

# 车辆路径问题的模型及算法研究综述

刘云忠, 宣慧玉

(西安交通大学管理学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 本文在文献 [1, 2, 3, 4] 的基础上, 首先, 介绍了车辆路径问题的分类和限制条件; 然后, 全面综述了国内外关于车辆路径问题的模型及算法研究现状, 重点探讨了车辆路径问题的模型构造、求解算法及其适用范围; 最后, 展望了其研究的前景。

**关键词:** 车辆路径问题; 物流管理; 遗传算法; 启发式算法

**中图分类号:** F570.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1004-6062(2005)01-0124-07

## 0 引言

车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP) 是物流管理研究中的一项重要内容。选取恰当的车辆路径, 可以加快对客户需求的响应速度, 提高服务质量, 增强客户对物流环节的满意度, 降低服务商运作成本。车辆路径问题是由 G. Dantzig 和 J. Ramser<sup>[5]</sup> 于 1959 年首先提出来的, 很快引起运筹学、管理学、计算机应用、组合数学、图论等学科的专家学者的高度重视。他们对此问题进行了大量的理论研究和实验分析, 取得了很大的研究进展。其研究结果在运输系统、物流配送系统、快递收发系统中都已得到广泛应用。现在, 对车辆路径问题的研究仍然相当活跃。车辆路径问题一般定义为: 对一系列发货点和/或收货点, 组织适当的行车路线, 使车辆有序地通过它们, 在满足一定的约束条件 (如货物需求量、发送量、交发货时间、车辆容量限制、行驶里程限制、时间限制等) 下, 达到一定的目标 (如路程最短、费用最小、时间尽量少、使用车辆尽量少等)。由此定义不难看出, 旅行商问题 (Traveling salesman Problem, TSP) 是 VRP 的一个特例。由于 Gaery<sup>[2]</sup> 已证明 TSP 问题是 NP 难题, 因此, VRP 也是 NP 难题。

## 1 车辆路径问题的分类及约束条件

根据研究重点的不同, VRP 有多种分类方式。如按任务特征分类, 有装货问题、卸货问题及装卸混合问题; 按任务性质分类, 有对弧服务问题 (如中国邮递员问题) 和对点服务问题 (如旅行商问题) 以及混合服务问题 (如校车路线安排问题)。按车辆载货状况分类, 有满载问题和非满载问题; 按车场数目分类, 有单车场问题和多车场问题; 按车辆类型分类, 有单车型问题和多车型问题; 按车辆对车场的所属关系分类, 有车辆开放问题 (车辆可不返回车场) 和车辆封闭问题

(车辆必须返回车场); 按已知信息的特征分类, 有确定性 VRP 和不确定性 VRP, 其中不确定性 VRP 可进一步分为随机 VRP (SVRP) 和模糊 VRP (FVRP); 按约束条件分类, 有 CVRP (带能力约束)、DVRP (带时间距离约束) 和 VRPTW (带时间窗口); 按需求是否可切分分类, 又可分为可切分的 VRP 和不可切分的 VRP。按优化目标数来分类, 有单目标问题和多目标问题。由于情况的不同, 车辆路径问题的模型构造及算法有很大差别。

在 VRP 中, 最常见的约束条件有:

(1) 容量约束。任意车辆路径的总重量不能超过该车辆的能力负荷。引出带容量约束的车辆路径问题 (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP)。

(2) 优先约束。引出优先约束车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with precedence Constraints, VRPPC)。

(3) 车型约束。引出多车型车辆路径问题 (Mixed/Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem, MFVRP/HFVRP)。

(4) 时间窗约束。包括硬时间窗 (Hard Time windows) 和软时间窗 (Soft Time windows) 约束。引出带时间窗 (包括硬时间窗和软时间窗) 的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with Time windows, VRPTW)。

(5) 相容性约束。引出相容性约束车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with Compatibility Constraints, VRPCC)。

(6) 随机需求。引出随机需求车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand, VRPSD)。

(7) 开路。引出开路车辆路径问题 (Open Vehicle Routing Problem)。

(8) 多运输中心。引出多运输中心的车辆路径问题 (Multi-Depot Vehicle Routing Problem)。

(9) 回程运输。引出带回程运输的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with Backhauls)。

收稿日期: 2003-05-26    修回日期: 2003-10-08

作者简介: 刘云忠 (1970—), 男, 江西新干人, 西安交通大学管理学院博士研究生。

(10) 最后时间期限。引出带最后时间期限的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with Time Deadlines)。

(11) 车速随时间变化。引出车速随时间变化的车辆路径问题 (Time-Dependent Vehicle Routing Problem)。

## 2 车辆路径问题的模型及算法概述

### 2.1 车辆路径问题的模型

一般来说,车辆路径问题可以构造成整数规划模型,也可以构造成图论及其他模型,这些模型之间存在着某种联系。但从建立模型时的出发点考虑,大多数模型都可看成是下面三种模型的变形与组合:

- (1) 以车流为基础的模型;
- (2) 以物流为基础的模型;
- (3) 聚覆盖模型;

### 2.2 车辆路径问题的算法

为简化车辆路径问题的求解,常常应用一些技术将问题分解或转化成一个或几个已经研究过的基本问题,再采用相对比较成熟的基本理论和方法,以得到最优解或满意解。

常见的基本问题有:旅行商问题、分派问题、运输问题、背包问题、最短路问题、最小费用最大流问题、中国邮路问题等。

常用的基本理论和方法有:分枝定界法、割平面法、线性规划法、动态规划法、匹配理论、对偶理论、组合理论、线性搜索技术、列生成技术、拉格朗日松弛技术、状态空间松弛技术、Benders 分解技术、次梯度 (subgradient) 优化技术、概率分析、统计分析、最差情况分析、经验分析等。

实质上,车辆路径问题的求解方法,基本上可分为纯优化算法和纯启发式算法两大类。由于纯优化方法在实际中应用范围很有限,为此,专家学者们主要把精力花在构造高质量的纯启发式算法上。目前已提出的纯启发式算法相当多,大体上可分为以下几类:

#### (1) 先分组后安排路线的方法

这种方法先按节点和/或弧的要求进行分组或划群,然后对每一组设计一条经济的路线。如 Gillett 和 Miller<sup>[3]</sup> 的 Sweep 算法,其目的在于形成需求点的径向区域,从车场(分配中心)发出的射线扫过这个区域,使不超过车辆容量的需求点组成一个区域,一个区域就是一个组,当形成一系列这样的组后,再对每一组中的各点安排路线。这种算法一般仅适用于装货或卸货问题。

#### (2) 先安排路线后分组的方法

这种方法首先构造一条或几条很长的路线(通常不可行),它包括了所有需求对象,然后再把这些很长的路线划分成一些短而可行的路线。具体进行时,一般是先解一个经过所有点的旅行商问题,形成一条路线,然后根据一定的约束(如车辆容量等)对它进行划分。

#### (3) 节约/插入算法

该算法的每一步,把当前的线路构型(很可能是不可行的)跟另外的构型(也可能是不可行的)进行比较,后者或是

根据某个判别函数(例如总费用)会产生最大限度的节约的构型,或是以最小代价把一个不在当前构型上的需求对象插入进来的构型,最后得到一个较好的可行构型。

#### (4) 改进/交换法

在始终保持解可行的情况下,力图向最优目标靠近,每一步都产生另一个可行解以代替原来的解,使目标函数值得以改进,一直继续到不能再改进目标函数值为止。

#### (5) 基于数学规划的算法

把问题直接描述成一个数学规划问题,根据其模型的特殊构型,应用一定的技术(如分解)进行划分,进而求解已被广泛研究过的子问题。

#### (6) 交互式优化法

把人的因素结合到问题的求解过程中,其思想就是:有经验的决策者应具有确定和修改参数的能力,并且根据知识直感,把主观的估计加到优化模型中去,这通常会增加模型最终实现并被采用的可能性。

必须注意的是,这几种纯启发式算法的划分不是绝对的,有的方法同时属于好几类算法。

## 3 确定性 VRP 和不确定性 VRP 的模型及算法

在 VRP 中,问题的算法与所建立的模型密切相关。由于在现有的文献中,大部分文献是研究确定性 VRP 和不确定性 VRP 的,因此,下文将对确定性 VRP 和不确定性 VRP 的算法作详细介绍。

### 3.1 确定性 VRP

确定性 VRP 是现实中最常见的类型。它针对的背景是:已知客户/节点的确切需求信息,以及客户/节点的位置。下面给出的精确算法和人工智能算法都是针对这种类型的问题。

#### (a) 精确算法

精确算法可以分为三个大类:直接树搜索算法、动态规划方法和整数线性规划。

(1) 分枝定界算法。该方法是 Laporte<sup>[6]</sup> 等人提出的。它利用了 VRP 和其放松形式  $mr$ -TSP 间的关系。根据 Lenstra<sup>[2]</sup> 等人所给出的  $m$  的上界  $m_v$ ,  $mr$ -TSP 可转化为 1-TSP。关键步骤是,引入  $m_v - 1$  个伪出发点,  $n = n + m_v - 1$ ,  $V = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $A = AU\{(i, j); i, j \in V, i \neq j, i \text{ 或 } j \in V \setminus V\}$ 。接下来用分枝定界算法求解,可求解有 260 个点的 VRP。

(2)  $k$  度中心树算法。该方法是 Christofides<sup>[7]</sup> 等人提出的。对固定  $m$  的  $mr$ -TSP 进行  $k$  度中心树松弛。所以该方法需要知道所需车辆数的下界。其模型是用边的角度建立的,出发点用一条边来表示,其他点用两条边表示。通过拉格朗日松弛法,将其中一个约束条件消去,并进一步将原来的最小化问题转化为 3 个易于求解的子最小化问题,然后进行求解。目前, M. L. Fisher<sup>[8]</sup> 对它做了进一步改进,可求解有 134 个客户的 VRP。

(3) 动态规划法。动态规划法是由 Elion<sup>[2]</sup> 等人首先提出的。它针对的也是固定车辆数的 VRP,通过递归方法求解。

为减小问题的计算规模,引入可行性规则或松弛过程减少状态的数量。其后,Christofides<sup>[2]</sup>提出了状态空间松弛,极大地减少了状态数量。该方法要求:转换函数易于求解,映射出来的范围小,这样可求得很好的下界。目前可求解有 50 个客户的 VRP。

(4) 集分割和列生成。VRP 的集分割是由 Balinski<sup>[9]</sup>等人首先提出的。它直接考虑可行解集合,在此基础上进行优化,因此建立的 VRP 模型最简单。其缺陷在于,如果问题所受约束不严格,则所需要计算的状态空间非常大。另外,要确定每个可行解的最小成本也是一件困难的事情。对于其中规模相对较小、约束严格的问题,可通过线性松弛,引入割平面进行求解。于是,Rao<sup>[10]</sup>等人引入了列生成方法进行求解。在该方法中,原问题被转化为简化问题,考虑的范围是所有可能的可行解的子集。在此基础上重复求解。通过引入优化对偶变量向量,对该简化问题松弛,通过计算列的最小边际成本,确定最优解。其算法本质上是最短路径算法,同时结合了分枝定界算法。Desrocher<sup>[2]</sup>用它求解有 100 个客户的带时间窗口的 VRP。

(5) 三下标车辆流方程。Fisher<sup>[11]</sup>等人针对带能力约束、时间窗口以及无停留时间的 VRP 问题,提出了三下标车辆流方程。在该方程中,其中两个下标表示弧或边,另外一个下标表示特定车辆的序号。基于 Benders 分解技术,他们提出了一种启发式算法,保证在有限的步骤内找到最优解。Fisher<sup>[11]</sup>等人用它计算了有 50 199 个客户的 VRP。Martello<sup>[2]</sup>和 Desrochers<sup>[2]</sup>分别提出了相应的改进算法。

(6) 二下标车辆流方程。对于对称的 CVRP 和 DVRP,可通过去掉表示车辆序号的下标,引入所需车辆数的下界,得到一个更为紧凑的方程。它所对应的算法结合了爬山法的思想,其算法核心仍然是线性规划,若得到的解是分数解,则用分枝定界算法求其整数解。该方法是由 Laporte<sup>[12]</sup>等人提出的,已用它来求解了规模为 60 的问题。

总的说来,精确性算法基于严格的数学手段,在可以求解的情况下,其解通常要优于人工智能算法。但由于引入严格的数学方法,因而无法避开指数爆炸问题,从而使该类算法只能有效求解中小规模的确定性 VRP。具体到每个算法,他们都有其使用范围和特点。分枝定界算法是从所要访问的点的角度出发建立的,因此不仅适用于对称 VRP,还适用于非对称的 VRP;三下标车辆流方程在模型中有效引入了代表时间窗口的变量,从而可适用于通用任务分配问题(GAP)和带时间窗口的 TSP(TSPITW);二下标车辆流方程是由 TSP 的 SYM 方程扩展而来。由于去掉了代表车辆序号的下标,形式上更为紧凑,具有更少的约束条件,所以仅适用于对称的 CVRP 和 DVRP,而且特别适用于这两种 VRP 中约束条件比较宽松的问题。而  $k$  度中心树、动态规划和集分割等方法在对应的模型中,以不同的方式给出能力约束、子回路约束等约束条件,适用于约束条件严格的问题。

#### (b) 人工智能算法

在求解中小规模 VRP 时,人工智能算法与精确算法相

比,在精度上不占优势。但在求解大规模 VRP 时,人工智能算法总可以在有限的时间里,找到满意的次优解/可行解,这是精确算法难以做到的。因此,在实际应用中,人工智能算法要更广泛。

由于 VRP 与 TSP 存在内在的本质联系,因此有相当数量的 TSP 的启发式算法在考虑到 VRP 的特点和约束后,可以用于 VRP,诸如,邻近点算法、插入算法、行程改进算法等。但是,大多数 VRP 的人工智能算法并不等同于 TSP 的启发式算法,常见的有特色的人工智能算法有以下几种:

(1) Clarke-Wright 算法。该算法是由 Clarke 和 Wright<sup>[13]</sup>提出的,用来解决车辆数不固定的 VRP。该算法最初按所需访问的点数  $n-1$  (不含出发点) 生成同样数量的路径,计算合并任意两条路径后可节省的成本量  $s_{ij} = c_{i1} + c_{1j} - c_{ij}$ 。然后对可节省的成本量进行排序。最后根据排序结果以及可行性条件,对路径进行归并(这里的归并是指:去掉分别位于原来两条路径中的弧  $(i,1)$  和  $(1,j)$ ,用  $(i,j)$  代替),直到无法找到更好的解。这种算法的复杂度为  $O(n^2 \log n)$ 。在 Paessens<sup>[14]</sup>的研究结果中,通过使用适当的数据结构,来降低它的复杂度。

(2) Sweep 算法。该算法是由 Gillett<sup>[15]</sup>等人提出的。即先计算出所要访问的点的极坐标,并按角度大小排序。然后在满足可行性条件的前提下,按角度大小归并到不同的子路径中,最后再根据 TSP 的优化算法对所得到的子路径进行优化。

(3) Chrisofides-Mingozi-Toth<sup>[2]</sup>两阶段算法。它主要面向 CVRP 和 DVRP。该算法的求解过程分为两个阶段:第一阶段按最小路径的原则形成初始解,然后用 k-OPT 算法对所得的各子路径分别进行优化。第二阶段是在各子路径间进行点的交换,以减小总行程,然后用 k-OPT 算法对点交换后的子路径进行优化。该算法的优点是:在计算过程中,考虑了所需要访问的点数量增加的情况。

(4) 禁忌搜索。Gendreau<sup>[2]</sup>等人最先将该方法应用于 VRP。先构造一系列的解,然后对所得解不断地进行改进。该算法所得到的解不一定是可行解,它们对可行性的偏离程度是通过目标函数里的罚函数来体现的。该算法求解过程中的邻域,是通过 GENI 过程得到的。它是针对 VRP 的比较好的启发式算法,可以成功地应用于许多经典的 VRP。其后,E. Taillard<sup>[16]</sup>通过按角度和路径重心对原问题的空间进行分割,再用禁忌搜索结合模拟退火对子问题求解,实现了问题求解的并行化。

(5) 遗传算法。J. Lawrence<sup>[2]</sup>最先将该方法用于 VRP 的研究,并可有效求解带时间窗口的 VRP。鉴于传统的遗传算法是个大范围、粗粒度的寻优算法,因此,Barnier<sup>[2]</sup>将它与约束满足问题(CSP)的技术相结合,通过遗传算法来处理 CSP 参数的子域(基因的适应度是通过 CSP 解的计算得到的),从而减小搜索空间,降低 CSP 问题目标函数和遗传算法约束的复杂度。张涛<sup>[55]</sup>等人则是通过遗传算法来保证搜索的全局性,用 3-OPT 算法来加强局部搜索能力,得到针对 VRP 的

混合算法。这类算法目前已可以求解较大规模的问题(199个客户)。

(6)重复匹配。该方法是由 P. Wark<sup>[17]</sup>等人提出的。首先对每个客户生成一条子路径,然后提供了总匹配成本和负载改变匹配成本,作为归并路径的依据,同时为满足自匹配条件的集合提供分割手段,以利于跳出局部最优。该算法也可求解较大规模的问题(199个客户)。

Clarke-Wright 算法归并子路径的基本前提是要满足车辆的能力约束,因此该算法适用于 CVRP; Sweep 算法通过角度大小对客户/节点加以聚类,本质上是将距离近的客户归并到一个子路径中,同时聚类要满足的可行性条件仍为车辆的能力约束,因此,该方法也适用于 CVRP; Christofides-Mingozi-Toth 两阶段算法、遗传算法进行聚类要满足可行性条件,并且约束条件既可以是能力约束,也可以是时间约束,因此该方法适用于 CVRP 和 DVRP; 禁忌搜索的可行性条件也是可以选择的,因此其适用范围与两阶段算法相同;重复匹配算法在其模型里同时考虑了时间约束和能力约束,因此它适用于这类强约束的 VRP。

### 3.2 非确定性 VRP

#### (a) 随机 VRP

现有的随机 VRP 是针对如下背景的配送问题:每天要访问的客户或节点的数量和位置是固定的,但每个客户每天的需求是不同的,并各自满足一定的可能性分布或随机分布。如果限于时间或资源的关系,调度员无法等到获得所有信息后才做决策,则需要应用本节所讨论的方法。

对这种类型的问题,目前出现的算法大部分可以归纳为以先验(即定)序列为基础的方法。该方法分为两个阶段:在信息不完全(随机)的情况下确定先验序列;在获得确定性信息的情况下进行决策。因此,其随机模型的选择基于两点:第一阶段的成本和第二阶段的期望成本。先验序列的确定方法又有两类:一类是按二元可能性理论来确定,另一类则是基于机会约束规划。

第一类方法的思想最早是在 Jalliet<sup>[2]</sup>的博士论文中提出的,并在 Bertimas<sup>[18,19]</sup>的博士论文中基本建立完整的体系。在该方法中,假定需求分布是二元(即在第  $i$  点有单位需求的概率为  $p_i$ ,则没有单位需求的概率为  $1 - p_i$ )、离散的。根据该假定,可推出先验序列的期望长度,相应的上下界和渐进特性。Michel Gendreau<sup>[20,21]</sup>等人以该理论为基础,得到目标函数和罚函数,以 Clarke-Wright 算法生成初始解,然后用禁忌搜索算法对初始解进一步优化,可以求解规模为 46 的问题。而 Laporte<sup>[22]</sup>基于 L-Shaped 方法,提出一个精确算法,可解决规模小于 50 的问题。

另一类方法是 Stewart, Laporte<sup>[22,23]</sup>等人分别使用机会约束规划,在一定的假定条件下,将 SVRP 转化为等价的、确定性的 VRP,并找到了解的界,其方法的核心是让出错返回的概率不超过一定的界限。机会约束规划模型均以确定性 VRP 的三下标流和二下标流模型为基础,添加可能性约束条件和罚函数后建立起来的。所用的算法,也与确定性的算法

有不少相通之处。如 M. Dror<sup>[24]</sup>就是在建立三下标流机会约束规划模型和罚函数模型后,利用 Clarke-Wright 算法进行求解的。

第二阶段的策略为:按照先验序列,跳过需求为零的客户,直接访问下一个客户,如果车辆负荷超过了车辆最大载重量,则返回出发点卸载,并回到出现超载的地方,继续提供服务。

在随机 VRP 中,还存在 LRP(Location Routing Problem, 位置路由问题)和需求可切分的 SVRP 等类型的问题。LRP 需要在仓库(出发点)运作成本已给出的情况下,确定它们的位置,使仓库运作成本最小化,同时还要给出最优配送路径。G. Laporte<sup>[23]</sup>等人给出的方法也是基于两阶段法,第一阶段确定仓库位置和设计路径,第二阶段采用出错返回方式,并分别建立了基于约束和基于边界罚函数的模型,最后用分枝定界法进行求解。B. Bouzaïene-Ayari<sup>[25]</sup>等人对需求可切分的 SVRP 问题,利用 Dror<sup>[22]</sup>等建立的模型和算法求解。总之,到目前为止,其他类型的 SVRP 模型和求解算法都是以基本型 SVRP 为基础的。

#### (b) 模糊 VRP

在实际的配送体系中,某些待服务的客户/节点需求信息没有或无法给出准确的描述,这样,就需要引入模型和算法来解决这类问题。

D. Teodorovic<sup>[26]</sup>等人是最早着手研究这类问题的人。他以模糊数表示客户点的需求信息,以倾向度为基础建立模糊判定规则,其核心是基于 Sweep 算法,并省略了 Sweep 算法的第二阶段,即初始化子路径后对它们的优化过程。

祝崇俊、刘民、吴澄<sup>[2]</sup>等人以模糊可能性分布,建立了 VRP 的基于置信度的三下标流模型,并提出了基于可能性分布的 2-OPT 算法。该算法引入了伪出发点,建立了以置信度为基础的判定规则,以遍历为终止条件,从而在全局层次上进行优化,同时避免过多地扩大搜索空间。该算法已可解决较大规模的问题(大于 200 个客户)。

## 4 其他类型的 VRP 模型及算法

对满载情况下车辆路径问题的研究,已有的文献资料比较有限。所见的研究仅限于把满载问题化为非满载问题来处理<sup>[27]</sup>。这种方法实质上是设置一个三维变量,以第三维来表示各点之间的车辆次数,相应地构造一个扩展的费用矩阵,这样就把满载问题转化成了非满载问题。

对多车场问题的处理,一般是将多车场问题化为单车场问题来求解。多车场问题转化单车场问题后,再对每一车场按单车场求解。这种算法可借助于一般的单车场算法,但由于是分区优化,只具有局部优化的性质。

对多车型问题,多是仅提出模型,而在解法上尚未提出合理优化的程序和步骤。现有的算法一般要求车辆必须返回原车场。这在单车场问题中没什么影响,但在多车场问题的情况下,由于所有车场处在一个系统中,这样就不能对全局进行优化,而只是一种粗略的近似。只有考虑车辆开放的

情况,才是一种全局优化。

## 5 国内研究现状

我国对车辆路径问题的研究是在 20 世纪 90 年代以后才逐渐兴起,比国外滞后 30 余年。目前,国内对于复杂的车辆路径问题的研究仍处于起步状态,通过中国期刊网数据库检索,1994~2002 年这九年间,在中国的正式期刊上已经发表该领域的文章 43 篇。另外,马为民<sup>[28]</sup>在其博士论文中用在线和竞争策略研究了带时间窗的、开放式 VRPTW。冯萍<sup>[29]</sup>在其硕士论文中用插入法、遗传算法、模拟退火算法研究了带软时间窗的车辆路径问题(VRPSTW)。就收集到的资料来看,我国在这方面的研究具有以下特点:(1)所研究的问题类型都是确定性问题;(2)在 43 篇论文中,有 3 篇是综述性论文,有 2 篇论文是研究算法的复杂度,有 16 篇论文采用遗传算法,其他论文采用聚类分析、列生成、改进表上作业法、模拟退火、人工神经网络、并行表搜索法、分枝定界法、Tabu Search、2-OPT 等算法<sup>[30~45]</sup>;(3)对该领域的专有名词没有统一规范的提法(如对 VRP 的提法有车辆路径问题、车辆路线问题、车辆路线安排问题、路由问题、车辆调度问题、多重运输调度问题);(4)该领域的研究者群体小,仅有西南交通大学、清华大学、浙江大学、北京交通大学、东北大学、南京航空航天大学等少数高校的科研工作者在从事这方面的研究工作,因此,就这方面研究的深度和广度来说,远远不能适应我国配送业以及物流业迅速发展的需要。

## 6 研究前景

如果把 VRP 放在物流管理这个大背景下,我们发现对 VRP 的研究可分为两种情况:一种是仍将 VRP 作为物流管理战术决策层次的相对独立的环节;另一种是将 VRP 与物流管理中的其他环节(如库存)作为一个整体来考虑。

第一种类型的 VRP 是本文介绍的重点,它也是后一种类型问题的研究基础,目前,还需要完成以下工作,以满足物流管理实际应用的要求:

(1) 建立完整的算法评估体系。这需要从两个方面着手,即 VRP 算法的复杂性分析和定界分析(收敛性分析)。通过算法复杂性分析,可为评定算法寻优效率提供依据,同时也为设计出更快算法提供理论指导。现有对算法效率方面的分析多是采用计算时间来衡量,但不同的算法对于不同类型的数据,其算法结果和效率可能会有很大的变化,因此,有必要从数学分析的角度来分析算法的复杂性。定界分析则为评判算法搜索能力提供衡量标准。通过确定算法的上下界,我们可以知道该算法可求得的最好和最差解的范围。同时,通过收敛性分析还可以知道该算法对 VRP 的平均搜索能力。这样,通过算法的上下界和收敛性,就可以选取满足使用者搜索精度要求的算法。

(2) 研究提供实时快速 VRP 算法。现有的算法远不能满足某些应用场合进行实时动态调度的需要,因此有必要提供有效的快速算法。鉴于纯数学的 VRP 算法通常要较长的计

算时间,因此,应用人工智能技术,采用专家系统,降低对寻优精度的要求,从而提高响应速度,是一种现实的途径。当然,对算法复杂性方面的研究,也是构造快速算法的一个有益的途径。

(3) 加强不确定 VRP(包括 SVRP 和 FVRP)的研究。实际上,现实生活中最常见的还是不确定 VRP,大部分确定性 VRP 是不确定性 VRP 的简化。现有的 SVRP 的成果已经可以解决小规模 SVRP,但不能胜任较大规模的 SVRP。解决较大规模的 SVRP 的现实途径仍然是人工智能方法,不过要获得通用的高效算法是困难的,因此应结合邻域特征来研究,并对具有不同邻域特征的问题提出不同的算法。对于 FVRP,应结合模糊可能性理论来进行研究。

(4) 开展开放式 VRP 的研究。传统 VRP 中的车辆都是要返回原起点的,开放式 VRP 中的车辆则不需要返回原点。这种类型可对应于有多个仓储中心的物流体系。它是最近二年出现的研究方向,目前已取得初步成果<sup>[46]</sup>。考虑到该问题的特点,将闭环式 VRP 现有成果扩展到这类情况,是一种快速有效的现实途径。

(5) 尝试用近年来出现的蚁群算法、免疫算法等新的启发式算法解决 VRP。目前,尚未看到有关这方面的研究成果。

第二类 VRP 由于与物流管理的其他环节作为整体来考虑,因此,具有了一定战略(系统)决策的特征,而且从严格意义上来说,这已经不属于纯粹 VRP 范畴。这种问题中的最主要类型是将它与库存作为整体来考虑,即库存-路径问题<sup>[47~49]</sup>。现有的库存-路径策略基本上局限为“零库存订购+固定分区”,因此对这类问题可在以下两个方面进一步展开研究:一方面,可对现有策略进行深入研究,在模型中加入一些实际的限制条件,如将配送中心点的无限能力变为有限能力供给,使模型和算法更接近实际。另一方面,展开对其他库存-路径策略的研究,为具有不同决策倾向的决策者提供决策依据。由于把库存和路径环节作为整体来考虑时,问题的复杂度大为增加,因此,在研究相应的模型和算法时,可进行合理的简化,以降低问题的复杂度。

## 参 考 文 献

- [1] Laporte G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms [J]. European Journal of Operational Research, 1992, 59: 345 ~ 358.
- [2] 祝崇俊,刘民,吴澄. 供应链中车辆路径问题的研究进展及前景. 计算机集成制造系统——CIMS[J]. 2001, 7(11): 1~6.
- [3] 郭耀煌,李军. 车辆优化调度问题的研究现状评述[J]. 西南交通大学学报, 1995, 30(4): 376 ~ 382.
- [4] 谢秉磊,郭耀煌,郭强. 动态车辆路径问题:现状与展望[J]. 系统工程理论方法应用, 2002, 11(2): 116 ~ 120.
- [5] Dantzig G, Ramser J. The truck dispatching problem[J]. Management Science, 1959, (6): 80 ~ 91.
- [6] Laporte G, Mercure H, Nobert Y. An exact algorithm for the asymmetrical capacitated vehicle routing problem [J]. Networks, 1986, 16: 33 ~ 46.

- [7] Christofides N, Mingozzi A, Toth P. Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning the shortest path relaxation[J]. Mathematical Programming, 1981, 20: 255 ~ 282.
- [8] Fisher M L. Optimal solution of vehicle routing problems using minimum k-trees[J]. Operations Research, 1994, 42(4): 626 ~ 642.
- [9] Balinski M, Quandt R. On an integer program for a delivery problem[J]. Operations Research, 1962, 12: 300 ~ 304.
- [10] Rao M R, Zlot S. Allocation of transportation units to alternative trips—A column generation scheme with out-of-kilter sub-problems[J]. Operations Research, 1968, 12: 52 ~ 63.
- [11] Fisher M L, Jaikumar R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing[J]. Networks, 1981, 11: 109 ~ 124.
- [12] Laporte G, Nobert Y, Desrocher M. Optimal routing under capacity and distance restrictions[J]. Operations Research, 1985, 33: 1050 ~ 1073.
- [13] Clarke G, Wright J W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points[J]. Operations Research, 1964, 12: 568 ~ 581.
- [14] Paessens H. The saving algorithm for the vehicle routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 1988, 34: 336 ~ 344.
- [15] Gillett B, Miller L. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem[J]. Operations Research, 1974, 22: 340 ~ 349.
- [16] Taillard E. Parallel iterative search method for vehicle routing problem[J]. Networks, 1993, 23: 661 ~ 673.
- [17] Wark P, Holt J. A repeated matching heuristic for the vehicle routing problem[J]. Operations Research Society, 1994, 45(10): 1156 ~ 1167.
- [18] Bertinas D J, Simchi-Levi D. A new generation of vehicle routing research: robust algorithms, addressing uncertainty[J]. Operations Research, 1996, 44(2): 286 ~ 304.
- [19] Bertinas D J. A vehicle routing problem with stochastic demand[J]. Operations Research, 1992, 40(3): 574 ~ 585.
- [20] Gendreau M, Hert Z A, Laporte G. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem[J]. Management Science, 1994, 40(10): 1276 ~ 1289.
- [21] Gendreau M, Laporte G. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands and customers[J]. Operations Research, 1996, 44(3): 469 ~ 477.
- [22] Stewart W R, Golden B L. Stochastic vehicle routing: a comprehensive approach[J]. European Journal of Operational Research, 1983, 14: 371 ~ 385.
- [23] Laporte G, Louveaux F, Mercure H. Models and exact solutions for a class of stochastic location-routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 1989, 39: 71 ~ 78.
- [24] Dror M, Trudeau P. Stochastic vehicle routing with modified savings algorithm[J]. European Journal of Operational Research, 1986, 23: 228 ~ 235.
- [25] Bouzaïene-Ayari B, Dror M, Laporte G. vehicle routing with stochastic demands and split deliveries[J]. Foundations of Computation and Decision Sciences, 1993, 18(2): 63 ~ 69.
- [26] Teodorovic D, Pavkovic G. The fuzzy set theory approach to the vehicle routing problem when demand at nodes is uncertain[J]. Fuzzy sets and systems, 1996, 82: 307 ~ 317.
- [27] Desrosiers J, Laporte G, Sauve M, Soumis F. Vehicle routing with full loads[J]. Computers and Operations Research, 1988, 15(3): 219 ~ 226.
- [28] 马卫民. 第三方物流配送优化问题及其竞争策略[D]. 西安交通大学博士学位论文, 2003.
- [29] 冯萍. 退火遗传算法在运输路线规划中的应用[D]. 西安交通大学硕士学位论文, 2001.
- [30] 祝崇俊, 刘氏, 吴澄, 吴晓冰. 针对 CVRP 的 2-OPT 算法的时间复杂度均值分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(9): 1218 ~ 1221.
- [31] 祝崇俊, 刘民, 吴澄, 吴晓冰. 针对模糊需求的 VRP 的两种 2-OPT 算法[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1035 ~ 1037.
- [32] 张丽萍, 柴跃廷, 曹瑞. 有时间窗车辆路径问题的改进遗传算法[J]. 计算机集成制造系统——CIMS[J]. 2002, 8(6): 451 ~ 454.
- [33] 姜大立, 杨西龙, 杜文, 周贤伟. 车辆路径问题的遗传算法研究[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 6: 40 ~ 45.
- [34] 郭兰英, 高一凡. 一种运输车辆调度聚类分析模型及仿真研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(1): 92 ~ 96.
- [35] 李军, 郭强. 车辆调度问题的改进表上作业法[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(5): 531 ~ 534.
- [36] 谢秉磊, 李军, 郭耀煌. 有时间窗的非满载车辆调度问题的遗传算法[J]. 系统工程学报, 2000, 15(3): 290 ~ 294.
- [37] 李大卫, 王莉, 王梦光. 一个求解带有时间窗口约束的车辆路径问题的启发式算法[J]. 系统工程, 1998, 16(4): 20 ~ 24, 29.
- [38] 张涛, 王梦光. 遗传算法和 3-OPT 结合求解带有能力约束的 VRP[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1999, 20(3): 254 ~ 256.
- [39] 袁健, 刘晋. 随机需求情形 VRP 的 Hopfield 神经网络解法[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(5): 579 ~ 584.
- [40] 袁健, 刘晋, 卢厚清. 随机需求情形 VRP 的退火网络算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 3: 109 ~ 113.
- [41] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 多重运输调度问题的模拟退火算法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 10: 11 ~ 15, 37.
- [42] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 多重运输调度问题基于双表的并行表搜索算法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 11: 20 ~ 26.
- [43] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 带时间窗的多重运输调度问题的自适应 Tabu Search 算法[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 12: 42 ~ 50.
- [44] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 多重运输调度问题的计算复杂性[J]. 运筹与管理, 1997, 6(3): 1 ~ 5.
- [45] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 多重运输调度问题的分枝定界算法及界限估计[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 459 ~ 462.
- [46] Sariklis D, Powell S. Heuristic method for the open vehicle routing problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(5): 564 ~ 573.
- [47] Chan L M A, Federgruen A, Simchi-Levi D. Probabilistic analysis and practical algorithms for inventory-routing models[J]. Operations Research, 1998, 46(1): 96 ~ 106.
- [48] 汪寿阳, 赵秋红, 夏国平. 集成物流管理系统中定位——运输路线安排问题的研究[J]. 管理科学学报, 2000, 3(2): 69 ~ 75.
- [49] 袁庆达, 游斌. 库存——运输联合优化问题简介[J]. 物流技术, 2001, 5: 9 ~ 10, 17.

## Summarizing Research on Models and Algorithms for Vehicle Routing Problem

LIU Yun-zhang, XUAN Hui-yu

(Management School of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on references [1, 2, 3, 4], first, this paper introduces the classifications and constraint conditions; Second, it gives a full review of achievements of models and algorithms for Vehicle Routing Problem at homeland and abroad, especially inquiring into the model structure, algorithms and its applicable cope of Vehicle Routing Problem. Finally, it prospects future research orientations of it.

**Key words:** vehicle routing problem; logistic management; genetic arithmetic; heuristic arithmetic

责任编辑：杜 健

www.cnki.net