

分 类 号 _____

密 级 _____

U D C _____

单位代码 10151

大 连 海 事 大 学

工程硕士学位论文

基于电动汽车的带时间窗的路径优化问题
研究

高 升

指 导 教 师 范厚明 职 称 教授

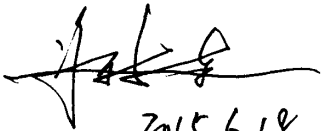
企 业 导 师 赵殿新 职 称 高级工程师

学位授予单位 大连海事大学

申请学位类别 工学硕士 学 科（专业） 物流工程

论文完成日期 2015 年 5 月 答 辩 日 期 2015 年 6 月

答辩委员会主席



2015.6.18



**The Research of Vehicle Routing Problems with Time
Window Based on Electric Vehicle**

A thesis Submitted to

Dalian Maritime University

In partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Engineering

by

Gao Sheng

(Logistics Engineering)


Thesis Supervisor: Professor Fan Houming

May 2015

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明


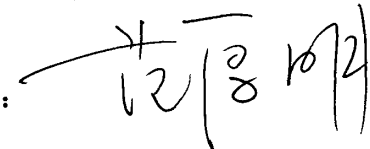
本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成博/硕士学位论文 “基于电动汽车的带时间窗的路径优化问题研究”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解大连海事大学有关保留、使用研究生学位论文的规定，即：大连海事大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。同意将本学位论文收录到《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》（中国学术期刊（光盘版）电子杂志社）、《中国学位论文全文数据库》（中国科学技术信息研究所）等数据库中，并以电子出版物形式出版发行和提供信息服务。保密的论文在解密后遵守此规定。

本学位论文属于： 保 密 ☐ 在 _____ 年解密后适用本授权书。
不保密 ☒ （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名： 导师签名：
日期：2015年 6月 18日

摘 要

目前我国大中城市普遍面临着空气污染的困扰。我国的城镇化进程一方面引起我国城镇居民汽车保有量快速增加, 另一方面导致城市物流配送量猛增。据相关调查, 空气中 60%~70%CO 和 40%的 NO_x 来源于汽车尾气。因此, 汽车的节能减排将对空气污染问题的解决起到关键作用。如果无污染、高效能的纯电动汽车得到广泛推广, 无疑将对城市污染问题的解决大有益处。随着国家关于电动汽车的相关法律法规的完善和扶持政策的推出, 电动汽车正在进入千家万户。除此之外, 我国物流配送企业也在试验将电动汽车运用于物流配送领域。2013 年 2 月, 北京 4 家单位投入 70 辆纯电动物流车。2013 年 7 月, 全国首台“换电式”纯电动的城市物流配送车辆在郑州正式上路。纯电动汽车和传统汽车相比, 具有续航里程短、充电时间长、充电站少等特点。传统配送车辆的路径优化问题模型不适应于电动汽车, 而国内对基于电动汽车的车辆路径问题研究较为匮乏。基于上述原因, 本文对基于电动汽车的车辆路径优化问题进行了深入研究, 试图解决如何在现有的条件下, 通过科学合理的路线规划使得物流配送中心的电动汽车运营达到最佳效果。

本文主要做了如下研究:

(1) 本文首先梳理了国内外对车辆路径优化问题和电动汽车运营管理问题的相关研究, 对前人的研究成果加以总结。在前人研究的基础上, 本文结合电动汽车的特点构建了以总配送成本最小为目标的带有惩罚函数的基于电动汽车的 VRPTW 模型。

(2) 对求解车辆路径优化问题的各种方法进行比较之后, 本文采用遗传算法, 设计了适合求解本文模型的染色体编码方式和遗传算子。算例分析结果验证了模型及算法的有效性。

关键词: 电动汽车; 时间窗; 车辆路径问题; 遗传算法

ABSTRACT

Nowadays, China's large and medium-sized cities are facing air pollution problems. China's urbanization process on the one hand caused car ownership of urban residents in China increased rapidly, on the other hand, leading to the city logistics distribution soared. According to the survey, 60%~70% CO and 40% NOX in the air is from automobile exhaust. Therefore, energy saving and emission reduction of the car will be the key role to solve the problem of air pollution. If the electric vehicle, which is pollution-free, high efficiency, can be widely promoted, will undoubtedly benefit to solve the problem of pollution in the city. With the improvement of national laws and regulations and the publication of supporting policies on electric vehicles, electric cars are entering into thousands of households. In addition, the logistics enterprises of our country are in the test of electric vehicles used in the field of logistics distribution. In February 2013, 70 electric vehicles are used in logistics distribution in Beijing. In July 2013, the first electric vehicle whose charge mode is changing the battery in our country is used in Zhengzhou. Compared to conventional vehicles, pure electric vehicles is short of driving range, long of charging time, lack of charging station. The model of optimal routing problem in the traditional vehicle is not adapts the electric vehicles, but the relevant research is deficiency in our country. Therefore, this thesis researches the optimal route problem for electric vehicles.

This thesis mainly does the following research:

First, the thesis reviews the relevant previous research about optimal routing problem and electric vehicle operation management. Then, the mathematical model with time penalty to optimizing VRPTW which was added the characters of the electric vehicle was established.

Second, this paper analyses a variety of optimization algorithms of resolving vehicle routing problem with time windows, and finally adopts genetic algorithm as the solving algorithm of the model. This paper designs the chromosome encoding and special arithmetic operators which are fit for the model. Ultimately confirms the feasibility of this model and algorithm by an example.

Key Words: Electric Vehicles; Time Window; Vehicle Routing Problem; Genetic Algorithm

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 研究内容与论文框架	4
1.3.1 研究内容	4
1.3.2 研究框架	5
第 2 章 物流配送系统车辆路径优化问题的相关理论	7
2.1 物流配送的相关理论	7
2.2 物流配送系统车辆路径问题基本模型	9
2.2.1 有容量约束的路径问题模型	10
2.2.2 带时间窗的车辆路径问题基本模型	12
2.3 物流配送系统车辆路径问题求解方法	16
第 3 章 基于电动汽车的物流配送系统分析	21
3.1 电动汽车的特点及其商业应用分析	21
3.1.1 电动汽车的特点及其充电模式	21
3.1.2 电动汽车的商业应用分析	22
3.2 基于电动汽车的物流配送系统的功能要素及其流程分析	22
3.2.1 基于电动汽车的物流配送的功能要素	22
3.2.2 基于电动汽车的物流配送流程	23
3.3 基于电动汽车的物流配送系统优化分析	24
3.4 基于电动汽车的物流配送系统 VRPTW 分析	26
第 4 章 基于电动汽车的 VRPTW 模型构建	28
4.1 基于电动汽车的 VRPTW 的特点及其描述	28
4.1.1 基于电动汽车的 VRPTW 与普通 VRPTW 的区别	28
4.1.2 基于电动汽车的 VRPTW 描述	29

4.2 基于电动汽车的 VRPTW 的基本假设	30
4.3 构建基于电动汽车的 VRPTW 的数学模型	33
4.3.1 参数定义	33
4.3.2 目标函数分析	34
4.3.3 约束条件分析	35
4.3.4 数学模型	36
第 5 章 基于电动汽车的 VRPTW 算法设计	38
5.1 算法概述	38
5.2 算法设计	41
5.2.1 编码方案设计	41
5.2.2 种群初始化	42
5.2.3 约束处理与适应度函数	42
5.2.4 遗传操作	42
5.2.5 终止条件	44
5.3 算例分析	44
5.3.1 算例介绍	44
5.3.2 算例结果及其分析	46
结论与展望	48
参考文献	50
附录 遗传算法程序	54
致 谢	64
作者简介	65

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

目前,我国大中城市普遍面临空气污染的困扰。为了彰显节能减排的决心,在哥本哈根世界气候变化大会上,我国向世界郑重承诺,到 2020 年我国单位国内生产总值的二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%。交通行业作为温室气体排放的重点领域之一,面临直接的减排压力。据相关调查,空气中 60%~70%的 CO 和 40%的 NO_x 来源于汽车尾气^[1]。我国的城镇化进程一方面引起我国城镇居民汽车保有量的快速增加,另一方面导致城市物流配送量猛增。我国目前的城市物流配送主要以汽车运输为主,城市配送量的增加必然引起物流配送车辆和配送次数的增加。私家车和配送车辆的增加使得城市的空气质量进一步下降。

众所周知,能源是我们人类社会经济发展所必须的物质基础,当今能源消费主要是不可再生的化石资源。我国等一些国家以煤炭能源为主,其他的国家则以天然气和石油为主。根据有关专家的预测,已探明的煤炭资源储量仅仅能够维持我们人类使用两百年左右,而石油资源更是仅仅能够维持不到半个世纪的时间^[2]。石油作为一种重要的不可再生能源,正面临着因过度开采而日趋枯竭的严重问题。目前,世界上各种汽车保有量约为 12 亿辆,假设平均每辆汽车每年消耗 10~15 桶石油及其制品核算,汽车每年将消耗 120~180 亿桶,约占世界石油年产量的一半^[2]。20 世纪 70 年代爆发的两次石油危机给世界各国的经济造成了不同程度的冲击,给政府和当时的汽车工业敲响了警钟^[3]。21 世纪,我们面临着来自石油资源更加严峻的挑战。

面对环境污染和能源短缺的双重压力,能源使用效率的提升和清洁能源的开发成为当务之急。在此情形之下,新能源汽车工业迎来了发展的大好时机。2001 年,我国开始从事新能源汽车方面的研究。2009 年,有关新能源汽车的政策法规密集出台,我国新能源汽车产业发展进入快车道。2010 年,政府在深圳、上海、杭州、长春、合肥等 5 个城市试点私人购买新能源汽车补贴工作^[4]。2011~2015 年,新能源汽车产业开始进入产业化阶段。新能源汽车可以分为燃料电池汽车、

混合动力汽车、纯电动汽车等多种类型。纯电动汽车具有技术相对简单成熟，能源利用率高，使用成本低，所需电能可有风能、太阳能等清洁能源获得等特点，因此，纯电动汽车可谓是当之无愧的节能环保汽车。除了推广纯电动私家车外，国家和地方也在进行纯电动物流配送车辆试点。2013年2月，北京4家物流单位投入70辆纯电动的物流配送车辆，正式拉起了纯电动汽车在城市物流领域规模化应用的序幕^[5]。2013年7月，全国首台“换电式”纯电动的城市物流配送车辆在郑州正式上路^[6]。

1.1.2 研究意义

本研究具有重要的理论意义和应用价值。其理论意义主要表现为：（1）本文是基于电动汽车的物流配送系统 VRPTW 问题研究，目前本方面的研究比较欠缺，本文的研究将进一步提高我国在该领域的科学研究水平，并丰富这一领域的研究内容；（2）通过梳理和分析前人关于物流配送系统车辆路径优化问题的研究，从而进一步深化对物流配送系统 VRP 问题的认识；（3）深入剖析基于电动汽车的物流配送系统 VRP，为构建基于电动汽车的物流配送系统的 VRPTW 模型打下坚实的基础；（4）在对实际问题进行深入分析基础上，构建了一种适用于基于电动汽车的带时间窗的路径优化模型。该路径问题模型融合了电动汽车续航里程短、配送过程中可能需要充电的特点，弥补了我国在相关领域研究的不足；（5）通过梳理和分析前人关于 VRP 的求解方法，本文结合自身研究问题的特点，采用遗传算法作为本文模型的求解算法。本文选择和设计了适合求解本文模型的染色体编码方式和遗传算子，对解决基于电动汽车的路径优化问题将具有参考价值。

其应用价值主要表现为构建了一种科学、有效的基于电动汽车的带时间窗的路径优化模型，并设计了适合求解本问题的遗传算法，模型和算法的有效性在算例分析中得到验证，从而可以为电动汽车在物流配送中的路径选择提供参考。

1.2 国内外研究现状

物流配送路径优化问题简称为 VRP（Vehicle Routing Problem）问题。VRP 问题最早是 Dantzig 和 Ramser 于 1959 年提出的^[7]。1962 年，Balinski 等人首先提出车辆路径优化问题的集分割概念，直接对可行解集合进行考虑，然后再进行优化，建立了最为简单的 VRP 问题模型^[8]。1964 年，Clarker 等人提出了经典的节约法，

可以解决车辆数目不确定的车辆路径规划问题^[9]。1968 年, Rao 等人引入列生成法求解 VRP 问题, 这种算法从本质上是讲是最短路径法^[10]。1971 年, Eilon 等人将动态规划法引入车辆数固定的 VRP 问题^[11]。1974 年, Gillett 等人提出了 Sweep 法(扫描法), 对实际问题给出极坐标形式的平面几何解^[12]。1981 年, Christofides 等人提出 k 度中心树算法求解一般 VRP 问题^[13]; Fisher 等人提出了用三下标车辆流方程求解带能力约束、时间窗口及无停留时间的 VRP 问题^[14]。1985 年, 等人提出用二下标车辆流方程求解对称的 VRP 问题^[15]。接着, Laporte 提出了多种分枝定界法求解 VRP 问题^[16,17]。20 世纪 80 年代以来, 许多学者开始将智能启发式算法引入优化领域解决相关问题。智能算法主要有禁忌搜索算法 (Tabu Search, TS)、模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA)、蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO)、遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN)、粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 等。1989 年, Glover 提出禁忌搜索算法^[18]。1989 年, Willard 最先将禁忌搜索算法运用于解决 VRP 问题^[19]。随后, Gendreau^[20]、Taillard^[21]、Duhamel^[22]、Renaud^[23]、Barbarosoglu^[24]、Philippe^[25] 等人运用禁忌搜索算法解决了不同的 VRP 问题。1982 年, 模拟退火算法最早是由 Kirkpatrick 应用于组合优化这一领域。蚁群算法最早由 Marco Dorigo 于 1991 年在其博士论文中提出。遗传算法最早是 Michigan 大学的 J.Holland 教授于 1975 年首先提出^[26]。随后, S.Lawrence^[27]、Potvin^[28]、Thangiah^[29]、Blanton^[30] 等人利用遗传算法解决了有时间窗口的 VRP 问题; Cheng 和 Gen 利用遗传算法解决了模糊 VRP 问题^[31,32]。

我国对车辆路径优化问题的研究是在 20 世纪 90 年代以后开始兴起。郭耀煌、李军^[33] 等国内第一批 VRP 研究者利用传统启发式算法解决了相对较为简单的 VRP 问题。1998 年, 蔡廷光等人应用模拟退火算法求解多重运输调度问题^[34,35]。1999 年, 张涛等人利用遗传算法和 3-opt 算法结合的混合算法解决 VRP 问题^[36]。2000 年, 李军设计了基于自然数编码的遗传算法解决非满载的 VRP 问题^[37]。2001 年, 刘浩等人应用模拟退火算法求解了两车型随机需求的 VRP 问题^[38]。2002 年, 郎茂祥设计了提高搜索效率的改进型遗传算法解决一般 VRP 问题^[39]。2004 年, 刘云忠等人应用蚁群算法求解了 VRP 问题^[40]。2005 年, 张建勇等人运用混合遗传算法结合模糊可能性理论解决需求不确定的 VRP 问题^[41]。之后, 崔雪丽等人设计了混合

改进型蚂蚁算法求解 VRP 问题^[42]。赵若彤设计了最速下降法与遗传算法相结合的混合遗传算法求解车辆路径优化问题^[43]。田景文等人设计提高遗传算法局部搜索能力的改进遗传算法求解路径优化问题^[44]。葛显龙等人设计了求解基于第三方的带软时间窗约束的 VRP 模型的改进交叉与变异操作的遗传算法^[45]。王华东等人设计了粒子群算法求解路径优化问题，提高了全局搜索速度^[46]。张维泽等人设计了提高收敛速度的改进蚁群算法求解车辆路径优化问题^[47]。张海刚等人设计了避免陷入局部极值的多相粒子群优化算法求解带软时间窗的车辆路径优化问题^[48]。

2010 年，Artmeier 等人发表了一篇研究电池驱动车辆的 VRP 问题的文章^[49]。M Sachenbacher, M Leucker 等又撰文研究了电动汽车的高效节能的路径问题^[50]。Jochen Eisner, Stefan Funke 等研究了复杂网络条件下的电动汽车车辆路径问题^[51]。Sevgi Erdoğan, Elise Miller-Hooks 于 2011 年研究了绿色车辆的车辆路径问题^[52]。2012 年 6 月，刘华旭在其硕士论文“基于电动汽车技术特征的共同配送调度优化研究”中探讨了将电动汽车技术和共同配送车辆调度相结合的 VRP 问题^[53]。2012 年 12 月，冯鹏翔在其硕士论文“基于电动汽车的物流配送系统 LRP 问题”中对电动汽车服务设施选址和车辆路径进行整体规划，试图降低整个物流配送系统的建设和服务成本^[54]。

综上所述，目前国内外专家学者在 VRP 模型及其求解算法方面已经取得了丰硕的成果，但是绝大多数专家学者针对该问题的研究是基于传统燃料车辆的基础上进行的。而基于电动汽车的 VRP 研究尚处于起步阶段，相关的研究成果比较少，其模型和算法尚且存在很多不足之处。针对此问题，本文构建了基于电动汽车的 VRPTW 模型并设计了适合求解本问题的遗传算法，弥补了该研究领域的不足。

1.3 研究内容与论文框架

1.3.1 研究内容

本文研究的是基于电动汽车的 VRPTW，研究内容包括绪论、物流配送系统车辆路径优化问题的相关理论、基于电动汽车的物流配送系统 VRPTW 分析、构建基于电动汽车的 VRPTW 模型、基于电动汽车的 VRPTW 模型的算法设计及相关的算例分析等五部分。具体内容如下：

(1) 绪论

首先对本文的研究背景及意义进行了详细的阐述；然后对国内外的相关研究进行总结；最后说明本文的研究内容及研究框架。

（2）物流配送系统车辆路径优化问题的相关理论

首先对物流配送系统的基础理论知识进行了简要的总结分析，然后重点分析介绍了有容量约束的路径问题模型和带时间窗的车辆路径问题基本模型等两种常见的车辆路径问题模型。最后对前人求解物流配送系统车辆路径问题的方法进行梳理和分析，最终决定选取遗传算法作为本文研究问题的求解算法。本部分的分析为后续的研究提供了坚实的理论基础。

（3）基于电动汽车的物流配送系统分析

本部分首先详细分析了电动汽车的特点及其目前国内外的商业应用情况。然后对基于电动汽车的物流配送系统进行分析，总结了可以对物流配送系统的哪些方面进行优化分析。在此基础上，本文对基于电动汽车的物流配送系统的 VRPTW 进行分析研究。

（4）构建基于电动汽车的 VRPTW 模型

与传统燃料的汽车相比，电动汽车应用于物流配送系统存在续驶里程短、充电站少、充电时间长等特点。因此，本文在构建模型时，对电动汽车的续驶里程、充电站位置、电动汽车充电时间等电动汽车的特点加以考虑，同时考虑了电动车的额定载重量等限制条件，力求模型更加符合实际情况。本文最终构建了以总配送成本最小为目标的基于电动汽车的 VRPTW 模型。

（5）基于电动汽车的 VRPTW 模型的算法设计及相关的算例分析

本文采用遗传算法作为本文研究问题的求解算法，选择和设计了适合求解本文模型的染色体编码方式和遗传算子。最后通过算例验证了本文模型和算法的可行性和有效性。

1.3.2 研究框架

本文的研究框架如图 1.1 所示：

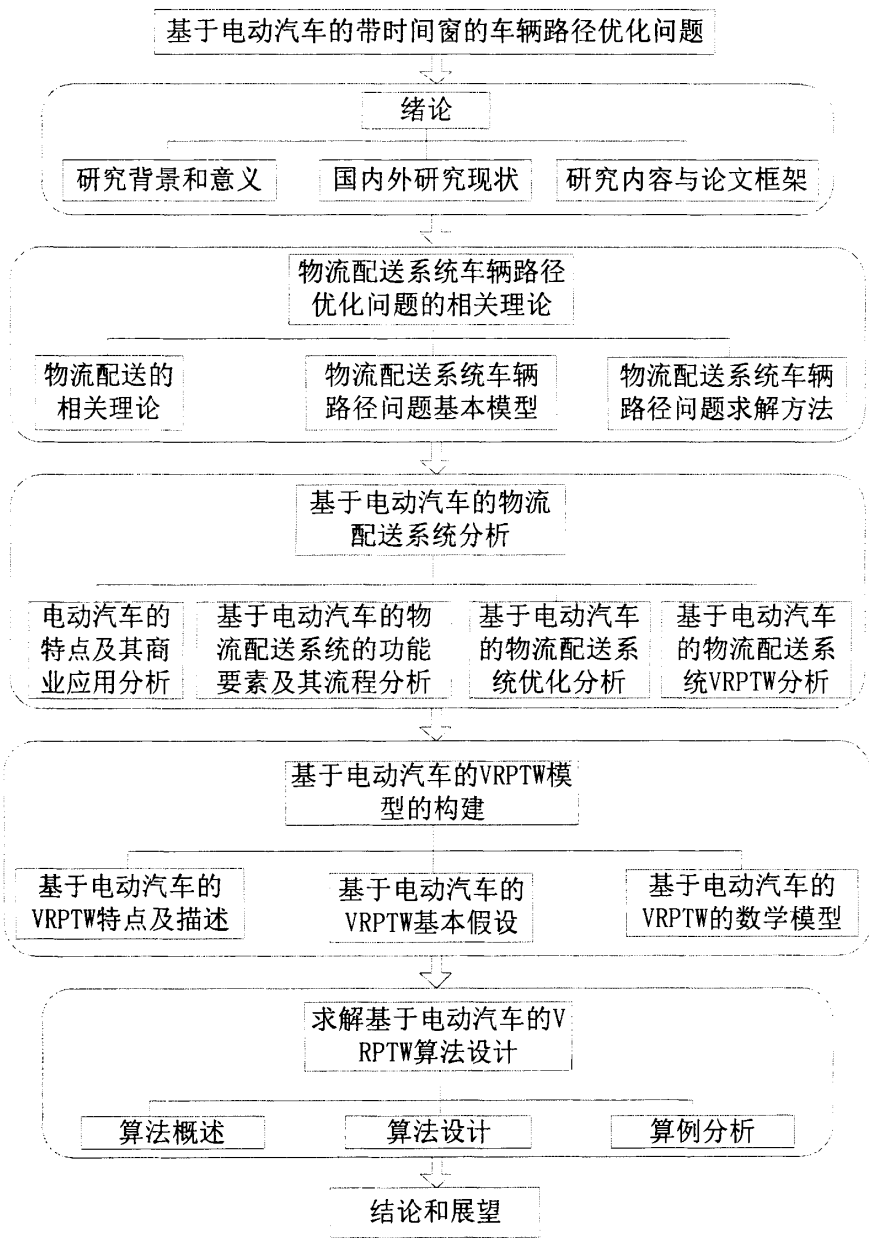


图 1.1 论文研究框架

Fig. 1.1 Research framework of the thesis

第 2 章 物流配送系统车辆路径优化问题的相关理论

2.1 物流配送的相关理论

(1) 物流配送的概念

物流至今没有统一的定义，2001 年颁布的《中华人民共和国物流术语标准物流术语》中定义物流为：物流就是物品从供应地向接收地的实体流动过程。根据实际需要，将运输、存储、装卸、搬运、包装、流通加工、配送、信息处理等基本功能实现有机结合。

我国国家标准《物流术语》中对“配送”的解释是：在经济合理区域范围内，根据客户要求，对物品进行拣选、加工、包装、分割、组配等作业，并按时送达指定地点的物流活动。配送是从物流系统中的运输环节派生出来的。与一般的物流相比，配送最有特点的活动是分拣配货^[55]。除此之外，配送还可以通过增大单次配送货物的数量来达到物流的规模效益。

(2) 物流配送的目标

目前人们普遍认为配送应具备时效性、经济性、可靠性、便利性等四大特点。

1) 时效性

时效性就是确保在规定的时间内交货，是流通领域内客户最为关注的内容之一。配送在物流活动中起着承上启下的作用，既是上游物流活动的结束，又是供应链中下游活动的开始。为了确保整条供应链的顺利进行，配送的时效性就变得异常重要。影响配送时效性的因素很多，比如送货司机的个人因素、客户的配合程度、配送路径的选择等。站在配送中心的角度，可以控制的因素包括配送路径的选择等，而客户卸货点的方便性、客户的配合程度等因素基本超出了配送中心的可控范围。由此可见，配送路径的选择是配送中心的工作重点之一，同时吸引了众多专业进行研究^[52]。

2) 经济性

在当前的市场经济中，配送中心的服务价格在很大程度上影响了生产制造企业对配送商的选择。配送中心的服务价格又取决于配送中心的运作成本。配送中心在保证满足客户要求、不降低客户满意度的前提下，通过各种技术和管理手段降低运作成本成为配送中心的不二选择。通过科学合理的规划配送路线可以有效

的降低物流配送成本。

3) 可靠性

可靠性完整的体现了整个配送系统的服务水平和设施能力。能否将货物按照客户的要求,保质保量地送达目的地是衡量配送系统的另一个重要要素。配送中心通过严格的规章制度、合适的设备以及员工的良好素质可以满足服务对象的合理的可靠性要求。

4) 便利性

配送系统是一个服务性的系统,所提供的服务必须能够让客户轻松获得。配送系统应该是具有较大弹性的柔性系统,能够满足客户紧急送货、信息传送、顺道退货等特殊的要求。配送系统的便利性主要体现在配送系统的技术要求上面。当前的配送系统中广泛采用先进的信息处理技术、通信技术、定位技术等辅助手段帮助操作人员及时响应客户的要求。

(3) 物流配送的分类

根据不同的分类标准,物流配送可以分为不同的种类。

1) 按物流配送的服务范围分类

根据服务的范围划分,物流配送可以分为城市物流配送和区域物流配送两个种类。

我们称只面向城市用户提供物流配送服务的物流配送类型为城市物流配送。通常情况下,城市物流配送的运距比较短,一般采用轻型载货汽车进行配送。因为运用轻型载货汽车配送具有调度灵活、机动性强等特点,因此城市物流配送能够开展少批量、多客户、多批次的配送活动。由于城市物流配送的辐射范围比较小,在流通实践中,城市物流配送中心通常与相应的区域配送中心相配合的方式运作。

区域物流配送是跨市、跨省甚至跨国的物流配送活动。它具有辐射能力强、活动范围大等特点。区域物流配送的特点是单次配送的货物数量比较大,但是总批次比较少。区域物流配送的主要客户是城市配送中心或者城市中的比较大的制造类企业。

2) 按提供配送服务的公司类型划分

按照提供配送服务的公司类型划分,物流配送可以分为专业物流企业物流配

送、大型生产厂商主导型物流配送、大型批发企业主导型物流配送、大型连锁企业自组型物流配送等四大种类。

专业物流配送企业是指专门从事第三方物流配送的服务性企业。他们有可能是从物流企业分化出来的。专业的物流配送企业也可能是从大型的生产企业的物流等部门脱离母体独立出来的。除此之外，专业物流配送企业也可能是各个公司的物流部门为了业务需要共同成立的物流配送企业。总之，专业物流配送企业的来源很多。专业物流配送企业在供应链上下游之间起着桥梁的作用。专业物流配送企业跟需要物流配送服务的上游或者下游企业建立联系，为其提供服务。专业物流配送企业可以将供应链上游企业的货物进行汇总，然后按照客户的要求进行统一的配送服务。专业物流配送企业的存在大大减少了整个物流配送系统的配送成本^[53]。

大型生产厂商主导型物流配送的规模一般比较庞大。此种类型的配送企业的网络布局比较广。传统的商品销售方式已经逐步被新型的互联网销售方式所代替。在传统的销售方式中，大型生产厂商往往配送服务需求的次数比较少，但是每次配送的货物数量比较多。而在现在的销售方式中，处于供应链下游的企业处于主导地位，他们往往是订购的批次比较多，但是每次订购的数量比较少。所以，相应的物流配送服务也随之变化，每次配送的货物数量比较少，配送的次数比较多。

大型批发企业主导型物流配送是一种常见的物流配送方式。相应的企业从供应链的上游企业批量购买产品，然后将这些产品销售给需求量小的下游企业。相关的物流配送企业将大量的货物根据批发商的要求配送给相应的需求企业。

顾名思义，大型连锁企业自组型物流配送是指大型的连锁企业由于自身业务的需要，自己组建进攻自己公司内部使用的物流配送网络。这类企业一般都有大量的分公司，每个分公司对每类货物的需求都比较少。但是由于分公司数量庞大，其总的采购规模就会很大。企业为了规模效益集中采购，然后配送到各个分公司，比如沃尔玛^[56]。

2.2 物流配送系统车辆路径问题基本模型

车辆路径问题（Vehicle Routing Problem, VRP）就是物流配送中心按照客户点的要求，制定满足一定的约束条件的科学合理的物流配送方案，尽量实现一定的

目标。一般情况下，约束条件包括物流配送中心车辆数量的限制、车辆规格的限制、配送车辆载重量的限制、配送车辆行驶里程的限制、客户点时间窗的限制等。常见的目标有配送车辆的总行驶里程最短、总的物流配送费用最少等。

车辆路径优化问题有很多不同的种类，不同种类的路径优化问题对应不同种类的模型。根据本文的研究内容，下面重点介绍两种基础的车辆路径问题模型。

2.2.1 有容量约束的路径问题模型

(1) 有容量约束的路径问题描述

某配送中心为各个已知客户点进行配送服务。配送中心的每辆配送车辆都有装载能力的限制。安排科学合理的车辆行驶路线，使一定数量的配送车辆从配送中心出发，完成配送任务后返回配送中心。路线规划的目标是配送成本最小。

(2) 有容量约束的路径问题的基本假设

为了将实际物流配送问题转化为数学模型，需要做出一定的假设：

- 1) 只有一个配送中心，且所有的配送车辆均以配送中心为起点，配送完成后返回配送中心；
- 2) 配送车辆的类型单一；
- 3) 任一客户点需求量已知且小于配送车辆的额定载重量；
- 4) 配送中心拥有足够的货物以供配送；
- 5) 每辆配送车辆可以为多个客户提供服务，但是每个客户只能由单个车辆配送；
- 6) 货物流向为单向，纯送货不带回程货；
- 7) 配送中心和客户点的位置坐标为已知；
- 8) 每辆配送车辆只服务一条路线。
- 9) 每个客户点的需求量不变且为已知；
- 10) 假设车辆从物流配送中心出发的时刻为 0 时刻；
- 11) 不考虑配送过程中的恶劣天气、车辆故障、道路拥堵等影响因素；
- 12) 所有的车辆都是从配送中心出发，完成配送任务后返回配送中心。

(3) 有容量约束的路径问题的数学模型

为了更加清晰准确的描述模型，我们对模型中使用到的符号进行如下定义。

N : 顾客点集合;

K : 配送车辆集合, 下标用 k 表示;

O : 配送中心, 下标用 o 表示;

V : 所有点的集合, $V = N \cup O$;

C : 配送车辆单位距离的运输成本;

d_{ij} : 点 i 到点 j 的距离, $i, j \in V$;

q_i : 客户点 i 的需求量, $i \in N$;

Q : 配送车辆的额定载重量;

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{配送车辆 } k \text{ 从点 } i \text{ 到点 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad k \in K, i, j \in V;$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{客户点 } i \text{ 任务由配送车辆 } k \text{ 完成} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad k \in K, i \in N;$$

基于以上的假设条件和参数定义, 建立的数学模型为:

$$\min C \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i \neq j} x_{ijk} d_{ij} \quad (2.1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{oik} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{jok} = 0 \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} x_{ijk} = \sum_{j \in N, j \neq i} x_{ijk} = y_{ki} \quad \forall k \in K \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ki} q_i \leq Q \quad \forall k \in K \quad (2.4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V, i \neq o} x_{oik} \leq |K| \quad (2.5)$$

$$x_{ijk}, y_{ki} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (2.6)$$

式 2.1 为目标函数, 式 2.2 保证每次配送任务都以配送中心为起点和终点; 式 2.3 保证每个客户点有且仅能被服务一次; 式 2.4 保证每辆配送车辆服务的客户所需的货物重量总和小于配送车辆的额定载重量; 式 2.5 表示为客户服务的配送车辆总数小于配送中心所拥有的配送车辆总数; 式 2.6 表示决策变量 x_{ijk} 、 y_{ki} 是 0-1 变量。

2.2.2 带时间窗的车辆路径问题基本模型

(1) 带时间窗车辆路径问题的描述

带时间窗的车辆路径优化问题（Vehicle Routing Problems with Time Windows, VRPTW）是以上文所述的经典的车辆路径优化问题为基础。在此基础上，新增了每个客户点都有物流配送时间的限制。我们称客户点的时间限制为时间窗。带时间窗的物流配送服务在实际的配送过程中会出现三种情况。第一种情况，物流配送车辆早于客户要求的最早时间到达。这种情况下，配送车辆需要等待到客户要求的最早时间点才能进行卸货。第二种情况，物流配送车辆正好在客户点规定的时间窗内到达，配送车辆到达后就可以直接进行卸货。第三种情况是物流配送车辆晚于客户点规定的最晚时间到达客户点。在这种情况下会出现两种结果。第一种结果，客户点拒绝接收货物。我们称这种情形下的时间窗为硬时间窗。硬时间窗的客户点要求物流配送车辆可以早于时间窗规定的最早服务时间到达，但是需要等待到客户点最早服务时间才能开始卸货，配送车辆也可以正好在客户规定的时间内到达，此时配送车辆到达客户点后可以直接进行卸货。第二种结果，客户点同意接收配送的货物，但是物流配送中心需要接受一定的惩罚。我们称这种情形下的时间窗为软时间窗。软时间窗的客户点允许物流配送车辆在客户点规定的时间外到达。软时间窗与硬时间窗相同的是，如果配送车辆早于客户点规定的时间到达，需要等待到客户点的最早接受服务的时间才能开始卸货；如果配送车辆正好在客户规定的时间内到达，此时配送车辆到达客户点后可以直接进行卸货。软时间窗与硬时间窗不同的是，在软时间窗情形下，配送车辆晚于客户点规定的时间到达时，客户点接受货物；但是在硬时间窗的情形下，如果配送车辆晚于客户点规定的时间窗到达，客户点不会接受货物。

与构建普通的车辆路径优化问题模型不同，构建带时间窗的车辆路径问题模型需要考虑物流配送中心因为违反客户点规定的时间而遭受到的惩罚成本。硬时间窗情形下，惩罚成本只包含配送车辆早到而遭受到的惩罚。而软时间窗情形下，惩罚成本包括两部分，因为配送车辆早到遭受的惩罚成本和因为配送车辆晚到而遭受来自客户点的惩罚成本。

通常情况下，带软时间窗的车辆路径优化问题更加符合实际情况，因此本文将详细介绍带软时间窗的车辆路径优化问题模型。

(2) 带时间窗车辆路径问题的基本假设

为了将实际配送活动中带时间窗的车辆路径问题抽象为数学模型^[57]，作出如下的假设：

- 1) 只有一个配送中心，且所有的配送车辆均以配送中心为起点，配送完成后返回配送中心；
- 2) 配送车辆的类型单一；
- 3) 任一客户点需求量已知且小于配送车辆的额定载重量；
- 4) 配送中心拥有足够的货物以供配送；
- 5) 每个客户都有其接受服务的时间窗；
- 6) 配送车辆行驶速度恒定；
- 7) 每辆配送车辆可以为多个客户提供服务，但是每个客户只能由单个车辆配送；
- 8) 货物流向为单向，纯送货不带回程货；
- 9) 配送中心和客户点的位置坐标为已知；
- 10) 每辆配送车辆只服务一条路线；
- 11) 每个客户点的需求量及时间窗不变且为已知；
- 12) 假设车辆从物流配送中心出发的时刻为 0 时刻；
- 13) 不考虑配送过程中的恶劣天气、车辆故障、道路拥堵等影响因素；
- 14) 所有的配送车辆都是从配送中心出发，完成配送任务后返回配送中心。

(3) 带时间窗车辆路径问题的惩罚成本函数

根据实际需要，每个客户点都规定了配送服务的时间窗。如果配送中心违反了客户的时间窗约束，势必给客户造成一定的经济损失，这些损失可以认为是违反了客户时间窗约束而导致的时间效应成本。配送中心在追求总效益最优的情况下，必须把时间效应成本纳入到考虑范围之内。

物流配送中心违反客户时间窗所产生的成本应当以适当的方式表达出来，避免在路线设计过程中只考虑车辆行驶成本而忽略掉时间效应成本。以函数形式表达出来的时间效应成本，我们称之为惩罚成本函数。一般情况下，惩罚成本的额度是根据配送中心和顾客之间的合同而定的。实际情况不同，惩罚成本函数也千差万别，但其共同特征是配送车辆到达时间偏离时间窗约束越多，其惩罚成本越

高。惩罚成本函数表达式如下：

$$pu_i(t_i) = \begin{cases} epu(e_i - t_i) & e_i > t_i \\ 0 & e_i < t_i < l_i \\ lpu(t_i - l_i) & t_i > l_i \end{cases} \quad (2.7)$$

上述函数表达式也可表示为：

$$pu_i(t_i) = epu \times \max(e_i - t_i, 0) + lpu \times \max(t_i - l_i, 0) \quad (2.8)$$

其中， epu 表示配送车辆提前到达客户点所发生的等待的单位时间的机会成本； lpu 表示配送车辆晚于时间窗到达客户点所处的单位时间的惩罚值； e_i 表示客户点 i 要求的最早服务时间； l_i 表示客户点 i 要求的最晚服务时间； t_i 表示配送车辆到达客户点 i 的时间。

如果车辆 k 在时间窗 e_i 之前到达客户点 i ，则车辆在此等待，产生机会损失成本 $epu(e_i - t_i)$ ；如果车辆在时间窗 l_i 之后到达客户点 i ，则产生延误成本 $lpu(t_i - l_i)$ ；车辆在时间窗 $[e_i, l_i]$ 之间到达客户点 i ，则时间效应成本为 0。式中 epu 和 lpu 的取值根据实际情况而定。当 epu 和 lpu 均取无穷大的正数 M 时，软时间窗惩罚成本函数便可以用来描述硬时间窗。硬时间窗惩罚成本函数表达式为：

$$pu_i(t_i) = M \times \max(e_i - t_i, 0) + M \times \max(t_i - l_i, 0) \quad (2.9)$$

(4) 带时间窗车辆路径问题的数学模型

为了更加清晰准确的描述模型，我们对模型中使用到的符号进行如下定义。

N ：顾客点集合；

K ：配送车辆集合，下标用 k 表示；

O ：配送中心，下标用 o 表示；

V ：配送中心和客户点的集合， $V = N \cup O$ ；

C ：配送车辆单位距离的运输成本；

d_{ij} ：点 i 到点 j 的距离， $i, j \in V$ ；

q_i ：客户点 i 的需求量， $i \in N$ ；

Q ：配送车辆的额定载重量；

e_i ：客户点 i 要求的最早服务时间， $i \in N$ ；

l_i : 客户点 i 要求的最晚服务时间, $i \in N$;

epu : 配送车辆提前到达客户点所发生的等待的单位时间的机会成本;

lpu : 配送车辆晚于时间窗到达客户点所处的单位时间的惩罚值;

t_i : 配送车辆到达客户点的时间, $i \in N$;

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{配送车辆 } k \text{ 从点 } i \text{ 到点 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad k \in K, i, j \in V;$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{客户点 } i \text{ 任务由车辆 } k \text{ 完成} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad k \in K, i \in N;$$

基于以上的假设条件和参数定义, 建立的数学模型为:

$$\min C \sum_{k \in K} \sum_{i \in I'} \sum_{j \in V, i \neq j} x_{ijk} d_{ij} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} pu_i(t_i) \quad (2.10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{oik} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{jok} = 0 \quad (2.11)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} x_{ijk} = \sum_{j \in N, i \neq j} x_{ijk} = y_{ki} \quad \forall k \in K \quad (2.12)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ki} q_i \leq Q \quad \forall k \in K \quad (2.13)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I', i \neq o} x_{oik} \leq |K| \quad (2.14)$$

$$x_{ijk}, y_{ki} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (2.15)$$

$$pu_i(t_i) = epu \times \max(e_i - t_i, 0) + lpu \times \max(t_i - l_i, 0) \quad (2.16)$$

式 2.10 为目标函数, 式 2.11 保证每次配送任务都以配送中心为起点和终点; 式 2.12 保证每个客户点有且仅能被服务一次; 式 2.13 保证每辆配送车辆服务的客户所需的货物重量总和小于配送车辆的额定载重量; 式 2.14 表示为客户服务的配送车辆总数小于配送中心所拥有的配送车辆总数; 式 2.15 表示决策变量 x_{ijk} 、 y_{ki} 是 0-1 变量; 式 2.16 是根据式 2.8 表示的惩罚成本函数表达式。

现在的物流配送服务过程中, 客户越来越注重服务的质量, 纷纷提出配送服务的时间要符合其规定的时间窗。为了构建的模型更加符合实际, 本文在带时间窗的车辆路径问题的基础上将构建基于电动汽车的带时间窗的车辆路径问题模型。

2.3 物流配送系统车辆路径问题求解方法

车辆路径优化问题提出后，国内外专家学者对其进行了大量研究，创造、引进和改进了很多求解算法。从解的精确程度方面来说，VRP的求解方法通常分为精确算法和启发式算法。启发式算法又有现代启发式算法和传统启发式算法之分。

（1）精确算法

精确算法是基于运筹学的优化算法，通常是针对具体的问题或者模型运用线性规划和非线性规划等数学规划技术求出最优解的算法。求解车辆路径优化问题的常用精确解算法如下：

1) 分枝定界法。在问题或者模型的解空间树上搜索问题的解，我们称这种求解问题的方法为分枝定界法。它是通过将解空间分解为若干个子空间，然后逐次搜索各个子空间，将该子空间与当前的最优解方案进行比较，剪掉不可能产生最优解的分枝，仅对有可能产生最优解的分枝进行搜索，最终得到最优解。分枝定界法最常用于求解包含纯整数规划和混合整数规划在内的整数规划问题。

2) 动态规划法。动态规划法适用于求解这样的问题：某个问题可以划分为几个相互关联的子阶段问题，从第一阶段开始逐次做出决策，并且上一阶段的决策会影响到下一阶段的决策。该算法求解最优解的原理是不管以前的状态策略如何，余下的各个决策必须构成最优策略；除此之外，各个状态前面的状态和决策作为后面子阶段问题的初始条件。动态规划法求解车辆路径问题时的最大的弱点是求解问题的规模不能过大。应用动态规划法时，如果变量个数过多，车辆路径问题将由于计算速度的限制而无法求解。

3) 割平面法。割平面法的基本思想是：先不考虑约束条件确定其可行域，然后增加线性约束条件，不断的将可行域中的非整数解切割掉，整数可行解不会被切割掉，最终得到切割完后一个可行域。此时可行域中整数坐标的极点恰好是问题的最优解。该方法的缺点是一般求解时间比较长。

精确算法的计算量往往随着问题规模的不断增大而呈现出指数增长的态势，只有在问题的规模比较小的时候才有求得最优解的可能性。因此，目前国内外专家学者将研究的重点放在改进和完善启发式算法上面。

（2）传统启发式算法

传统启发式求解算法的原理是,首先从一个初始客户开始,将未配送的客户按照一定的标准或规则加入到现有线路当中,直到将所有客户都安排在路线中为止,从而最终构成一条完整的配送服务线路。这类算法包括节约算法、插入算法、扫描算法和两阶段算法等。

1) 节约算法。节约算法是由 Clarke 和 Wright 提出,它是以三角不等式作为基础,基本思想是每部车辆都被安排单独配送一个客户,并且只以一个配送中心作为起始点和终点。即有几辆配送车辆就会有几条往返的配送线路;然后定义每条配送线路中的第一个和最后一个配送客户分别为 A 点和 B 点。在此基础上,将其中一条线路的 A 点与另外的线路的 B 点合并相连构成一条新的线路。如果合并之后的路线满足既定的约束条件,我们则认为此次合并是可行的。然后按照三角不等式的原理计算合并后的节约值;根据节约值进行排序。选择从节约值最大的线路开始进行路线的合并,直到将所有的客户点都划归到配送线路中为止。该方法计算步骤简单,计算速度快,但是在客户规模增大后容易出现不理想的优化结果。

2) 插入算法。该算法结合了邻近法与节约法的思想。该算法的原理是首先选择一个起始配送点开始,以最邻近思想选择下一个合适的客户点作为插入对象,并求解节约值,根据节约值从大到小的选择顺序决定插入位置与对象,重复以上步骤,直到所有的客户点都被插入到了线路当中为止。

3) 扫描算法。扫描算法的思想是:先以极坐标的方式表达配送中心和各客户点的位置,配送中心位于原点。每个点将根据极坐标的角度给予一个相应的标号。客户点所处的角度越大被赋予的编号也越大。如果出现两个或者多个客户点的极坐标相同,我们根据客户点距离配送中心的远近给予编号,距离配送中心越近的客户点被赋予的标号越小。我们将按客户点标号从小到大的顺序将客户点放入到配送路线中去,但是必须保证配送路线满足约束条件。重复上述操作步骤直到所有的客户点都被安排进配送路线中。此时得到问题的一个初始解。然后我们进行类似于遗传算法变异操作的操作,调整各子路径上的客户点,力求接近或者得到问题的最优解。采用扫描算法求解问题的精度和其编码方案密不可分。如果我们采用一种编码方案对客户进行编码,虽然算法的计算量比较少,但是所得到的解的质量不会太好。如果我们采用多种编码方案对客户点进行编码,解的质量会有

大幅度的提高，但是其计算量也会随之大幅增大。如果采用此算法求解路径优化问题，我们需要在问题的解的质量和计算量之间做一个权衡。综合来看，本算法只适合求解小规模的路径优化问题。

4) 两阶段算法。

顾名思义，两阶段算法的求解过程总共分为两个阶段。在第一阶段，该算法的做法是先得出初始解，然后采用了被称为 k -OPT 的算法对其进行优化；然后转入第二阶段，第一步的操作类似于遗传算法的变异操作，将各个子路径的客户点进行交换，力求得到质量得到改善的解。第二步和第一阶段一样，将得到的解采用被称为 k -OPT 的算法进行优化。采用两阶段算法求解车辆路径优化问题时，人们常常将经验丰富的决策者的对方案的评价加入模型。这种做法大大增加了模型实现和最终被采用的可能性。两阶段算法的优点是在计算的过程中对所要进行访问的客户点数量增加的情况进行了考虑。

(3) 现代启发式算法

现代启发式算法，也被称为智能启发式算法，是人们尝试借助自然界的机制或特性构造的一系列性能优异的算法。与传统启发式算法相比，现代启发式算法的目标是从总体上看，问题的解的质量呈现出向好的趋势，并不要求每一代进化出来的解都比之前得到的解的质量好。这样做在现代启发式算法避免陷入局部最优解中扮演着重要的作用。下面我们将针对可以用于求解车辆路径优化问题的四种现代启发式算法进行详细的介绍。

1) 禁忌搜索算法。禁忌搜索算法 (Tabu Search Algorithm, 简称 TS) 的解题思路是模仿人们找东西的思路。当我们寻找一件物品的时候，我们会对这件物品可能存在的地方进行第一遍寻找。但是如果寻找完一遍后并没有找到这件物品，我们会对我们已经找过的地方再次进行寻找，直到找到为止。禁忌搜索算法的思想是首先确定一个初始解，然后再初始解的基础上向一定的方向进行搜索，最后将选择向解的质量增加最快的方向前进。但是这种规则有陷入局部最优解的可能性。为了避免这种情况的发生，该算法采用了比较灵活的记忆技术。除此之外，该算法还采用释放准则的策略，增加算法向最优解前进的可能性。该算法的流程图如图 2.1 所示。

该算法有一个最大的优点就是为了避免陷入局部最优解，该算法将产生的局

部最优解放到一张禁忌表中进行记录。同时该算法有两个很大的缺点：一个是该算法对初始解的依赖过强，如果初始解的质量较差，该算法的收敛速度将十分缓慢。另外一个缺点是该算法采用串行搜索的方式进行搜索，而不是像遗传算法那样并行搜索，这样大大增加了算法的运行时间。

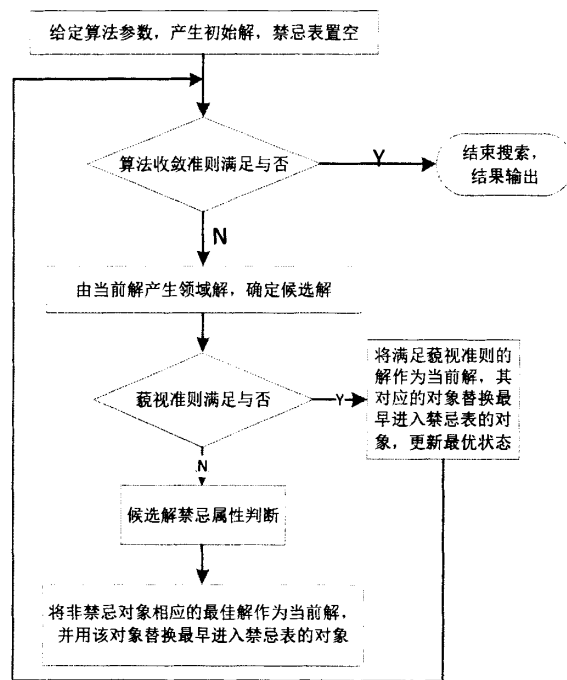


图 2.1 禁忌搜索算法流程图

Fig. 2.1 Flow chart of the tabu search algorithm

2) 模拟退火算法。

模拟退火算法（Simulated Annealing,SA）通过模拟固体的退火过程，遵循 Metropolis 接受准则，在迭代寻优的过程中不仅仅接受更优解，同时以一定的概率接受恶化解规避陷入局部最优解，进而在全局范围内逐渐搜索到接近最优解的满意解。模拟退火算法流程图如图 2.2 所示。

模拟退火算法的优点是能够找到全局满意解且收敛速度较快。模拟退火算法有两个缺点：一是需要平衡降温的快慢。如果采用缓慢降低温度的方法，能够得到质量比较好的解，但是相应的算法运行时间将比较长；如果我们选取快速降低温度的方式降低温度，此时我们得到的解的质量没有保证；第二个缺点是我们选

择可行解的邻域的方法必须恰当，否则我们可能得不到质量较好的解。

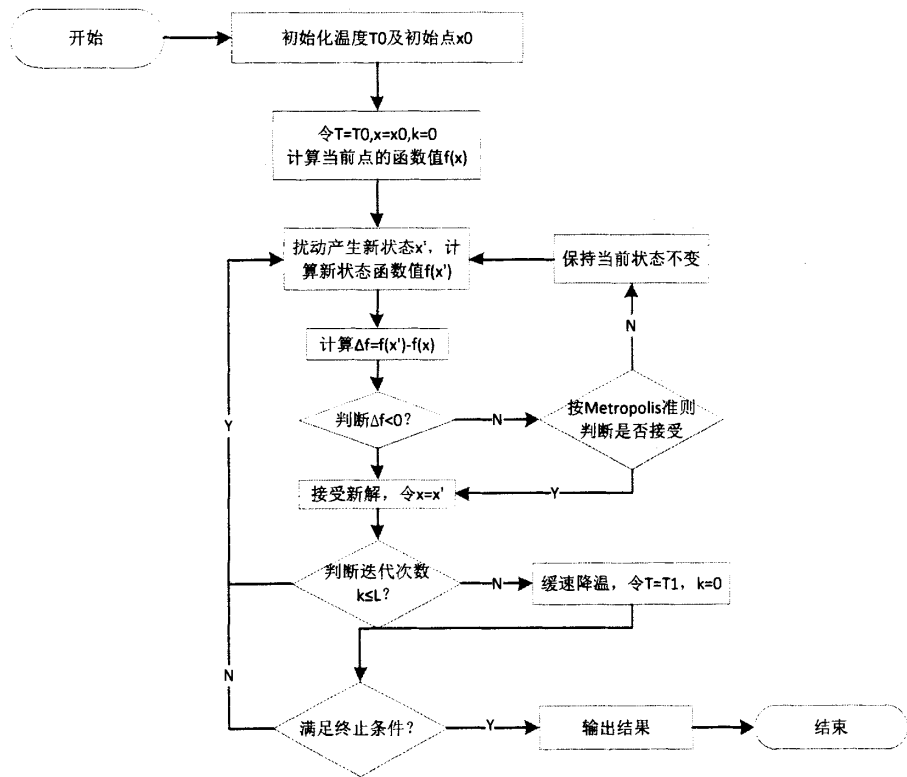


图 2.2 模拟退火算法流程图

Fig. 2.2 Flow chart of the simulated snnealing

3) 蚁群算法。蚁群算法是模拟蚁群觅食行为原理的仿生算法。该算法在求解的过程中会在所寻得的解上留下一定的信息，被留下的信息量与解的性能正相关，再次寻优时会根据寻优路径中信息的浓度进行搜索过程并选择较优的路径，随着迭代过程的进行，较优路径被再次选择的可能性就越大，并最终收敛得到最优解或满意解。蚁群算法具有较强的可扩展性，比较适合大规模的智能算法，但也有初期信息素稀缺、求解速度慢的缺点。

4) 遗传算法。

遗传算法的思想是模仿自然界中生物进化的规律而来的。遗传算法强大的并行搜索能力、不容易陷入局部最优等诸多优点非常适合求解本文所研究的问题。第五章将对本算法做详细的分析。

第3章 基于电动汽车的物流配送系统分析

为了构建基于电动汽车的 VRPTW 模型，本章对基于电动汽车的物流配送系统 VRPTW 进行了深入剖析。本章首先对电动汽车的特点及其商业应用情况进行了梳理，然后在分析基于电动汽车的物流配送系统的基础上，总结出可以对物流配送系统的哪些方面进行优化分析。最后，本文对基于电动汽车的物流配送系统的 VRPTW 进行详细的分析研究。

3.1 电动汽车的特点及其商业应用分析

3.1.1 电动汽车的特点及其充电模式

电动汽车(BEV)是指以车载电源为动力，用电机驱动车轮行驶，符合道路交通安全法规各项要求的车辆。电动汽车依靠电力驱动，而不是汽油、柴油等不可再生资源，其带来的效益不言而喻。然而电动汽车具有生产制造成本高、续驶里程短、充电时间长等制约其推广应用的特点。电动汽车的续驶里程和充电时间与其充电方案的选择密切相关。现在主要存在快速充电模式、常规充电模式和机械充电模式等三种充电模式。

快速充电又称为应急充电，是指以较大的电流为电动汽车提供充电服务的充电模式。这种充电模式能够满足客户在短时间达到一定充电量的要求。快速充电的充电时间一般为 20 分钟到 2 小时，充电电流为 150~400A。快速充电模式可以在几分钟内使电池储电量达到 70%~80%，10~15 分钟的时间就能使电池储量达到 80%~90%。相比常规充电模式，快速充电模式工作和安装成本高。

常规充电，我们又称之为普通充电。常规充电的充电电流比快速充电的电流低很多，一般在 15A 左右。在常规充电模式下，电动汽车的充电时间一般为 5~8 个小时，有的甚至达到 10 至 20 小时。由于常规充电模式对功率和电流额定值要求不高，因此其充电器和安装成本比较低，可以充分利用电力低谷时段充电，降低充电成本，提高充电效率和延长电池的使用寿命。

机械充电模式，通俗的讲，就是更换电动汽车的电池组。电动汽车的电池组的质量比较大，并且如果更换的话对技术的要求比较高，因此机械充电模式一般需要专业的人员通过专业的设备来完成。采用电池组快速更换系统更换电池组时，

一般用时在 10 分钟左右。机械充电模式可以提高车辆使用效率，同时用户用车更加方便。用户可以对更换下来的电池在低谷时段进行充电，降低充电成本，提高车辆运行经济性。

3.1.2 电动汽车的商业应用分析

目前电动汽车产业正在加速形成，各种功用的电动汽车被研发和推广使用。电动汽车按使用用途可分为轿车、客车和货车。目前国内外已经有多家物流公司开始采用电动货车进行物流配送。早在 2010 年，UPS 在德国南部的文德林根分公司试点改装的电动卡车，2012 年又将 6 辆柴油车改装为电动汽车。同样是在 2012 年，DHL 公司和法国雷诺合作，计划在 18 个月内为其运输车队引进 20 辆电动汽车，争取在 2015 年将电动汽车的使用率提高到 30%。联邦快递与尼桑合作增购 87 辆纯电动卡车，使车队中的纯电动汽车数量增加到 130 辆。2013 年 2 月，北京 4 家单位投入 70 辆纯电动物流车，正式拉起了我国纯电动汽车在城市物流领域规模化应用的序幕。同年 7 月，全国首台“换电式”纯电动的城市物流配送车辆在郑州正式上路。

3.2 基于电动汽车的物流配送系统的功能要素及其流程分析

3.2.1 基于电动汽车的物流配送的功能要素

基于电动汽车的物流配送有七大功能要素组成，分别是备货、储存、分拣及配货、配装、配送运输、送达服务和配送加工。

（1）备货。备货是物流配送服务的准备工作，但是它在整个物流配送系统中起着至关重要的作用。众所周知，物流配送系统追求总成本最小。物流配送服务的优势之一就是能够把不同的客户点的货物集中起来形成规模效益。而备货是决定配送服务规模效益的关键环节。如果备货成本太高或者货源数量较少、集货较少会直接影响到配送服务其他功能要素的成本，大大降低物流配送的效益。

（2）储存。如果将储存进行细分，储存可以分为储备和暂存两种形式。简单的讲，储备和暂存的区别就是：储备的数量一般比较大，而暂存的数量一般比较少。深层次的讲，储备是按照客户或者物流配送中心制定的战略进行一定数量的货物的存储。储备是公司战略层面的决定。暂存是物流配送中心在进行配送任务时，由于分拣配货的原因，在理货场地暂时存储一定数量的货物。相对来讲，暂

存属于公司战术层面的存储。

(3) 分拣及配货。分拣及配送是物流配送所独有的功能要素。同时分拣及配送也是体现物流配送规模效益的重要环节。物流配送中心需要配送的货物达到一定的规模之后, 分拣配货的水平对整个物流配送系统水平的高低起着决定性的作用。

(4) 配装。如果单个客户需要配送的货物的数量不能达到配送车辆的额定载重量, 我们将为该配送车辆安排两个或者多个客户。一辆物流配送车辆为多个客户点进行服务的环节, 我们称之为配装。通过配装操作, 物流配送中心可以有效的提高配送车辆的利用率, 降低物流配送的成本^[58]。

(5) 配送运输。与普通的运输相比, 配送运输的距离一般比较短。配送运输一般采用轻型载货汽车作为运输工具。

(6) 送达服务。简单的讲, 送达服务就是将货物送到客户的服务。但是在实际的物流配送中, 送达服务并没有那么简单。比如有的客户有时间窗的限制, 物流配送车辆必须在其规定的时间内到达。但是物流配送中心出于总的物流配送成本最低的考虑, 安排路线时可能不会完全按照客户规定的时间进行配送, 出现配送和客户接货不协调的现象。

(7) 配送加工。配送加工属于流通加工。配送加工可以在很大程度上提高客户对物流配送服务的满意程度。

3.2.2 基于电动汽车的物流配送流程

基于电动汽车的物流配送的一般流程比较规范, 但并不是所有的配送活动都按照一般流程进行。不同产品的配送流程不尽相同, 甚至相同产品的不同批次的配送流程也不相同。但一般来说, 物流配送流程可以用图 3.1 表示。

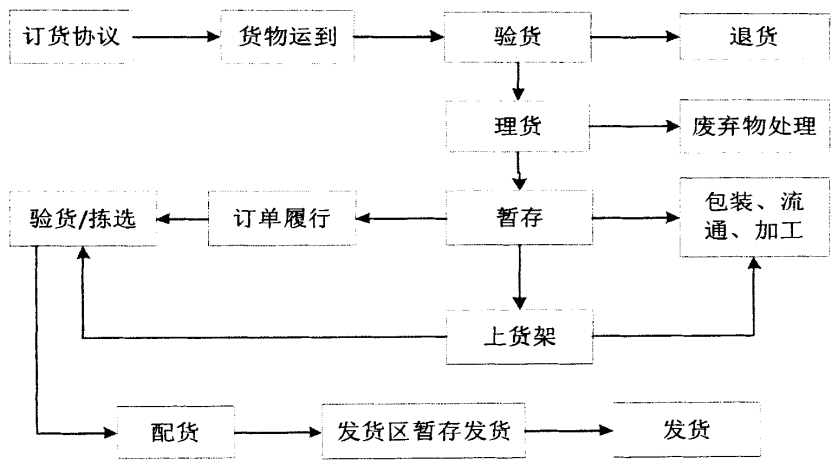


图 3.1 物流配送的一般流程

Fig. 3.1 The general process of logistics distribution

3.3 基于电动汽车的物流配送系统优化分析

基于电动汽车的物流配送系统优化可以分为三个方面：配送中心选址优化、配送中心库存优化、配送中心车辆调度优化。

(1) 基于电动汽车的配送中心选址优化

不同情况下，基于电动汽车的物流配送系统的目标也不尽相同。常见的目标有成本最小、综合评价结果最优等。但是总的来说，配送中心具有投资规模大、服务周期长等特点，所以配送中心在选址时理应兼顾资源节约、环境友好，充分考虑总成本、服务等目标的基础上，认真考虑节点可持续发展的潜力，比如服务设施的扩展可能性等。在总成本、服务、发展潜力等目标出现冲突的情况下，配送中心选址优化问题可采用多目标决策、综合评价的方法^[59]。

基于电动汽车的配送中心选址优化遵循适应性原则、经济性原则、协调性原则和前瞻性原则等。配送中心选址需要充分考虑国家和所在地区的经济政策、经济社会发展的整体水平、候选地点物流资源和市场需求分部情况，并与之相适应。配送中心选址既要考虑总成本最小，又要考虑配送中心的规模或等级满足市场需求，最终综合考虑达到最优的经济性。配送中心应在区域分布、经济功能、规模等级、技术水平等方面相互协调，打破地区、行业的界限，按照科学布局、资源整合、优势互补、良性循环的思想进行规划。除此之外，配送中心选址应从全局

角度和长远角度考虑，局部利益服从整体利益，当前利益服从长远利益。配送中心的前瞻性建设超前于现有的物流业发展阶段。

虽然实际问题的不同，配送中心选址的数学模型也有很多种，但是配送中心选址优化的基本内容和基本模型是一致的。其基本内容包括三个方面：一是区域内配送中心的数量；二是每个配送中心的位置；三是配送中心的级别或者规模。其基本模型可以表述为：在 m 个候选的选址地点中选择 p 个最优点作为配送中心为 n 个仓库进行配送服务，其目标是总距离、时间或者配送费用等达到最少。

配送中心选址问题的主要解决思路是构建合适的数学模型，明确优化目标，可以通过模拟退火算法、禁忌搜索等智能算法进行计算，得到令人满意的选址决策方案。

（2）基于电动汽车的配送中心库存优化

基于电动汽车的配送中心的库存优化问题，也成为库存控制优化问题，是指根据客户的要求、生产需要，结合历史统计数据和预测数据对库存进行科学合理的运算，力求找到最优的库存管理策略的问题。库存优化通常是针对库存空间的动态管理或者存储货物的预测和动态管理等方面展开。

（3）基于电动汽车的配送中心车辆调度优化

基于电动汽车的车辆调度优化问题是指已知配送中心与仓库的位置和仓储容量需求的情况下，如何安排配送车辆实现最优的配送方案的优化问题。配送路径优化是国际上公认的比较复杂的研究备受国内外专家学者的重视。

车辆调度优化主要包括车辆数量和容量的调度优化以及车辆路径的优化。本文重点研究的是车辆路径优化。车辆路径优化属于带有约束的极值优化问题，一般可转化为旅行商、最短路径问题等。从最优化方法上看，车辆路径优化问题属于 NP 难题，可行解有非常多，并且随着初始条件矩阵的增大，问题的求解难度和求解时间级数倍上升，被称为“维数灾”。

国内外专家学者一直致力于这方面的研究，从最初的精确解算法、启发式算法，发展到现在的基于自然规律的智能算法。虽然车辆路径优化问题的求解方法得到了很大的进步，但是不同场合、不同问题、瞬息万变的信息、难以定义的实际环境等特殊情况使得在各种实际问题中，针对特定的优化目标的情况下，车辆路径优化问题仍然是理论研究和实践的难题^[60]。

3.4 基于电动汽车的物流配送系统 VRPTW 分析

在现在的物流配送服务过程中，客户对配送服务的时间有限制。如果配送车辆不能在客户时间窗内到达，物流配送中心将接受一定的惩罚。因此对物流配送服务提出了更高的要求。如今国内外物流配送服务商纷纷试验将电动汽车作为配送车辆，但是电动汽车用于配送服务存在续驶里程短、充电时间长等特点，电动汽车在配送路径选择过程中存在如下问题。

为了能够清楚的表达问题的特点，此处将问题简化为：配送中心运用电动汽车为各个客户点进行配送服务，每个客户点都有时间窗限制。如果配送中心不能在时间窗内到达客户点将接受一定的惩罚。除此之外，由于电动汽车技术的限制，电动汽车的续驶里程有限，配送过程中可能需要进入充电站进行充电，其中电动汽车的充电时间比传统汽车加油时间长很多。物流配送中心为了使惩罚成本和车辆行驶费用构成的总成本最小，需要对配送中心的车辆行驶路径进行科学合理的规划。如图 3.2 所示，物流配送中心为 4 个客户点进行配送服务且每个客户有时间窗的限制，配送区域内有一个充电站。配送路线有很多种，为了更好的表达基于电动汽车的车辆路径问题，我们选取两种典型的路线进行分析。

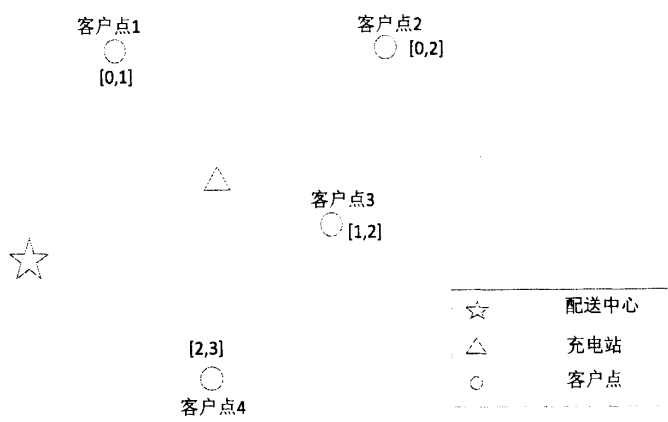


图 3.2 各点的相对位置及客户点的时间窗

Fig. 3.2 The relative position and the time window of each customer

第一种情况如图 3.3 所示，由于续驶里程的限制，物流配送中心派出电动汽车 1 经客户点 1、客户点 2，返回配送中心，派出电动汽车 2 经客户点 3、客户点 4，然后返回配送中心。

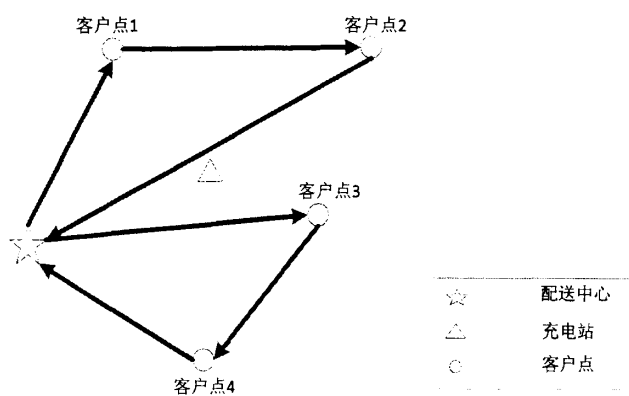


图 3.3 配送车辆路径

Fig. 3.3 Routing of vehicles

第二种情况如图 3.4 所示，同样由于续驶里程的限制，电动汽车经客户点 1、客户点 2 后，进入充电站进行充电，充满电后经客户点 3、客户点 4，返回配送中心。第二种情况下车辆行驶总路线比较短，但是有可能违反了客户时间窗而遭受一定的惩罚。由于续驶里程的限制，配送车辆在配送过程中进入充电站充电是采用电动汽车进行物流配送服务所特有的情形。

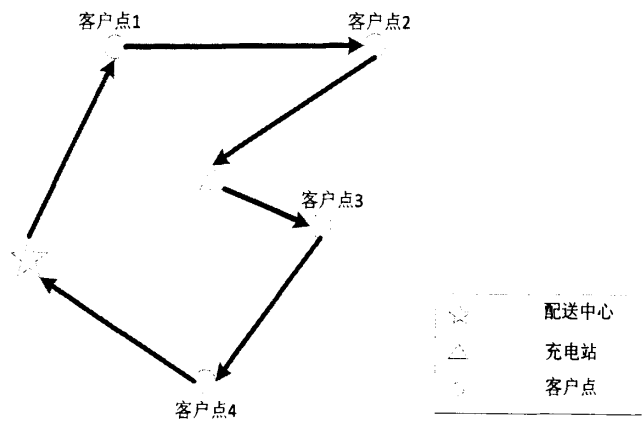


图 3.4 配送车辆路径

Fig. 3.4 Routing of vehicle

第4章 基于电动汽车的VRPTW模型构建

随着国家对新能源汽车的大力支持和人们节能环保意识的增强,电动汽车用于物流配送是大势所趋。电动汽车特有的续驶里程短、充电时间长等特点使得传统燃油配送车辆的调度模型与求解算法不适应调度电动汽车,因此建立适合的基于电动汽车的物流配送模型和设计出高效可行的求解算法成为当务之急。电动汽车的调度问题比传统燃油车辆的调度问题更加复杂。研究基于电动汽车的车辆调度问题,就必须在电动汽车续驶里程、充电站位置和充电时间等条件的限制下,建立物流配送车辆路径优化问题的模型。

4.1 基于电动汽车的VRPTW的特点及其描述

4.1.1 基于电动汽车的VRPTW与普通VRPTW的区别

电动汽车续驶里程太短,采用电动汽车进行配送过程中,电动汽车可能需要进入充电站进行充电,并且电动汽车进行充电需要较长的时间。与传统类型的VRPTW相比,基于电动汽车配送的VRPTW有如下特征:

(1) 由于电动汽车技术的限制,电动汽车续驶里程短,目前我国用于物流配送的电动汽车的续驶里程在150~200km之间,远远小于常规动力配送车辆的续驶里程,不能满足按照常规动力配送车辆配送路线进行配送的要求。电动汽车在配送过程中因其续驶里程短可能需要进入充电站进行充电,充电结束后完成后续的配送任务。在基于电动汽车的VRPTW模型设计过程中需要考虑电动汽车到达配送中心、充电站、客户中心中每个点时都有剩余电量,即必须保证电动汽车有足够的电量到达为其规划的路线上的每个点;

(2) 电动汽车处于起步阶段,相应的配套设施不完善,配送过程中充电服务的可获得性差。以北京为例,其充电设施可以分为3类:公共专用、私人自用和社会公用充电桩三类。截至2015年2月,北京建设完成公共专用充电场站234座,充电桩3676个;已建私人自用充电设施1500个;已经建成社会公用充电桩1500个,其中1000余根已经完成调试工作。根据北京市电力公司《“十二五”北京市电动汽车智能充换电服务网络发展规划》,并纳入北京市“十二五”电动汽车发展整体规划:2015年底,建成272座充换电站为骨架、136座配送站为网点,3.03

万台充电桩为补充的三级智能充换电服务网络，届时能够满足 6 万辆纯电动汽车的充换电需求。由于充电站数量和布局等问题，电动汽车在配送过程中如要进入充电站进行充电，可能绕行比较远的距离，导致配送路线距离大幅增加，增加物流配送的成本。除此之外，长距离的绕行会引起到达客户点的时间后延，可能会错过客户时间窗而增加物流配送中心的惩罚成本；

(3) 电动汽车充电时间长。电动汽车充电分为三种模式：快速充电模式、常规充电模式和机械充电模式。快速充电的充电时间一般为 20 分钟到 2 小时；常规蓄电池的充电时间一般为 5~8 小时，甚至长达 10 至 20 小时；采用电池组快速更换系统更换电池组时，一般用时在 10~20 分钟左右。不难看出，配送过程中电动汽车只能通过快速充电或者机械充电模式充电，常规充电模式由于充电时间过程过长而不能采用。即使采用快速充电或者机械充电模式进行充电，电动汽车的充电时间也比常规燃料电动汽车补充燃料的时间长很多。

通过第二章的分析可以看出，基于电动汽车的 VRPTW 比基于传统燃油配送车辆的 VRPTW 复杂很多。建立基于传统燃油配送车辆的 VRPTW 模型只需要考虑客户点的时间窗、配送车辆的容量限制和配送车辆的总行驶里程最短三个问题，不需要考虑配送车辆的续驶里程、配送范围中是否有加油站及加油站的位置、配送过程中是否进入加油站、配送过程中何时进入加油站、加油时间等一系列问题。由于电动汽车续驶里程短、充电时间长和充电站数量少等原因，构建基于电动汽车的 VRPTW 模型需要考虑的硬性约束条件和软约束条件比构建常规的 VRPTW 模型多很多。本文在前人研究的基础上，构建基于电动汽车的 VRPTW 模型，试图解决上述问题。

4.1.2 基于电动汽车的 VRPTW 描述

基于电动汽车的 VRPTW 可以描述为：由于国家政策利好和自身条件，某物流配送中心采用电动汽车为各个客户点进行配送服务，每个客户点都有配送时间的限制。如果配送中心不能在时间窗内到达客户点将接受一定的惩罚。电动汽车有一定的容量限制。除此之外，由于电动汽车技术的限制，电动汽车的续驶里程有限，配送过程中可能需要进入充电站进行充电，其中电动汽车的充电时间比传统汽车加油时间长很多。物流配送中心如何规划配送中心的车辆行驶路径，惩罚

成本和车辆行驶费用构成的总成本可以达到最小。

综上所述，基于电动汽车的带时间窗的车辆路径优化的目标和约束条件如表 4.1 所示。

表 4.1 基于电动汽车的 VRPTW 的目标及其约束条件
Tab. Target and constraint of VRPTW in the context of electric vehicles

目标	惩罚成本和车辆行驶费用所构成的配送总成本最小
约束条件	约束 1：电动汽车最好在客户的时间窗内对客户进行配送服务，否则物流配送中心将受到违反客户时间窗的惩罚； 约束 2：每次配送任务都以配送中心为起点和终点； 约束 3：每辆电动汽车服务的客户所需的货物重量总和必须小于电动汽车的额定载重量； 约束 4：电动汽车拥有足够的电量到达为其规划的配送路线上的客户点、配送中心或者换电站； 约束 5：物流配送方案中使用的电动汽车数量不得超过物流配送中心所拥有的电动汽车数目。

4.2 基于电动汽车的 VRPTW 的基本假设

结合本文研究的重点，为了将实际配送活动中带时间窗的车辆路径问题抽象为数学模型，本文做出如下假设：

(1) 每辆电动汽车配送过程中每个充电站最多进入一次

根据物流配送服务的特点，各个客户点距离配送中心不会太远，电动汽车配送过程中可能不需要充电就能完成既定的配送任务；如果配送过程中不充电无法完成既定的配送任务，电动汽车最多在每个充电站充电一次即可完成充电站附近客户点的配送任务。假如电动汽车多次进入同一充电站进行充电，必定导致配送总距离的增加，同时可能因为运输时间的增加而违反客户点的时间窗限制，增加物流配送中心的惩罚成本。综合考虑，本文做出每辆电动汽车配送过程中每个充电站最多进入一次的假设。

(2) 电动汽车经过充电站后，电池是被充满的

根据电动汽车充电模式的特点，电动汽车在进行物流配送过程中有两种充电

模式可以选择：一是快速充电模式；二是机械充电模式。常规充电模式由于充电时间过长不能应用于物流配送过程中，可以应用在电动汽车返回物流配送中心后使用，节约充电成本。采用机械充电模式时，电动汽车选择充电就意味着充满电；采用快速充电模式时，电动汽车可以选择充电量。本文为了简化问题，假设电动汽车进入充电站就选择充满电。

(3) 电动汽车的类型单一且无超载现象

本文假设电动汽车的类型单一主要出于两点考虑：一是企业出于自身规范化管理的考虑，采用统一的电动汽车；二是本文为了研究的需要将问题进行了简化处理。出于交通安全的考虑，物流配送过程中应尽量避免电动汽车超载。

(4) 在客户点装卸过程中，电动汽车不消耗自身电能

电动汽车在客户点进行装卸货期间处于不工作状态，不需要消耗自身电能。

(5) 任一客户点需求量小于电动汽车的额定载重量

现代物流配送的特点是频率高、批量少，单个客户点往往不能使电动汽车实现满载。本文将要建立的基于电动汽车的 VRPTW 模型正是基于这种背景，所以在此假定单一客户点的需求量小于电动汽车的额定载重量。

(6) 配送中心拥有足够的货物以供配送

客户点一般都会提前一段时间下单，配送中心有足够的时间进行备货，一般不会出现配送中心货物短缺的情况。因此，本文假设配送中心拥有足够多的货物，对于配送中心货物短缺的情况不予考虑。

(7) 所有的电动汽车在配送过程中速度恒定且相同

虽然电动汽车在实际的物流配送过程中，行驶速度一直在变化，本文为了研究的需要将问题简化为电动汽车在配送过程中速度恒定且相同。

(8) 货物流向为单向，纯送货不带集货

物流配送问题可以分为纯装货、纯卸货、混合配送三种类型。本文研究的是纯卸货物流配送问题，即只考虑如何将货物按照客户点的要求将货物从配送中心送达各个客户点，不考虑从客户点装货的问题。

(9) 配送中心、充电站和客户点的位置坐标为已知

在实际的物流配送活动中，配送中心、充电站和客户点的地理位置是已知的，这也是进行物流配送系统车辆路径优化问题研究的基础条件。

(10) 每辆电动汽车可为多个客户服务，每个客户只能被一辆车服务

现代物流配送的特点是频率高、批量少，单个客户点往往不能使电动汽车实现满载，没有必要再安排其他车辆对该客户点进行配送服务。鉴于现代物流配送的上述特点，物流配送中心出于经济效益等考虑，安排一辆电动汽车为多个客户点进行配送服务。

(11) 每个客户点的需求量、服务时间及时间窗为已知

各个客户点的需求量及时间窗一般都会提前一段时间汇总到配送中心，不需要物流配送中心预测客户点需求量的预测，为配送中心合理的安排物流配送工作提供了便利。每个客户点的服务时间一般与其需求量成正比，我们只需要确定服务时间与需求量之间的比例系数，就可以结合已知的每个客户点的需求量计算出为各个客户点的服务时间。

(12) 假设电动汽车从物流配送中心出发的时刻为0时刻

不同的物流配送中心，车辆从物流配送中心出发的时间不同；即使同一个物流配送中心，电动汽车接受的任务不同，从物流配送中心出发的时间也不尽相同。由于电动汽车从物流配送中心出发的时刻不会影响到模型的建立及其求解算法的设计，我们将电动汽车从物流配送中心出发的时间设为0时刻。如果实际物流配送中，电动汽车从物流配送中心出发的时刻不是0时刻，我们只需要将出发时刻的参数改为相应的数值即可。

(13) 不考虑配送过程中的车辆故障、道路拥堵等影响因素

本文研究的是基于电动汽车的VRPTW，研究的重点是针对电动汽车续驶里程短、配送过程中需要充电等特点构建适合电动汽车特点的VRPTW模型。由于论文篇幅的原因，本文对配送过程中的车辆故障、道路拥堵等影响因素不做考虑。

(14) 所有的电动汽车都是从配送中心出发，完成配送任务后返回配送中心

本文研究的是纯卸货的物流配送问题，即如何将货物按照客户点的要求将货物从配送中心送达各个客户点。本文研究问题的特点决定了本文必须做出所有的电动汽车都是从配送中心出发及其完成配送任务后返回配送中心的假设。

(15) 电动汽车的充电时间为已知

电动汽车在进行物流配送的过程中，一般采用快速充电模式和机械充电模式两种模式。无论采用哪种充电模式，电动汽车的充电时间是恒定的。

(16) 电动汽车的续驶里程为已知

由于技术问题，电动汽车的续驶里程比较短。2013 年北京市 4 家物流企业投入运营的 70 辆电动汽车，续驶里程在 100 公里左右。郑州市巨洋方圆物流有限公司投入运营的电动汽车的续驶里程在 150~200 公里之间。由于电动汽车续驶里程短的限制，本文在构建基于电动汽车的 VRPTW 模型时不得不考虑电动汽车的续驶里程这个硬性约束条件。由于电动汽车在出厂时都会被注明续驶里程，除此之外，电动汽车在实际使用过程中，企业也会有其经验续驶里程。

(17) 单一配送中心

每个物流配送中心都有其服务的客户点范围，本文研究的是物流配送中心、充电站、客户点构成的物流配送系统。

4.3 构建基于电动汽车的 VRPTW 的数学模型

4.3.1 参数定义

为了更加清晰准确的描述模型，我们对模型中使用到的符号进行如下定义。

N ：客户点集合；

K ：电动汽车集合，下标用 k 表示；

M ：充电站集合；

O ：配送中心，下标用 o 表示；

V ：客户点、充电站、配送中心等点的集合，下标用 v 表示， $V = N \cup M \cup O$ ；

C ：电动汽车配送单位距离的运输成本；

d_{ij} ：点 i 到点 j 的欧式距离， $i, j \in V$ ；

q_i ：客户点 i 的需求量， $i \in N$ ；

Q ：电动汽车的额定载重量；

p_{vk}^1 ：电动汽车 k 到达 v 点时所剩余的电量；

p_{vk}^2 ：电动汽车 k 离开 v 点时所剩余的电量；

P ：电动汽车的电池容量；

e_i ：客户点 i 要求的最早服务时间， $i \in N$ ；

l_i ：客户点 i 要求的最晚服务时间， $i \in N$ ；

epu : 电动汽车提前到达客户点所发生的等待的单位时间的机会成本;

lpu : 电动汽车晚于时间窗到达客户点所处的单位时间的惩罚值;

t_i' : 电动汽车到达点 i 的时间, $i \in V$;

t_i^* : 电动汽车离开点 i 的时间, $i \in V$;

tw_i : 电动汽车在客户点 i 处的等待时间, $i \in N$;

tf_i : 如果 i 代表客户点, 则 tf_i 表示电动汽车在点 i 的服务时间; 如果 i 代表充电站, 则 tf_i 表示电动汽车的充电时间, $i \in N \cup M$;

t_{ij} : 电动汽车从点 i 到点 j 所需要的时间, $i, j \in V$;

$speed$: 电动汽车在配送过程中的行驶速度;

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{电动汽车 } k \text{ 从点 } i \text{ 到点 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad k \in K, i, j \in V;$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{客户点 } i \text{ 任务由电动汽车 } k \text{ 完成} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad k \in K, i \in N.$$

4.3.2 目标函数分析

本文研究的是基于电动汽车的 VRPTW, 其物流配送成本主要由两方面构成: 车辆的运输成本和惩罚成本。

(1) 车辆的运输成本

车辆的运输成本随着其行驶距离的增加而增加, 基本可以认为车辆的运输成本与车辆所行驶的里程数成正比。配送中心总的车辆运输成本 C_{tr} 可以表示为:

$$C_{tr} = C \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i \neq j} x_{ijk} d_{ij} \quad (4.1)$$

(2) 惩罚成本

实际的物流配送活动中, 由于各种原因客户会对物流配送中心的配送服务规定时间窗。但是由于车辆调度等原因, 物流配送中心无法保证 100% 在客户规定的时间窗内将货物送到。出于现实情况考虑, 客户往往对配送服务进行软时间窗的限制。软时间限制允许配送车辆在规定的窗口外到达, 但是物流配送中心会受到一定的惩罚。物流配送中心的惩罚成本如式 2.8 所示。

4.3.3 约束条件分析

基于电动汽车的 VRPTW 主要存在电动汽车续驶里程、电动汽车额定载重量、物流配送中心电动汽车的数量、配送任务以配送中心为起点和终点以及时间窗等五个约束条件。

(1) 电动汽车的续驶里程约束

电动汽车的续驶里程比较短，用于物流配送的电动汽车的续驶里程在 $100\text{ km} \sim 200\text{ km}$ 之间。如果按照普通燃油汽车的物流配送方案安排电动汽车进行配送，电动汽车因为续驶里程的限制而无法完成。因此，在构建基于电动汽车的 VRPTW 模型时，我们必须考虑电动汽车的续驶里程这个约束条件。换句话说，我们在进行物流配送方案设计时，必须保证电动汽车到达其配送路线上的每个点时的剩余电量大于零。电动汽车的续驶里程约束可以用数学的形式表示为：

$$p_{vk}^1 \geq 0 \quad \forall v \in V, \forall k \in K \quad (4.2)$$

(2) 电动汽车的额定载重量约束

每辆电动汽车都有最大载重量的限制，物流配送中心为其安排的配送货物总重量不得超过其额定载重量。电动汽车的额定载重量约束可以表示为：

$$\sum_{i \in N} y_{ki} q_i \leq Q \quad \forall k \in K \quad (4.3)$$

(3) 物流配送中心电动汽车的数量约束

物流配送中心拥有一定数量的电动汽车，我们设计的物流配送方案中所使用的电动汽车总数目不得大于物流配送中心拥有的电动汽车的数目。物流配送中心电动汽车的数量约束可以表示为：

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V, i \neq 0} x_{oik} \leq |K| \quad (4.4)$$

(4) 配送任务以配送中心为起点和终点约束

本文研究的是纯卸货物流配送问题，即只考虑如何将货物按照客户点的要求将货物从配送中心送达各个客户点。本文研究的方向决定了构建模型时需要考虑配送任务以配送中心为起点和终点这个约束条件。配送任务以配送中心为起点和终点约束可以表示为：

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{oik} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{jok} = 0 \quad (4.5)$$

(5) 时间窗约束

物流配送中心最好在客户规定的时间窗内为客户进行服务，否则将受到相应的惩罚。时间窗约束如式 2.8 所示。

4.3.4 数学模型

在以上的假设条件和参数定义的基础上，结合上文关于目标函数和约束条件的分析，我们可以建立如下数学模型：

$$\min C \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i \neq j} x_{ijk} d_{ij} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} pu_i(t_i) \quad (4.6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{oik} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{jok} = 0 \quad (4.7)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} x_{ijk} = \sum_{j \in N, i \neq j} x_{jik} = y_{ki} \quad \forall k \in K \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ki} q_i \leq Q \quad \forall k \in K \quad (4.9)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V, i \neq o} x_{oik} \leq |K| \quad (4.10)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} x_{ijk} \leq |N| \quad \forall k \in K \quad (4.11)$$

$$t_o^* = 0 \quad (4.12)$$

$$t_{ij} = d_{ij} / speed \quad \forall i, j \in V \quad (4.13)$$

$$\dot{t}_i = t_i^* + tf_i + tw_i \quad i \in N \cup M \quad (4.14)$$

$$\dot{t}_j = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i \neq j} x_{ijk} (\dot{t}_i + t_{ij}) \quad \forall k \in K \quad (4.15)$$

$$tw_i = \max[0, (e_i - \dot{t}_i)] \quad \forall i \in N \quad (4.16)$$

$$p_{ik}^1 = p_{ik}^2 \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (4.17)$$

$$p_{ik}^2 = P \quad \forall i \in O \cup M, \forall k \in K \quad (4.18)$$

$$p_{vk}^1 \geq 0 \quad \forall v \in V, \forall k \in K \quad (4.19)$$

$$x_{ijk}, y_{ki} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (4.20)$$

$$pu_i(\dot{t}_i) = epu \times \max(e_i - \dot{t}_i, 0) + lpu \times \max(\dot{t}_i - l_i, 0) \quad (4.21)$$

式 4.6 为目标函数，其中，第一项是配送过程中的运输费用，第二项是物流配

送中心因违反客户点时间窗而遭受到的惩罚成本；式 4.7 保证每次配送任务都以配送中心为起点和终点；式 4.8 保证每个客户点能且仅能被服务一次；式 4.9 保证每辆电动汽车服务的客户所需的货物重量总和小于电动汽车的额定载重量；式 4.10 表示为客户服务的电动汽车总数小于配送中心所拥有的电动汽车总数；式 4.11 表示每辆电动汽车服务的客户点数目小于等于客户点总数目；式 4.12 表示电动汽车从配送中心出发的时间是 0 时刻；式 4.13 表示电动汽车从点 i 到点 j 的行驶时间为两点间的欧氏距离除以电动汽车的行驶速度；式 4.14 表示电动汽车离开客户点 i 的时间等于电动汽车到达客户点 i 的时间、在客户点 i 的服务时间、在客户点 i 的等待时间三者的和；式 4.15 表示电动汽车到达点 j 的时间等于电动汽车离开其前一点 i 的时间加上其从点 i 行驶到点 j 所需要的时间；式 4.16 表示如果电动汽车到达客户点 i 的时间早于客户点 i 要求的最早服务时间 e_i ，电动汽车需要等待到客户点 i 要求的最早服务时间 e_i 才能开始服务，等待的时间 tw_i 为 $e_i - t_i'$ ，否则无需等待， tw_i 为 0；式 4.17 保证电动汽车到达客户点的剩余电量等于电动汽车离开客户点时的剩余电量，即在客户点停留过程中不消耗电动汽车自身的电能；式 4.18 表示离开配送中心或者换电站时，电动汽车的电量是被充满的；式 4.19 保证电动汽车拥有足够的电量到达为其规划的配送路线上的客户点、配送中心或者换电站；式 4.20 表示决策变量 x_{ijk} 、 y_{ki} 是 0-1 变量；式 4.21 是根据式 2.8 表示的惩罚成本的函数表达式。

本模型具有比较强的通用性能，通过不同的参数设定及约束调整可以转化为其他问题。本模型是针对基于电动汽车的带时间窗的车辆路径问题模型，在一般的带时间窗的车辆路径优化问题里面融合了电动汽车续航里程短、配送过程中需要充电的特点。如果本模型去掉关于电动汽车特点的式 4.17、式 4.18、式 4.19，该模型就变成一个普通的带时间窗的车辆路径问题模型。如果本模型去掉带时间窗的车辆路径优化问题特有的式 4.12、式 4.13、式 4.14、式 4.15、式 4.16、式 4.21 和目标函数中的惩罚成本，并且去掉含有电动汽车特点的式 4.17、式 4.18、式 4.19，本模型就转化为常规的含有容量约束的车辆路径优化模型。

第5章 基于电动汽车的 VRPTW 算法设计

通过第二章对前人各种 VRP 求解算法的分析, 本文选择遗传算法作为本文所研究问题的求解算法。本章首先概述了遗传算法的基本情况, 在此基础上设计了适合求解本文模型的染色体编码方式和遗传算子。最后通过算例验证了本文模型和算法的可行性和有效性。

5.1 算法概述

在实际的车辆路径问题中, 各种约束条件错综复杂, 问题的规模也比较大。遗传算法因为其强大的并行搜索能力、不容易陷入局部最优、自学习性、自组织性、自适应性等诸多优点而被广大专家学者应用于求解车辆路径问题领域。遗传算法的诸多特点也适合于求解本文研究的基于电动汽车的 VRPTW 模型, 因此本文选择和设计了适合本文的遗传算法作为所研究问题的求解算法。

遗传算法是模拟生物在自然环境中“优胜劣汰、适者生存”的遗传和进化过程形成的具有自适应能力的、全局性的概率搜索算法。

(1) 遗传算法基本概念

1) 个体 (Individual) 或染色体 (Chromosome)

个体或者染色体通常用一个向量来表示: $X=x_1x_2\dots x_l$, 其中 x_i 是串 X 的基本单元, 称为基因 (Gene)。遗传算法求解的问题不同, 个体的表达方式不同。常见的遗传算法的个体的表达方式有整数串、二进制串、实数串等。

2) 编码 (Coding) 和解码 (Decoding)

编码就是将实际问题的解空间表达成遗传算法所能处理的表达方式, 就是表现型表达为基因型。遗传算法求解完成后, 需要将得出的最优解表达成实际问题的解的形式, 这种操作就称为解码操作。

3) 种群 (Population) 和种群规模 N

种群就是个体的集合。种群规模表示种群中个体的数量。种群规模的大小非常重要, 如果种群规模过小虽然能够提高算法的运行速度, 但是降低了种群的多样性, 使得算法容易陷入局部最优解, 得出的解的质量没有保证; 如果种群规模过大则降低算法的运行速度。

4) 适应度 (Fitness)

适应度最早是被生物学家用来形容某个生物物种对其所处的周围环境的适应程度。在遗传算法中，适应度被用来表示种群中每个个体接近最优解的程度。在遗传算法中，适应度是通过适应度函数计算而来。适应度在遗传算法中起着重要的作用。遗传算法中选择进行交叉、变异的个体就是根据适应度的值进行的。

5) 遗传算子 (Genetic Operators)

遗传算法主要通过遗传算子实现种群的进化。遗传算法通过遗传算子逐代进化种群，相应的解也逐代优化并逐渐接近最优解。常用的遗传算子有选择算子 (Selection)、交叉算子 (Crossover) 和变异算子 (Mutation)。

选择算子的作用就是为交叉等遗传操作选择种群中的个体。选择算子选出的个体有机会作为父代进行后续的遗传操作。种群中每个个体被选中的机会与其适应度值密切相关。但是选择策略不同，种群中个体被选择的概率与适应度值的关联程度不同。常见的选择策略有轮盘赌选择、排序选择等。而在遗传算法中，轮盘赌选择策略的应用最为广泛。它的基本思想就是种群中个体被选中的概率与其适应度值的大小成正比。

交叉算子是遗传算法特有的算子。父代个体通过交叉操作可以得到子代个体，子代个体能够部分或者全部地继承父代个体的结构特征和有效基因。交叉算子的设计需要遵循既不太多的破坏父代染色体编码串中优良的基因组，又要有效的产生较好的新染色体的原则。基本遗传算法的交叉算子可以分为点式交叉和均匀交叉两种。交叉算子的设计和实现与所研究的具体问题紧密相关。本文研究的车辆路径优化问题属于基于次序的组合优化问题，需要设计专门的交叉算子。

变异算子是指父代个体编码中的某些基因用其他等数量的基因替换，从而产生子代新个体的操作的算子。变异算子可以有效的维持种群的多样性，防止算法出现早熟现象，提高全局搜索能力。

(2) 遗传算法的工作流程

遗传算法的工作流程图如图 5.1 所示。

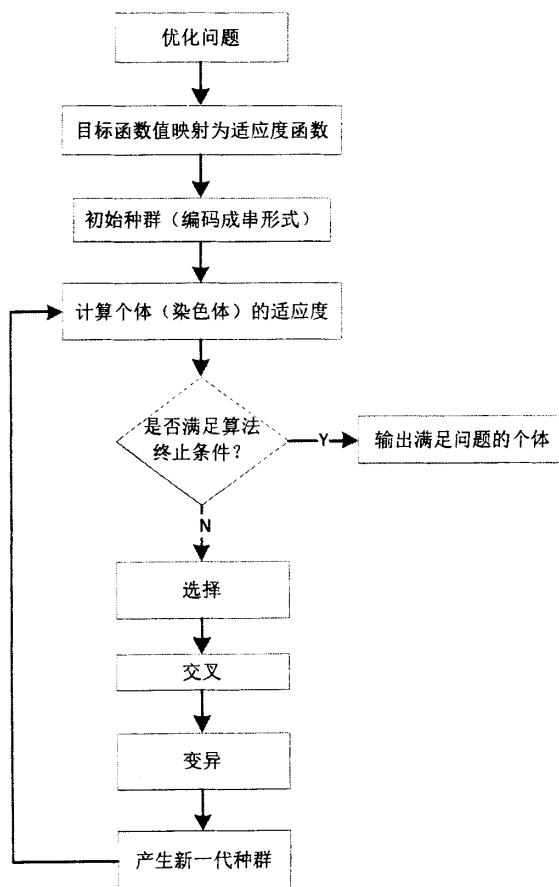


图 5.1 遗传算法工作流程图

Fig. 5.1 Flow chart of the genetic algorithm

(3) 遗传算法特点

遗传算法与其他的现代启发式算法相比，具有 7 大优点：

1) 应用领域较为广泛。遗传算法处理的对象是对参数集编码的串，不是问题的参数；

2) 自学习、自组织和自适应性。遗传算法求解问题时，遗传策略确定之后，算法将利用进化过程中的信息自行组织搜索；

3) 遗传算法拥有强大的并行搜索能力，能够处理庞大的数据量；

4) 遗传算法的可扩展性比较强，能够与其他算法混合使用，应用范围更加广泛；

5) 遗传算法在搜索过程中不容易陷入局部最优，即使适应度函数是非规则、

不连续的情况下，找到全局最优解的可能性也很大；

6) 遗传算法模拟的是自然进化机制，能够用于解决一些复杂的优化问题；

7) 遗传算法是一种启发式算法，采用概率的规则指导搜索方向，对搜索空间没有任何的特殊要求，能搜索离散的复杂空间，适用于求解大规模，甚至超大规模的复杂化问题。

遗传算法虽然具有以上优点，但其也有一定的局限性：

1) 遗传算法的编码机制没有严格的规定，没有规范性；

2) 遗传算法的效率比其他现代启发式算法低；

3) 遗传算法容易出现过早收敛；

4) 单一的编码不能全面的将问题的约束表达出来。

根据上述分析，本文决定采用遗传算法对模型进行求解。针对遗传算法的特点及所研究的问题，本文采用自然数编码的方式进行编码方案的设计。由于遗传算法的编码方案不能完全反映模型的约束条件，本文将其与目标函数融合成算法的适应度函数。

5.2 算法设计

5.2.1 编码方案设计

根据本文模型的特点，采用自然数编码方式^[61,62]。染色体长度为 $m+n+k+1$ ，其中 n 表示客户点数量， m 为换电站数量， k 为配送车辆数量。配送中心的编码为 0；编码 $1, 2, 3, \dots, n$ 代表各个客户点被分配的自然数序号； $n+1, n+2, n+3, \dots, n+m$ 代表各充电站被分配的自然数序号。

例如配送中心有 3 辆电动汽车为 8 个客户进行配送服务，配送区域有 2 个充电站。假如其中一条染色体为：0, 3, 2, 9, 6, 0, 7, 10, 1, 5, 0, 8, 4, 0。表示的行驶路线为：第 1 辆电动汽车的行驶路径为 0-3-2-9-6-0，代表这辆电动汽车从配送中心出发，先后经过客户点 3、客户点 2，然后进入编号为 9 的充电站进行充电，充满电后经客户点 6 返回配送中心；第 2 辆电动汽车的行驶路线为 0-7-10-1-5-0，代表此车从配送中心出发经客户点 7，进入编号为 10 的充电站，然后经客户点 1、客户点 5 返回配送中心；第 3 辆电动汽车的行驶路线为 0-8-4-0，代表此车从配送中心出发经客户点 8、客户点 4 返回配送中心。

5.2.2 种群初始化

首先将所有的客户点、充电站代码随机排成一列, q_i' 代表染色体中第 i 个客户点的货物需求量。如果 $\sum_{i=1}^a q_i' \leq Q$ 且 $\sum_{i=1}^{a+1} q_i' > Q$, 则在染色体第 a 位后面插入 0; 然后从插入 0 后开始重复计算直至插入 $n-1$ 个 0, 再将染色体首位及最后一位分别插入一个 0, 最终形成一条初始染色体, 反复上述过程产生 N 条个体构成初始种群。

5.2.3 约束处理与适应度函数

常见的约束条件的处理方法有三种。方法一是将问题的约束在染色体中表现出来的直接处理约束的方法。该方法的适用领域有限, 设计专门的染色体和遗传算子较为困难。方法二是在编码的时候不考虑约束, 而是在遗传算法的计算过程中对得到的染色体对应的解是否可行进行检测。此方法只适用于约束简单、可行解易于得到的优化问题。本文采用第三种方法——惩罚函数的方法处理约束。根据本文研究的问题, 需要将电动汽车续驶里程和额定载重量的限制以惩罚函数的形式进行处理, 得到的目标函数为:

$$\min z = C \sum_{k \in K} \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V', j \neq i} x_{ijk} d_{ij} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} pu_i(t_i) + M_1 \max(\sum_{i \in N} q_i' - Q, 0) + M_2 \max(-p_{vk}^1, 0)$$

由于两项约束都必须满足, 因此 M_1 、 M_2 取很大的正数可以使得不符合约束条件的染色体的目标函数值极大。

适应度函数要求越大越好, 因此我们取上述目标函数的倒数为适应度函数, 即适应度函数为: $fit(i) = 1/z$ 。

5.2.4 遗传操作

(1) 选择复制

本文采用轮盘赌选择、保留父代最优染色体替换子代最差染色体的方式。具体的步骤如下:

Step1: 计算当前种群中各个染色体的适应度 $fit(i)$;

Step2: 计算种群中所有染色体的适应度之和 $sumfit = \sum_{i \in N} fit(i)$, $i = 1, 2, \dots, n$;

Step3: 计算当前种群中各个染色体的选择概率 $p(i) = fit(i) / sumf$, $i = 1, 2, \dots, n$;

Step4: 计算当前种群中各条染色体的累计概率 $ps(i) = \sum_{i \in N} p(i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

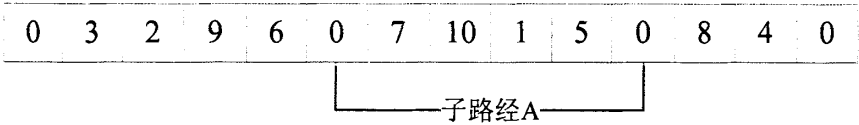
随机产生一个在 $[0,1]$ 区域内的实数 r ，如果 $ps(i) > r$ 就选择第一条染色体，否则选择使得 $ps(i-1) < r < ps(i)$ 成立的第 i 条染色体。

(2) 交叉

自然数编码进行交叉的方法有很多，比如顺序交叉、循环交叉等。这些交叉方法适用于 TSP 问题，不能很好的适应多辆配送车辆，多条子路经的车辆路径优化问题。为了改善算法进化后期的寻优能力，本文采用新的改进交叉算子，最大程度的保留父代的优秀子路经信息。具体操作如下：

Step1: 分别在两个父代染色体上随机选择一段子路经，例如：

父代染色体 1:

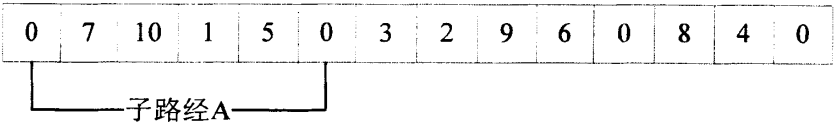


父代染色体 2:



Step2: 被选择的子路段前置，

父代染色体 1:



父代染色体 2:



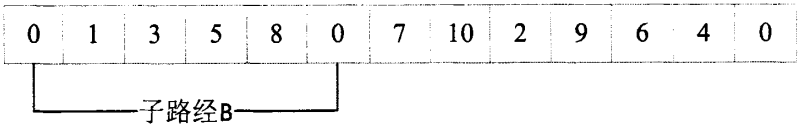
Step3: 将父代染色体 1 的子路经 A 作为子代染色体 1 的一部分，同时将父代染色体 2 中子路经 A 没有的编码按照父代染色体 2 中的顺序添加到子路经 A 的后

面，在染色体的末尾添加编码 0；

子代染色体 1：



同理得到子代染色体 2：



Step4: 针对子代染色体 1，在子路经 A 后面的 7 个位置中的一个的位置添加 1 个编码 0，共有 7 种情况，分别计算 7 中情况的适应度，把适应度值最大的作为子代染色体 1；同理得到子代染色体 2。

(3) 变异

选择 3-交换变异算子对染色体进行变异，即在父代染色体中随机选择三个位置进行交换，得到 5 个子代染色体，对所有情况计算适应度，适应度最高的进入子代种群。

5.2.5 终止条件

遗传算法是随机搜索算法，为了结束遗传算法的进化循环，必须预先设定终止规则。常见的终止规则有 3 种：一是达到预先设定的目标；二是种群中的最优个体在连续若干代中没有获得改进；三是达到预先设定的进化代数。预先设定进化代数能够有效的控制算法的求解精度和运行时间，因此本文采用事先确定的进化代数作为终止规则。

5.3 算例分析

5.3.1 算例介绍

某物流配送中心为 25 个客户点提供配送服务，每个客户的货物需求量、时间窗不同。配送中心拥有 3 辆同一类型的电动汽车，其续驶里程 dis 为 $160km$ ，额定载重量 Q 为 $5t$ 。假设电动汽车进入充电站就选择充满电，充电时间为 $0.4h$ ；假设电动汽车从配送中心出发的时间为 $0h$ ，且在配送过程中的行驶速度恒定为

40 km/h。电动汽车的行驶成本为 10 元/km，惩罚成本系数 epu 为 20 元/h， lpu 为 30 元/h。算例的其他数据在表 5.1 中列出。表 5.1 中的第一列数据代表配送中心、客户点及充电站的编号，0 代表配送中心，1,2,3,...,25 代表客户点，26,27 代表充电站；第二列和第三列分别表示配送中心、客户点、充电站的 X 坐标和 Y 坐标，本文假定客户之间的距离为欧氏距离；表中第四列表示客户点的货物需求量；第五、六列分别表示客户要求的服务时间窗；第七列表示客户点需要服务的时间。如何安排车辆才能使得总费用最小。

表 5.1 客户需求信息
Tab. 5.1 Table of customer demand information

序号	X 坐标	Y 坐标	需求量 (t)	最早接受服务 时间 (h)	最晚接受服务 时间 (h)	服务时间 (h)
0	56	56	0	0	100	0
1	66	78	0.2	0	1	0.2
2	56	27	0.3	1	2	0.3
3	88	72	0.3	2	4	0.3
4	88	32	0.3	7	8	0.3
5	24	48	0.3	5	6	0.3
6	40	48	0.5	3	5	0.5
7	32	80	0.8	0	2	0.8
8	16	69	0.4	7	8	0.4
9	88	96	0.5	1	3	0.5
10	48	96	0.7	4	5	0.7
11	32	104	0.7	1	2	0.7
12	80	56	0.6	3	4	0.6
13	48	40	0.2	0	1	0.2
14	24	16	0.2	2	4	0.2
15	48	8	0.4	2	3	0.4
16	16	32	0.1	7	8	0.1
17	8	48	0.1	6	8	0.1
18	32	64	0.2	7	9	0.2
19	24	96	0.5	1	3	0.5
20	72	104	0.2	1	3	0.2
21	72	32	0.7	8	10	0.7

续表 5.1

22	72	16	0.2	6	10	0.2
23	88	8	0.7	7	8	0.7
24	104	56	0.1	6	7	0.1
25	104	32	0.5	4	6	0.5
26	83	45	0.4	0	100	0.4
27	32	40	0.4	0	100	0.4

图 5.2 表示的是算例中配送中心、客户点及充电站的位置分布，其中圆圈“O”表示配送中心，圆点表示客户点，三角“Δ”代表充电站。

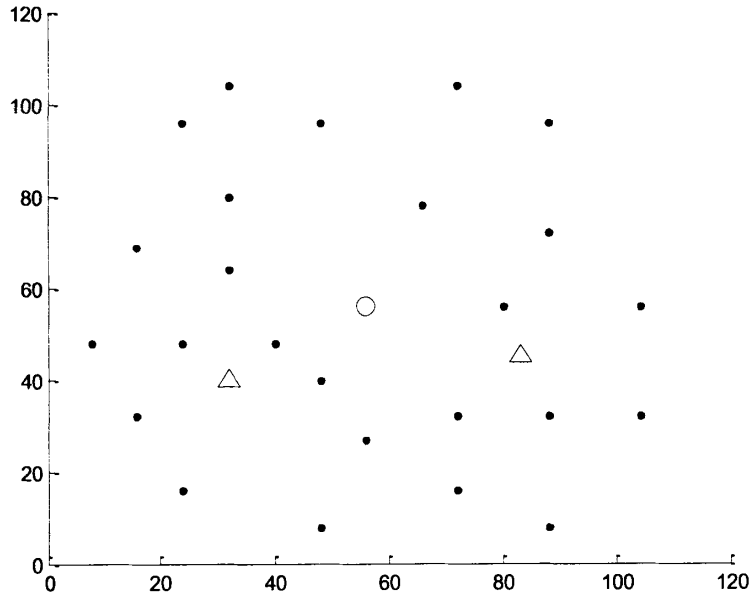


图 5.2 配送中心、客户点及充电站的位置分布

Fig. 5.2 The location of the distribution center, the customers and charging stations

5.3.2 算例结果及其分析

本文采用 Matlab2014a 编制上述遗传算法程序对本文算例进行求解。相应的参数设置为：种群大小 $NIND$ 为 100，最大迭代次数 $\max gen$ 为 500，交叉概率 P_c 为 0.9，变异概率 P_m 为 0.1。

运行结果显示，3 辆车都参与配送任务，3 辆车的配送路线及其费用见表 5.2。

表 5.2 运输路线及配送成本
Tab. 5.2 Routing and cost of distribution

车辆	路径	配送成本（元）
1	0→1→20→9→3→12→26→25→24→4→23→22→21→0	2896.8
2	0→13→2→15→14→6→27→5→16→17→8→18→0	2401.3
3	0→7→19→11→10→0	1244.6
合计		6542.7

表 5.2 对应的配送路径如图 5.3 所示。

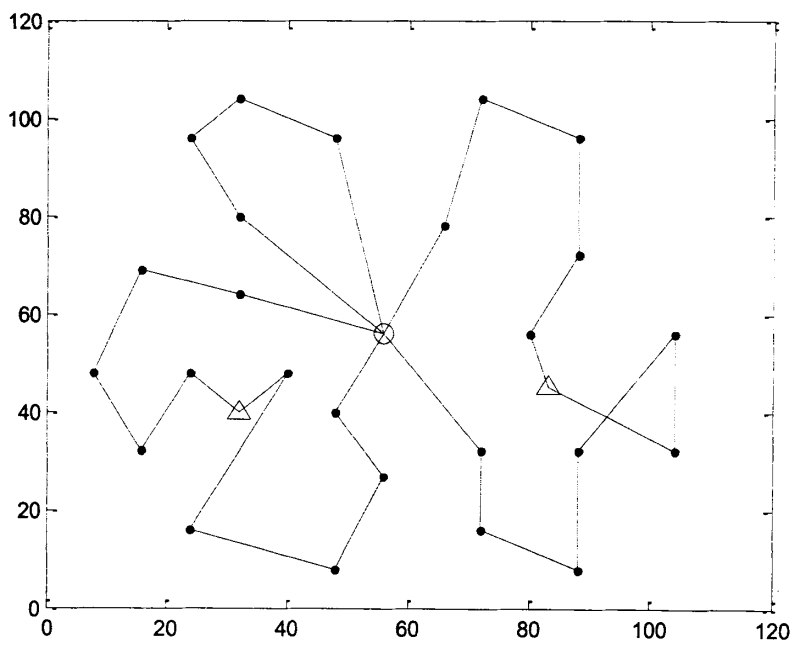


图 5.3 配送路径
Fig. 5.3 Routing of distribution

结论与展望

2013 年 2 月,北京 4 家单位投入 70 辆纯电动物流车,正式拉开了我国纯电动汽车在城市物流领域规模化应用的序幕。同年 7 月,全国首台“换电式”纯电动的城市物流配送车辆在郑州正式上路。尽管电动汽车技术日趋成熟,但是电动汽车在推广和运营过程中会遇到续驶里程短、服务设施少、充电时间长等问题。解决好这些问题对电动汽车的推广和使用具有重大的意义,但是目前我国针对电动汽车运营过程中遇到的问题研究很少。正式基于上述原因,本文对基于电动汽车的车辆路径优化问题进行了深入研究,试图解决如何在现有的条件下,通过科学合理的路线规划使得物流配送中心电动汽车的运营达到最佳的效果。

本文的研究成果主要有以下几个方面:

(1) 本文首先总结分析了国内外的研究现状,然后对物流配送系统和电动汽车用于物流配送的特点进行了深入的分析,为模型的构建打下坚实的基础。

(2) 本文研究这样一个问题:由于国家政策利好和自身条件,某物流配送中心采用电动汽车为各个客户点进行配送服务,每个客户点都有配送时间的限制。如果配送中心不能在时间窗内到达客户点将接受一定的惩罚。电动汽车有一定的容量限制。除此之外,由于电动汽车技术的限制,电动汽车的续驶里程有限,配送过程中可能需要进入充电站进行充电,其中电动汽车的充电时间比传统汽车加油时间长很多。物流配送中心为了使惩罚成本和车辆行驶费用构成的总成本最小,需要对配送中心的车辆行驶路径进行科学合理的规划。本文对所研究的问题进行了深入分析,在一定基本假设的前提下,构建了问题所对应的数学模型。

(3) 根据本文所研究的问题的特点,设计了求解该问题的改进的遗传算法。文章最后通过算例求解分析验证了算法的有效性。

由于科研水平所限,本文在问题的研究上还存在一定的局限性,因此对“基于电动汽车的 VRPTW”问题的研究做出如下展望:

(1) 本文构建的模型是基于一定的假设的基础上建立的,比如单一配送中心、单一车型等,这与实际情况存在一定的差别。多配送中心、多车型的基于电动汽车的 VRPTW 问题将是今后探讨和研究的一个重要方向。

(2) 本文研究的是客户点需求量和时间窗固定的静态车辆路径优化问题,客

户需求量和时间窗变化的动态车辆路径优化问题将更加符合未来配送的实际情况。

(3) 本文在研究过程中假定电动汽车在配送过程中是匀速行驶的，未考虑实际配送过程中的交通拥堵等情况。

(4) 本文研究的是基于电动汽车的 VRPTW 问题，配送过程中可以在现有的充电站进行充电。根据实际需要，企业可以在配送区域内自建充电站，因此基于电动汽车的带时间窗的 LRP 值得进一步研究。

参考文献

- [1] <http://www.cae-shc.gov.cn/old/detail4.asp?contentid=253>.
- [2] 朱华.我国电动汽车产业发展模式及湖北省电动汽车产业发展对策研究[D].武汉:武汉理工大学汽车学院, 2004.
- [3] 蒋惠琴,欧万彬,鲍健强,等.电动汽车:引领城市低碳交通的未来[J].生态城市建设与生态危机管理——中国未来研究会 2010 年学术年会论文集, 2010.
- [4] http://baike.baidu.com/link?url=EiPkkkWiVOR-J1qLcv9pmaNRSCq6hl0tD000eFAkMh8UYeSS6bxGRAIaZbdeES_kseiMDK5jzUWzliEwCBq_ia.
- [5] <http://www.bjcankao.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=50&id=14568>.
- [6] <http://www.d1ev.com/20437.html>.
- [7] Dantzig G B, Ramser J H. The truck dispatching problem[J]. Management science, 1959, 6 (1): 80-91.
- [8] Balinski M L, Quandt R E. On an integer program for a delivery problem[J]. Operations Research, 1964, 12 (2):300-304.
- [9] Clarke G, Wright J W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points[J]. Operations research, 1964, 12 (4):568-581.
- [10] Rao M R, Zionts S. Allocation of transportation units to alternative trips—A column generation scheme with out-of-kilter subproblems[J]. Operations Research, 1968, 16 (1):52-63.
- [11] Eilon S, Watson-Gandy C D T, Christofides N. Distribution management[M]. London: Griffin, 1971:98:103.
- [12] Gillett B E, Miller L R. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem[J]. Operations research, 1974, 22 (2):340-349.
- [13] Christofides N, Mingozzi A, Toth P. Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations[J]. Mathematical programming, 1981, 20 (1):255-282.
- [14] Fisher M L, Jaikumar R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing[J]. Networks, 1981, 11 (2):109-124.
- [15] Laporte G, Nobert Y, Desrochers M. Optimal routing under capacity and distance restrictions[J]. Operations research, 1985, 33 (5):1050-1073.
- [16] Laporte G, Mercure H, Nobert Y. An exact algorithm for the asymmetrical capacitated vehicle routing problem[J]. Networks, 1986, 16 (1):33-46.
- [17] Laporte G, Nobert Y. Exact algorithms for the vehicle routing problem[J]. North-Holland Mathematics Studies, 1987, 132(1):147-184.
- [18] Glover F. Tabu search-part I[J]. ORSA Journal on computing, 1989, 1 (3):190-206.
- [19] Willard J A G. Vehicle routing using r-optimal tabu search[J]. Master's thesis, The ManagementSchool, ImperialCollege, London, 1989, 3(2):23-25.

- [20] Kohl N, Madsen O B G. An optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows based on lagrangian relaxation[J]. *Operations Research*, 1997, 45 (3):395-406.
- [21] Taillard É, Badeau P, Gendreau M, et al. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows[J]. *Transportation science*, 1997, 31 (2):170-186.
- [22] Duhamel C, Potvin J Y, Rousseau J M. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with backhauls and time windows[J]. *Transportation science*, 1997, 31 (1):49-59.
- [23] Renaud J, Laporte G, Boctor F F. A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 1996, 23 (3):229-235.
- [24] Barbarosoglu G, Ozgur D. A tabu search algorithm for the vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 1999, 26 (3):255-270.
- [25] Badeau P, Guertin F, Gendreau M, et al. A parallel tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1997, 5 (2): 109-122.
- [26] Holland J H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*[M]. U Michigan Press, 1975:34-38.
- [27] Lawrence S, Mohammad A. Parametric experimentation with a genetic algorithmic configuration for solving the vehicle routing problem[C]//*Proceedings Annual Meeting of the Decision Sciences Institute*, Decis Sci Inst. 1996:488-490.
- [28] Potvin J Y, Dubé D, Robillard C. A hybrid approach to vehicle routing using neural networks and genetic algorithms[J]. *Applied Intelligence*, 1996, 6 (3):241-252.
- [29] Thangiah S R. An adaptive clustering method using a geometric shape for vehicle routing problems with time windows[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1995:536-545.
- [30] Blanton Jr J L, Wainwright R L. Multiple vehicle routing with time and capacity constraints using genetic algorithms[C]//*Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993:452-459.
- [31] Cheng R, Gen M. Fuzzy vehicle routing and scheduling problem using genetic algorithms[J]. *Genetic Algorithms and Soft Computing*, 1996:683-709.
- [32] Gen M, Cheng R. *Genetic algorithms and engineering optimization*[M]. John Wiley & Sons, 2000:47-52.
- [33] 李军. 有时间窗的车辆路线安排问题的启发式算法[J]. *系统工程*, 1996,14(5):45-50.
- [34] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 多重运输调度问题的模拟退火算法[J]. *系统工程理论与实践*, 1998, 10(3):18-19.
- [35] 蔡延光, 钱积新. 多重运输调度问题基于双表的并行表搜索算法[J]. *系统工程理论与实践*, 1998,18(11):20-26.
- [36] 张涛, 王梦光. 遗传算法和 3—opt 结合求解带有力约束的 VRP[J]. *东北大学学报: 自然科学*

版,1999, 20(3):254-256.

[37] 李军,谢秉磊.非满载车辆调度问题的遗传算法[J].系统工程理论方法应用, 2000,9(3): 235-239.

[38] 刘浩,袁健,卢厚清.两种类型车辆随机需求路由问题[J].南京航空航天大学学报,2001,33(2): 155-158.

[39] 郎茂祥. 用单亲遗传算法求解配送车辆调度问题的研究[J]. 交通与计算机,2006,24(1): 119-122.

[40] 刘云忠,宣慧玉.蚂蚁算法在车辆路径问题中的应用研究[J].信息与控制,2004,33(2): 249-252.

[41] 张建勇,李军.模糊车辆路径问题的一种混合遗传算法[J].管理工程学报, 2005,19(2):23-26.

[42] 崔雪丽,朱振刚.VRP 的混合改进型蚂蚁算法求解[J].苏州科技学院学报:工程技术版,2009, 22(4): 62-66.

[43] 赵若彤.一种物流配送车辆路径智能优化算法研究[J].计算机与数字工程,2013,41(4): 529-531.

[44] 田景文,孔垂超,高美娟.一种车辆路径规划的改进混合算法[J].Computer Engineering and Applications,2014, 50 (14):25-27.

[45] 葛显龙,辜羽洁,谭柏川.基于第三方带软时间窗约束的车辆路径问题研究[J].计算机应用研究,2015, 32 (3): 689-693.

[46] 王华东,李巍.粒子群算法的物流配送路径优化研究[J].计算机仿真,2012, 29(5):243-246.

[47] 张维泽,林剑波,吴洪森,等.基于改进蚁群算法的物流配送路径优化[J].浙江大学学报:工学版,2008,42(4):574-578.

[48] 张海刚,顾幸生,吴燕翔.改进的粒子群算法及其在带软时间窗车辆调度问题中的应用[J].华东理工大学学报:社会科学版,2009 (5):774-778.

[49] Artmeier A, Haselmayr J, Leucker M, et al. The optimal routing problem in the context of battery-powered electric vehicles[C]//Workshop: CROCS at CPAIOR-10, Second International Workshop on Constraint Reasoning and Optimization for Computational Sustainability, Bologna, Italy.2010:98-107.

[50] Sachenbacher M, Leucker M, Artmeier A, et al. Efficient Energy-Optimal Routing for Electric Vehicles[C]//AAAI.2011:118-126.

[51] Eisner J, Funke S, Storandt S. Optimal Route Planning for Electric Vehicles in Large Networks[C]//AAAI.2011:163-171.

[52] Erdoğan S, Miller-Hooks E. A green vehicle routing problem[J].Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48 (1):100-114.

[53] 刘华旭.基于电动汽车技术特征的共同配送调度优化研究[D].北京交通大学,2012.

[54] 冯鹏翔.基于电动汽车的物流配送系统 LRP 问题[D].华中科技大学,2012.

- [55] 盛丽俊.带有时间窗的车辆路径问题的优化研究[D].上海海事大学,2006.
- [56] 范李平.物流配送及其车辆优化调度研究[D].上海海事大学,2004.
- [57] 李佳书,范厚明,张晓楠,等.带有车辆总成本和时间窗约束的工业区废弃物回收车辆调度优化[J].物流技术,2014,33(2):71-74.
- [58] 李维健.B2C 电子商务模式下物流配送路径优化问题研究 [D].北京:北京交通大学, 2007.
- [59] 石兆.物流配送选址—运输路径优化问题研究[D].中南大学,2014.
- [60] 赵辰.基于遗传算法的车辆路径优化问题研究[D].天津大学, 2012.
- [61] 刘芳华,赵建民,朱信忠.基于改进遗传算法的物流配送路径优化的研究[J].计算机技术与发展,2009,19(7):83-86.
- [62] 易荣贵,罗大庸.基于遗传算法的物流配送路径优化问题研究[J].计算机技术与发展,2008,18(6):13-15.

附录 遗传算法程序

```
%主程序
clear all;
clc;
k=3;m=25;ch=2; %3 辆车, 25 个客户点,2 个充电站
q=[0,0.2 0.3 0.3 0.3 0.3 0.5 0.8 0.4 0.5 0.7 0.7 0.6 0.2 0.2 0.4 0.1 0.1 0.2 0.5 0.2 0.7 0.2
0.7 0.1 0.5,0,0]; %各客户点需求量, 其中配送中心/充电站需求量为 0,其中 q(1)
为配送中心, 以此类推
X=[56 56
66 78
56 27
88 72
88 32
24 48
40 48
32 80
16 69
88 96
48 96
32 104
80 56
48 40
24 16
48 8
16 32
8 48
32 64
24 96
72 104
72 32
72 16
```

88 8

104 56

104 32

83 45

32 40]; %配送中心、充电站和客户点的坐标位置，配送中心在第 1 位，充电站在最后

ET=[0 1 2 7 5 3 0 7 1 4 1 3 0 2 2 7 6 7 1 1 8 6 7 6 4 0 0]; %客户要求到货的时间始点，充电站范围是[0,100]

LT=[1 2 4 8 6 5 2 8 3 5 2 4 1 4 3 8 8 9 3 3 10 10 8 7 6 100 100]; %客户要求到货的时间终点

TT=[0.2 0.3 0.3 0.3 0.3 0.5 0.8 0.4 0.5 0.7 0.7 0.6 0.2 0.2 0.4 0.1 0.1 0.2 0.5 0.2 0.7 0.2 0.7 0.1 0.5 0.4 0.4]; %客户点的停留时间,充电站的停留时间为 0.4

Ck=10; %第 k 辆车运行单位距离的费用

C1=20; %车辆在任务点处等待单位时间的机会成本

C2=30; %车辆在要求时间之后到达单位时间所处的惩罚值

Dis=160; %续驶里程

Qk=5; %车辆额定载重量

speed=40; %电动汽车的行驶速度

NIND=100; %种群大小

maxgen=100; %遗传代数

pc=0.9; %交叉概率

pm=0.05; %变异概率

s=chushihua(NIND,m,ch); %初始化种群

%优化

gen=0;

figure;

hold on;box on;

xlim([0,maxgen]);

title('优化过程');

xlabel('代数');

```

ylabel('最优值');
D=Distance(X);
l=ostation(m,k,NIND,s,ch);
[fit,ff,p]=fitness(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X);    %计算
适应度和模型目标函数值
preff=min(ff);
spperfect=zeros(maxgen,m+k+ch+1);
while gen<maxgen
    %计算适应度和模型目标函数值
    [fit,ff,p]=fitness(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X);
    %绘制模型目标函数优化过程图
    line([gen-1,gen],[preff,min(ff)]);
    preff=min(ff);
    %选择操作
    seln=sel(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,X,k,ch,speed,TT);
    %交叉操作
    scro=cro(s,m,pc,NIND,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,Qk,q,X,k,ch,speed,TT);
    %变异操作
    scro=mut(s,m,k,pc,NIND,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,Qk,q,X,ch,speed,TT,pm);
    %重插入子代
    s=reins(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X,pm,pc);
    %记录当前代最好适应度
    [fitmax,nmax]=max(fit);
    %更新迭代次数
    gen=gen+1;
    spperfect(gen,:)=s(nmax,:);
end
%输出最优解的路线和最优目标函数值
disp('最优解: ')
%pp=outputpath(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X);
disp(s(nmax,:))    %最优路线

```

```
[fit,ff,p]=fitness(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X);
disp(['目标函数值: ',num2str(max(ff))])
%选择
function seln=sel(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,X,k,ch,speed,TT)
D=Distance(X);
l=ostation(m,k,NIND,s,ch);
%从种群中选择两个个体
seln=zeros(2,1);
[fit,ff,p]=fitness(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X);
for i=1:2
    r=rand;
    prand=p-r;
    j=1;
    while prand(j)<0
        j=j+1;
    end
    seln(i)=j;    %选中个体的序号
end
end
%交叉
function scro=cro(s,m,pc,NIND,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,Qk,q,X,k,ch,speed,TT)
scro=zeros(NIND,m+k+ch+1);
l=ostation(m,k,NIND,s,ch);
for i=1:2:NIND-1
    seln=sel(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,X,k,ch,speed,TT);
    %s(seln(1),:)
    scro(i,:)=s(seln(1),:);
    scro(i+1,:)=s(seln(2),:);
    rr=rand;
    if pc>rr
        c1=randsrc(1,1,l(seln(1),:));
        c2=randsrc(1,1,l(seln(1),:));
```

```

c3=randsrc(1,1,l(seln(2),:));
c4=randsrc(1,1,l(seln(2),:));
c12min=min(c1,c2);
c12max=max(c1,c2);
c34min=min(c3,c4);
c34max=max(c3,c4);
if c12min~=c12max
    scroi1=scro(i+1,:);
    for j=c12min:c12max
        for ij=1:m+k+ch+1
            if scroi1(ij)==scro(i,j)
                scroi1(ij)=0;
            end
        end
    end
    os2=find(scroi1);
    scro1=[scro(i,c12min:c12max),scroi1(os2),0];
    if length(scro1)>m+k+ch+1
        scro1(end)=[];
        scro(i,:)=scro1;
    elseif length(scro1)<m+k+ch+1
        station1=randsrc(1,1,min(c12max,length(scro1)):max(c12max,length(scro1)));
        scro(i,:)=[scro1(1:station1-1),0,scro1(station1:end)];
    end
end
if c34min~=c34max
    scroi=s(seln(1),:);
    for j=c34min:c34max
        for ij=1:m+k+ch+1
            if scroi(ij)==scro(i+1,j)
                scroi(ij)=0;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
    os1=find(scroi);
    scro2=[scro(i+1,c34min:c34max),scroi(os1),0];
length(scro2)
    if length(scro2)>m+ch+k+1
        scro2(end)=[];
        scro(i+1,:)=scro2;
    elseif length(scro2)<m+k+ch+1
        station2=randsrc(1,1,min(c34max,length(scro2)):max(c34max,length(scro2)));
        scro(i+1,:)=[scro2(1:station2-1),0,scro2(station2:end)];
    end
end
end
end
%变异操作
function scro=mut(s,m,k,pc,NIND,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,Qk,q,X,ch,speed,TT,pm)
D=Distance(X);
l=ostation(m,k,NIND,s,ch);
scro=cro(s,m,pc,NIND,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,Qk,q,X,k,ch,speed,TT);
    % scro(i,:)=s(seln(1),:);
    % scro(i+1,:)=s(seln(2),:);
for i=1:NIND-10
    if pm>rand
        R=randsrc(1,2,1:m+k+ch+1);
        scro(i,R(1:2))=scro(i,R(2:-1:1));
    end
end
end
%保留父代精英个体
function s=reins(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X,pm,pc)
D=Distance(X);
scro=mut(s,m,k,pc,NIND,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,Qk,q,X,ch,speed,TT,pm);

```

```

[fit,ff,p]=fitness(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X);
[tfit,index]=sort(fit);
s_perfect=s(index(end-9:end),:); %父代前 10 精英个体
s=[s_perfect;scro];
end
%适应度函数
function [fit,ff,p]=fitness(NIND,m,Ck,Dis,C1,C2,LT,ET,s,Qk,q,k,speed,ch,TT,X)
f=zeros(NIND,1);M=1000000;p=zeros(NIND,1);%M 很大的数
dd=zeros(NIND,3);ddd=zeros(NIND,1);qq=zeros(NIND,3);qqq=zeros(NIND,1);
ps=zeros(NIND,1);f=zeros(NIND,1);ff=zeros(NIND,1);fit=zeros(NIND,1);
%pun=punish(C1,C2,LT,ET,m);
l=ostation(m,k,NIND,s,ch);
pun=punish(C1,C2,LT,ET,m,NIND,k,s,speed,ch,TT);
d=sumd(s,m,k,NIND,ch,X);
Q=sumq(NIND,q,s,k,m,ch);
for i=1:NIND
    for j=1:9
        if Dis>d(i,j) %Dis 续驶里程
            dd(i,j)=0;
        else
            dd(i,j)=1;
        end
    end
end
end
for i=1:NIND
    for j=1:3
        ddd(i)=ddd(i)+dd(i,j);
    end
end
end
for i=1:NIND
    for j=1:3
        if Qk>Q(i,j)

```

```

        qq(i,j)=0;
    else
        qq(i,j)=1;
    end
end
end
for i=1:NIND
    for j=1:3
        qq(i)=qq(i)+qq(i,j);
    end
end
for i=1:NIND
    f(i)=Ck*(d(i,1)+d(i,2)+d(i,3)+d(i,4)+d(i,5)+d(i,6)+d(i,7)+d(i,8)+d(i,9))+pun(i)+M*ddd(
i)+M*qq(i);
    fit(i)=1./f(i);
    ff(i)=Ck*(d(i,1)+d(i,2)+d(i,3)+d(i,4)+d(i,5)+d(i,6)+d(i,7)+d(i,8)+d(i,9))+pun(i);
end
%计算选择概率
fitsum=0;
for i=1:NIND
    fitsum=fitsum+fit(i);
end
for i=1:NIND
    ps(i)=fit(i)/fitsum;
end
%计算累计概率
p(1)=ps(1);
for i=2:NIND
    p(i)=p(i-1)+ps(i);
end
%惩罚函数
function pun=punish(C1,C2,LT,ET,m,NIND,k,s,speed,ch,TT)

```

```

l=ostation(m,k,NIND,s,ch);
cc1=zeros(NIND,m);ccc1=zeros(NIND,1);
cc2=zeros(NIND,m);ccc2=zeros(NIND,1);
pun=zeros(NIND,1);
T=time(NIND,m,k,s,ET,speed,TT,ch);
for i=1:NIND
    for j=1:m
        cc1(i,j)=max(ET(j)-T(i,j),0);
        cc2(i,j)=max(T(i,j)-LT(j),0);
    end
end
for i=1:NIND
    for j=1:m
        ccc1(i)=ccc1(i)+cc1(i,j); %车辆早于时间窗始点到达的总惩罚时间
        ccc2(i)=ccc2(i)+cc2(i,j); %车辆晚于时间窗终点到达的总惩罚时间
    end
end
for i=1:NIND
    pun(i)=C1*ccc1(i)+C2*ccc2(i);
end
function l=ostation(m,k,NIND,s,ch)
%确定 0 的位置，把他赋值给 ls
l=zeros(NIND,4);
ll=zeros(NIND,m+k+ch+1);
for i=1:NIND
    for j=1:m+k+ch+1
        if s(i,j)==0
            ll(i,j)=j;
        end
    end
end
for i=1:NIND

```

```
    lll=find(ll(i,:));  
    l(i,:)=lll;  
end  
%计算两两城市之间的欧式距离  
function D=Distance(X)  
    row=size(X,1);  
    D=zeros(row,row);  
    for i=1:row  
        for j=i+1:row  
            D(i,j)=((X(i,1)-X(j,1))^2+(X(i,2)-X(j,2))^2)^0.5;  
            D(j,i)=D(i,j);  
        end  
    end  
end
```

致 谢

本文是在导师范厚明教授的悉心指导与敦促下完成的，得益于导师的耐心指导使我对基于电动汽车的车辆路径优化问题有了更深刻的认识，并确定了后续的研究方向。首先感谢范老师两年来在科研学习和生活上给予我的指导和帮助。在生活中导师给与了我很多帮助，在科研方面，在导师的帮助下使学生们都感受到了科研带来的团队协作精神。此外，范老师睿智宽容的治学态度和渊博的知识也让我获益匪浅，这些都将会成为我以后生活和工作中巨大的财富。在此，谨向范教授致以崇高的敬意和衷心的感谢！学生今后工作也定当谨记老师教诲，不忘师恩！

在本文的研究与写作过程中，我参考阅读了大量国内外文献资料。在此，谨向文中提到的每一位作者表示衷心的感谢，他们的研究成果给了我许多启迪！感谢实验室所有的师兄师姐和所有师弟师妹们，是你们的不断帮助和支持给了我很大鼓舞，让我能突破论文的重重难关，获得成功，感谢他们给予了我无私的帮助。深深地感谢我的父母，感谢他们不求回报的养育之恩，感谢他们在我求学道路上的一贯理解与支持，以及对我一如既往的殷切期望和无私奉献！对在百忙之中抽空参加我论文评阅和答辩的各位专家表示衷心的感谢！值此论文完成之际，再次向所有关心、支持和帮助过我的老师、同学、亲人和朋友们致以最诚挚的谢意和最美好的祝愿！

作者简介

姓 名：高升

性 别：男

出生年月：1991.03

民 族：汉族

籍 贯：山东省德州市乐陵市

研究方向：物流工程

简历：

学习经历

2005.09~2008.06 山东省乐陵市第一中学

2008.09~2012.06 山东交通学院

2013.09~2015.06 大连海事大学

工作经历