

文章编号: 1001-0920(2002)04-0439-04

# 制造虚拟网络成员企业产量联合优化

赵道致

(天津理工学院 经济管理学院, 天津 300191)

**摘要:** 分析了制造虚拟网络(MVN)的组织结构及其各成员企业之间的物流关系,建立了描述 MVN 供应网络物流的投入产出模型。考虑到短生命周期产品市场需求的不确定性,建立了以 MVN 联合利润最大为目标的各成员企业产量联合优化模型,并证明了目标函数的凹性。发现了目标函数的一阶条件方程决定的超曲面在决策变量张成的平面上的投影为直线,据此给出了最优解的解法。

**关键词:** 制造虚拟网络; 供应网络管理; 联合优化; 利润最大化; 投入产出分析

中图分类号: F 203

文献标识码: A

## Joint optimal output of members in manufacturing virtual network system

ZHAO Dao-zhi

(School of Economics and Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** The organization structure of manufacturing virtual network (MVN) and its material flow relationship between member firms are analyzed. An input-output model is used to describe material flow in the supply network of MVN quantitatively. According to the demand uncertainty of short life-cycle products, a joint optimal output model of member firms in MVN is proposed to maximize its total profit, and the object function is shown to be concave. The projections of hypersurface defined by the equations of first order condition of the object function are straight lines on the planes spanned by decision variables. The solution of optimal joint output is given.

**Key words:** manufacturing virtual network; supply network management; joint optimization; profit maximization; input-output analysis

## 1 引言

制造虚拟网络(MVN)模式出现于 20 世纪 90 年代初期<sup>[1]</sup>,并随着信息与通讯技术(ICT),特别是 E-Business/B2B 和 E-Manufacturing 技术的出现而得到了迅速发展<sup>[2]</sup>。

近年来,已有许多关于网络组织特点的分析文献<sup>[3]</sup>。我们通过研究国内外企业案例发现,MVN 实际上是一种强调组织之间相互灵活的依赖关系,以

求获得更强的竞争力、市场柔性和规模优势的一种组织战略。在 MVN 中,若干企业为了抓住某一种或几种市场需求,合作开发与生产相应的产品,相互协调合作构成了物流供应网络,各成员企业在 MVN 中分属于不同的利润中心。这就提出了有关制造网络组织内生产运作目标一致而盈利目标不一致的一系列协调与合作优化问题。

多利润中心协调优化问题的两个主要特点是:

产品生命周期短和计划分散。前者导致需求的不确定性增加,后者使得计划的协调更加困难。

关于面对随机需求的短生命周期产品的产量或库存优化问题,已有很多研究成果<sup>[4]</sup>;对于供应链上两级产量和库存联合优化问题,也有一些理论研究成果<sup>[5-7]</sup>;而针对 MVN 各成员企业产量联合优化问题,还缺乏有效的方法和理论研究成果。本文试图解决在考虑市场需求的不确定性时,短生命周期产品在 MVN 组织结构中以全局利润最大化为目标的产量计划联合优化问题。

## 2 网络组织内的需求分类及投入产出模型

### 2.1 需求分类

假设某 MVN 生产的是一种结构复杂的多工艺阶段的产品, MVN 中的每个企业只负责产品构成中一个项目或一个工艺阶段的生产,每个成员企业生产的项目都对应供应网络中的一个需求。根据需求来源的不同,我们将所有这些需求分为最终需求和中间需求。

**定义 1** 将那些来自 MVN 外部的需求称为最终需求。

**定义 2** 将那些来自 MVN 内部成员的需求称为中间需求。

显然,有些项目既是中间需求又是最终需求。

### 2.2 制造网络组织的投入产出模型

由于产品结构上的技术关系,各种最终需求和中间需求之间存在着数量上的直接和间接依存关系,这两种关系可用投入产出模型中的直接消耗系数矩阵和完全消耗矩阵来描述。设虚拟制造网络组织生产和供应的全部需求项目标号集合为  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。在此给出如下符号说明:

$D_i$  和  $I_j$  分别表示网络组织内的第  $i$  种中间需求和第  $j$  种最终需求项目,  $i, j \in N$ ; 向量  $Q'$  和  $Q^D$  分别为最终需求计划产量和中间需求计划产量;  $a_{ij}(i, j \in N)$  为制造网络组织中加工单位最终或中间需求项目需要下层中间需求项目的数量,称为直接消耗系数;  $A = \{a_{ij}\}^{n \times n}$ 。

制造网络组织成员企业在生产中间需求  $D_i$  时,应满足其作为原材料或中间产品供应上一级成员企业生产中间需求  $D_j$  和最终需求  $I_j$  的要求,即

$$Q^D = A Q^D + Q' \quad \text{或} \quad Q = (I - A) Q^D = H Q' \quad (1)$$

其中  $H = I - A = \{h_{ij}\}^{n \times n}$ 。可以证明,矩阵  $(I - A)$  是满秩矩阵<sup>[8]</sup>。式(1)整理得

$$Q^D = (I - A)^{-1} Q' = D Q' \quad (2)$$

式中,  $D = (I - A)^{-1} = \{d_{ij}\}^{n \times n}$  为完全消耗系数矩阵或称 Leontief 逆矩阵。在已知最终需求项目计划向量  $Q'$  时,可用式(2)方便地计算出各类中间需求项目的需求向量  $Q^D$ 。

设最终需求项目的市场需求为  $X$ , 相应的中间需求项目为  $Z$ 。由式(2)知  $Z = D X$ , 即

$$z_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j, \quad i \in N \quad (3)$$

## 3 优化模型的建立

### 3.1 决策变量的确定

MVN 在组织生产时,面对随机的市场需求,首先应确定最终需求的计划产量  $Q'$ , 以获取最大的利润。同时,还要保证各类中间需求项目的计划产量不得小于最终需求对它的需求量,即当最终需求的计划产量为  $Q'$  时,中间需求的计划产量  $Q^D$  应为

$$Q^D = Q^D + U = D Q' + U, \quad U \geq 0 \quad (4)$$

其中

$$q_i^D = \sum_{j=1}^n d_{ij} q_j' + u_i, \quad u_i \geq 0, \quad i \in N$$

式中  $u_i$  为中间需求  $i$  的供应裕量。因为  $Q^D$  可根据需求间的完全消耗系数和最终需求利用式(2)直接计算得出,且完全消耗系数可由各类需求项目的 BOM 决定,因此计划决策向量为  $Q'$  和  $U$ 。

### 3.2 目标函数的建立

现在的问题是如何确定最终需求项目的计划产量  $Q'$  和中间需求的计划产量  $Q^D$ , 以使制造网络系统总利润最大。设市场的随机需求向量为  $X$ 。由于市场需求的随机性,将导致最终需求的计划产量与市场需求之间不一定相等。定义最终需求项目的市场需求与计划产量的差额向量为  $Y = X - Q' = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 。当  $y_i > 0$  时,会出现最终需求的库存而发生库存保管费用;当  $y_i < 0$  时,会出现最终需求延期交货的惩罚费用(如价格折扣等)。设最终需求项目  $i$  的单位存货保管费用为  $h_i$ , 单位延期交货的惩罚费用为  $w_i$ 。为方便起见,我们用最终需求的单位差额成本函数  $d_i(y_i)$  来表示上述费用,即

$$b_i(y_i) \triangleq \begin{cases} h_i, & y_i < 0 \\ w_i, & y_i \geq 0 \end{cases}$$

$$B(Y) \triangleq [b_1(y_1), b_2(y_2), \dots, b_n(y_n)] \quad (5)$$

定义最终需求项目的市场需求与计划产量的差额绝对值向量为  $Y \triangleq (|y_1|, |y_2|, \dots, |y_n|)^T$ , 最终需求的差额成本为  $B(Y)Y$ 。

在各类需求的加工制造过程中, 其生产成本可分解为与产量无关的固定成本和与产量呈线性关系的变动成本。一般情况下, 固定成本和单位变动成本在计划产量范围内是不变的, 而计划外中间需求的生产固定成本和单位变动成本将大于计划内需求的生产固定成本和单位变动成本。在此, 定义计划外中间需求向量为  $Z$ , 其中

$$z_i = \max\{z_i - q_i^p, 0\} = \max\left\{z_i - \left[\sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i\right], 0\right\}, \quad i = N \quad (6)$$

设计划内和计划外加工各类需求项目的固定成本向量分别为  $F^p$  和  $F^a$ , 计划内和计划外加工各类需求项目的单位变动成本向量分别为  $V^p$  和  $V^a$ 。由前述分析知  $F^a \geq F^p, V^a \geq V^p$ 。设虚拟制造网络最终需求的市场价格向量为  $P$ , 其市场需求向量为  $X$ , 则  $MVN$  由这些最终需求得到的总销售收入为  $PX$ 。用总销售收入减去最终需求差额成本及各类中间需求计划内和计划外生产制造成本, 可得制造网络总利润。为方便起见, 我们定义计划外中间需求的制造固定成本函数为

$$F^a(Z) \triangleq [f_1^a(z_1), f_2^a(z_2), \dots, f_n^a(z_n)]$$

其中

$$f_i^a(z_i) = \begin{cases} 0, & z_i < q_i^p = \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i, \\ f_i^a, & z_i \geq q_i^p = \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i, \end{cases} \quad i = N \quad (7)$$

如用  $\Pi$  表示企业利润, 则得企业总利润

$$\begin{aligned} \Pi(Q^l, U) = & PX - B(Y)Y - \{[F^pE + V^p(DQ^l + U)] + [F^a(Z)E + V^aZ]\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $E = (1, 1, \dots, 1)^T$ 。

设最终需求项目的市场随机需求  $x_i (i = N)$  相互独立, 其概率密度函数和分布函数分别为  $f_i(x_i)$  和  $F_i(x_i), i = N$ , 均值为  $\mu_i$ 。用  $J(Q^l, U)$  表示企业总利润的期望值, 则有

$$J(Q^l, U) = \int_{i=1}^n \{p_i \mu_i - h_i [q_i^l F_i(q_i^l) - \int_0^{q_i^l} x_i f_i(x_i) dx] - \int_{q_i^l}^{\infty} x_i f_i(x_i) dx - q_i^l [1 - F_i(q_i^l)]\} -$$

$$\begin{aligned} & \left[ f_i^p + v_i^p \left[ \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i \right] \right] - \\ & f_i^a \left[ 1 - G_i \left[ \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i \right] \right] - \int_{j=1}^n v_i^a \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i z_i g_i(z_i) dz_i + \\ & v_i^a \left[ \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i \right] \left[ 1 - G_i \left[ \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i \right] \right] \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $g_i(z_i)$  和  $G_i(z_i)$  分别为  $z_i$  的概率密度函数和分布函数。

### 3.3 优化模型分析

首先假设企业期望利润函数  $J(Q^l, U)$  是二阶连续的。式(9) 最优解(最大值) 存在且唯一的条件是  $J(Q^l, U)$  对各类最终需求  $q_k^l (k = N)$  和中间需求裕量  $u_k (k = N)$  的一阶导数为零, 且  $J(Q^l, U)$  为凹函数。

分别对式(9) 中  $q_k^l$  和  $u_k$  求偏导, 并令其为零, 则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial u_k} J(Q^l, U) = & -v_k^p + f_k^a g_k \left[ \sum_{j=1}^n d_{kj}q_j^l + u_k \right] + \\ & v_k^a \left[ 1 - G_k \left[ \sum_{j=1}^n d_{kj}q_j^l + u_k \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial q_k^l} J(Q^l, U) = & w_k - (h_k + w_k) f_k(q_k^l) - \sum_{i=1}^n v_i^p d_{ik} + \\ & \sum_{i=1}^n f_i^a d_{ik} g_i \left[ \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i \right] + \\ & \sum_{i=1}^n v_i^a d_{ik} \left[ 1 - G_i \left[ \sum_{j=1}^n d_{ij}q_j^l + u_i \right] \right] = \\ & w_k - (h_k + w_k) F_k(q_k^l) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

进一步, 如果  $MVN$  总利润期望值函数  $J(Q^l, U)$  是凹函数, 则由式(10) 和(11) 可得到  $q_k^l$  和  $u_k$  的最优解。考虑到最终需求项目  $i$  的市场随机需求  $x_i$  的概率密度随需求的增加而降低, 对应于市场需求的中间需求项目  $j$  的随机需求  $z_j$  的概率密度也随  $z_j$  的增加而降低这一客观经济现象, 我们假设随机需求密度函数  $f_i(x_i) (i = N)$  和  $g_j(z_j) (j = N)$  是单调减的。

**定理 1** 企业总利润期望值函数  $J(Q^l, U)$  是凹函数, 如果最终需求的随机需求密度函数  $f_i(x_i) (i = N)$  和中间需求的随机需求密度函数  $g_j(z_j) (j = N)$

$N$ ) 是单调减的, 即

$$f_i(x_i) < 0, \quad x_i \in R^+, \quad i \in N$$

$$g_j(z_j) < 0, \quad z_j \in R^+, \quad j \in N$$

证明略。

至此, 由式(5)和(7)解得的  $Q^*$  和  $u^*$  是最终产品制造部门  $M$  和原材料供应部门  $S$  的联合优化决策的最优产量。

### 4 最优解的计算方法

(10) 与(11) 两式虽然给出了最优解  $u_k$  和  $q^k(k \in N)$  的求解方程, 却很难直接用这两式计算最优解  $u_k$  和  $q^k, k \in N$ 。然而, 可通过分析式(10)和(11)揭示的  $u_k$  和  $q^k(k \in N)$  之间的关系来计算最优解。

由式(10) 可得

$$\left. \frac{du_i}{du_j} \right|_{\frac{\partial J}{\partial u_k} = 0} = - \frac{\frac{\partial J}{\partial u_j} \frac{\partial J}{\partial u_k}}{\frac{\partial J}{\partial u_i} \frac{\partial J}{\partial u_k}} = \begin{cases} 0, & k = i, i \in j \\ \frac{d_{kj}}{d_{ki}}, & k = j, i \in j, i, j \in N \\ \text{无意义}, & k \in i, k \in j \end{cases} \quad (12)$$

式(12) 表明, 式(10) 第  $k$  个方程决定的超曲面在  $u_k-u_j(k, j \in N, k \neq j)$  平面上截得的曲线, 是一条与  $u_j$  轴平行、与  $u_k(k, j \in N, k \neq j)$  轴垂直的直线。这表明中间需求计划裕量最优解  $u_k^*$  与  $u_j^*(k, j \in N)$  相互独立。

由(10)和(11) 两式可得

$$\left. \frac{dq^k_i}{du_j} \right|_{\frac{\partial J}{\partial u_k} = 0} = - \frac{\frac{\partial J}{\partial u_j} \frac{\partial J}{\partial u_k}}{\frac{\partial J}{\partial q^k_i} \frac{\partial J}{\partial u_k}} = \begin{cases} - \frac{f_k^a g_k \left( \sum_{l=1}^n d_{kl} q^l + u_k \right) - v_k^a g_k \left( \sum_{l=1}^n d_{kl} q^l + u_k \right)}{f_k^a d_{kj} g_k \left( \sum_{l=1}^n d_{kl} q^l + u_k \right) - v_k^a d_{kj} g_k \left( \sum_{l=1}^n d_{kl} q^l + u_k \right)} = \\ - 1/d_{kj}, & k = j \\ 0, & k \neq j \end{cases} \quad (13)$$

式(13) 表明, 式(10) 第  $k$  个方程决定的超曲面在  $q^k-u_k(i, k \in N)$  平面上截得的曲线, 是一条与  $u_k$  轴的夹角斜率为  $-1/d_{ki}$  的直线,  $d_{kj} > 0$ ; 超曲面在  $q^k-u_j(i, j \in N, j \neq k)$  平面上截得的曲线, 是一条与  $u_j$  轴平行的直线。

由式(11) 知, 其第  $k$  个方程只有  $q^k$  一个决策变量, 与  $q^i(i \neq k)$  和  $u_j(j \in N)$  无关。因此可得

$$\left. \frac{dq^k_i}{du_j} \right|_{\frac{\partial J}{\partial u_k} = 0} = - \frac{\frac{\partial J}{\partial u_j} \frac{\partial J}{\partial q^k_i}}{\frac{\partial J}{\partial q^k_i} \frac{\partial J}{\partial q^k_i}} = 0, \quad j, k \in N \quad (14)$$

式(14) 表明, 由式(11) 第  $k$  个方程决定的超曲面在  $q^k-u_j(k, j \in N)$  平面截得的曲线, 是一条与  $u_j$  轴平行的直线。

综上所述,  $\frac{\partial J}{\partial u_k} J(Q, U) = 0$  与  $\frac{\partial J}{\partial q^k_i} J(Q, U) = 0$  在  $q^k-u_k$  平面上投影线的交点, 即为最优解  $q^{k*}$  和  $u_k^*$ 。

最后的问题是求出  $\frac{\partial J}{\partial u_k} J(Q, U) = 0$  投影线在  $u_k$  轴上的截矩  $u_k$ , 以及  $\frac{\partial J}{\partial q^k_i} J(Q, U) = 0$  投影线在  $q^k$  轴上的交点  $q^{k*}$ 。实际上, 两条投影线分别为

$$q^k = - \frac{1}{d_{ki}}(u_k - u_k^*) \quad (15)$$

$$q^k = q^{k*} \quad (16)$$

直线(15) 的截矩  $u_k$  可用式(10) 计算, 即解下列方程

$$\begin{cases} f_k^a g_k(\xi_k) + v_k^a [1 - G_k(\xi_k)] = v_k^k \\ u_k = \xi_k, \quad k \in N \end{cases} \quad (17)$$

交点  $q^{k*}$  的计算可通过解方程(11) 来计算。

### 5 结 论

MVN 组织战略的目的是为了快速响应市场需求的变化, 并使网络组织整体获取最大利润。欲达此目的, 就需要 MVN 组织成员协调生产, 联合控制各环节的最优产量。本文利用投入产出模型建立了 MVN 中多成员企业、多环节之间的关系模型, 在此基础上给出了以网络组织整体利润最大化为目标的供应网络各环节产量联合优化模型, 证明了最优解的存在性, 并给出了解法。

本文提出的方法具有可操作性, 对于解决 E-Business/B2B 和 E-Manufacturing 中虚拟制造网络组织战略中提出的多利润中心生产协调问题具有一定的理论意义, 对于指导制造网络组织协调制定各成员企业的联合最优产量计划具有一定的实际意义。

(下转第 446 页)

差补偿器前、后模型计算结果进行了比较。

以 0430550600 号带钢为例, 带钢合金号为 AP1056E1, 带宽 1 023 mm, 入口和出口厚度分别为 2.820 mm 和 0.500 mm, 取其 30 组实测数据作为对比标准, 计算并绘制的仿真结果曲线如图 5 所示。其中, 横坐标为实测数据组数( $n$ ), 纵坐标为轧制力( $f/N$ ); 曲线①为实测轧制力, 曲线②为引入分级(两级)NN 误差补偿的轧制力模型输出, 曲线③为引入一级 NN 误差补偿器(长时)的轧制力模型输出, 曲线④为无 NN 误差补偿器的轧制力模型输出。

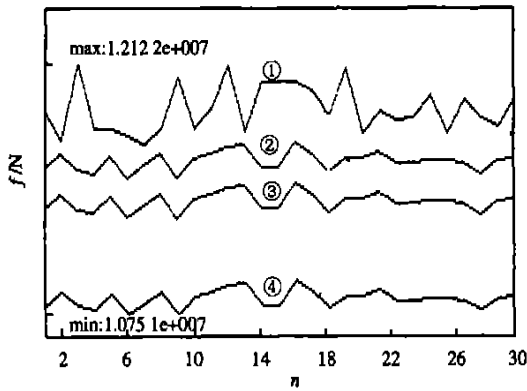


图 5 轧制力仿真结果

由图 5 可以看出, 未经补偿的轧制力模型计算结果偏小; 经 NN 误差补偿器修正后, 计算结果更加接近实测轧制力。

针对图 5 仿真曲线的相关统计数据列于表 1, 其中相对偏差计算公式为(实测值- 计算值)/实

测值。

表 1 仿真计算结果统计数据

轧制力	最大值	最小值	平均值	相对偏差
实测值	1.212 2e+ 007	1.192 0e+ 007	1.200 8e+ 007	
计算值	1.084 0e+ 007	1.075 1e+ 007	1.079 3e+ 007	10.12%
修正值	1.166 6e+ 007	1.157 1e+ 007	1.161 5e+ 007	3.27%

利用编制的仿真程序, 对不同钢种和不同规格的 10 卷带钢进行上述仿真计算。计算结果表明, 引入 NN 分级误差补偿器后, 轧制力模型的预报偏差可降低(5~7)%。

#### 参考文献(References):

- [1] 王国栋, 刘相华, 吕程, 等. 人工智能在轧钢中的应用与性能预报[J]. 钢铁, 2000, 35 (增刊): 24-31.  
(Wang Guodong, Liu Xianghua, Lu Cheng, et al. Application of artificial intelligence to steel rolling and performance prediction [J]. *Iron & Steel*, 2000, 35 (S): 24-31.)
- [2] J Larkiola, P Mylykoski, J Nylander, et al. Prediction of rolling force in cold rolling by using physical models and neural computing [J]. *J of Materials Processing Technology*, 1996, 7(60): 381-386.
- [3] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982. 349-369.
- [4] 杨节. 轧制过程数学模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 29-32.
- [5] 张立明. 人工神经网络的模型及其应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993. 24-32.

(上接第 442 页)

#### 参考文献(References):

- [1] Powell W. Neither market nor hierarchy: Network forms of organization [J]. *Res in Organ Beh*, 1990, 12 (4): 295-336.
- [2] Symon G. Information and communicational technologies and network organization: A critical analysis [J]. *J of Occup & Organ Psyc*, 2000, 73(4): 389-414.
- [3] Podolny J, K Page. Network forms of organization [J]. *Ann Rev of Soci*, 1998, 24(1): 57-76.
- [4] Vidal C J, M Goetschalckx. Strategic production distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models [J]. *Eurp J of Oper Res*, 1997, 98(1): 1-18.
- [5] 赵道致. 企业内部供应链产量联合优化决策研究[J]. 系统工程学报, 1999, 14(2): 162-166.  
(Zhao Daozhi. The study on decision making of joint optimal production quantity in supply chain within a firm[J]. *J of Syst Eng*, 1999, 14(4): 162-166.)
- [6] Alfredsson P, J Verrijdt. Modeling emergency supply flexibility in a two-echelon inventory system [J]. *Manag Sci*, 1999, 45(10): 1416-1431.
- [7] Cachon G P, P H Zipkin. Competitive and cooperation inventory policies in a two-stage supply chain [J]. *Manag Sci*, 1999, 45(7): 936-953.
- [8] 钟契夫, 陈锡康. 投入产出分析[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 1987. 677-680.