

摘要

随着中国居民生活质量与消费水平的提高，居民对于生鲜冷链产品的需求正在不断攀升，中国冷链物流行业处于快速增长阶段。目前，交通运输业是全球碳排放的第二大来源，其中冷链物流行业相较于常温物流行业能耗与碳排放量更高，是物流领域进行行业绿色化改革的重要部分。正是在这样的背景下，本文选择从绿色低碳的角度来研究冷链物流配送路径的优化问题。

首先，目前有关多种类冷链品的配送一般采用多车型模式，但存在车辆装载率低，制冷成本高、损耗率高、碳排放量大等缺点。为此，考虑到冷链产品易腐的特性，为了减少产品损耗，提高消费者满意度，本文引入多温共配送模式，在对比机械式冷藏车和蓄冷式常温车两种实现方式的优缺点后，选择蓄冷式实现该模式。

其次，为提高车辆通行效率、避免道路拥堵，本文考虑配送过程中道路实际状况的影响，引入交通拥堵指数对车辆通行速度进行刻画，使用时变模型计算不同时间段下车辆的行驶时间。同时，采用负载估计模型对车辆配送过程中的碳排放量进行计算，并引入碳税计算碳排放成本。

随后，本文构建了以总配送成本最低为目标的冷链配送路径优化模型，模型总成本包括车辆固定成本、车辆运输成本、制冷成本、碳排放成本、惩罚成本。为求解所建模型，本文选择蚁群算法作为本文的基础算法，在研究了传统蚁群算法的原理及缺陷后，分别从启发式因子、移动概率的选择、信息素更新策略等多个方面对传统蚁群算法进行了改进，并混入了 2-opt 局部优化算法。

最后，笔者选择了无锡市生鲜社区团购平台作为算例，运用 MATLAB 软件求解本文模型，对比本文改进算法和其他蚁群算法计算结果，证实了改进算法性能的优势；同时，从不考虑道路实况、使用传统多车型模式以及不考虑碳排放成本多个角度对模型进行求解，分析不同模式下的求解结果，证实了本文路径优化模型有效性。

综上，在实际的冷链品的配送业务中，考虑道路实际通行状况及碳排放成本，并引入多温共配模式，能有效地降低配送环节的各项成本，减少冷链品的损耗，提高运输过程的绿色水平及用户满意度。本文研究的冷链多温共配路径优化模型及改进后的蚁群算法，可以为相关物流企业和部门提供一定的参考价值和实践依据。

关键词：冷链物流；碳排放；道路实况；多温共配；蚁群算法

ABSTRACT

With the improvement of the quality of life and consumption level of Chinese residents, the demand for fresh cold chain products is rising, and China's cold chain logistics industry is in a rapid growth stage. Currently, the transportation industry is the second largest source of global carbon emissions, of which the cold chain logistics industry has higher energy consumption and carbon emissions compared to the ambient logistics industry, and is an important part of the logistics sector to carry out industry greening reform. It is against this background that this paper chooses to study the optimisation of cold chain logistics distribution routes from a green and low carbon perspective.

Firstly, the current distribution of multi-category cold chain products generally adopts a multi-vehicle model, but there are disadvantages such as low vehicle loading rate, high refrigeration cost, high loss rate and high carbon emission. For this reason, considering the perishable characteristics of cold chain products, in order to reduce product loss and improve consumer satisfaction, this paper introduces the multi-temperature co-delivery mode, and after comparing the advantages and disadvantages of the two realisation methods of mechanical refrigerated vehicles and stored-cooled ambient vehicles, the stored-cooled type is chosen to realise this mode.

Secondly, in order to improve the efficiency of vehicle traffic and avoid road congestion, this paper considers the influence of the actual road conditions during the distribution process, and introduces the traffic congestion index to portray the speed of vehicle traffic, and uses a time-varying model to calculate the travel time of vehicles under different time periods. At the same time, a load estimation model is used to calculate the carbon emissions in the process of vehicle distribution, and a carbon tax is introduced to calculate the carbon emission cost.

Subsequently, this paper constructs a cold chain distribution path optimisation model with the objective of minimising the total distribution cost. The total cost of the model includes vehicle fixed cost, vehicle transportation cost, refrigeration cost, carbon emission cost and penalty cost. In order to solve the constructed model, the ant colony algorithm is chosen as the base algorithm of this paper. After studying the principles and defects of the traditional ant colony algorithm, the traditional ant colony algorithm is improved from various aspects such as heuristic factors, selection of movement probability, pheromone update strategy, etc., and the 2-opt local optimization algorithm is mixed in.

Finally, I selected the Wuxi fresh community group purchasing platform as an example and used MATLAB software to solve this paper's model, comparing the calculation results of this paper's improved algorithm and other ant colony algorithms to confirm the advantages of

the improved algorithm's performance; at the same time, the model was solved from several perspectives, such as not considering the actual road conditions, using the traditional multi-vehicle model and not considering the cost of carbon emissions, to analyse the solution results under different modes. The effectiveness of this paper's path optimisation model is confirmed.

In summary, in the actual distribution business of cold chain products, considering the actual road traffic conditions and carbon emission costs, and introducing multi-temperature co-distribution mode can effectively reduce the costs of distribution, reduce the loss of cold chain products, and improve the green level of transportation process and user satisfaction. The optimization model of cold chain multi-temperature co-distribution path and the improved ant colony algorithm studied in this paper can provide certain reference value and practical basis for relevant logistics enterprises and departments.

Key words: Cold Chain Logistics; Carbon Emission; Road Reality; Multi-temperature co-distribution; Ant Colony Algorithm

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 本文研究的背景.....	1
1.1.2 本文研究的意义.....	3
1.2 国内外文献回顾与评述.....	4
1.2.1 国外文献回顾.....	4
1.2.2 国内文献回顾.....	6
1.2.3 研究评述.....	9
1.3 研究内容与方法.....	10
1.3.1 研究内容.....	10
1.3.2 研究方法.....	11
1.3.3 技术路线.....	12
1.4 创新点.....	14
1.5 本章小结.....	14
第二章 相关理论研究.....	15
2.1 冷链物流相关理论研究.....	15
2.1.1 冷链物流的概念.....	15
2.1.2 冷链物流的特点.....	16
2.1.3 冷链品的多温共配模式.....	16
2.2 低碳物流相关理论研究.....	17
2.2.1 低碳物流的概念.....	17
2.2.2 低碳物流的特点.....	18
2.2.3 碳排放量的影响因素及计算.....	19
2.3 车辆路径问题相关理论研究.....	19
2.3.1 车辆路径问题的描述.....	19
2.3.2 车辆路径问题的构成要素.....	20
2.3.3 车辆路径问题的研究类型.....	21
2.3.4 车辆路径问题的求解方法.....	21
2.4 时变路网相关理论研究.....	24
2.4.1 时变路网的概念与特征.....	24
2.4.2 时变路网模型.....	24
2.5 本章小结.....	26
第三章 考虑道路实况的冷链物流多温共配路径优化模型构建.....	27
3.1 问题描述.....	27

3.2 考虑道路实况的车辆行驶时间计算	27
3.3 多温共配模式的实现.....	29
3.4 碳排放量的计算.....	30
3.5 模型构建.....	30
3.5.1 模型假设与约束.....	30
3.5.2 符号说明.....	31
3.5.3 目标函数分析.....	32
3.5.4 模型建立.....	34
3.6 本章小结.....	35
第四章 模型求解算法设计	36
4.1 求解思路.....	36
4.2 蚁群算法介绍.....	36
4.2.1 蚁群算法原理.....	36
4.2.2 蚁群算法的基本流程.....	37
4.2.3 缺点与改进思路.....	39
4.3 算法设计.....	40
4.3.1 启发函数设计.....	40
4.3.2 移动概率的选择.....	40
4.3.3 信息素更新策略.....	41
4.3.4 局部优化策略.....	41
4.4 算法步骤.....	42
4.5 本章小结.....	44
第五章 算例分析	45
5.1 基础参数的设定.....	45
5.2 数据处理.....	47
5.3 结果分析.....	47
5.3.1 算法的有效性分析.....	48
5.3.2 本文模型的实验结果.....	49
5.3.3 多车型配送模型的实验结果.....	51
5.3.4 不考虑道路实况模型的实验结果.....	54
5.3.5 不考虑碳排放成本模型的实验结果.....	54
5.4 本章小结.....	55
第六章 结论与展望	56
6.1 主要结论.....	56
6.2 研究展望.....	56
参考文献.....	58
附录.....	61

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 本文研究的背景

(1) 碳排放现状

自上个世纪七十年代以来，随着全球经济发展，在世界范围内城市化和工业化进程被不断推进，全球碳排放量呈现同步上升趋势，如何控制碳排放量已成为全人类需要共同面对的重要问题。目前，碳排放带来的全球变暖等气候问题日益严峻，全球性的以节能减碳为目的的碳中和行动正在进行，目前提出碳中和目标的国家共有 126 个，约占全球碳排放总量的一半，绝大部分国家承诺将在 2050 年实现碳中和，体现了各国对解决碳排放问题的决心。

面对全球日益严峻的碳排放问题，中国不断加码碳减排目标。2005 年，中国第一次提出碳减排目标，提出中国将在 2020 年实现碳排放强度比 2005 年下降 15%；2015 年，中国提出了到 2030 年的自主行动目标，提出碳排放在 2030 年左右达到峰值并尽早达峰；2020 年 9 月 22 日，中国政府在第七十五届联合国大会上提出：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。”尽管中国的碳减排目前已经取得了一些成果，但离中国“双碳”目标的实现还有不小的距离，节能减排任务道阻且长。

交通运输领域是碳减排重要领域之一，目前交通运输依然以燃油作为最主要的动力来源。据国际能源署的数据显示，交通运输是当今全球第二大碳排放来源，约占全球总排放量的 24%，这也凸显了全球实现安全、绿色、高效、负担得起的交通即可持续交通的紧迫性。据统计，2020 年，全球能源碳排放为 320 亿吨，中国碳排放为 99 亿吨，约占全球碳排放的 31%，是全球最大的碳排放国家，其中交通运输排放约占中国碳排放总量的 10%，公路运输占其中近九成。因此交通运输领域如何向绿色低碳转型是目前需要考虑的重要问题。

(2) 交通拥堵对碳排放的影响

随着社会经济发展，社会人口不断增加，城市化进程地推进，中国交通运输业在快速发展中。根据国家交通运输部发布的信息，中国 2021 年公路总里程为 528.07 万公里，相较于 2020 年增加了 8.26 万公里；公路密度 55.01 公里/百平方公里，增加 0.86 公里/百平方公里；2021 全年机动车的年平均交通量为 14993 辆/日，比上年增长 4.9%，年平均行驶量为 348692 万车公里/日，增长 3.6%。交通运输业的持续发展不仅为国家经济增长带来了动力，也为居民的日常生活带来了便利，但随之而来的交通拥堵问题却成为了各大城市的一大病症。

交通拥堵问题将造成经济损失，对环境健康带来严重危害。首先，在交通拥堵的情况下，车辆需要不断地停车和启动，这不仅降低了车辆的通行速度，同时也增加了车辆行驶的燃油消耗与温室气体排放量，交通对环境的污染逐步成为城市环境质量恶化的主要污染源；另外，交通拥堵也导致了事故的增多，据统计，2020年中国交通事故共发生247646起，对居民生命财产安全造成了威胁的同时也带来的巨大的经济损失，每年中国因交通拥堵带来的经济损失高达2500亿元。因此，在考虑碳排放的路径优化中引入交通实际状况，在缓解道路拥堵压力的同时也降低了总体配送过程中的碳排放量，在物流配送路径优化问题的研究中具有现实意义。

(3) 冷链物流现状及发展趋势

近些年，随着中国居民消费水平和生活质量的提高，消费者的食品安全意识也在不断提升，居民对于生鲜冷链产品的需求正在快速增加，中国的冷链物流行业正处于快速发展阶段。根据中物联冷链委员会公布数据显示，2015-2020年，中国冷链物流市场规模持续扩大，年均复合增长率为19.2%，2020年冷链物流行业市场规模达到4698亿元，同比增长38.5%。与此同时，中国冷链基础设施建设也在加快推进，国内冷藏车与冷库数量呈现出逐年增长趋势。如图1-1所示。

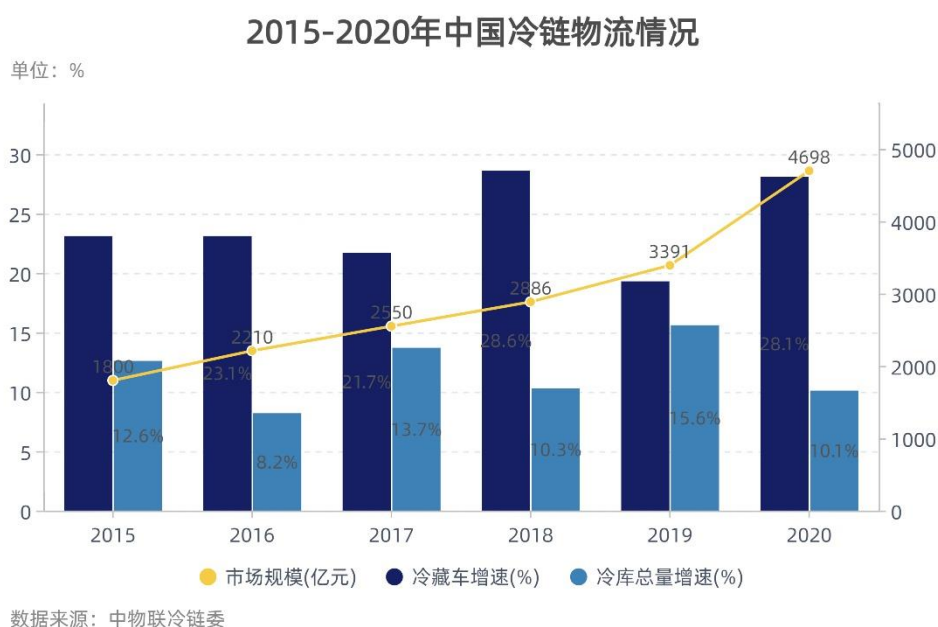


图 1-1 2015-2020 中国冷链物流情况

Figure1-1 Cold chain logistics in China 2015-2020

虽然近几年中国冷链物流行业发展迅速，但目前仍还处于起步阶段。根据中物联冷链委发布的《2019农产品产地冷链研究报告》数据显示，当前中国果蔬、肉类、水产品的冷藏运输率分别为35%、57%、69%，而发达国家平均冷藏运输率高达90%以上。国内冷藏运输率远低于发达国家水平，这导致许多冷链产品在运输环节无法得到规范的保鲜措施。目前，国内的生鲜平均损耗率在10%以上，是欧美发达国家的2-3倍。总体来说，中国在人均冷库容量和冷链耗损率等方面与发达国家的差距较大，国内冷链物流市

场还有较大的发展空间。为保障冷链物流行业的稳定可持续发展，相关部门相继发布了一系列政策法规。2010年中国国家发改委出台了《农产品冷链物流发展规划》；2016年中国铁路总局提出了《铁路冷链物流网络布局“十三五”发展规划》；2020年3月中国国家发改委出台《关于开展首批国家骨干冷链物流基地建设工作的通知》。这些政策重点关注冷链物流设施的配置、冷链物流系统的建立和改善农产品流通的措施，有力地促进了国内冷链物流行业的规范化和快速发展。

不可避免的，在冷链物流行业快速发展的同时也带来一些环境问题。相较于普通公路运输，冷链物流因冷链产品易腐的特殊性，在运输和储存过程需要对产品进行冷藏，这些都需要大量的能源消耗；据悉，相较于普通货车冷藏车的尾气排放增加了30%。而目前由于中国冷链物流路径优化不够成熟，不合理的配送路径致使冷链车的空载率较高，增加了城市道路负担，这些都将加重中国碳排放总量，为环境带来不利影响。因此，冷链物流未来若能着眼于冷链绿色化转型，基于低碳视角，以降低配送过程中的碳排放为目标之一，构建合理的配送路径，不仅能在一定程度上降低企业冷链物流成本，也更加符合全球低碳化的国际环境，亦对中国“双碳”目标的实现做出贡献，促进冷链物流行业的健康发展。

本文正是在这样的背景下，基于绿色低碳视角，选择冷链物流配送路径优化问题进行研究。考虑到冷链产品易腐的特性，为降低产品损耗提高消费者满意度，本文引入了多温共配模式，同时考虑了配送过程中道路实况带来的影响，构建了带时间窗的冷链配送路径优化模型，旨在求解冷链配送的最优路径，在满足消费者需求的基础上提高满意度、降低配送成本并实现配送过程的低碳。

1.1.2 本文研究的意义

(1) 理论意义

首先，目前关于低碳物流的研究多集中于物流企业与低碳经济之间的定性分析，低碳车辆路径问题方面的低碳配送问题研究较少。本文根据国际和国内新形势，将碳减排问题应用到冷链物流配送领域，充分考虑了冷链物流领域的行业特性，构建了适用于冷链配送的路径优化模型；另外，利用实际算例对模型进行了检验，对目前低碳车辆问题以及冷链物流相关问题的研究做出了补充。

其次，现有文献对于车辆路径优化问题的模型构建鲜有学者考虑到道路实际因素，本文从实际情况出发，将道路实况引入模型，对车辆路径优化模型进行了更加深入的研究，并弥补了现有研究的不足。

最后，中国学术界在路径优化算法的研究已经取得一定成果，但对于不同领域或者不同场景的算法研究针对性缺乏，本文研究的冷链物流路径优化问题，在低碳视角下考虑了道路实况，引入了多温共配模式，并采用了一些新的研究方法对现有算法进行了改进，丰富了车辆路径优化算法研究的内容。

(2) 实践意义

首先，从政府层面来说，本研究为相应的政策法规的制定提供一些依据。目前，在中国提出“双碳”目标下，各部门针对物流行业先后出台了碳排放相关政策，对冷链行业的绿色转型提出了新要求。本文针对冷链物流配送路径优化问题，研究了冷链物流与碳排放的关系，分析了冷链物流对城市环境影响，为政府制定冷链物流碳排放评估标准提供了参考。

其次，从企业的角度来分析，本研究在企业实现冷链物流绿色化中有指导性作用。本文采用的碳排放计算方式同样可以作为企业实际物流配送中的计算依据，企业在此依据上可以制定更加合理的减排目标。另外，本文构建的路径优化模型也可用于实际场景，优化企业配送路径及车辆调度提供新的方案，实现企业降低配送成本，提高用户满意度，以及降低燃料消耗的目标。

1.2 国内外文献回顾与评述

1.2.1 国外文献回顾

(1) 考虑碳排放的冷链物流配送路径问题研究现状

Dantzig 和 Ramser 在 1959 年首次提出了车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP)，描述了一个有关车辆运输汽油时服务站选择与车辆调度的问题，该问题的提出在当时的交通运输领域引发了热烈讨论，对该时期交通运输业的发展有着至关重要的作用。早在上世纪八十年代，就有国外学者发现了交通运输会给城市带来空气污染，为缓解交通运输给环境污染带来的压力，国外各学者在低碳物流领域各个研究方向均做了一定的研究。

关于定性研究，Hepburn (2006)^[1]提出了选择合适的政策工具对碳排放监管的重要性，提出了基于价格和数量的两种工具，其中包括碳税、碳排放量限制、碳权交易等政策。Sbihi 等 (2010)^[2]从组合优化角度研究，提出在逆向物流、废弃管理、车辆调度和车辆路径选择等问题中引入环境、经济因素，推进物流行业的绿色化。Devika Kannan 等 (2012)^[3]提出了环境友好型供应链实践的重要性，建立了基于碳足迹的逆向物流网络，并对网络中的选址问题和车辆路径问题进行研究，最后研究了塑料行业的真实案例，验证了模型的有效性。

在定量研究方面，Solomon 等 (1998)^[4]研究了带有时间窗约束的生鲜农产品车辆路径和车辆调度问题，为之后学者对时间窗约束方面的研究提供了数据和指引。Chaabane 等 (2010)^[5]设计了一个基于混合整数线性规划的可持续供应链框架，并考虑了生产和运输中产生的气体排放，最后将该框架应用于铝行业供应链评估，证明了模型的有效性。Stephen 等 (2013)^[6]分析不同车型和单一车型的车辆的配送成本差异，构架了多车型的冷链物流路径优化模型，并应用混合局部搜索的模拟退火算法对模型进

行求解。Osvald (2007) 等^[7]提出了以生鲜产品易腐性为关键因素的生鲜农产品 VRP 模型, 将产品的货损作为总成本的一部分, 使用禁忌搜索法求解问题, 最后应用实例参数对模型的有效性进行验证。De Armas (2015) ^[8]研究了一个带有时间窗的动态多目标车辆路径问题, 并提出了一种基于可变邻域搜索的启发式算法解决问题。

(2) 多温共配的冷链物流配送路径问题研究现状

国外目前有关多温共配的文献并不多, 但也有部分学者在这一方向取得了一定成果, 现有研究主要集中在的不同因素的约束和影响。Kuo Ju Chia, Chen Mu Chen (2010) ^[9]指出对于温度敏感和易腐蚀的冷链产品, 温度监测是有必要, 但实时监测成本过高, 为此提出了一种多温联合配送的模式, 以储存和运输有着不同温度需求的多种产品。Chaug-Ing Hsu 等 (2011) ^[10]对比了冷链产品多温共配模式的传统技术和新技术, 并构建了一个二元整数规划模型, 在“最佳优先搜索”原则下, 使用分支定界法对模型进行求解, 结果显示了多温共配模式的可行性, 另外, 研究还提出可以考虑引入蓄冷保温箱来降低总成本。2013 年, Chaug-Ing Hsu 等 (2013) ^[11]研究了多温共配模式下的中短期的运营计划, 在短期规划中, 对车辆的装载量和出发时间进行了优化, 在中期规划期间, 考虑的车队规模带来的影响。同年, Chaug-Ing Hsu 等 (2013) ^[12]从客户服务需求的角度考虑, 研究了带有时间窗的多温共配模型, 并使用模型确定车辆交付周期和调度列表, 实验结果表明多温共配能在有效降低运输成本的同时提高消费者满意度。

还有一些学者将物联网技术应用于冷链物流的多温共配问题中, Tsang 等 (2018) ^[13]提出了一种基于物联网的冷链产品路径优化模型, 设计了一种多温度的包装模型实现了在运输过程中产品温度的实时监控, 最后利用遗传算法对配送路径进行优化。Tsang 等 (2020) ^[14]在考虑消费者满意度和食品质量的角度下, 构建了一个基于物联网的多目标多温共配模型, 使用两阶段多目标遗传算法 (2PMGAO) 解决该问题。

也有部分学者从碳排放的角度研究了冷链产品的多温共配问题, Wei-Ting Chen 等 (2015) ^[15]考虑了冷链产品运输产生的温室气体, 构建了考虑气体排放和时间窗的多温共配 VRP 模型, 研究对比了传统 VRP 模型和多温共配 VRP 模型碳排放量, 结果表明, 冷链配送虽然因制冷产生额外的碳排放, 单在多温共配模式下碳排放量还是低于传统配送模型, 这展示了多温共配模式的环境友好性。Golestani Maryam 等 (2021) ^[16]在多目标的绿色冷链选址和多温共配问题的研究中, 使用混合整数线性规划和 e-约束方法对模型进行求解。

(3) 考虑道路实况的车辆路径问题研究现状

相较于国内, 国外关于考虑道路交通实况的 VRP 研究较早, 研究成果也更加丰富。Bernhard Fleischmann 等 (2004) ^[17]从现代交通信息系统导出了实际的车辆行驶时间数据, 基于此, 提出了一种通用的框架, 应用在车辆路径优化算法中实现时变速度的刻画, 研究中使用了柏林市的交通数据对算法进行了测试。Richard Eglese 等 (2005) ^[18]根据道路网络构建了一个数据库, 数据库中包含了不同时间段的道路通行时间, 由此计算配送过程中从不同时间开始的行程对应的不同结束时间, 并利用英国西北部的真实道路数据对

模型的有效性进行检验。W. Maden 等（2010）^[19]使用了一种启发式算法解决车辆路径和调度问题，以配送时间最小为目标，考虑了交通道路拥堵的影响构建了数学模型，最后将该模型应用英国西南部的运输车队，结果显示使用模型路径可以减少 7% 的 CO₂ 排放量。

Anna Franceschetti 等（2013）^[20]在时间相关污染路径问题中，指出交通拥堵会显著的限制车辆行驶速度并增加行程中的碳排放量，针对这个问题，作者还提出了一种新的优化算法，对出发时间和车辆行驶速度进行优化。同年，Dabia 等（2013）^[21]求解了一种带时间窗约束的车辆路径问题，模型考虑了道路拥堵的影响，利用分支定价算法进行问题求解，这种算法有分支定界，列生成算法和 VRPTW 的子问题求解三部分组成，在国内比较少见。Liang Wen 等（2014）^[22]以配送费用最小为目标，提出了两种启发式算法来解决时变路网下最小费用路径问题，最后利用伦敦实际道路数据对算法进行了测试。同年，Jiani Qian 等（2014）^[23]将车辆速度作为车辆路径问题中的决策变量，车辆速度有道路实际拥堵指数决定，并提出了两种方法来求解最优路径，一种是基于时间增量的动态规划法，另一种为新型的启发式算法，最后，比较了两种算法的性能。

Yiyong Xiao 等（2016）^[24]在绿色车辆路径问题中，提出一个新的混合整数线性规划模型，模型主要考虑了交通拥堵和时间窗的约束以及碳排放的影响，并使用迭代领域搜索算法解决问题。Sun Shichao 等（2018）^[25]在研究中指出交通拥堵、交通事故和极端天气等因素会造成道路通行时间的不稳定性，构建了随机的时间依赖的校车路径优化模型，并通过实例验证了模型的可行性。

1.2.2 国内文献回顾

（1）考虑碳排放的冷链物流配送路径问题研究现状

车辆路径问题于上世纪由国外科学家提出，国内虽研究起步较晚，但已有不少研究成果，随着全球经济的快速发展，日益严重的环境问题对中国交通运输业提出了新的要求，最近，从低碳视角出发以减少碳排放总量，降低油耗为目的绿色车辆路径问题正成为物流业研究新趋势。近几年，随着冷链物流规模的扩大，不少学者将低碳视角引入对冷链物流领域进行研究，对于传统的路径优化问题来说一般只需要考虑车辆的固定成本和运输成本，而冷链产品的路径优化问题，因其产品的易腐蚀的特性，需要重点考虑运输途中的时间因素所带来的影响，低碳物流方向应该根据冷链物流的行业特性进行研究。目前，中国学者对于低碳冷链物流的研究已有一定成果。

部分学者定性的分析了碳排放与冷链物流关系，并提出了一些对策建议。郭红霞，邵铭（2012）^[26]对中国农产品冷链物流现状进行分析，将低碳经济思路应用于农产品冷链物流领域，引入了第三方物流，并加强整个农产品供应链的信息共享。姜樱梅等（2017）^[27]考虑农产品特性，研究了农产品冷链物流碳排放的成因及现状，提出引入第三、第四方物流企业，构建考虑碳优化的农产品冷链体系，并提出了相应的对策建议。牟进进

(2019)^[28]基于新旧能源的转换视角,提出了四项控制农产品变质损耗的对策。

碳排放的测量与碳排放成本的计算是低碳冷链物流的重要问题之一,因此,一些学者就这部分问题进行了相应的研究。杨建华等(2012)^[29]使用碳税来刻画碳排放成本,构建了一个仓库能力有限的冷链物流配送模型,为企业提供了运营决策依据。黄星星等(2018)^[30]基于“农超对接”的农产品供应链模式,研究了碳税和碳限两种碳规则下生鲜农产品冷链物流配送路径有优化问题,并对碳税和碳限额进行了灵敏度分析。潘茜茜,干宏程(2016)^[31]在传统冷链物流配送路径问题研究中引入碳排放,使用考虑车辆载重的单位距离燃料消耗来刻画碳排放量,并以此计算碳排放成本。但在实际情况碳排放的计算所涉及的因素众多,仅用车辆载重与距离来计算与实际情况还是有一定偏差,因此,王智忆,陆敬筠(2017)^[32]在考虑载重和速度的基础上,同时考虑了车辆的功率的影响,另外对制冷设备的碳排放问题也做了相应的研究。

传统配送模式多以单一车型和单一配送中心为假设,也有部分学者在考虑碳排放的基础上对多车型或多配送中心问题进行研究。杨珍花等(2015)^[33]传统冷链配送的基础上,更加深入地分析了冷链配送的成本问题,在引入碳排放的基础上构建了一种多车型混合模型,结果显示多车型总成本相较于单一车型总成本降低了约12%,并从灵敏度的角度分析了车型使用量与需求量上升的关系。鲍春玲,张世斌(2018)^[34]结合了冷链物流企业拥有多个配送中心的实际情况,提出了一种联合配送模式,即“多对多”模式,使用遗传算法进行路径优化,并通过算例仿真,对比了传统分区配送与联合配送模式,验证了联合配送模式的优势。

在冷链物流配送路径优化问题的模型构建方面,许多学者在传统低碳模型的基础上设计并构建了更加复合实际情况的优化模型。有的学者出于客户满意度的考虑,构建了带有时间窗的VRP模型,

考虑到当前研究多集中于单一软时间窗约束,马向国(2016)^[35]在分析了冷链物流配送各项成本后,着重考虑了客户服务时间与客户重要性,构建了一种混合时间窗模型。刘炎宝等(2019)^[36]考虑了产品新鲜度下降带来的对消费者满意度影响,在有时间窗约束的同时增加了生鲜农产品新鲜度下降的惩罚成本,并由此构建了路径优化模型,并混合遗传算法和禁忌搜索算法对其进行求解。也有学者基于多目标的角度进行研究,李军涛等(2019)^[37]在引入了模糊时间窗约束的基础上,综合考虑了冷链配送中配送成本、碳排放量、客户满意度三个因素构建了多目标优化模型,通过模糊数学方法对各函数进行去标量化,并采用模糊层次分析法计算三者相应的目标权重系数。

在冷链VRP模型求解方面,国内学者大多选择启发式算法进行求解,并在传统算法的基础上加以改进,以达到更高的运算效率和更加精准的运算结果。方文婷等(2019)^[38]将A*算法引入传统蚁群算法,构造了一种新型的混合蚁群算法,并用实例验证的算法的有效性。康凯等(2019)^[39]为求解有关生鲜农产品冷链物流的路径优化问题,提出了一种结合2-opt局部搜索机制的改进蚁群算法。陶帝豪(2019)^[40]使用全局人工鱼群算法对构建的模型进行求解,并通过Matlab对具体实例进行仿真。

(2) 多温共配的冷链物流配送路径问题研究现状

目前,国内有关多温共配的相关文献和研究还较少,主要集中于多温共配相关理论政策的定性研究、多温共配实现方式的研究以及多温共配冷链 VRP 问题的研究。

在多温共配相关理论政策研究方面。李永开,王淑云(2011)^[41]在寿光蔬菜的研究中,提出了发展多温共配冷链的必要性。在分析鲜活农产品的特性的基础上,吕俊杰,孙双双(2013)^[42]指出中国生鲜农产品在运输途中损耗过大的问题,提出一种设立不同温层的多温共配模式,以提高冷链领域物流资源的利用率,降低冷链产品的腐败率。一年后,吕俊杰等(2014)^[43]对冷链物流多温共配模式的费用分摊机制进行研究,在原有的研究成果的基础上,利用改进后的 Shapley 算法提出了一种结合多温共配模式特性的新型分摊方法,并通过算例验证了方法的实用性。牟进进等(2017)^[44]基于服务创新的角度对蓄冷式多温共配的创新机制进行了研究,并对其服务创新发展问题提出了一些展望与对策。

现有冷链物流多温共配的实现主要有两大方式:蓄冷式多温共配模式和机械式冷冻区隔车运输模式,部分学者在这一方向进行了研究。王淑云,赵敏(2012)^[45]研究了蓄冷技术的运作模式和经济效益,对比了传统的专用冷藏车模式,揭示了蓄冷式冷链物流多温共配模式在降低固定成本、降低产品损耗等方面的优势。王淑云等(2016)^[46]继续对蓄冷式和机械式两种多温共配方式进行研究,对比了两者优缺点,构建了基于蓄冷式多温共配模型和机械式多温共配模型,通过对模型效率进行了深入的对比,结论证明了蓄冷式模型的在实践中优势。戴夏静,梁承姬(2017)^[47]研究了带时间窗的蓄冷式多温共配冷链 VRP 问题,并利用遗传算法对问题进行求解,验证了蓄冷式在总体上优于机械式。胡卫等(2016)^[48]结合了同时送取思想,提出了一种带时间窗约束的机械式冷藏区隔车多温共配模型,最后使用遗传算法解决该问题。

对于冷链物流多温共配 VRP 模型的构建方面,大部分学者选择对时间窗约束,客户需求变化,优化算法的选择等因素进行了研究。陶荣(2014)^[49]提出借助蓄冷式保温箱对冷链产品进行保温,降低运输途中的损耗率,最后从供应商的视角出发,构建了考虑多个成本因素的多温共配冷链物流 VRP 模型,并利用蚁群算法对模型进行求解。王淑云,孙虹(2016)^[50]在客户需求随机的情况下,构建了带时间窗约束的冷链产品多温共配 VRP 模型,使用两阶段法路径优化模型,首先参照历史数据进行预先规划,在需求确定后进行回程补货,提出了一种结合蚁群算法、随机动态规划和 K-Means 聚类算法优点的新算法,另外,还对模型先关参数进行了灵敏度分析。陈婧怡,邱荣祖(2019)^[51]利用 ArcGIS 对多温共配 VRP 模型进行规划,是实例验证了多温共配模式的有效性。丁艳(2021)^[52]使用量子比特对配送路径信息进行描述,并利用蚁群算法进行求解,证实了多温共配模式对车辆装载率和转载率的改进。

(3) 考虑道路实况的车辆路径问题研究现状

现有车辆路径问题对于道路实况因素的研究不在少数。有一些学者选择在这方面进行实证研究,张果果(2016)^[53]以北京 5 条真实配送路径为数据基础,对物流配送路径

优化问题进行了实证研究，提出了物流配送路径优化的六种评价指标，并指出了交通拥堵及交通管制对其中三种指标的影响。

在危险品运输和应急救援领域，也有部分学者在考虑道路实际状况的角度进行研究。阎俊爱，郭艺源（2016）^[54]研究了时变路况下，非常规突发事件下救援物资运输的路径优化问题，为实际中的应急救援问题提供了指导。朱婷等（2016）^[55]研究了危险化学品的配送路径优化问题，提出了运输时间和风险的时变性，并在这两个约束的基础上构建了数学模型，使用蚁群算法对模型进行求解。辛春林等（2016）^[56]在危险品的多式联运路径优化问题的研究中，考虑了时变因素带来的影响，建立了动态的多式联运 VRP 模型。

在模型的策略优化和算法选择方面。石兆，符卓（2013）^[57]考虑了配送时天气、道路状况、交通管制等时变因素对配送时间和成本带来的影响，以客户满意度最大为目标构建了带时间窗的数学模型，采用包含预先优化与实时优化的两阶段优化策略进行问题求解。张湘博等（2017）^[58]在考虑交通拥堵、天气状况、节假日以及环境因素的前提下，构建了一种基于深度学习算法的 VRP 模型，并与传统禁忌搜索算法进行比较，得出了深度学习算法效果更优的结果。葛显龙等（2018）^[59]在有关时变道路的配送路径优化问题中，提出了一种跨时间域计算配送成本的方法，结合重庆市京东的配送实例，运用改进遗传算法对问题进行求解。

也有研究者在考虑道路实况的基础上，结合碳排放和冷链物流等研究方向对车辆路径优化问题进行讨论。徐梅，陈淮莉（2019）^[60]提出了一种考虑交通拥堵的多温共配车辆路径优化模型，使模型更加符合实际情况，使用遗传算法和 Cplex 算法实验结果显示考虑交通拥堵的模型配送成本相较于不考虑交通因素的配送模型降低了约 17%。李顺勇等（2019）^[61]从实际交通一般存在多通路的视角出发，构建了考虑多通路的 GVRP 模型，考虑了实际配送途中车辆的多通路选择问题，研究结果显示在时变网络下的多通路 VRP 能更好地降低油耗。王旭坪（2019）^[62]针对多车型的冷链问题，提出了一种考虑时空距离和碳排放的冷链配送路径优化模型，并提出了一种时空距离度量方法，使模型更加复合实际情况，碳排放的计算通过发动机所做的功来计算。张济风，杨中华（2020）^[63]考虑到配送途中不同路段车辆具有不同行驶速度，基于时变网络的角度构建了冷链物流多温共配 VRP 模型，使用模拟退火算法进行求解，对货损成本中的腐败函数进行改进，刻画了一种随时间动态变化的腐败函数。

1.2.3 研究评述

（1）国外研究评述

通过上文对国外相关文献的梳理，我们不难看出，国外有关车辆路径方面的研究远早于国内，研究范围更加广泛，研究结果也更加丰富。此外，研究冷链物流碳排放问题相对深入，国外学者分别从定性和定量两个角度进行了分析研究。但在冷链品多温共配

问题的研究上比较贫乏，随着冷链物流的发展，消费者满意度在整个配送活动中扮演着愈发重要的角色，而冷链产品的新鲜度对消费者满意度有着显著影响，因此，多温共配模式有着良好的现实研究意义，或将成为未来冷链物流领域的热点问题。最后，在考虑道路实况的车辆路径方面，国外研究人员在模型构建，算法选择方面的研究已经比较成熟，并将其运用于不同场景且取得成效，这为中国今后有关道路实况研究提供了数据基础和方向指导。

（2）国内研究评述

笔者前文通过对低碳冷链物流、多温共配的冷链路径优化和考虑道路实况的车辆路径三个方向的现有文献进行梳理，可以看出，目前国内有关低碳冷链物流的讨论大多集中在引入第三方物流或政府相关的定性研究，对于定量研究较少，虽然有部分学者对低碳冷链 VRP 模型的构建进行了研究，但在冷链物流中讨论碳排放因素还是少数，其中有关碳排放量测算方法和碳排放成本计算方法也较为单一。由于冷链产品易腐的特殊性，部分研究人员提出了将多温共配模式引入传统冷链配送，并构建了相应的数学模型，但在冷链物流领域，有关多温共配的研究还处于起步阶段，对于多温共配模式的研究人员较少，研究方式还较为浅显，未来需要结合不同场景不同角度进一步深入研究。现有的车辆路径优化问题通常假设车辆速度恒定未考虑道路实际状况带来的影响，目前已有研究人员在这一方向进行研究，并取得了一定成果，但从碳排放问题、多温共配模式和冷链物流等多个角度综合考虑的研究非常少。因此，为了使问题更加符合实际场景，可以考虑结合多个研究角度对车辆配送路径进行优化，并使用效率更高的改进算法进行问题求解。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本文在分析了中国冷链发展现状的基础上，指出了中国冷链物流存在的不足之处，结合中国冷链物流行业倡导低碳减排的大环境，本文对低碳冷链物流配送路径优化问题进行研究。综合考虑配送车辆的固定成本、运输成本、制冷成本、配送过程中产生的碳排放成本，以及因未满足客户要求的服务时间窗而产生的惩罚成本作为目标函数，并结合配送过程中的道路实况，引入多温共配模式构建冷链物流的路径优化模型，为解决该问题本文提出了一种结合 2-opt 局部搜索机制改进的蚁群算法。最后，通过实例验证模型和算法的有效性。本文重点研究内容如下：

（1）相关理论研究

本文相关理论研究主要包括冷链物流、低碳物流、车辆路径问题与时变路网四个方面。首先，研究了冷链物流的特点和适用场景，分析了冷链物流配送的管理原则；其次，对有关低碳物流的现有文献进行研究，研究主要从低碳物流的定义、低碳物流的特点、

碳排放量的影响因素及碳排放计算方法三个方向进行；随后，梳理并总结了现存车辆路径问题的主要构成要素、研究方法和研究类型，并对比了不同研究方法的优劣性；最后，对时变路网相关理论进行了研究，对时变路网相关概念和特征进行归纳，讨论了时变路网模型演变和应用。

（2）碳排放成本的计算

现存有关碳排放的计算方法有很多，部分学者根据车辆燃油消耗量、运输距离、行驶速度、距离和承载量计算其汽车碳排放，也有学者通过尾气排放成分计算碳排放。本文模型在考虑道路实况因素的角度下考虑运输距离和车辆装载量，利用单位距离燃料消耗量刻画车辆运输途中的碳排放，最后，引入碳税，将碳排放量转化为配送的碳排放成本。

（3）道路实况的描述

关于实时路况如何量化到整个模型中去，现有方式可以考虑道路通畅模糊评价方法理论，通行时间由路段矩阵计算而来，但矩阵数据是随机生成的；也有使用爬虫爬取高德地图历史数据，转化为车辆的平均速度，但是这些方法一般只考虑整个配送网络的平均速度，较少考虑了不同时间段对通行时间的影响。因此本文参考百度地图拥堵指数预测数据，在配送之前对配送网络中不同时段进行交通拥堵指数的预测，以此计算不同配送路径配送速度，时间和成本。

（4）多温共配模式

对于冷链物流中容易出现产品变质的货损问题，考虑引入多温共配模式，支持配送常温、冷藏和冷冻多种不同类型的生鲜产品。目前研究多温共配问题，车辆类型主要为机械式冷冻区隔车运输和蓄冷式多温共配车运输，两种车型的优缺点各不相同，冷冻成本也不同。传统机械式冷冻区隔车配送效果不错，但是固定成本较高，且卸货过程中容易产生热交换，将带来额外的制冷成本和变质成本，而蓄冷式多温共配利用常温车搭配蓄冷保温箱进行配送，经济性、安全性、灵活性等方面都要优于传统机械式，因此考虑使用蓄冷式多温共配车。

（5）路径优化算法的选择

目前常用的启发式算法有遗传算法，粒子群算法，蚁群算法等。其中蚁群具有正反馈性、较强的鲁棒性、分布式计算、易于与其他方法相结合等优点，因此考虑使用蚁群算法作为本研究的基础算法，在传统蚁群算法中混入 2-opt 局部优化算法，并在启发式因子设计、移动概率的选择规则、信息素更新策略等多个方面对算法进行优化。最后通过实例验证本文改进算法的有效性。

1.3.2 研究方法

本文主要使用了以下几种研究方法：

（1）文献综合研究法

笔者通过对国内外现有文献和研究成果进行阅读和梳理,从考虑碳排放的冷链物流配送路径问题、多温共配的冷链物流配送路径问题以及考虑道路实况的车辆路径问题三个方向进行了文献综述,总结了国内外有关冷链物流配送路径优化问题的以往研究成果,分析了该领域的研究趋势,为本文研究方向提供的理论基础。

(2) 定性与定量分析法

本文定性的分析了影响冷链物流碳排放量的相关因素以及道路实况与车辆通行速度间的关系,此外,本文还定量研究了车辆燃油消耗和碳排放量的计算方法,这些为本研究低碳视角下的冷链物流 VRP 模型的构建提供了指导。

(3) 数学建模法

为系统的深入地研究了低碳冷链物流配送路径优化问题,本文利用数学建模法构建了一个考虑多因素的冷链物流 VRP 模型,以降低配送过程中各项成本为目标,求解配送的最优路径。

(4) 仿真对比分析法

本研究通过 Matlab 对数据进行仿真,对比了多种蚁群算法与本文算法的运行结果,证实了本文改进算法在运行效率和准确性上的优势;对比了考虑碳排放和不考虑碳排放的配送方案,证实碳排放因素对配送路径的影响;对比了考虑道路实况和不考虑道路实况的配送方案,证实了配送环节中考虑道路实况的重要性;对比了多温共配模式下和传统模式下冷链物流配送成本,实验结果证实了多温共配模式的可行性。

1.3.3 技术路线

本文的技术路线图如图 1-2 所示:

第一章 绪论

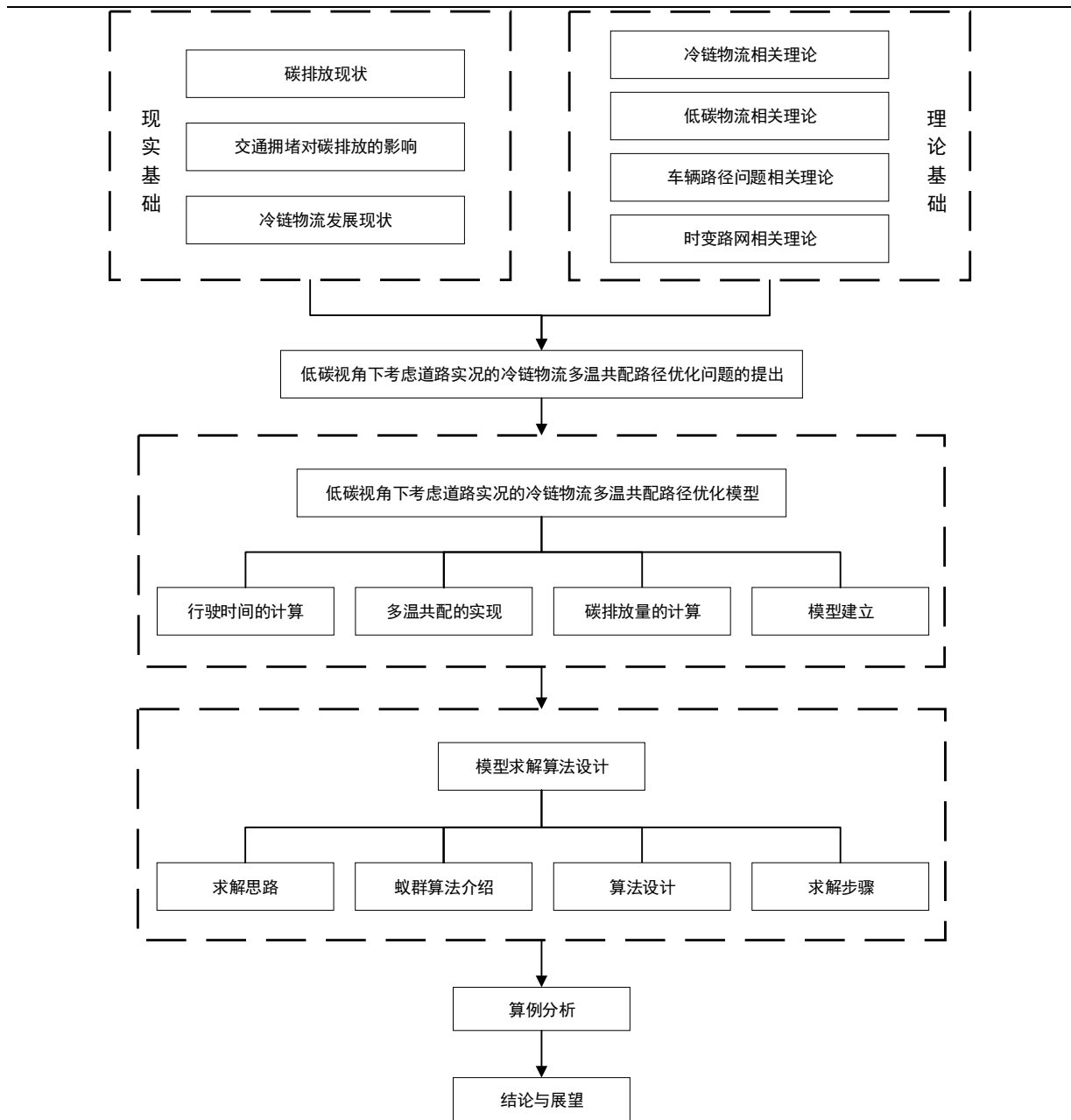


图 1-2 技术路线图

Figure 1-2 Technology roadmap

根据上述的研究方法和技术路线，初定本文基本框架如下：

第 1 章，绪论。首先介绍了本文的研究背景及意义，然后对国内外文献进行回顾与评述，最后介绍了本文研究内容和研究方法，并提出了本文的创新点。

第 2 章，相关理论研究。分别从冷链物流相关理论、低碳物流相关理论、车辆路径问题相关理论及时变路网相关理论四个方面进行了理论研究，为本文研究提供了理论基础。

第 3 章，考虑道路实况的冷链物流多温共配路径优化模型构建。首先，对本文研究问题进行描述；随后，阐述了模型构建中关键部分的实现；最后，分析配送过程中的成本影响因素，构建本文路径优化模型。

第4章，模型求解算法设计。介绍模型求解思路，对传统蚁群算法进行改进，并对算法求解步骤进行概述。

第5章，算例分析。使用 MATLAB 对模型进行算例分析，重点讨论了考虑碳排放和不考虑碳排放的配送方案，考虑道路实况和不考虑道路实况的配送方案，多温共配模式下和传统多车型模式下实验结果。验证了模型及算法的有效性与准确性。

第6章，结论与展望。总结了本文研究的主要结论，并对相关领域的后续研究方向进行展望。

1.4 创新点

(1) 目前，国内虽有学者从低碳、多温共配和考虑道路实况等多个角度对冷链物流配送路径优化问题进行了讨论，但将这三者结合考虑的研究很少，为了使模型更加贴近真实配送环境，笔者综合考虑了三者带来的影响研究了冷链物流配送路径问题，对这一方向研究进行了补充。

(2) 有关碳排放成本的计算方面，重点考虑车辆行驶距离和车辆载重的影响，采用负载估计模型计算碳排放量，并引入碳税计算碳排放成本。

(3) 本文在改进的蚁群算法中混入了 2-opt 局部优化算法，在算法优化方面，启发式因子是启发蚂蚁选择节点的关键因素和蚁群算法的核心部分，可以直接影响到算法的求解质量，本模型在考虑燃油消耗和道路实况的情况下，将车辆载重引入启发式因子；为了算法避免停滞现象出现，算法的移动概率规则采用确定性选择与随机性选择相结合的策略；另外，为了避免算法失去随机性，使用轮盘赌作为选择策略；此外，为避免算法过早收敛于非全局最优解，笔者设定了蚁群算法信息素上下限。

1.5 本章小结

本章首先从碳排放现状、交通拥堵对碳排放的影响、冷链物流发展现状及发展趋势三方面介绍了本文研究背景，同时分析了研究的理论意义和实践意义。在此基础上从考虑碳排放的冷链物流配送路径问题、多温共配的冷链物流配送路径问题、考虑道路实况的车辆路径问题三个角度梳理了国内外研究现状。最后提出了本文的研究内容、方法，并介绍了本文的创新点。

第二章 相关理论研究

2.1 冷链物流相关理论研究

2.1.1 冷链物流的概念

冷链物流一般是指冷藏冷冻类食品从生产，贮藏运输和销售等环节，直至消费之前都要时刻处在指定低温环境之中，从而确保食品质量和降低食品损耗等系统工程。它是伴随着科学技术进步和制冷技术发展而创立的一种基于冷冻工艺学的低温物流工艺。

目前冷链物流的适用范围主要有：初级农产品，如蔬菜，水果；肉类，禽类，蛋类；水产品，花卉产品等。加工食品：速冻食品，禽肉类，水产类及其他包装用熟食，冰淇淋及奶制品；巧克力；快餐原料。特殊商品：药品及其他。

因其物流技术的特殊性，冷链物流的价值主要体现在以下几点：

- (1) 冷链物流使食品保鲜能力增强，存储期延长，符合新鲜食品要求。
- (2) 通过流通环节对食品进行温度控制，减少食品腐败和降低产品损耗量。
- (3) 冷链物流能够在货物装卸过程中实现封闭环境，存储与运输等功能，对食品安全输送起到保障作用。

冷链物流主要有温控保温、冷链仓储、冷链传输、冷链装卸、冷链信息化控制、冷链运输、冷链检验检疫七个组成部分。

- (1) 温控保温：储藏物品温度湿度要求准确的冷库（含恒温恒湿冷库）。
- (2) 冷链仓储：一般用于生鲜农产品，通过冷链仓库对商品进行储存与保管。
- (3) 冷链运输：对于传输机械设备，用具等的使用，需要在设定温度范围内，以实现生鲜农产品分类拣选和打包。
- (4) 冷链装卸：冷链装卸时，应检测物品的温度。冷藏和冷冻物品卸货时间需根据规定要求将卸货车辆和卸货仓库密封，以确保卸货过程中物品温度的上升被限制在许可范围内。而当卸货作业停止后，应立即将运输设备的厢体门关好，以维持制冷系统的正常工作。

(5) 冷链信息化控制：冷链物流信息化系统的关键技术主要有：信息采集和跟踪技术，信息传输和交换技术，信息处理技术。其中信息采集和跟踪技术主要有 RFID 技术、GPS 技术等；信息传输技术主要有物联网、射频识别（RFID）、无线传感器网络（WSN）等技术。信息管理技术主要有数据库管理技术。信息技术作为当代冷链物流的神经系统，容易实现企业所有资源的战略协同管理和冷链物流的成本下降。

(6) 冷链运输：冷链运输是在整个运输过程中，不论是装卸搬运，改变运输方式还是更换包装设备，总是保持被运物品具有一定的温度。冷链运输方式既可采用公路运输，水路运输，铁路运输和航空运输等运输方式，又可采用由各种运输方式构成的综合运输。

(7) 冷链检疫检验: 冷链检疫检验需制定标准有序的食品检疫检验制度, 对运输量较大, 距离较远以及污染概率较大的运输工具安排人员进行管理, 对其进行常规清洗, 消毒等卫生处理以及对冷链物流实施实时监控与温度记录, 以保证运输途中食品质量状态达到要求, 确保进口食品的安全与卫生。

2.1.2 冷链物流的特点

冷链物流的货物一般为易变质易腐的商品, 与普通常温物流系统相比, 需要更加专业的装备, 信息系统和远远庞大的建设投资。相较于常温物流, 冷链行业对于时效性和组织协调性都将有更多的需求。

(1) 物流对象的特殊性

对于冷链物流, 它与其他物流方式有着明显的区别。其特殊性更为突出。物流链的范围也更加复杂, 除了初级农产品外, 还包括加工食品, 不仅如此, 还包括药品等特殊商品。显然, 物流的对象比较特殊, 但它与人类生活密切相关, 几乎包括人类生活的所有方面。

(2) 运作系统相对复杂

冷链物流的主要对象是易腐烂或变质的商品, 冷链物流操作过程应主要针对低温环境。同时对于物流对象在收集和预冷、装卸和运输过程中, 物流的供应链也比较复杂。因此, 一般来说, 冷链物流的操作要求比较高, 对相关人员的工作能力也有更高的要求。

(3) 作业点的协调性

作为一种专业化程度较高的物流模式, 冷链物流运作涉及面广, 而基础运作对相关硬件和配套设施的要求更高。从物流的各个节点来看, 其协调性更为突出。此外, 冷链物流对象本身的重量也应得到保证。

(4) 高成本

因为生鲜商品需要冷链运输, 冷链物流对储存条件、温度要求比较苛刻, 需要专业人员对运输过程的各个环节进行实时监控, 增加了冷链运输的成本和人工成本。此外, 为保证储存条件, 还需要大量的设备和仪器、技术配合, 这就增加了冷链物流的成本。

2.1.3 冷链品的多温共配模式

随着国内冷链行业的快速发展, 消费者对于冷链商品的种类和需求量正在不断增加, 冷链配送领域面临着新挑战, 为了满足消费者多种温层冷链品的需求, 多温共配模式被运用到冷链商品配送场景中。冷链品的多温共配模式指的是在一辆配送车中, 设置多个温度区域, 同时装载温度要求不同的多种商品, 以满足多种温层商品同时配送的目的。在传统冷链配送中, 配送使用的冷藏车往往只能设置单一的冷藏温度, 无法满足消费者多样少量的配送需求, 若将不同温度要求的商品统一装载到一辆冷藏车中, 在配送过程中商品变质的风险将大大增加, 带来便是配送成本的增加与客户满意度的降低; 若选择

使用不同车型运输不同商品，则可能降低冷藏车的装载率，使配送车辆数量增多，这样同样会带来配送成本的增加。多温共配模式的提出解决了传统单品配送的弊端，保证了不同冷链品的冷藏需求，旨在降低冷链品的损耗率的同时，缓解城市交通压力，提高车辆的装载率，降低冷链配送成本。

目前，多温共配模式的实现主要为机械式与蓄冷式两种方式。机械式多温共配的实现需要专用的机械式冷藏车，在冷藏车中使用绝缘材料将车厢分隔为不同温区，并利用冷冻机控制不同温区的温度。相对与传统冷链配送模式，机械式多温共配模式在商品质量和配送效率及成本方面有较大的优势，但由于专用的机械式冷藏车的制造成本通常为普通冷藏车的 2 倍，其前期投入成本及后期维护成本都较高。为此，有学者提出了蓄冷式多温共配模式，在配送前利用保温箱提前蓄冷以保证运输途中的温度需求，再将具有不同温度的蓄冷式保温箱装入冷藏车，在这种模式下使用常规车辆便可以实现多种冷链商品的同时配送。蓄冷箱操作流程如图 2-1 所示。保温箱的使用可以避免传统冷藏箱在配送中装卸的冷气流失，同时保温箱的装卸比较便利，可重复利用，可以有效提高车辆的装载效率，减少能源浪费，大大降低了配送环节的各类成本。

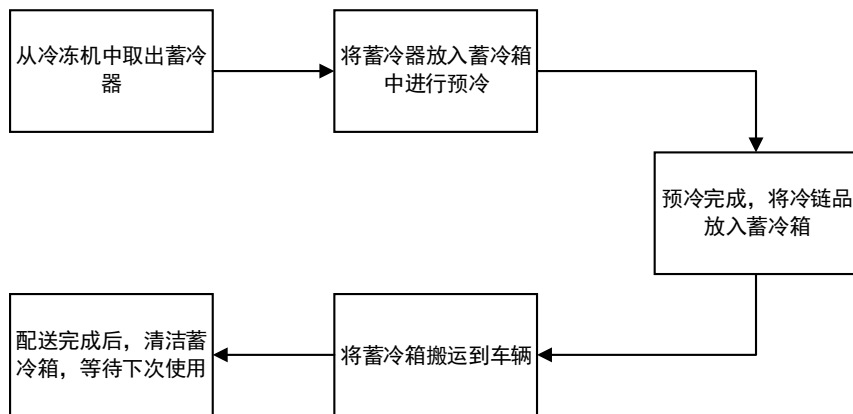


图 2-1 蓄冷箱操作流程

Figure2-1 Operation procedure of cold storage tank

多温共配运作策略在 2006 年被国际制冷学会列为优先研究问题，受到国内外学者的广泛关注。目前，已有一些企业使用多温共配模式以提高冷链运输效益，在中国台湾地区大荣货运采用多温共配模式为多个便利店进行冷链产品的配送，如莱尔富、一统、全家等。基于以上多温共配模式的理论分析，本文将采用蓄冷式多温共配模式对冷链配送进行研究。

2.2 低碳物流相关理论研究

2.2.1 低碳物流的概念

全球碳排放量持续增长，温室效应加剧，随着低碳经济成为世界范围内的热门话题，

低碳物流也随之衍生而出。以可持续发展理念为指引，采用技术创新、制度创新、产业转型和新能源开发等措施，尽可能降低高碳能源消耗和温室气体排放，以实现经济社会发展和生态环境保护的双赢型经济发展，这就是低碳经济。如何利用前沿技术和机制，构建低碳的经济模式和生活方式，促进社会的可持续发展是低碳经济的主要议题。目前，低碳物流的概念主要围绕低碳经济的定义延伸而来，其根本意义是在不破坏物流行业基本发展需求的情况下，尽可能减少行业能源消耗和温室气体排放，旨在实现物流行业的可持续发展。

2.2.2 低碳物流的特点

(1) 系统性

所谓系统，就是为了达到某种目的，由若干因素相互作用、相互影响所形成的有机整体。低碳物流是在低能耗、低排放、低污染的前提下，由低碳存储、低碳运输和低碳包装等三个功能要素组成的系统。从系统的角度看，只有系统的各个功能环节都是低碳的，整体上实现了资源的最大利用，物流系统才能符合低碳物流的内涵。低碳物流不仅是物流系统中的一个子系统，还包括自身的许多子系统：如低碳运输子系统、物流仓储子系统和物流包装子系统。这些子系统也有这个物流系统的固有优势，相互影响。此外，由于系统性也代表着低碳物流的全面性，高碳物流系统同样会受到外部因素的影响，外部因素对低碳物流的实施会产生制约或促进作用。

(2) 双向性

低碳物流的双向性，意味着低碳物流包括两个主要的去碳化方向：正向物流和反向物流。正向物流是指商品按照生产、流通、消费的顺序流动；而反向物流是指商品在正向物流中产生的各种衍生品的低碳化和合理处理，主要表现为对废弃物的回收、分拣、净化、提炼等处理。由于以往对物流的认识多局限于正向物流，忽视了反向物流在节能减排上的作用。在今后的工作中需要同时在正向物流和反向物流两方面实现去碳化。

(3) 多目标性

为了实现可持续发展的最终目标，主要标准是四个目标的统一：经济效益、消费者利益、社会效益和生态效益。作为一种社会经济活动，低碳物流以追求经济效益为基本目标，但从可持续发展的角度看，低碳物流还应关注消费者、社会以及生态环境的利益。低碳物流需要平衡这些目标，而生态环境效益是其他目标实现的保障，对低碳物流的最终实现有着至关重要的作用。

(4) 标准性

在低碳物流不同的功能环节，对节能减排有不同的具体要求。需要针对物流的不同功能环节建立各种标准，并对其进行统一协调，以提高物流系统的管理水平。此外，中国对低碳物流中使用的相关技术都有统一的标准。目前，中国各大城市和绝大多数行业都在开展碳排放限值、审查、评估和验证等方面的标准体系建设的研究工作。

2.2.3 碳排放量的影响因素及计算

在车辆路径问题中，相较于其他成本的计算，车辆行驶过程中碳排放的计算则较为复杂，与其影响因素较多有关。碳排放量的影响因素见表 2-1。

表 2-1 碳排放量影响因素

Table 2-1 Factors influencing carbon emissions

类别	影响因素
车辆因素	车辆类型、车辆质量、发动机型号、燃油种类、 配价、车辆使用年限、汽车牵引力、发动机损失
环境因素	道路类型、道路坡度、温度、气压
交通因素	车辆行驶速度、道路拥堵情况、车辆加速度

根据不同的应用场景和研究模型，各界学者使用碳排放计算方式也不尽相同。针对重型车的碳排放量计算，欧盟提出了交通排放和能量消耗模型（MEET），这种模型根据汽车重量制定了不同的计算方式；对于小于 3.5t 的汽车，碳排放量只与汽车速度有关；对于其他类型的车辆，其碳排放量则受到车辆速度与行驶距离的影响。Bowyer 从微观角度出发，提出了适用于短途运输的瞬时排放模型，该模型考虑了车辆类型、车辆质量、发动机型号、车辆加速度以及能源消耗率等多个因素，对车辆的碳排放量进行测算。还有学者认为汽车的燃油消耗与其负载存在某种线性关系，由此提出了考虑车辆负载和行驶距离两个影响因素的负载估计模型。

目前，有关车辆碳排放量的计算方式繁多，研究人员需要根据研究实际情况选择更加适合的计算方法，以便得到更加精确的研究结果。

2.3 车辆路径问题相关理论研究

2.3.1 车辆路径问题的描述

车辆路径问题（Vehicle routing problem, VRP）这一名词是由学者 Dantzing 和 Ramser^[64]在 1959 年首次提出。之后便引起了学术界的广泛谈论，运筹学、物流学、计算机应用等多个领域的研究人员，对此问题进行了深入研究，并将其应用于实际的生产生活中，例如：车辆调度问题、快递配送投递问题、管道铺设问题。

车辆路径问题一般描述为：对于已知的一系列客户取货点以及需求量，为配送车辆制定合适的配送路线，使车辆在一定的约束条件下（如客户货物需求、服务时间约束、车辆载重约束、里程约束等）有序地通过这些路线，最终达到一定的目标（如总配送成本最小、车辆里程最小、用时最短、碳排放量最低等）。车辆路径问题如图 2-2 所示。

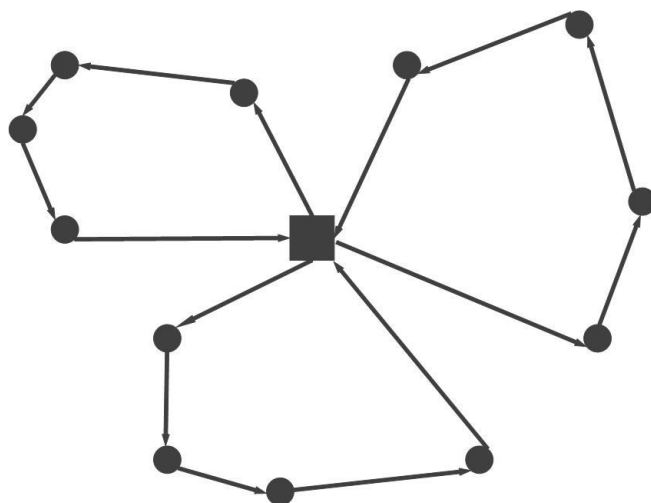


图 2-2 车辆路径问题

Figure 2-2 Vehicle routing problem

2.3.2 车辆路径问题的构成要素

从车辆路径问题的概念可以看出，车辆路径问题主要围绕以下几个构成要素：

(1) 配送中心

配送中心需要对货物进行分拣和装卸，全部车辆须从配送中心驶出，并且，所有车辆在服务完所有用户时需要返回该配送中心。在车辆路径问题中，存在单一配送中心和多配送中心两类情况，在多配送中心问题中，按照不同的配送中心对客户进行划分，可以将拥有多配送中心的车辆路径问题分解成多个单一配送中心的车辆问题。

(2) 客户点

客户点表示车辆路径问题中的所有服务对象，它一般有如下性质：货物的数量和种类不同；顾客所要求的服务时段不同（也称时间窗），顾客在仅在某一特定时间段接收货物；客户点的重要程度不同，重要的客户需要优先服务。

(3) 车辆

在车辆路径问题中，车辆表示运载货物的运输工具，因此，这里的车辆可以指汽车、轮船、飞机、火车、管道等各种交通运输工具。车辆在装载量的限制、油耗的差异、行驶速度的差异、配送费用的高低等方面的差异将影响问题的求解结果。

(4) 道路网络

道路网络为货物运输提供了基础，是构成车辆路径问题的关键要素之一。该网络表示了从配送中心出发车辆经过所有客户点，最后回到配送中心的所有路径的集合。

(5) 约束条件

在规划车辆配送路径时需要满足的若干要求，这些要求被称为约束条件。如车辆使用数量的限定、车辆容量的限制、用户时间窗的要求、车辆行驶里程的限制。

(6) 优化目标

优化目标解决是指车辆路径问题要达到的目标,一般来说包括:最低的总配送成本、最少的车辆使用数目、最短的行驶距离、最高的客户满意度等。

2.3.3 车辆路径问题的研究类型

车辆路径问题的概念自被提出以来,便收到学术界的广泛关注,车辆路径问题的研究被应用于不同场景,目前,车辆路径问题的研究主要集中在以下几个方面:

(1) 多车型问题

根据车辆的类型,可以分为单一车型的车辆路径问题和多车型的车辆路径问题两类。此外,有学者将使用多种运输方式,例如火车与汽车的联合使用,这种情况被称为多式联运的车辆路径问题。

(2) 多车场问题

按照配送中心的数量划分,只有一个配送中心的被称为单一车厂车辆路径问题,而拥有多个配送中心的则被称为多车厂车辆路径问题。

(3) 时间窗问题

根据用户对于服务时间的要求进行划分,其中无时间要求的称为无时间窗约束的车辆路径问题,若用户对时间窗有一定的要求,则被称为带有时间窗约束的车辆路径问题。此外,在有时间窗约束的前提下,更加时间窗的性质可以被细分为硬时间窗约束与软时间窗约束。

(4) 随机需求问题

根据需求是否确定进行划分,用户需求确定被称为需求确定的车辆路径问题,如果用户需求不确定,则为随机需求的车辆路径问题。

(5) 单目标与多目标问题

根据优化目标的不同,可将车辆路径问题划分为单目标和多目标两类,例如,仅以车辆运输成本最小为目标或以车辆行驶距离最短为目标,则被称为单目标车辆路径问题,而以车辆运输成本、车辆固定成本、碳排放成本等多个成本综合最小为目标,则被称为多目标车辆路径问题。

由此我们可以看出,本文所研究的冷链物流多温共配路径优化问题是单配送中心、单一车型、需求确定、带时间窗约束的多目标车辆路径问题。

2.3.4 车辆路径问题的求解方法

目前,各界学者为解决车辆路径问题提出了多种有效的求解方法,如图 2-3 所示。这些算法一般被分为精确算法和启发式算法两种,其中启发式算法又被分为传统启发式算法和现代启发式算法。国内外的研究成果表明,现代启发式算法相较于其他算法求解效率更高,质量更好,因此,现代启发式算法是目前车辆路径问题中使用最为广泛的算法。下文将介绍常用的现代启发式算法的原理及优缺点。

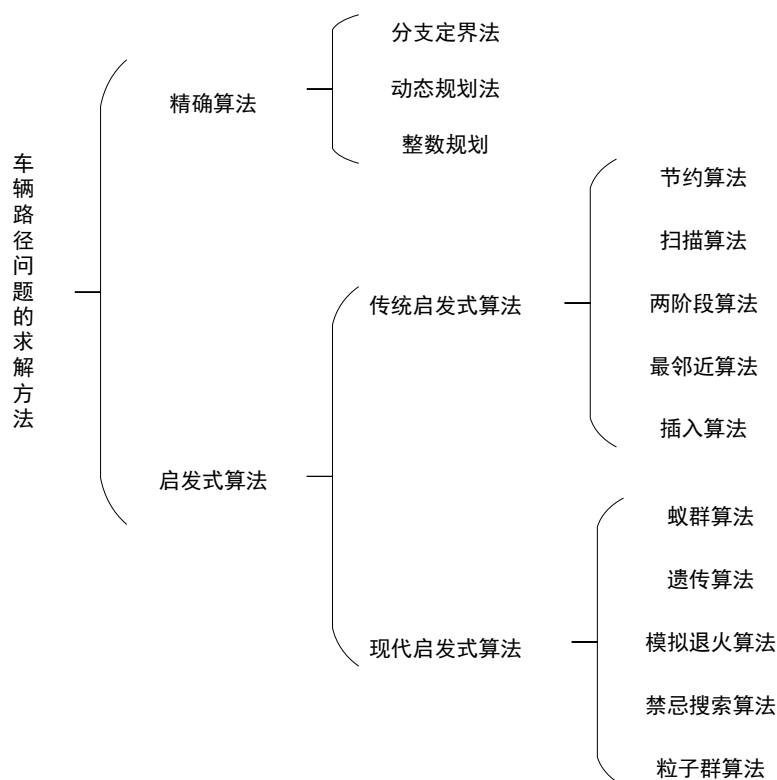


图 2-3 车辆路径问题求解方法

Figure 2-3 Algorithms for Vehicle routing problem

(1) 蚁群算法

蚁群算法 (ACO) 是一种群集智能算法, 它是由一群轻微智能或无智能的个体通过相互合作表现出智能行为, 并为解决一些复杂问题提供了新的思路。蚁群算法是由意大利研究人员 Colomi A, Dorigo M 等^[65]人于 1991 年首次提出的。蚂蚁算法是一种仿生算法, 其灵感来自于野外蚂蚁的觅食行为。在自然界中, 蚂蚁总是能找到一条从食物源到巢穴的最优路径, 这是因为蚂蚁在搜索食物时会分泌出一种特殊的信息素, 其他蚂蚁会根据信息素的浓度来指引方向, 所以当一条路径上通过的蚂蚁数量越多时, 这种信息素的浓度将升高, 其他蚂蚁选择这条路径的概率就越大, 这个过程可以认为是一种正反馈机制。

(2) 遗传算法

遗传算法 (GA)^[66]起源于计算机对达尔文生物进化论的模拟, 是一种随机的全局搜索和优化方法, 它模拟自然选择和遗传中的繁殖、交配和变异, 从任何初始种群开始, 通过随机选择、交配和变异操作, 生成更适合环境的个体群体, 使种群演化到搜索空间中越来越好的区域, 并以这种方式继续不断地繁殖和演化, 最终得到一个最适合环境的个体群, 从而找到问题的高质量解决方案。

(3) 模拟退火算法

模拟退火 (SA)^[67]算法收到统计物理学得启发, 源于固体退火的原理, 是一种概率算法。当一个固体被加热到足够高的温度, 然后让它慢慢冷却, 随着加热, 固体内部的

颗粒变得不规则，内部能量增加，分子和原子变得更加不稳定。随着固体的冷却，颗粒变得更加有序，能量减少，原子变得更加稳定。在冷却过程中，固体在任何温度下都会达到平衡，并最终在室温下达到基态，此时内部能量最小。模拟退火算法从一个较高的初始温度开始，加上温度参数的递减，将概率跳跃的特性与目标函数的随机搜索相结合，在解空间中寻找全局最优，即局部最优解可以概率地跳出，最终向全局最优收敛。模拟退火算法是一种能够避免陷入局部最小值的序列结构并最终向全局最优收敛的优化算法，使搜索过程具有时间变化和最终的零概率跳跃。

(4) 禁忌搜索法

禁忌搜索算法 (TS)^[68]与 1986 年被 Fred Glover 等人提出，是一种常见的邻域搜索算法。禁忌搜索算法的特点是利用禁忌技术来避免重复搜索。它通过建立一个禁忌表来存储已经达到的局部最优状态，在下次搜索中，可以根据禁忌表的信息选择性地避开这些点。禁忌搜索是人工智能的一种表现形式。这种算法的关键思想在于标记已搜索到的局部最优解对象，并尽量避开这些对象，从而保证探索有效的搜索路径。TS 提出了一个基于智能记忆的框架，在实际执行过程中可以根据问题的性质进行调整。在禁忌搜索算法中，一般比较常见的是将其与其他优化算法相结合，即在其他优化算法中使用 TS 算法的思想。

(5) 粒子群算法

1995 年，美国研究人员 Kennedy 和 Eberhart^[69]联合提出了一种粒子群算法 (PSO)，其灵感来自于关于鸟类种群行为的建模和模拟的研究结果。粒子群优化算法是一种进化的计算技术。它起源于对鸟群行为的研究。它的主要思想是利用鸟群中个体之间的信息共享，在解决问题的空间中逐次进化整个鸟群的运动，从而获得问题的可行解决方案。

(6) 现代启发式算法比较

现代启发式算法的优缺点比较见表 2-2

表 2-2 算法对比

Table 2-2 Algorithm Comparison

算法	优点	缺点
蚁群算法	鲁棒性强，搜索灵活，优化性能好	收敛速度慢，易陷入局部最优
遗传算法	鲁棒性强，优化性能好	过早收敛，后期搜索效率低
模拟退火算法	适应性好，渐进收敛性	收敛速度慢，调参复杂
禁忌搜索法	全局搜索能力强	过度依赖初始解
粒子群算法	算法简单，容易实现	性能欠佳，过早收敛

2.4 时变路网相关理论研究

2.4.1 时变路网的理论与特征

时变路网表示车辆在同一路径的行驶时间与车辆的驾驶时段有关，具有一定的时变规律。在现有的与车辆路径问题有关的研究中，为了精简模型与计算，一般假设道路网络上车辆的速度是恒定的。然而在真实的道路网络中，车辆的行驶状况将受到各种因素的影响。

与时间有关的因素包括经常性因素和偶发性因素两类：经常性因素，如早晚高峰时段，此时的车辆拥堵状况可以根据历史数据进行预测；偶发性因素，诸如极端天气、意外交通事故等因素，这些因素几乎是不可预测的，但却能对特定路段的出行时间产生重大影响。由此可以看出，时变路网的特点体现在旅行时间的不确定性以及先进先出性。

(1) 旅行时间的不确定性

在实际情况中，车辆在道路网路中行驶的时间将受到多类因素的影响，在车辆路径问题中如何对这些影响因素进行刻画是国内外学者研究的重点。根据现有的研究结果，一般可以利用道路网路的历史数据对车辆行驶状况进行事前预测，并在车辆行驶过程中进行动态监测，以调整车辆路径规划。但由于预测及规划的有限性，车辆的行驶时间并不能做到完全精确的计算，依旧呈现不确定性。

(2) 先进先出性

先进先出性（FIFO）也被称作不超车特性，可以简单解释为先出发的车辆一定会比后出发的车辆先驶离道路的现象。

2.4.2 时变路网模型

根据现有的研究结果，研究人员提出了以下三种时变模型来描述道路网络的时变性。

(1) 基于行驶时间的时变模型

Manlandraki 与 Daskin M^[70]于 1992 提出了一种基于行驶时间的时变模型，他们将工作时间分成若干个时间段，研究车辆在不同时间段出发，在道路上行驶时间的差异。该时变模型如图 2-4 所示。

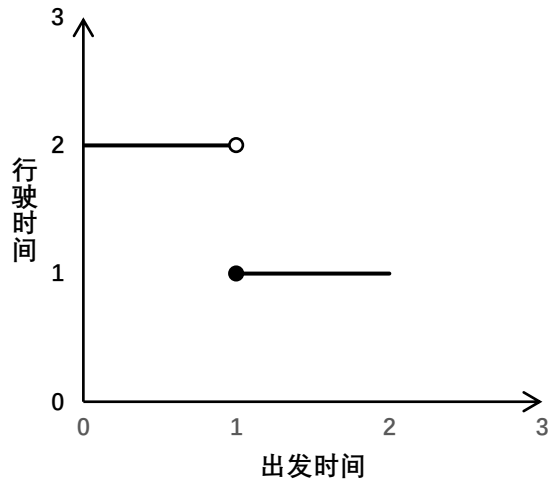


图 2-4 基于行驶时间的时变模型

Figure 2-4 Time-varying model based on travel time

根据图 2-4 所示模型我们可以得出，当车辆在 $t=0$ 和 $t=1$ 之间出发，则需要 2 个单位时间到达终点，当车辆在 $t=1$ 之后出发，则需要 1 个单位时间抵达终点。但是若出发点位于 $t=1$ 附近时，将出现不符合时变路网的 FIFO 原则的现象。假设车辆 1 在 $t=0.9$ 时出发，车辆 2 在 $t=1.1$ 时出发，此时根据模型，车辆 1 在 $t=2.9$ 时抵达终点，车辆 2 在 $t=2.1$ 时抵达终点，这时车辆 2 将先于车辆 1 结束行程，这是不符合常理的。

(2) 基于行驶速度的时变模型

在上述基于行驶时间的时变模型被提出的同年，Hill 等人提出了一种基于行驶速度的时变模型，该模型研究了车辆出发时间与行驶速度的关系，模型如图 2-5 所示。

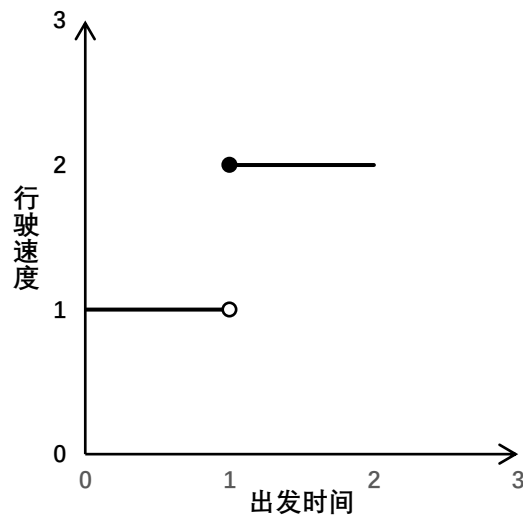


图 2-5 基于行驶速度的时变模型

Figure 2-5 Time-varying model based on travel speed

根据图 2-5 所示模型我们可以得出，当车辆在 $t=0$ 和 $t=1$ 之间出发，车辆在道路中的行驶速度为每单位时间行驶 1 个单位的路程，当车辆在 $t=1$ 之后出发，车辆的行驶速

度为每单位时间行驶 2 个单位的路程。但是若出发点位于 $t=1$ 附近时，同样将出现不符合时变路网的 FIFO 原则的现象。若假设起点到终点距离为 1 个单位路程，且车辆 1 在 $t=0.9$ 时出发，车辆 2 在 $t=1.1$ 时出发，此时根据模型，车辆 1 在 $t=1.9$ 时抵达终点，车辆 2 在 $t=1.6$ 时抵达终点，这时车辆 2 将先于车辆 1 结束行程，这是亦不符合常理的。

(3) 改进的时变模型

2003 年，Ichoua^[71]对上述两种时变模型进行结合，提出了一种改进的时变模型，模型同时考虑了车辆出发时间对行驶速度与行驶时间的影响。其中有关行驶速度的时变模型沿用了 Hill 等人提出的模型，通过该模型确定出发时刻的车辆行驶速度，并计算车辆到达终点的时间，随后判断车辆是否跨时间行驶，若存在跨时间行驶，则对跨时间段的进行计算，最终得到车辆的行驶时间。改进后的时变模型如图 2-6 所示。

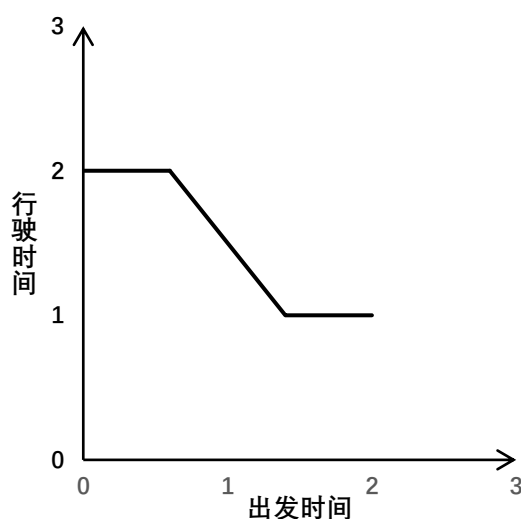


图 2-6 改进的时变模型

Figure 2-6 Improved time-varying model

不难看出，改进后的时变模型，车辆的出发时间与车辆的行驶时间呈线性关系，解决了前两种模型在跨越不同时间段带来的不合理现象，符合时变网络的 FIFO 原则，更加贴近真实的道路网络情况。

2.5 本章小结

本章主要对研究所需的相关理论进行了梳理与总结；首先，笔者对冷链物流相关概念进行了阐述，并对其特点进行了分析，随后对冷链品的多温共配模式进行了研究，为后续冷链配送问题的研究提供了基础；其次，对低碳物流的定义与特点进行了介绍，同时梳理了车辆碳排放量的影响因素和计算方式，为后续模型中碳排放成本的计算提供了方法；随后，从构成要素、基本类型和求解方法三个角度对车辆路径问题相关理论进行了描述，为本文的模型求解提供了依据和思路；最后，笔者对时变路网相关理论进行研究，先后对其相关定义和特点以及时变模型进行了总结，为本文考虑道路实况的车辆路径问题的研究提供了理论基础。

第三章 考虑道路实况的冷链物流多温共配路径优化模型构建

3.1 问题描述

本文研究的是低碳视角下考虑道路实况的冷链物流多温共配路径优化问题，此问题可以具体描述为一个冷链物流配送中心向多个客户配送冷链产品，配送中心采用多温共配模式，使用蓄冷式冷藏车进行配送，为客户提供三类不同温层货物，且每个用户的需求和位置已知；城市道路通行状况具有时变性，车辆在完成配送任务后要返回配送中心。在考虑车辆装载限制和时间窗约束的前提下，满足客户需求，综合考虑配送活动中产生的车辆固定成本、运输成本、制冷成本、惩罚成本、碳排放成本，以总成本最小作为目标，构建一个冷链物流路径优化模型，求解冷链配送的最优路径方案。

3.2 考虑道路实况的车辆行驶时间计算

(1) 节点间距离计算

本文基于百度地图平台提供的数据获取各节点的经纬度，计算各节点间的距离。 (A_i, B_i) 和 (A_j, B_j) 分别表示配送网络中的客户点 i 和 j 的经纬度坐标，为了简化计算，使用俩点间的直线距离 d_{ij} 来描述客户点 i 与 j 的距离，计算方式如公式 3-1 与公式 3-2 所示，其中 R 为地球半径， Pi 为圆周率。

$$C = \sin(B_i) + \sin(B_j) + \cos(B_i) * \cos(B_j) * \cos(A_i - A_j) \quad (3-1)$$

$$d_{ij} = \frac{R * \arccos(C) * Pi}{180} \quad (3-2)$$

(2) 车辆行驶速度计算

在实际的道路网络中，车辆的行驶速度受到多方面的因素影响，比较复杂，为更好的解决本文研究的车辆路径问题，采用百度地图交通大数据平台所提供的交通拥堵指数对车辆行驶速度的刻画，拥堵指数为车辆在某一时间段的实际行驶时间与畅通时间段行驶时间的比值，拥堵指数与道路拥堵程度成正相关，即拥堵指数越大则表示道路通行速度越慢，道路拥堵程度越重。拥堵程度的划分标准如表 3-1 所示。

表 3-1 拥堵程度划分标准

Table 3-1 Congestion level classification criteria

拥堵程度	畅通	缓行	拥堵	严重拥堵
拥堵指数	1-1.5	1.5-1.8	1.8-2	>2

根据表 3-1 的信息我们可以计算出某一地区各时间段的车辆行驶速度。根据百度地

图交通出行大数据平台提供的交通数据，以无锡市为例，在城市交通畅通情况下的车辆行驶速度为 50km/h，将 6:00 至 18:00 的时间以一小时为单位分成 12 段，利用无锡市以往的城市交通拥堵指数，我们可以得出不同时间区间下的车辆行驶速度，如图 3-1 所示。

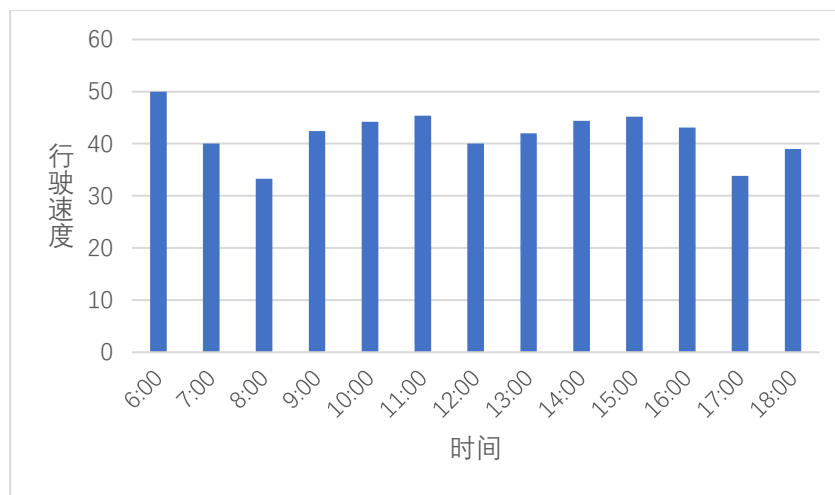


图 3-1 车辆行驶速度

Figure 3-1 Vehicle travel speed

(3) 车辆行驶时间计算

车辆在实际配送过程中存在跨时间段的情况，在本文上一章有关时变网络理论研究中，我们可以发现，车辆在断点处存在着速度跳跃的现象，此时，若采取单一的基于行驶时间的时变模型计算旅行时间，或许会出现违背 FIFO 原则的情况，为了使研究更加符合实际，本文将采用 Ichoua 提出的改进的时变模型来计算车辆在道路中的行驶时间。假设客户 i 到客户 j 间的距离为 d_{ij} ，车辆从客户 i 出发的时间为 t_i ，到达客户 j 的时间为 t_j ， v_{ij}^h 表示在 h 时段车辆在路径 (i, j) 的行驶速度。车辆从客户 i 到客户行 j 驶时间的计算步骤如下，计算流程图见图 3-2。

Step1: 根据图 3-1 的信息，确定车辆从客户点 i 出发时刻的行驶速度 v_{ij}^h ；

Step2: 计算车辆到达客户点 j 的时间 t_j ， $t_j = t_i + d_{ij} / v_{ij}^h$ ，若 t_j 仍与 t_i 处于同一时段，则计算结束。否则转到 Step3；

Step3: 首先，计算未跨时段部分的行驶路程 d_1 ， $d_1 = v_{ij}^h (t_{h+1} - t_i)$ ；则跨时段的部分的行驶路程 $d_2 = d_{ij} - d_1$ ，这部分的行驶时间 $t_2 = d_2 / v_{ij}^{h+1}$ 。则车辆实际行驶时间 $t = t_{h+1} + t_2$ ，计算结束。

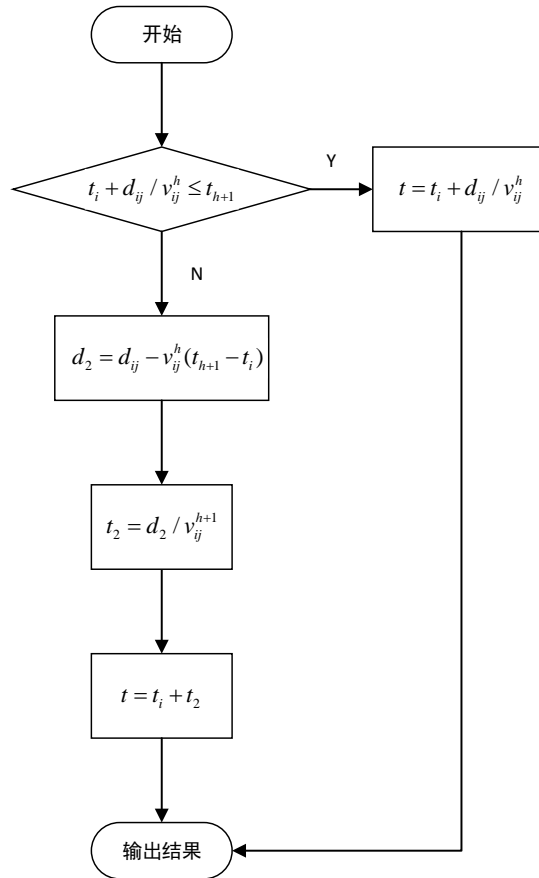


图 3-2 车辆行驶时间计算流程

Figure 3-2 Vehicle travel time calculation process

3.3 多温共配模式的实现

根据现有的研究成果，目前有多种多温共配模式的实现方法，其中蓄冷式多温共配在多个方面有着明显优势。首先，相较于需要专用冷藏车机械式，在常规车辆中使用蓄冷箱可以大大降低冷链配送的固定成本；其次，蓄冷箱的使用可以有效减少运输途中货物装卸带来的热交换，保障冷链品的新鲜度，提高客户满意度。为此，本文将采用蓄冷式多温共配模式。

对于多温共配模式，其不同温层的温度设置较为严格，根据相关文献的阅读，本文设置 3 个温层，依次为鲜食类，冷藏类与冷冻类，各温层放置的冷链品种类不同，通过蓄冷器与蓄冷箱的使用实现各个温层的温度需求。本文三个温层的具体设置如表 3-2 所示。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/266145232032010054>