

单位代码： 10293 密 级： _____

南京邮电大学

专业学位硕士学位论文



论文题目： 基于烟花算法的混合车辆调度系统

学 号 1220096708

姓 名 邵海东

导 师 宫婧

专业学位类别 电子信息硕士

类 型 全日制

专业（领域） 计算机技术

论文提交日期 2023 年 6 月 3 日

Hybrid vehicle scheduling system based on fireworks algorithm



Thesis Submitted to Nanjing University of Posts and
Telecommunications for the Degree of
Master of Electronic Information



By

Shao haidong

Supervisor: Prof.Gong jing

Jun 2023

摘要

现阶段，随着技术发展和政策倾斜，以电动汽车为代表的新能源车日渐普及。越来越多的物流企业在车队配置上开始引进电动车，与燃油车协作完成运输任务。由于两者的差异较大，传统的车辆调度方法并不能适应两者混合的场景。而电车调度的关键之处在于电量消耗估算，现有的电动汽车调度问题的研究大多根据传统汽车的能耗模型，计算出固定的电量消耗速率。但实际使用中，电动汽车的能耗速度是非线性的。因此，以固定的电量消耗速率计算混合车辆调度问题，可能造成电动汽车无法完成既定计划。

基于此，本文着重考虑了混合车辆调度模型中，电动汽车电量消耗速度的计算，并考虑电车的电量补充情况。同时，优化了烟花算法，提升其求解质量，通过仿真实验测试效果，主要工作如下：

（1）研究混合车辆的调度问题，重点调研了电动汽车使用中，电量消耗的相关影响因素。将温度，空调使用因素纳入到电量计算中，并结合传统动力学公式改进了电量消耗模型，提高了电量估计的准确性。以总成本（包括固定、行驶、充电等成本）最小设置目标函数，电量消耗模型作为约束条件，与其他约束共同作用与模型。最终，构建出了符合实际的混合车辆调度模型。

（2）改进了烟花算法。针对烟花算法的容易陷入局部最优的问题，优化了变异策略和选择策略。同时，优化初始种群，提高初始解的质量，以加快算法收敛速度。对比不同算法的求解结果，验证了改进烟花算法的效果。

（3）开发了融合上述模型的基于 web 端的调度系统。企业可以在系统中，查看和维护车辆、司机、行车费用等相关信息数据。并根据客户的订单信息，计算配送任务。同时，路径规划结果以图表方式进行可视化展示，使得相关信息一目了然，增加系统的用户友好性。

如何以经济、环保、科学的方式使用混合车辆进行城市物流服务，对企业而言非常重要。本文以实际情况为出发点，完善了电动汽车的能耗模型，建立出合理的混合车辆调度模型。并改进烟花算法，提升算法的求解效率和精度，保证了最终计算出的调度计划的合理性和优越性。同时，开发的物流系统具有较强的实际应用性，可以为物流企业的决策运营提供一定的帮助，节省相关的人力物力。因此，本文的研究工作具备一定的实际意义。

关键词：车辆调度问题，混合车辆，电动汽车，电量消耗，烟花算法

Abstract

At present, with the development of technology and policy inclination, new energy vehicles represented by electric vehicles are becoming increasingly popular. More and more logistics companies are introducing electric vehicles in their fleet configurations and collaborating with fuel vehicles to complete transportation tasks. Due to the significant differences between the two, traditional vehicle scheduling methods cannot adapt to mixed scenarios. The key to tram scheduling lies in the estimation of electricity consumption. Most of the existing research on electric vehicle scheduling problems is based on traditional vehicle energy consumption models, calculating a fixed rate of electricity consumption. But in practical use, the energy consumption speed of electric vehicles is non-linear. Therefore, calculating the hybrid vehicle scheduling problem at a fixed rate of electricity consumption may result in electric vehicles being unable to complete the established plan.

Based on this, this article focuses on the calculation of electric vehicle power consumption speed in the hybrid vehicle scheduling model, and considers the power replenishment of electric vehicles. At the same time, the fireworks algorithm has been optimized to improve its solution quality. The results have been tested through simulation experiments, and the main tasks are as follows:

(1) Researching the scheduling problem of hybrid vehicles, with a focus on investigating the relevant influencing factors of electricity consumption in the use of electric vehicles. Incorporating temperature and air conditioning usage factors into the calculation of electricity consumption, and combining traditional dynamic formulas to improve the electricity consumption model, the accuracy of electricity estimation has been improved. Set the objective function with the minimum total cost (including fixed, driving, charging, and other costs), and use the electricity consumption model as a constraint condition to work together with other constraints to establish the model. Finally, a practical hybrid vehicle scheduling model was constructed.

(2) Improved fireworks algorithm. In response to the problem of easily falling into local optima in the fireworks algorithm, the mutation strategy and selection strategy have been optimized. At the same time, optimize the initial population and improve the quality of the initial solution to accelerate the convergence speed of the algorithm. The effectiveness of the improved fireworks algorithm was verified by comparing the solution results of different algorithms.

(3) Developed a web-based scheduling system that integrates the above models. Enterprises can view and maintain relevant information data such as vehicles, drivers, and travel expenses in the

system. And calculate the delivery task based on the customer's order information. At the same time, the path planning results are visualized in a graphical format, making the relevant information clear at a glance and increasing the user friendliness of the system.

It is very important for enterprises to use hybrid vehicles for urban logistics services in an economical, environmentally friendly, and scientific manner. This article takes the actual situation as the starting point, improves the energy consumption model of electric vehicles, and establishes a reasonable hybrid vehicle scheduling model. And improve the fireworks algorithm to improve its solving efficiency and accuracy, ensuring the rationality and superiority of the final calculated scheduling plan. At the same time, the developed logistics system has strong practical applicability and can provide certain assistance for the decision-making and operation of logistics enterprises, saving relevant manpower and material resources. Therefore, the research work of this article has certain practical significance.

Key words: vehicle scheduling problem, hybrid vehicle, electric vehicle, power consumption, fireworks algorithm

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 课题来源.....	3
1.3 章节安排.....	3
第二章 相关技术研究	5
2.1 基础知识.....	5
2.1.1 混合车辆调度问题.....	5
2.1.2 烟花算法.....	6
2.2 车辆调度问题主要的求解算法	8
2.3 混合车辆调度问题研究现状	9
2.3.1 车辆调度问题的分类.....	9
2.3.2 混合车辆中电动车辆调度问题研究现状	11
2.3.3 混合车辆调度问题研究现状.....	12
2.4 基于烟花算法的车辆调度问题研究现状	13
2.5 本章小结.....	15
第三章 混合车辆调度系统设计	16
3.1 系统设计分析.....	16
3.1.1 业务流程分析.....	16
3.1.2 需求分析.....	17
3.2 系统模块设计.....	19
3.2.1 总体设计.....	19
3.2.2 功能模块设计.....	20
3.3 数据库设计.....	22
3.4 本章小结.....	24
第四章 考虑电量消耗的混合车辆调度模型	26
4.1 问题分析.....	26
4.2 电动汽车特性和能耗影响分析	28
4.2.1 电动汽车特性分析.....	28
4.2.2 电动汽车能耗影响因素分析.....	29
4.3 电动汽车非线性能耗估计模型	29
4.3.1 基于动力学的能耗模型.....	30
4.3.2 考虑温度空调因素的能耗模型.....	32

4.4 混合车辆调度模型建立.....	34
4.4.1 模型假设.....	34
4.4.2 数学描述及符号定义.....	35
4.4.3 目标函数.....	36
4.4.4 约束条件.....	36
4.5 实验仿真.....	38
4.5.1 仿真数据.....	38
4.5.2 结果与分析.....	38
4.6 本章小结.....	40
第五章 混合车辆调度模型求解算法设计	42
5.1 问题分析.....	42
5.2 算法设计.....	43
5.2.1 算法总体流程.....	43
5.2.2 初始解生成优化.....	45
5.2.3 变异策略优化.....	46
5.2.4 选择策略优化.....	46
5.3 实验仿真.....	47
5.3.1 仿真数据及方案流程.....	47
5.3.2 改进 FWA 的仿真结果与分析	48
5.3.3 不同规模数据集的仿真结果与分析.....	50
5.3.4 不同温度的仿真结果与分析.....	53
5.4 本章小结.....	54
第六章 混合车辆调度系统实现	55
6.1 系统开发环境.....	55
6.2 系统功能模块实现.....	56
6.2.1 登录模块.....	56
6.2.2 订单管理模块.....	57
6.2.3 车辆调度模块.....	58
6.2.4 车队管理模块.....	59
6.3 系统测试.....	60
6.3.1 登录功能.....	60
6.3.2 订单管理功能.....	61
6.3.3 车辆调度功能.....	62
6.3.4 车队管理功能.....	64
6.4 本章小结.....	65
第七章 总结与展望	66
7.1 总结.....	66
7.2 展望.....	67

参考文献.....	68
-----------	----

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近些年，碳排放、碳中和这些词，逐渐得到了人们的关注，这背后跟环境变化关系密切，说明了人们的环保意识在不断提升。以 CO₂ 为代表的温室气体的排放，是温室效应产生的主要因素，也造成了气候变化带来的其他危害，如海平面上升、极端天气、影响农作物生长等。虽然全球碳排放量的增速在近些年有所减缓，但仍未达峰，面临的问题依然严峻。化石能源作为不可再生资源，并不利于社会的可持续发展，降低碳排放量，正在成为全球共识。我国作为一个具有责任感的大国，也根据实际情况提出了“双碳”战略，以控制环境问题的进一步发展。物流公司所在的交通运输业，极度依赖化石能源，因此也是碳排放的大户，行业的变革急需到来。

电力作为清洁能源，在很多方面都得到了应用，电动汽车也是很早就开始了研究。许多国家已采取如财政补贴、免购置税等政策，鼓励消费者购买电动汽车^[1]。国内新能源汽车在过去几年的销售数据如图 1.1 所示，发展势头迅速。虽然现阶段电动汽车的市场份额仍然不足，但在过去的几年里，全球范围内的电动汽车产量和销量都在快速增长。中国的新能源汽车在全球市场的份额已占到 60%以上，而且还出口到了发达国家。新能源汽车是汽车产业转型升级的主要方向，也是产业高质量发展的战略选择^[2]。党和国家高度重视，为产业发展指明了方向，完善健全配套的规划和政策，推动了新能源汽车良好的发展势头。虽然电动汽车的市场发展也受到了充电设施不足和里程焦虑等问题的限制，但是随着高续航电车的研发和通过电磁感应进行无线充电技术的发展，这些问题都会得以解决^[3]。

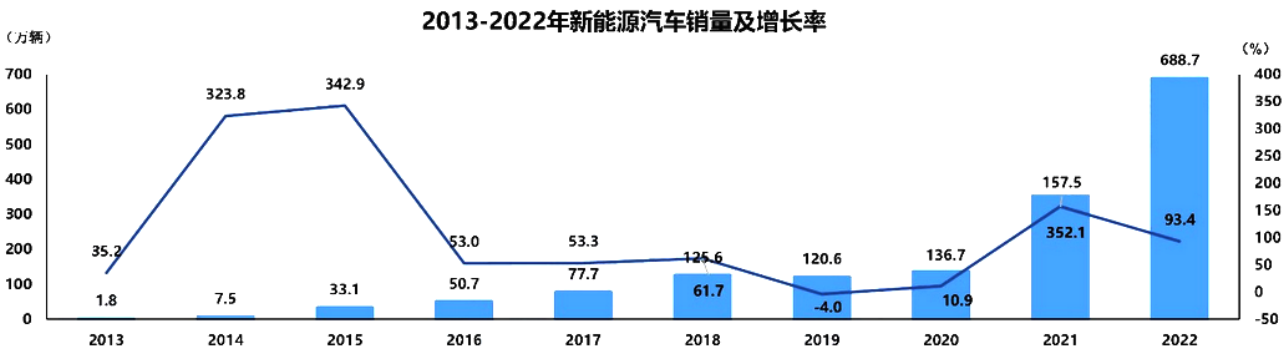


图 1.1 国内新能源汽车销量趋势

根据《新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）》，2025 年时，所有销售的新车中，新能源汽车占比应在五分之一左右。到 2035 年，主要销售纯电动汽车，公共领域用车全面电动化。随着政策倾向和物流行业的快速发展带来的业务需要，如顺丰、DHL 等一些物流企业开始尝试引入电动货车投入到公司的末端配送业务中^[4]。因此物流企业的车队配置中，电动汽车和燃油车并存的现象将会在较长的一段时间。由于两者在续航里程，载货量，维修保养等方面存在差异^[5]，传统的调度方式已不适用。

基于此，对物流经营者而言，如何在兼顾效益的同时，减少车辆运行产生的有害物质，完成碳排放指标，是一个不小的挑战。

1.1.2 研究意义

在节能减排的背景下，交通运输领域需要积极采取措施降低碳排放量。电动汽车产业是我国战略性新兴产业，正向着绿色、智能的方向的快速发展，最终会取代传统燃油车。同时，电动汽车也是物流运输企业减少碳排放可以使用的一种有效措施。电动汽车与物流行业的契合度更高：（1）经济。电动汽车的能源成本低，电价低于汽油和柴油的价格，而且电动汽车得益于其机械结构，它的维修保养成本比传统车辆也得到了降低。（2）高效。电动车的能量转换效率很高，能够最大程度将电能转换为行驶需要的能量。因为没有气体排放，它的运行也更加平稳，减少了噪音污染，对快递服务而言是一个极具吸引力的选择。（3）环保。电车汽车尾气零排放，降低了有害物质的产生，也能使行业逐步摆脱对日益减少的化石能源的依赖，也是对抗道路污染的绝佳方式。能够更好地创造经济和社会效益，但现阶段，电动车也受到充电设施不足、续航里程、充电时长等因素的影响，使其应用还不全面。

油车向电车的过渡是一个渐变的过程，本文基于电动汽车与燃油车共存的混合车辆的业务场景，符合当前物流行业的发展趋势。以企业的实际需要为切入点，研究混合车辆如何进行的车队调度，能够达到效益与环保兼容的问题，并开发与之配套的业务系统，有利于企业的配送业务可以健康可持续地开展，增加收入，效率的优化也可以提高用户满意度，提升企业形象。同时，也有利于推动电动车辆在城市的范围使用，从而减少污染物质。因此，具有一定的现实意义。

车辆调度问题，也被称为车辆路径问题（Vehicle Routing Problem, VRP）。目前对 VRP 的研究还是以燃油车辆为主，近几年，随着电动汽车的发展，以纯电动车辆为主的 VRP 研究开始逐渐增多。但将两者结合的研究并不全面。混合车辆的调度问题，也可以当成异质车辆路径问题（HVRP）。VRP 对于电动车辆而言，其关键环节是剩余电量的计算，大多数文献采

用基于传统车辆的能耗模型，即考虑相关阻力，具体是加速、轮胎摩擦、空气、坡度四项阻力，用来估算电车行驶需要的电能。但此模型忽略了电池的实际情况，其实，电动汽车的电池效率还受温度，过度充放电等因素影响^[6]。而且内部空调的使用没有得到关注，我国绝大部分地区，季节交替明显，在夏冬两季的空调开启的频率必然会上升，这就会能耗的增加。据研究，空调的使用大概会增加约 13.3% 的能耗^[7]。因此，本文在进行电量估算模型上，考虑了温度，空调使用的因素，与实际情况更为贴近，所以具备一定的理论意义。

据此，本文研究的电动车辆和燃油车辆并存的混合车辆调度问题，在实际应用和理论研究方面都具有一定的作用。

1.2 课题来源

本课题来自导师团队与某快递物流企业的合作项目，该项目的主要研究方向是物流终端配送环节的智能化和数据可视化。本课题主要是研究了物流企业逐步引入电动汽车扩充现有车队，产生混合车辆的新趋势下，以烟花算法为基础解决末端配送时的车辆调度问题。同时调研分析了现有物流配送环节的流程和电动汽车的应用现状，发现目前的车辆调度问题，对电动汽车对能耗估计模型研究不够深入。构建出一种考虑电量消耗速率的混合车辆调度模型，根据问题特点改进一种群智能优化算法——烟花算法求解模型，并开发了与之配套的车辆调度系统，将算法应用到系统中，优化车辆调度功能，系统还具有车队配置，历史数据维护等功能。本课题的研究能够提高物流配送效率，降低配送路途中的碳排放量，因此具有一定的实际应用价值。

1.3 章节安排

本文主要研究混合车辆场景下的车辆调度问题及相应的系统开发，旨在提高物流企业的车辆调度效率，减少车辆行驶过程中的碳排放。论文的章节安排如下：

第一章 绪论。介绍了课题的研究背景和意义，简要说明了当前对混合车辆的车辆调度研究存在的不足地方，并解释了课题来源。最后，对全文的组织结构和章节目录做了大致说明。

第二章 相关技术研究。对基于烟花算法的混合车辆调度问题涉及的技术进行调研分析。首先是车辆调度问题和烟花算法的相关介绍，包括车辆调度问题的起源，主要的分支，求解算法的研究现状等。着重介绍了低碳背景下，电动汽车的车辆路径问题的国内外研究现状。归纳总结了混合车辆调度问题目前还存在的不足，引出了本文的创新点，即考虑温度、空调

使用的车辆调度模型。

第三章 混合车辆调度系统设计。首先对企业的需求进行分析，以此为基础，制定系统总体的运行流程。根据实际情况，编写调度系统的功能需求，并对各功能模块及作用做了详细的说明，然后由系统的功能模块绘制对应的用例图。最后，设计了数据库主要的表和相关字段。

第四章 考虑电量消耗的混合车辆调度模型。首先描述现有问题，分析相关特性，总结了此课题研究的实用性。然后详细介绍了关于电动汽车能耗估计模型，最后根据当前的研究现状说明了本文的创新点，给出了考虑电量消耗的混合车辆调度模型，并给出了详细的模型说明和实现方案。

第五章 混合车辆调度模型求解算法设计。首先分析了烟花算法在求解过程中存在的不足之处，并绘制了算法求解的流程图。结合流程图，说明每一步骤的详细设计，并着重说明了算法的改进之处。将仿真数据作为算法输入，对仿真结果进行分析，证明了算法求解的可靠性，因此改进的烟花算法能够提高现实问题的求解效率。

第六章 混合车辆调度系统实现。首先搭建系统的开发与部署环节，并结合系统设计图和运行截图描述主要功能模块，最后测试了系统相关功能模块，并得出测试结果。

第七章 总结与展望。概括本文的主要工作，获得的相关成果。最后也指出不足之处，基于此，制定后续需要改进，扩展的研究内容。

第二章 相关技术研究

本章节将对课题研究涉及到的有关 VRP 的相关理论和研究现状进行文献综述，总结其中的特点，引出本文的创新点，并为后续研究内容做理论铺垫。主要从 VRP 分类、求解方法、混合车辆调度问题研究内容等方面展开。

2.1 基础知识

2.1.1 混合车辆调度问题

混合车辆调度问题属于车辆调度问题的一个分支。车辆调度问题属于较为经典的组合优化问题，1959 年由美国学者首次提出。对于物流业而言，调度问题的研究有很大的应用价值，通过优化车辆行驶路径，可以降低物流成本。经过一些国内外专家学者研究，并将研究成果投入到实际的物流运输活动中进行验证，调度问题的相关研究得到了快速发展。在问题模型、优化目标等方面的设计更符合不同生产场景下的需要。

车辆调度问题可以描述为：一个拥有多辆车的车队、一个配送中心（或仓库）、一定数量的客户，需要规划行车路线，且遵从约束条件（如货物量、时间限制、续航里程限制、车辆装载限制等），实现对应的目标（如成本最小、路程最短、时间最快、投入车辆最少等）^[8]。具体场景如图 2.1 所示。

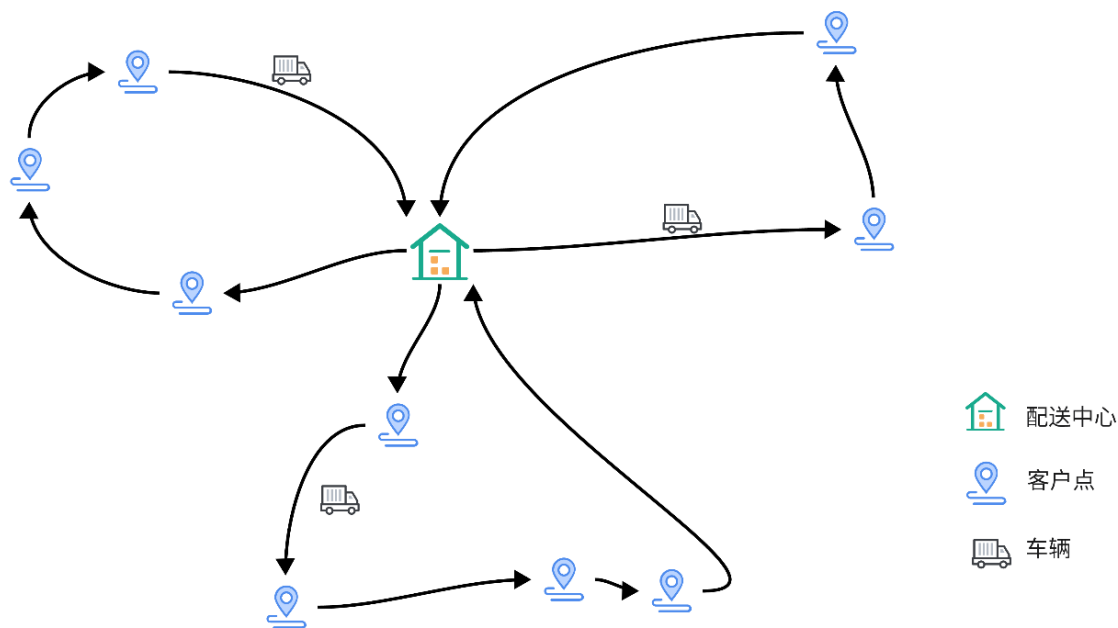


图 2.1 车辆调度场景图

混合车辆指包含多种车型的车队。本文研究的混合车辆包含电动车和燃油车两种车型，电动汽车的电量消耗模型对混合车辆调度中的影响较大，这也是本文的创新点之一，使用动态电量消耗模型，相关成果也已撰写成专利。

2.1.2 烟花算法

烟花算法（Fireworks Algorithm, FWA）是一种模拟烟花爆炸过程中的触发机制而提出的群智能算法^[9]。因其较好的性能和鲁棒性，已经广泛应用于许多领域，如图像处理^[10]、机器学习^[11]、计算任务调度^[12]等，在车辆调度问题方面的应用也日益增多。FWA 通过多粒度搜索策略实现解空间的探索，同时通过引入种群内火花的交互和协作，增强了算法的全局搜索能力。该算法的主要特点包括自适应调整爆炸半径、自适应调整火花数量、自适应调整爆炸次数等。

烟花算法的基本流程包括初始化种群，计算适应度选择个体，通过爆炸更新烟花的位置，在每次迭代中，根据各个火花的适应度值进行选择，得到下一代烟花，搜索最优解。算法基本步骤如图 2.2 所示。

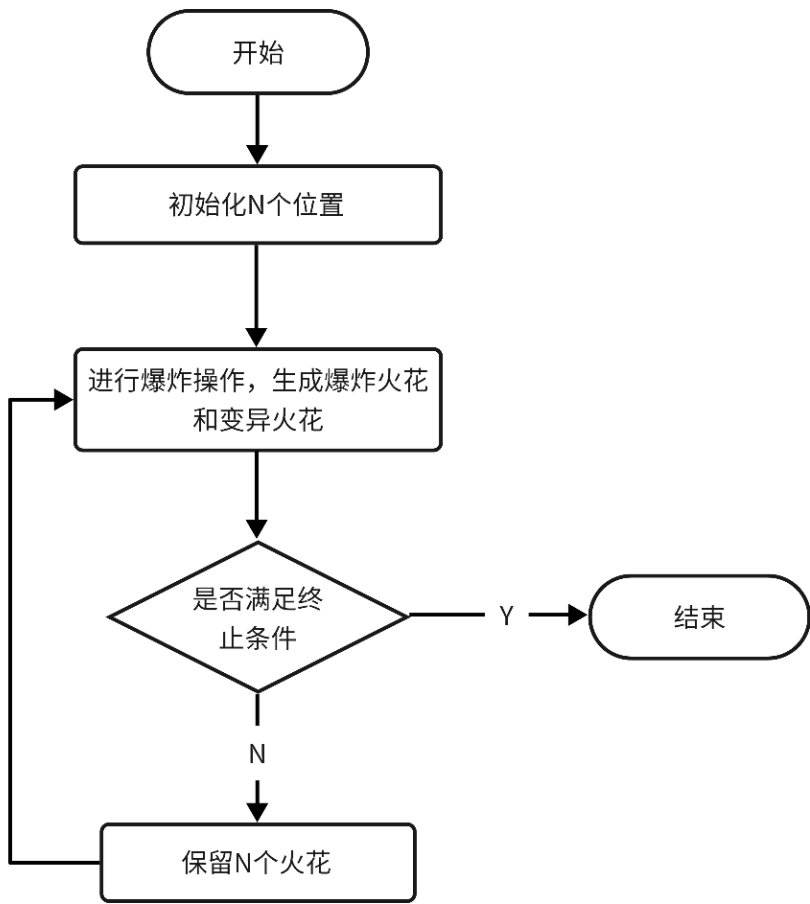


图 2.2 烟花算法流程

FWA 和其他群智能算法相比有以下不同点：

(1) 爆炸和聚合: 烟花算法通过爆炸和聚合的方式寻找最优解, 而其他群智能算法则通常使用群体行为来寻找最优解。

(2) 烟花和火花: 烟花算法中, 烟花表示一个解, 火花包括了爆炸火花和变异火花, 表示这个解的变体, 而其他群智能算法中则通常使用粒子、蚂蚁、鸟等来表示解。

(3) 适应度函数: 烟花算法中的适应度函数可以是任意函数, 而其他群智能算法通常使用特定的适应度函数。

(4) 参数设置: 烟花算法的参数设置相对简单, 而其他群智能算法则需要设置更多的参数。

自 FWA 提出以来, 学者们对其做了多种改进, 主要有两类改进方式, 一类是基于传统 FWA 改进算子, 另一类是混合不同启发式算法的研究。FWA 在车辆路径问题中的应用也逐渐得到了关注和研究。已有的研究表明, 对烟花算法进行适当的改进和优化, 可以显著提高算法的性能和收敛速度。

曾敏等人^[13]提出了一种改进的烟花算法。该算法在变异火花的生成方式上, 采用了具有更强搜索能力的柯西变异算子, 参考前代烟花的爆炸数据, 估算下一代烟花的爆炸半径, 解决了爆炸半径不易设定的困扰, 平衡局部和全局搜索, 根据基准函数进行实验, 证明了其改进方式改善了算法的求解速度和精度。Liu 和 Qin^[14]提出了一种利用邻域信息的烟花算法, 将烟花种群划分为不同阶段的不同种群, 不同阶段的邻域信息利用策略也不同, 设计了早期和晚期策略。结果表明, 该改进算法在大量测试数据和三个实际问题具有优势和竞争力。并将算法用于预测交通流中, 提高了模型的预测精度。Wei 等人^[15]为解决 FWA 搜索速度慢、易陷入局部最优的缺陷。提出一种改进思路来修正这些缺点。首先, 提出了一种基于反馈控制的闭环动态搜索间隔调整策略, 以提高搜索效率。然后分析了有效的关键参数, 设计了与迭代阶段相关的爆炸半径调整方法。为增强算法的局部搜索能力, 更改了变异火花的生成方式, 引入了布朗运动的概念。为了使高质量的烟花产生更密集的火花, 提出了一种基于每种烟花排名的爆炸强度算子。最后, 通过大量实验, 验证了该算法的优越性。

Yue 等人^[16]针对多维复杂空间的优化问题, 提出了一种基于 FWA 和灰狼优化算法的混合算法, 该算法结合了灰狼算法的良好开发能力和 FWA 强大的探索能力。在 16 个基准函数上使用改进粒子群算法、乌鸦搜索算法、飞蛾扑火算法等群智能算法和提出的混合算法进行了 30 次测试。验证了该混合算法的性能优势。Zhu 等人^[17]注意到 FWA 的全局性能受到爆炸幅度的显著影响, 提出了一种混合粒子群算法的烟花算法, 以提高 FWA 的全局性能。在算法中, 将种群进化速度融入到爆炸幅度计算中, 该机制通过评估每个迭代过程中的适应度进化速度来动态调整, 以控制全局和局部搜索信息。实验表明, 该算法取得了较好的效果。

2.2 车辆调度问题主要的求解算法

随着车辆调度问题研究的不断发展，求解方法也层出不穷。选择适合问题的算法至关重要。目前主要的求解算法有精确算法和启发式算法，逐渐展现的还有机器学习有关的方法，图 2.3 列出了相关求解算法。

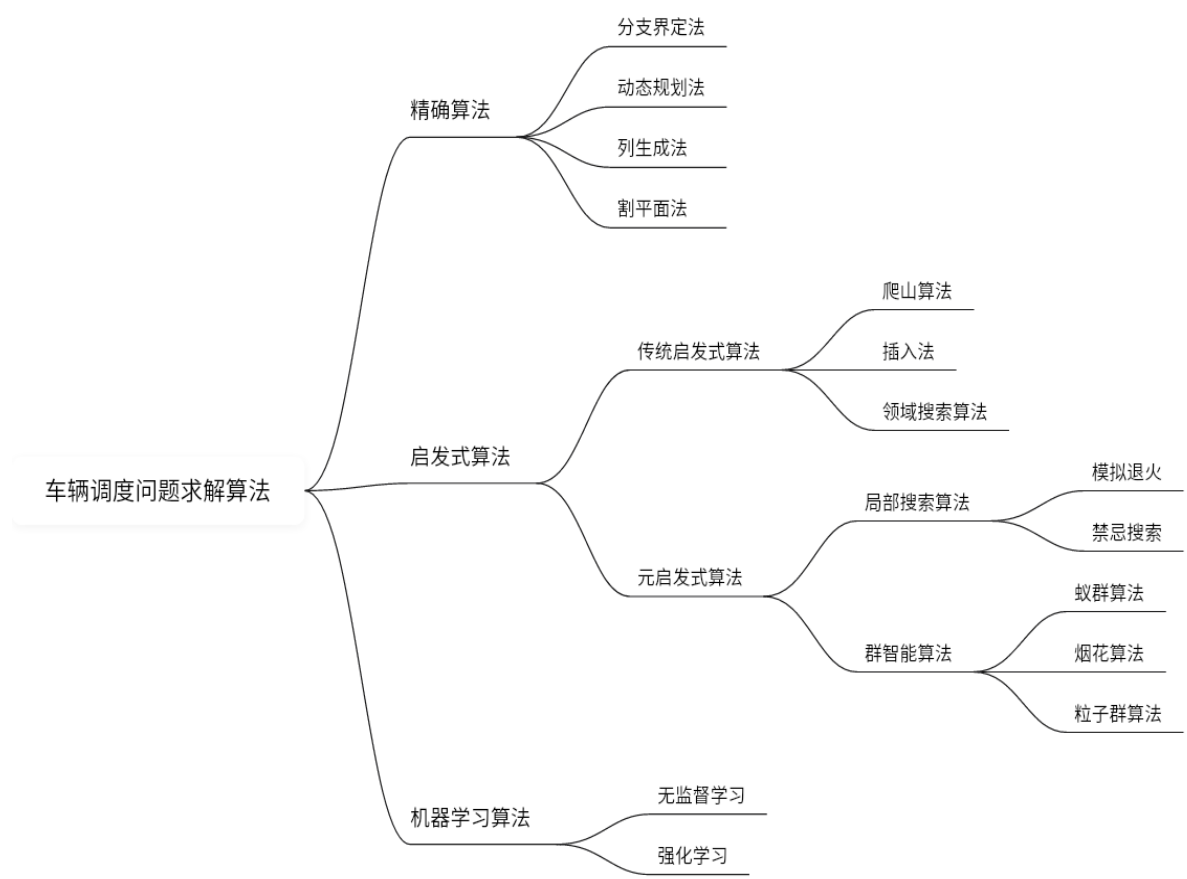


图 2.3 求解算法分类

其中，精确算法主要有动态规划法，分支界定法等。其能够得出问题的最佳解，但只适合规模不大的问题，否则效率会大打折扣。启发式算法有扫描法、蚁群算法、烟花算法等。其只能求出问题的近似最优解，求解大规模问题时，能在较短时间完成求解。机器学习方法也是只能求得问题的近似最优解，主要利用自动学习特征的方式来进行计算^[18]。但是，其结果的准确性和数据集的质量密切相关，现实中，很难找到符合各个场景的数据集。因此，本文采用启发式算法中的烟花算法进行模型求解工作。

长期以来，群智能算法受到了许多学者的关注研究，但实际领域中仍存在一些需求，是使用目前的研究成果及方法无法解决的。烟花算法也会产生陷入局部搜索的缺点。本文将针对模型特点，在第五章对烟花算法进行改进优化，进一步探究烟花算法的性能，提高算法的效率和应用价值。

2.3 混合车辆调度问题研究现状

本文研究的混合车辆调度问题，需要针对电动车和燃油车的不同特性，做出不同的处理措施，电动车作为混合车队的主体部分。因此，本小节将关注一些关于电动汽车调度问题的研究现状，重点是混合车辆调度问题的研究内容。

2.3.1 车辆调度问题的分类

VRP 已经开拓了众多的分支领域。学术界有许多关于 VRP 的研究文献。研究内容主要包含的几个要素如下：

(1) 客户点。物流活动的服务对象，服务模式可以是单一取/送服务，或者取送都包含的。客户点通常都有时间窗的限制，即在某个时间段内需要服务。时间窗分为硬时间窗、软时间窗，硬时间窗要求在指定时间内到达客户点进行服务，否则配送失败。软时间窗则可以接受未在指定时间到达，但需要进行一定的惩罚。客户的需求也有明确和模糊区别，当需求量超过车辆限制后，一辆车无法满足需求，需要对订单拆解，这就是需求可拆分 VRP。除此之外，也存在客户优先级的因素。

(2) 配送中心。也被称为仓库、车场等，是物流企业储存或中转货物的地点，数量可以是一个或多个。车辆大都从配送中心出发，最后回到中心，需要回到配送中心的要求称为封闭式 VRP，不需要回到中心的称为开放式 VRP。目前大多数的研究还是封闭式 VRP，开放式仅有少数研究。

(3) 运输车辆。作为载具，通常有以下属性：额定载重和容量、续航里程、能源消耗速度、运输成本等。根据车队的配置，存在单车型，多车型 VRP，单车型代表所有车辆的属性都一致，多车型需要做额外考虑，货物体积也是常考虑的因素。车辆行驶速度大都假设为匀速行驶。

(4) 目标函数。是 VRP 的最终实现目标，一般有：总成本最小、使用车辆数最少、行驶距离最短、时间最短等。

(5) 道路网络。一般把客户点、配送中心、电动汽车需要的充电站称为节点。各节点需要相连，它们之间的连线便组成了道路网络。求解调度问题时，通常是提前计算好道路网络中任意两点的距离，由此计算出行驶时间。使用矩阵保存所有的计算结果，程序运算时可直接调用。

基于 VRP 特点，考虑不同业务场景的要求，为以上要素添加一些附加约束条件、设置符

合相应需求的优化目标，能够拓展出许多各有特色的研究课题，相关的分类如表 2.1 所示。最后，需要将相应的约束条件和目标函数进行组合构建出各种更加复杂多变的问题模型。然后采用对应的策略求解。

表 2.1 车辆调度问题分类

研究要素	内容	种类
客户	服务时间要求	无时间窗、硬时间窗、软时间窗、混合时间窗
	服务方式要求	仅取货、仅送货、同时取送货
	需求特点	需求不确定、需求明确、需求不可拆分、需求可拆分
	客户优先级	无优先级、考虑优先级
配送中心	中心数量	单车场、多车场
	车辆管理方式	封闭式、开放式、半开放式
运输车辆	车辆类型	单车型、多车型
	载重容量限制	载重约束、容积约束
	车辆载货要求	满载，非满载
道路网络	道路特点	动态路网、静态路网
目标函数	目标数量	单目标、多目标

基于此，许多学者为 VRP 的发展做出了不同贡献，发表了各种论文。例如，Vidal 等人^[19]总结了现有和新兴的 VRP，Koç 等人^[20]发表了关于 VRP 同时取送件的综述文章。在动态 VRP 和 RTVRP 领域，Pillac 等人^[21]回顾了动态车辆路径问题，Abbatecola 等人和 Adacher^[22]分别调查了动态 VRP 的动态和优化启发式来源。Guajardo 和 Rönnqvist^[23]考虑了协同运输中的成本分配方法，Gansterer 和 Hartl^[24]调查了 CVRP 中的运营研究模型和解决方法，王万良等人^[25]研究了使用强化学习算法的多配送中心 VRP，Cleophas 等人^[26]研究了协同城市运输的理论和实践。

2.3.2 混合车辆中电动车辆调度问题研究现状

随着电动汽车的发展,许多学者对电动车辆路径问题(EVRP)进行了研究,并涌现出不少成果和应用。EVRP 要考虑车辆电池大小、电量消耗和充电设施等现实因素,计算出最优路径,使得车辆的运营成本最小。EVRP 已经成为智能交通系统领域的研究热点之一。EVRP 与传统 VRP 相比,因为车辆的差异,存在一些不同之处,详细说明如下:

(1) 充电需求:电动车辆需要充电,因此在求解过程中需要考虑充电站的位置、数量和充电时间等因素。这使得问题变得更加复杂,因为充电站的位置和数量可能会影响路径的选择,而充电时间也会增加整个行程的时间。

(2) 能量消耗:与传统车辆路径问题中的燃料消耗不同,电动车辆的能量消耗与车速、车重、路段坡度等因素有关。因此,在电动车辆调度时必须考虑电量消耗速度,而不仅仅是道路长度。

(3) 不确定性:由于路况、交通等因素,电车的行驶时间往往存在不确定性。这使得路径规划更加困难。

(4) 车辆类型差异:电动车辆的类型多样,有的续航里程长,有的能源效率更高。这些差异需要在路径规划中加以考虑,以满足不同车辆的需求。

现有的 EVRP 研究中,有的侧重于考虑充电时间和充电站数量等限制条件,提出了基于约束规划的方法。还有一部分研究则把车辆路径规划问题和充电桩配置问题相结合,提出了混合整数线性规划算法。同时,一些研究则关注路径规划算法的优化,提出了一些新的优化算法。

Messaoud^[27]研究了具有随机行程时间的 EVRP。建立机会约束规划模型,并使用蒙特-卡罗模拟用于改进大邻域搜索算法来求解问题,同时最小化期望的总消耗能量。在随机环境下,该方法能产生较优解。Yu^[28]等人提出了一种基于自适应大邻域搜索的算法,该算法使用多种邻域结构,并通过自适应策略选择邻域结构,以提高算法效率。同时,该算法还考虑了车辆容量、充电站等多种约束条件,在多个数据集上进行了实验,并将结果与其他算法进行比较。Arias 等人^[29]研究了 EVRP 和充电站位置优化模型,考虑了交通网络和电力配送系统的相互作用。该模型旨在最小化总行驶成本和总电力系统投资成本两个目标,同时考虑了充电站建设成本、用电量峰值等限制条件。

张必达等人^[30]在问题的约束条件方面考虑了行驶时间、充电站点情况和绕行指数等因素,建立了充电、换电联合的数据模型,并改进自适应 A*算法修正导航路径。仿真实验表明,该模型能优化电动汽车的充电策略。Kouider 等人^[31]考虑了一个周期性电动汽车路径问题,优化

了一组固定的在多周期范围内的车辆调度问题，最大限度地减少总成本的和充电时间跨度。Sayarshad 等人^[32]使用马尔可夫决策过程，提出了具有前瞻策略的电动出租车动态路线规划问题，考虑了有限电池容量、出租车司机到电池交换站的弯路，旨在最大化社会效益的目标下将客户延迟和系统成本集成到动态长远定价政策中。通过在纽约市的电动出租车市场进行实验，取得了不错的效果。

EVRP 的研究意义在于，通过优化电动汽车的行驶路线，提高电动汽车的能源利用率和运营效率，降低运营成本和环境污染，促进可持续发展。此外，电动汽车路径问题也涉及到实时交通信息、充电站规划、能源管理等多个领域，因此对于提高城市交通管理水平、改善城市环境质量也具有重要的意义。随着 AI、车联网、大数据等技术的发展，电动汽车路径问题将会更加智能化，能够更加准确地预测交通状况和充电需求，实现动态路径规划。此外，多元化的电动汽车路径问题将会考虑不同类型电动汽车的需求和限制，例如不同车型、电池容量、充电方式等，提高求解的灵活性及适应性。

2.3.3 混合车辆调度问题研究现状

目前，电动汽车的发展还受着续航里程不足和充电设施分布不合理等问题的制约。与此同时，燃油车具有行驶距离远、加油方便等优点。因此，如何合理利用电动汽车和燃油汽车的优势，优化其配送路线规划，已成为研究的热点。这个问题涉及到不同类型车辆之间的有效分配和协同作用，以最大限度地降低成本，节约能源和减少排放。

电动汽车和燃油汽车联合的车辆路径问题具有以下特点：

- （1） 能源转换成本高：由于电动汽车和燃油汽车使用的能源存在差异，需要考虑能源转换成本。也就是说，电动汽车需要充电，而传统燃油汽车需要汽油，这增加了配送成本。
- （2） 路线协同：由于电动汽车和燃油汽车的行驶里程不同，需要考虑如何协同规划路线，以确保满足车辆之间的分配任务。
- （3） 排放和环保：电动汽车和燃油动力汽车在使用过程中会产生不同程度的污染和排放，需要考虑如何在保证配送效率的同时最大限度地减少污染和排放。

刘长石等人^[33]提出了一种混合车辆调度模型，区分不同类型的车辆，并考虑了交通拥堵、载重限制和行驶距离等因素，采用遗传和模拟退火算法求解模型，并通过实验对比了两种算法的性能。李英等人^[34]研究的混合车辆路径优化模型中加入了车队配置问题，针对两种车型的差异，设置了不同的成本计算公式。且考虑充电设施对规划结果的影响。对蚁群算法做出改进，并融入了分散搜索的思想，组合成了两阶段的启发式算法。使用 Cplex 求解器和提出

的算法进行对比实验,证明了算法的性能。Amiri 等人^[35]基于重型卡车的应用场景,提出了双目标混合车辆的车辆路径问题模型,其中第一个目标是运输成本最小化,而第二个是碳排放的最小化。考虑了服务面积、充电功率和充电站密度等因素。使用沃尔玛超市的数据进行了实验,取得了提升效果。

Chen 等人^[36]提出一种新的模型用于电车和油车混合的车辆调度和运营。考虑了电车在电池交换站更换电池的能量补充方式,并根据电池交换站的位置进行车辆路线规划。探讨了电池交换站与电车数量对运营成本的影响,并给出了电池交换站在不同开放情况下车队运营的建议。最后,开发了一种 HBP-ASS 算法将精确和启发式策略相结合,用于求解所提出的调度模型。分别针对小型和大型实例进行了算法性能验证。结果表明 HBP-ASS 明显优于大邻域搜索算法。Bao 等人^[37]研究了机场地面的混合车辆调度方法,并评估不同比例的电动车辆对运营成本的影响。建立了基于时间窗的混合车辆调度模型。构建了 2 个不同路网规模、航站楼配置和航班特征的场景,每个场景有 5 个不同比例的车队,以反映电动汽车比例变化时的运营特征。Qin 等人^[38]以最小化车辆行驶时间为目标,建立了一个混合整数线性规划模型。为解决在大规模实例中,精确方法将失败的问题,在启发式算法中,加入强化学习方法,作为高级选择策略,元启发式算法作为低级启发式算法。通过对比实验可以看出,该算法经过适当的训练,能够融合两种算法的优点,取得了明显的改进。

混合车辆调度问题的研究具有很强的现实意义,有着较高的实用价值,且顺应了当前的发展风向。主要体现在以下几个方面。可以节约成本:有效的利用电动汽车和燃油车共同完成运输任务;可以提升企业车队的运输效率,节约运营成本;减少污染:通过合理规划车辆路线,可以最大限度地减少污染和排放,实现环境保护和可持续发展;促进电动汽车的普及:电动汽车和燃油汽车联合使用可以帮助电动汽车逐渐替代燃油汽车,推动能源转型,从而更好地应对能源短缺和环境保护问题。

2.4 基于烟花算法的车辆调度问题研究现状

烟花算法属于群智能算法,与其他经典的群智能算法,如蚁群算法、粒子群算法等原理类似。其在车辆调度问题方面也有相关应用。因此,本文在第五章进行仿真实验时,对比算法的选择上并不局限与其他文献的烟花算法,也为体现本文改进烟花算法在求解混合车辆调度问题上的优越性,将比较其他群智能算法的求解效果。

李猛等人^[39]针对维修资源的车辆调度问题,混合了烟花算法和遗传算法,进行实验表明,FWA 中的爆炸操作可以有效改善遗传算法容易“早熟”的缺点,从而减少了调度成本。许德

刚等人^[40]研究了应急医疗物资配送调度问题,根据应急调度特点,建立调度过程模型。为有效求解问题,提出了优化烟花算法,借助更换变异策略的方式,提高局部寻优能力,还融入了禁忌表,避免局部最优的存在概率。最后进行仿真,证明了算法的可靠性。万杰等人^[41]根据实际的中俄贸易运输场景,分析其多式联运特点,并考虑各种时间窗条件下,如何制定出最优运输方案的问题。综合相关因素,将运输成本最小设置为目标函数,构建了合理,符合实际的问题模型。对 FWA 进行改进求解问题模型,提出核心和非核心烟花的概念,核心烟花控制非核心烟花的爆炸行为,保证改进 FWA 的全局搜索性,也加快了算法运行速度。根据不同的实验参数,对比结果的相关指标,证明了求解方案具有较好的有效性。

Yang 等人^[42]针对经典的有容量限制的车辆调度问题进行研究,提供了一种新的离散 FWA。该算法具有两个主要特征:一种新的火花生成规则,通过引入一个参数平衡全局和局部的搜索能力,实现更强的搜索效率。另一种是基于适应度值方法,确定每个烟花的爆炸幅度,可以提高算法的有效性。最终将该算法与现有的几种群智能算法进行了比较。结果显示,改进 FWA 在处理车辆调度问题方面具有竞争力。Chen 等人^[43]重点关注了车辆调度环节的配送路径规划。考虑了道路状况,通过地图厂商的 API 获取驾驶时间,形成一个时间矩阵。针对标准烟花算法的缺陷,引入了一种烟花差分进化算法。仿真结果表明,烟花差分进化算法能够有效地规划最优分配路径,与原始烟花算法、蚁群算法和粒子群算法相比在求解精度上有了更好的提高。Zhang 等人^[44]基于电子商务快速发展,物流需求爆炸式增长的背景。为了解决物流在服务存在的问题,建立了 2E-VRPDB 模型。第一步根据客户时间要求进行分类,第二步是对两级货运系统进行建模,以获得最佳路线。提出了改进烟花算法,根据模型特点,放弃映射规则,并重新设计了相应的爆炸算子和突变算子。为了证明改进算法的有效性,将其解决方案和计算时间与文献中的遗传、蚁群等算法进行了比较。Mirzabaghi 等人^[45]在多车型的调度问题中,考虑了不同的经济、环境和社会因素。构建出双目标模型,一方面,最大限度地减少燃料消耗量,从而减少运输过程造成的污染,另一方面,最大化驾驶员的满意度。开发了两种基于遗传算法和烟花算法的多目标算法。为了提高这些算法的效率,在它们的结构中还使用了局部搜索方法。求解各种实例的结果表明,烟花算法具有更好的性能。

鉴于烟花算法在车辆调度问题方面的广泛使用,且类似于蚁群算法、粒子群算法等经常被应用于求解混合车辆调度问题中的群智能算法,其求解质量会受到初始解的影响,存在陷入局部最优的问题。而烟花算法的性能已经被证明受随机数的影响较小^[9],其迭代机制允许进行多点爆炸,产生更多解,使得其搜索能力较强,并且其收敛速度较快。所以本文在求解混合车辆调度模型时,将以标准的烟花算法为基础,并做出相应改进,以期提高求解质量。

2.5 本章小结

本章主要介绍车辆调度问题及烟花算法的相关内容。在 2.1 节中，介绍了车辆调度问题和烟花算法的概念和研究等内容。2.2 节主要总结了车辆调度问题的相关求解算法。2.3 节是混合车辆调度问题的相关研究现状。最后着重分析了基于烟花算法的车辆调度问题的研究现状，通过相关文献对该问题进行介绍和分析，可以更好地理解本文采用的算法，也有助于算法的优化和改进，提高车辆调度系统的性能和效率。因此，该部分的总结对于后续的论文研究和实践应用具有重要的指导意义。本章的研究内容和方法，对于后续的车辆调度系统的设计和开发具有重要的参考价值。

第三章 混合车辆调度系统设计

物流车辆调度系统是一种应用于物流管理领域的信息技术系统。它通过集成计算机网络、物联网和传感器,实现对物流运输过程的监控、调度和优化,还具备数据分析,辅助决策等功能,实现运输计划的优化、调整和更新,帮助企业做出更准确、快速、有效的物流管理决策,提高运输效率,降低成本。

本章主要描述混合车辆调度的设计开发流程,明确系统设计阶段需要完成的任务。首先对实际需求进行分析,预估系统将要完成的目标。然后根据需求完成总体设计和具体的功能模块设计,规定各个模块需要实现的效果以及之间相互调用的方式流程,最后梳理系统的数据管理功能,完成对应的数据库设计。

3.1 系统设计分析

3.1.1 业务流程分析

物流企业的车辆运输任务一般需要以信息系统为依托,借助平台系统将客户、车辆和司机联系起来,保证信息的有效传输,减少无效沟通。调度系统将客户提交的订单需求进行整合,根据任务需求和车辆状态,能自动或手动分配任务、规划路线、监控运输进程等,从而提高运输效率和精度,节约运输成本和时间,提高客户满意度。同时,系统也可以管理维护车辆和司机的数据,便于优化车辆和司机的利用率,降低运营成本。此外,系统还可以提供数据统计和分析工具,帮助业务人员了解车辆调度和运输情况,对业务进行调整和优化。系统的大致业务流程如图 3.1 所示。详细说明如下:

(1) 客户在系统中提交运输需求,将需求信息,包含地址、联系电话、服务时间、货物重量和货物体积等信息,填写后提交系统自动审核,防止出现不符实际或无法完成的运输任务,通过后等待系统安排车辆接单。

(2) 调度系统收到运输的需求数据,等待指令进行运输计划的制定,调度员进行算法的参数维护,即需求数据、运输车辆的信息、成本价格、环境温度等要素,如需更新,进行相应的操作,最后提交系统,进行任务计算,制定出初步的运输计划。

(3) 调度员大致评估一下调度任务的准确性,如任务无明显差错,进行下一步的人员指派。否则应视情况微调运输计划,或者直接修改相关参数重新进行任务的制定。调度任务确认之后,系统生成运单信息,相关情况推送给客户和指派的司机。

(4) 司机收到指派信息后，包含客户的基本信息和运送货物的信息。按照预先生成的运输线路，按要求行驶，到达指定的客户点后，将车辆停放在指定位置。然后与客户进行核对，确认货物的数量、品种、规格等信息是否与任务单上的要求相符，同时确认货物是否正常。如货不对版，及时反馈给客户和公司。装载货物时，司机应使用相关工具和设备，将货物装载到车辆上，过程中需要注意货物的稳定和安全，确保运输过程中不受损坏。完成装载后，司机要求客户在系统中确认收货。签收确认完成后，司机将车辆开离客户点，并继续执行下一项运输任务。

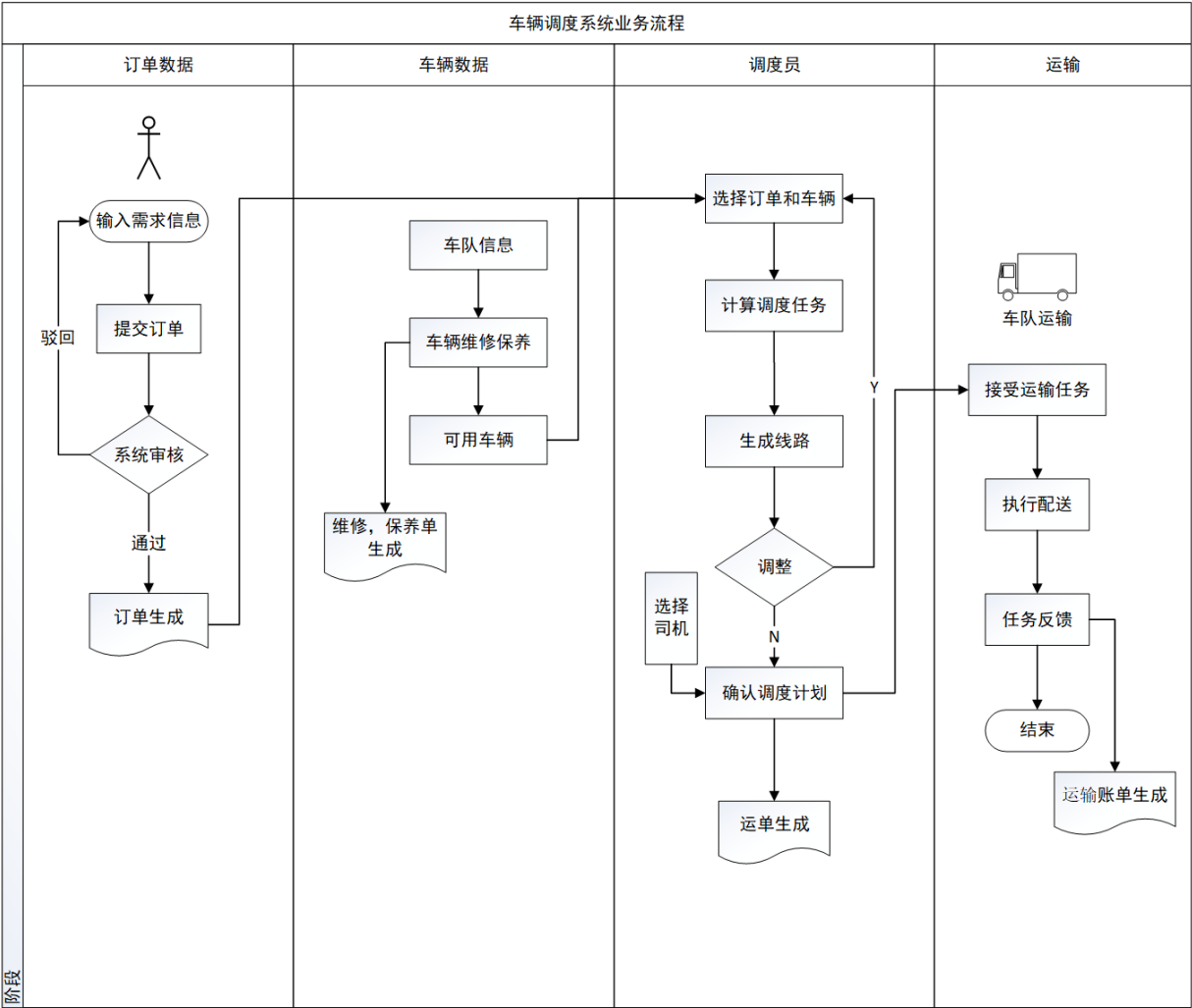


图 3.1 调度系统业务流程

3.1.2 需求分析

需求分析是系统开发的第一步，通过对用户需求进行分析，可以明确系统需要实现的功能和性能要求。准确理解用户需求，对后续的系统设计、开发和测试工作非常有帮助。实际开发过程中，通常存在因为需求不明确、理解错误等问题，导致实际效果与设想不符，进而影响开发流程的整体质量和用户满意度。通过需求分析，可以避免这种情况的发生，降低开

发过程中的错误率，提高系统的可靠性和稳定性。

混合车辆调度系统需要把不同类型的车辆组合在一起，根据实际情况进行灵活调度，满足不同运输需求，提高运输灵活性。通过合理的车辆调度和路线规划，制定更加高效的运输方案，降低成本，提高运输效率，增强企业影响力和盈利能力。根据以上需求，本文研究的系统应包括车辆管理、路径规划、订单管理、司机管理等功能。因此，本系统的角色分为三类：用户，司机和系统调度员。不同角色的用户可以执行不同的操作。三类角色的用例图如图 3.2 所示。

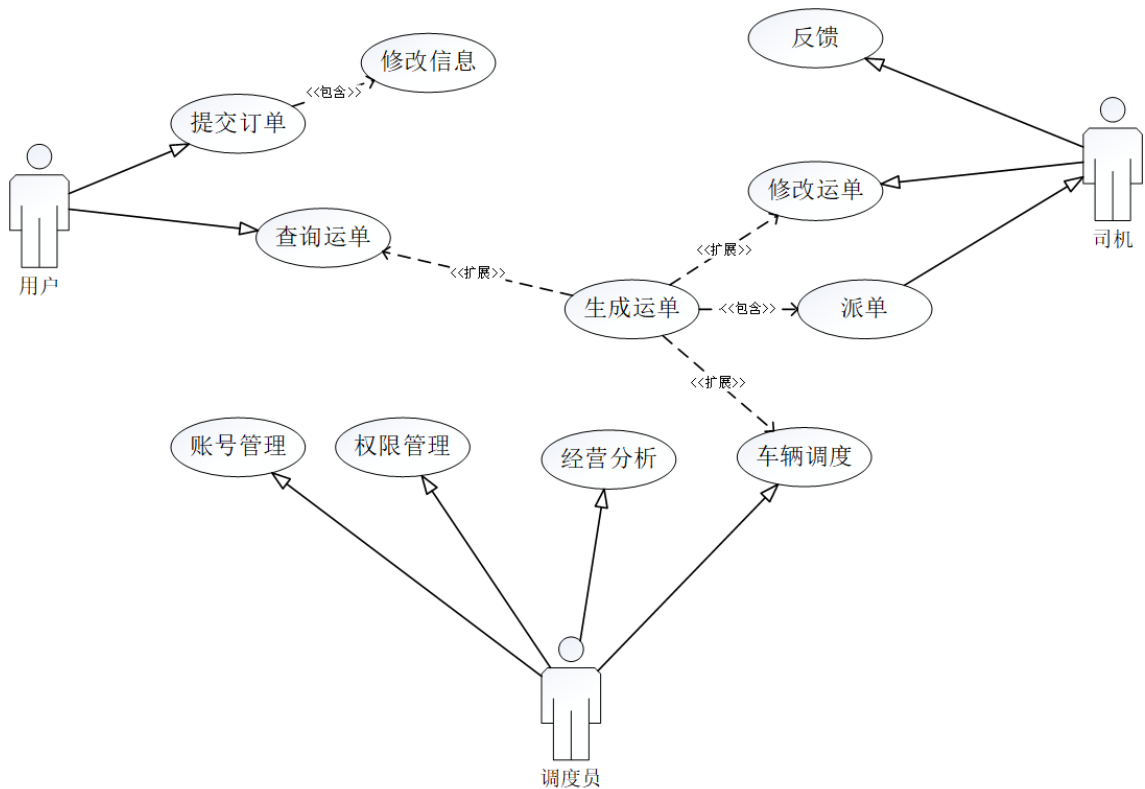


图 3.2 系统用例图

以下是各角色的主要操作：

用户：一般指下单方或物流需求方。用户可以在系统中提交货物信息、运输要求和相关资料，并查询订单状态和运输信息。

司机：司机是系统中的执行者，主要负责货物的运输。司机可以在系统中接受派单、查看订单信息、提供运输过程中的实时数据，并确认完成订单。

系统管理员：系统管理员是系统的管理者，主要负责系统的维护和管理。系统管理员可以进行用户管理、车辆管理、司机管理、系统设置、数据备份等操作，并处理系统中出现的问题。

不同的角色也可能会有交叉和重叠的部分，比如司机和系统管理员都可以查看订单信息。在系统设计中，需要考虑不同角色之间的权限和数据访问控制，以确保系统的安全性和可靠

性。

此外,系统的性能需求方面,应要具备:(1)快速响应时间:能够在短时间内完成分配和调度车辆的任务。(2)可用性:系统应该具有高可用性,能够 24 小时不间断地运行。(3)稳定性:系统应该具有稳定性,能够处理大量数据和复杂操作。(4)扩展性:系统应该具有可扩展性,能够满足未来业务增长的需求。

安全需求方面(1)数据安全:系统应该具有数据安全性,做一些加密操作,保护用户数据不被非法获取和篡改。(2)身份认证:系统应该具有身份认证功能,只有经过认证的用户才能够访问和使用系统。(3)权限管理:系统应该具有权限管理功能,能够限制用户的访问权限和操作权限。同时,系统应该具有用户友好性,具有数据可视化功能,能够将数据以图表等形式展示,方便用户理解和分析。

3.2 系统模块设计

系统模块设计说明是实现系统功能的重要依据。它描述了系统中每个模块的功能和实现细节,为开发工作提供详细的指导和参考。

3.2.1 总体设计

本节主要根据前面需求分析章节的相关内容,对系统整体架构进行设计,便于后续工作的顺利进行。系统的整体架构图表示了各个组成部分之间的关系和交互方式,它是系统设计的重要组成部分。有助于开发人员更好地协同开发、更好地进行系统维护和升级,也有助于用户更好地理解系统的功能和使用方式。本调度系统的架构如图 3.3 所示,具体的层级划分为:基础支撑层、数据层、业务层、接口层、界面层。详细说明如下

客户端:承担用户交互职责,包括用户登录界面、订单管理界面、车辆调度界面、数据查询界面等。可以使用电脑,手机等终端接入系统。

接口层:负责处理相应的网络请求,转发到相应的地址,调用下层的服务和模块,并将结果返回给用户界面层。

业务层:负责处理接口层转发过来的请求,进行业务逻辑处理,包括用户验证、订单管理、车辆调度、运单管理等。

数据层:负责访问数据库,执行数据操作。存储车辆调度系统中的各种数据,包括用户信息、订单信息、车辆数据、运单数据等。

基础设施层:提供底层的支持和服务,包括网络服务、安全服务等。

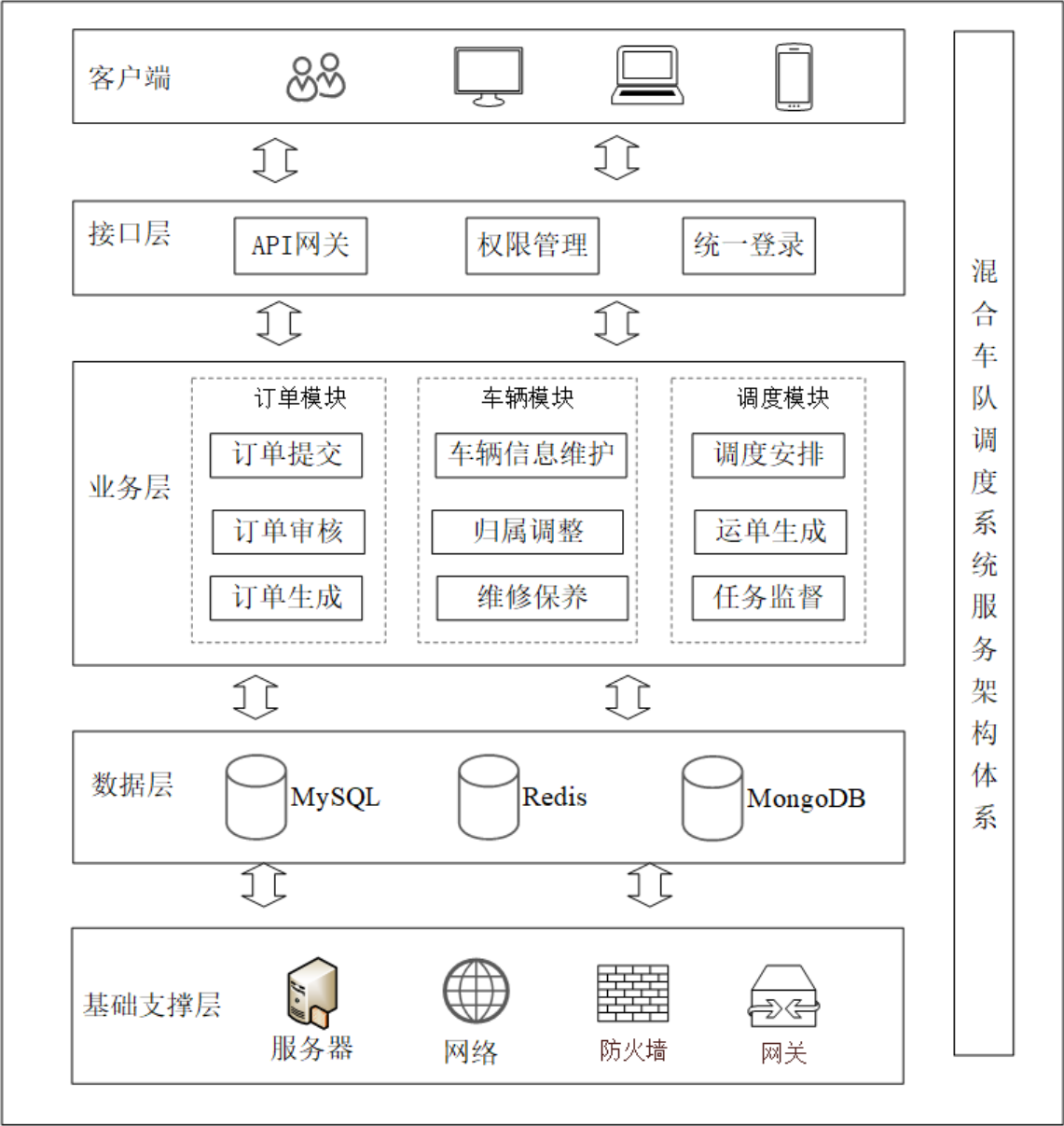


图 3.3 系统架构图

3.2.2 功能模块设计

车辆调度系统是一种较为复杂的信息化管理系统，需要设计多个功能模块来实现系统的各项功能。经过需求分析，根据职能进行模块划分，制定出订单管理模块、用户管理模块、车辆调度模块模、运单管理模块、司机管理模块、车辆管理模块以及经营分析模块，具体的模块组成和对应完成的功能图如图 3.4 所示。

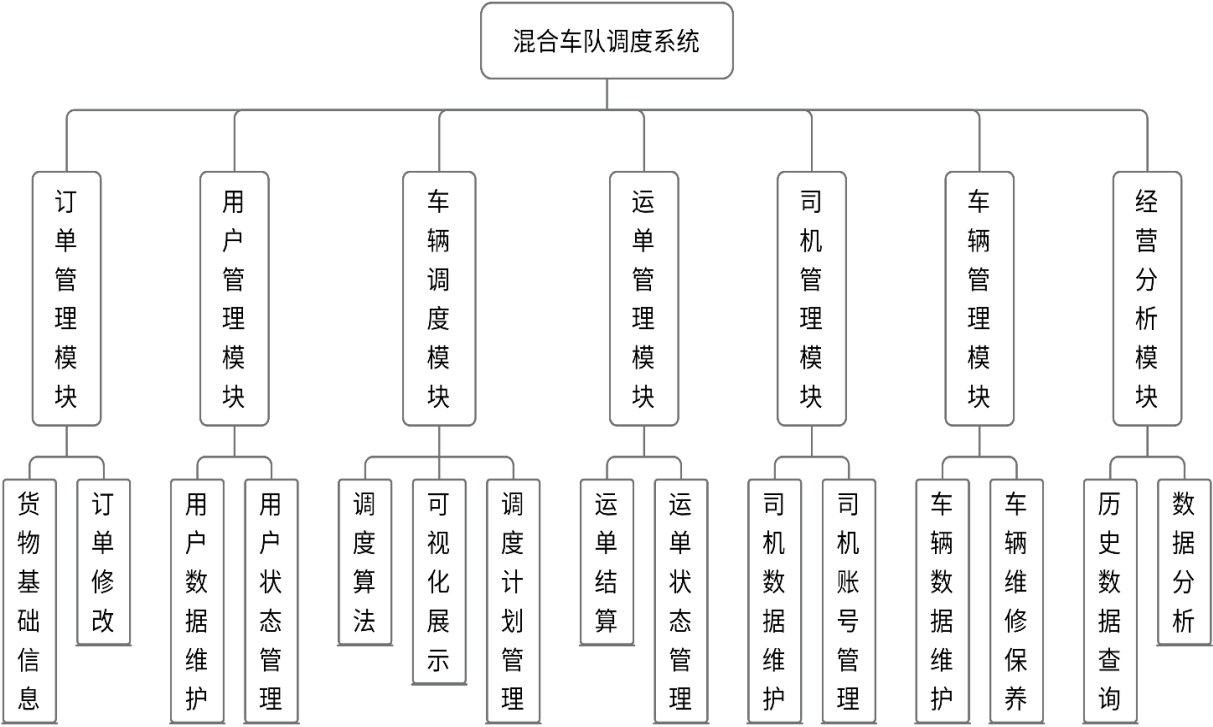


图 3.4 调度系统需求模块

订单管理模块：负责管理和处理系统中的所有订单，确保所有订单都能得到及时、准确的处理。用户在创建订单时，需填写有关信息，如起点、终点、货物类型、数量等。提交订单后，订单状态将变为“待处理”。当订单创建后，系统需要对其进行处理。判断订单是否合理，如果订单不符合要求，系统会将其拒绝，并通知用户。同时，客户在需求接受之前可以修改相关信息。

用户管理模块：负责管理所有用户的信息，确保用户能够安全、便捷地使用系统。允许用户在系统中创建新的账户，可以在系统中管理和修改个人信息，如联系信息、密码等。同时，管理员也可以管理和修改用户信息，如重置密码等。系统还需要对用户进行不同的权限管理，以确保系统的安全性。管理员可以设置用户的权限级别，不同的权限级别可以访问不同的功能。

车辆调度模块：系统的核心部分之一，它负责对车辆进行调度和管理，以实现最优的路线规划和资源利用。车辆调度模块需要根据订单的要求，同时兼顾相关约束条件对车辆进行最优路线规划。同时为使得结果更加直观，需要实现可视化功能。本文将在第四章设计调度模型，第五章设计算法求解调度模型。

运单管理模块：管理和维护所有运单的信息，包括订单号、起始地点、终点、货物信息、配送日期等。同时，系统还需要跟踪订单的状态和进度，将生成的运单分配给最合适的车辆和司机。还需要处理所有的运单结算工作，包括费用的计算、结算、发票开具等。同时，系统还需要提供报表和统计功能，以便管理员进行数据分析和管理的。

司机管理模块：管理和维护所有司机的信息，包括姓名、手机号、驾驶证信息、所属车队等。

车辆管理模块：管理和维护所有车辆的信息，包括车辆型号、车牌号、车辆所属车队、行驶里程等。同时，系统还需要跟踪车辆的保险、年检、维修等情况，记录车辆每次出车情况。

经营分析模块：利用系统内部的数据和信息，对运营情况进行统计、分析和评估，帮助企业管理者更好地掌握企业的经营状况和发展趋势，进而制定更加有效的经营策略和决策。

各模块之间存在联系，可以进行数据交互。它们之间的时序图如图 3.5 所示。

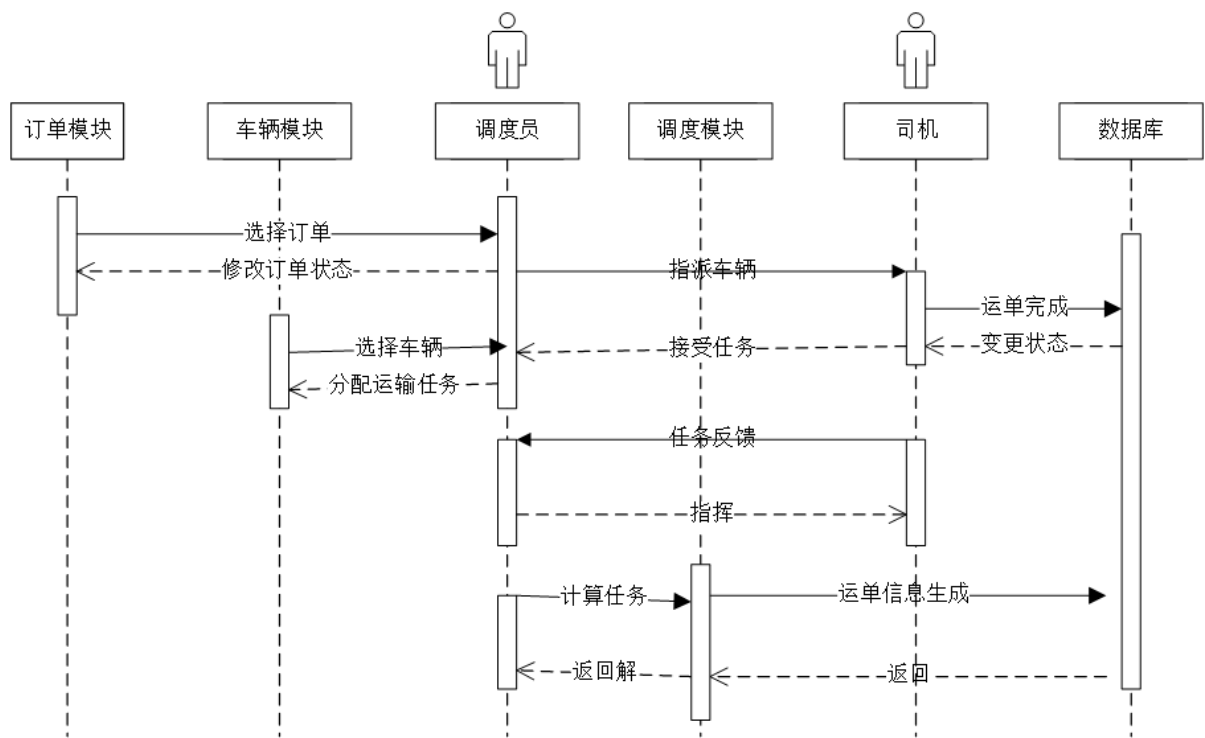


图 3.5 系统序列图

3.3 数据库设计

系统数据库设计的作用是定义系统所需存储的数据，包括数据表、字段、数据类型、约束条件等。数据库设计需要考虑系统的业务需求和数据的组织结构，以满足系统的功能需求和性能要求。数据库设计可以确保数据的安全可靠，并且可以支持系统的扩展和维护。在车辆调度系统中，数据库设计需要考虑订单、运单、用户、司机、车辆等数据的存储和管理，以支持系统的业务流程和数据分析需求。

按照相关的数据库实体，设计出完善的数据库，主要的数据库表有五张，分别是，客户订单表、运单表、司机信息表、车辆信息表、用户信息表。下面是详细的车辆调度系统的数据库设计：

(1) 用户表 (user):

记录系统中的用户信息。包括用户 ID (id)、用户名 (username)、密码 (password)、用户类型 (type): 取值包括“普通用户”和“管理员”等。

(2) 车辆表 (vehicle)

存储车辆相关信息。字段包括车辆 ID (id)、车牌号 (plate_number)、车辆类型 (type): 取值包括“电车”、“油车”、“混合动力”等、车辆状态 (status): 取值包括“空闲”、“使用中”、“维修中”、车长、载重、容积等。

(3) 司机表 (driver)

记录司机的个人信息。包括司机 ID(id)、姓名(name)、手机号(phone)、司机状态(status): 取值包括“空闲”、“工作中”、“休息中”、驾驶证号等。

(4) 订单表 (order)

存储订单信息。包括订单 ID (id)、下单时间 (create_time)、地址点 (address)、订单状态 (status): 取值包括“已下单”、“已接单”、“已完成”、用户 ID (user_id): 关联用户表中的用户 ID、货物类型 (oreder_type)、货物重量 (weight)、货物体积 (volume) 等。

(5) 运单表 (waybill)

存储运单信息。包括运单 ID (id)、运单状态 (status)、取值包括“待配送”、“配送中”、“已完成”等、费用 (cost)、订单 ID (order_id): 关联订单表中的订单 ID、司机 ID (driver_id): 关联司机表中的司机 ID、车辆 ID (vehicle_id): 关联车辆表中的车辆 ID 等。

(6) 车队表 (fleet)

记录车队的基本信息, 包括车队 ID、车队名称、负责人姓名、联系电话等。

(7) 车队车辆关系表 (fleet_vehicle)

记录每个车队与其拥有的车辆之间的关系, 包括车队 ID、车辆 ID 等。

(8) 车队司机关系表 (fleet_driver)

记录每个车队与其拥有的司机之间的关系, 包括车队 ID、司机 ID 等。

(9) 系统日志表 (system_log)

记录系统中的所有操作日志, 包括操作时间、操作者、操作类型、操作内容等。

各表之间的联系如图 3.6 所示:

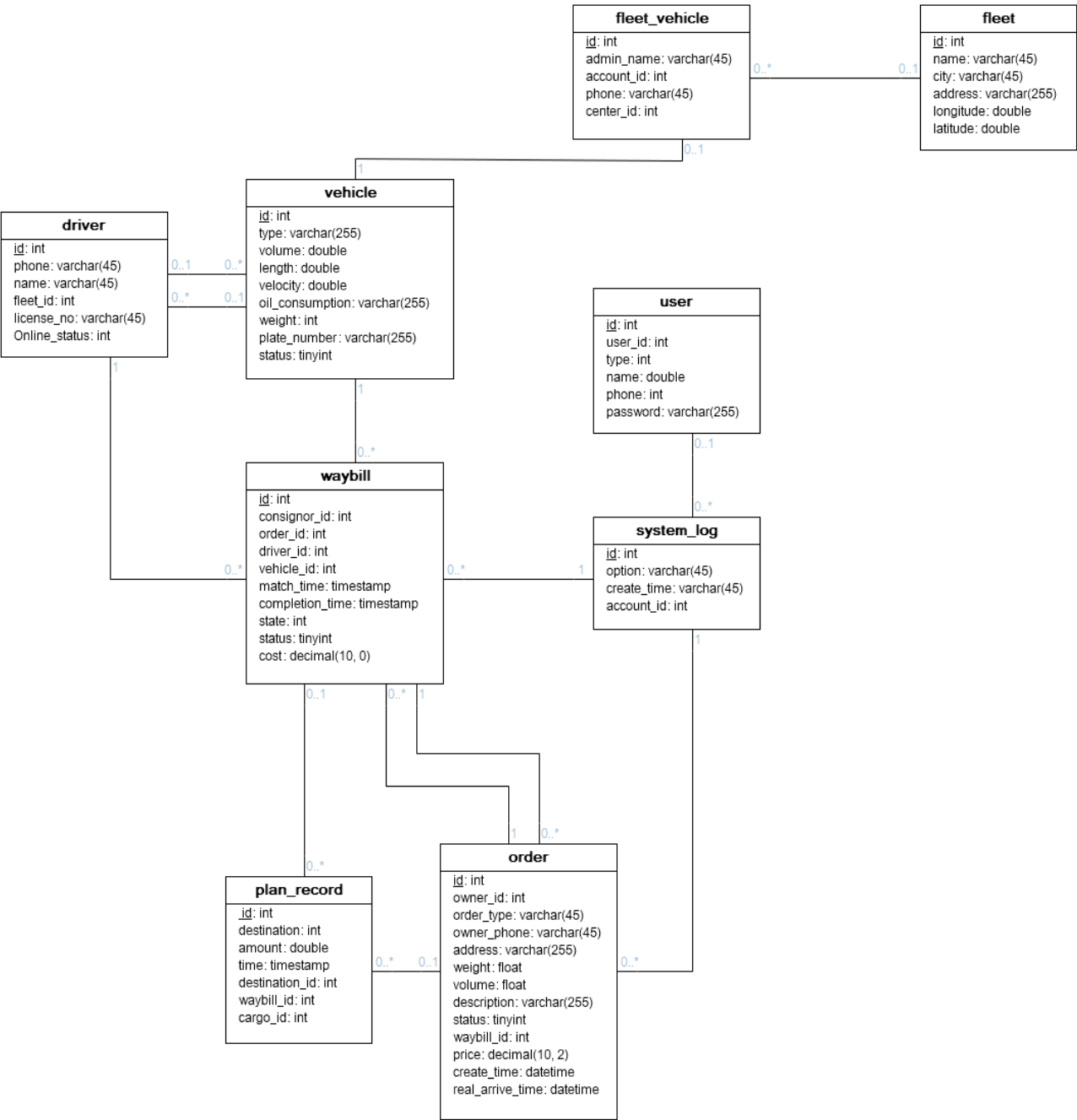


图 3.6 数据库设计

3.4 本章小结

本章主要介绍了混合车辆调度系统的设计过程，包括系统设计分析、系统模块设计和数据库设计。在系统设计分析中，主要包括业务流程分析和需求分析两个方面。在业务流程分析中，本文对整个车辆调度流程进行梳理，包括业务流程中涉及到的各个角色、步骤、数据等信息。在需求分析中，从用户角度出发，明确系统需要实现的各个功能模块以及对应的需求。系统模块设计分主要涉及到对系统整体结构和各个功能模块的设计和划分。包括前端、

后端、数据库等组成部分之间的关系和交互，以实现系统的各项功能。而功能模块设计则对系统的各个功能模块进行详细的设计和划分，以确保各个模块之间协作和信息交换。数据库设计部分主要涉及到系统所需存储的数据和数据之间的关系，考虑到订单、运单、用户、司机、车辆等数据的存储和管理，以支持系统的业务流程和数据分析需求。本章的内容为混合车辆调度系统的开发提供了指导和参考。

第四章 考虑电量消耗的混合车辆调度模型

车辆调度问题是一个备受关注的研究领域。在这个领域中，混合车辆调度问题是一类涵盖多种不同类型车辆的复杂问题。该问题通常考虑多种类型车辆之间的互补性，以及这些车型所具有的不同特性，例如不同的载重能力、行驶速度、能耗等。同时，考虑电量消耗的混合车辆调度模型也是当前研究的一个热点，因为它可以更准确地反映出新能源汽车的实际情况，为环保和节能提供了一种新的解决方案。

本章将实现第三章系统设计中的车辆调度功能中的调度模型部分，介绍考虑电量消耗的混合车辆调度模型的建立过程，并详细阐述其中所涉及到的理论知识和模型构建方法，以期车队调度问题的研究提供新的思路和方法。

4.1 问题分析

本章节需要构建的混合车辆调度模型，可以理解为：针对目前的业务配送网络中已知的客户点，投入具有电动车型和燃油车型的车队执行配送任务，两种车型的相关参数已知。这些车辆从配送中心出发，在不超过各自载重的约束条件下，将逐一服务各个客户点，并完成客户于调度系统中提交的服务要求^[46]。在配送路途中，电动车可能受到其电池容量的限制，导致剩余电量无法满足余下路程的续航电量要求。因此，这些车辆必须按一定的策略，选择附近的充电设施，进行电量补充，以增加续驶里程，然后完成余下的运输任务。混合车辆的配送网络如图 4.1 所示。

文献[47]考虑了多种车型，包括纯电动车、混合动力车、燃油车等，还加入了车辆调度员的影响因素。其实验结果证明了混合车辆与单一动力的车队相比，可以产生更高的效益。文献[48]在混合车辆的路线问题研究上，引入了时间窗和充电站因素，且不限制各类型车辆的使用数量。广泛的实验显示，在各种各样的场景下，合理使用的混合车辆比使用单一车辆可以显著降低业务费用。文献[49]对车辆配置、载重、电池容量等关键因素进行实验比对，以发现这类因素对运输成本的影响。将充电行为的纳入考虑范围，更加符合实际。并把问题模型分为了主模型与子模型，提升了求解效率。

文献[50]意识到在混合车辆调度问题中，电动车的能源消耗是动态的，提出在行驶过程中，加速和减速等行为会影响消耗的能量，如果忽视，会产生不可行的解决方案。因此，他们优化了模型，并开发了一种基于大邻域搜索的求解算法（HLNS），根据测试模型求解的效果，

评估了其提出的 HLNS 算法的性能。文献[51]根据混合配送的实际场景，构建了初始和动态两阶段模型。针对其特点，设计了改进的自适应大规模邻域搜索算法（IALNS）进行求解。为了验证算法性能，使用不同规模需求的数据进行问题求解。结果表明，IALNS 的性能和效率越好，表明其在车辆调度问题方面具有较为明显的优势。

但以上文献的调度模型通常没有考虑电动车辆受温度和空调使用影响的电量消耗，这将导致调度过程中可能出现车辆电量不足、充电等待时间过长等问题。这些问题会增加调度成本、降低调度效率和质量，致使车辆无法按时完成任务，从而影响客户满意度。电动车与行驶路途中损失电量的消耗关系表达式是非线性函数。配送成本有以下几项：车队固定成本、充电成本、每公里行驶成本等。本论文旨在不超出所有限制条件下，制定合理的车队组合及配送路线，使得总配送成本最少。该模型的主要挑战在于电动车的电量限制和非线性能耗特性，以及不同车型和充电设施之间的相互制约关系。因此，需要建立有科学的数学模型和有效的优化算法技术，以获得最优解决方案。

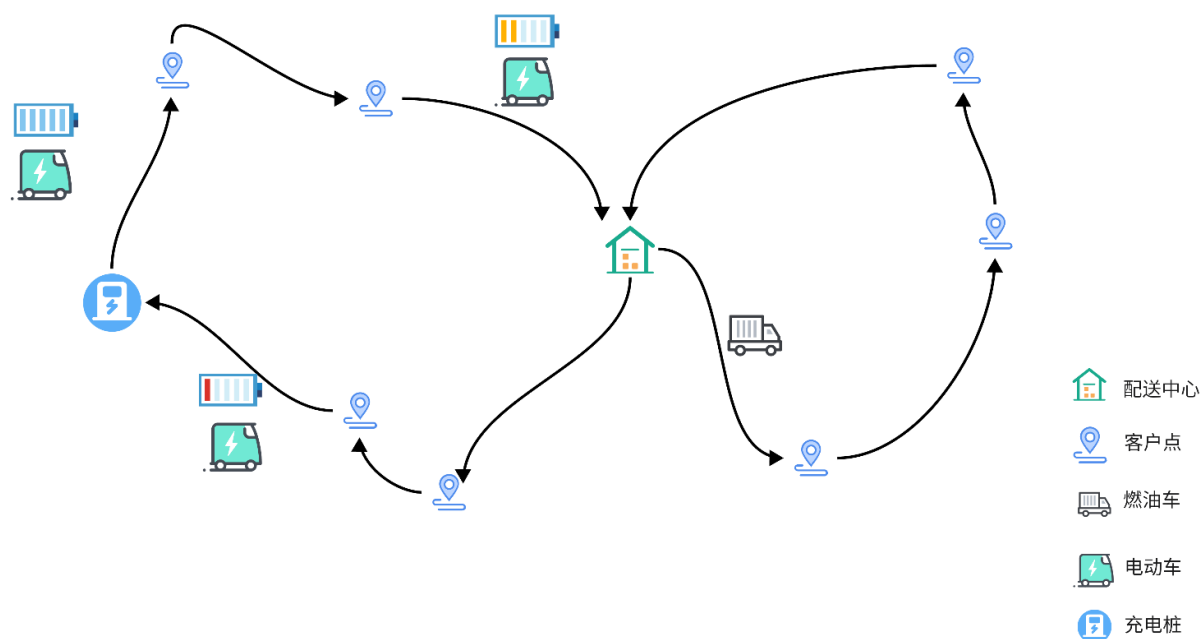


图 4.1 混合车辆配送网络

此外，现有混合车辆调度模型通常只考虑了车辆的调度问题，而忽略了充电设施的分布和电网负载等因素。这些因素也会对混合车辆的调度效率和成本产生影响。例如，充电设施的分布不均匀会导致车辆在充电过程中浪费时间，从而影响调度效率；电网负载过大可能会导致电网不稳定，影响电动车辆的充电速度和充电效果，从而影响调度的质量。

因此，建立一个考虑电量消耗和充电需求的混合车辆调度模型是必要的。该模型应该考虑充电设施的分布和电网负载等因素，以优化调度效率和成本。这样可以保证混合车辆调度的可行性和稳定性，并提高客户的满意度。

4.2 电动汽车特性和能耗影响分析

4.2.1 电动汽车特性分析

新能源汽车有纯电动、混合动力和燃料电池等类型，因为电力设施和技术因素，纯电动汽车的市场份额占主导地位，因此本文研究的混合车辆中的电动车指的是纯电动车型。电动汽车具有动力电池、整车电控、电驱动三大关键技术部件^[52]。这些部件的特性就会造成电动车与燃油车辆的驾驶、续航等方面差异，也使得电动车拥有了环保、噪音低、能量转换率高等长处。

但也存在一些缺点，与本文的研究课题关系密切，需要将这些因素纳入考虑范围。下面将从以下几点叙述：

(1) 续航里程

续航里程一直是购买电动车用户思考的重要因素之一^[53]。目前市场的主流电动车品牌续航大都未超过 500KM，且在使用中，续航通常被车辆速度、载重、温度及驾驶习惯等情况影响，无法达到标定的续航。续航还会因为电池老化而逐渐减小。司机驾驶电车时，会非常关注剩余电量，一旦预估电量无法满足行驶到目的地，就会产生焦虑情绪，希望快速进行电量补充，确保车辆不会在半路抛锚。这就是所谓的“里程焦虑”^[54]。

(2) 基础设施

基础设施决定了电动车的便利性，如果不能方便的充电，人们购买电车的欲望就会降低。这就需要政府能够提供大量的基础设施，如充电站、便民充电桩等^[55]，而且还需考虑高峰期排队充电等问题。构建一个高效率的充电网络至关重要，以较低的成本，提高用户满意度也是充电桩寻址问题的目标^[56]。当前电车的能量补充方式有三种慢充、快充、换电三种模式，这几种模式各有优缺点，具体如表 4.1 所示

表 4.1 充电方式

充电方式	优势	缺点
慢充	充电设施的门槛要求低	充电时间较长，需要数十个小时，不适用于远距离驾驶
快充	短时间内可以补充较多电量，一般用在远距离行驶补充电量	电量达到 80%后，充电速度会降低
换电	速度快，几分钟内可以更换完成	电池型号无法统一。需要储备大量电池，对人员操作要求较高

(3) 电池稳定性变化

电动车的动力来源是电池。市面上现有电池种类有镍镉电池、铅酸电池、金属氢化物镍电池、锂电池。现阶段电动货车普遍采用锂电池作为电源。锂离子电池有着电压高、寿命长、绿色环保等优点，但是不论何种电池，都会受如驾驶模式，加速模式，充电习惯、环境温度等因素影响电池寿命，产生不同的退化现象^[57]。随着使用时间的变长，后期电池的更换成本，也是许多人对电动汽车信心不足的地方。

4.2.2 电动汽车能耗影响因素分析

电池的使用性能受多方面影响，除了和本身材质有关系，例如铅酸电池的循环放电次数在 300 次左右，而锂离子电池达到了 1500-2000 次。电动汽车能耗主要是三部分：驱动车辆的电量，动力传动系统损失的电量，电动汽车所需的辅助装置耗电量^[58]。外界因素如：温度、坡度、风阻和速度等影响的就是此三部分的工作效率，这也是本文考虑电量消耗的研究点。

温度：低温情况下，空气密度会变大，从而增加汽车的行驶阻力，消耗部分电量^[59]。温度对锂电池的使用性能非常显著。温度降低时，电池内阻增加，电势分布变得不均匀，使得部分能量无法利用。温度对电量和续航里程的影响可以概况为以下两点：(1) 电池内阻在低温下增大，使得一部分电量消耗在克服内阻上，用来加热电池。因此当电量相同时，低温会导致能量效率低，可用电量降低；(2) 内阻在低温下升高，电池的放电限制条件会更快满足，使得部分电量不能使用。

坡度：道路坡度会影响汽车做功，遇到陡坡，一部分电能会转化为势能，动能就不足，降低行车里程。行驶在下坡路段时，会回收一些能量，本文研究的车队场景是城市配送服务，路面基本平坦，因此本文在后续章节的电量消耗模型中未考虑此因素。

驾驶员习惯：不同驾驶员的习惯不同，可能导致能耗差别很大。因为驾驶员的操作（如刹车次数和力度、行驶速度）将直接影响车辆的具体能耗。因此，对于电动汽车而言，公司需要制定相应的行车规范，以达到安全和降低成本的效果。

辅助装置：电动汽车的耗能装置有车载空调、车内具有加热功能的器件(座椅、风窗玻璃等)、电池热管理系统、助力转向和灯光等。其中，空调能耗在整车辅助装置能耗中占比较大，因此本文着重考虑空调使用对电量的影响。

4.3 电动汽车非线性能耗估计模型

电动汽车的能量系统与传统燃油车存在较大差异，其能耗也与多种因素相关，如行驶速

4.3.1 基于动力学的能耗模型

根据本文的 4.2.节的内容，可以发现影响电动汽车行驶里程的相关因素及表现，详细因素如图 4.2 所示。电动汽车的电量主要消耗在以下三方面：（1）驱动车辆消耗的电量；（2）动力传动系统损失的电量；（3）操作所需的辅助设备的电量。传统的能耗模型指的是基于动力学原理建立的电量消耗模型，具体是方面（1）的能量计算。电动汽车的动力学模型主要涉及电机、车辆动力系统和轮胎/路面之间的相互作用。这个模型描述了电动汽车的加速、制动、转向、轨迹跟踪等方面的特性。

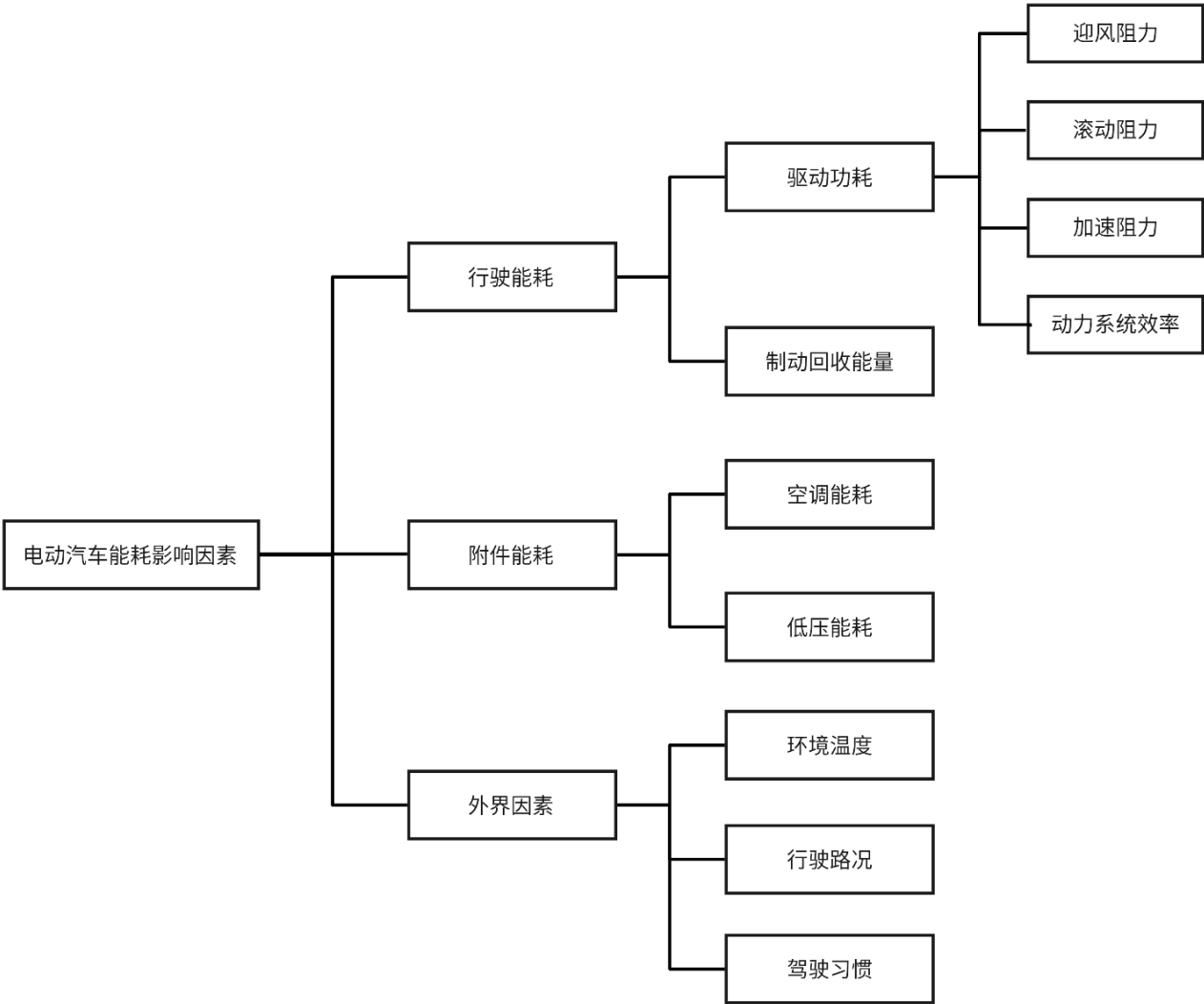


图 4.2 电动汽车能耗影响因素

在电动汽车能耗的研究中。Yi 等人^[60]改进了考虑外部环境因素的能耗预测模型，探讨了风速、滚动阻力、电机功率和温度等因素对电动汽车总能耗的影响。Sautermeister 等人^[61]在

能耗预测中考虑驾驶员行为和交通状态的不确定性，研究了电动汽车剩余里程估计的不确定性，推导了剩余里程的预测方法。Wang 等人^[62]提出了一种考虑电池退化的能耗估计方法。假设电动汽车的电池退化率遵循概率分布，在新加坡收集了 3000 多辆电动出租车的运营数据。结果表明电池退化导致能耗估计误差超过 10%。Hao 等人^[63]在一年内收集了 197 辆相同型号的电动汽车的运行数据，估计不同驾驶行为中的能耗和其他性能。研究发现，冬季电动汽车的实际续航里程为 NEDC 测试周期估计的续航里程的 64%。

本文研究重点是混合车辆的调度问题，为降低能耗估算的复杂度，暂不考虑坡度、制动回收、电池退化内部消耗等因素。本小节主要根据相关研究成果建立基于动力学的车辆的能量消耗公式。将在下一小节中探讨电动汽车关于温度和空调使用额外消耗的电量。

车辆在执行运输任务中，它的货物负载是时刻变化的，因为每到达一客户点都会进行装卸货操作。所以对于计算能量消耗时，载重因素不能固定，每一次计算时都需要更新。综合文献[64-66]中提出的公式，本文构建的能耗模型如公式 4.1 所示，对于传统的燃油车辆的能量消耗计算本公式也适用。

$$E_a = \frac{0.5C_d\rho Av^3}{1000\varepsilon} + \frac{gC_rvm}{1000\varepsilon}$$

(4.1)

参数说明以及具体数值如表 4.2 所示：

表 4.2 公式参数说明及数据值

名称	具体数值	说明
E_a	/	车辆动力学公式消耗的电量
v	50	车速（km/h）
m	2000	车重（kg）
g	9.8	重力常量
ρ	1.293	空气密度（kg/m ³ ）
A	3.6	迎风面积（m ² ）
C_d	0.3	空气动力阻力系数
C_r	0.01	滚动阻力系数
ε	0.8	车辆传动系效率

4.3.2 考虑温度空调因素的能耗模型

利用动力学模型估算电动汽车的行驶能耗，仅仅是从电动车与传统汽车相同的特点出发，但电动汽车在具体使用时的能耗特性，没能够在模型中考虑，如空调、座椅加热等车辆附属设备使用的电量，温度变化导致能耗波动产生的额外消耗等。

在大多数 HVRP 研究中，都假设电动汽车每单位距离的能量消耗率不发生改变。然而，其能量消耗受到诸如驾驶风格（速度和加速度）、车辆负载和天气等条件而变化。其中，环境温度对电动汽车的性能有着显著影响，会直接导致能耗产生波动。据研究，在较冷的天气下，空气密度的增加会导致滚动阻力和空气阻力的增加^[67]。此外，在低温下，传动系统整体效率降低。另一方面，环境温度会影响如空调，座椅加热等车辆辅助设备的使用频率。在高温天气下使用空调的频率会上升。在寒冷天气下，电机的热能无法在冬季提供供暖需求，使用空调、加热器等辅助设备会更加频繁，这会导致能耗增加，从而显著影响续航里程^[68]。

如果忽略环境温度和辅助设备之间的交互作用，将导致在能耗估计和现实情况产生巨大偏差。根据全球领先的专业车队管理公司 Geotab 的研究报告^[69]，通过 102 个不同的品牌/型号电动汽车的 520 万次左右的旅行数据，并按温度分析了车辆平均出行效率。发现无论品牌或型号如何，大多数电动汽车都遵循类似的温度范围曲线。寒冷和炎热的温度都会影响范围，但寒冷的气候影响更大，最坏的情况下将导致续航里程缩水一半以上。电动汽车最适宜的行驶温度在 21.5℃ 左右，在此温度下的行驶里程甚至超过了车辆标定的续航里程。具体的影响关系如图 4.3 所示。

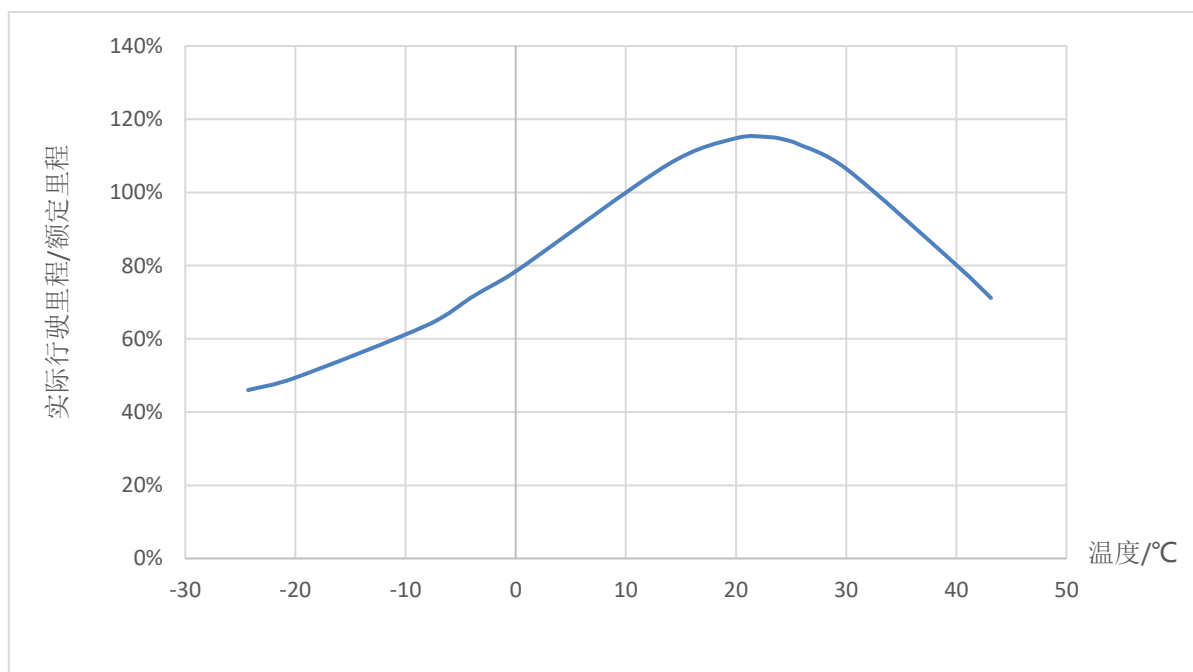


图 4.3 温度对电车的续航里程影响

以江苏地区的每月的气温为例，一年中每月的变化如图 4.4 所示。可以发现全年的温差可达到 34 度。再加之，我国幅员辽阔，纬度跨越较大，所以电动汽车在全国各地的能耗都会有不同的情况。因此在解决车辆调度问题时，考虑外界温度对电动车能耗的影响，具有较强的现实意义。

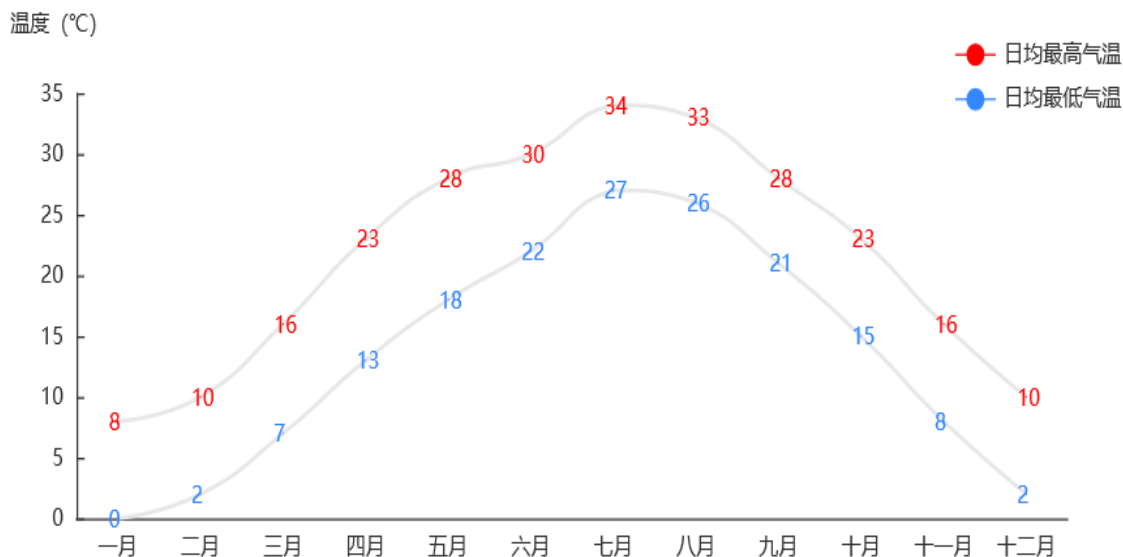


图 4.4 江苏地区全年平均温度变化

电动汽车能耗估算模型可分为三大类：分析模型、统计模型和计算模型^[70]。分析模型基于纵向车辆动力学和效率图估算损耗。根据车辆动力学理论对纵向车辆动力学进行建模，以计算车轮克服相反的力所需的功率。该模型既可用于瞬时能耗估算，也可用于生态路线规划的行程能耗预测。统计模型基于对真实驾驶数据的分析，以得出不同因素与电动汽车能耗之间的经验关系。计算模型基于人工神经网络，以确定许多影响因素与电动汽车能耗之间的关系^[71]。这类模型用于根据输入因素估计电动汽车能耗，其中，根据每个因素的相对重要性，使用训练算法为其确定权重。

估计方法的选择取决于应用目标。一般来说，统计和计算模型比分析模型需要更多的计算工作。然而，它们更准确，因为它们基于数据分析和概率预测。文献^[72]中描述了美国阿贡国家实验室开发的名为“Autonomie”的模拟工具。该仿真工具基于车辆参数和数据分析，用于车辆能耗计算。Autonomie 对测试数据显示出良好的准确性，并被业界广泛使用。

本文在电车基于动力学的电量消耗模型，做了进一步的优化，增加了温度和空调使用的参数。采用文献^{[73][74]}的统计模型估算方式，根据历史数据进行函数拟合，得到一个影响关系式，单位距离（即 km）能耗与温度之间的函数关系可以给出如下：

$$E_t = \begin{cases} 0.3392 - 0.005238T - 0.0001078T^2 + 1.047 \times 10^{-5}T^3 + 3.955 \times 10^{-7}T^4 - 1.362 \times 10^{-8}T^5 - 3.109 \times 10^{-10}T^6, & T < 22 \\ 0.4211 - 0.01627T + 0.0004229T^2, & T \geq 22 \end{cases} \quad (4.2)$$

T 为当日气温。文献[74]使用两段函数进行数据计算,更接近现实数据,因此本文采用该文献拟合出的公式。

空调使用的功耗公式:

$$E_c = \varphi \cdot AC \quad (4.3)$$

$$\varphi = y_{ij} / v \quad (4.4)$$

φ 代表使用时间,由两地距离 y_{ij} 和速度 v 计算而得, AC 是空调的功率。本文设置的空调开启条件是室外温度小于 10°C 时开启制暖模式,大于 30°C 时开启制冷模式,其余时间段禁止开启。功率值采用车辆的额定功率进行计算。

综上,电车的电量消耗公式如下:

$$E = \begin{cases} E_t & 10 \leq T \leq 30 \\ E_t + E_c & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.5)$$

4.4 混合车辆调度模型建立

混合车辆调度问题是一个复杂的优化问题,需要建立适当的数学模型来描述和解决问题。在本小节中,本文将重点介绍模型建立的过程,并阐述模型假设和变量的定义。最后详细说明目标函数和约束条件的构建。

4.4.1 模型假设

模型是对实际问题的简化和抽象,模型的假设条件是对实际问题进行限制和简化的前提条件。在混合车辆调度模型的建立中,假设条件主要包括车队的基本特征和运输任务的基本要求,如车辆的数量、类型、容量、装载方式、行驶速度等,具体如下:

- (1) 配送中心的数量只有一个。
- (2) 每辆车由中心驶出,最后返回中心。
- (3) 客户的数量、地理坐标及货物量均已知。
- (4) 配送过程中客户的需求一次满足,即不拆分需求。
- (5) 中心的车辆发车时,电车为满电状态,油车为满油状态。
- (6) 货物装卸时,电量没有额外的损失。
- (7) 货物流向固定,只收集货物,即取货。
- (8) 车辆匀速行驶。
- (9) 不考虑天气,道路实际状况等。

(10) 车队只存在电车和油车两类车辆，且这两类车型下的具体车辆的所有参数都一致，即只存在两种车型。

(11) 电动车辆采用快充方式，充满电后才能再次出发，去往下一个客户点。同时，整个行车途中只进行一次充电。

4.4.2 数学描述及符号定义

根据 4.3.1 小节的假设，现将模型中的变量及含义如表 4.3 所示。

表 4.3 参数含义

变量名称	含义
A	客户点集合， $A=\{1, 2, 3, \dots, n\}$
O	配送起、终点 $\{0, n+1\}$
E	充电点集合， $F=\{1, 2, 3, \dots, f\}$
V_f	燃油车集合 $\{1, 2, 3, \dots, m\}$
V_e	电动车集合 $\{m+1, m+2, \dots, m+n\}$
V	所有车辆集合 $V_f \cup V_e$
S_1	客户点，配送点和充电点集合 $A \cup O \cup E$
S_2	配送点和客户点集合 $A \cup O$
W_e	电车最大载重
W_f	燃油车最大载重
x_{ijk}	表示车辆 k 是否经过路段 ij $x_{ijk} = \begin{cases} 0 & \text{经过为 1, 否则为 0} \end{cases}$
y_{ij}	i 到 j 的距离
P_f	燃油车每公里行驶成本
P_e	电车每公里行驶成本
E_k	电车每公里耗电量
A_{ik}	车辆 k 到达 i 点的剩余电量
L_{ik}	车辆 k 离开 i 点的剩余电量
E_{ek}	车辆 k 在充电站 e 的充电量
B	电动车电池容量
W_i	用户 i 的货物重量
T	当日气温

4.4.3 目标函数

总配送成本考虑以下三部分：

(1) 车辆行驶费用。行驶费用与行驶距离相关，燃油和电动车辆的每公里行驶成本为 P_f 和 P_e 。

(2) 固定成本：主要是由车辆的购置成本，日常的维修保养费用，司机以及相关管理人员的工资，在本文中此项成本设为常数值。

(3) 充电费用 P_c ：充电费用的金额大小受剩余电量的影响。充电时，车辆的剩余电量越多，则需要支付的充电费越少，等待时间也越少。单位充电成本使用商业电价，每千瓦时 p 元，即 $P_c = p \cdot E_{ek}$ 。

本文的优化目标是，车辆运输过程中的总成本最低。根据要求，解决混合车辆调度问题的目标函数如下：

$$\min z = \sum_{i \in S_1} \sum_{j \in S_1} \sum_{k \in V_e} x_{ijk} \cdot y_{ij} \cdot P_e + \sum_{i \in S_2} \sum_{j \in S_2} \sum_{k \in V_f} x_{ijk} \cdot y_{ij} \cdot P_f + P_c \quad (4.6)$$

4.4.4 约束条件

约束条件是混合车辆调度模型中必不可少的一部分，它们的作用是限制车辆和任务的行为，以确保模型的解是可行和合理的。具体来说，约束条件有以下

(1) 电量约束

防止电车中途抛锚，到达任意点的剩余电量需大于等于 0。公式如下：

$$A_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in S_1, \forall k \in V_e \quad (4.7)$$

采用完全充电策略，电车离开配送中心或充电站应为满电；公式如下：

$$L_{ik} = B \quad \forall i \in 0 \cup E, \forall k \in V_e \quad (4.8)$$

需要计算电车的充电量，用来计算充电费用，其在充电站的充电量由电池容量减去到达充电站时的电量；公式如下：

$$E_{ek} = B - A_{ek} \quad \forall e \in E, \forall k \in V_e \quad (4.9)$$

设定电车装货时不损耗电量，即到达 i 点的电量等于离开 i 点的电量，公式如下：

$$L_{ik} = A_{ik} \quad \forall i \in A, \forall k \in V_e \quad (4.10)$$

电车在行驶过程中电量损耗关系的计算公式如下：

$$A_{jk} = L_{ik} - E \cdot y_{ij} \cdot x_{ijk} + B(1 - x_{ijk}) \quad \forall i \in S_1, \forall j \in S_1, \forall k \in V_e \quad (4.11)$$

(2) 客户点访问约束

车辆到达某个客户点的时候,之后必须从此处离开,以此保证车辆离开配送中心后最终回到中心。

$$\sum_{i \in S_1} \sum_{k \in V} x_{ijk} = \sum_{i \in S_1} \sum_{k \in V} x_{jik} \quad \forall j \in S_1 \quad (4.12)$$

每辆车从中心出发,只执行一条运输路径。

$$\sum_{j \in S_1} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (4.13)$$

根据需求不可拆分的假设,每个用户点只被访问一次,公式如下:

$$\sum_{j \in S_2} \sum_{k \in V_f} x_{ijk} + \sum_{j \in S_1} \sum_{k \in V_e} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in S_1 \quad (4.14)$$

(3) 载重约束

车辆在运输途中的货物总重量不能超过自身的额定载重,否则实际服务过程中,会出现无法满足客户要求的情况,公式如下:

$$\sum_{i \in S_1} W_i \cdot \left(\sum_{j \in S_1} x_{ijk} \right) \leq W_f \quad \forall k \in V_f \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in S_1} W_i \cdot \left(\sum_{j \in S_1} x_{ijk} \right) \leq W_e \quad \forall k \in V_e \quad (4.16)$$

车辆的调度成本计算方法设计如下所示。

Algorithm 1: 车辆调度成本计算

输入: 当日气温

输出: 调度方案

1. 读取所有客户点、充电站、配送中心之间的距离数据;
 2. 根据气温,确定具体的电量消耗公式;
 3. 产生基础路线方案;
 4. **foreach** 路线方案 每个车辆 **do**
 - 5 **if** 车辆类型是电动汽车 **then**
 - 6 **if** 剩余电量可到达下一节点 **then**
 - 7 | 扣除相应电量,更新剩余电量
 - 8 **end**
 - 9 **else**
 - 10 **if** 剩余电量可到达最近的充电站 **then**
 - 11 | 去充电,然后继续前往下一节点
 - 12 **end**
 - 13 **else**
 - 14 | 方案失败;
 - 15 **end**
 - 16 **end**
 - 17 **else if** 车辆类型是燃油车 **then**
 - 18 | 到达下一节点;
 19. **end**
-

4.5 实验仿真

本小节将进行仿真实验，探讨考虑温度，空调使用的情况下，车辆完成运输任务需要的总电量的变化情况。

4.5.1 仿真数据

当前，并没有完全符合混合车辆调度问题特征的标准数据集，需要根据一些标准数据集进行修改。本文选用 VRP 领域的著名数据集 Solomon 算例中的部分，具体是 C1、R1、RC 这三种类型。C1、R1 与 RC1 类型算例中，客户点的分布方式各有不同，因此选取这三种具有一定的代表性。

三类算例中均取 101 编号的数据集，它们的客户点数量均为 100。现均匀抽取其中的 25 个客户点数据。为符合混合车辆的应用场景，增加 4 个充电站的坐标数据，分别是(30, 60)、(30, 15)、(70, 60)、(70, 15)。车队的车辆设为 10 辆。

根据文献[51]，并进行相关调查工作。确定模型中相关参数的具体数值，如表 4.4 所示。

表 4.4 模型参数设置

符号	具体数值 - 单位	说明
W_f	550 - kg	油车载重
W_e	300 - kg	电车载重
P_c	0.42 - 元/km	油车每公里行驶成本
P_e	0.18 - 元/km	电车每公里行驶成本
PF_c	200 - 元	油车固定成本
PF_e	220 - 元	电车固定成本
B	80 - kwh	电车的电池容量
PC	0.6226 - 元/kwh	充电单价
AC	1.62 - kwh	空调功率

4.5.2 结果与分析

本文的实验均使用 win10 操作系统，Intel(R) Core(TM) i5-7300HQ CPU @ 2.50GHz ，16GB 内存的电脑，仿真软件使用 Matlab R2016a 版本。

随机生成两条不同路径,不同数量的电车对总成本的影响如图 4.5 所示。电车数量越多,总成本越低,但随着电车数量的增多,成本影响逐渐降低。同时,受到电池大小的影响,有些路径,即使多次充电也不能完成运输任务,回到中心。加之电车的充电需要一定的时间,充电次数增加,会过多消耗任务完成的总时间。因此,本文根据仿真结果,将电车的数量设为车队总数量的 40%。

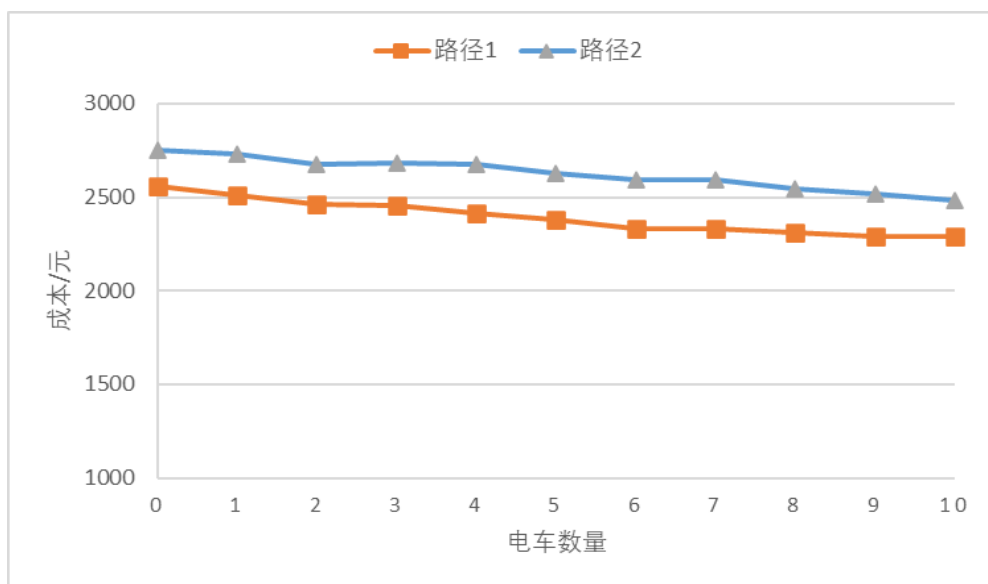


图 4.5 不同电车数量对成本的影响

确定车队配置后,将 4.3 节中的现有电量消耗模型和改进后电量消耗模型,作为电量约束条件,整合到模型中。为体现仿真的可靠性,保持其他数据不变,仅对电量消耗的计算方式进行变化,针对不同的温度,空调开启两种因素进行仿真模拟。未开启空调,温度在 -10°C 到 40°C 范围下。并于文献[51]内的传统电量消耗模型进行对比,两者的运输消耗的总电量如图 4.6 所示。为防止出现数据中断,忽略电池容量的约束。

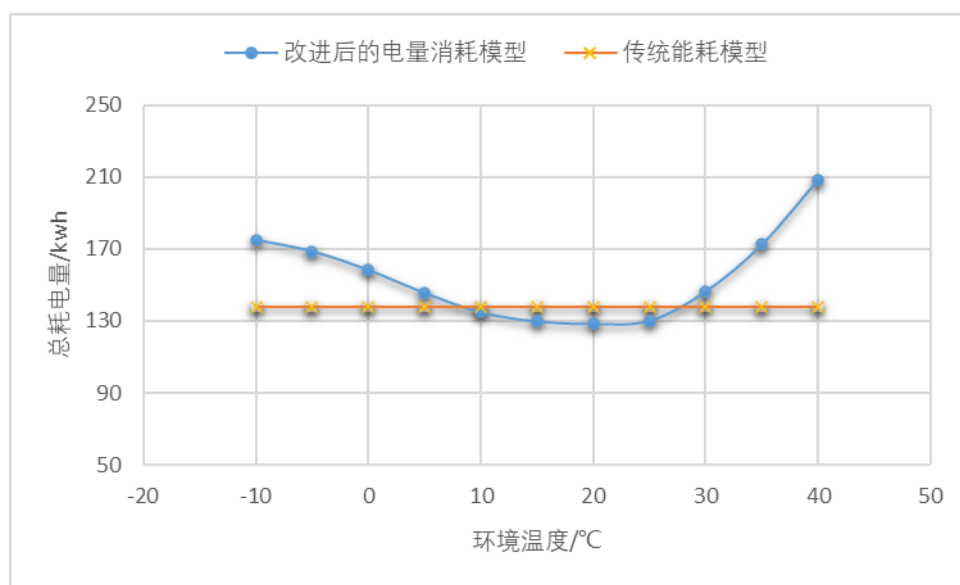


图 4.6 温度对耗电量的影响

根据仿真数据可知,不同的环境温度对总耗电量的影响较大。图 4.6 的结果也符合 4.3.2

小节描述的环境温度对电动汽车的具体影响表现。由图可知，不同温度的能耗差距最大达到了 80kwh 左右。在实际的作业过程中，可能会出现多次访问充电站，增加总成本的情况。甚至可能导致电动车辆中途抛锚，无法完成运输任务的情况。因此，以固定的电量消耗速度来进行车辆调度，与现实情况相比，大概率产生误差。

在温度影响的基础上，再将空调使用纳入考虑范围，探讨温度，空调双重影响下的电量消耗情况。空调开启的温度范围设定为小于 10°C ，大于 30°C 时开启。电量消耗使用额定功率进行计算，暂不考虑冷暖模式的功率差异，车辆的运输路线同图 4.7 的实验。总电量的变量情况如图 4.7 所示。

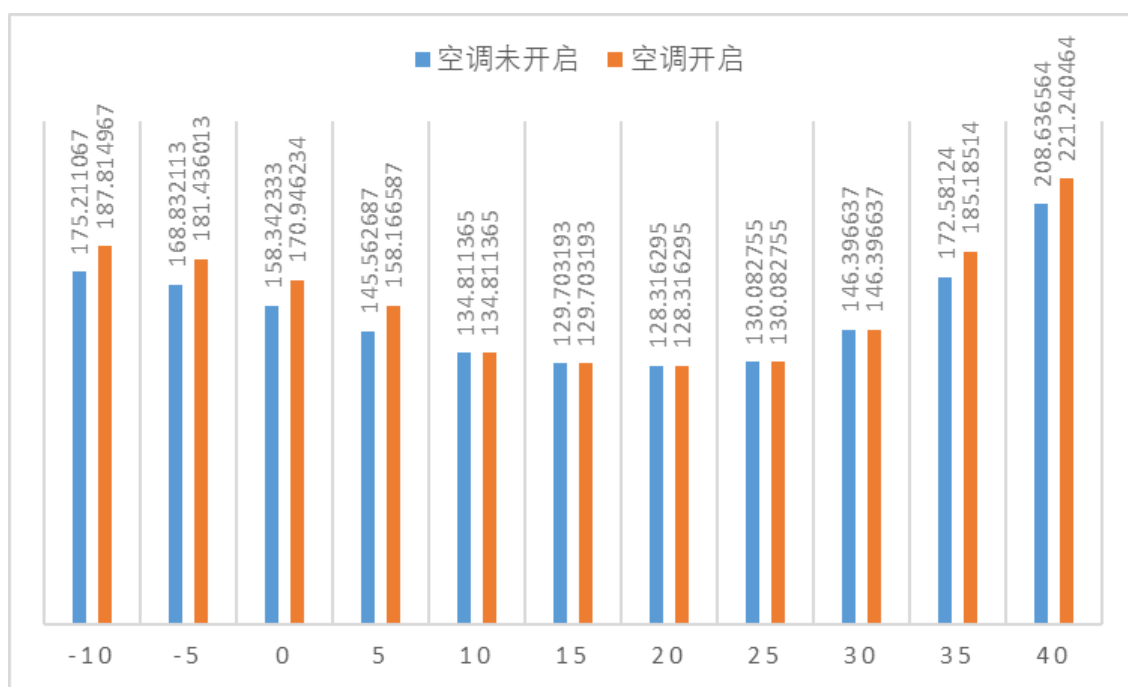


图 4.7 温度和空调对耗电量的影响

综合了空调开启和关闭的两种情况，发现空调使用又额外增加了 12.6kwh 左右的总能耗。其实，温度对电池的放电影响远不及对空调功率的影响。车载空调的运转功率并不是额定功率，在不同温度下，功率会发生变化。因此空调将会对电量消耗产生更大的影响，此因素是更不容忽视的。本文为便于计算，将空调的功率设定为额定功率。

根据上述实验，可以发现，温度和空调使用的影响对电动车辆的影响是显而易见的。本文针对电动车辆特点改进的电量消耗模型也具有一定实际意义。

4.6 本章小结

本章主要介绍了考虑电量消耗的混合车辆调度模型建立。首先，对问题进行了分析，指出了考虑电量消耗的混合车辆调度问题的重要性和难点。接着，分析了电动汽车的特点和能

耗特性，为后续章节的能耗模型建立铺垫了理论基础。然后，介绍了电动汽车非线性能耗估计模型，包括基于动力学的能耗模型和考虑温度空调因素的能耗模型，这些模型是计算车辆电量消耗的重要工具。最后，给出了混合车辆调度模型的建立，包括模型假设、数学描述及符号定义、目标函数和约束条件等方面的内容。并进行了仿真实验，说明了本章模型改进的有效性，可以优化车队调度的结果，降低车队运营成本，提高效率。

第五章 混合车辆调度模型求解算法设计

本文第四章对电动车辆的电量消耗模型进行改进，并将电量消耗模型整合到混合车辆调度模型中。本章在第四章的模型基础上，提出一个改进烟花算法来求解问题模型，对算法的实现流程进行了详细分析，并改进了初始解生成、变异火花生成和种群保留等策略。利用仿真实验对改进前后的效果其进行了测试与分析。

5.1 问题分析

学术界普遍认为 VRP 属于 NP-hard 问题，只有当数据量较少，应用场景并不复杂的情况下才有几率求出最优解。在车队调度问题中，如何合理调配车辆以降低成本一直是研究的热点问题。本文研究的混合车辆调度问题较为复杂，它既包括传统的货车运输问题，又涉及到新兴的电动货车。在该模型中，车队的调度涉及到多个因素，例如各个客户点之间的距离、运输时间、货车容量、电动车电量等。模型的复杂度对不同的求解算法也会产生不一样的影响，因此，选择适合的算法至关重要。

对于此类问题，研究者大都采用启发式算法，并验证了启发式算法面对 VRP 的有效性。FWA 作为一种启发式算法也可以求解复杂的组合优化问题，目前已被应用于许多领域。其主要优点包括全局搜索能力强、具有较好的鲁棒性和适应性等。且操作简单易于实现，因此本文选择 FWA 解决混合车辆调度问题。

根据本文的 2.2 小节，可以了解到 FWA 也存在一些缺点，如算法的收敛速度不快、计算过程需要大量资源等。一些实验表明，传统的 FWA 不能保证找到全局最优解，容易陷入局部最优，此外 FWA 的局部搜索能力较差，需要做出改进。本文将针对这些问题，改进烟花算法使其适应混合车辆调度模型。

文献[16]将灰狼算法与 FWA 进行混合，设计了 FAGWO 算法，在每一次迭代时，根据概率选择采用何种方式进行种群迭代更新，加快了算法的求解速度。文献[75]提出了区域增强的离散多目标烟花算法，用来解决所建立的低碳 VRP 模型。其中包括三种新型的策略，首先，为了增强决策空间的全局搜索和烟花周围区域的局部挖掘，设计了一个局部映射爆炸算子。其次，为保持种群多样性，设计了一种混合变异算子来调整子行程。第三，为了提高算法的求解精度，给出了一种目标驱动的扩展搜索算子。文献[76]提出了一种称为指数衰减爆炸的爆炸算子，以增强烟花算法的局部搜索能力，所提出的方法进一步引入了引导突变的思想。该

算法被称为指数衰减烟花算法 (EDFWA)。实验结果表明, 与专门为大规模问题设计的多个具有代表性的优化器相比, EDFWA 不仅在低维情况下效果显著, 在高维度问题上也表现出了强大的搜索能力。文献[77]提出了混合粒子群的烟花算法 (FW-PSO), 集中了两者的优点, 算法的收敛速度得到提升。

本文主要针对混合车辆调度模型中的配送路线问题, 结合改进后的烟花算法和电量动态消耗因素, 提出一种新的调度策略。通过引入一个初始解, 结合贪心算法, 求解出更加优质的配送路线。同时, 本文还使用 MATLAB 进行了大量的数值实验, 并与传统优化算法、其他文献改进的 FWA 算法进行了对比, 结果表明本文提出的改进算法能够有效地解决混合车辆调度问题, 且相较于同类算法, 具有一定的优势。

5.2 算法设计

5.2.1 算法总体流程

烟花算法模拟了烟花爆炸的过程, 通过不断爆炸和聚合, 寻找最优解。与其他优化算法相比, 烟花算法在全局搜索和收敛速度方面比较优秀, 在某些优化问题上有很好的表现。

算法具体的步骤说明如下:

(1) 初始化: 规定算法的相关参数, 有烟花数量、变异数量、迭代次数、每个烟花的火花数量等。随机初始化爆竹位置: 生成初始的爆竹位置, 可以使用随机数或其他方法。

(2) 计算烟花适应度: 根据烟花位置计算其适应度, 适应度函数根据具体问题而定。适应度值关系到每个烟花的产生的火花质量。适应度越高, 爆炸能量越大。

在本文中, 适应度值反映了实际对应路径的所有信息(包括成本、总配送距离、约束处理情况), 所以本方法定义适应度值的计算公式如下:

$$f(i) = Z \quad (5.1)$$

式中, Z 为模型中的目标函数, $f(i)$ 即某个烟花所对应的适应度值, $f(i)$ 越小, 被选中的几率就越大;

(3) 爆炸操作: 按照每个烟花的适应度值进行爆炸操作。在爆炸时, 会生成若干个火花, 每个烟花产生的火花的数目和位置与自身适应度有一定的关系。为了体现不同的烟花的差异, 适应值较高的种群, 生成的火花数较多, 而适应值低的火花数较少, 爆炸半径和产生的火花数量的计算公式为:

$$R_i = \hat{R} \times \frac{f(i) - Y_{min} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(i) - Y_{min}) + \varepsilon} \quad (5.2)$$

$$S_i = m \times \frac{Y_{max} - f(i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (Y_{max} - f(i)) + \varepsilon} \quad (5.3)$$

式中, R_i 为烟花 i 的爆炸半径, S_i 为烟花 i 产生的火花数, \hat{R} 和 m 是常数, 用来控制爆炸半径和数目的大小, Y_{min} , Y_{max} 代表烟花的最小和最大适应值, $f(i)$ 是烟花 i 的适应度, ε 是数值很小的常数, 是为避免分母为 0 无法计算的情况。

为防止烟花产生的火花数受适应度值的影响, 分布过于不均衡。需要通过映射关系将其修正。对生成过程设置一个上下边界, 具体的规则如下:

$$\hat{S}_i = \begin{cases} S_{min}, & S_i < S_{min} \\ S_i, & S_{min} \leq S_i \leq S_{max} \\ S_{max}, & S_i > S_{max} \end{cases} \quad (5.4)$$

式中, S_{min} 和 S_{max} 为预先设置的最大、最小的爆炸火花数量。

为更清晰描述爆炸操作, 下面就烟花 x_i 的变化过程做如下说明:

烟花 x_i 是一个行向量, 维度为 n , 解的形式是 $(x_{i1}, x_{i1}, \dots, x_{in})$, 根据公式算出爆炸半径 R_i 和火花数目 S_i 。对于烟花 x_i 只有爆炸 $1 \sim R_i$ 次才会产生下一代的火花。根据概率选定 $u (1 \leq u \leq n)$ 个烟花位置分量, 对选取出的位置分量 $k (k=1, 2, \dots, n)$, 依照公式 5.5 进行位置偏移, 得到不同的爆炸火花。

$$x_{ik} = x_{ik} + R_i \times U(-1, 1) \quad (5.5)$$

其中, $U(-1, 1)$ 是区间 $[-1, 1]$ 之间的均匀分布。

(4) 在进行爆炸和变异操作后, 将父代, 子代烟花进行合并产生新的种群。一般是使用“精英”策略筛选。假设候选种群数为 K , 烟花种群为 N 。先选择适应度最优的烟花保留, 接着在余下的 $K - 1$ 个种群中筛选出 $N - 1$ 个烟花。计算每个种群与其他种群的距离之和, 最后利用式 5.6 确定选择概率。

$$p(x_i) = \frac{D(x_i)}{\sum_{j=1}^1 D(x_j)} \quad (5.6)$$

$$D(x_i) = \sum_{x_i \in K} \|x_i - x_j\| \quad (5.7)$$

式中, $D(x_i)$ 是烟花 x_i 与其他烟花的距离总和;

(5) 算法终止: 如果满足终止条件, 算法结束; 否则回到步骤 (2) 继续执行。

本模型的改进 FWA 求解过程的流程图如 5.1 所示

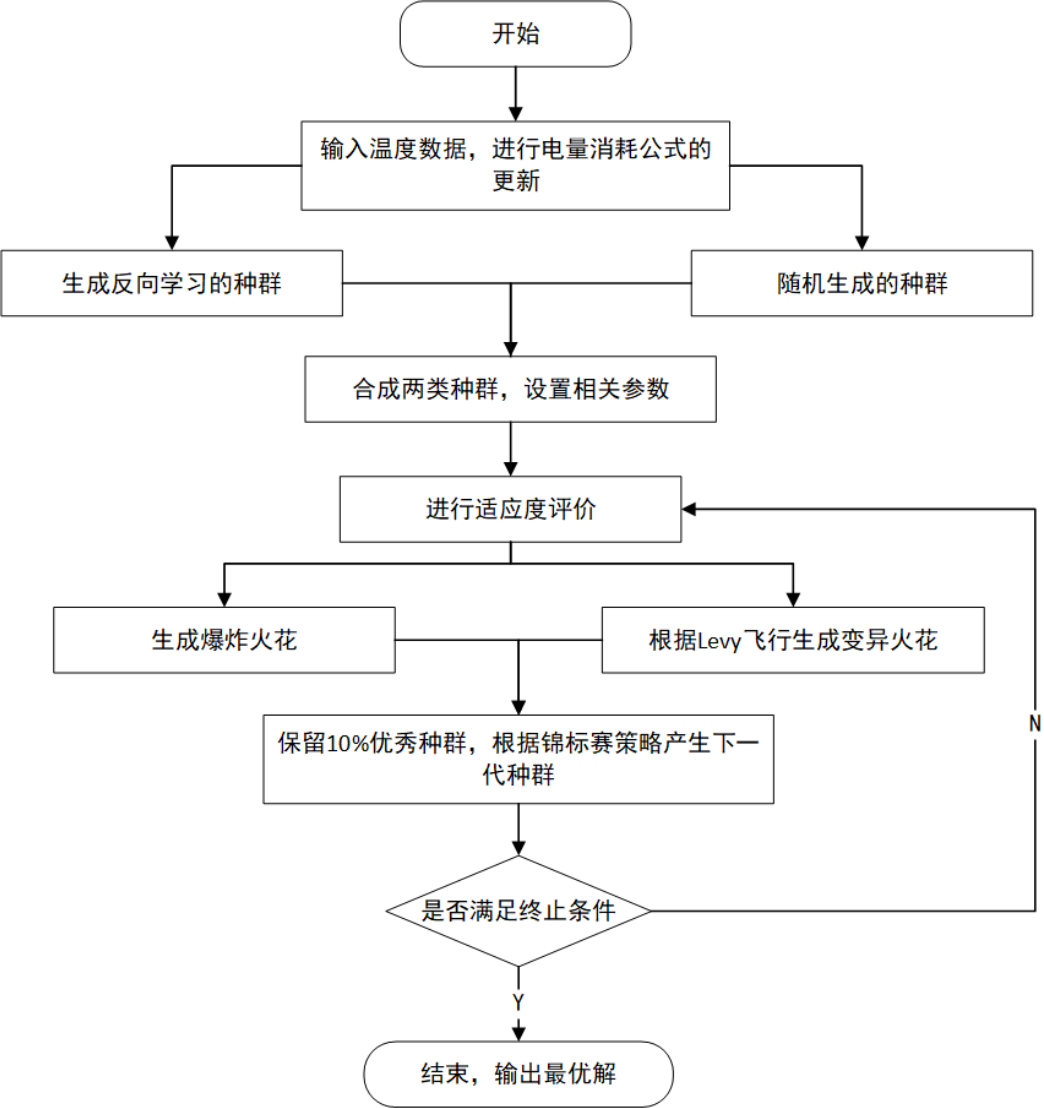


图 5.1 模型求解流程

5.2.2 初始解生成优化

算法求解时，需要设置最初的种群，一般使用随机数生成方式。但这样的方式会使种群分布不稳定，降低种群多样性。而种群质量与算法收敛速度有一定的关联，因此采用反向学习策略^[78]优化初始化步骤。

现将反向种群的生成原理进行简要说明：设 X 是一个解，维度是 n ， $X=|x_1, x_2..., x_n|$ ， $x_i \in [a, b]$ ， $i = 1, 2, ..., n$ 。则其反向种群为 X'

$$\begin{cases} X' = (x'_1, x'_2, ..., x'_n) \\ x'_i = a + b - x_i \end{cases}$$

(5.8)

生成初始种群的基本步骤如下：

- 步骤 1，随机产生一个初始种群,并根据式(5.8)得到对应的反向种群；
- 步骤 2，计算初始种群，反向种群的适应值；

步骤 3, 比较两类种群中相关个体的适应度值, 适应度值更优的个体将会保留到最终的初始种群。

经过反向学习优化后的种群, 既增加了多样性, 又具备了优秀个体, 降低算法陷入局部最优的可能, 提升运算速度。

5.2.3 变异策略优化

FWA 采用的是高斯变异策略, 实现较为简单, 易于理解和应用。但是高斯变异产生的步长较短, 不易跳出局部最优,

为防止陷入局部最优的问题, 引入 Levy 飞行策略产生变异火花。Levy 飞行是一种随机行走策略。可以引入较大的扰动, 有助于跳出局部最优解, 也可以根据相关参数, 自适应地调整扰动大小, 提高搜索效率^[79]。其公式如下:

$$Levy(\beta) = \frac{\mu}{|v|^{-\beta}} \quad (5.9)$$

式中, $Levy(\beta)$ 为服从参数 β 的 Levy 分布, $0 < \beta < 2$, μ 服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布, v 服从 $N(0, 1)$ 分布, σ 可以下列公式计算得到:

$$\sigma = \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\beta \Gamma(\frac{1+\beta}{2}) 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \quad (5.10)$$

其中, Γ 代表伽马分布函数, β 的值为 1.5。

原 FWA 变异操作会替换整个解的变量, 这可能导致较优解的相关信息不能传递到下一代种群, 导致收敛变慢。本文在改进时, 选择随机选择几个维度进行变异, 不替换全部变量。优化变异策略后, 为进一步发掘算法的全局搜索能力。借鉴了遗传算法的交换片段思想, 将变异后得到的解, 再多进行一次变量交换, 以增加种群多样性。

5.2.4 选择策略优化

为便于进行相关的说明, 本文对相关参数做出定义。一次运算的解 (即种群) 的个数为 S , 执行爆炸, 变异操作, 然后产生更多的火花, 火花数目为 K 。最后, 运用一定的选择策略留下 S 个烟花, 形成下一代种群。传统 FWA 做法是: 先选择 K 个火花中最优的一个解, 即适应度值最小对应的解。然后根据轮盘赌规则, 在剩余 $K-1$ 个解中选择 $S-1$ 个烟花组成下一代群体。

该策略存在一个问题, 即当种群数较大时, 个体较优的数量不少, 只选择一个, 会浪费

其他种群的优越性。且轮盘赌方式，还需计算各个解之间的距离，需要一定的运算时间。因此，本文先保留 10%的较优解，剩余的种群根据锦标赛选择策略，随机选择解进行比较保留，不仅可以加快运算速度，还保证了种群的多样性。

5.3 实验仿真

为了检验改进烟花算法对实际问题求解的效果。将借助 Matlab 对其进行了仿真实验，采用相关数据集，使用多种不同的优化算法对混合车辆调度模型进行求解，对比各自的实验结果，得出相关结论。

5.3.1 仿真数据及方案流程

选取 Solomon 算例中的 C1、R1 与 RC1 类型数据集中的 101 组，代表了不同分布形式的客户点。根据实际情况，本文使用了不同规模的客户数量来检验算法的可靠性。客户点数量分为 25，50，100。由于原数据集中，不存在充电站坐标。因此为三种规模的客户点配套的充电站数量分别是 4，6，10 个。车队配置根据 4.5 节的仿真结果，电动车与燃油车的数量比定为 4：6。具体的情况如表 5.1 所示。

表 5.1 数据集情况

客户点数量	充电站数量	电动汽车数量	燃油车数量
25	4	4	6
50	6	4	6
100	10	6	10

在进行计算前，需要对数据集进行预处理。充电站的具体坐标信息采用随机生成的方式，客户点信息，采用在数据集中均匀抽取的方式组成。在计算适应度值的时候，将中心、客户点、充电站三类坐标的信息融合在一起，组合的形式是：（中心，客户点、充电站）。如 25 个客户点的数据集，附加 1 个中心，4 个充电站，共计 30 个坐标信息。

采用欧氏距离的计算方式，计算出各个点之间的距离。并且计算出中心和客户点距离最近的充电站序号。预先存储为 mat 文件，供迭代计算时直接使用。燃油车的行驶不受油量约束，其费用直接按里程进行计算。电动汽车在完成运输任务的途中允许充电一次，具体的模型求解过程的伪代码如下：

Algorithm 2: 改进烟花算法

Input: n 维初始解

Output: 最优解

1 根据初始解生成对应的反向学习种群;

2 计算种群的适应度值;

3 保留一半适应度最好的种群;

4 while t 终止条件未满足 do

5 根据适合度值计算每个种群的爆炸半径和爆炸次数;

6 根据爆炸半径和爆炸次数生成更多的种群;

7 选择一定数量的种群进行 Levy 飞行变异操作;

8 计算所有群体的适应度函数;

9 通过选择最好的 10% 的种群并对剩余种群使用锦标赛选择策略,

保持种群规模不变;

10 end

11 计算出最佳的路径方案;

5.3.2 改进 FWA 的仿真结果与分析

仿真环境同本文 4.5 小节。改进的 FWA 的相关参数设置为：种群数 50，变异种群数 30，迭代次数 500，总评价次数为 15000。爆炸火花数 50，产生火花的边界范围是 2 到 50，环境温度设置为 22℃。数据集使用 C1 类型改编的 25 个客户点规模。针对原 FWA 存在的搜索精度不足等问题，在做出变异策略优化的等改进措施后。本文选取了几种近几年论文里用的比较多的算法，对混合调度模型进行求解对比，以检验改进措施的有效性。

首先，本文将改进的 FWA 算法（下称改进 FWA），与传统 FWA 算法、FAGWO 算法及 FW-PSO 算法进行对比测试。四种算法运行 20 次取测试结果的平均值，具体的运行结果如表 5.2 所示，算法的收敛情况如图 5.2 所示。

表 5.2 不同改进的烟花算法的运行情况

算法名称	运行时间/s	目标值
FWA	11.8882	602.8140
改进 FWA	9.70247	548.2504
FWGWO	17.5313	537.0314
FW-PSO	22.7969	556.8875

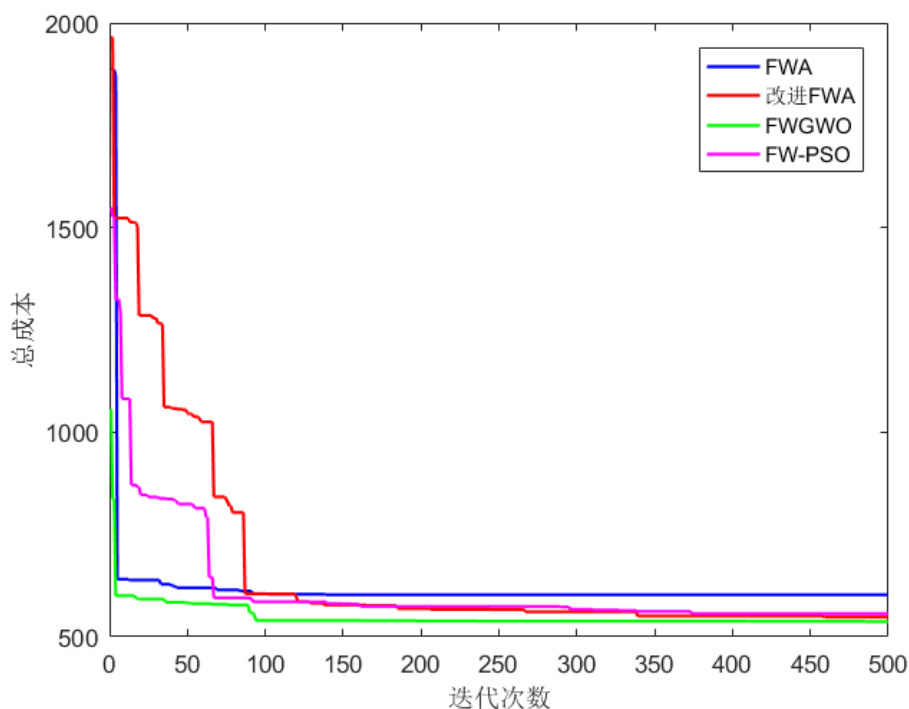


图 5.2 FWA 不同改进的效果对比

从实验数据中可以看出，四类算法的收敛速度差异不大。在运行时间方面，改进 FWA 的运行时间最短，为 9.70247 秒，FWA 次之，为 11.8882 秒。改进 FWA 节省的时间是选择策略的变化，不仅减短了运算时间，还提升了求解精度，说明了本文改进措施的有效性。FWGWO 和 FW-PSO 的运行时间较长，分别为 17.5313 秒和 22.7969 秒。因此，可以得出结论：改进 FWA 的计算效率最高。从目标值来看，四种算法得到的目标值各不相同，其中改进 FWA 和 FWGWO 的目标值相差最小，结果最好的是 FWGWO。但综合运行时间的因素可以得出结论：改进 FWA 的求解效果最好。

为更加全面的判断 FWA 的求解效果，本文增加了算法对比范围，选取了文献[80]和文献[81]中改进的遗传算法（简称 GA）和离散粒子群算法（简称 PSO），与本文改进的 FWA 进行，实验结果如图 5.3 所示。

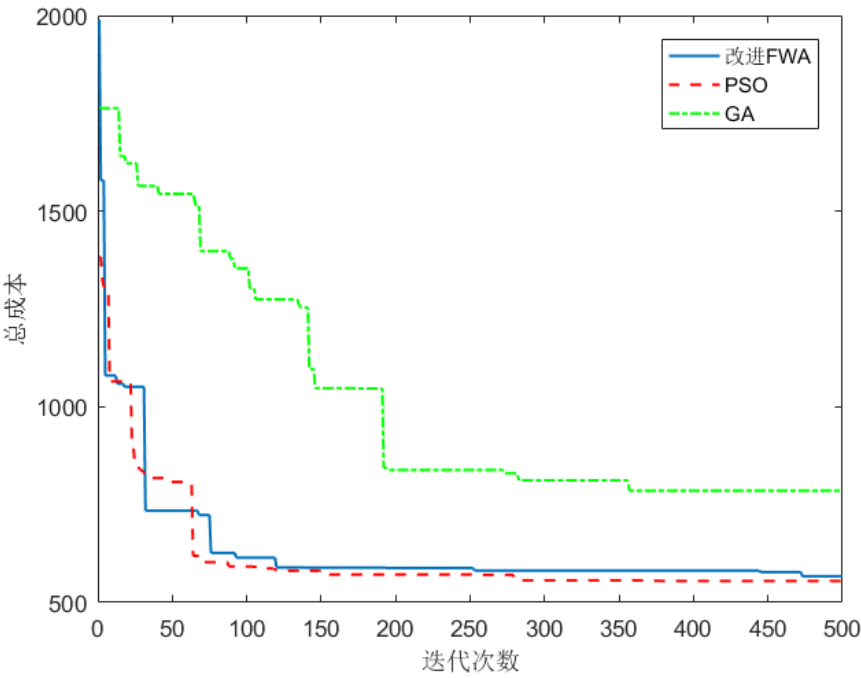


图 5.3 不同算法的求解效果对比

算法运行时间，最终的函数值等数据由各自执 20 次以后，取平均值得到。具体如表 5.3 所示。

表 5.3 不同算法的运行情况

算法名称	运行时间/s	目标值
改进 FWA	10.9082	566.8905
PSO	23.5469	554.6356
GA	35.6875	785.5542

根据相关的仿真实验可以发现，改进后 FWA 算法求解速度在三类算法中 fastest，求解精度和 PSO 差距不大，略低于 PSO。但运行时间只有 PSO 的一半不到，将算法应用到系统时，响应时间是评估系统的一大重要指标。因此，改进 FWA 的综合性能要优于 PSO。而 GA 对本文的调度模型求解效果不佳，也间接说明了群智能算法的特点：在某些特定场景下的性能会发生变化。在收敛速度方面，100 代左右，改进 FWA 和 PSO 已基本收敛。

5.3.3 不同规模数据集的仿真结果与分析

5.3.2 节的客户点规模是 25，为进一步测试改进 FWA 的求解效率。本文使用预处理过的三类数据集。每类数据集都筛选出客户点规模分别为 50，100 的数据。使用在 25 客户点规模测试效果较好的 PSO，FWGWO 与改进 FWA 进行对比，环境温度设为 22℃。相关的实验数据如下所示。

表 5.4 不同规模数据集仿真结果

数据集	客户点数量	算法	运行时间/s	总成本/元
C1	50	改进 FWA	18.8354	1275.203
		PSO	35.6094	1395.081
		FWGWO	25.375	1290.433
	100	改进 FWA	26.4531	2704.715
		PSO	50.8906	2742.587
		FWGWO	37.1719	2528.108
R1	50	改进 FWA	16.658	1263.38
		PSO	30.3906	1268.467
		FWGWO	23.3906	1209.676
	100	改进 FWA	26.0312	2676.673
		PSO	49.5469	2473.353
		FWGWO	34.8281	2404.541
RC1	50	改进 FWA	15.5914	1237.449
		PSO	28.2344	1268.832
		FWGWO	21.2188	1191.882
	100	改进 FWA	26.8565	2985.407
		PSO	51.8594	3016.945
		FWGWO	40.0156	2787.323

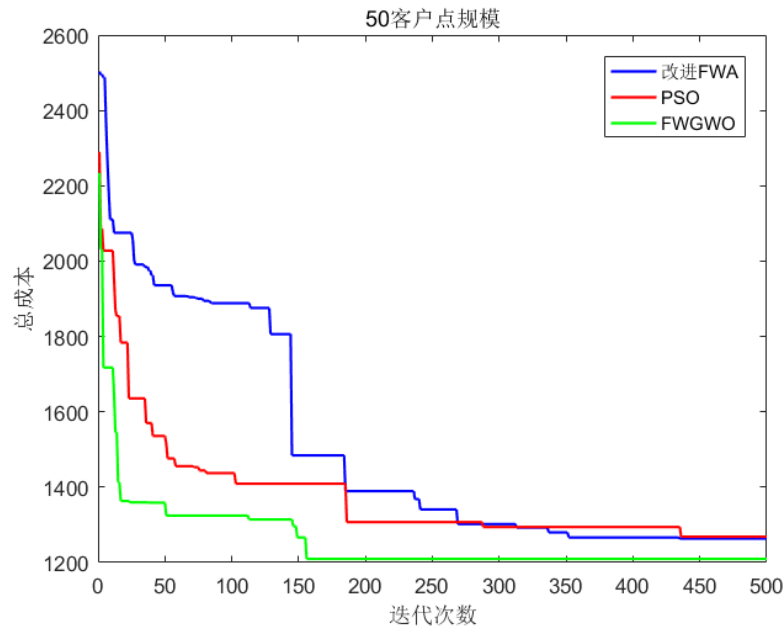


图 5.4 客户点 50 的求解效果对比

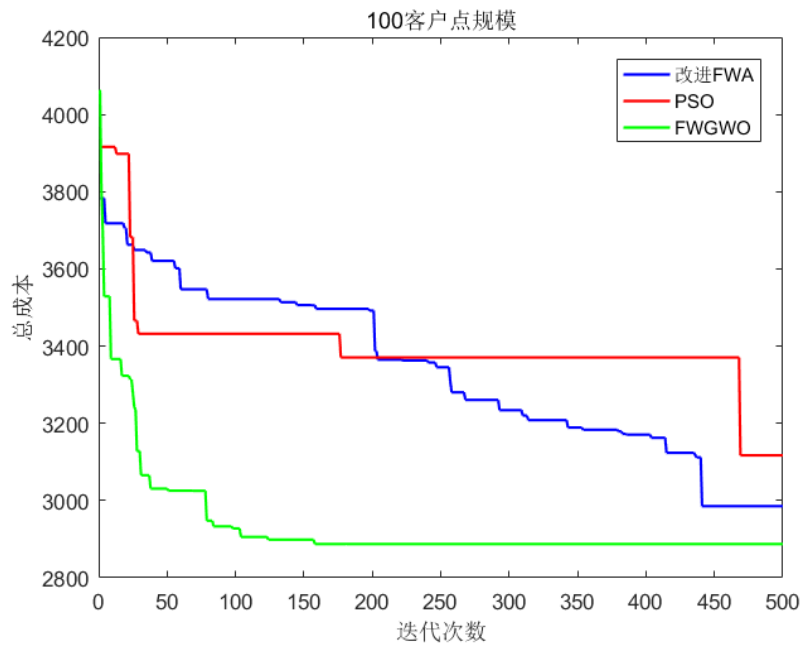


图 5.5 客户点 100 的求解效果对比

实验结果包含了三种算法（改进 FWA，PSO，FWGWO）在三个不同数据集（C1，R1，RC1）中处理不同规模（50 和 100）时的运行时间和总成本。通过这个数据表格，可以发现随着数据集规模的增加，所有算法的运行时间和总成本都有所增加。改进 FWA 算法的运行时间在所有数据集和规模中都是最短的，PSO 算法的运行时间是最长的。在 C1 和 R1 数据集中，改进 FWA 算法的总成本都是最低的，而在 RC1 数据集中，FWGWO 算法的总成本最低。

从实验结果来看，改进 FWA 算法在处理混合车辆调度问题时表现出了较好的性能。在所有的数据集和规模中，改进 FWA 算法都取得了最佳的或次佳的总成本结果，并且在所有算法中，它的运行时间都是最短的。这表明改进 FWA 具有较高的求解效率和精度。因此，在类似

的问题中，改进 FWA 算法可能是一个可靠的求解方法。

5.3.4 不同温度的仿真结果与分析

将环境因素加入到算法求解中，观察环境温度对车辆调度方案的影响。因为原始数据中客户需求量较小，导致结果差异并不明显，为增加结果的多样性，对客户点的需求量进行了修改，选用 25 客户点的数据，车辆数为 10，其中电车 4 辆，车代号是 1-4，油车 6 辆，车代号是 5-10.不同温度下，车辆调度方案的结果如下所示。

表 5.5 不同温度仿真结果

温度/℃	电车数量	燃油车数量	充电次数	行驶距离/km	总成本/元
-10	2	3	0	760.33	1286.305
0	3	2	0	758.83	1262.567
10	2	2	0	771.553	1172.085
20	3	1	1	809.639	1050.048
30	2	2	0	725.402	1120.132
40	1	3	1	833.866	1150.136

不同温度下，车辆行驶路线如表 5.6 所示。其中车代号指的是具体哪一辆车，路线方案用连接号表示。以路线“0-6-9-13--0”为例，指车辆从配送点 0 出发，依次到达客户点 6，客户点 9，客户点 13，最终回到配送站 0。

表 5.6 不同温度的路径方案

温度	车代号	路线
-10	2	0 - 8 - 12 - 15 - 13 - 14 - 0
	4	0 - 19- 16 - 23 - 20 - 22 - 0
	5	0 - 24 - 17 - 9 - 11 - 10 - 0
	6	0 -21 - 25 - 26 - 4 - 2 - 0
	8	0 - 6 - 5 - 7 - 18 - 3 - 1- 0
10	2	0- 17- 16 - 12- 10 -2- 0
	4	0-9-6-24-11-3-7-0
	7	0-5-8-18-23-25-26-0
	9	0-14-15-20-22-21-19-13-0
20	1	0-5-23-24-14-2-12-0
	2	0-6-9-13-3-7-0

	4	0-26-25-17-19-4-8-0
	8	0-11-10-16-18-21-20-22-15-0
40	2	0-18-12-14-11-24-23-7-16-0
	7	0-19-20-22-25-26-2-4-10-15-0
	8	0-6-9-8-5-13-0
	9	0-17-21-3-1-0

温度较低时，电车出行受到影响，服务的客户点数量较少，燃油车承担更多的任务。由于车辆最终要回到中心，所以，车辆会走到更远的地方，总行驶距离便会上升。当温度较高时，车载空调耗电增多，低成本方案会少用电动车。只有在适宜温度的范围，多使用电动车才能降低成本，如果超出了适宜范围，优先选择电车会导致车辆频繁充电，且需要多辆车协同，升高了成本。

因此，本文可以得出结论：在适宜的温度范围，多使用电动汽车可以降低成本，超出适宜范围，应优先使用燃油车，搭配少量电动车辆。

5.4 本章小结

本章主要介绍了改进烟花算法在混合车辆调度模型中的应用。首先，对烟花算法进行了分析，指出了其存在的不足之处。接着，根据模型的特点和需求，对算法进行了设计和改进，包括初始解生成、变异策略、选择策略等方面的优化。最后，利用仿真工具进行实验，对实验结果进行了详细的分析和解释，证明了改进 FWA 的优越性。通过本章的研究，可以证明改进的烟花算法在混合车辆调度模型中具有很好的应用前景。

第六章 混合车辆调度系统实现

本章将说明混合车辆调度系统的开发过程，包括开发环境、功能模块编写和测试。根据本文第三章的设计要求，实现相应的功能。系统主要的功能模块有登录模块、订单模块、车辆调度模块和车队管理模块。其中，登录模块实现了用户身份验证和访问权限控制；订单管理模块实现了订单的查询、修改和删除；路径规划模块实现了车辆调度的功能；车队管理模块实现了车辆状态的实时监控和调度。

6.1 系统开发环境

根据目前业内的主流技术体系，经过调研分析工作，了解相关知识。本系统采用 Java 和 Vue.js 完成系统的实际开发工作，这些技术可以提高系统的开发效率。本次开发的相关环境信息如表 6.1 所示。

表 6.1 开发环境信息

技术/工具	说明
Vue.js	Web 端使用的 js 库
Java	服务端的开发语言
Git	版本控制
Element-UI	UI 组件库
IDEA	IDE
VsCode	编辑器
Windows 10	操作系统
MySQL	数据库
Spring Boot	Java 框架
16G	系统内存
i5-7300HQ	系统处理器

6.2 系统功能模块实现

6.2.1 登录模块

该模块主要实现车辆调度系统的登录功能,因为涉及到三类用户,每类用户的权限不同。所以,登录模块需要正确辨别用户信息。通过 `User` 类表示系统中的用户,关联了权限、角色及账号等信息。`Permission` 类表示系统中的权限,包括访问、编辑、删除等不同类型权限。每个权限与一个或多个角色相关联。实现登录功能,还需要 `LoginService`, `UserService`, `PermissionService` 进行底层的数据查询。

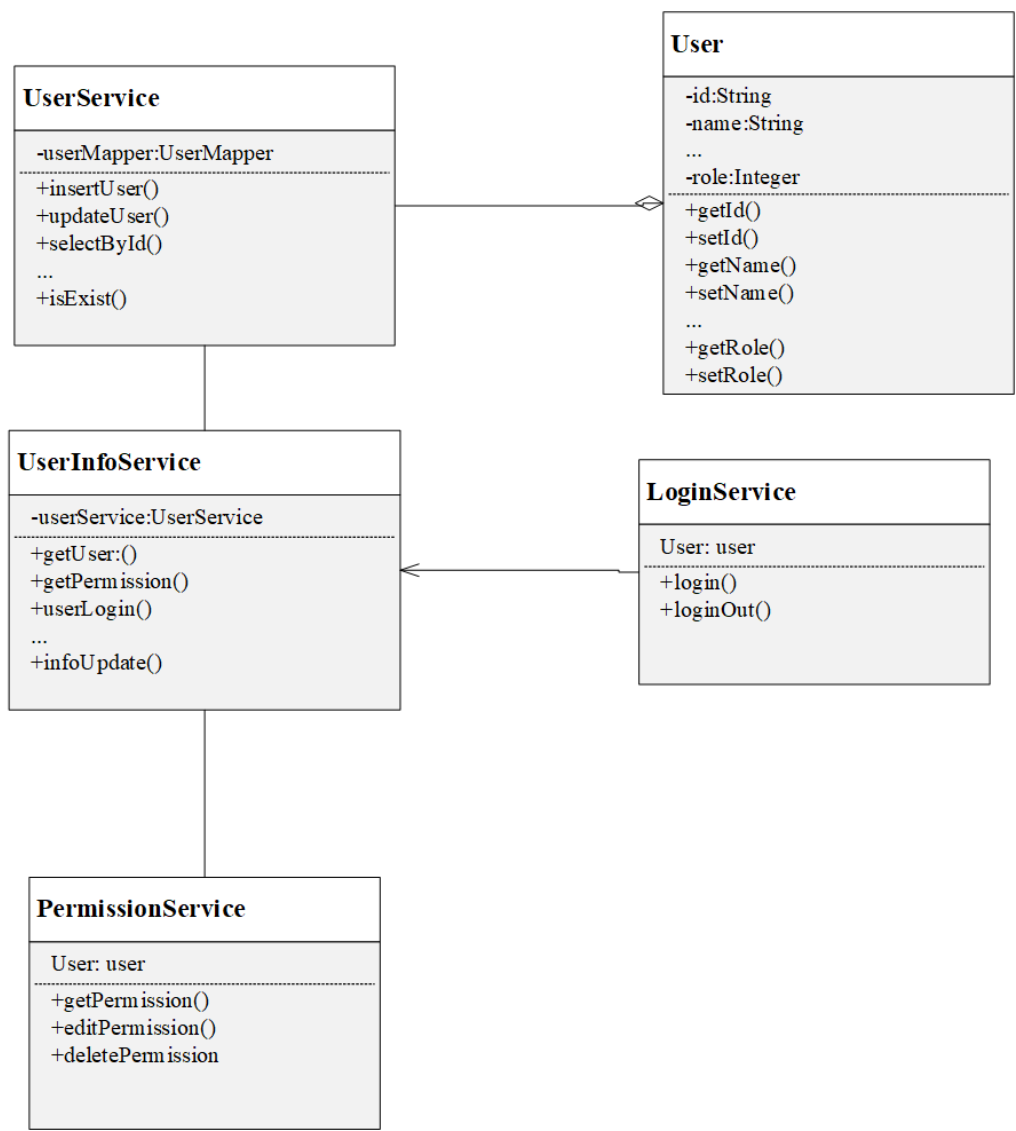


图 6.1 登录功能类图

本模块实现了用户的登录功能。用户在登录时需要填写账号信息。系统会校验用户输入的信息并进行身份认证,如信息有误,则进行提示。认证成功后将服务端返回的凭证信息存储于客户端。本模块采用 JWT 令牌机制实现用户身份认证,提高系统的安全性和稳定性。登

录功能的具体流程如图 6.2 所示。

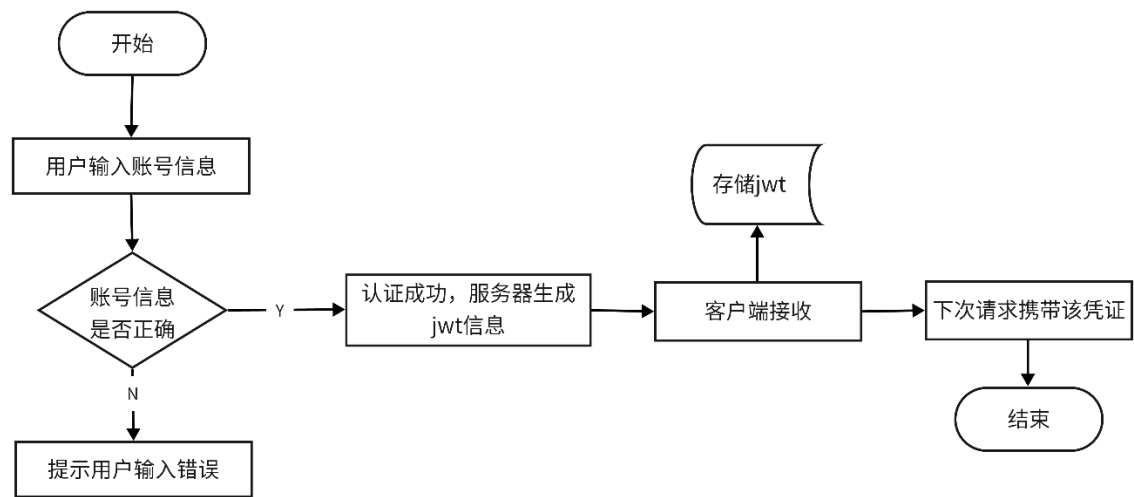


图 6.2 登录流程

6.2.2 订单管理模块

本模块实现了订单的有关功能。用户在提交订单时需要填写姓名、联系方式、货物信息等基本情况。创建成功后生成订单号。用户可以在系统中查询和管理自己最新的订单信息，调度员选择有关订单进行调度任务计算，具体操作的时序图如下所示。

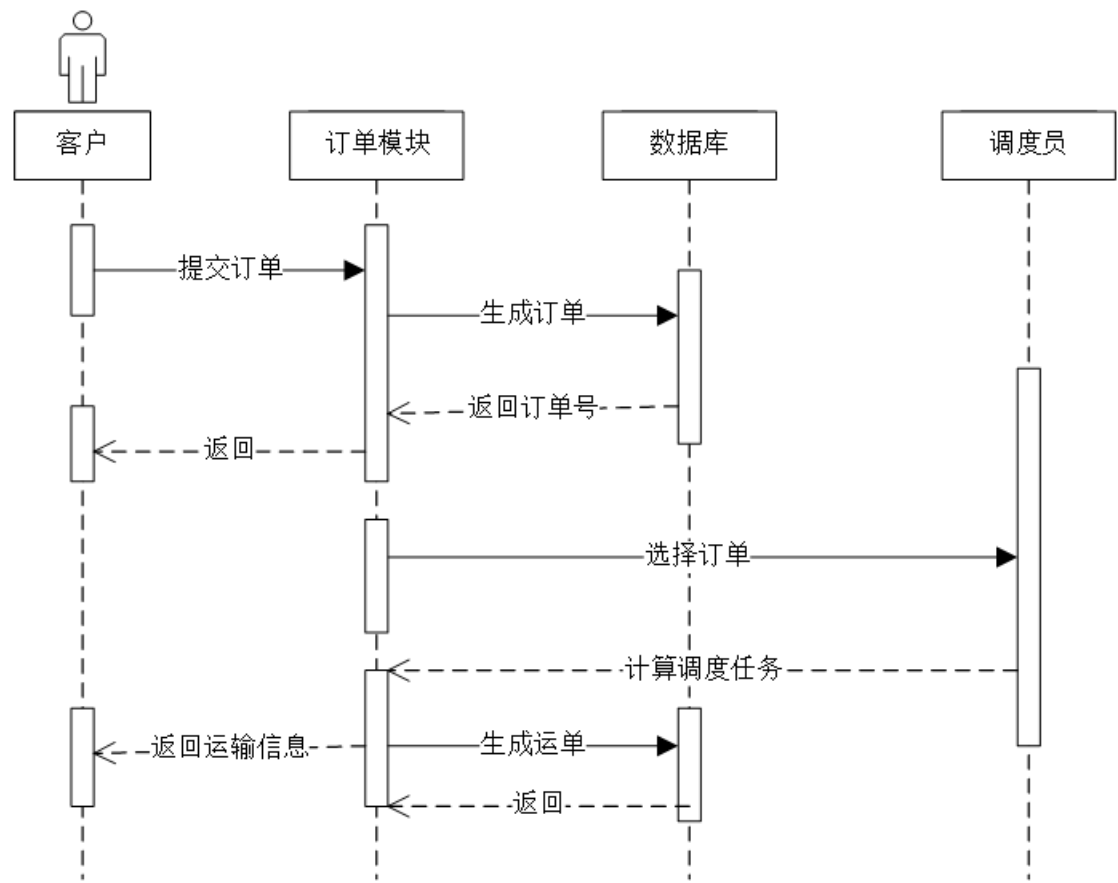


图 6.3 订单管理时序图

订单模块会先判断相关数据是否合理，不合理直接拒绝，减轻管理人员的工作。用户可以在系统中查询和管理自己的订单信息，调度员可以根据订单号、需求日期等条件查询有关订单，列表内包含了查看详情按钮，可以看到订单和用户更多的信息，便于查找。如有不合理的订单躲过了系统的自动审核。调度员可以根据详情页的客户信息联系用户，说明情况，进行订单删除操作。

订单管理的实现需要 Order，OrderService，OrderInfo，OrderDao 类。OrderInfo 类涵盖了订单号、下单人、始发地、终点、需求量等字段。相关的数据操作调用 Order 类内的方法，Order 类作为接口层的类，处理前端请求。其内部的方法需要 OrderService 和 OrderDao 的提供具体实现和数据的操作。根据设计，数据库操作借助框架内的 DBConnection 类来完成相关操作，类图表示如图 6.4 所示。

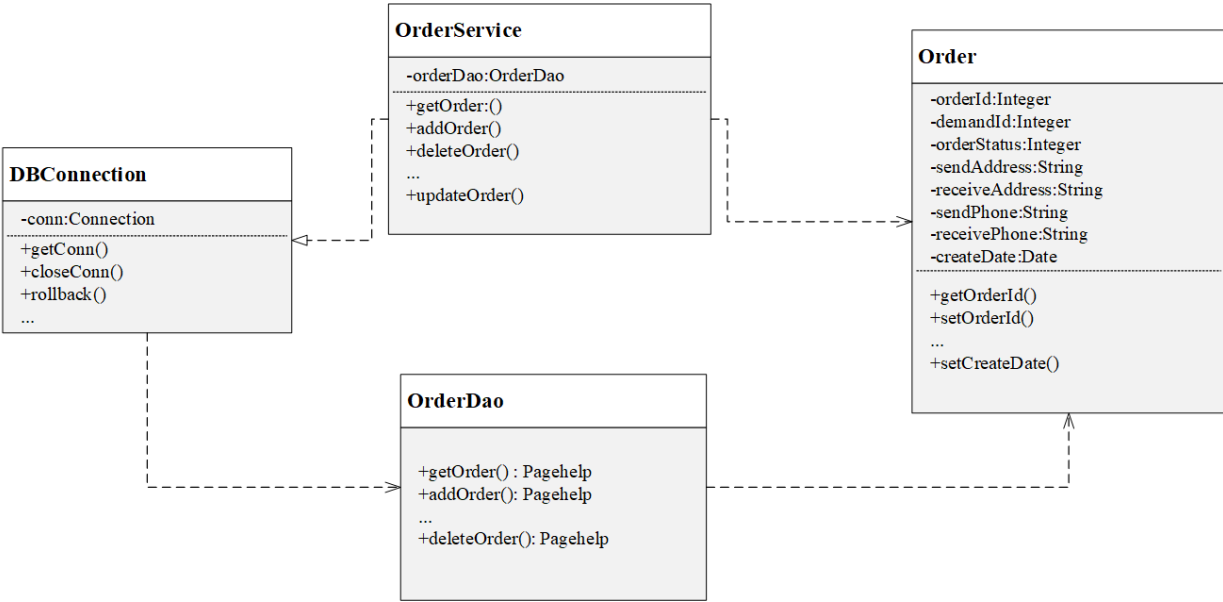


图 6.4 订单管理类图

6.2.3 车辆调度模块

本模块是系统的核心模块，实现了运输时的车辆调度功能。计算调度计划时，需要先选中相关的订单和车辆，然后才能提交给后台算法运算。因此，实现该模块需要多个相关类的协作，具体是车辆数据模块的 Truck 类和订单数据模块的 Order 类应与本模块进行交互。调用以上相关类的方法函数得到一些基础字段值，组合生成符合本模块要求的实体类，本模块使用有关数据产生的计算结果，作为最终的响应数据回传到系统前端。各模块间简洁的类图表示如图 6.5 所示。

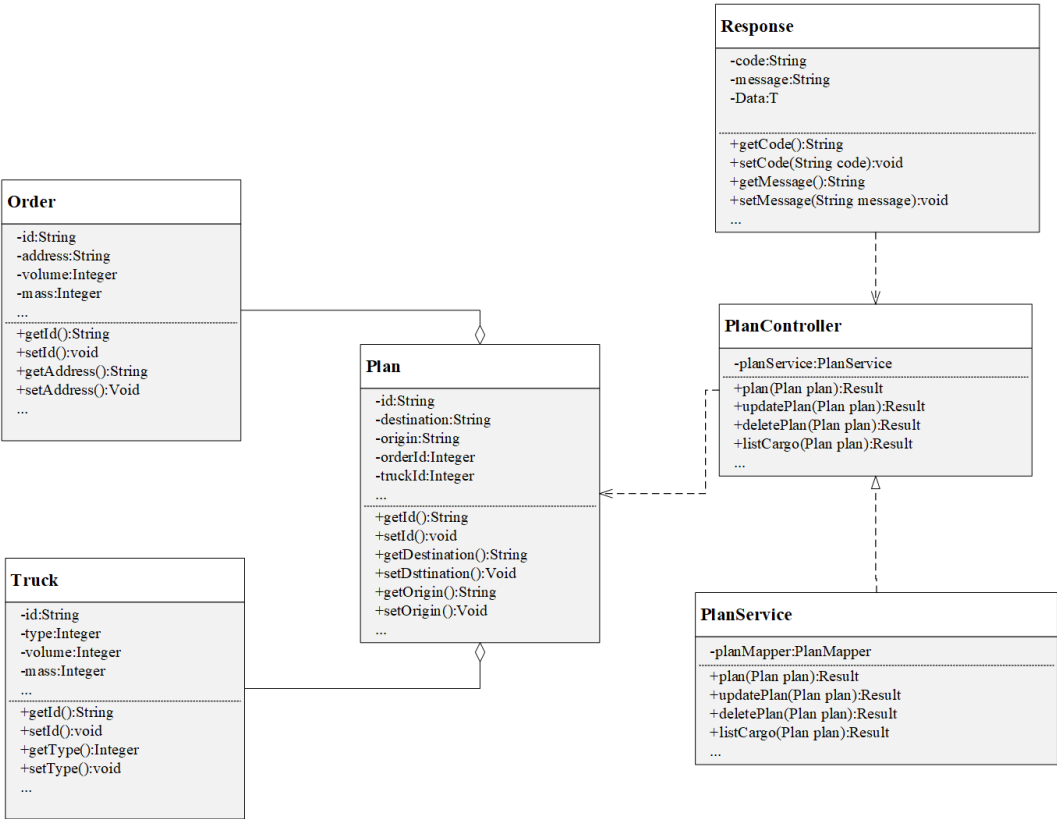


图 6.5 车辆调度模块类图

本模块采用了第五章优化后的 FWA 进行路径计算，可以提高运输效率和降低运输成本，提高了系统的竞争力和用户的满意度。选择订单数据进行计算。现实中，可能出现系统未考虑的情况，本系统提供了调整和重新生成路径的选项。调度员可以增加车辆和订单选择，再次计算路径。或者保留原数据重新计算。

6.2.4 车队管理模块

在车队管理方面，管理员可以查看车辆的基本信息，如图 6.12 所示。车辆信息以列表的形式展示，相关数据项包括车牌号、车辆型号、能耗、载重、所属车队等。并提供了车辆信息的修改删除功能。

关于此模块的设计需要表示车辆信息的实体类 Truck，车队实体类 Fleet。完成信息维护的功能，还需要实现 TruckService，FleetService 类中的相应的增删改函数。车辆归属关系调整，使用 FleetService 中的 updateFleet 方法，车队具体信息查询由 queryFleet 方法完成。因为涉及到文件上传，建立 FileUpload 类，编写上传 upload、获取上传状态 getUploadStatus、获取上传文件信息 getUploadInfo、上传成功后的回调 success 等函数。各类之间的联系如图 6.6 所示。

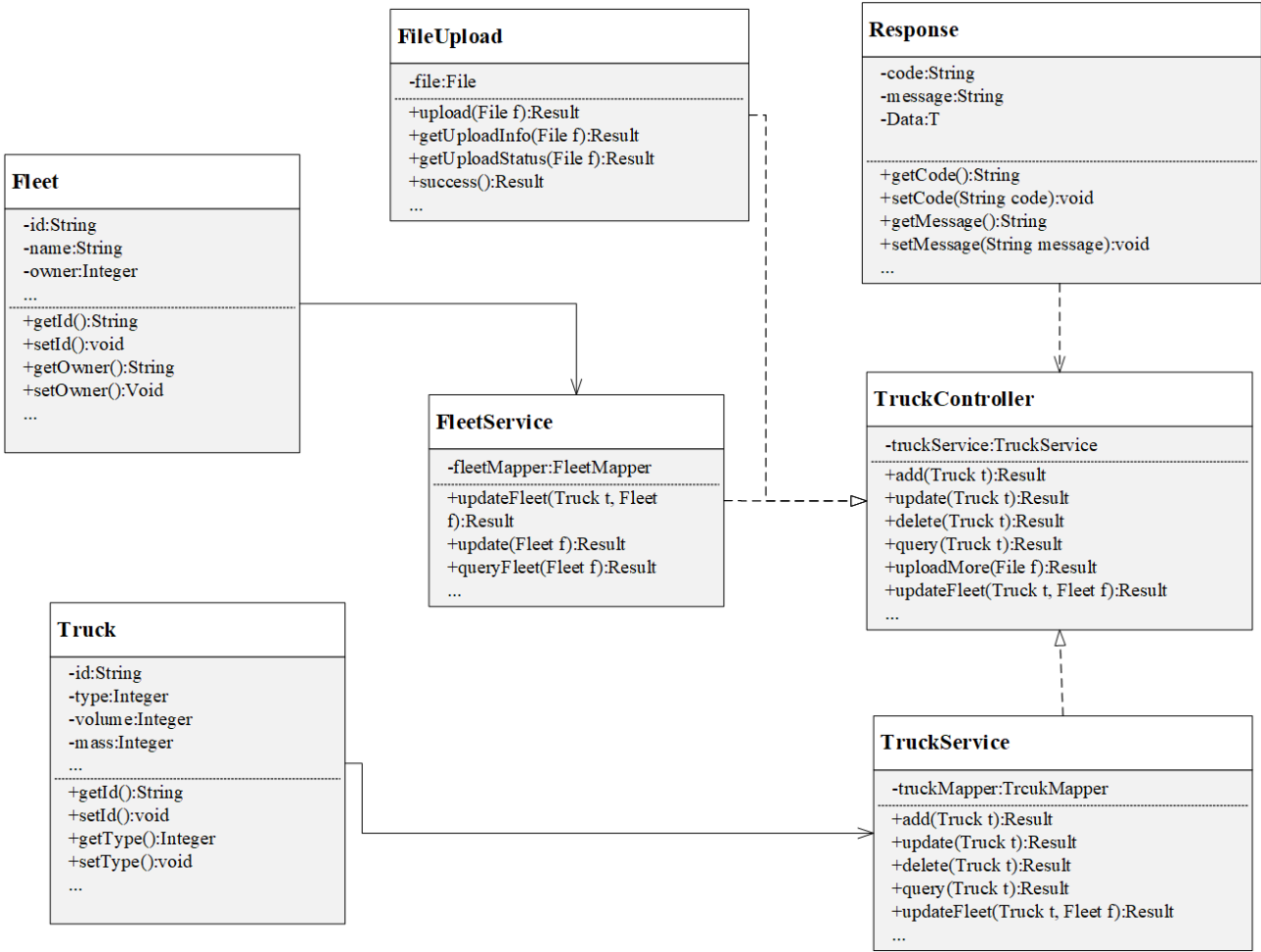


图 6.6 车队管理功能类图

6.3 系统测试

6.3.1 登录功能

系统的登录功能需检验不同输入的情况，且验证不同权限用户登录后，对应的功能菜单和操作权限是否正常。具体的测试项如表 6.2 所示。

表 6.2 登录功能测试项

测试项	目标	结果
正确信息登录	可以登录	正确
错误、不合法信息登录	登录失败，返回错误原因	错误原因正确
权限返回	符合数据库数据	正确
菜单返回	符合数据库数据	正确
注销操作	注销后，用户数据清除	已清除

登录界面如图 6.7 所示。用户在此界面输入账号相关信息。系统会先根据相关规则进行

南京邮电大学专业学位硕士研究生学位论文

第六章 混合车辆调度系统实现

校验，符合后再将数据传到服务端进行查询认证，同时对手机号码验证和密码加密存储。本模块采用 JWT 令牌机制实现用户身份认证，提高系统的安全性和稳定性。



图 6.7 系统登录

账号信息验证无误后，将跳转到系统的主界面。为了系统的安全性，采用了拦截器，对非法的路由跳转操作进行拦截。因为系统在设计时，将用户分为了三类，即：用户、调度员、司机。所以，在登录完成后，系统会识别账号信息，返回相应账号角色的功能菜单，即权限控制。再由前端渲染出左侧用户可操作的菜单栏。

6.3.2 订单管理功能

订单管理是调度系统的一个重要模块，它包含了创建、删除、修改、查询、批量处理等功能，表 6.3 是订单管理模块的测试项。

表 6.3 订单管理功能测试项

测试项	目标	结果
订单新增	新增信息无误	正确
订单数据查询	返回结果无误	返回结果正确
详细信息查询	信息无误	正确
订单删除	正确删除	正确
订单批量处理	所有数据都正常被处理	正确

订单管理页面如 6.8 所示。包含了订单号，客户名、需求日期等信息。本模块实现了订单



图 6.8 订单页面

列表内包含了查看详情按钮，可以看到用户的个人信息，便于联系。如图 6.9 所示。此类操作包含了权限控制。当有不合理的订单，系统未审核出。调度员可以根据详情页的客户信息联系用户，说明情况，进行订单删除操作。

6.3.3 车辆调度功能

调度功能是车辆调度系统的重要功能之一，它根据需求数据，车辆数据等信息，对车辆进行最优路径规划，以最小化车队运输任务的总成本，降低运营费用。同时，系统还可以对结果进行微调。因此，需要从规划任务的输入，输出，调整等方面进行测试。调度模块的测试项如表 6.4 所示。

表 6.4 调度功能测试项

测试项	目标	结果
选择的订单车辆数据是否正确	输入数据无误	正确
是否计算出最优路径	结果无误	正确
输出的数据项是否清晰全面，正确	输出无误	正确
调整功能是否正常	正常	正常
运单生成功能是否正常	数据无误	正常
系统的计算时长是否合理	时长不宜过久	合理

具体的操作界面如图 6.9 所示，使用多选框，供调度员选择车辆和订单，还需要输入今日温度信息。系统可以根据相关数据，自动计算成本最低的路线。



图 6.9 调度选择页

调度员点击生成调度计划后，系统经运算，将结果以表格形式呈现各项数据。如图 6.10 所示，包括了总成本，电车数、油车数、客户点数以及具体的行车路径。

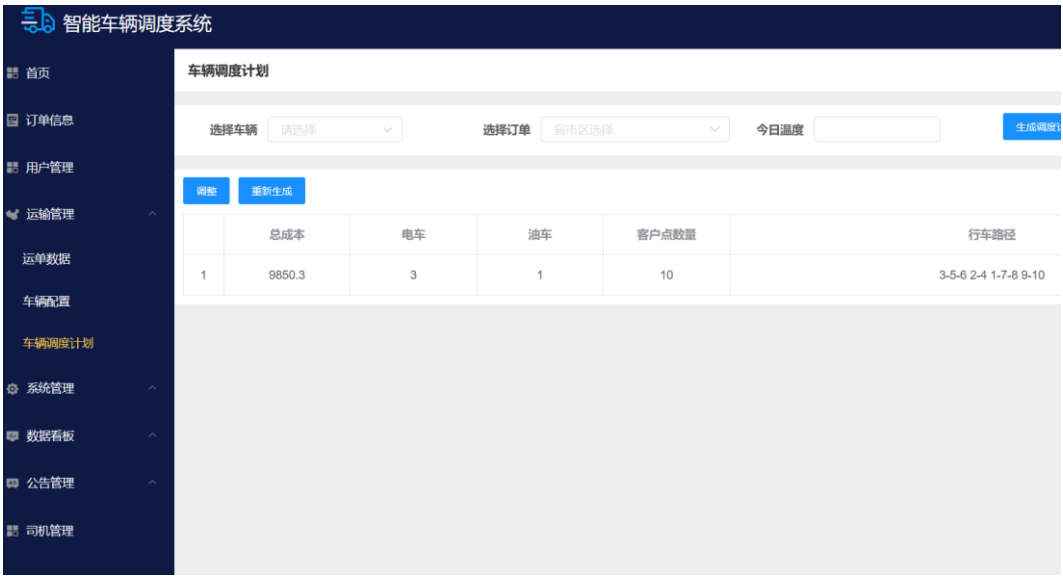


图 6.10 结果生成页

如果对计算结果不满意，可以点击调整按钮，重新选择订单和车辆数据，或者点击重新生成按钮，仍然按照当前数据进行路径计算。因为群智能算法不能保证一定得到最优结果，所以再次计算，可能出现更好的解。图 6.11 展示了调整功能。

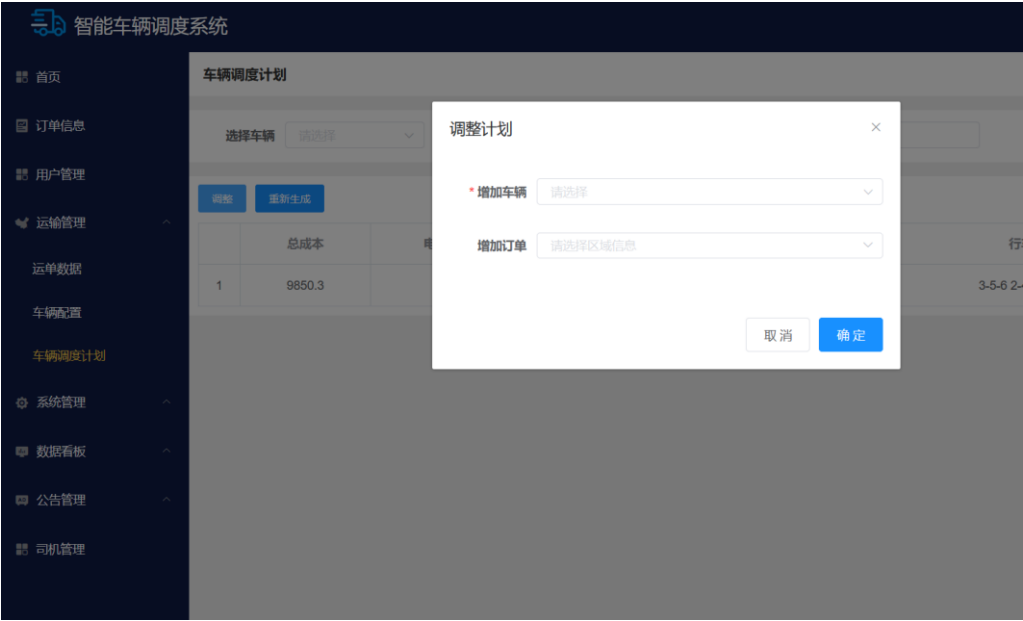


图 6.11 调度信息调整

调度计划生成后，系统组合运输数据生成运单信息。运单信息将转移到运单数据菜单栏，如图 6.12 所示，运单数据页提供了运单查询功能，显示了线路名称，始发中心，目的中心，经过客户点数以及司机车辆的有关信息。

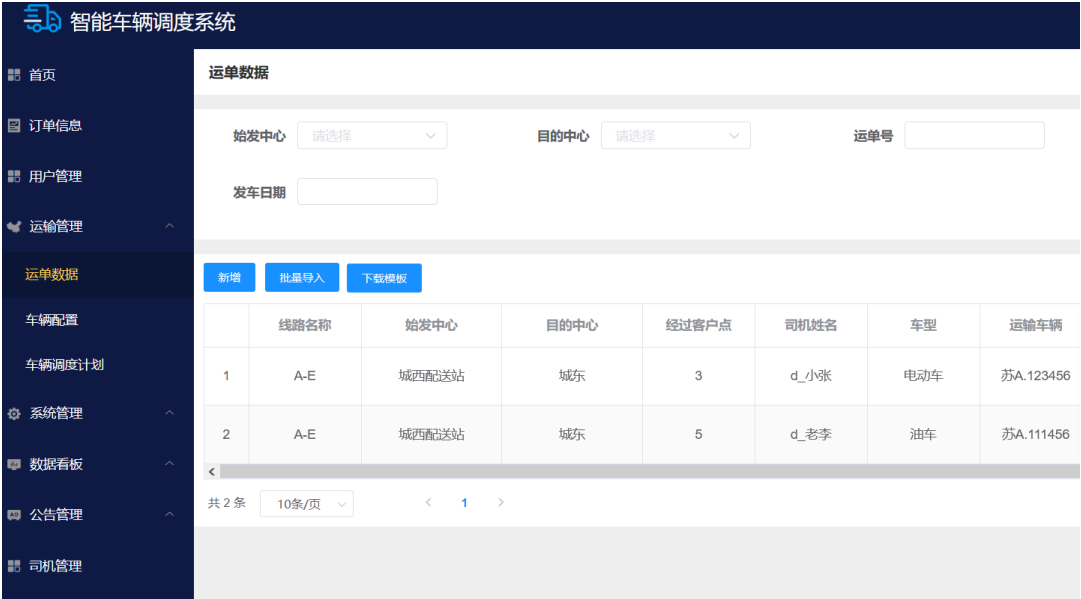


图 6.12 生成的运单信息

6.3.4 车队管理功能

车队管理是本调度系统中非常重要的一个功能模块，它负责维护车辆的基础数据，有助于调度结果符合实际。需要对车辆信息的修改、增加及删除等功能进行测试，表 6.5 是车队管理的具体测试项。

表 6.5 车队管理功能测试项

测试项	目标	结果
车辆信息的增加	数据无误	正确
车辆数据的批量导入	数据无误	正确
车辆数据查询	结果无误	正确
车辆数据的修改功能	修改无误	正常

为方便基础数据管理，在系统内增加新增和批量导入功能。批量导入如图 6.13 所示，提供模板，说明了上传要求。



图 6.13 车辆批量导入

车辆数据的新增也可以使用单个新增的形式，以表单的信息，确定了各数据项，重要的信息采用选择框的形式，防止非法数据的出现。

6.4 本章小结

本章主要介绍了混合车辆调度系统的实现过程，包括开发环境配置、功能模块编写和整体测试。系统功能模块包括注册登录模块、订单管理模块、车辆调度模块和车队管理模块。本章的实现过程和测试结果表明，混合车辆调度系统具有较好的实用性和可靠性，可以满足运输管理的需求，提高运输效率和效益。在未来的工作中，可以进一步完善混合车辆调度系统的功能，如增加数据分析模块、优化路径规划算法等，以满足更复杂的物流运输管理需求。同时，还可以采用更加先进的技术手段，如人工智能、物联网等，进一步提高系统的效率和可靠性。

第七章 总结与展望

7.1 总结

本论文的研究旨在解决混合车辆调度问题，即如何规划电动车和传统燃油车的路线和行驶计划，以最大程度地降低能源消耗，同时保证服务质量和运营效率。在模型的构建阶段，根据现实生活中的情况，重点考虑了混合车辆中电动车的能量消耗估算，将外界温度，车辆空调使用等因素加入到电量消耗模型中，提高了电量消耗的估算精确，从而保证了车队的调度计划在实际执行时，不会出现大的偏差，导致公司运营成本上升和客户满意度下降等影响。本文完成的主要工作如下：

（1）首先，交代了论文课题的研究背景和意义。并结合近几年的相关论文介绍了 VRP 的基础知识和求解算法的研究现状，以及绿色车辆路径问题的研究现状。重点关注了烟花算法在 VRP 领域中的应用，进行了算法研究工作，分析其原理和优劣之处，为烟花算法的改进铺垫理论基础。

（2）其次，本文设计了一个混合车辆调度系统，便于算法的实际应用。并建立了一个考虑电量消耗的混合车辆调度模型，通过考虑电动车的电量消耗，能够更加准确地描述车队的调度情况。由于电动汽车的续航里程受到多方面因素的影响，以往的大部分 VRP 研究都将电动汽车的能量消耗设为线性形式。本文分析了电动汽车的特性和能量消耗问题，根据车辆的动态载重、外界温度和空调使用等因素，结合传统的能量消耗公式，构建出非线性的能量消耗模型。

（3）结合考虑电量消耗因素的混合车辆调度模型，本文提出了一种改进的烟花算法来求解混合车辆调度模型，该算法采用了不同于传统 FWA 的初始解生成方式、变异火花生成策略和个体保留策略，结合仿真数据，并将改进的 FWA 与主流的群算法，如遗传算法、粒子群算法进行实验仿真，验证了其有效性。

（4）最后，本文实现了一个混合车辆调度系统，考虑到企业的实际需求，进行相关功能的实现，包括了车辆数据维护，调度计划安排和经营分析等功能，并对各功能模块进行了测试。车辆调度系统的应用，可以节省相关的人力物力，提升工作效率。同时，还可以根据经营数据进行分析，为企业的决策提供参考。

7.2 展望

本文的研究的混合车辆调度问题，符合目前新能源汽车快速发展的背景下，物流企业的运营现状，具有一定现实意义。所做的研究内容和方法对后续的研究工作具有一定的参考价值。但本文对于混合车辆调度问题的研究还存在不足，设定了一些假设条件，没有完全符合现实情况，未来研究可以进一步探索混合车辆调度问题的优化策略。例如：

（1） 将道路交通的实际情况纳入模型的约束条件，可以考虑基于车联网技术，实时获取道路信息，提高规划路径的合理性。

（2） 车辆的能耗因素的不确定性，给实际的运输任务带来了风险。本文基于历史数据进行能耗的预估，准确度还不够。可以考虑引入更多的数据源，使用机器学习和人工智能等新技术来提高能耗模型的准确性。

（3） 关于车辆类型，本文假定只存在两类车型，有一定的局限性。实际中，电动车辆可能会有多种类型，此外还存在混合动力，氢能源动力车辆等，在续航、载重、能量补充等方面的差异会给调度任务带来新的变化。

（4） 本文的应用场景只考虑了取货路径，物流企业还存在多种业务场景，可以针对如送货路径，同时取送货路径等场景，改进调度模型进行研究。

参考文献

- [1] Ji D, Gan H. Effects of providing total cost of ownership information on below-40 young consumers' intent to purchase an electric vehicle: A case study in China[J]. *Energy Policy*, 2022, 165: 112954.
- [2] 叶颖津,林诗媛,韩雅儒等. “双碳”目标下标准化战略助力新能源汽车产业发展的思考[C]//中国标准化协会.第十八届中国标准化论坛论文集.,2021:7.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.024182.
- [3] Palmer C. Electric car market poised to accelerate[J]. 2021, 7(02): 136-138.
- [4] Deng J, Hu H, Gong S, et al. Impacts of charging pricing schemes on cost-optimal logistics electric vehicle fleet operation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 109: 103333.
- [5] Crabtree G. The coming electric vehicle transformation[J]. *Science*, 2019, 366(6464): 422-424.
- [6] Erdelić T, Carić T. A survey on the electric vehicle routing problem: variants and solution approaches[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 2019.
- [7] Xiao Y, Zhang Y, Kaku I, et al. Electric vehicle routing problem: A systematic review and a new comprehensive model with nonlinear energy recharging and consumption[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 151: 111567.
- [8] Baradaran V, Shafaei A, Hosseini A H. Stochastic vehicle routing problem with heterogeneous vehicles and multiple prioritized time windows: Mathematical modeling and solution approach[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 131: 187-199.
- [9] Tan Y, Zhu Y. Fireworks algorithm for optimization[C]//Advances in Swarm Intelligence: First International Conference, ICSI 2010, Beijing, China, June 12-15, 2010, Proceedings, Part I 1. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 355-364.
- [10] Chen Y, Li L, Zhao X, et al. Simplified hybrid fireworks algorithm[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 173: 128-139.
- [11] Wang M, Chen L, Heidari A A, et al. Fireworks explosion boosted Harris Hawks optimization for numerical optimization: Case of classifying the severity of COVID-19[J]. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2023, 16: 136.
- [12] Yadav A M, Sharma S C. Cooperative task scheduling secured with blockchain in sustainable mobile edge computing[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2023: 100843.
- [13] 曾敏,赵志刚,李智梅.带柯西变异的自学习改进烟花算法[J].小型微型计算机系统,2020,41(02):264-270.
- [14] Liu X, Qin X. A neighborhood information utilization fireworks algorithm and its application to traffic flow prediction[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 183: 115189.
- [15] Wei W, Ouyang H, Li S, et al. A modified fireworks algorithm with dynamic search interval based on closed-loop control[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, 200: 329-360.
- [16] Yue Z, Zhang S, Xiao W. A novel hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and fireworks algorithm[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 2147.
- [17] Zhu F, Chen D, Zou F. A novel hybrid dynamic fireworks algorithm with particle swarm optimization[J]. *Soft Computing*, 2021, 25: 2371-2398.
- [18] 蒋华伟,郭陶,杨震.车辆路径问题研究进展[J].电子学报,2022,50(02):480-492.
- [19] Vidal T, Laporte G, Matl P. A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 286(2): 401-416.

- [20] Koç Ç, Laporte G, Tükenmez İ. A review of vehicle routing with simultaneous pickup and delivery[J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 122: 104987.
- [21] Pillac V, Gendreau M, Guéret C, et al. A review of dynamic vehicle routing problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 225(1): 1-11.
- [22] Abbatecola L, Fanti M P, Ukovich W. A review of new approaches for dynamic vehicle routing problem[C]//2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2016: 361-366.
- [23] Guajardo M, Rönnqvist M. A review on cost allocation methods in collaborative transportation[J]. *International transactions in operational research*, 2016, 23(3): 371-392.
- [24] Gansterer M, Hartl R F. Collaborative vehicle routing: A survey[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 268(1): 1-12.
- [25] 王万良, 陈浩立, 李国庆等. 基于深度强化学习的多配送中心车辆路径规划[J]. *控制与决策*, 2022, 37(08): 2101-2109.
- [26] Cleophas C, Cottrill C, Ehmke J F, et al. Collaborative urban transportation: Recent advances in theory and practice[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 273(3): 801-816.
- [27] Messaoud E. A chance constrained programming model and an improved large neighborhood search algorithm for the electric vehicle routing problem with stochastic travel times[J]. *Evolutionary Intelligence*, 2023, 16(1): 153-168.
- [28] Yu Z, Zhang P, Yu Y, et al. An adaptive large neighborhood search for the larger-scale instances of green vehicle routing problem with time windows[J]. *Complexity*, 2020, 2020: 1-14.
- [29] Arias A, Sanchez J, Granada M. Integrated planning of electric vehicles routing and charging stations location considering transportation networks and power distribution systems[J]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2018, 9(4): 535-550.
- [30] 张必达, 闫强, 张琳, 张海瑞. 基于实时交通信息的电动汽车充换电路径规划方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(10): 2333-2342.
- [31] Kouider T O, Cherif-Khettaf W R, Oulamara A. Large Neighborhood Search for Periodic Electric Vehicle Routing Problem[C]//ICORES. 2019: 169-178.
- [32] Sayarshad H R, Mahmoodian V, Gao H O. Non-myopic dynamic routing of electric taxis with battery swapping stations[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 57: 102113.
- [33] 刘长石, 陈慧璇, 吴张. 城市物流配送的混合车辆路径规划模型与优化算法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(03): 759-768.
- [34] 李英, 张鹏威, 吴一帆. 电动汽车/传统汽车混合车队车辆配置及路径优化模型[J]. *系统管理学报*, 2020, 29(03): 522-531.
- [35] Amiri A, Amin S H, Zolfagharinia H. A bi-objective green vehicle routing problem with a mixed fleet of conventional and electric trucks: Considering charging power and density of stations[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 213: 119228.
- [36] Chen Y, Li D, Zhang Z, et al. Solving the battery swap station location-routing problem with a mixed fleet of electric and conventional vehicles using a heuristic branch-and-price algorithm with an adaptive selection scheme[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 186: 115683.
- [37] Bao D W, Zhou J Y, Zhang Z Q, et al. Mixed fleet scheduling method for airport ground service vehicles under the trend of electrification[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2023, 108: 102379.
- [38] Qin W, Zhuang Z, Huang Z, et al. A novel reinforcement learning-based hyper-heuristic for heterogeneous vehicle routing problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156: 107252.

- [39]李猛,和伟辉,毛攀登等.一种面向维修资源配送调度的遗传-烟花混合算法[J].智能系统学报,2022,17(01):88-97.
- [40]许德刚,李凡,王露等.优化烟花算法在医疗物资应急调度中的应用[J].计算机工程与应用,2021,57(24):249-258.
- [41]万杰,龙云飞,陈星瀚.基于改进烟花算法的中俄商品多式联运路径优化[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(03):291-298.
- [42]Yang W, Ke L. An improved fireworks algorithm for the capacitated vehicle routing problem[J]. Frontiers of Computer Science, 2019, 13: 552-564.
- [43]Chen D, Zhang X, Gao D, et al. Logistics Distribution Path Planning Based on Fireworks Differential Algorithm[C]//2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, 2020: 2797-2802.
- [44]Zhang M, Xiong G, Bao S, et al. A time-division distribution strategy for the two-echelon vehicle routing problem with demand blowout[J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2022, 18(4): 2847-2872.
- [45]Mirzabaghi M, Jolai F, Razmi J, et al. Sustainable routing of heterogeneous vehicles with simultaneous pickup and delivery considering economic, environmental and social factors[J]. Journal of Transportation Research, 2021, 18(1): 227-250.
- [46]Rinaldi M, Picarelli E, D'Ariano A, et al. Mixed-fleet single-terminal bus scheduling problem: Modelling, solution scheme and potential applications[J]. Omega, 2020, 96: 102070.
- [47]蒋阳升,吴佳媛,胡路.考虑车辆调度和调度员分配的共享汽车混合车队规模优化[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(06):145-152.
- [48]Hiermann G, Hartl R F, Puchinger J, et al. Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 272(1): 235-248.
- [49]李得成,陈彦如,张宗成.基于分支定价算法的电动车与燃油车混合车辆路径问题研究[J].系统工程理论与实践,2021,41(04):995-1009.
- [50]Macrina G, Laporte G, Guerriero F, et al. An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 276(3): 971-982.
- [51]南丽君,陈彦如,张宗成.改进的自适应大规模邻域搜索算法求解动态需求的混合车辆路径问题[J].计算机应用研究,2021,38(10):2926-2934.
- [52]王震坡,黎小慧,孙逢春.产业融合背景下的新能源汽车技术发展趋势[J].北京理工大学学报,2020,40(01):1-10.
- [53]Pelec D, Babic J, Carvalho A, et al. A survey-based assessment of how existing and potential electric vehicle owners perceive range anxiety[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 122779.
- [54]Pelec D, Babic J, Carvalho A, et al. Electric vehicle range anxiety: An obstacle for the personal transportation (r) evolution?[C]//2019 4th international conference on smart and sustainable technologies (splitech). IEEE, 2019: 1-8.
- [55]Gunawan I, Redi A A N P, Santosa A A, et al. Determinants of customer intentions to use electric vehicle in Indonesia: An integrated model analysis[J]. Sustainability, 2022, 14(4): 1972.
- [56]Li J, Sun X, Liu Q, et al. Planning electric vehicle charging stations based on user charging behavior[C]//2018 IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI). IEEE, 2018: 225-236.
- [57]Fioriti D, Scarpelli C, Pellegrino L, et al. Battery lifetime of electric vehicles by novel rainflow-counting algorithm with temperature and C-rate dynamics: Effects of fast charging, user habits, vehicle-to-grid and climate zones[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 59: 106458.

- [58] Ullah I, Liu K, Yamamoto T, et al. A comparative performance of machine learning algorithm to predict electric vehicles energy consumption: A path towards sustainability[J]. *Energy & Environment*, 2022, 33(8): 1583-1612.
- [59] Al-Wreikat Y, Serrano C, Sodré J R. Effects of ambient temperature and trip characteristics on the energy consumption of an electric vehicle[J]. *Energy*, 2022, 238: 122028.
- [60] Yi Z, Bauer P H. Effects of environmental factors on electric vehicle energy consumption: a sensitivity analysis[J]. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2017, 7(1): 3-13.
- [61] Sautermeister S, Falk M, Bäker B, et al. Influence of measurement and prediction uncertainties on range estimation for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 19(8): 2615-2626.
- [62] Wang H, Zhao D, Cai Y, et al. A trajectory-based energy consumption estimation method considering battery degradation for an urban electric vehicle network[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 74: 142-153.
- [63] Hao X, Wang H, Lin Z, et al. Seasonal effects on electric vehicle energy consumption and driving range: A case study on personal, taxi, and ridesharing vehicles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119403.
- [64] Li Y, Zhong Z, Zhang K, et al. A car-following model for electric vehicle traffic flow based on optimal energy consumption[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, 533: 122022.
- [65] Croce A I, Musolino G, Rindone C, et al. Traffic and energy consumption modelling of electric vehicles: Parameter updating from floating and probe vehicle data[J]. *Energies*, 2021, 15(1): 82.
- [66] Kancharla S R, Ramadurai G. An adaptive large neighborhood search approach for electric vehicle routing with load-dependent energy consumption[J]. *Transportation in Developing Economies*, 2018, 4: 1-9.
- [67] Taggart J. Ambient temperature impacts on real-world electric vehicle efficiency & range[C]//2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, 2017: 186-190.
- [68] Iora P, Tribioli L. Effect of ambient temperature on electric vehicles' energy consumption and range: Model definition and sensitivity analysis based on nissan leaf data[J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2019, 10(1): 2.
- [69] Charlotte Argue. To what degree does temperature impact EV range? [EB/OL]. <https://www.geotab.com/blog/ev-range/>, 2023-02-06.
- [70] Miri I, Fotouhi A, Ewin N. Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(1): 501-520.
- [71] Qi X, Wu G, Boriboonsomsin K, et al. Data-driven decomposition analysis and estimation of link-level electric vehicle energy consumption under real-world traffic conditions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 64: 36-52.
- [72] Islam E, Moawad A, Kim N, et al. An extensive study on sizing, energy consumption, and cost of advanced vehicle technologies[J]. *Contract ANL/ESD-17/17*, 2018.
- [73] 张新城, 刘志珍, 侯延进等. 考虑出行温度影响的电动汽车充电功率需求分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(04): 124-131.
- [74] Rastani S, Yüksel T, Çatay B. Effects of ambient temperature on the route planning of electric freight vehicles[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 74: 124-141.

- [75]Shen X, Lu J, You X, et al. A Region Enhanced Discrete Multi-Objective Fireworks Algorithm for Low-Carbon Vehicle Routing Problem[J]. Complex System Modeling and Simulation, 2022, 2(2): 142-155.
- [76]Chen M, Tan Y. Exponentially decaying explosion in fireworks algorithm[C]//2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). IEEE, 2021: 1406-1413.
- [77]张颖,杨广媛.基于FW-PSO算法优化无线传感网络拓扑结构的方法[J].电子与信息学报,2021,43(02):396-403.
- [78]Herdianti W, Gunawan A A S, Komsiyah S. Distribution cost optimization using pigeon inspired optimization method with reverse learning mechanism[J]. Procedia Computer Science, 2021, 179: 920-929.
- [79]Kaidi W, Khishe M, Mohammadi M. Dynamic levy flight chimp optimization[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 235: 107625.
- [80]da Costa P R O, Mauceri S, Carroll P, et al. A genetic algorithm for a green vehicle routing problem[J]. Electronic notes in discrete mathematics, 2018, 64: 65-74.
- [81]Daely P T, Aruan Y J, Lee J M, et al. Dynamic VRP optimization using discrete PSO in edge computing environment[C]//2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). IEEE, 2021: 654-656.