

文章编号:1000-582X(2005)12-0081-04

# 制造企业能量投入产出优化\*

王涛<sup>1</sup>,夏伯才<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 工学院,四川 绵阳 621900)

**摘要:**物质、能量和信息是构成当代制造企业的三大要素,能量系统是整个企业的一个子系统. 由企业能物流分析得到企业能量系统静态投入产出方程,将其改造成带一步延迟的 W. Leontief 型能量系统动态投入产出模型. 作者用线性二次型最优控制方法,以确定生产过程中各生产部门生产能力和资源的合理规划与配置,优化企业能量系统结构. 给出了一个计算示例.

**关键词:**动态投入产出模型; 能量系统; 规划

**中图分类号:**F406.2; TK01\*8

**文献标识码:**A

投入产出分析(Input-Output Analysis)研究一个经济系统内部各部门之间“投入”与“产出”关系<sup>[1]</sup>,除应用于宏观经济系统的综合平衡分析外,还可以应用于企业微观经济系统<sup>[2-8]</sup>. 在企业层次,每一个生产部门一方面以自己的产品分配给其他部门作为生产资料,另一方面,每一个生产部门在其生产过程中也要消耗其它各部门的产品,所以各部门之间形成了复杂的互相交错的关系,列昂节夫(W. Leontief)将这一关系用投入产出(平衡表)来分析. 这一模型一般用于企业生产计划编制、产品结构分析、主次生产比例分析和其他经济分析.

企业能量系统是制造企业中一个重要的子系统,所以对系统中的各种能量信息,如能源供应信息、能源消耗信息、能源计划信息,必须进行严密的系统分析和优化研究,做出科学的规划与决策,才能实行有效的调节与控制,以保证生产过程的持续进行,实现最有效地利用能源. 为此,笔者试图从企业能量投入产出表出发,在建立动态投入产出模型的基础上,运用优化控制技术实现企业能源合理规划与配置.

## 1 企业能量系统的基本特征

作为整个企业的一个子系统,企业能量系统由组织系统、监测系统、决策系统、控制系统等子系统所组成,结构如图1所示. 制造企业产品众多,工艺复杂,工

序之间相互制约,物流和能流之间存在无穷循环消耗(如二次能源水的循环利用).

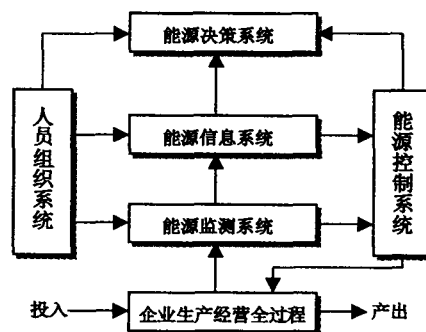


图1 企业能量系统

可见,能量系统是整个企业的一个子系统,属于具有管理特征的离散时变(随机)系统. 这类系统除了维数高以外,还存在一个层次问题,一层是对象的动力学特征(可用差分方程描述),另一层是管理(包括技术和工艺)特征(通常用代数方程刻画). 因此,多级、多维数、多目标和多层次是企业能量系统的特征.

在现代系统科学和控制论中,一种可行的处理方法就是建立里昂捷夫动态投入产出模型,在一定的优化准则下建立目标函数,辅之以工艺、技术和市场等约束条件,即可建立确定边界条件和初始条件下的用能优化控制模型.

\* 收稿日期:2005-07-20

基金项目:中国工程物理研究院科学技术基金项目(20010668;20000329)

作者简介:王涛(1967-),女,黑龙江哈尔滨人,中国工程物理研究院电子工程研究所会计师,主要从事企业经济分析研究.

## 2 企业能量系统建模

对经济系统的研究离不开模型,而一个系统往往可以用不同的模型去描述,其中之一就是状态空间模型.状态空间模型的应用范围越来越广泛,已成为研究经济系统的一种有力工具,也是进行投入产出分析的基础.

投入产出分析本质上是一种从数量上系统研究一个经济系统不同部门(或产品)之间相互依存关系的经济数学方法.早期的投入产出模型一般为静态模型,它只能反映一个时点(一般为一年)上的经济发展及经济结构情况.在静态投入产出分析中,通常是将投资作为一种最终需求外生地加以处理.动态投入产出模型的变量不仅涉及时间变化,而且将投资需求同生产的发展联系起来,同时通过投资系数矩阵将投资由动态的外生变量变为动态的内生变量,再现了投资与生产之间的相互联系、相互制约的循环往复过程.它是静态模型的发展,且无论在理论上和方法上远较静态模型复杂.

### 2.1 状态方程描述

为建立企业能量系统 W. Leontief 离散型动态投入产出模型,作如下抽象处理:

首先,以整个系统的生产工艺环节为基本要素,引入“假想生产工序”的概念,规定一个工序只生产一种产品(包括能源产品和非能源产品),一个工序或部门含有多种产品时,按能耗情况折算成标准产品产量<sup>[8]</sup>.确定“假想生产工序”的原则是:满足生产结构和消耗分析的需要;满足计划评价、优化和生产预测的需要;接近现有工序和产品的一般分类方法;易于采集数据等.按上述原则,可将实际生产工序进行细分或归并,绘制出如图 2 所示的产品能耗关系图,描述系统中的能流和物流,图 2 中序号 1, 2, …, n 表示产品,有向边  $a_{ij}$  表示产品  $j$  对产品  $i$  的消耗系数,当  $j=i$  时,表示工序自耗或内部损耗.

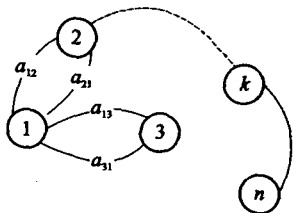


图 2 产品能耗关系图

其次,把产品构成分成工序产品、外购材料、外购能源和自产能源.

在此基础上,采集历史数据,编制价值型企业能量投入产出表,根据图 2 表达的关系,确定直接消耗矩

阵,得到企业能量系统静态投入产出方程,将其改造成带一步延迟的 W. Leontief 动态投入产出模型<sup>[1]</sup>:

$$X(k) = AX(k) + B[X(k+1) - X(k)] + Y(k), \\ k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

其中,  $n$  为系统状态数,即归并后的系统产品和能源品种数;  $X(k)$  为状态变量,  $Y(k)$  为系统输出,它们均为  $n$  维列向量;  $N$  为规划期长度,通常以年为单位.  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 表示产品对能源产品和非能源产品之间的直接消耗系数,其元素满足  $0 \leq a_{ij} < 1$  且  $\sum_{i=1}^n a_{ij} < 1$ ,  $B = (b_{ij})_{n \times n}$  为投资系数阵,  $b_{ij}$  表示第  $j$  种产品增加单位产量需要  $i$  产品量,  $A$ 、 $B$  均可从企业能量平衡表等历史数据中得到.

以状态的改变  $X(k+1) - X(k)$  为控制变量  $U(k)$ , 即:

$$U(k) = X(k+1) - X(k). \quad (2)$$

根据能量平衡原则,可得到动态投入产出模型:

$$X(k+1) = X(k) + U(k), X(0) = X^{(0)}, \quad (3)$$

$$Y(k) = (I - A)X(k) - BU(k). \quad (4)$$

$X^{(0)}$  为系统初始状态,方程(3)为系统状态方程,它描述系统的动力学特征,方程(4)为系统的输出方程,它体现了系统投入和产出之间的平衡关系.

### 2.2 可控性和可观测性

可以证明<sup>[9]</sup>,由式(3)-(4)描述的动态系统是可控且完全可观测的.显然,矩阵  $[I \ I \ \dots \ I^{n-1} \ I]$  的秩等于  $n$ .因此,系统是可控的.在实际能量系统中,消耗矩阵  $A$  满足 Hawkin - Simon 条件,即  $0 \leq a_{ij} < 1$  且  $\sum_{i=1}^n a_{ij} < 1$ ,可知  $|1 - a_{ij}| > \sum_{i=1, i \neq j}^n |a_{ij}|, j=1, \dots, n$ .因此,

$I - A$  非奇异.于是,系统可观测性矩阵

$$\begin{bmatrix} I - A \\ (I - A)E \\ \vdots \\ (I - A)E^{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I - A \\ (I - A)E \\ \vdots \\ (I - A) \end{bmatrix} \text{的秩等于 } n, \text{因此系统是}$$

完全可观测的.

## 3 动态投入产出优化策略

在制定企业能源规划时,对系统的优化采取平稳的调整策略,即在尽可能短的时间内满足产出需求的同时,尽量减小对系统产品和消耗结构(即  $X(k)$ )调整.

用  $n$  维列向量  $D(k)$  ( $k=0, 1, \dots, N-1$ ) 表示对各部门(工序)提供的最终耗(含)能产品的数量需求,视为已知.同时还要考虑到,需求向量  $D(k)$  往往总是根据生产子系统等的需要作出的粗略预测估计,是一

种假定的特定比例的动态结构,未能考虑不确定性. 现假定  $D(k)$  为具有多种噪声的不确定信号,仅知道其具有有界能量,即

$$D(k) \in L_2 = \{D(k) : \sum_{k=0}^{N-1} D(k)^T D(k) < \infty, \forall > 0\}.$$

当处于动态平衡时,需求  $D(k)$  等于企业能量系统的产出  $Y(k)$ . 但供需不平衡是难免的,同时还存在其它不确定因素,既干扰. 这时,可调整产出能力,在保证  $Y(k)$  与  $D(k)$  之“差”尽可能小的同时,为保证系统的平稳运行,控制系统状态改变  $X(k+1) - X(k)$ , 保证对产出结构  $U(k) (= X(k+1) - X(k)) (k=0, 1, \dots, N-1)$  的调整不要太大.

根据以上分析,引入系统评价函数为线性二次型:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \{ [D(k) - Y(k)]^T \cdot$$

$$Q(k) [D(k) - Y(k)] + U(k)^T R(k) U(k) \}. \quad (5)$$

由式(4)得(为简略以下用  $D$  表示  $D(k)$  等)

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \{ [D + (A - I)X + BU]^T \cdot$$

$$Q [D + (A - I)X + BU] + U^T R U \}. \quad (6)$$

其中  $A(k)$  是第  $k$  年的直接消耗系数阵,  $Q(k)$  是  $n \times n$  阶对称半正定阵,  $R(k)$  是  $n \times n$  阶对称正定阵,  $Q(k)$  和  $R(k) (k=0, 1, \dots, N-1)$  都是对角加权阵,一般形式为

$$Q(k) = \begin{bmatrix} q_1(k) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & q_n \end{bmatrix}, R(k) = \begin{bmatrix} r_1(k) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & r_n \end{bmatrix}.$$

$Q(k)$  和  $R(k)$  中的各分量是可调的,以体现决策者的偏好. 为方便起见,可把它们取为常数.

由式(1-6)即得到企业能量系统的最优控制模型:

$$\left. \begin{aligned} X(k+1) &= X(k) + U(k) \\ X(0) &= X^{(0)} \\ Y(k) &= (I - A)X(k) - BU(k), k = 0, 1, \dots, N-1 \\ \text{Min. } J \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)是一个线性二次型最优控制问题,且业已证明,上述系统是可观和可控的. 在式(1)和式(6)约束下,只要满足  $B^T Y(k+1) B + R < 0^{[10]}$ , 就可以得到最优控制函数

$$U^*(k) = -R(k)^{-1} B^T P(k) X(k). \quad (8)$$

矩阵  $P(k)$  通过迭代方法来求解下列代数 Riccati 方程求出,详细过程参见文献[10-11].

$$-P(I - A)^T P + P B R^{-1} B^T P - Q = 0. \quad (9)$$

这样,就可得到反馈控制  $K = -R(k)^{-1} B^T P(k)$ ,

优化产品结构(状态)  $X^*(k)$  和相应的产出水平  $Y^*(k)$ .

上述优化策略具有明确的经济含义,通过选择不同的  $Q(k)$  和  $R(k)$  可区分各部门(工序)提供的最终产品数量与需求之差以及各部门产出能力的变化所要求的主次程度. 选取  $Q(k)$  和  $R(k)$  各个分量的大小,可以体现决策者对各状态分量(即系统产品状态和产出状态)的重视程度,从而得到不同的方案. 通过这些方案的比较研究,以便得到满意的策略,实现企业能量系统优化.

如果考虑系统状态变量和输出中存在的随机扰动,一般可假设为白噪声信号,则式(7)可设计出带有 Kalman 滤波的线性二次型高斯控制器<sup>[12]</sup>,从而实现系统调节和优化.

#### 4 简要算例

设有一企业能量系统消耗 2 种能源,按一个工序生产一种产品将实际工序和产品归并为 4 个工序和 4 种标准折算产品,对其作 5 a 规划. 从企业能量平衡表等历史数据中得到参数如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0.147 0 & 0.145 2 & 0.091 8 & 0 \\ 0.150 1 & 0.741 0 & 0.052 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.695 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.137 4 & 0.023 6 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.123 7 & 0.226 5 & 0 & 0 \\ 0.016 4 & 0.030 1 & 0 & 0 \\ 0.300 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.475 2 & 0.137 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

为简化,不考虑系统状态变量和输出中存在的随机扰动,对其作 5 a 规划( $N=5, n=4, m=2$ ),取  $Q = \text{diag}([5, 1, 4, 1000])$ ,  $R = I_{4 \times 4}$ ,  $X(0) = (0, 0, 0, 0)^T$ , 得到最优状态反馈矩阵为:

$$K = \begin{bmatrix} -0.387 1 & 0.040 7 & 7.587 9 & -23.202 4 \\ -1.262 5 & 0.685 2 & -2.349 4 & 5.946 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

据此可以产品调整策略,选取不同的  $Q$  和  $R$ , 可得到不同的方案,供决策者参考. 需要指出的是,这样得出的最优控制是“人工”意义下的最优控制,因为它的效果完全取决于加权矩阵  $Q$  和  $R$  的选取,如果这些加权矩阵选择不当,则可能出现完全没有意义的解,更谈不上“最优”了.

#### 5 结论

根据制造企业能量系统的特点,从能流和物流分

析入手,引入“假想生产工序”的概念,对整个系统的生产工艺环节进行分解或归并,得到了系统产品能耗关系的简洁表达.由价值型企业能量投入产出表确定直接消耗系数,得到带一步延迟的 W. Leontief 动态投入产出模型,体现投入和产出之间的平衡关系.以此为基础建立的优化模型是完全可控和可观测的,采用线性二次型优化控制策略具有明确的经济含义,能方便的体现决策者地主观意愿,据此可实现企业能量系统的中短期规划.

#### 参考文献:

- [1] LEONTIEF W. Input-output Economics[M]. New York: Oxford University Press, 1986.
- [2] CASSETTI M A, STEENGE A E. Compilation of Input-output Data from the National Accounts[J]. Economic Systems Research, 1994, 6(4): 435-447.
- [3] 周鹏,唐焕文,赵晶,等.中国宏观经济预测模型算法及应用[J].大连理工大学学报,2004,40(3): 342-346.
- [4] 周鹏,唐焕文.一个中国宏观经济预测模型及算法[J].大连理工大学学报,2003,43(2): 129-131, 140.
- [5] 张金水.可计算非线性动态投入产出模型[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [6] CHUNG J L. The Dynamic Variable Input-output Model: An Advancement form the Leontief Dynamic Input-output Model[J]. Ann Reg Sci, 2000, 34(4): 591-614.
- [7] 赵松山.关于经济系统的状态空间模型及其构建研究[J].南京财经大学学报,2004,(3): 25-31.
- [8] 许杰.本钢产品能值模型的开发与研究[J].冶金能源,1996,15(2): 11-14.
- [9] 吴麒.自动控制原理[M].北京:清华大学出版社,1992.
- [10] [日]绪方胜彦.离散时间控制系统[M].刘君华译.西安:西安交通大学出版社,1990.
- [11] STEIN G, ATHENS M. The LQG/LTR Procedure for Multivariable Feedback Control System Design[J]. IEEE Trans On Automatic Control, 1987, AC-32(2): 105-114.
- [12] CHRISTIANO L. Solving the Stochastic Growth Model by Linear-quadratic Approximation and by Value-function[J]. International Journal of Business and Economic Statistics, 1990, 15(1): 23-26.

## Energy Input-output Optimization of Manufacturing Enterprise

WANG Tao<sup>1</sup>, XIA Bo-cai<sup>2</sup>

(1. Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Technology, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In today's manufacturing enterprise, material, energy and information are three basic elements, and energy system is a sub-system in it. Based on the static input-output relationship derived from the energy flow and material flow net diagram, W. Leontief type dynamic input-output model with one step delay is developed. With LQR optimal control method, a dynamic input-output energy system of manufacturing enterprise has been built for planning of production capacities, the distribution of resources, and the dynamic balancing of system. An illustrated example is presented.

**Key words:** dynamic input-output model; energy system; planning

(编辑 张小强)