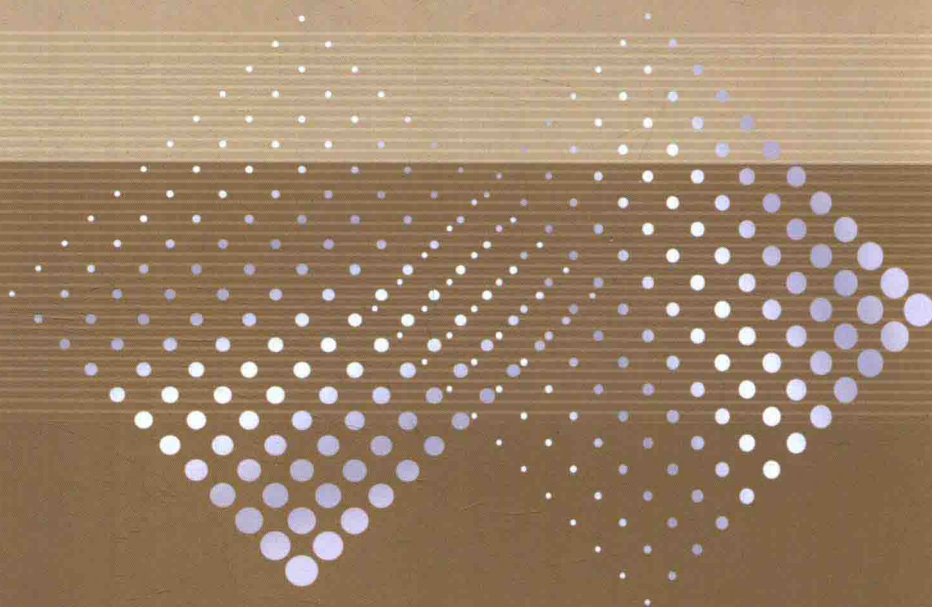


配送企业车辆路径问题的建模及优化方法

Models and Heuristics for Vehicle Routing Problem of Distribution Companies

◎王超 穆东 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.cn>

配送企业车辆路径问题的 建模及优化方法

Models and Heuristics for Vehicle Routing Problem
of Distribution Companies

王 超 穆 东 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

随着市场经济的发展,配送对经济活动的影响越来越明显。车辆路径问题(VRP)一直是配送活动优化的重要内容,是最大限度地降低配送成本、提高顾客满意度的保障。本书在全面综述了国内外车辆路径问题研究现状的基础上,主要针对配送企业的实际需求,研究了目前最常见、配送发展迫切需要解决的三种车辆路径问题,给出了智能启发式求解算法,并以北京市一家配送企业为例,介绍如何通过本书中的求解算法,减少企业的配送车辆数和车辆行驶总距离。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

配送企业车辆路径问题的建模及优化方法 / 王超, 穆东著. — 北京: 北京交通大学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-5121-2657-2

I. ① 配… II. ① 王… ② 穆… III. ① 物资配送-车辆调度-研究
IV. ① F252. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 030278 号

配送企业车辆路径问题的建模及优化方法

PEISONG QIYE CHELIANG LUJING WENTI DE JIANMO JI YOUHUA FANGFA

策划编辑: 吴嫦娥

责任编辑: 解 坤

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印 刷 者: 北京艺堂印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170 mm×235 mm 印张: 12 字数: 249 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-2657-2/F·1593

印 数: 1~800 册 定价: 45.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

随着市场经济的发展，配送对经济活动的影响越来越明显。车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP) 一直是配送活动优化的重要内容，是最大限度地降低配送成本、提高顾客满意度的保障。VRP 问题将运筹学理论研究和实际生产生活紧密联系起来，是运筹学领域发展最成功的主题之一。由于亚启发式算法这门新兴建模技术的不断发展和完善，许多学者都开始利用这一方法，对 VRP 问题进行近似求解，取得了令人瞩目的成果。

本书也是通过亚启发式算法求解 VRP 问题的研究成果之一，主要针对配送企业的实际需求，研究了目前最常见、配送发展迫切需要解决的三种车辆路径问题，并给出了智能启发式求解算法。全书共 7 章，第 1 章介绍了本书的研究背景和意义，以及技术路线；第 2 章综述了国内外车辆路径问题研究现状，并对本书所采用的研究方法进行了概念性介绍；第 3 章考虑同时取送货的车辆路径问题 (VRPSPD)，并提出一种基于禁忌规则的模拟退火算法 (HSA)。第 4 章考虑带时间窗和同时取送货的车辆路径问题 (VRPSPDTW)，并构建基于时间窗和同时取送货的车辆路径问题 (VRPSPDTW)。第 5 章考虑配送网点优化的车辆路径问题 (2E-LRPSPDTW)，并提出并行模拟退火路径重连算法 (P-SA-PR) 求解。第 6 章调研北京一家配送企业 (CSYB)，优化了该企业的车辆配送路径。第 7 章是结论与展望。

车辆路径问题的研究涉及运筹管理和交通运输领域的热点、难点问题，本书是在我的博士学位论文《配送企业车辆路径问题模型与算法研究》的基础上修改完成的，尝试将自己在该领域的一些研究历程、心得及部分经验和读者分享。

完成本书，首先我要感谢我的导师穆东教授和魏际刚教授，没有他们的引领，我无法走进浩瀚的学术海洋，也无法形成自成体系的研究思想和成果。其次，我要感谢美国 Purdue University 的 John W. Sutherland 教授和 Fu Zhao 教授，在做访问学者两年，对我的科研给予了宝贵的指导。此外，华中科技大学的刘琼教授、重庆大学的何彦副教授、Purdue University 的 Katherine Ortegon，以及我的同门姜庆国博士、刘沛博士生、杨丽博士生和中国海洋大学信息科学与工程学院的周圣川博士生、北京交通大学计算机与信息技术学院的王胜春博士生、华为南京研究所的陈明、西北工业大学理学院的孔维仁博士生等对书中的理论和算法的研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。在调研期间，CSYB 企业的总经理、区域配送网点经理（陈洪刚、谭林）和若干快递员对 CSYB 配送过程的运作环节给予了详细介绍，再次表达我衷心的感谢。

本书得到了国家自然科学基金重点项目（No.71132008）“物流资源整合与调度优化研究”和国家自然科学基金面上项目（No.71473013）“物流资源低碳整合模式与动态决策研究”的资助，在此表示衷心的感谢。

本书的选题涉及运筹管理和交通运输领域的热点、难点问题，对 VRP 问题的研究是基于确定信息，而在实际中顾客的需求是随机性需求。今后的研究将分析具有统计规律的随机性信息，研究随机性信息条件下的配送企业车辆路径问题。另外，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

王 超

2015 年 12 月 8 日于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究内容和技术路线	3
1.3 研究创新点	6
第 2 章 文献综述和研究方法	8
2.1 车辆路径问题研究综述	8
2.1.1 VRP 问题简介	8
2.1.2 考虑同时取送货的 VRP 问题研究综述	9
2.1.3 考虑时间窗和同时取送货的 VRP 问题研究综述	13
2.1.4 考虑选址分配的 VRP 问题研究综述	14
2.2 研究方法概述	33
2.2.1 模拟退火算法	33
2.2.2 禁忌搜索算法	34
2.2.3 并行计算	36
2.2.4 路径重连	37
2.3 本章小结	39
第 3 章 考虑同时取送货的车辆路径问题	40
3.1 引言	40
3.2 VRPSPD 问题模型	42
3.2.1 问题描述	42

3.2.2 数学模型43

3.3 算法设计.....45

3.3.1 初始解45

3.3.2 局部搜索算法45

3.3.3 基于禁忌规则的模拟退火算法48

3.4 数值实验.....51

3.4.1 算法参数的确定51

3.4.2 算法性能比较52

3.5 本章小结.....63

第4章 考虑带时间窗和同时取送货的车辆路径问题64

4.1 引言.....64

4.2 VRPSPDTW 问题模型.....66

4.2.1 问题描述66

4.2.2 数学模型67

4.3 算法设计.....69

4.3.1 串行模拟退火算法69

4.3.2 主从模式的并行化70

4.4 数值实验.....75

4.4.1 算法参数的确定76

4.4.2 算法性能比较76

4.5 本章小结.....82

第5章 考虑配送网点优化的车辆路径问题83

5.1 引言.....83

5.2 2E-LRPSPDTW 问题模型.....85

5.2.1 问题描述85

5.2.2 数学模型	88
5.3 算法设计	93
5.3.1 算法框架	93
5.3.2 初始解	94
5.3.3 初始温度和初始成本	96
5.3.4 邻域结构	98
5.3.5 主从模式的并行化	101
5.3.6 结合子问题	101
5.3.7 路径重连算法	105
5.4 数值实验	106
5.4.1 算法参数的确定	108
5.4.2 算法性能比较	108
5.5 本章小结	118
第 6 章 案例分析——以 CSYB 企业为例	120
6.1 CSYB 配送企业概况	120
6.1.1 公司简介	120
6.1.2 调研中发现的问题	121
6.1.3 企业营业网点	121
6.2 CSYB 企业配送路径优化	122
6.2.1 CSYB 单级车辆配送路径的优化	122
6.2.2 CSYB 考虑网点选址的两级配送系统的优化	124
6.2.3 假设获得厢式货车通行证情景下 CSYB 企业的配送路径	129
6.3 本章小结	131
第 7 章 结论与展望	133
7.1 研究结论	133

7.2 研究展望..... 137

附录 A CPLEX 求解 VRPSPDTW 问题的程序..... 139

附录 B CSYB 企业配送网点..... 145

附录 C CSYB 企业配送网点及社区..... 146

参考文献..... 150

后记..... 183



第1章

绪 论

1.1 研究背景和意义

车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP) 指一个或多个设施和多个地理位置分散的顾客点, 在满足一系列约束条件的前提下, 设计一套运输路线, 满足货物在设施和顾客点的运输^[1], 属于最为经典的组合优化问题之一。该问题自 1959 年由 Dantzig 和 Ramser^[2] 首次提出以来, 吸引了众多领域专家和学者的研究兴趣, 并取得了丰富的成果。

在理论研究上, 有大量的文献研究带时间窗的 VRP 问题 (vehicle routing problem with time window, VRPTW), 有较多的文献研究同时取送货的 VRP 问题 (vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, VRPSPD), 但是既考虑时间窗又考虑同时取送货的 VRP 问题 (vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows, VRPSPDTW) 的文献却非常少, 而且缺乏有效的算法求解该问题。然而, 在企业配送中货物的流动是双向的, 既需要将产品配送到顾客, 有时也需要从顾客处取货。与此同时, 配送企业为了满足顾客的要求, 往往需要考虑顾客的时间窗, 以便在规定的时间内完成送货

和取货任务。

另外,一些学者在研究 VRP 问题时,将配送网点的选址分配统筹考虑,构成了选址-路径问题(location routing problem, LRP)。但是目前多数的研究局限于单级配送网络。然而,在企业配送中,货物流动过程通常包括了两个阶段,即从中央配送中心到区域配送网点的分销阶段、从区域配送网点到顾客的分销阶段,这是一个两级(2E)配送问题。

在现实应用中,VRP 问题在发达国家已经有着非常广泛的应用,包括快递业、航空运输、班车路线规划等。近年来,随着我国产业布局的调整与升级、电子商务的迅猛发展、消费方式的转变,以及城市工商业发展模式的日趋多元化,小批量、多频次、时效性强的直接配送、住宅配送以及“门到门”配送等配送业务迅速发展,既有力地促进了经济社会的发展,又方便了居民多元化需求。但是,我国配送企业众多,服务水平参差不齐,配送路线的选择主要依靠司机经验,缺乏配送路线的合理设计和计算机软件的辅助,直接结果是不仅降低了企业的配送效率和增加了配送成本,而且由于配送业务的大量增加、配送车辆的迅猛增长,也给城市的交通、环境带来了影响^[3-4]。因此,通过科学、合理的方法来协助企业优化车辆配送线路,具有较强的现实意义。

综上所述,研究车辆路径的优化,通过科学、合理的方法来确定车辆配送线路,在面对众多需求的顾客时,准时地将货物配送给顾客,同时尽量减少配送车辆和配送里程,具有重要的理论和实践意义。

在理论上有两方面:①为配送企业的车辆路径选择提供新的方法。VRP 问题一直是运筹学与组合优化领域的研究热点问题,涉及管理科学与工程、计算机、数学等众多学科的交叉融合。由于 VRP 问题是 NP-hard 问题,促使许多学者在求解方法方面进行理论创新。本书提出了 VRPSPD 问题、VRPSPTW 问题、2E-LRPSPTW(带时间窗和同时取送货的两级选址-路径问题, two echelon location routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows)问题

的混合整数规划模型 (mix integer problem, MIP) 和智能优化算法, 这为 VRP 问题 (涉及 LRP 问题) 提供了一个新的启发式算法。② 研究的 2E-LRPSPDTW 问题, 考虑配送网点的选址分配, 贴近当前配送网络的实际特征, 用系统的眼光分析研究企业的配送系统, 它改变了单纯地从运输路线选择的角度进行配送系统的优化。

在实践上有两方面: ① 有利于促进配送企业的发展。利润最大化是配送企业的目标, 这一目标促使他们不断提高专业化水平, 抢占配送市场。低效的配送系统将降低配送企业的市场竞争力。因此, VRP 问题的研究有助于整合配送资源, 优化企业的配送系统, 提高顾客服务水平, 降低配送成本。② 有利于减轻城市交通负担, 减少尾气排放, 促进城市可持续发展。Swgalou 等^[5]指出, 城市内的货物运输产生的氮氧化物和悬浮微粒的排放量分别占到整个城市运输排放量的 40% 和 45%。这些数据显示城市内的货物运输对市民的健康有着不可忽略的影响。研究 VRP 问题, 通过算法优化配送路径, 可以在满足顾客需求的情况下, 减少车辆出行次数, 降低车辆行驶里程, 增加车辆装载率, 减轻对城市交通拥堵和交通环境产生的影响, 促进城市可持续发展。

1.2 研究内容和技术路线

本书综合运用运筹学、管理学、经济学等相关理论与方法, 结合配送企业的实际, 在综述国内外 VRP 相关问题研究现状的基础上, 采用系统分析、数学建模与实证研究相结合的方法, 提出了目前最常见、配送发展迫切需要解决的三种车辆路径问题的算法。本书以 VRP 问题的基本模型出发, 考虑现实中的顾客有同时取送货的需求, 研究了 VRPSPD 问题, 提出 HSA 算法; 在此基础上, 引入顾客服务时间窗限制, 研究了 VRPSPDTW 问题, 提出 P-SA 算法; 并进一步考虑配送网点的优化, 研究了 2E-LRPSPDTW 问题, 提出 P-SA-PR 算法。本书的研究

技术路线如图 1-1 所示，具体研究内容如下。

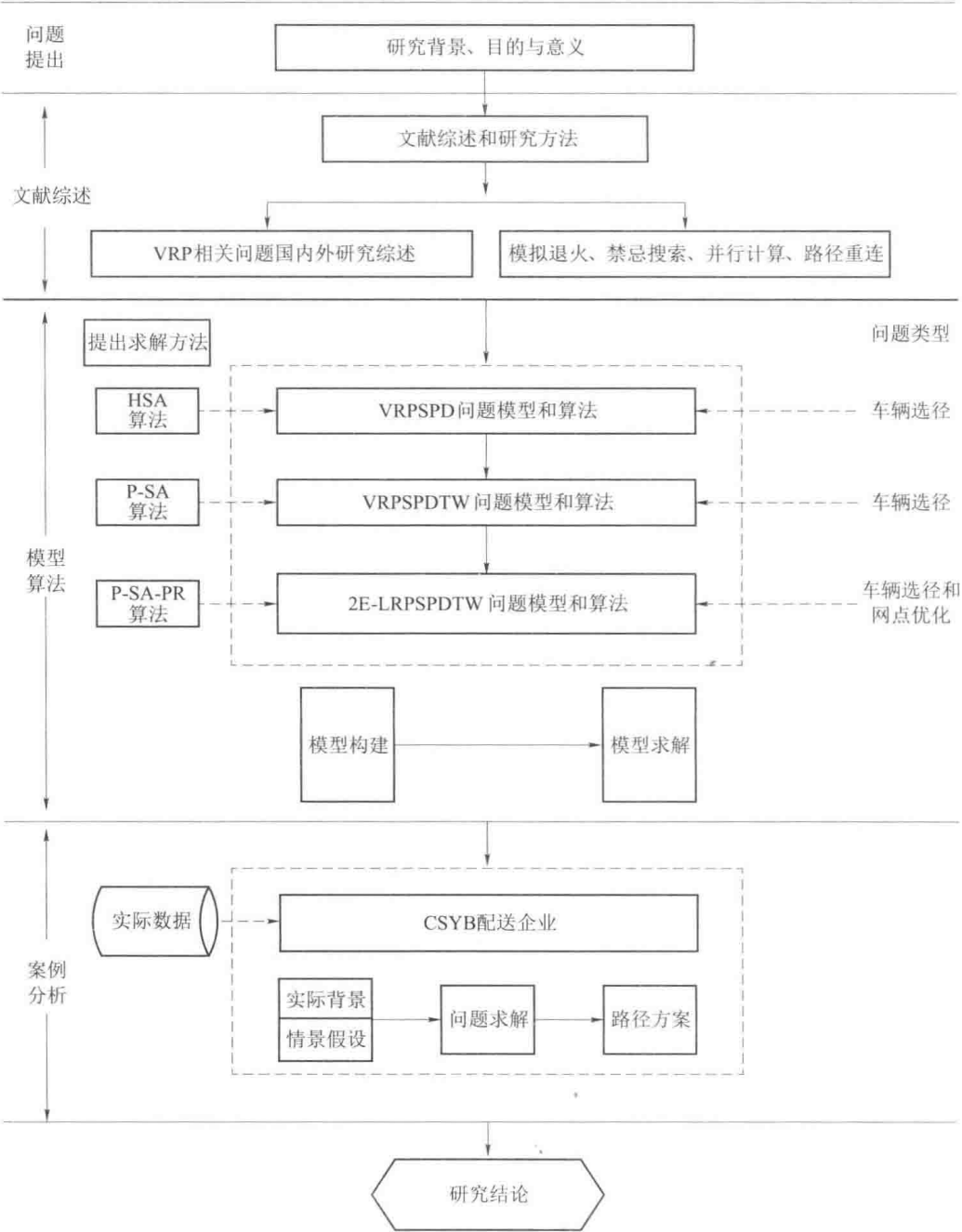


图 1-1 技术路线图

第1章：绪论。首先介绍了研究配送企业车辆路径问题的背景和意义，并从配送企业的现实命题出发，引出本书的研究内容和研究思路，并介绍本书的研究创新点。

第2章：详细总结了国内外 VRP 问题的研究现状，通过文献分析发现了现阶段 VRP 问题的研究不足，并介绍本书所使用的模拟退火算法、禁忌搜索算法、并行计算和路径重连算法等。

第3章：对考虑同时取送货的车辆路径问题（VRPSPD）进行研究。对于配送企业的车辆路径问题，从最基本的 VRP 模型入手，考虑每个顾客有同时取货和送货的需求（simultaneous pickup and delivery, SPD），则是一个同时取送货的车辆路径优化问题（VRPSPD）。本章提出一种基于禁忌规则的模拟退火算法（hybrid simulated annealing, HSA）进行求解。算法首先使用剩余承载力和径向附加费（residual capacity and radical surcharge, RCRS）算法求得初始解，然后在模拟退火算法框架下使用4种邻域搜索方法对初始解进行优化。最后，选取国际上通用的测试数据集对算法性能进行测试，检验算法的有效性。

第4章：对考虑带时间窗和同时取送货的车辆路径问题（VRPSPDTW）进行研究。在第3章对于 VRPSPD 问题进行研究的基础上，考虑顾客有服务时间窗（time window, TW）的限制，是一个带时间窗的同时送取货的车辆路径问题（VRPSPDTW），而提出一种主从式并行模拟退火算法（parallel simulated annealing, P-SA）代替传统的串行模拟退火算法，并选取国际上通用的测试数据集对算法性能进行测试，检验算法的有效性。

第5章：对考虑配送网点选址分配的车辆路径问题（2E-LRPSPDTW）进行研究。在第4章的研究中，仅考虑了车辆的路径选择，没有考虑网点的选址分配。第5章在第4章的基础上，引入配送中心的选址，并且考虑两级城市配送中心（中央配送中心和区域配送网点），即带时间窗和同时取送货的两级选址-路径问题（2E-LRPSPDTW）。在 P-SA 算法的基础上，增加路径重连（path relinking, PR）

算法,进一步优化 P-SA 算法,提出了 P-SA-PR 算法。最后,选取国际上通用的测试数据集对算法性能进行测试,检验算法的有效性。

第 6 章: CSYB 配送企业的案例研究。对该企业调研后,通过本书提出的算法对 CSYB 企业的单级配送路径和两级配送系统进行优化。为我国城市配送企业的车辆路径的优化提供理论与经验借鉴。

1.3 研究创新点

(1) 第 3 章: 在求解同时取送货的车辆路径问题 (VRPSPD) 时进行方法的创新。第 3 章对传统的串行模拟退火算法改进,提出一种基于禁忌规则的模拟退火算法 (HSA)。HSA 算法借鉴禁忌搜索算法 (tabu search, TS) 的思想,在退火过程中引入禁忌表,通过设置存储体来记忆最近访问过的解集,一定程度上避免曾经访问过的解,并加速了搜索过程。HSA 算法首先使用剩余承载力和径向附加费 (RCRS) 算法求得初始解,然后在模拟退火算法框架下使用 4 种邻域搜索方法对初始解进行优化。

采用国际上通用的 Dethloff 数据集 (40 个小型顾客规模算例)、Salhi 和 Nagy 数据集 (14 个中型顾客规模算例)、Montane 和 Galvao 数据集 (18 个大型顾客规模算例),并将计算结果与文献中的算法的结果进行比较,验证了 HSA 算法的有效性。

(2) 第 4 章: 在求解带时间窗和同时取送货的车辆路径问题 (VRPSPDTW) 时进行方法的创新。第 4 章利用多马尔科夫链 (MMC) 方法,整合同步和异步 MMC 策略,在主从模式下将传统的 SA 算法并行化,提出一种主从式的并行模拟退火算法 (P-SA)。

采用 Wang 和 Chen 数据集 (65 个小型和中型顾客规模的算例) 验证了该算法的有效性,并构造了 30 个顾客规模为 200、400、600、800 和 1 000 的大型顾

客规模算例作为新算例。P-SA 算法的结果可作为标杆,为后续学者通过大型算例测试算法提供参考。

(3) 第5章:在求解带时间窗和同时取送货的两级选址-路径问题(2E-LRPSPDTW)时进行方法的创新。LRP 常规的解决方法是把选址问题和车辆路径问题作为两个独立的问题进行两阶段求解,这种方法没有考虑设施选址和车辆路径两个问题之间的影响和制约关系。因为,第一阶段的求解结果会对第二阶段的求解产生影响,这样即使第一阶段求解的结果很优也无法保证第二阶段也得到较优解。第5章采用 P-SA-PR 算法对该问题进行求解,将 LRP 的解看作一个整体,通过对 LRP 的解的结构进行分析,重新进行设计和改进。采用国际上通用的 Nguyen 数据集(24 个算例)、Prodhon 数据集(30 个算例)、Sterle 数据集(30 个算例),验证了 P-SA-PR 算法的有效性。



第 2 章

文献综述和研究方法

2.1 车辆路径问题研究综述

2.1.1 VRP 问题简介

在 VRP 问题中有一个或多个设施和多个地理位置分散的顾客点,在满足一系列约束条件的前提下,寻找最优的运输路线,满足货物在设施和顾客点之间的运输。在 VRP 问题中,设施位置、顾客点位置和道路情况已知,由此确定一套车辆运输路线,以满足目标函数。通常 VRP 的目标函数是运输成本和车辆分派成本总费用最小,如图 2-1 所示。对 VRP 问题的现有研究考虑了车辆在各个客户点间巡回访问的特性,提高了运输效率,并与实际情况相吻合。但是,此问题未考虑设施的选址,使得整个物流成本不能达到最低。

根据本书的研究,将从车辆路径问题的三个方面进行综述:① 综述同时取送货的车辆路径问题 (VRPSPD);② 综述带时间窗和同时取送货的车辆路径问题 (VRPSPDTW);③ 综述考虑配送网点选址分配的车辆路径问题 (LRP)。