# 需求不定条件下柔性配送系统的生产决策优化模型

□孙 宇|文

基于供应链管理理论的柔性化配送系统主要的是集现代工程、管理技术和物流作业向多样化、差异化转变的结合体。柔性化配送系统的中心是利用先进的现代系统工程技术、管理技术、计算机技术、通信技术、机械工程技术及自动化技术的有机整合形成柔性化配送系统的技术基础，满足终端用户动态变化需求，实现全过程资源优化配置。不定性是引起配送系统管理困难的主要原因之一，而配送系统中不定性的来源主要有供应、制造和需求，其中需求的不定性是最难予以解决的。通过运筹学理论建立目标函数、约束条件，进而得出最优解是研究配送系统柔性的主要途径之一。

柔性通常被定义为对环境不确定性的适应性反应。柔性的定义为：柔性不仅是对不确定环境的一个适应性反应，而且可以主动地制造竞争对手难以应付的不确定性。简而言之，柔性是一种应变能力，柔性是一个系统所具有的有效地处理环境变化或由环境引起的不确定性的能力。面对市场需求的不定，增加柔性可以增加配送系统产品的销量，提高系统资源的利用率，从而提升整个配送系统的价值水平。柔性控制的主要内容是需求的识别和柔性系数的优化和控制，需求的确定是通过分析外部环境的变化，困难的是需求分为显性需求和潜在需求，已经表现出的需求为显性需求，而潜在需求是现在暂时未表现出来的未来的需求。柔性的优化和控制是根据需求调整柔性水平（柔性因子），使柔性因子与需求匹配。这里首先要判断出柔性因子是否满足需求，若不能满足需求，则需要采取行动，调整柔性因子，找出一个较优现实柔性系数。如何通过非线性规划方法建立配送系统的柔性生产决策模型，同时，通过模型的求解给出了柔性生产决策模型最优柔性系数是本文所阐述的方法，并通过算例对模型及求解方法进行验证。

> 柔性是一个系统所具有的有效地处理环境变化或由环境引起的不确定性的能力。面对市场需求的不定，增加柔性可以增加配送系统产品的销量，提高系统资源的利用率，从而提升整个配送系统的价值水平。

## 一、需求不定条件下柔性配送系统优化模型分析

配送系统是通过前馈的物料流和反馈的信息流，将材料供应者、产品生产者、分销服务中心和顾客连成一体的系统。通常，配送系统是由一个核心制造企业和许多供应商、分销售、零售商共同组成的网链状结构模式，是一种涉及多个不定市场的复杂系统。配送系统的生产决策就是协调材料供应商、产品制造商、分销商之间的资源配置，以最大限度地满足顾客需求。为便于分析，本文对配送系统结构进行部分简化。设定配送系统由制造商、销售商和顾客三方组成，且制造商仅生产一种产品，通过一个销售商销往一个需求不定的市场，制造商原材料的获取不受任何限制。其需求不定条件下配送系统柔性优化模型建立过程如下。

⑴ 成本构成分析

在组织生产过程中，配送系统的每个节点企业都要发生各种生产成本。这里假定为了快速响应客户需求，制造商采用MTO (make to order) 生产方式。这样， 制造商成本仅为制造成本。设制造商的最大生产能力为$\Phi$，产品产量为$Q$，制造商增加单位生产能力所需投入的固定费用为$m$，生产单位产品的变动成本为$v$， 则制造成本为$C_p = \Phi m + Qv$；

在MTO方式下，制造商生产的全部产品数量$Q$转移给销售商，若从制造商运送产品到销售商的单位运输成本为$r$，则产品运输成本为$C_s = rQ$；

面对不定性市场需求，制造商的产量与市场需求之间总是存在一定的差异，从而导致销售商存在一定的库存商品，进而产生保管费用或延期交货的惩罚费用(如价格折扣等)。

设特定产品的市场需求量为 $x$，单位产品的库存费用为$s$，单位产品的延期交货惩罚费用为$k$。若$x < Q$，则库存保管

费用为$Cw = (Q - x)s$；若$x > Q$，则延期交货惩罚费用为$Cd = (x - Q)k$。

因销售商存在一定的固定成本和产品到顾客的运输成本，而该费用对配送系统生产决策影响不大，故通常可以忽略。

令$y = x - Q$

用Tc 表示配送系统总成本，则式(1) ：$Tc = \Phi m + Qv + Qr + ! y ! b(y)$。 (1)

$$\text{其中}\quad b(y) = \begin{cases} s, & y < 0 \\ k, & y \geq 0 . \end{cases}$$

(2) 模型的建立

设最终产品的单价为p，若市场需求量为x，则配送系统产品销售收入为p x。用Π表示配送系统的总利润，根据上面成本构成的分析结果，得到配送系统总利润函数为：

式(2) ：$\Pi(Q,\Phi) = p x - Tc = p x - [\Phi m + Qv + Qr + ! y ! b(y)]$ (2)

最终产品随机需求x 的概率密度函数与分布函数分别表示为f(x )和F(x)。均值为μ，若用J (Q，Φ) 表示配送系统期望总利润，即$J(Q,\Phi) = E[\Pi(Q,\Phi)]$，则有：

$J(Q,\Phi) = p\mu - \{\Phi m + (v + x)Q + [s\int(Q - x) f(x) dx + k\int(x - Q) f(x) dx]\}$。(积分区间为[0,Q]和[Q,∞])

整理后得式 (3)

$J(Q,\Phi) = p\mu - [\Phi m + (v + t)Q + (s + k)Q F(Q) - kQ - s\int x f(x) dx + K\int x f(x) dx]$. （积分区间为[0,Q]和[Q,∞] ） (3)

令$Z(Q,\Phi) = \Phi m + (v + t)Q + (s + k)QF(Q) - kQ - s\int x f(x) dx + k\int x f(x) dx$.

(积分区间为[0,Q]和[Q,∞])

则 式 (3) 变为式 (4)

$J(Q,\Phi) = p\mu - Z(Q,\Phi)$. (4)

式中:pμ为配送系统的销售收入期望,Z (Q，Φ ).为配送系统期望总成本。

在需求不定条件下，配送系统追求期望总利润的最大化，即max J (Q，Φ ). 由式(4) 可知，在已知需求分布情况下，p*μ为常量，若求max J (Q，Φ)，则min Z (Q，Φ ). 即 ：追求配送系统期望总利润最大化的目标等价于追求配送系统期望总成本最小化。

本文研究配送系统生产柔性是指配送系统改变产品产出水平的能力，它根据配送系统的生产富余能力来计量。配送系统生产柔性可表示为：

$W = (\Phi - Q)/\Phi$ (5)

以配送系统期望总成本最小化为目标函数，生产柔性作为约束条件，建立需求不定条件下，配送系统柔性生产决策优化模型为：

$$\begin{cases} \min Z(Q,\Phi) & (6a) \\ s.t.\ W = \varepsilon & (6b) \\ \Phi - Q \geq 0 & (6c) \\ Q, \Phi > 0 & (6d) \end{cases}$$

其中ε为配送系统的生产柔性水平，ε∈[0, 1)。

约束式(6b)表示配送系统生产柔性必须满足一定的柔性水平。

式(6c) 表示产品产量Q 受到最大生产能力Φ的制约。

模型(6) 的意义是 ：在给定配送系统柔性水平E的条件下，配送系统期望总成本最小。

(3) 最优方案的确定

配送系统生产柔性决策有效边界上的点均可视为配送系统柔性决策的满意解，为此，需要找到一个最优解，但模型(6)无法直接计算得到，因此必须引入新的判断标准。

柔性代表配送系统对不定性的反映能力，柔性越大，配送系统适应市场需求变化的能力越强，而增大配送系统的柔性，便意味着配送系统成本相应增加。因此，配送系统决策者一般希望以最小的成本获取最大的柔性。

将$\omega = Z/\varepsilon$定义为成本柔性系数，其经济含义为 ：在单位柔性下配送系统所承担的成本，是柔性与配送系统承担成本之间的均衡关系的度量值。所以，在单位柔性水平下配送系统成本越小越好。若在柔性配送系统生产决策时取成本柔性系数 ω为极小值，则对应的$\hat{\varepsilon}$为最优生产柔性水平，即：

$$\begin{cases} \min \omega, \\ s.t.\ \hat{Z}(\varepsilon) = r\int xf(x) dx - s\int x f(x) dx. \end{cases}$$ 其中积分区间为[0,g(ε)]和[g(ε),∞] (7)

式(13) 表明，在配送系统生产柔性决策有效边界确定的期望总成本最小化的满意解范围之内，求解m in Ξ的问题，即在有效边界上寻找最优点。其求解过程如下：

$d\omega/d\varepsilon = (Z'(\varepsilon) - Z(\varepsilon))/\varepsilon^2$, (8)

将式(12)代入(14),并令$d\omega/d\varepsilon = 0$,得：

$\{-(s + r)g'(\varepsilon) g(\varepsilon) f(g(\varepsilon))\varepsilon - [r\int x f(x) dx - s\int x f(x) dx]\}/\varepsilon^2 = 0$, (9)

(其中积分区间为[0,g(ε)]和[g(ε),∞])

即：

$(s + r) g'(\varepsilon) g(\varepsilon) f(g(\varepsilon))\varepsilon + \int x f(x) dx - s\int x f(x) dx = 0$, (10)

(其中积分区间为[0,g(ε)]和[g(ε),∞])

其中 ：

$g(\varepsilon) = F^{-1}[(r - (v + t) - m/(1 - \varepsilon))/(s + r)]$

通过解方程式(16) 即可得到配送系统的最优生产柔性水平$\hat{\varepsilon}$。

## 二、算 例

配送系统中某制药公司A生产一种抗生素产品，主要销售市场为地区D。假设公司A 每生产单位产品所需投入的生产设施费用m 为20元/件，生产单位产品的变动成本v 为9元/件。该配送系统在地

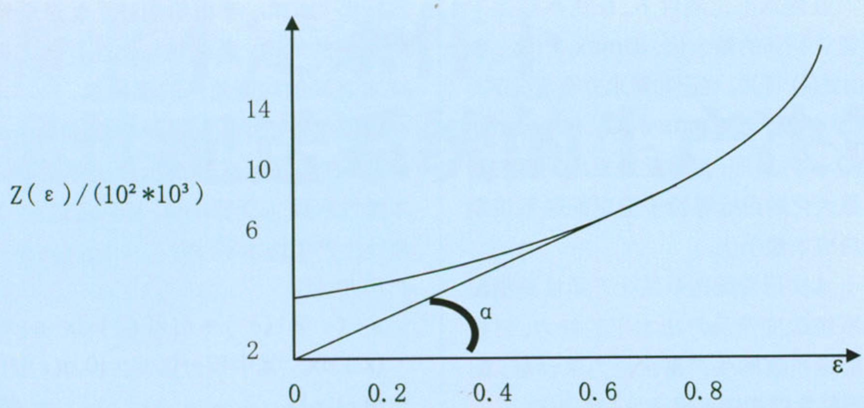


图1 配送系统生产柔性决策的有效边界

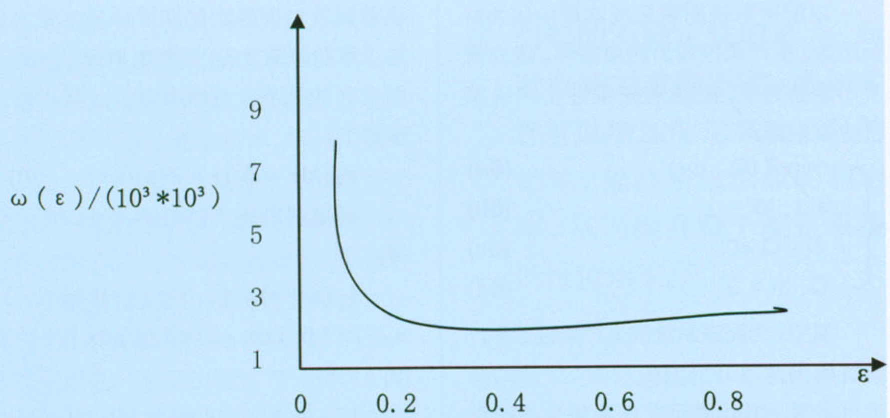


图2 成本柔性系数曲线

表1 不同生产柔性ε条件下的配送系统生产决策情况和期望总成本

| ε | 产量Q/(件/月) | 生产能力Φ/(件/月) | 期望总成本Z/(元/月) | 成本柔性系数ω= Z/ε |
|---|---|---|---|---|
| 0.00 | 11572 | 11572 | 390026 | |
| 0.10 | 11475 | 12750 | 415634 | 4156340 |
| 0.30 | 10214 | 16020 | 487651 | 1625503 |
| 0.50 | 10789 | 21578 | 613342 | 1226684 |
| **0.5806** | **10523** | **25091** | **695250** | **1197468** |
| 0.70 | 9895 | 32985 | 888988 | 1269983 |
| 0.85 | 6578 | 43856 | 1461976 | 1719972 |

区D有唯一销售商B，从公司A 运往销售商B 的单位运输成本t为1元/件，销售商B 的单位库存成本s 为3元/件，销售商B在地区D 的单位产品缺货成本r为150元/件。产品的每月市场需求量x 服从正态分布，其均值μ= 10000 件，方差σ²= 2 000²。

使用MATLAB数学软件，计算出不同生产柔性水平E下的配送系统期望总成本和配送系统最优决策数据如表1所示。

图1曲线的经济意义为： 配送系统决策者可依据自身的成本承受能力(或资本实力)，对所能达到的最大配送系统柔性进行选择。例如，若配送系统期望总成本投资可达到80 万元，则配送系统决策者可选择的最大柔性为0.654;若配送系统期望总成本最大投资只45万元，则配送系统决策者可选择的此成本下的最大柔性为0.2075。

在有效边界上任取一点A，点A和坐标轴原点的连线与横轴的夹角为α，则tgα= Z/ε= ω, 即柔性成本系数ε的值等于夹角α的正切。

由图1可看出，随着A 点在有效边界上从左向右移动，夹角α变化规律为: 先由大变小，再由小变大. 由此表明，柔性成本系数ε的取值随着柔性水平E的增大而变化，其变化规律为： 先由大变小，再由小变大，中间存在唯一极小值。由于柔性成本系数ε代表配送系统在单位柔性下所承担的成本，ε极小值的存在说明配送系统决策者能以最小的成本柔性比，获得最理想的投资效益. 因此ε极小值点即为柔性配送系统的最优决策点。

将数据代入式(16)，通过解方程，可求得 ε ˆ=0.5806，此柔性水平下的配送系统最优生产量为10523件/月，所需最大生产能力为25091件/月，销售商的订货量为10253件/月，配送系统期望总成本为695250元。

为了更直观地反映成本柔性系数随柔性水平变动的情况，绘出了成本柔性系数曲线，如图2所示。

该图表明，随着生产柔性水平的增大，成本柔性系数取值呈先降后升的变化。

本文研究了基于市场需求不定条件下配送系统的生产柔性决策问题，通过成本分析建立了决策模型，给出了配送系统生产柔性决策有效边界的定义和经济意义，并在此基础上引入成本柔性系数最小化的判断标准，从而得出了最优方案的确定方法。

本文仅研究了需求不定条件下配送系统中单生产商和销售商情景的柔性生产决策模型，对于多销售商、多市场以及考虑供应商供应能力限制等条件下的柔性配送系统设计问题，可以作为下一个需要研究的领域去探讨。