

陆 琳 © 著

不确定之心

信息车辆路径问题及其
智能算法研究



科学出版社
www.sciencep.com

不确定信息车辆路径 问题及其智能算法研究

陆 琳 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以现代物流的新现象——不确定信息车辆路径问题为研究对象,系统分析该类问题特征及其求解算法,以现代管理学、统计学为指导思想,构建新的随机车辆路径、模糊车辆路径、动态车辆路径模型,深入分析车辆路径问题各类求解算法的原理及改进思想,在此基础上提出最大熵分布估计算法、自感应蚁群算法、混合粒子群算法等新型智能优化算法,求解不确定信息车辆路径问题。研究表明,新的求解方法对不确定信息车辆路径规划具有明显的优化作用,它的导入对丰富物流学理论、提高我国物流企业竞争力具有重要的理论价值和现实指导意义。

本书适用于管理科学与工程、工商管理等经济管理专业教学、科研人员,也可供从事物流管理工作的政府经济部门和企事业单位管理人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

不确定信息车辆路径问题及其智能算法研究/陆琳著. —北京:科学出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-03-028806-6

I. ①不… II. ①陆… III. ①物流-车辆-运输调度-研究 IV. ①F253.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 167657 号

责任编辑:赵静荣 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市农林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 8 月第一次印刷 印张: 11 1/2

印数: 1—1 800 字数: 229 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着全球市场分工的进一步细化,世界范围内贸易的频率与数量都呈现出显著增长,物流效率成为甄别一个企业乃至一个国家经济运行效率的重要指标之一。车辆路径问题是物流运输系统的核心组件,由于其研究方法及成果可直接应用于组合优化领域,因而自诞生之日起就得到了理论与实务界的广泛关注,取得了大量的成果。但由于时代经济与信息处理技术的限制,这些研究大多是确定型模型,即假设在安排车辆路径之前,已经知道并且确定所有的相关信息。现今,社会经济运行的环境较从前发生了巨大变化。一方面,经济活动频率大大增加,伴随着大量的不确定信息;另一方面,通信及计算机技术的飞速发展不仅使社会经济秩序避免了因不确定信息的泛滥而可能引发的混乱,而且进一步促使人们利用这些不确定信息创造更多的财富。可以说,对不确定信息的处理策略及技术手段直接决定了经济实体的效率、赢利水平。针对这一新情况的产生、发展,本书对不确定信息车辆路径进行研究。

全书共 8 章。第 1 章为绪论,阐述了本书的研究背景和意义,介绍了本书的研究方法和思路以及各章的基本内容。第 2 章介绍车辆路径问题相关理论知识,分析车辆路径问题的内涵、特点、研究现状及相应的各种数学模型、优化方法,概述不确定信息车辆路径问题相关研究成果。第 3 章介绍了求解车辆路径问题的各类启发式算法的研究现状,并提出新的改良算法,即最大熵分布估计算法、自感应蚁群算法和混合粒子群算法,进行了相应的理论分析与证明,为处理复杂的不确定信息车辆路径问题提供必要的数学求解工具。第 4 章集中研究了随机需求车辆路径问题、随机顾客车辆路径问题以及同时供货和取货的随机车辆路径问题。第 5 章以车辆模糊行驶时间和顾客模糊预约时间为信息参量,分析了模糊车辆路径问题。第 6 章研究动态旅行修理员问题,阐述了动态车辆路径问题实现的技术支持单元以及动态信息数据生成的方法。第 7 章研究更具现实意义的满载有时间窗动态车辆路径问题,阐明物流企业对新信息的处理方法,提出动态车辆路径问题优化的分置策略。在上述理论的基础上,以 VB 为开发语言,开发出具有 Windows 图形界面的动态车辆路径规划系统,该系统可在电子地图上动态显示出车辆的行驶路线及当前位置,可根据动态信息的变化确定最优路径并显示输出。第 8 章总结了本书的研究成果和创新点,并对未来研究进行了展望。

本书的出版,得到了贵州财经学院的大力支持。在贵州财经学院“企业管理重点学科组”第四轮学科建设过程中,本书的创作出版被列入支持计划,感谢学科组

徐大佑教授、黄东兵教授对本书提出宝贵意见,感谢贵州省经济系统仿真重点实验室对本书的支持,尤其要感谢贵州财经学院副院长蔡绍洪教授、唐昌维副教授在本书创作时期给予帮助。本书出版承蒙国家社会科学基金(09CJY074)、贵州省科学技术基金(黔科合J字[2009]2120、[2010]2098)、贵州省教育厅自然科学重点基金(黔教科 20090013)的资助,并得到科学出版社高等教育出版中心经管分社社长陈亮和编辑赵静荣、胡志强等的帮助。在此,致以衷心的感谢。

在本书撰写过程中,参考了大量国内外的文章和著作,尽量注明和列出参考文献,可能还有疏漏,未能列出。在此,向相关文献作者表示衷心感谢!

陆 琳

2010年5月于贵州财经学院

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究方法和思路	2
1.3 主要研究内容	3
第 2 章 车辆路径问题相关理论概述	5
2.1 VRP 要素分析	5
2.2 不确定信息车辆路径问题的特征及要素	12
2.3 小结	18
第 3 章 求解车辆路径问题的各类启发式算法	19
3.1 引言	19
3.2 20 世纪 70~90 年代产生的智能算法	19
3.3 20 世纪 90 年代后产生的智能算法	74
3.4 小结	114
第 4 章 非实时 UIVRP I: 随机车辆路径问题	115
4.1 引言	115
4.2 VRPSD	115
4.3 VRPSC	119
4.4 VRPSDP	123
4.5 小结	127
第 5 章 非实时 UIVRP II: 模糊车辆路径问题	128
5.1 引言	128
5.2 FVRP 的描述与模型构建	128
5.3 试验分析	132
5.4 小结	133
第 6 章 实时 UIVRP I: 动态旅行修理员问题	134
6.1 引言	134
6.2 DTRP 的体系结构	134
6.3 动态度与动态强度	137
6.4 动态信息数据的生成	137

6.5	仿真试验	140
6.6	小结	148
第7章	实时 UIVRP II: 有时间窗动态车辆路径问题	149
7.1	引言	149
7.2	DVRPTW 的描述	149
7.3	动态顾客生成的新模型	151
7.4	DVRPTW 的优化算法	151
7.5	随机试验及分析	153
7.6	小结	157
第8章	结论与展望	158
8.1	主要结论	158
8.2	研究展望	160
参考文献		161

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

物流概念最早是由美国学者克拉克在 20 世纪 20 年代提出的,当时称为“Physical Distribution”,直译为“实物配送”。随着社会经济的发展,物流已从传统的运输服务发展成为以信息技术和管理为核心的综合物流系统,1984 年美国物流管理协会正式将物流概念改为“Logistics”^[1]。物流成本在 GDP 中占有较高的份额,其构成也反映了国民经济运行的规模与质量^[2~5]。

在对现代物流问题的众多研究中,车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)是最为引人注目的问题之一,一直是运筹学与组合优化领域的前沿与研究热点问题。这一方面是由于 VRP 的理论涉及多学科,很多实际问题的理论抽象都可归结于这一类问题,其研究成果可以广泛服务于运筹学、物流科学、交通运输工程、管理科学与工程、计算机应用、图论与网络分析等领域,具有很强的应用前景;另一方面是由于随着我国社会主义市场经济的不断完善,国民经济运行逐步与国际接轨,近年来,石油价格不断上涨(2010 年 5 月 7 日,纽约证券交易所报价为 77 美元/桶),大大提高了我国企业的经营成本,对物流系统构成了越来越大的压力,控制运输成本已成为企业急需解决的现实问题。在这种背景下,对 VRP 问题进行深入、系统的研究,不仅可以拓宽 VRP 的应用领域,而且可以为我国物流配送、交通运输等企业(组织)改进运输管理水平,以及提高运输效益提供重要的理论依据。

在以往的研究中,人们一般假定在构造路径之前,所有的信息(包括顾客信息、车辆信息、路况信息和路径制定者信息)都是确定的,路径制定者对所有信息掌握在胸,并且信息均与时间无关。在这样的假定下,安排的路径也是相对固定的,因而这类车辆路径问题被称为确定型 VRP。但是,客观世界存在着大量不确定性,反映在 VRP 中,可能会出现不确定的运输需求、不确定的顾客需求时间、交通拥挤、车辆故障等情况,这些不确定信息随着时间的推移会随机出现,需要适时改变车辆的运行路线,对已安排好的车辆路径进行及时调整。在这种情况下,传统的确定型 VRP 的理论和方法不再具有处理这些问题的能力,需要研究一整套新的与确定型 VRP 相对应的不确定信息车辆路径问题(uncertain information vehicle routing problem, UIVRP)的理论和方法。现代社会高效运转的机制对 UIVRP 的需求越来越大(如当下流行的“即时配送”),且随着通信和信息处理技术的发展,处理随机、模糊信息,动态安排车辆路径成为可能。在这种时代背景下,选择研究

UIVRP,不只是对 VRP 系统理论的一种完善,更具有现实的应用意义。

1.2 研究方法和思路

本书的研究方法总体上采取文献研究→算法设计→模型构建→算法实现→仿真测试与性能评估→结果讨论的研究路线。首先,对文献资料进行归纳分类、鉴别比较、去粗取精,找出各种方法的异同,吸取有用的方法和成果为我所用;其次,对新兴的人工智能算法进行系统深入的分析,提出新的改良解法;再次,作出合理的假设,确定正确贴切的目标,借鉴或融合现有的成熟方法,构建各类不确定信息车辆路径模型,在建模和算法上有所创新和突破;最后,对本书提出的算法和模型利用 VB 进行编程,开发出具有 Windows 图形界面的动态车辆路径规划系统,通过大量的仿真试验来验证本书提出的算法和模型的有效性。

本书的技术路线如图 1.1 所示。

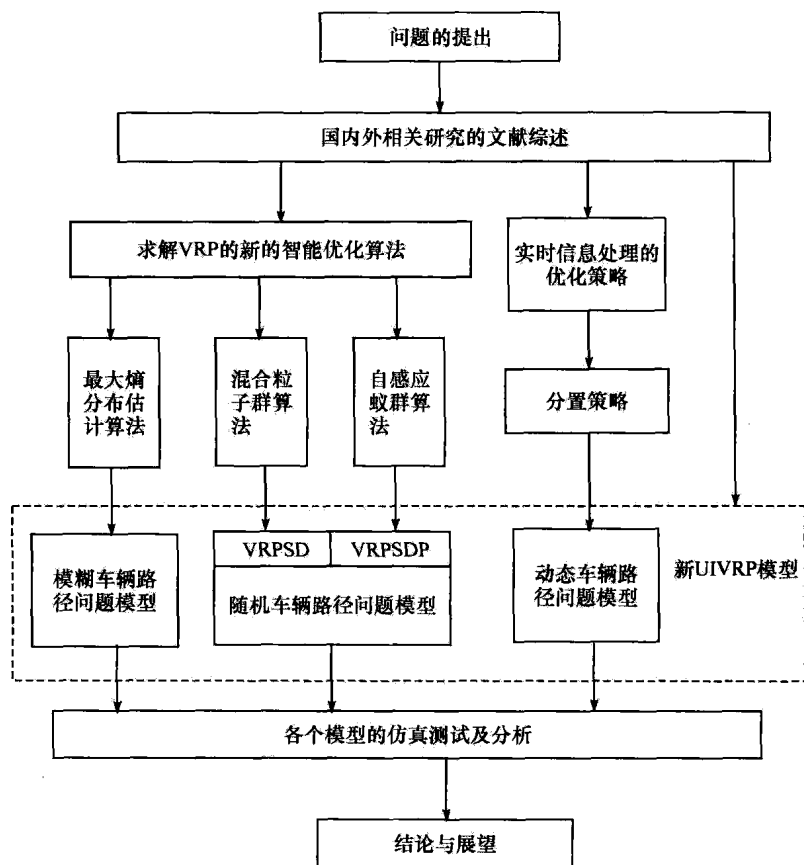


图 1.1 技术路线图

1.3 主要研究内容

第1章阐述了本书的研究背景和意义,介绍了本书的研究方法和思路以及各章的基本内容。

第2章对不确定信息车辆路径问题进行了概述。首先阐述了目前车辆路径问题的研究成果,包括车辆路径问题的定义、构成、分类、模型以及求解VRP问题的经典算法;在此基础上,将不确定信息车辆路径问题划分为非实时信息处理的不确定信息车辆路径问题和实时信息处理的不确定信息车辆路径问题两大类,分析了不确定信息车辆路径问题的内涵、特点、研究现状及相应的各种数学模型、优化方法,指出研究中存在的问题。

第3章对求解车辆路径问题的各类启发式算法的研究现状进行了较为详细的综述和归纳,阐述它们诞生的思想源泉、运作流程,并详尽分析了它们在车辆路径问题中的应用进展。在此基础上提出了新的改良算法,即最大熵分布估计算法(maximum entropy distribution algorithm, MEDA)、自感应蚁群算法(self-telepathy ant colony algorithm, STACA)和混合粒子群算法(hybrid particle swarm optimization, H-PSO),进行了相应的理论分析与证明,为处理复杂的不确定信息车辆路径问题提供必要的数学求解工具。

从第4章起正式转入不确定信息车辆路径问题的研究,从非实时UIVRP向实时UIVRP逐步递次深入。首先,在第4、5章入手研究非实时UIVRP。第4章研究了随机车辆路径问题(stochastic vehicle routing problem, SVRP),包括仅有供(取)货任务的随机需求车辆路径问题(vehicle routing problem with stochastic demands, VRPSD)、随机顾客车辆路径问题(vehicle routing problem with stochastic customers, VRPSC)以及具有同时供货和取货任务的随机车辆路径问题(vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up, VRPSDP)的内容。针对VRPSD问题,结合现实生活中长期顾客服务记录所隐含的统计性知识构建了新的统计学模型,设计了求解该模型的混合粒子群算法,并且通过大量的仿真试验分析了新算法与其他智能算法的优劣。对于VRPSDP问题,在VRPSD统计学模型的基础上构建了该类问题的整数规划模型,设计了针对该问题的自感应蚁群算法,并进行了数据测试与比较。第5章研究了模糊车辆路径问题(fuzzy vehicle routing problem, FVRP),以车辆模糊行驶时间以及顾客模糊预约时间为模糊信息参量,采用细分顾客类别以吸收配送者知识系统的方法,分别以物流企业效用最大化和顾客效用最大化两种决策目标构建了两类模糊信息动态车辆调度优化模型,给出了求解该类问题的最大熵分布估计算法,并结合仿真试验分析了决策参数的变化对两类模型计算结果的影响,给出了相关参数制定的依据。

第 6、7 章展开对实时 UIVRP 的研究。其中,第 6 章主要研究非满载动态车辆路径问题,即动态旅行修理员问题(dynamic traveling repairman problem, DTRP),阐述了动态车辆路径问题(dynamic vehicle routing problem, DVRP)实现的技术支持单元以及动态信息数据生成的方法,并利用仿真试验考察了实时 UIDRP 问题各现场一次性优化方法的性能。第 7 章对满载有时间窗动态车辆路径问题(dynamic vehicle routing problem with time windows, DVRPTW)进行了研究,在拟合动态顾客的生成流、处理新信息的机制以及动态规划行驶中车辆行驶路径的策略方面提出了新的见解,发展了一种新的时间决定型 Poisson 流模型以拟合动态顾客的生成,阐明物流企业对新信息的处理方法,提出 DVRP 优化的分置策略,设计了针对该问题的改进蚁群算法(modified ant colony optimization, MACO)以及相应的分段计算启用规则,并结合仿真试验与各现场一次性优化方法及基本蚁群算法进行了性能比较,验证新策略及新算法的有效性。

第 8 章对本书所做的研究工作和所取得的研究结果进行了简要的归纳和总结,并提出今后需要进一步深入研究的问题和方向。

第2章 车辆路径问题相关理论概述

2.1 VRP 要素分析

2.1.1 车辆路径问题的定义

车辆路径问题最早由学者 Dantzig 和 Ramser^[6]于 1959 年提出,一般可定义为:对于一系列装货点和(或)卸货点,组织合适的行车线路,使载货车辆有序地通过它们,在满足一定的约束条件(如货物需求量、发送量、交发货时间、车辆容量限制、行驶里程限制、时间限制等)下,达到一定的目标(如路程最短、费用最少、时间尽量少、使用车辆数量尽量少等)^[7]。车辆路径问题的示意图如图 2.1 所示。

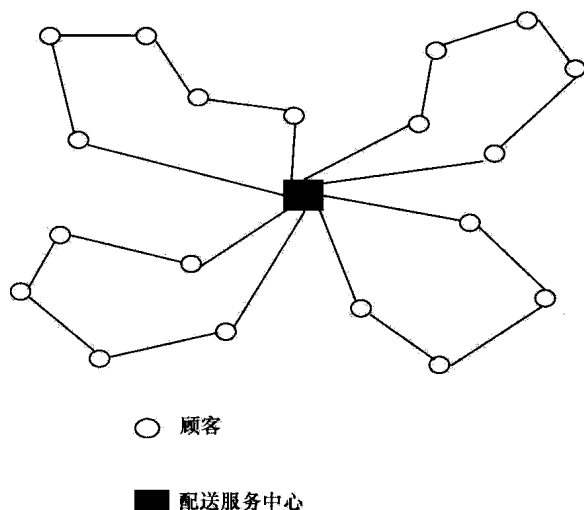


图 2.1 车辆路径问题示意图

根据问题的空间特性和时间特性的相对重要性,国外将车辆路径问题归结为车辆线路安排问题和车辆调度问题。一般认为,不考虑时间要求,仅根据空间位置安排线路时称为车辆线路安排问题;考虑时间要求,安排线路时称为车辆调度问题^[8]。为规范全书用语,不在论述中产生概念上的混淆,本书统一将论述问题归为 VRP;对于有时间要求的车辆调度问题采用加上具体约束定语的形式进行表达,如“vehicle routing problem with time windows”等。

2.1.2 VRP 的分类

VRP 主要包括货物、车辆、物流中心、顾客、运输网络、约束条件和目标函数等构成要素,根据这些要素可划分为不同的种类^[9]:

(1) 按物流中心的数目分,有单物流中心问题(配送系统中仅有一个物流中心)和多物流中心问题(配送系统中存在多个物流中心)。

(2) 按车辆载货状况分,有满载问题(由于顾客需求或供应的货物量大于或等于车辆载重量,故完成一项配送任务需要一辆以上的配送车辆,配送车辆需要满载运行)、非满载问题(由于顾客需求或供应的货物量小于车辆载重量,多项配送任务可共用一辆配送车辆,车辆在配送过程中经常处于非满载状态)、满载和非满载混合问题(由于一部分顾客需求或供应的货物量大于或等于车辆载重量,而另一部分顾客需求或供应的货物量小于车辆载重量,一些配送车辆需要满载运行,而另一些车辆则经常处于非满载状态)。

(3) 按配送任务特征分,有纯送货问题(仅考虑从物流中心向顾客送货,也称为纯卸问题)、纯取货问题(仅考虑把各顾客供应的货物取到物流中心,也称为纯装问题)以及取送混合问题(既考虑将顾客需求的货物从物流中心送到各个顾客,同时考虑将顾客供应的货物从顾客处取到物流中心,也称为装卸混合问题或集货和送货一体化问题),如图 2.2 所示。

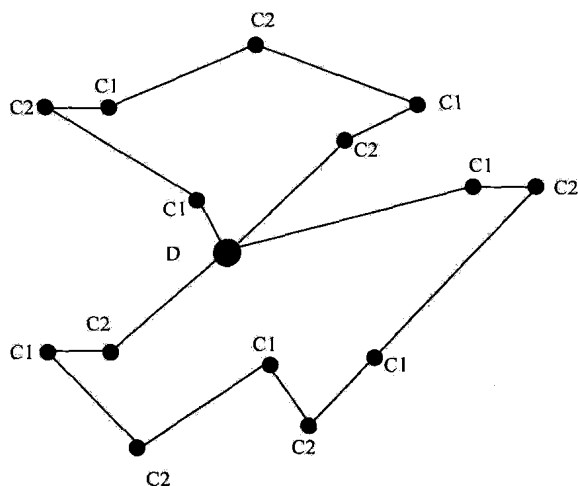


图 2.2 集送一体化 VRP

(4) 按顾客对货物取(送)时间的要求分,有无时限问题(顾客对货物的取走或送到的时间无具体要求)和有时限问题(顾客要求将需求的货物在规定的时间内送到,将供应的货物在规定的时间内取走,也称为有时限问题)。有时限问题

又可以分为硬时间窗问题(顾客要求货物必须在规定的时间内送到或取走,不能提前也不能拖后)和软时间窗问题(顾客要求将货物尽量在规定的时间内送到或取走,但也可以提前或拖后,只不过在提前或拖后时,要对配送企业实施一定的惩罚)。

(5) 按已知信息的特征分类,有静态 VRP 和动态 VRP。

(6) 按需求是否可切分分类,可分为可切分的 VRP 和不可切分的 VRP。

(7) 按车辆类型数分,有单车型问题(所有配送车辆载重量相同)和多车型问题(配送车辆载重量不完全相同)。

(8) 按车辆对车场的所属关系分,有开放式 VRP(即车辆完成配送任务后,可以不返回其发出车场,回车车场可以是指定的多个车场之一,见图 2.3)和半开放式 VRP(即以完成最后一个配送任务为配送结束标志,不用回到车场,见图 2.4)。

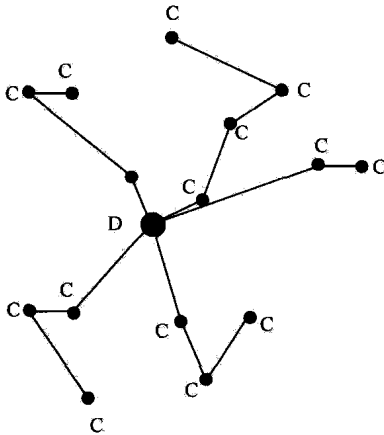


图 2.3 开放式 VRP

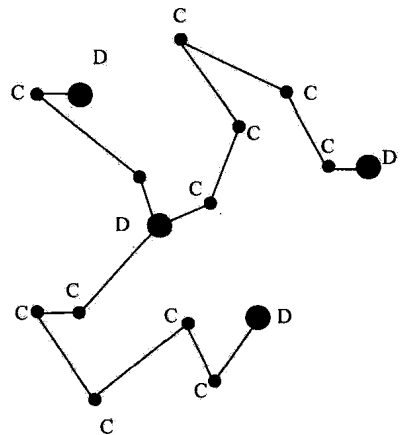


图 2.4 半开放式 VRP

(9) 按优化目标数分,有单目标问题(仅考虑一个配送目标)和多目标问题(同时考虑多个配送目标)。

(10) 按 VRP 涉及车场的数量来分,VRP 可分为单车场或多车场两种类型。单车场 VRP 表示配送车辆发车或回车只有一个车场,多车场 VRP 的配送车辆则有多多个车场可供选择。如图 2.5、图 2.6 所示。

2.1.3 VRP 复杂度分析

文献[10]对优化组合问题算法的有效性进行了阐述,认为优化组合问题算法可以用执行该算法的各种计算资源来度量,其中最重要、最典型的两个资源是所需的运行时间和存储空间,不过人们一般把最快的算法与最有效的算法等同起来,因为运算时间常常是决定某一特定算法在实际中的实用性和有效性的主要因素。为了更具一般性,人们常常用问题规模 n 的函数来表示计算的复杂性,如旅行商问题

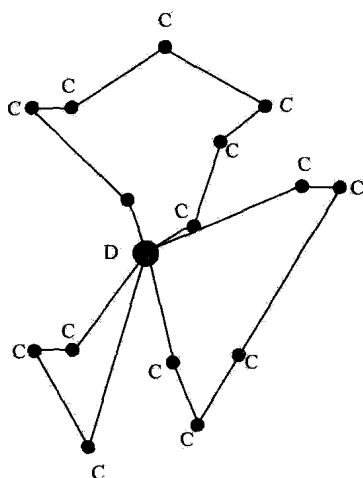


图 2.5 单车场 VRP

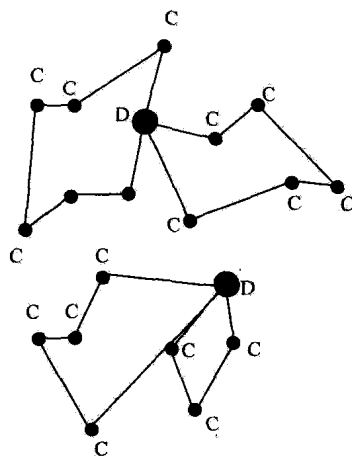


图 2.6 多车场 VRP

的城市数、背包问题的物品数。不同的算法具有不同的时间复杂性,通常认为,仅当算法的时间复杂性函数是关于 n 的多项式函数时,才认为这个算法是有效的、实用的。

1) 以算法复杂性为基础的算法分类

以算法复杂性为基础,可以把算法分为两类:一类是多项式算法,即存在某个以 n 为变量的多项式 $P(n)$,使其时间复杂度函数为 $o[P(n)]$ 的算法;另一类是指数时间算法, n 是作为指数出现在时间复杂度里面的。例如,搜索二分法的时间复杂性是 $o(\lg n)$,它是多项式算法;用动态规划方法解 TSP 问题,它的时间复杂性为 $o(n^2 2^n)$,是指数时间算法。

2) P (polynomial, 多项式)问题、 NP (non deterministic polynomial, 非多项式)问题、 NP 完全问题、 NP -hard 问题

(1) P 问题。如果一个问题有求解它的多项式算法,这个问题称为 P 问题。

(2) NP 问题。若存在一个多项式函数 $g(x)$ 和一个验证算法 H ,对一类判定问题 A 的任何一个“是”的判定实例 I 都存在一个字符串 S 是 I 的“是”回答,满足其输入长度 $d(S)$ 不超过 $g[d(I)]$ 。其中, $d(I)$ 为 I 的输入长度,且验证算法验证 S 为 I 的“是”回答的计算时间不超过 $g[d(I)]$,则称判定问题 A 为多项式非确定性问题,简称为 NP 问题。

(3) 判定问题 P 到 Q 的归约是指存在一个转换函数 F ,它可以把问题 P 的输入 x 转换为问题 Q 的输入 $F(x)$,使得问题 P 对于输入 x 得到正确结果当且仅当问题 Q 对于输入 $F(x)$ 得到正确结果。多项式归约是用来建立两个问题 P 和 Q 之间的复杂程度的比较关系,实际上就是通过转换函数 $F(x)$ 把求解问题 P 转化为对问题 Q 的求解。

(4) NP-C 问题,也称为 NP 完全问题。如果判定问题 $A \in \text{NP}$ 且 NP 中任何问题可多项式归约为问题 A,则 A 为 NP-C 问题。

(5) NP-hard 问题,也称为 NP 难问题。NP 中任何一个问题可多项式归约为问题 A,但不确定是否 $A \in \text{NP}$,称问题 A 为 NP-hard。NP-C 能多项式归约为 NP-hard,反推不成立。

$P \neq \text{NP}$ 时, P、NP、NP-C、NP-hard 的关系如图 2.7 所示。

3) 车辆路径问题的复杂度

VRP 被提出后,对其求解算法的研究一直是研究的重点和难点。在对其求解算法进行研究的同时,不少学者也对它的计算复杂性进行了

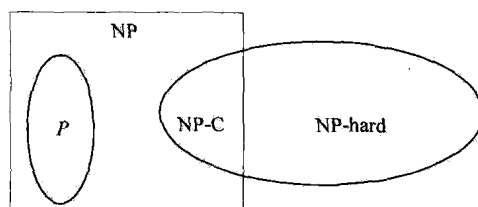


图 2.7 算法复杂性关系图

研究,为确定求解算法的研究方向奠定了基础。Lenstra 证明了容量约束 VRP 是 NP-hard 问题。Hassin、Shlomi Rubinstein 证明了 k VRP 问题在 k 等于 3 或 4 时, k VRP 问题能找到多项式时间算法;但是当 k 大于 4 时,只存在求解该问题的指数时间算法。Akio Imai、Etsuko Nishimura 等证明了多车型 VRP 属于 NP-hard。Solomon 指出带时间窗的 VRP 比一般的 VRP 更复杂。Hideki Hashimoto、Toshihide Ibaraki 等证明了软时间窗 VRP 属于 NP-hard。Savelsbergh 提出不仅带时间窗的 VRP 本身是 NP-hard 问题,而且当车队大小(可用车辆数)固定时,甚至要得到一个问题的可行解都是一个 NP-hard。Lenstra 和 Rinnooy Kan 在对 VRP 的计算复杂性进行综述和分析的基础上,证明了几乎所有类型的 VRP 均为 NP-hard 问题。

2.1.4 VRP 的模型

由 VRP 的分类可知,VRP 的多样性与复杂性造就了该问题模型的形式多样性和求解复杂性。因此,作为问题求解的开始,其模型的建立也是十分复杂的。经过几十年的研究发展,有关 VRP 模型的研究已经取得了大量的成果。综合过去的相关研究,VRP 模型基本可以分为图模型、数学模型和仿真模型^[11]。

1) 图模型

图模型是 VRP 模型最基本的形式,图模型可定义为 $G=(V,A)$ 。其中, $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$, v_0 表示供货点, $v_1, \dots, v_n$ 代表 n 个需求量分别为 $q_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的待访问顾客点; $A \subset V \times V$ 表示弧或者点之间的通路。另外的条件还有以下几个:模型中有 m 辆车;载重量分别为 $Q_i (i=1, 2, \dots, m)$; c_{ij} 是弧,它通常用通路 $(v_i, v_j) \in A$ 的费用或者距离来表示。该模型要实现的目标就是在图 G 上确定出 m 条路径,使全局总费用最小或者使路程最短。

2) 数学模型

由于 VRP 是 NP-hard 问题, 因此对 VRP 数学模型的研究较多, 按决策变量含义的不同主要有以下几类。

(1) 含有 0-1 决策变量的模型: 0-1 变量可以针对行车路线而制定, 也可以针对车辆与顾客的关系而定。

(2) 含有整型决策变量的模型: 变量可表示为使用某种型号的车辆数目, 或者表示行走某一路线的车辆数目等。

(3) 含有非负线性决策变量的模型: 如运输问题的模型等。

总之, 物流配送车辆路径规划模型是一个混合整数线性规划模型, 它可以根据变量设定的需要包含 0-1 变量、其他整数变量以及线性变量等。

3) 仿真模型

仿真模型是对实际问题的直观描述, 该类模型包含了问题领域的知识, 是与实际问题的本来面目更加接近的一类模型。国内学者在对物流系统进行仿真时, 大多采用基于 Petri 网的网络模型的方式, 其基本思想是, 用库所集 P 代表系统中实体和活动的状态, 用变迁集 T 代表系统中的事件。Petri 网虽然非常适合于建立系统动态模型, 并且能对系统的动态特性进行分析, 它的图形表示也为其应用带来很好的直观性, 但是, 当系统比较复杂时, 利用 Petri 网进行建模与分析存在很大的难度, 因为此时 Petri 网模型将变得十分复杂并产生组合爆炸, 从而给仿真带来极大困难。因此, 直接应用普通 Petri 网对复杂物流系统进行建模和分析是不合适的, 必须扩展 Petri 网的定义, 或直接采用实体流程图等比较简单的建模方法。

2.1.5 VRP 的求解算法

VRP 被提出后, 对其求解算法的研究一直是研究的重点和难点, 目前已提出了许多求解 VRP 的算法, 主要分为精确算法和启发式算法两大类^[8]。

1. 精确算法

精确算法指可求出最优解的算法, 主要针对 VRP 的图模型和数学模型进行求解, 计算量一般随问题规模的增大而呈指数增长, 所以多用于规模较小的问题。精确算法主要包括直接树搜索算法、动态规划方法和整数线性规划三个大类, 其代表性的算法有 Laporte 等^[12]提出的分支定界算法、Christofidest 等^[13]提出的 k 度中心树算法、Eilon 等^[14]提出的动态规划法、Balinski 和 Quandt^[15]首先提出的集分割和列生成法、Fisher 和 Jaikumar^[16]针对带能力约束时间窗口以及无停留时间的 VRP 问题提出的三下标车辆流方程法、Laporte 等^[17]提出的二下标车辆流方程法等。

总体说来, 精确算法基于严格的数学手段, 在可以求解的情况下, 其解通常要