

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

不少企业和公共机构都面临着空间维度上的选址问题，以为客户提供一定的服务功能。工业企业需要在供应链中选择不同的设施，如仓库、制造和组装厂、零售网点等；政府机构也需要确定公共服务设施的位置，如学校、医院、消防站、救护站、垃圾填埋场等。设施选址影响着系统的运营水平和服务水平，好的设计方案可以有效地提高服务质量，降低运输成本。

现实案例中广泛存在着不确定因素，如需求的波动和设施的中断，给选址规划带来了很大的挑战。在过去的几十年里，大量的研究都专注于需求端的不确定性；只有较少的研究关注供应端的不确定性<sup>[1]</sup>。实际上，设施的运作经常会被意外的事件影响，如自然灾害、停电、操作事故、罢工或恐怖袭击。虽然设施中断的概率通常比较低，但是后果是灾难性的。设施的中断，将迫使客户从其他正常工作的设施来寻求服务（尽管距离可能较远），或者完全放弃服务（产生缺货惩罚成本）。无论哪一种情形，系统运行成本都会上升、服务质量会下降。如果多个设施同时失效，所产生的不利影响将会进一步加剧。Kleindorfer 和 Saad<sup>[2]</sup>指出，中断风险的不确定性和需求的不确定性有着根本的不同，因为它们使产品的流动完全停止，并可能持续较长一段时间。设施的中断，将给供应链的结构带来本质的变化，对运营层次的决策（如库存策略、配送路径）带来影响，产生较高的应急成本。这些挑战和复杂性，使研究中断风险条件下的供应链网络设计问题成为必然。

供应链风险<sup>[3]</sup>可以定义为：“由供应链内、外部环境中存在的不确定因素所导致的造成供应链中断或运营障碍的可能性”。21 世纪头几年的

一些中断事件，暴露了各个公司乃至全球整个行业的脆弱性，引起了人们对供应链风险的重视。2001年“9·11”事件中，世贸中心和五角大楼遇袭，供应链风险问题变得空前突出。事件发生后，美国境内桥梁、隧道和机场关闭，物流受阻；零部件的缺乏给汽车行业带来了巨大冲击，福特、通用、本田和丰田都暂时关闭了它们在北美的部分工厂。2008年中国南方遭遇百年不遇的大雪，几乎让所有的道路交通都处于类瘫痪状态；而建立在这些物流网络上的供应链系统，则无一例外地出现延迟。2011年3月11日，日本发生了9.0级大地震，并伴有大规模海啸。厂房损坏、交通堵塞和停电，造成了重大人员伤亡和财产损失，也造成了全国大范围的工业停产；半导体、液晶面板、闪存芯片等电子元件的短期供应中断，影响到了全球电子行业。2011年7月，泰国发生了一场严重洪灾，公路、民航等枢纽节点无法有效运转，相关企业供应链陆续出现中断。泰国是全球硬盘的主产地，这次特大洪水给全球硬盘产业带来重大冲击，导致其价格上涨30%。时至今日，所引发的蝴蝶效应仍未结束。

由于面对供应中断事件反应的不同，直接改变了诺基亚和爱立信这两家欧洲电子公司在手机业务上的平衡。飞利浦是这两大巨头RfC芯片的主要供应商，2000年3月18日，飞利浦设在美国新墨西哥州的芯片厂由于雷电火花引发了一场大火。核心部件的供应中断，对当时需求旺盛的手机业来说，无疑是个致命的重创。爱立信公司在此前为了节省成本，基本上排除了后备供应商；火灾发生时，又错误地低估了该事件的影响而未能及时做出反应，手机生产陷入停工状态，生产计划落空，失去了市场，直接导致当年手机业务亏损17亿美元；第二年初，即宣布退出手机生产。这场持续了10分钟的火灾，害苦了爱立信，却成全了诺基亚。诺基亚公司火线突围挽残局，迅速找到了日本和美国的供应商来承担部分芯片的生产，赶上了市场需求的高潮，在全球移动电话市场上的占有率从27%迅速上升到30%。

上述事件表明，当前的供应链都运行在高度不确定的环境下，中断风险对供应链网络的运营有着重大影响，会降低整体效率，给企业带来难以估量的经济损失。由于供应链上的不同企业相互关联，如果从原材料供应到产品配送的任何环节出现中断，都会影响整个链条的运作，导致供应链运行效率降低、运输成本和库存压力增大。

很多优化模型都通过各种方法,使供应链变得更加精简、有效。然而,最近的研究指出,这方面的努力虽然可以成功地降低运营成本,但是也增加了供应链的脆弱性<sup>[4]</sup>。为了规避风险,提供一个可靠的网络设计方案至关重要,在正常情况和失效情形下,都能以低成本运行良好。因此,在中断风险的可能性下,研究供应链网络的优化设计具有重要的意义。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 供应链网络优化概述

供应链<sup>[5]</sup>是围绕核心企业,通过对商流、信息流、物流、资金流的控制,从采购原材料开始,制成中间产品以及最终产品,最后由销售网络把产品送到消费者手中的将供应商、制造商、分销商、零售商、最终用户连成一个整体的功能网链结构。而供应链网络是由这些相互交互的公司或组织构成的,其目标是生产产品并在指定时间和地点,将产品发送给顾客。对供应链进行优化,就是从整条供应链最优的角度,综合考虑供应商、零售商、最终客户组成的网络,指出各方需要相互协调,以较低成本完成采购、配送等功能。考虑中断风险的供应链网络优化,是指在供应端因为台风、地震、停电、火灾等原因发生故障时,仍然可以以较低成本保证整个网络有序、可靠地运行。

一般的供应链网络设计问题都包括战略层的设施选址问题(facility location problem, FLP),即确定设施(仓库、配送中心(distribution center, DC)、停车场、工厂等)的最优数量及最佳位置,以使物流成本最低<sup>[6]</sup>。设施选址决策对整个供应链网络的效率和效益的提高都起着重要的作用,并且属于长期规划项目,要考虑众多因素,这使得选址问题非常复杂。配送中心的建设投资大、周期长、回收慢,且一经选定后需长期运营,因此,合理选址就显得十分重要。为提高综合效益,在供应链网络的分析和设计时,设施选址需要模型化和定量化。

我国物流业正处于起步阶段,国际上一般以物流成本占 GDP 的比例来衡量一个国家的物流发展水平。据国家发改委网站消息<sup>[7]</sup>,国家发改委、国家统计局和中国物流与采购联合会联合通报 2015 年全国物流

运行情况, 数据显示, 2015 年社会物流总费用 10.8 万亿元, 其中, 运输费用 5.8 万亿元, 占社会物流总费用的比重为 53.3%; 保管费用 3.7 万亿元, 占社会物流总费用的比重为 34.1%; 管理费用 1.4 万亿元, 占社会物流总费用的比重为 12.6%。社会物流总费用占 GDP 的 16.0%, 比 2014 年下降 0.6%。而美国自 1990 年开始, 物流费用占 GDP 的比例就已下降到 10% 左右。这些数据显示, 要降低物流成本、提高物流发展水平, 首先应该降低物流配送成本。优化操作层的配送路径方案, 运输成本最低 (如运费最少), 是降低配送成本的关键。车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP) 是指在配送中心和客户位置已知的前提下, 依据客户的需求量、配送车辆的容量和路况等信息, 确定配送车辆数目以及每一辆车的配送路径, 在满足客户需求的前提下, 使总配送成本最低。

在我国 2015 年的物流费用结构中, 库存保管费用占物流总费用的 34.1%。库存管理是预测、计划和执行补充库存的行为, 并对这种行为进行控制, 重点是确定何时订货、订购多少。库存量过大, 占用资金多, 利息负担重; 库存量过小, 则会出现断档, 影响生产的连续性。库存管理常作为战术层的决策, 支持上游的制造过程和下游的配送过程。

长期以来, 运输问题和库存问题都是被独立研究的, 造成库存成本和运输成本之间存在着“效益背反”(trade-off) 现象。所谓“效益背反”, 通俗地讲, 即此消彼长, 同一资源 (如成本) 的两方相互矛盾, 想要较多地达到某一目的, 必然会使另一方受到部分损失<sup>[8]</sup>。例如, 对零售商来说, 他希望在不缺货和及时满足客户需求的前提下, 尽可能降低自己的库存水平 (零库存), 所以他希望供应商能够准确、及时和频繁地送货, 这必然造成供应商运输成本的增加; 对供应商来说, 他希望大批量配送, 以取得生产和运输的规模效应, 这必然导致零售商库存水平上升、库存成本增加。因此, 把库存和运输分开来单独研究, 会使得一方成本的降低以另一方成本的上升为代价, 难以作出对供应链系统整体最优的库存和运输策略。对库存和路径的整合研究, 即库存-路径问题 (inventory routing problem, IRP), 或库存-运输联合优化 (inventory transportation integrated optimization, ITIO) 问题可以通过协调控制配送过程中的库存成本、运输成本、配送频率和配送数量等因素, 达到有效组织和管理配送活动的目的。

在过去的几十年里,学者们对 FLP 和 VRP 分别进行了大量的研究。Salhi 和 Rand<sup>[9]</sup>指出,将这两个问题分开优化,很容易陷入子问题最优、整体次优,从而增加配送总成本。Stenger 等<sup>[10]</sup>进一步表明 FLP 和 VRP 之间存在强烈的相互依存关系。作为 FLP 和 VRP 的集成问题,即选址-路径问题(location routing problem, LRP)逐渐成为研究热点,指在由一系列客户和潜在在配送中心构成的系统中,确定开放的配送中心位置,同时确定配送车辆从各配送中心出发、完成多个客户需求的行驶路线,使得总费用最小或配送时间最短。

综上,在供应链网络设计中,选址(location)决策、库存(inventory)决策、路径(routing)决策都是相互联系的。Chopra 和 Meindl<sup>[11]</sup>指出,供应链管理的功能可以根据其决策分为战略层、战术层和操作层。战略层面的决策包括协调整个供应链网络(如选址),战术层面的决策涉及到长期的生产决策(如库存),业务层面的决策都集中在短期计划(如车辆调度)。从供应链网络长久的运营来看,三个层次的决策耦合度非常高,相互影响。因此,供应链设计就是在同时兼顾战略层、战术层、操作层的基础上,考虑选址、库存、路径决策,将供应链的长期运营成本减小到最低。本书借鉴了 Guerrero 等人<sup>[6]</sup>的工作,将供应链网络设计问题等价于选址-库存-路径联合优化问题(inventory location routing problem, ILRP)。

### 1.2.2 经典选址问题

经典的选址问题有覆盖问题、 $P$ -中值问题( $P$ -median problem, PMP)、 $P$ -中心问题、无容量限制的设施选址问题(uncapacitated facility location problem, UFLP)、有容量限制的设施选址问题(capacitated facility location problem, CFLP)等<sup>[12]</sup>。下面列出了 CFLP 模型<sup>[12]</sup>,这个模型将在后文中被多次用到。

$$\min \sum_{j \in J} f_j y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_i c_{ij} z_{ij} \quad (1.1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (1.2)$$

$$\sum_{i \in I} d_i z_{ij} \leq C_j y_j, \quad \forall j \in J \quad (1.3)$$

$$y_j, z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (1.4)$$

其中, 集合  $I$  和  $J$  分别是客户点和候选设施的集合, 参数  $f_j$  和  $C_j$  分别是设施  $j$  的开放固定成本和容量,  $d_i$  是客户  $i$  的需求量,  $c_{ij}$  表示客户  $i$  到设施  $j$  单位需求量的运输成本; 二元决策变量  $y_j = 1$  表示开放设施  $j$ ,  $z_{ij} = 1$  表示客户  $i$  的需求由设施  $j$  来满足。引入下面的有效不等式, 能加强问题 (1.1)~(1.4) 的线性松弛:

$$z_{ij} \leq y_j, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (1.5)$$

$$\sum_{j \in J} C_j y_j \geq \sum_{i \in I} d_i \quad (1.6)$$

UFLP 模型由式 (1.1)、式 (1.2)、式 (1.5) 和式 (1.4) 组成。选址模型的标杆算例常采用美国地图数据<sup>①</sup>。这组算例含有一个 49 节点的数据集, 包括华盛顿以及 48 个内陆州的首府; 一个 88 节点的数据集, 包括上述 49 个节点和美国最大的 50 个城市 (去掉重复点); 一个 150 节点的数据集, 包括美国最大的 150 个城市。每个节点同时作为客户点和候选设施点 (即  $I = J$ ), 节点需求与所在州的人数成正比, 节点坐标用经纬度表示。这些算例在文献 [12] 中提出, 并由文献 [13] 做了修改。49 节点的 UFLP 最优解如图 1.1(a) 所示 (图 1.1(b) 和图 1.1(c), 将分别在 1.2.4 节和 1.2.5 节中加以介绍), 一共新建了 5 个设施。

$P$ -中值模型是指, 给定需求已知的客户集合, 在若干候选设施集合中, 找到  $P$  个设施, 并指派每一个客户到一个特定的设施点, 使客户和设施点之间的运输费用最低, 其数学模型表示为:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_i c_{ij} z_{ij} \quad (1.7)$$

s. t.

$$\sum_{j \in J} y_j = P \quad (1.8)$$

式 (1.2), 式 (1.5), 式 (1.4)

<sup>①</sup> 数据来源: <http://coral.ie.lehigh.edu/larry/research/publications/>



图 1.1 模型的比较

(a) UFLP; (b) LMRP; (c) RFLP

若运输成本  $c_{ij}$  独立于需求量, 那么从目标函数 (1.1) 和 (1.7) 中移除参数  $d_i$  即可。

覆盖模型, 就是对于若干需求已知的客户点, 确定一组服务设施来满足这些客户点的需求。此模型需要确定设施的最小数量和合适位置, 可以分为两类<sup>[14]</sup>: 集合覆盖模型, 即用最小数量的设施去覆盖所有的需求点; 最大覆盖模型, 即在给定数量的设施下, 覆盖尽可能多的需求点。

### 1.2.3 选址-路径联合优化问题

在 UFLP 和 CFLP 中, 设施和客户间的运输路径都假定是放射线状。当配送车辆一次装货, 可以服务多个客户时, 这一假设不再成立。LRP 是选址、路径联合优化的问题, 若仓库和车辆都有容量限制, 则构成有容量限制的选址-路径问题 (capacitated LRP, CLRP)。CLRP 假设仓库都是完全可靠的。

较早的研究集中于确定性的 CLRP, 即事先已知问题的所有信息。近几年有不少学者开始关注 CLRP 的精确求解方法, Barreto 等<sup>[15]</sup> 运用割

平面法找到了下界; Belenguer 等<sup>[16]</sup>用有效不等式, 加强了 CLRP 的线性松弛, 并基于 0-1 线性规划模型, 设计了一种分支切割算法。其他的精确算法都基于集划分模型。Akca 等<sup>[17]</sup>设计了一种分支定价法, Contardo 等<sup>[18]</sup>引入了 5 个新的有效不等式, 设计了一种分支-切割-定价法。CLRP 是一个 NP 难问题<sup>[19]</sup>, 这些精确法都只能有效求解规模很小的算例, 如 50 个客户、5~10 个仓库<sup>[20]</sup>。

在过去的十年中, 对 CLRP 的研究出现了许多新的元启发式算法。其中表现最好的是 Prins 等<sup>[21]</sup>提出的贪婪随机自适应搜索 (greedy randomized adaptive search procedure, GRASP) 算法, Prins 等<sup>[22]</sup>提出的拉格朗日松弛-粒度禁忌搜索 (lagrangian relaxation-granular tabu search, LRGTS) 算法, Barreto 等<sup>[15]</sup>提出的聚类分析法, Duhamel 等<sup>[23]</sup>提出的 GRASP 和进化局部搜索 (evolutionary local search, ELS) 的混合算法, Vincent 等<sup>[24]</sup>设计的模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法, Ting 和 Chen<sup>[25]</sup>设计的多蚁群优化 (multiple ant colony optimization, MACO) 算法, 以及 Contardo 等<sup>[26]</sup>设计的基于 GRASP 和整数线性规划 (integer-linear program, ILP) 的元启发式算法。启发式方法能有效求解的算例规模可以达到 300 个客户、20 个仓库<sup>[20]</sup>。

也有不少研究关注于不确定的 LRP, 包括随机的和模糊的<sup>[27]</sup>, 其参数 (如客户需求或者行驶时间) 分别用概率分布和模糊数来表示。在随机 LRP 中, 经常使用的方法包括仿真、期望值模型、机会约束规划和补偿法<sup>[20]</sup>。随机 LRP 的目标通常是最小化固定选址成本和路径成本的和的数学期望。在 Albareda-Sambola 等<sup>[28]</sup>所考虑的随机 LRP 中, 客户需求的出现时间是事先未知的, 其不确定性用伯努利分布来描述。这篇文章采用了两阶段的启发式方法, 第一阶段确定开放的仓库和路径, 第二阶段在给定需要访问的客户之后, 调整路径以满足客户需求。Zhang 等<sup>[29]</sup>与 Javid 和 Azad<sup>[30]</sup>都在 LRP 中引入了库存决策, 其中客户需求分别服从泊松分布和正态分布。Klibi 等<sup>[31]</sup>研究了一个随机的多周期选址-运输问题, 每个客户需求的到达时间和订货量都是随机的, 每个场景中的需求量用蒙特卡洛法产生。Ghaffari-Nasab 等<sup>[32]</sup>研究了一个随机行驶时间的双目标 CLRP。实际应用里, 建模中通常没有足够的历史数据, 随机变量的概率分布也很难预测, 因此, 常引入模糊变量。近年来, Zarandi

等<sup>[33]</sup>研究了一个两节点之间的行驶时间是模糊变量的 CLRP, Zarandi 等<sup>[34]</sup>还研究了带时间窗的 CLRP, 其中客户需求和行驶时间都是模糊变量。Mehrjerdi 和 Nadizadeh<sup>[35]</sup>考虑了模糊需求的 CLRP。这些文献采用模糊机会约束规划来处理模糊变量。

#### 1.2.4 选址-库存联合优化问题

UFLP 和 CFLP 都没有考虑库存成本, 因此, 在有库存成本的网络中应用这些模型, 会导致次优的设计以及不正确的系统成本估计。Daskin 等<sup>[36]</sup>和 Shen 等<sup>[37]</sup>构建了考虑风险共担的选址模型 (location models with risk pooling, LMRP), 在设施选址模型中, 引入了库存成本。“风险共担” (risk pooling) 的概念最早由 Simchi-Levi 等<sup>[38]</sup>提出, 体现了一种集中式库存管理的思想, 指多个客户的订单汇总到上级 DC 时, DC 的需求波动比客户需求波动之和小的现象。这是因为当需求汇总时, 来自某位客户的高需求, 可能被另一位客户的低需求所弥补。49 节点的 LMRP 最优解如图 1.1(b) 所示, 新建了 3 个设施。

文献 [36] 和文献 [37] 描述的是一个三级的供应链网络, 由一个供应商、若干候选 DC 和若干客户组成, 这些 DC 会从供应商订货并服务各客户, 目标是确定 DC 的选址决策和库存策略, 使总成本 (包括 DC 的选址成本、年度订货成本、DC 向供应商订货的运输成本和 DC 给客户供货的运输成本) 最小。客户有独立的正态随机需求, DC 通过持有安全库存来缓冲系统在订货提前期储备不足问题。考虑库存成本会在目标函数中引入非线性项, 这两篇文章分别使用了拉格朗日松弛和列生成来求解, 对凹最小子问题, 设计了一个多项式算法, 假设对于所有客户, 需求的方差均值比是一个定值, 这样可以把每个 DC 的非线性项, 从两个减少为一个。Shu 等<sup>[39]</sup>松弛了这一假设, 提出了一种基于计算几何的算法。

另外, 也有不少文献探究了 LMRP 的扩展问题。例如, Ozsen 等<sup>[40]</sup>研究了 CLMRP (capacitated LMRP), 即有容量限制的 LMRP, 其中每个 DC 都有有限的容量; Ozsen 等<sup>[41]</sup>在 CLMRP 中, 分析了多重指派问题; Shen 和 Qi<sup>[42]</sup>引入了路径决策。这些文献都采用了拉格朗日松弛算法。

### 1.2.5 考虑中断风险的选址问题

上面提及的所有问题,如 PMP、UFLP、LMRP 和 CLRP,都忽略了设施因为潜在中断风险(如地震、台风、罢工、火灾等)而不能提供服务的情况。与此相反, Snyder 和 Daskin<sup>[13]</sup> 首次提出了可靠性设施选址问题(reliable fixed-charge location problem, RFLP),来探究可能的设施失效事件对最优设施布局的影响。这篇文章假设所有的设施都有相等的中断概率,在建模上采取的策略是:将每个客户按照层级( $r = 0, 1, 2, \dots$ )依次指派给多个设施。对每个客户来说,最低层级的设施( $r = 0$ )称为主要设施,将会在正常情况下服务这个客户,高层级的设施( $r = 1, 2, \dots$ )是备选设施。当主要设施失效时,这个客户就由第一个备选设施( $r = 1$ )来提供服务;如果这个设施也失效了,就由第二层级的设施来提供服务,以此类推。一般的,一个客户由其  $r$  级的设施来满足需求,当且仅当其更低层级的  $r$  个设施全部失效。如果指派给一个客户的所有设施都已失效,或者满足这个客户需求的应急成本比缺货成本还要大,那么这个客户就接受一个惩罚成本。Snyder 和 Daskin<sup>[13]</sup> 的一个重要发现是,当在选址模型中考虑设施可能的失效事件时,会开放更多的设施(图 1.1(c))来分散风险(risk diversification)。这篇文章还指出,选择“可靠的”选址方案,只增加很少的日常运营成本,则可带来应急成本的大幅度减少。

Berman 等<sup>[43]</sup>、Cui 等<sup>[44]</sup>、Shen 等<sup>[45]</sup> 和 Aboolian 等<sup>[46]</sup> 允许设施的失效概率可以互不相等,称之为 HRFLP(heterogeneous RFLP)。Berman 等<sup>[43]</sup> 在 PMP 中引入了设施的失效可能,指出当失效概率变大时,设施的位置将会更加集中。Cui 等<sup>[44]</sup> 和 Shen 等<sup>[45]</sup> 都针对 HRFLP, 建立了一个非线性混合整数规划模型。其中, Cui 等<sup>[44]</sup> 采用 Sherali 和 Alameddine<sup>[47]</sup> 的重构线性化技术(Reformulation Linearization Technique, RLT)将其线性化,然后设计了一种拉格朗日松弛算法,算例测试表明,当每个客户指派的设施数目足够小时,此算法是有效的; Shen 等<sup>[45]</sup> 对特殊情形的 RFLP(即失效概率相等)设计了一种能找到近似最优解的启发式算法。Aboolian 等<sup>[46]</sup> 研究了与 Cui 等<sup>[44]</sup> 相同的问题,但是没有限制一个客户可能指派的设施数。这篇文章通过迭代地改进上下界,设计了效率较高的算法。可靠性选址模型的综述,可以参见文献 [1]。