

# 《物流系统分析》复习提纲

葛乾

2024 年 3 月 9 日

## 1 简介

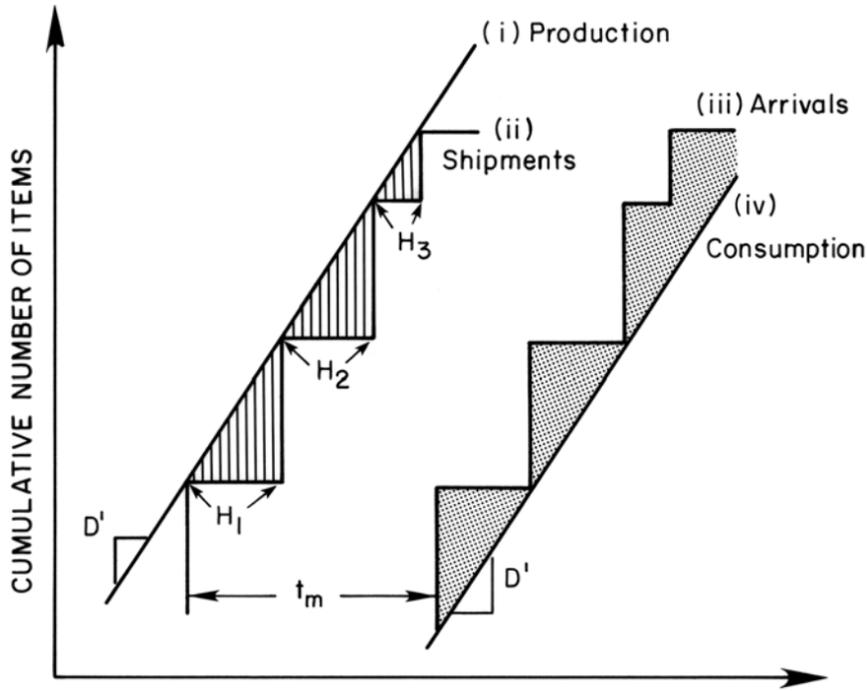
- 物流：决定物料和信息流动的功能性活动，以及执行这些活动不可或缺的基础设施、手段、工具和资源
- 物流活动会发生成本，并影响产品的价值。物流活动趋近于离消费者最近的设施时，产品会不断增值。增值可以是空间的（如配送活动），也可能是时间的（储存活动）
- 一般，物流活动根据发生的地点分类，还需考虑生产与配送的过程
  - 供给物流 (supply logistics) 发生在生产工厂之前，作为企业生产计划的一部分，包括原材料、材和生产部件的管理
  - 内部物流 (internal logistics) 发生在生产工厂之中，接受和储存材料、从仓库中遴选以送到生产线、转移半成品去包装以及储存终端产品
  - 配送物流 (distribution logistics) 发生在生产工厂之后，市场之前。这些活动为销售点和顾客供给商品。
- 物的流动一般和信息的流动被整合在一起。信息流的方向与物的流动相反
  - MTO (make to order, 按单生产) 模式中，顾客的订单影响到生产计划，而后者决定处理厂或组装厂对物流和部件的需求
  - MTS (make to stock, 库存生产) 模式中，市场信息被用来预测销售量，因而影响配送方式以及生产和供应的计划
- 物流系统的目标：成本、盈利和服务水平
  - 服务水平包含顾客的总体满意程度，依赖于构成市场营销组合 (marketing mix) 的很多因素，这些因素与**产品特性、价值、促销机会以及配送方式**有关。
  - 服务水平的例子（第一次课件第 31 页）
- 物流系统的管理，横跨规划、组织和控制等阶段，按照顺序发生
  - 规划 (planning) 阶段根据预先制定的目标，选择最佳的决策
  - 组织 (organizing) 阶段在企业的组织架构图内组织直接参与物流活动的人力资源，以有效的达到企业目标
  - 控制 (control) 阶段根据企业管理所要求的定性与定量指标衡量物流系统的表现。当结果与目标不一致时，可能还会纠偏
- 本门课程关注规划阶段，可以划分为三个决策层级：战略 (strategic)、战术 (tactical) 与运作 (operational)
  - 战略决策 (长期选择)：对物流系统有长期影响 (一年以上)，包括大额财务投资，因而难以在短期内撤回。该类规划一般依赖于对集计数据的预测 (如类似产品的区域需求)
  - 战术决策 (中期选择)：关注对可用资源的使用，依赖于预测。频率一般是每年、每季度或者每月
  - 运作决策 (短期选择)：关注对人力资源和原材料的每周或每日计划，依赖于周围环境获取的数据 (顾客发出的订单、关于仓库的信息、车辆的可用性、物流行业的人力等)

## 2 简洁模型的作用

- 基于模型的方法，数学规划（mathematical programming）。
  - 收集尽可能多的数据，识别与问题相关的决策变量，建成数学规划模型，使用数值方法求解
  - 缺点：采集数据的过程比较费力，决策过程有时没有经过系统分析，建成的模型可能是 NP-Hard 并依赖启发式方法
- 基于模型的方法：连续近似（continuous approximation, CA）用汇总数据代替详尽数据，解析方法代替数值优化
  - 优点：不需要解析模型可以精确求解，可以识别接近最优解的解的诸多性质；这些近似最优解形成准则，以用来设计实际可以部署的解，即同时满足分析过程所忽略的其他要求的解；最后的“精细化调整”（fine-tuning）过程也许需要电脑辅助求解，然而并非必需
  - 连续近似方法不能代替数学规划方法
- 连续近似（简洁模型）的优势
  - 灵活有用
    - \* 可成为分析员与决策者沟通的工具
    - \* 可为改进策略提供方向
  - 结果准确
    - \* 精细模型的误差来自算法无法求解最优解，简洁模型的误差来自对数据的简化
    - \* 数据的错误是另一类误差来源。数据的错误通过传播，使最优解出现误差。使用简洁模型易于追溯哪类数据的错误导致了最优解的误差
    - \* 除了数据的错误，我们还需要考虑问题假设的合理性两种方法均有其应用场景

## 3 物流系统成本的识别

- 移动成本包括处理成本和运输的成本。处理（handle）成本是指发生在运输车辆之外的移动成本；运输成本是货物在运输车辆中时的移动成本。
- 保管成本包括租赁成本与等待成本。租赁包括对空间的租赁、放置货物所需的设备、以及维护所需成本（如安全、服务等）；等待成本反映了货物在库的时间成本，包括机会成本以及保存时的损耗成本。对于给定的货物，其租赁成本一般是固定的，不依赖于货物的数量；而等待成本则依赖于货物如何被处理。
- 物流活动不同阶段的货物累积量。(i) 生产；(2) 配送；(3) 到达；(4) 消费。 $D'$  是单位时间生产（消费量）， $t_m$  是配送时间
  - 等待配送的货物量为曲线 (i) 和 (ii) 的时间轴上某点的纵向间隔
  - 在途货物量为曲线 (ii) 和 (iii) 的纵向间隔
  - 等待被消费的货物量为曲线 (iii) 和 (iv) 的纵向间隔
  - 当货物按照“先进先出”的准则被处理时，横轴上某点对应每条曲线上的同一个货物在不同状态的发生时间。因此，该点对任意两条曲线横轴间隔，代表两种物流活动之间所花时间
  - 两条曲线之间的阴影区域，代表货物的等待时间。如左侧条纹处的阴影区域代表货物在起点所花时间；右侧散点处的阴影区域代表货物在终点所花时间



#### 4 一到一配送系统

- 固定需求时的 EOQ 公式:  $\{\min Av + \frac{B}{v}, s.t.v \leq v_{\max}\}$ 。  $A = c_h/D'$  表示单位货物保管费用,  $B = c_f$  表示每批货物固定运输费用。决策变量为批量。
- 误差分析: 多种误差的组合带来的总误差, 并不一定是简单叠加
- 变需求下的 EOQ 问题。决策变量为配送时间与批量

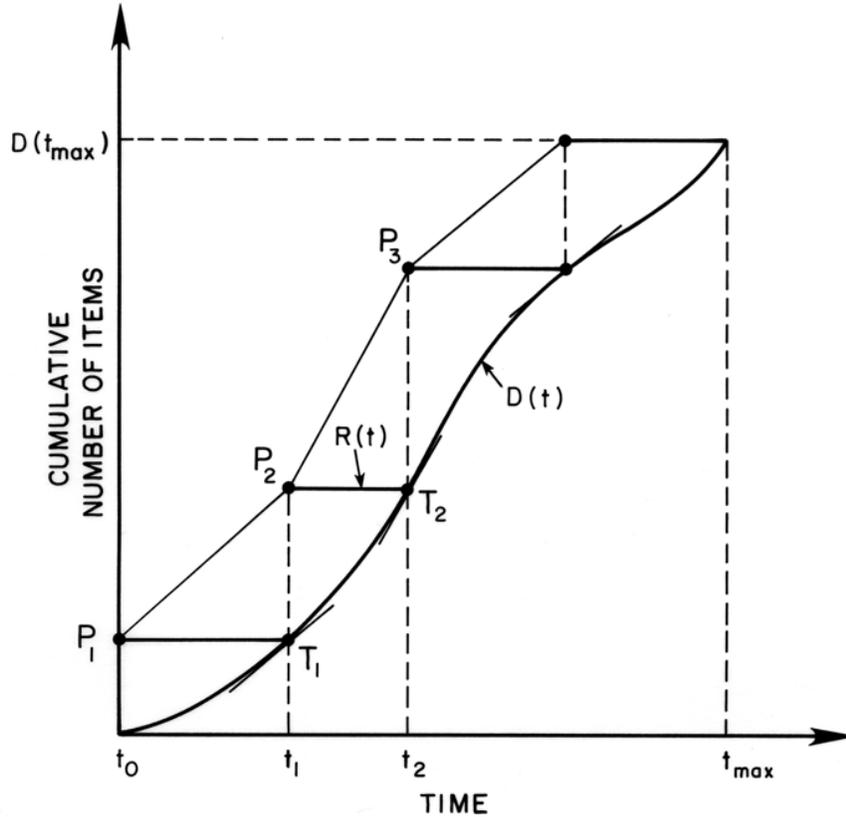
– 当管道库存成本可被忽略时, 保管成本约等于租赁成本

- \* 批量大小为  $D(t_{\max})/n$ ,  $n$  为配送的次数
- \* 配送时间的决策如下: 将纵轴  $[0, D(t_{\max})]$  分割为  $n$  段; 寻找时间  $t_i$  使得  $D(t_i) = \frac{i}{n}D(t_{\max}), i = [1, 2, \dots, n]$ ; 派送刚好能满足下一周期需求数量的货物。
- \* 注意此时  $n$  是未知的, 需要计算整数  $n$  使得单位时间成本或者单位货物成本最小。

$$cost/time = c_r \frac{D(t_{\max})}{n} + c_f \frac{n}{t_{\max}}$$

– 当租赁成本可以忽略时, 即商品小而昂贵, 保管成本约等于在途的保管费用 (等待费用)

- \* Newell 方法: 从纵轴上选取一点  $P_1$ , 找到该点在需求曲线上对应的点  $T_1$ ,  $T_1$  对应的时刻为  $t_1$ ; 过  $P_1$  点做需求曲线在  $T_1$  处的切线方向的平行线, 该平行线与  $T_1$  处垂直曲线的交点为  $P_2$ ; 用类似方法可以求出  $P_3, \dots$ 。假设  $P_1, P_2, P_3, \dots$  构成的曲线设为  $R(t)$ , 如果  $R(t)$  不经过  $(t_{\max}, D(t_{\max}))$ , 则需要重新调整  $P_1$  的位置, 重复之前步骤, 直到满足要求为止。
- \* 连续近似模型: 考虑时间区间  $[t_{i-1}, t_i]$  为两次配送的时间间隔, 则该时间内发生的成本为  $cost_i = c_f + c_i \times \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 D'(t'_i) \approx \int_{t_{i-1}}^{t_i} \left[ \frac{c_f}{H_s(t)} + \frac{c_i H_s(t)}{2} D'(t) \right] dt$  (令  $H_s(t) = t_i - t_{i-1}$ ); 总成本为  $\int_{t_0}^{t_{\max}} \left[ \frac{c_f}{H_s(t)} + \frac{c_i H_s(t)}{2} D'(t) \right] dt$ 。可得最优的配送频率  $H_s(t) = \left[ \frac{2c_f}{c_i D'(t)} \right]^{1/2}$ 。

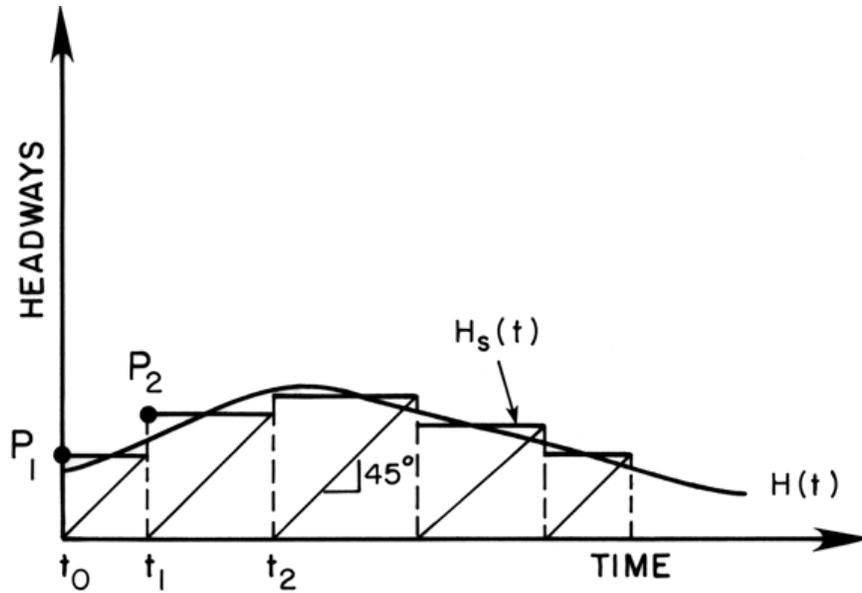


\* 计算配送时间的步骤如下：从起点画一条  $45^\circ$  的射线；在纵轴上移动  $P_1$  的位置，使得  $t_0$ 、 $P_1$ 、该射线与经过  $P_1$  的水平线的交点、交点对应的的时间  $t_1$  构成的长方形面积与  $H(t)$  曲线以下的面积相等，此时的  $t_1$  即为下一个配送时间。同理可以构造出  $t_2, t_3, \dots$

- 除了配送频率问题，连续近似模型也可以用于选址等问题。由于推导过程类似，此处不赘述，可通过 3.5.1 节的案例掌握该部分内容。
- 网络设计问题：当存在规模经济时，总成本的曲线是一个凹函数，存在多个局部最优解。当输入数据稍微更改时，解可能产生很大变化。当存在规模不经济时，总成本的曲线是一个凸函数，可通过局部搜索求得近似最优解。

## 5 一到多配送系统

- 决策变量：路径、配送时间
- 路径非常多时 ( $N/C \gg C$ )：先划分小分区，再在小分区内规划路径。
  - 小分区的宽度  $\sqrt{\frac{6}{\delta}}$ ，长度  $C/\sqrt{\frac{6}{\delta}}$ ， $C$  是每个车能服务的最大顾客点数。
  - 小分区的划分原则：应该朝向配送中心；首先应该规划等距离曲线，然后让分区与这些等距离曲线垂直；应该先规划区域边缘处的分区，然后在向中心方向用分区填满剩余区域
  - 欧式距离下，等距离曲线为以配送中心为圆心的一系列同心圆
  - 曼哈顿距离下，等距线应该是以出发点为形心，与测量方向，即  $x, y$  轴方向成  $45^\circ$  夹角的一系列正方形

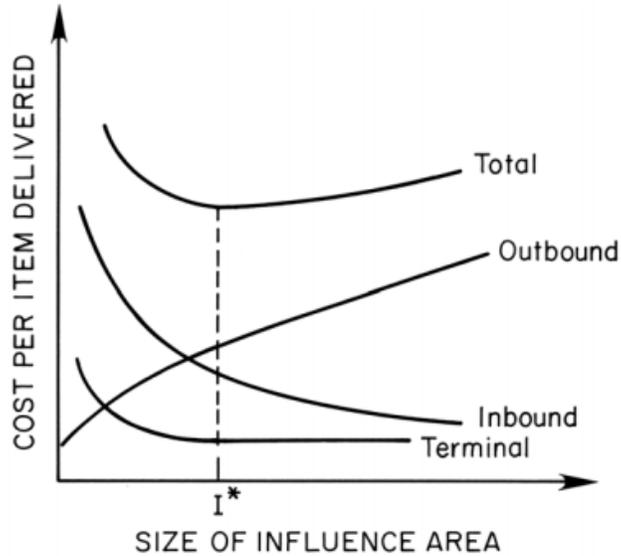


–  $\delta(x)^{-1/2}$  为  $x$  附近的点与点之前的近似平均距离, VRP 总距离  $\approx N \left[ \frac{2R(r)}{C} + kE(\delta^{-1/2}) \right]$ , 其中前一项为从配送中心到分区的直线运输距离, 第二项为分区内的本地运输距离。

- 路径非常少时 ( $N/C \ll C$ )
  - VRP 总距离为  $\approx k'NE(\delta^{-1/2})$
  - $k'$  与  $k$  的取值不同, 因为分区的形状和划分方法不同
  - 此时每个分区的配送路径 (TSP) 都应该是直接从配送中心出发, 形状为楔形。
- 物流系统成本
  - 决策变量:  $L$ , 配送次数
  - 库存/等待成本远小于租赁成本时的管道库存成本可以被忽略, 可用 EOQ 公式求解最优的  $L$ ;
  - 等待成本远大于租赁成本时, 物流系统成本最小化的问题可以归约为一到一配送问题
  - 与生产过程的整合: 交错生产策略
    - \* 该策略可以降低生产商处的最大库存和平均库存
    - \* 具体如下: 将服务区域分为  $P$  个子区域; 每个子区域包含相同数目的顾客, 并需要至少若干旅程才能覆盖完; 为每个子区域按照次序生产; 每当完成一个子区域的生产, 即按照 VRP 方法计算出的路径为该子区域配送货物
    - \*  $P$  的大小决定了工厂面向不同子区域生产计划的不同, 如平滑的员工工作量或者材料要求。 $P$  越大, 生产计划变化地越频繁, 反而不利于工厂生产。

## 6 带转运的一到多配送系统

- 转运: 将货物从一个载具装卸到另一个载具的过程, 通常在一个固定设施发生。
- 中转枢纽的作用: 将长距离的直线运输与短距离的配送分开, 可以用更大容量的车辆用于直线运输, 同时可以使一辆车在不违背路径长度约束的前提下访问更多的配送点。



- 决策变量：战略层决策变量，中转枢纽的数量与位置；战术层决策变量，直线运输车辆的路径和时刻表；运作层决策变量，本地配送车辆的路径和时刻表。
- 为避免分拣和重新转载带来的麻烦，连续近似方法假设每个顾客仅被一个中转枢纽服务，即不考虑冗余路网。与之前相同，该部分内容关注战略层决策。
- 一个中转枢纽的第  $n$  级影响区域为从它出发需要  $n$  次或者更少转运次数到达的点集。第 0 级影响区域构成其服务区域的一个分割。由于每个中转枢纽仅位于另一个其他中转枢纽的路径上，每级影响区域都构成一个分割。
- 物流系统总成本包括进站成本、中转枢纽成本和出站成本。其中进站和出站两部分的物流活动，可以分别看做两个独立的一到多配送系统。影响区域的面积越大，进站成本越低，中转枢纽成本越低，出站成本越高；

$$\underbrace{\alpha_5 + \alpha_6/I}_{\text{中转枢纽}} + \underbrace{z^i(\lambda, r, I)}_{\text{进站}} + \underbrace{Z^0(\lambda, \delta, I)}_{\text{出站}}$$

- 第三项怎么来的？在带转运的一到多配送问题中，影响区域的形状可近似认为是一个圆，设半径为  $R$ 。假设圆内任意一点到圆心距离为  $r$ ，夹角为  $\theta$ ，则其到枢纽的期望距离为  $\bar{r} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{r}{\pi R^2} r dr d\theta = \frac{2}{3}R$ 。又  $R = \sqrt{\frac{I}{\pi}}$ 。因此  $Z^0(\lambda, \bar{r}, \delta) = E_r[z_0(\lambda, r, \delta)] = z_0\left(\lambda, \frac{2}{3}\sqrt{\frac{I}{\pi}}, \delta\right) \approx z_0(\lambda, 0.38I^{1/2}, \delta)$ 。
- 完整的设计步骤：首先，分割出尽量规则的符合计算出的  $I(x)$  大小的影响区域；然后，在满足区域约束的前提下，将中转枢纽放置于形状的中心；最后，基于一到多配送系统中所总结的技术，为每个影响区域计算最优的运营策略。
- 自动分区算法

---

**Algorithm 1:** 自动分区算法

---

1  $m \leftarrow 1$ ; 初始化中转枢纽位置  $\mathbf{x}_i$  和影响区域半径  $r_i$ ; 预设参数: 收敛容许参数  $\epsilon$ , 步长  $\mu_m$ , 扰动参数  $\delta$ , 设置影响区域的面积系数  $k \approx 1$ , 面积系数的变动参数  $\Delta k$

2 **while**  $F_T \neq 0$  或  $F_B \neq 0$  **do**

3     计算每个 disk 的大小:  $r_i = \sqrt{\frac{I^*(\mathbf{x}_i)}{k\pi}}$

4     计算重叠 disk 的斥力  $F_T$  (依赖于  $r(\mathbf{x}_i) + r(\mathbf{x}_j)$  与  $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$  之间的关系) 和边界的斥力  $F_B$  (依赖于  $r(\mathbf{x}_i)$  与中转枢纽到边界距离的关系)

5     **if**  $F_T \neq 0$  或  $F_B \neq 0$  **then**

6         | 将中转枢纽沿着斥力方向移动  $\mu_m$ , 同时随机在某个方向增加一个扰动  $\delta$

7     **end**

8     **if**  $\mu_m < \epsilon$  **then**

9         | 重置  $m = 1$ ,  $k = k + \Delta k$

10     **end**

11      $m = m + 1$

12 **end**

13 基于带权重的 Voronoi 曲面细分方法 (weighted-Voronoi tessellation, WVT), 划分中转枢纽的影响区域,  $i = \arg \min_j \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|}{r(\mathbf{x}_j)}$ .

---