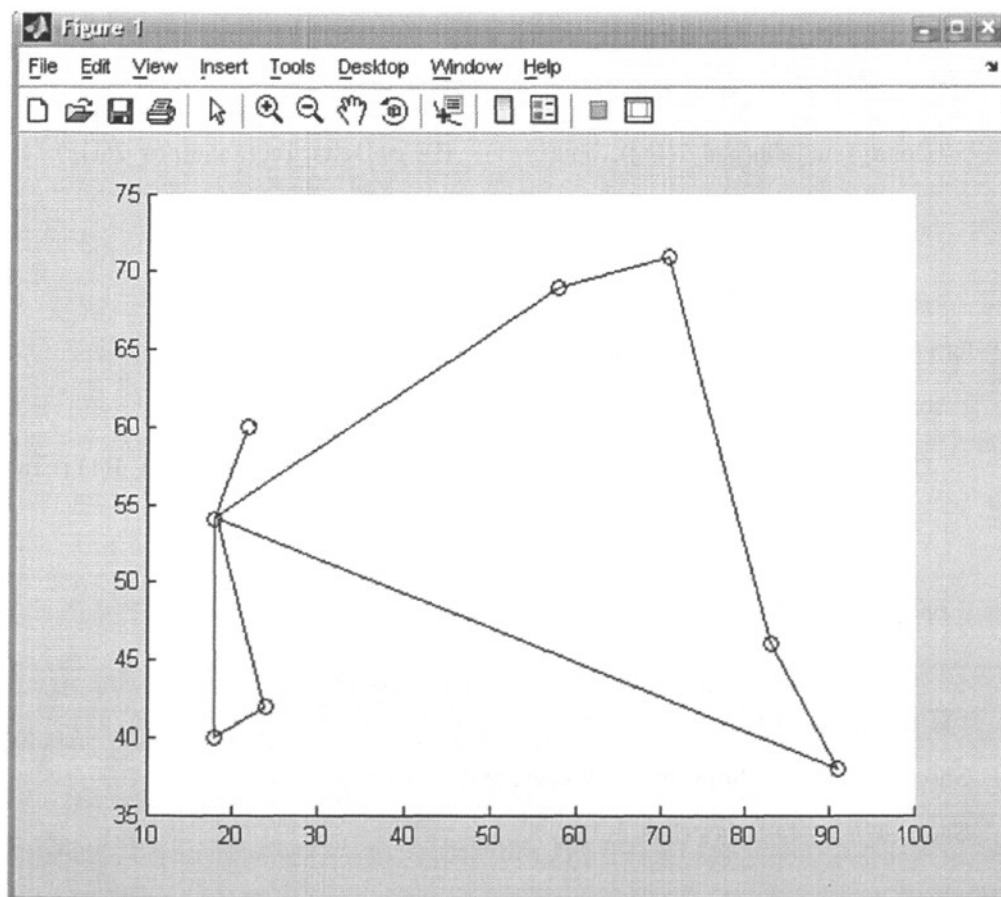


图 4.2 普通货物运输车辆路径问题试验仿真图

最优路径距离为 217.8135；最优行驶路径为：0-1-0，0-2-3-4-5-0，0-6-7-0。

向上述例子中的 7 个客户点运输危险货物，各任务点坐标及货运量见表 4.1 一个发货点坐标及货运量，危险货物总风险度见表 4.2 危险货物总风险度。

表 4.2 危险货物总风险度( $10^{-4}$ )

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	$10^7$	12564.3	1018.5	$10^7$	624.4	11891.1	1601.1	624.4
1	12564.3	$10^7$	1397.5	4388.9	16845	$10^7$	1795.4	2489.5
2	1018.5	1397.5	$10^7$	1132.6	4094	$10^7$	6058.8	8565.6
3	$10^7$	4388.9	1132.6	$10^7$	$10^7$	1209.5	5303	$10^7$
4	624.4	16845	4094	$10^7$	$10^7$	9417.7	3686.8	$10^7$
5	11891.1	$10^7$	$10^7$	1209.5	9417.7	$10^7$	3906	$10^7$
6	1601.1	1795.4	6058.8	5303	3686.8	3906	$10^7$	1658
7	624.4	2489.5	8565.6	$10^7$	$10^7$	$10^7$	1658	$10^7$

注：1、(4,5)路段上危险货物总风险度为 $10^7$ ，表示根据省市有关危险货物运输规定，该路段有隧道，禁止危险货物运输车辆通行；

2、(i,j),i=j 路段上的危险货物总风险度为 $10^7$ ，表示蚂蚁必须移动到下一点；

3、其他危险货物总风险度为 $10^7$ 的路段表示此点到下一点的没有道路可走；

4、其他数据取自王贤高《道路危险货物运输风险评价研究》。

为和普通货物运输车辆路径问题方便比较，危险货物运输车辆路径问题中的参数设置相同，即： $q=1.0$ ， $\alpha=1$ ， $\beta=5$ ， $\rho=0.1$ ； $Q=100$ ； $NC_{max}=50$ ； $m=8$ ； $m$ 表示蚂蚁个数， $NC_{max}$ 表示最大循环次数， $NC$ 表示循环次数。 $\gamma=4$ ， $\gamma$ 为路段加权调节因子。

最优路径距离为 219.4279，最优行驶路径为：0-1-0，0-2-3-5-4-0，0-6-7-0，所用车辆数 3 辆，仿真试验如图 4.3 危险货物运输车辆路径问题仿真图所示：

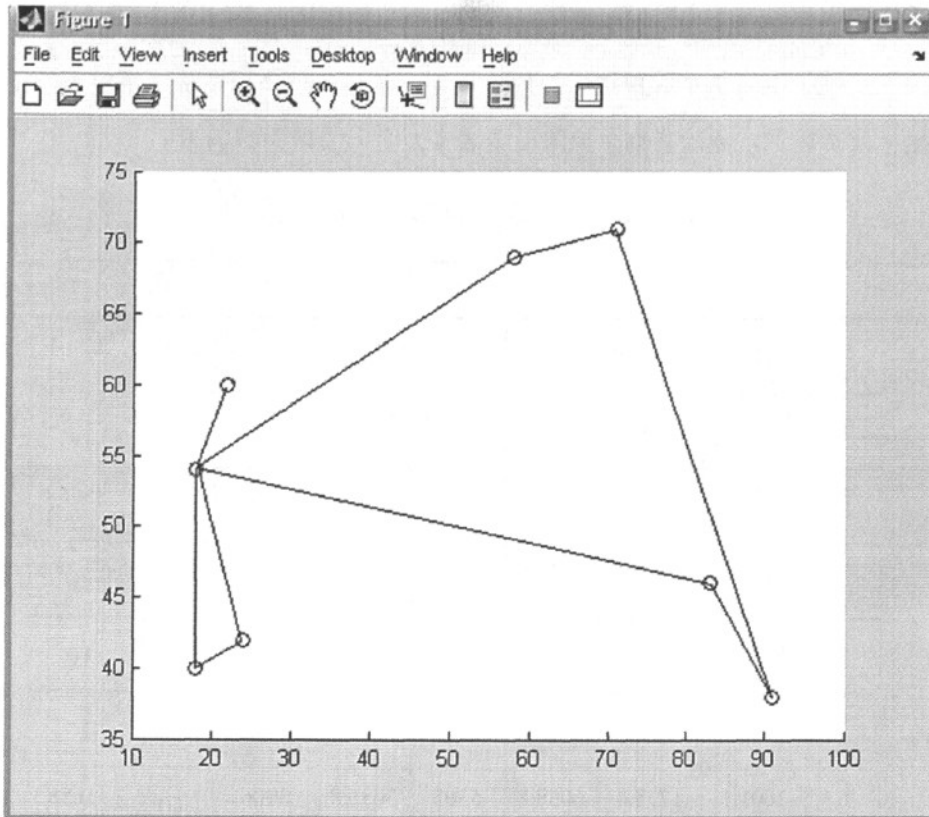


图 4.3 危险货物运输车辆路径问题仿真图

比较图 4.2 与图 4.3 可以看出，在相同的参数设置下，危险货物运输路径优化问题中考虑危险货物总风险度后，所得到的优化路线与普通货物运输路径优化问题中的的优化路线不同。因为考虑了危险货物风险度的缘故，危险货物运输路线长度为 219.4279，比普通货物运输路线长度长 1.6144。

通过用 Matlab 编制的程序对危险货物运输路径的优化，可以看出：改进的蚁群算法是成功的，在危险货物运输路径应用是可行的。这将为从事危险货物运输的车辆路线安排起到较好的优化效果，为企业快速决策，迅速对危险货物需求客户点作出反应提供了有力的数据支持。

#### 4.5 小结

1、介绍路段风险度计算模型及公式表示形式，引入路径加权值的概念，即为道路路段风险度的倒数，并将路径加权值引入蚁群算法的跃迁概率中，使蚂蚁选择路径时考虑道路路段风险度的影响因素。

2、基于 Matlab 的危险货物运输路径优化问题的蚁群算法程序流程，介绍了几个关键的程序块：生成距离矩阵、随机选择起点、路权生成、计算转移概率、约束计算、计算局部最短和最常路径、更新信息素、计算全局最短路径。

3、将改进的蚁群算法分别应用于道路普通货物运输车辆路径问题和道路危险货物运输车辆路径问题中。在参数相同的情况下，因为应用于道路危险货物运输车辆路径问题的蚁群算法中的转移概率引入路权参数，考虑了路段危险货物风险度，所以仿真路线结果不同。

## 结论

本文对危险货物运输现状进行了阐述,结合危险货物运输特点和危险货物运输路径优化研究,并用改进的蚁群算法应用于危险货物运输车辆的路径优化问题,进行了一些方法与模型的研究工作。

将改进的蚁群算法引入危险货物运输车辆路径优化,综合运用改进蚁群算法和车辆路径优化理论,对危险货物运输车辆路径优化进行了探讨,在考虑安全运输的前提下,追求运输系统总体最优。因此,本文针对道路危险货物运输路线的优化进行了分析研究,得出以下结论:

1、根据道路危险货物运输路线优化特点和道路危险货物运输路线优化的原则,在经典 VRP 模型的运输回路表示形式的基础上,提出了危险货物运输经典 VRP 模型的运输回路表示形式。

2、根据路段风险度计算模型及公式表示形式,引入路径加权值的概念,即为道路路段风险度的倒数,并将路径加权值引入蚁群算法的跃迁概率中,使蚂蚁选择路径时考虑道路路段风险度的影响因素。

3、基于 Matlab 的危险货物运输路径优化问题的蚁群算法程序流程,将改进的蚁群算法分别应用于客户点、各任务点坐标及货运量都相同的普通货物运输车辆路径问题和危险货物运输车辆路径问题中。在参数相同的情况下,因为应用于危险货物运输车辆路径问题的蚁群算法中的转移概率引入路权的概念,考虑了危险货物风险度,所以仿真路线结果不同。

需要进一步解决的问题:

1、对于本文所提出的危险货物运输经典 VRP 模型的运输回路表示形式,由于时间关系对其在模型的建立上缺乏足够的理论上的分析。因此,在这方面所做的工作有待于进一步完善,需要进行更加深层次的研究。

2、由于时间关系,对于本文所提出的路径加权值平衡指数值的选取没有足够的理论支持,只能采用试取值的方式。因此,路径加权值平衡指数值的选取需要更加进一步的研究分析。

## 参考文献

- [1] 吴宗之, 孙猛. 200 起危险化学品公路运输事故的统计分析及对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(2):3-8
- [2] 庄英伟. LPG 罐车公路运输风险评价方法及应用研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2004
- [3] 周珣. 基于道路危险货物运输安全的路线优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2004
- [4] 郭晓林, 李军. 基于事故分级的有害物品运输路径风险度量模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(6): 35-39
- [5] 刘大学. 基于 ITS 的道路危险货物运输管理信息系统设计与开发[D]. 西安: 长安大学, 2006
- [6] 沈小燕, 刘浩学, 周珣. 基于模糊综合评价的公路危险货物运输路线优化[J]. 公路与汽运, 2006, (1): 24-26
- [7] GB 6944—1986, 危险货物分类和品名编号[S]. 中华人民共和国国家标准, 1986
- [8] GB 6944—2005, 危险货物分类和品名编号[S]. 中华人民共和国国家标准, 2005
- [9] 刘敏文, 范贵根, 方洪仙, 等. 危险货物运输管理教程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.1
- [10] 王艳华, 佟淑娇, 陈宝智. 危险化学品道路运输系统危险性分析[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(2): 8~12
- [11] 任常兴, 吴宗之. 危险品道路运输选线问题分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 84~88
- [12] 柳林, 朱建荣. 基于混合蚂蚁算法的物流配送路径优化问题的研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, (13): 203-205
- [13] 沈 珪. 基于改进蚁群算法的配送路线优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2006
- [14] JT617-2004, 汽车运输危险货物规则[S]. 中华人民共和国交通标准, 2004
- [15] 柳林, 朱建荣. 基于遗传算法的物流配送路径优化问题的研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, (27): 227-229
- [16] M.Dorigo, V.Maniezzo, A.Colomi. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents[J]. IEEE Trans.Sys., Man, Cybernetics, 1996, (B26):29-41
- [17] DORIGOM, CAROGD, GAMBARDELLA L M. Ant algorithms for discrete optimization[J]. Artificial Life, 1999, 5(3): 137-172
- [18] LEGUIZAMON L M, MICHALEWICZ Z. A new version of ant system for subset problems[J]. Proceeding of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999, 2: 1459-1464.
- [19] GAMBARDELLA L M, TAILLARDED, DORIGOM. Ant colonies for the quadratic assignment



- problem[J]. Journal of the Operational Research Society,1999, 50(2): 167-176.
- [20] MANIEZZO DO GO M, COLORNI A. Algodesk: an experimental comparison of eight evolutionary heuristics applied to the quadratic assignment problem[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 81(1): 188-204.
- [21] 李士勇. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [22] 李继玲. 蚁群算法在物流运输车辆优化调度中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005
- [23] Botee H M, Bonabeau E. Evolving ant colony optimization. Advances in Complex System. 1998(2):149-159
- [24] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [25] 詹士昌, 徐婕, 吴俊. 蚁群算法中有关算法参数的最优选择[J]. 科技通讯, 2003, 19 (5): 381-386
- [26] 叶志伟, 郑肇葆. 蚁群算法中参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\rho$  设置的研究[J]. 武汉大学学报, 2004, 29 (7): 597-601
- [27] 何桂良, 潘久辉. 蚁群算法的小改进[J]. 现代计算机, 2005, (205): 76-79
- [28] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1 (1): 53-66.
- [29] 徐精明, 曹先彬, 王煦法. 蚁群算法求解问题时易产生的误区及对策[J]. 计算机工程. 2004, 30(16): 25-26
- [30] 敖磊. 求解 TSP 问题的改进蚁群算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005
- [31] 陈佑健. 蚁群算法的研究及在网络路由优化上的应用[D]. 南京: 河海大学, 2005
- [32] 宋雪梅. 蚁群算法的改进及应用研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2004
- [33] 付宇. 蚁群优化算法的改进及应用[D]. 上海: 上海海事大学, 2006
- [34] 刘安佐. 基于改进蚁群算法的数据分类研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006
- [35] 于致清. 基于蚁群算法的玻璃切割控制系统[D]. 成都: 四川大学, 2006
- [36] M.Dorigo, L.M.Gambardella. A study of some properties of ant-Q. In: Voigt H-M, Ebeling W, Rechenberg I, Schwefel H-S, eds. Proceedings of the PPSN44th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature Berlin. Springer Verlag, 1996: 656-665
- [37] T.Stuetzle, H.Hoos. The MAX-MIN Ant System and Local Search for the traveling Salesman Problem [C]. In Proc. ICE'97-1997 IEEE 4-th Int. Conf. Evolutionary Computation, IEEE Press, 1997. 147-167
- [38] L.M.Gambardella, M.Dorigo. An ant colony system hybridized with a new local search for sequential ordering problem[J]. INFORMS Journal on Computing, 2000, 12(3): 237-255

- [39] Ethan Erkut,Armann Ingolfsson , Transport Risk Models for Hazardous Materials: Revisited[J]. Operatians Research Letters, 2005, 33: 81-89
- [40] 李宁, 毓彤, 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,(4): 130-135

## 攻读学位期间取得的研究成果

- [1] 张恒海, 姜攀, 冯红运. 车速对轮胎噪声的影响和防治[J]. 长安大学学报社会科学版, 2006,8: 20-21
- [2] 赵建有, 张恒海, 冯忠祥. 道路交通事故预警系统构建[J]. ITS 智能交通, 2007, 1: 79-82
- [3] 冯红运, 姜攀, 张恒海. 连续下坡路段交通安全的改善措施[J]. 道路与安全, 2006, 6(9): 38-42

## 致谢

本文是在尊敬的导师赵建有教授的悉心指导下完成的。在与赵老师相处的日子里，无论是赵老师善良正直、和蔼可亲的为人，还是学术上一丝不苟的治学态度，都给我留下了深刻的印象。在三年的研究生学习期间，赵老师传授我丰富的专业知识，以其严谨的治学作风、丰富的科研经验、渊博的理论知识言传身教，导师宽容、和蔼、坦诚的人格魅力，将使我终身受益，在生活上，赵老师也给予我很大的关怀和帮助。我谨向赵老师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

同时也非常感谢我的舍友们，感谢他们为我营造了一个友善和谐的学习、生活空间。也感谢我的同学、师弟、师妹们，让我的学习与生活充满了活力与欢笑。感谢曾经给予我帮助和带给我欢乐的所有兄弟姐妹，与你们相识成友是我的荣幸，也是我在长大的最大收获！

最后，向含辛茹苦、任劳任怨、默默支持我的父母致以最崇高的敬意，感谢你们对我的支持和无微不至的关爱！你们的付出我今生难以报答，在今后的工作中我一定再接再厉，不辜负你们的期望！

最后感谢在百忙中给我审稿的各位老师，谢谢！