

文章编号:1000-6788(2006)03-0033-06

生产企业供应链中产销运作协调研究

田俊峰¹, 杨梅²

(1. 西南财经大学工商管理学院物流管理教研室, 四川 成都 610074; 2. 铁道第二勘察设计院线路处, 四川 成都 610031)

摘要: 基于单工厂、多产品、多分销中心的供应链网络, 研究生产企业的产销运作协调问题。根据给定的假设条件, 建立多周期混合整数规划模型, 对产销环节进行同步优化。通过对模型的等价转换, 设计拉格朗日松弛启发式算法进行求解。最后, 给出数值算例验证算法的有效性, 计算结果表明产销运作协调可以有效地降低供应链成本。

关键词: 供应链; 生产; 分销; 拉格朗日松弛

中图分类号: TP301.6; F273

文献标识码: A

Research on Coordinated Production-Distribution Operation in Manufacturing Supply Chain

TIAN Jun-feng¹, YANG Mei²

(1. Logistics Management Department, School of Business Administration, Southwest University of Finance and Economy, Chengdu 610074, China; 2. Track Department, 2nd Railway Survey & Design Institute, Chengdu 610031, China)

Abstract: The paper studies coordinated production-distribution operation problem in manufacturing supply chain network comprised of single plant, multiple products and multiple distribution centers. A multi-period mixed integer programming model is proposed according to the assumptions, whose aim to synchronously optimize production and distribution. Lagrangian relaxation heuristic algorithm is designed to solve the model by equivalent transformation. Finally, a numeral example is given to validate effectiveness of the algorithm. The computational result shows that coordinated production-distribution operation can remarkably reduce supply chain cost.

Key words: supply chain; production; distribution; Lagrangian relaxation

1 引言

生产与分销是生产企业供应链中非常重要的两个环节, 传统上它们被生产企业的不同部门各自独立地进行管理, 二者之间各自为政。如何将产销环节有机地协调起来, 一直是生产企业面临的难题, 同时也是学术界研究的热点。

对于产销运作协调的研究, 最初考虑的是单产品、单周期的静态环境^[1,2]; 而对于较复杂的多产品、多周期动态环境的研究则相对较晚, Chandra & Fisher (1994) 首先将生产批量问题与车辆路径问题整合起来进行研究, 采取先优化生产批量, 后安排车辆路径的策略, 设计启发式算法对模型进行求解^[3]。Arntzen & Brown & Harrison (1995) 提出多周期混合整数规划模型来优化 DEC 公司全球供应链中的生产-分销计划, 但在这篇案例研究中没有考虑运输调度问题以及模型的算法^[4]。Fumero & Vercellis (1999) 建立整合的生产-库存-运输优化模型, 将原问题分解为生产、库存、需求分配和路径四个子问题, 结合全有全无策略和拉格朗日松弛法对模型进行求解^[5]。Bredstron & Ronnqvist (2002) 为优化瑞典一家大型纸浆生产企业供应链的运作, 建立了生产计划-路径调度一体化混合整数规划模型, 指出了与文献[3]相类似的求解策略, 但没有详细地设计算法步骤^[6]。

本文研究单工厂、多产品、多分销中心供应链网络的产销运作协调问题; 工厂与分销中心之间一对一

收稿日期: 2004-07-07

作者简介: 田俊峰(1973 -), 男, 安徽宿松人, 工学博士, 研究方向: 供应链建模与优化、电子商务系统分析与设计、物流系统仿真; 杨梅(1973 -), 女, 四川都江堰人, 工学硕士。

(one to one)直接送货(direct shipping),车辆调度的着重点在于送货任务的指派和运量的分配;模型求解采取生产批量、库存和车辆调度同步优化的策略.

2 多周期产销运作协调模型的建立

模型建立的前提条件包括:

1) 假定分销中心的客户需求是可以预测的确定值,产品适销对路,整个产销系统的能力能够满足客户的需求,不允许缺货;

2) 每个时间阶段车辆最多出行一次,每次出行可以装载不同品种的产品对一个分销中心送货,送货完毕立即返回工厂;

3) 产品的生产过程中发生固定的准备成本、可变生产成本和库存持有成本;分销过程发生车辆固定运输成本(保险、养路费和返空费)、可变运输成本和分销中心的库存持有成本.

模型的参数和变量如下:

i ——产品编号, $i = 1, 2, \dots, N$;

j ——分销中心编号, $j = 1, 2, \dots, J$;

k ——车辆编号, $k = 1, 2, \dots, K$;

t ——时间阶段编号, $t = 1, 2, \dots, T$;

s_i ——产品 i 的固定准备成本(元);

c_i ——产品 i 的单位生产成本(元/件);

h_i^0 ——产品 i 在工厂的单位库存持有成本(元/件);

g_k ——车辆 k 的固定运输成本(元);

r_{ij} ——产品 i 运输到分销中心 j 的单位运输成本(元/件);

h_i^j ——产品 i 在分销中心 j 的单位库存持有成本(元/件);

a_i ——生产单位产品 i 消耗的能力资源量(小时/件);

C ——每阶段可提供的生产能力资源量(小时);

b_i ——运输产品 i 占用的运输能力(吨/件);

V_k ——车辆 k 的运输能力(吨);

D_{ijt} —— t 阶段产品 i 在分销中心 j 的需求量(件);

决策变量:

P_{it} —— t 阶段产品 i 的生产数量;

Y_{it} —— t 阶段产品是否生产, $Y_{it} = 1$ 表示是, $Y_{it} = 0$ 表示否;

I_{it}^0 —— t 阶段末产品 i 在工厂的库存, $I_{i0}^0 = 0$;

Q_{ijkt} —— t 阶段由车辆 k 运输产品 i 到分销中心 j 的数量;

X_{jkt} —— t 阶段是否安排车辆 k 对分销中心 j 送货; $X_{jkt} = 1$ 表示是, $X_{jkt} = 0$ 表示否;

I_{it}^j —— t 阶段末产品 i 在分销中心 j 的库存, $I_{i0}^j = 0$.

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (s_i Y_{it} + c_i P_{it} + h_i^0 I_{it}^0) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \left(r_{ij} \sum_{k=1}^K Q_{ijkt} + h_i^j I_{it}^j \right) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T g_k X_{jkt}, \quad (1)$$

$$\text{s. t. } P_{it} \quad Y_{it} \quad \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T D_{ijt}, \quad \forall i, t; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N a_i P_{it} \leq C, \quad \forall t; \quad (3)$$

$$I_{it}^0 = I_{i,t-1}^0 + P_{it} - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijkt}, \quad \forall i, t; \quad (4)$$

$$P_{it}, I_{it}^0 = 0; Y_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, t; \tag{5}$$

$$I_{it}^j = I_{i,t-1}^j + \sum_{k=1}^K Q_{ijkt} - D_{ijt}, \quad \forall i, j, t; \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^N b_i Q_{ijkt} \leq X_{jkt} V_k, \quad \forall j, k, t; \tag{7}$$

$$\sum_{j=1}^J X_{jkt} \leq 1, \quad \forall k, t; \tag{8}$$

$$Q_{ijkt}, I_{it}^j = 0; X_{jkt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k, t. \tag{9}$$

目标函数(1)为产销过程中相关成本的总和. 约束条件(2)为 P_{ij} 与 Y_{it} 的关系约束; (3)为生产能力资源约束; (4)为工厂库存平衡约束; (5)为变量的取值范围约束; (6)为分销中心库存平衡约束; (7)为车辆运输能力约束; (8)为车辆出行约束; (9)为变量取值范围约束.

模型(1)~(9)为多周期的 0-1 混合整数规划模型, 通过该模型将传统的生产批量问题和分销车辆调度问题整合在一起.

3 模型的等价转换与求解

为了减少模型中变量和约束条件的数目, 在算法设计的计算机实现过程中, 尽量少占用系统内存, 达到快速求解的目的, 可以考虑 $\forall t = 1, 2, \dots, T$ 分别对(4)和(6)式两边进行累加, 消去模型((1)~(9))的库存变量. 得到如下的结果:

$$I_{it}^0 = I_{i0}^0 + \sum_{m=1}^t \left[P_{im} - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijkm} \right], \quad \forall i, t; \tag{10}$$

$$I_{it}^j = I_{i0}^j + \sum_{m=1}^t \left[\sum_{k=1}^K Q_{ijkm} - D_{ijm} \right], \quad \forall i, j, t. \tag{11}$$

又因为 $I_{i0}^0 = 0, I_{i0}^j = 0$, 将(10)、(11)代入目标函数(1)得:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[s_i Y_{it} + c_i P_{it} + h_i^0 \sum_{m=1}^t \left(P_{im} - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijkm} \right) \right] + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \left[r_{ij} \sum_{k=1}^K Q_{ijkt} + h_i^j \sum_{m=1}^t \left(\sum_{k=1}^K Q_{ijkm} - D_{ijm} \right) \right] + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T g_k X_{jkt} \end{aligned} \tag{1}$$

s. t. (2), (3)

$$\sum_{m=1}^t \left(P_{im} - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijkm} \right) \leq 0, \quad \forall i, t; \tag{4}$$

$$P_{it} = 0; Y_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, t; \tag{5}$$

$$\sum_{m=1}^t \left(\sum_{k=1}^K Q_{ijkm} - D_{ijm} \right) \leq 0, \quad \forall i, j, t; \tag{6}$$

(7), (8)

$$Q_{ijkt} = 0; X_{jkt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k, t. \tag{9}$$

消去库存变量后, 上述模型中, 还存在 Y_{it} 和 X_{jkt} 两种 0-1 变量, 直接进行求解, 很难在可以接受的时间内取得最优解. 这里, 注意到将生产与分销活动联系起来的变量是 Q_{ijkt} . 由拉格朗日松弛法可知: 如果对约束条件(4)进行松弛, 将其添加到目标函数中, 原问题可以分解为两个相对独立的子问题, 每个子问题的计算规模减小, 从而使原问题的求解变得相对简单.

取拉格朗日乘子 $\lambda_{it} = 0$, 得:

$$LR(\lambda) = \min Z + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_{it} \left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^t Q_{ijkm} - \sum_{m=1}^t P_{im} \right).$$

对上式进行分类合并, 可以得到如下的生产问题(P)和分销问题(D):

$$P: LR_P(\) = \min_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[s_i Y_{it} + c_i P_{it} + (h_i^0 - \dots) P_{im} \right]$$

s. t. (2), (3), (5)

$$D: LR_D(\) = \min_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \left[r_{ij} \sum_{k=1}^K Q_{ijkt} + (h_i^j + \dots) \sum_{m=1}^K Q_{ijkm} - h_{it}^j \sum_{m=1}^K D_{ijm} \right] + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T g_k X_{jkt}$$

s. t. (6), (7), (8), (9)

松弛后两个问题中各含有一种 0-1 变量, 这样可以使用标准的分枝定界法或者割平面法分别对它们进行求解.

拉格朗日对偶问题为:

$$LD(\) = \max LR(\) = \max \min [LR_P(\) + LR_D(\)] \quad (0).$$

拉格朗日对偶问题通常采用次梯度法求解, 关于次梯度法的具体求解步骤见参考文献[7] (p. 273 ~ p. 281), 算法参数取值如下:

1) 取上限值 UB 和初始拉格朗日乘子 $u_{it}^0 = 0$;

2) 拉格朗日乘子迭代方程: $u_{it}^{u+1} = \max(0, u_{it}^u + \alpha \Delta u_{it}^u)$. 其中 u 为算法迭代次数, u_{it}^u 为在点 u_{it}^u 的一个次梯度, α 为步长,

$$\Delta u_{it}^u = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^K Q_{ijkm}^u - \sum_{m=1}^K P_{im}^u, \quad u_{it}^u = \frac{UB - LR_P^u(\) - LR_D^u(\)}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \alpha_{it}^u} \quad (0 \leq u_{it}^u \leq 2).$$

3) 算法终止原则: 每次迭代, 记录 $LR(\)$ 值, 并且与上一次的结果进行比较, 如果上升, 继续下一次迭代, 否则 α 值减小一半, 继续下一次迭代. 当在给定的迭代次数 U 内, $\min |u_{it}^{u+1} - u_{it}^u| < \epsilon$ (ϵ 为给定的任意小正数), 算法停止.

由于对约束条件(4)进行了松弛, 次梯度法得到的拉格朗日松弛解 P_{it} 、 Q_{ijkt} 不一定为原问题的可行解, 因此应对得到的解进行可行性修正. 这里, 采用如下的方法进行:

1) 若 $\exists i, t, \sum_{m=1}^K P_{im} - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijkm} < 0$, 转向 2;

2) $\forall i, t$, 固定 Q_{ijkt} 值, 求解如下的生产批量模型:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (s_i Y_{it} + c_i P_{it} + h_i^0 I_{it}^0)$$

s. t. (2), (3), (5)

$$I_{it}^0 = I_{i,t-1}^0 + P_{it} - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijkt}, \quad \forall i, t.$$

3) 若有解, 算法停止, 否则, 对分销计划按如下步骤进行修正:

令 $S = \left\{ i_t \mid i_t = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijkt} \right\}$, $(\hat{t}, \hat{t}) = \arg \max (i_t)$ (S 中 i_t 最大值下标索引), 车辆可调整的运量

$\hat{t} = \left\lceil \sum_{m=1}^K \left[\sum_{k=1}^K Q_{ijkm} - D_{ijm} \right] \right\rceil$, 取 $\hat{t} = \arg \max (\hat{t})$, 车辆可利用的运输能力 $\hat{t}_{kt} = V_k - \sum_{i=1}^N b_i Q_{\hat{t}kt} (t > \hat{t})$. 分两种情况进行讨论:

a. $\exists k, t > \hat{t}, \hat{t}_{kt} < V_k$: 若 $b_{\hat{t}kt} > \hat{t}_{kt}$, 将可调整的运量全部加载到阶段 $t (t > \hat{t})$ 非满载的车辆上运输, 更新车辆的运量; 否则, 将可调整的运量部分加载到阶段 $t (t > \hat{t})$ 非满载的车辆上, 使其满载, 更新车辆的运量. 返回 2.

b. $\forall k, t > \hat{t}, \hat{t}_{kt} = V_k$: 在阶段 $\hat{t} = \arg \min (i_t) (t > \hat{t})$ 增加一辆空车 \hat{k} 执行任务, $\hat{k} = \arg \min (g_k)$, 当 $V_{\hat{k}} - b_{\hat{k}\hat{t}} > 0$ 时 $Q_{\hat{t}\hat{k}\hat{t}} = \lfloor (V_{\hat{k}} - b_{\hat{k}\hat{t}}) / b_{\hat{k}\hat{t}} \rfloor$; 否则 $Q_{\hat{t}\hat{k}\hat{t}} = \lfloor V_{\hat{k}} / b_{\hat{k}\hat{t}} \rfloor$ ($\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整数值). 返回 2.

4 产销运作独立决策模型

为了比较协调决策和独立决策之间的差异,这里根据文献[5]的模型分离策略简要提出独立决策条件下的生产模型和分销模型。

由于不受分销的影响,生产可以直接按照产品的客户需求来安排,其批量模型(PM)如下:

$$\begin{aligned}
 \text{PM: } \min PZ = & \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[s_i Y_{it} + c_i P_{it} + h_i^0 \left(P_{im} - \sum_{j=1}^J D_{ijm} \right) \right] \\
 \text{s. t. } & (2), (3), (5) \\
 & \sum_{m=1}^t \left(P_{im} - \sum_{j=1}^J D_{ijm} \right) \leq 0, \quad \forall i, t. \tag{4}
 \end{aligned}$$

其中(4)为转换后的工厂库存平衡约束.假定优化的生产批量为 P_{im} ,在分销模型中将以此作为已知参数,来安排车辆调度,由此可以建立如下的分销模型(DM):

$$\begin{aligned}
 \text{DM: } \min DZ = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \left[r_{ij} \sum_{k=1}^K Q_{ijkt} + h_i^j \sum_{m=1}^t \left(\sum_{k=1}^K Q_{ijkm} - D_{ijm} \right) \right] + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T g^k X_{jkt} \\
 \text{s. t. } & (6), (7), (8), (9) \\
 & \sum_{m=1}^t \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{ijkm} \leq P_{im}, \quad \forall i, t. \tag{6}
 \end{aligned}$$

其中(6)为每阶段车辆的运量约束。

5 数值算例

假定规划期内总的生产能力和运输能力可以满足产品需求,不存在缺货,需要解决的问题是考虑能力约束,确定在不同时间阶段工厂产品的生产数量,车辆对分销中心的送货量,使系统总成本最小。

表 1 模型参数的取值

参数名称	概率分布
s_i	U(100,120)
c_i	U(10,20)
h_i^0	U(2.0,2.5)
g_i	U(300,400)
r_{ij}	U(3,5)
h_i^j	U(1.0,1.5)
a_i	U(0.5,1.0)
C	U(250,300)
b_i	U(0.02,0.05)
V_k	U(5,6)
D_{jt}	N(14,4)

表 2 不同规模问题的计算结果

产品数目	时间阶段数目	分销中心数目	Gap_{R-C}	Gap_{H-R}	Gap_{U-H}
4	3	2	7.63	4.33	8.58
	5	4	7.92	4.28	8.74
	7	6	8.11	4.45	8.97
	9	8	8.23	4.62	9.09
	11	10	8.31	4.74	9.22
6	3	2	8.22	4.71	9.25
	5	4	8.35	4.81	9.32
	7	6	8.39	4.88	9.35
	9	8	8.42	4.91	9.38
	11	10	8.44	4.97	9.43
8	3	2	8.48	5.02	9.41
	5	4	8.53	5.08	9.46
	7	6	8.61	5.13	9.53
	9	8	8.66	5.19	9.61
	11	10	8.73	5.27	9.68

算法利用 VC#.net 和 LINDO 公司的数学规划应用程序接口 LINDO API 2.0 来实现.在 P 800 192M SDRAM PC 机上对模型参数按表 1 的概率分布随机取值,产生 15 个不同规模的问题,采用相对百分比的方法分别进行如下两方面的测试^[3,5]:

1) 协调决策条件下不同求解方法的目标函数值 这里采用线性连续松弛、拉格朗日松弛以及拉格朗日松弛 + 启发式算法三种求解方法,相应的目标函数值分别为: W_C 、 W_R 、 W_H . 如果原问题存在最优解 W_0 ,

则由优化理论可知: $W_C \leq W_R \leq W_0 \leq W_H$. 以参数 $Gap_{R-C} = \frac{(W_R - W_C)}{W_C} \times 100$ 、 $Gap_{H-R} = \frac{(W_H - W_R)}{W_R} \times 100$ 说

明它们的差异.

2) 协调决策与独立决策的系统总成本 W_U 表示独立决策条件下的系统总成本, 参数 $Gap_{U-H} = \frac{(W_U - W_H)}{W_H} \times 100$ 说明两者的差异.

以上测试的具体结果如表 2.

表 2 的计算结果表明:

1) 拉格朗日松弛法相对线性连续松弛法, 系统目标函数值有明显改善, 这表明前者更接近系统最优目标函数值, 具有一定的优越性.

2) 拉格朗日松弛法经过可行性修正后得到的可行解目标函数值, 同未经修正的拉格朗日松弛目标函数值之间的相对差值也是可以接受的.

3) 独立决策条件下的系统总成本同修正后的协调决策可行解目标函数值(系统总成本)存在着差异 ($Gap_{U-H} > 0$), 这表明分销协调决策能够节约成本.

6 结束语

本文基于单工厂、多产品、多分销中心的供应链网络, 研究了生产企业的产销运作协调问题, 提出了协调决策和独立决策两种情形下的产销模型, 针对前者设计了拉格朗日松弛启发式算法进行求解. 数值实例的计算结果一方面验证了模型和算法的合理性, 另一方面表明产销协调决策可以有效地降低供应链成本.

参考文献:

- [1] Blumenfeld D, Burns L. Synchronizing production and transportation schedules [J]. Transportation Research-Part B, 1991, 25(1): 23 - 37.
- [2] Zubair M. An integrated production-distribution model for a multi-national company operating under varying exchange rates [J]. International Journal of Production Economics, 1999, 58: 81 - 92.
- [3] Chandra P, Fisher M. Coordination of production and distribution planning [J]. European Journal of Operations Research, 1994, 72: 503 - 517.
- [4] Arntzen B, Brown G, Harrison T, Trafton L. Global supply chain management at Digital Equipment Corporation [J]. Interfaces, 1995, 25(1): 69 - 93.
- [5] Fumero F, Vercellis C. Synchronized development of production, inventory, and distribution schedules [J]. Transportation Science, 1999, 33(3): 330 - 340.
- [6] Bredstrom D, Ronnqvist M. Integrated production planning and route scheduling in pulp mill industry [A]. Proceeding of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences [C]. Washington DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2002, 3: 1606 - 1614.
- [7] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.