## 基于粒子群算法的车辆路径规划的调研报告

### 课题背景

在现实应用中，车辆路径规划除正常耗费之外，往往还要考虑实时路况、时间窗约束、时变车速等多种因素。本课题拟构建配送总成本最低、客户平均满意度最高的优化模型。

车辆路线问题（VRP）最早是由Dantzig和Ramser于1959年首次提出，它是指一定数量的客户，各自有不同数量的货物需求，配送中心向客户提供货物，由一个车队负责分送货物，组织适当的行车路线，目标是使得客户的需求得到满足，并能在一定的约束下，达到诸如路程最短、成本最小、耗费时间最少等目的。由定义可知，著名的旅行商问题（TSP）是VRP问题的一个特例，由于Gaery已证明TSP问题是NP难题，因此，VRP也属于NP难题。

VRP自1959年提出以来，因为其应用和经济价值很高，一直收到国内外学者的广泛关注。

VRP问题可以描述如下：

存在一个配送中心D，有M辆车，车辆容积为Q，有N位顾客，每位顾客有其需求量D。车辆从场站出发对客户进行配送服务最后返回场站，要求所有顾客都被配送，每位顾客一次配送完成，且不能违反车辆容量的限制，目的是所有车辆路线的总距离最小。车辆路线的实际问题包括配送中心配送、公共汽车路线制定、信件和报纸投递、航空和铁路时间表安排、工业废品收集等。

在基本车辆路线问题（VRP）的基础上，车辆路线问题在学术研究和实际应用上产生了许多不同的延伸和变化型态，包括时窗限制车辆路线问题、追求最佳服务时间的车辆路线问题、多车种车辆路线问题、车辆多次使用的车辆路线问题、考虑收集的车辆路线问题、随机需求车辆路线问题等。

本课题的研究目标就是多目标优化的TDCVRPTW问题。

### 行业现状

物流是供应链活动的一部分，是为了满足客户的需要，以最低的成本，通过运输、保管、配送等方式，实现原材料、半成品、成品、服务消费以及相关信息由商品的产地到商品的消费地所进行的计划、实施和管理的全过程。物流以仓储为中心，促进生产与市场保持同步。物流行业的参与企业根据自身的定位差异，可分为基础物流资源提供企业和物流资源整合企业。其中，基础物流资源企业主要分布在物流行业各业态及基础设施领域，是物流行业运输网络、节点的主要提供者；物流资源整合企业主要分布在信息系统和物流行业的各业态中。

近年来，我国物流运行保持恢复态势，实体经济持续稳定恢复拉动物流需求快速增长，物流供给服务体系进一步完善，供应链韧性提升，有力地促进宏观经济提质增效降本，到2022年，物流业务活动仍将趋于活跃，物流产业转型升级加速，行业规模再度增长。

从层次来看，物流已经形成多种所有制并存、多元主体竞争、多层次服务共生的格局。从所有制看，国有、民营和外资三足鼎立；从需求看，既有民生需求，也有来自农工商等产业需求；从提供主体看，既有传统企业，也有专业化企业和新兴企业。在近些年物流业重要性日益显现的态势下，社会资本纷纷进入物流领域。服务产品和服务模式日趋呈现多样性，第三方、第四方、供应链、平台、联盟、O2O、众筹等多种经营模式加快发展。服务空间分布上有同城、区域、全国、跨境等多种类型。服务时限上有“限时达、当日递、次晨达、次日递”等多种类型。物流企业不断开拓业务范围，开展代收货款、上门取件、代客报关、代客仓储、代上保险、代发广告、签单返回等时效业务和增值服务；冷链、跨境包裹、社区代收货、智能快递箱、校园快递、农村快递等新兴和专业化业务不断涌现。物流业与电子商务交叉渗透融合进程加快。物流服务竞争方式日趋多样化、差异化，竞争形态发生了很大变化。电商物流、快递快运、物流地产、冷链物流、航空物流、物联网等细分市场成为投资关注点。一些物流企业开始进军物流电商领域。

从物流总额结构来看，物流中绝大部分是工业品物流，其次是进口货物物流，再次是单位与居民物品物流。据资料显示，2022年我国社会物流总额达347.6万亿元，同比增长3.7%。其中，工业品物流总额309.2万亿元，占比为88.93%；农产品物流总额5.3万亿元，占比为1.52%；再生资源物流总额3.1万亿元，占比为0.89%；单位与居民物品物流总额12.0万亿元，占比为3.45%；进口货物物流总额18.1万亿元，占比为5.21%

从费用结构方面来看，运输费用9.55万亿元，占比为53.77%；保管费用5.95万亿元，占比为33.5%；管理费用2.26万亿元，占比为12.73%。21世纪以来,随着经济全球化格局的形成,国内物流行业进入了快速发展通道，物流需求规模持续保持较高增幅，物流业增加值平稳增长。国家统计局数据显示，2013年国内社会物流总额已经达到197.8万亿元，同比增长9.3%,但物流成本过高成为了制约物流业持续、健康发展的重要因素。我国物流成本居高不下，《中国采购发展报告(2014)》统计数据显示，2013年我国社会物流总费用达到10.2万亿元，占GDP的比重为18%,美国这一比重仅为8.5%,发达国家平均比重为9%,发展中国家平均比重为6%..在居高不下的运输成本构成中，燃油费占比46%,公路、桥梁收费占比25%,两者占比合计达到7成多，其余人工成本、车辆保险损耗占比不到3成。究其原因：一方面，国内交通运输配套设施建设滞后，大大增加了物流企业成本支出。另一方面，国内物流面临严峻的收费问题，并呈现出“乱、多、高”现象，大大加剧了企业物流成本负担。

与过去科技含量较低的状况相比，目前物流行业信息化建设有一定进展，物流集成化和自动化水平有较大提升。物流行业自身技术进步较快，信息化程度不断增强。高速铁路、高速船舶、自动化立体仓库、自动分拣设备、智能物流设备等现代物流装备进入快速发展期，物流企业普遍使用手持终端、车辆卫星定位技术、电子条码、无线靶枪等，互联网、车联网、物联网、大数据、云计算等技术加快应用，信息网络技术与物流业进一步加快融合，信息网络技术对物流业务的支持能力进一步增强，物流供需匹配APP系统受到重视。

中国已成为物流大国，但还不是物流强国，物流绩效并不理想。成本高、效率低、集约化水平不高、产业支撑度不足，诚信、标准、人才、安全、环保等“软实力”不强，尚不能满足现代物流国际竞争的需要。物流整体市场环境较为严峻，产业间联动发展空间巨大，物流企业经营压力持续加大，收入利润率低。地方保护、不正当竞争、诚信体系缺失等问题依然存在，资金短缺、人才短缺问题难以缓解，创新驱动的内生机制尚未建立。与此同时，国家支持物流业发展的诸多政策有待落实，相关问题还没有实质性改善。这些对我国物流业进一步发展提出了严峻挑战。

### 现存问题

一是物流系统性不强，网络化程度较低。中国物流系统性和综合性不强，运输结构不合理，网络化和组织化程度较低，呈现分散、各自发展的态势，基础设施的配套性、兼容性较弱，末端网络薄弱。“干、支、末”与“物流枢纽、物流园区、物流中心、配送中心、终端网点”等构成的物流网络很不完善，干线之间、干线支线之间、干线、支线与配送之间、支线与末端之间均存在许多薄弱环节。物理基础设施网络、信息网络、运营网络尚在形成之中。公共物流基础设施、社会化物流基础设施、企业自营物流基础设施之间的比例不尽合理。高效便捷、能力充分、衔接顺畅、结构优化、布局合理的综合交通运输体系尚未形成，综合交通运输枢纽建设滞后，难以实现合理分工和有效衔接，沿海和内陆集疏运体系不配套；一些地方物流园区、物流中心盲目大量兴建情况严重，造成闲置浪费；仓储设施资源分布在不同行业和部门，缺乏有效整合；铁路在综合交通运输中的优势未得到充分发挥

二是物流基础设施结构性短缺。中国物流基础设施相对滞后，存在结构性短缺，现代化设施比重低，不能满足现代物流发展要求。现代化仓储、多式联运转运等设施不足，高效、顺畅、便捷的综合交通运输网络尚不健全，布局合理、功能完善的物流园区体系尚未建立，物流基础设施之间不配套，难以有效衔接。大量煤炭中长途运输依赖公路，造成大量优质能源的消耗和运输成本的增加；部分沿江通道高等级航道占比低，网络化程度不高；航空货运基础设施发展总体不足；仓储建设严重滞后，仓库面积大大低于发达国家水平，全国公共通用仓库建设缓慢且“带病作业”，存在重大安全隐患。

三是第三方物流和供应链服务发展不足。中国第三方物流服务功能单一，市场意识不强，不能满足客户多方位服务需求。第三方物流企业多是由功能单一的运输企业、仓储企业转型而来，经营规模小，综合化程度较低，在管理、技术及服务范围上整体水平不高，不能为企业提供完整的供应链服务。服务水平低，服务成本较高，影响了第三方物流服务效率。大多数第三方物流企业技术装备和管理手段比较落后，服务网络和信息系统不健全，供应链建设和管理服务水平低，很难适应现代物流追求动态运作、快速响应的要求。运行体制不畅，政企职责不分，部门管理中条块分割、分割运营及制度束缚问题突出，物流组织化程度低，一定程度上肢解了物流资源社会化配置综合效益，制约了第三方物流产业发展。

四是物流信息化和智能化滞后。与国际先进水平相比，中国在物流信息化、智能化长期发展战略上尚未形成体系，整体规划能力低。物流信息化建设相对缓慢，行业信息化标准、规范不健全，信息类专业人才相对缺乏；信息资源缺乏统筹开发，共享率低，更新速度慢。物流信息化整体应用水平尚处于较低层次，特别是中小物流企业的信息化水平很低，先进的信息技术应用较少，应用范围有限，信息化对企业运营生产环节的渗入层次较低。缺乏开放式公共物流信息平台体系，缺乏统一的快速反应物流管理信息平台，尚未实现信息共享、一体化服务。物流企业对自身的信息化发展缺乏规划，缺乏覆盖整个企业的、全面集成的信息系统。物流各环节信息化、智能化程度偏低，信息沟通不畅，造成库存、运力浪费，没有发挥“信息流”主导“物品流”的作用。

五是物流业与相关产业联动不足。物流业与制造业、农业、商贸业、电子商务联动不足，物流速度慢、成本高、渠道不畅、模式陈旧，严重制约了制造业由大变强、解决三农问题、推动商贸服务和电子商务的持续发展等进程。集疏运一体化等物流资源的整合和利用的规划、实施难度和成本相对较高，相关产业与物流业不同程度、层次的供需结构性矛盾普遍存在，与物流业联动信息化平台和技术应用滞后，未能充分发挥对联动发展的促进作用。相关行业的物流外包程度相对较低，开放程度有待提高；自营物流退出成本较高，物流外包的风险较难控制，物流外包的服务范围尚待进一步明确。物流业与相关产业联动发展的综合环境落后于中国经济和社会发展的需求和速度，如物流企业深度介入制造业的战略性考虑和能力缺乏，制造业核心竞争力的国际化战略性选择及其物流业务分离和外包的动力不足等。

六是物流应急能力薄弱。中国现有应急物流保障系统抗风险性较差，应急能力薄弱。在应对各类重大突发性事件时，难以做到“第一时间”应急物资的保障。由于传统物流经营互相封闭，割裂了物流各方面的联系，衔接不顺畅，难以及时满足应急保障的需要。现有长期形成的物流定式和以单纯追求经济效益最大化为驱动力的物流模式不利于应急物流的实现，要实现应急物流时间效益最大化，必须有相应的应急机制为基础。现行的应急物流保障机制以行政命令为主要手段，不计物流运作成本，并且应急物流指挥体系不完善、配送指标体系不健全，配送方式欠灵活，交通运输存在较大问题，军地物流服务保障各自为政。应急快速反应机制不健全，社会及部门间缺乏联动互动机制，缺乏所需的基础数据库支持，灾害现场状况恶化和应急技术装备严重不足，集权式应急物流系统模式低效运作。没有形成完善的应急物流预案体系，应急采购制度不健全，国家级救灾物资储备仓库布局不合理和应急衔接不畅。应急物流中应急物资的筹措、储存、运输和补给整个链条运作的整体性和系统性差，应急物资管理条块分割，导致反应能力差。

### 国内外研究现状

#### 车辆路径问题

关于VRP问题的研究成果十分丰富，国内外总共上万篇相关文章，且由于其现实意义，大量企业也投入了许多资源研究该问题。

VRP问题的解法目前主要有两大类，分别是精确求解方法，启发式算法。其中精确求解方法主要有分支界限法，分支界限定价法，列生成算法。启发式算法则比较多样，如遗传算法，模拟退火方法，禁忌搜索，蚁群算法，变领域搜索等。除了这两类，由于深度学习近几年十分火热，部分学者也使用深度学习方法来求解VRP问题及其变体。

分支定界法是一种求解整数规划问题的常用算法，可用于解决纯整数规划和混合整数规划问题。该方法通过将全部可行解空间反复分割为越来越小的子集（分支），并计算每个子集内的解集的目标下界（对于最小值问题）来进行搜索与迭代。在每次分枝后，当发现某些子集的界限超出已知可行解集的目标值时，便不再进一步分枝，而是进行剪枝操作。这种方法的主要思路是不断地分枝和定界，以逐步缩小搜索空间，从而提高求解效率。

列生成算法（Column Generation Algorithm）是一种解决组合优化问题的有效方法，通常用于解决线性规划问题中的大规模问题，尤其是在资源分配、网络设计和运输等领域。列生成算法的基本思想是动态生成可行解空间的列，通过将问题分解为主问题和子问题两个阶段来实现。在主问题阶段，只考虑问题的一部分变量，通常称为列，然后将问题转化为一个小规模的线性规划问题并求解。在子问题阶段，利用主问题的解来生成新的列，并将这些新列加入主问题中，形成一个更大的问题。这样不断迭代，直到找到最优解或满足某个终止条件为止。列生成算法的优点在于它能够充分利用问题的特殊结构和稀疏性，减少了求解问题所需的计算时间和存储空间。它尤其适用于那些具有大规模列集合但只有少数列对目标函数有贡献的问题，如运输网络设计、航班调度和电力系统优化等领域。

遗传算法（Genetic Algorithm）是一种启发式优化算法，模拟了生物进化过程中的自然选择和遗传机制。在遗传算法中，问题的解被编码成染色体或基因型，然后通过模拟自然选择、交叉、变异等操作来生成新的解，并筛选出更好的解。通过不断迭代这些操作，遗传算法能够搜索到问题的全局最优解或接近最优解的解空间。

模拟退火方法（Simulated Annealing）是一种基于物理学原理的全局优化算法，模拟了固体退火时的温度降低过程。在模拟退火中，通过接受概率性的状态转移来避免陷入局部最优解，同时随着迭代的进行逐渐减小接受概率，使算法在搜索过程中逐渐收敛到全局最优解。

禁忌搜索（Tabu Search）是一种启发式搜索算法，用于解决组合优化问题。禁忌搜索通过维护一个禁忌列表来记录已经搜索过的解，以避免重复搜索相同的解，同时引入禁忌策略来引导搜索过程，以尽量避免陷入局部最优解并加速收敛到全局最优解。

变领域搜索（Variable Neighborhood Search，VNS）是一种启发式搜索算法，通过不断变化搜索领域来探索问题的解空间。在变领域搜索中，通过定义不同的搜索领域或邻域结构，并在不同的邻域中进行搜索，以克服搜索过程中可能遇到的局部最优解和搜索空间的局限性，从而提高搜索的效率和全局搜索能力。

前文提到，VRP是TSP的上位问题，所以也属于NP-hard问题，因此目前无法在多项式时间内得到最优解，所以精确算法只能在小规模实例中求解，而大规模实例都采用启发式算法求解。除了运行时间的差距，精确求解算法难度很大，实现十分复杂，但是启发式算法一般算法思想简单，实现简单，因此启发式算法受到广泛的使用。

在运输管理中，VRP有很高的经济价值和意义，因此，很多研究人员一直致力于解决该问题。1959年，Dantzig提出了CVRP问题。1987年，Solomon在CVRP的基础上添加了时间窗约束，也就是CVRPTW问题，并且给出了一组算例，被称为solomon算例，直到今天还在被广泛使用。1999年，Laporte提出了VRP问题的精确算法，同时Larsen使用了Dantzig-Wolfe分解（DW分解算法）的精确方法来解决 CVRPTW。Lysgaard等人提出了分支和切割的算法。

由于VRP是NP-hard问题，所以后续许多研究者使用启发式算法解决这个问题。Toth在2003年提出了基于受限邻域概念的颗粒禁忌搜索策略。Golden在1998年以及Wasil在2005年结合了记录到记录的旅行和可变长度邻域列表，发现了许多新的最优解。Mester在2005年提出了主动引导进化策略AGES并获得了许多最优解。这部分是因为使用了高质量的初始解决方案。其他方法，如Prins在2009年提出的贪心随机自适应搜索过程和Tarantilis以及Kiranoudis在2002年提出的阈值接受算法也得到了成功应用。。其中VNS算法是Imran和Wassan在2009年提出的算法，被认为是解决VRP问题最成功的元启发式算法之一。2007年，Bräysy提出了改进版变邻域搜索算法。Polacek在2004年，以及Polat在2015年也提出了使用VNS算法解决VRP问题。

除了精确算法和启发式算法，部分学者也采用深度学习的方式来求解VRP问题。Elias Khalil在2017年使用图嵌入结构和深度学习方法求解VRP问题。根据结果，该方法在部分数据集上略差于启发式算法，但是在真实世界表现略好。Chaitanya和Alex Nowak在2017年以有监督的方式训练了一个图卷积网络（GCN）。Michel Deudon在2018年将Irwan Bello中的长短期记忆（LSTM）架构替换为Transformer架构，实现了更有效的学习方法。

#### 粒子群算法

粒子群算法（Particle Swarm Optimization，PSO）是一种群体智能优化算法，灵感来源于鸟群或鱼群等生物群体的行为。该算法由美国的James Kennedy和Russell Eberhart于1995年提出，最初用于解决优化问题。

粒子群算法模拟了鸟群或鱼群等生物个体在搜索过程中的群体行为。在PSO算法中，解空间中的每个潜在解被称为粒子，这些粒子沿着解空间中的搜索方向移动，并根据其个体历史最优解和群体历史最优解来调整移动的方向和速度。

PSO算法的基本思想是通过模拟群体的协作和信息共享来搜索解空间中的最优解。每个粒子都有一个位置向量和一个速度向量，它们通过迭代更新来搜索解空间。粒子的移动受到个体历史最优解和全局历史最优解的影响，以及一定程度的随机性。

粒子群算法的理论研究是对该算法本身的探索和改进。Shi等人将惯性权重加入了粒子群算法的速度更新公式中，并通过大量实验测试了惯性权重对于粒子群算法寻优能力的影响。实验结果表明，惯性权重的大小直接决定了整个粒子群在寻优过程中的策略，对于粒子跳出局部最优以及扩大搜索范围具有重要作用。Chaturvedi等人通过对学习因子c1和c2的研究，得出了学习因子的值在[0,2]时，算法能够取得较好的结果。Jin等人提出了一种基于健康度的粒子群算法（HPSO），该算法通过对每一个粒子计算健康度来区分正常粒子和异常粒子，对于每一代中的异常粒子，通过对其个体最优值进行变异操作，提高其健康度。实验结果也表明HPSO具有较好的搜索能力。

因为PSO容易陷入局部最优解，一些研究者也着力研究如何提升PSO的全局搜索能力。综合学习粒子群算法（CLPSO）由Liang等人提出，其特点在于更新单个粒子的飞行速度时，综合了整个种群粒子的历史最优信息。由此，该算法能够维持良好的种群多样性，有效地避免了算法过早陷入局部最优解的问题。Zhan等人提出了自适应粒子群优化算法（APSO），其特点在于具备快速收敛的全局搜索能力。该算法根据种群的空间分布信息和粒子的优劣实时计算并确定粒子群的进化状态，并根据种群的不同状态动态调整算法中的各种参数。这样设计能够使得算法具有较好的搜索性能和收敛速度。此外，APSO还引入了精英学习策略，有助于算法跳出局部最优解。Maurice Clerc在2004年提出了NoHope/ReHope机制，用于在种群陷入局部最优解时重新启动种群，此外，Maurice Clerc还定义了一组行为，将PSO在解空间的连续变化映射为离散变化，并求解了TSP问题。夏学文等人提出了一种具备反向学习和局部学习能力的粒子群优化算法。该算法在每次迭代中记录下最差粒子的位置以及每个个体的历史最差位置。当算法陷入停滞时，部分粒子采用反向学习策略，向这些较差的信息学习，以使粒子摆脱局部最优。同时，利用种群中较优粒子的位置引导粒子在局部进行精细搜索，有效地提高了算法的局部搜索能力。

**设计思路**

本课题研究目标是VRP问题，由于现实世界车辆带有容量限制，所以是带容量限制的VRP问题，由于需要考虑时变车速，所以是时间依赖的VRP问题，由于需要考虑客户满意度，所以是带软时间窗，多目标优化的VRP问题。综上可以将问题缩写为多目标TDCVRPTW。

多目标优化一般有两种思路，一种是设计一个目标函数，函数依赖于需求的目标。常见的方法有权重聚合方法，切比雪夫聚合方法，或者基于惩罚的边界交叉法。还有就是使用帕累托前沿，将所有非支配解都提交给用户。这里打算采用帕累托前沿来返回数据，因为很多时候，客户满意度和成本之间很难权衡，所以将选择权交给用户。

编码方式打算采用《基于粒子群算法求解带时间窗的车辆路径规划问题VRPTW模型》提到的编码方式，将连续的编码映射到离散数据，便于PSO算法求解VRP问题。

由于PSO算法的结果和初始种群质量相关性大，所以打算采用混沌映射生成初始种群，提高种群的多样性。为了解决调参麻烦这件事，打算采用自适应PSO算法来自动调参。