

基于最大有效面集的网络SBM评价模型及其应用

郭文, 孙涛, 朱建军

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 在网络SBM(slacks-based measure)模型评价的基础上,选择生产系统的最大有效面集作为参考集,构建内部子过程存在关联的多阶段复杂生产系统的基于最大有效面集的网络SBM效率评价模型,该模型实际反映了无效生产单元改进为有效生产单元的最优路径.将投入、中间产品和产出三者在于过程的价值分布作为权重引入上述模型子过程的权重设定中,增强了模型实用性.最后采用一个实例验证了该模型在多阶段关联复杂生产系统效率评价中的有效性和优势.

关键词: 网络SBM; 最大有效面集; 系统效率评价

中图分类号: O224

文献标志码: A

Network slacks-based measure evaluation method based on maximum frontier set and its application

GUO Wen, SUN Tao, ZHU Jian-jun

(College of Economic and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China. Correspondent: GUO Wen, E-mail: guowen.870608@163.com.)

Abstract: On the basis of the evaluation of the network slacks-based measure(SBM) model, the maximum frontier set of the production system is selected as reference sets. The network SBM evaluation method based on the maximum frontier set is built, in which the multi-stage complex production system exists in internal sub-processes. The model reflects that the optimal path of the inefficient production unit is improved as efficiency. By taking the value distribution of inputs, intermediate products and outputs in the sub-process as its weights to introduce into the model, the practicability of the model is enhanced. Finally, an example is given to verify the effectiveness of the model in efficiency evaluation of the multi-stage correlated complex production system.

Key words: network slacks-based measure; maximum frontier set; system efficiency evaluation

0 引言

数据包络分析(DEA)是目前系统效率评价的一种重要方法,但是由于实际中生产系统的复杂性,传统的DEA方法存在两方面的局限.首先,大多数DEA方法无法获得投入、产出松弛与效率之间的关系,从而无法直观地反映低效生产单元的效率提升路径.SBM模型将生产单元的投入、产出松弛直接反映在评价值的计算中,很好地解决了这个问题^[1-6].文献[2-3]构建了超效率SBM模型,文献[4-5]则构建了非期望产出SBM模型,分别解决了SBM有效单元的进

一步比较和生产系统存在非期望产出的效率评价.其次,传统的DEA方法将生产系统视为一个“黑箱”,忽视了生产系统的内部结构及其关联性,无法满足多阶段关联的复杂生产系统的效率评价.网络SBM模型充分考虑了子过程间的联系,并且能同时给出系统效率和子过程效率的评价值,在多阶段关联的复杂生产系统效率评价中具有较强的优势^[7-8].文献[8]利用2000~2006年日本商业银行的实际数据进行了网络SBM模型的实证研究,结果证实网络SBM模型能更好地提高识别生产单元的效率.另外,子过程的权重

收稿日期: 2013-09-06; 修回日期: 2014-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71171112); 教育部人文社科基金项目(11YJA790133); 江苏省社科基金重点项目(12EYA001); 江苏省软科学重点项目(SBR20130186); 江苏省高校哲学社科基金重点项目(2011ZDIXM051); 国家建设高水平大学公派研究生基金项目([2014]3026); 江苏省研究生培养创新工程项目(KYZZ_0107, CXLX12.0178).

作者简介: 郭文(1987-),男,博士生,从事管理科学与工程的研究; 孙涛(1959-),男,教授,博士生导师,从事能源系统工程、环境工程学研究.

问题也是大多数学者关注的焦点^[9-11]. 文献 [10-11] 都将投入要素的使用成本作为权重引入 SBM 模型, 实现了子过程权重与投入要素使用成本的联系.

上述 SBM 模型在效率评价的过程中均采用了生产可能集的有效点作为参考集, 忽视了其有效面, 造成评价结果偏低. 近年来, 有学者开始研究以有效面为参考集的生产系统的效率评价^[12]. 文献 [12] 的研究表明, 基于有效面集的 SBM 模型代表了低效生产单元改进为有效生产单元的最短路径, 在投入资源约束的情况下, 基于有效面的效率评价以及投入、产出松弛量更加符合实际; 另外, 本文认为子过程权重不仅受到投入要素使用成本(价值)的影响, 同时也受中间产品和产出的价值的影响. 因此, 本文借鉴网络 SBM 模型的思想, 在规模报酬可变的经济假设下, 选择生产系统的有效面集作为参考集, 充分考虑了投入、中间产品和产出的价值, 构建基于有效面集的网络 SBM 模型 (MFS-NSBM) 来实现多阶段关联复杂生产系统的效率评价.

1 网络 SBM 模型回顾与分析

假设复杂生产系统包含 m 个生产单元 $DUM_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 和 $N (n = 1, 2, \dots, N)$ 个子过程. 其子过程 n 的投入向量、产出向量和中间产品向量分别为

$$\begin{aligned} X^n &= (x_j^n, \dots, x_m^n), n = 1, 2, \dots, N; \\ Y^n &= (y_j^n, \dots, y_m^n), n = 1, 2, \dots, N; \\ Z^{(n \rightarrow v)} &= (z_j^{(n \rightarrow v)}, \dots, z_m^{(n \rightarrow v)}), \\ n, v &\in (1, 2, \dots, N) \ \& \ n \neq v. \end{aligned} \quad (1)$$

文献 [13] 研究了网络 SBM(NSBM) 模型在多阶段关联复杂生产系统效率评价中的应用, 本文首先借鉴以下几个概念.

定义 1(整体效率、子过程效率) 定义模型

$$\begin{aligned} \theta_o &= \min_{\lambda^n, s^{n-}, s^{n+}} \frac{\sum_{n=1}^N w^n \left[1 - \frac{1}{r_n} \left(\sum_{p=1}^{r_n} \frac{s_{po}^{n-}}{x_{po}^n} \right) \right]}{\sum_{n=1}^N w^n \left[1 + \frac{1}{s_n} \left(\sum_{q=1}^{s_n} \frac{s_{qo}^{n+}}{y_{qo}^n} \right) \right]}. \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^m x_j^n \lambda_j^n + s^{n-} = x_o^n, n = 1, 2, \dots, N; \\ & \sum_{j=1}^m y_j^n \lambda_j^n - s^{n+} = y_o^n, n = 1, 2, \dots, N; \\ & \sum_{j=1}^m z_j^{(n \rightarrow v)} \lambda_j^n = \sum_{j=1}^m z_j^{(n \rightarrow v)} \lambda_j^v = z_o^{(n \rightarrow v)}, \\ & s^{n-} \geq 0, s^{n+} \geq 0, \lambda_j^n \geq 0; \\ & \sum_{n=1}^N w^n = 1, \sum_{j=1}^m \lambda_j^n = 1, \lambda_j^n \geq 0, \forall j, n. \end{aligned} \quad (2)$$

其目标函数为被评价生产单元 DUM_o 的整体效率. 假设其最优解向量 $\theta_o^\#, \lambda^{n\#}, s^{n-\#}, s^{n+\#} (n = 1, 2, \dots, N)$ 的子过程 v 的效率为

$$\theta_o^v = \frac{1 - \frac{1}{r_v} \left(\sum_{p=1}^{r_v} \frac{s_{po}^{v-\#}}{x_{po}^v} \right)}{1 + \frac{1}{s_v} \left(\sum_{q=1}^{s_v} \frac{s_{qo}^{v+\#}}{y_{qo}^v} \right)}, v \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (3)$$

定义 2(子过程参考集、整体参考集) 定义被评价生产单元 DUM_o 的子过程 v 的参考集

$$R_o^v = \{j | \lambda_j^{v\#} > 0\}, j \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (4)$$

其整体参考集

$$R_o = \{R_o^1, \dots, R_o^N\}. \quad (5)$$

定义 3(整体 SBM 有效、子过程局部 SBM 有效)

定义最优解向量 $\theta_o^\#, \lambda^{n\#}, s^{n-\#}, s^{n+\#} (n = 1, 2, \dots, N)$ 对于 $\forall v \in (1, 2, \dots, N)$ 满足 $s^{v-\#} = 0, s^{v+\#} = 0$ 的生产单元 DUM_o 为整体 SBM 有效, 反之则为整体 SBM 无效. 在子过程 $v (v \in \{1, 2, \dots, N\})$, 定义最优解向量 $\theta_o^\#, \lambda^{n\#}, s^{n-\#}, s^{n+\#} (n = 1, 2, \dots, N)$ 满足 $s^{v-\#} = 0, s^{v+\#} = 0$ 的生产单元 DUM_o 为子过程 v 局部 SBM 有效, 反之则为子过程 v 局部 SBM 无效.

传统 NSBM 模型仅以 SBM 有效点为参考集, 造成 SBM 无效单元的投入或产出松弛偏高. 文献 [13] 采用传统 NSBM 评价生产单元 A 的投入、产出松弛矩阵为 $[0.3078, 0.1830, 0.5837, 0, 0.0071]^T$, 而在不改变生产系统前沿面的情况下取目标函数最大化, 可得其投入、产出矩阵为 $[0.0000, 0.1282, 0.1454, 0.0000, 0.0000]^T$. 在系统投入资源、生产技术约束的条件下, 以后者为改进目标显然更符合生产单元 A 的实际情况, 本文研究的目的在于基于生产系统的有效面集探寻 SBM 无效单元改进为有效单元的最短路径.

2 基于最大有效面集的网络 SBM 评价

为了探讨 SBM 无效单元改进为有效单元的最短路径, 本文拓展了以下几个概念.

定义 4(子过程有效面) 经过 $(x_o^v, y_o^v, z_o^{(v \rightarrow n)})$ 和 $(x_j^v, y_j^v, z_j^{(v \rightarrow n)}) (j = 1, 2, \dots, m)$ 的平面 $\gamma^v x^v - \pi^v y^v + \nu^{(v \rightarrow n)} z^{(v \rightarrow n)} = 0$ 为系统子过程 v 的一个有效面. 其中

$$\begin{aligned} x_o^v &= u_1 x_1^v + \dots + u_m x_m^v, \\ y_o^v &= u_1 y_1^v + \dots + u_m y_m^v, \\ z_o^{(v \rightarrow n)} &= u_1 z_1^{(v \rightarrow n)} + \dots + u_m z_m^{(v \rightarrow n)}, \\ u_i &> 0, \sum u_i = 1, i = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (6)$$

并且生产单元 $(x_o^v, y_o^v, z_o^{(v \rightarrow n)})$ 为子过程 v 局部 SBM 有效, $(\gamma^v, \pi^v, \nu^{(v \rightarrow n)})$ 为其对偶变量.

文献 [13] 的研究表明, 在规模报酬可变的经济假

设下, 对于 $\forall v(v \in \{1, 2, \dots, N\})$, 生产系统必然存在子过程 v 局部 SBM 有效单元. 假设生产系统中子过程 v 局部 SBM 有效单元共有 k 个, 本文用 $D_j^v = (x_j^v, y_j^v, z_j^{(v \rightarrow n)}) (j \in \{1, 2, \dots, k\})$ 表示所有子过程 v 局部 SBM 有效单元的集合.

定义 5 (子过程有效面集) 如果 $\{D_j^v\} = \{(x_j^v, y_j^v, z_j^{(v \rightarrow n)})\} (j \in \{1, 2, \dots, k\})$ 中 i 个单元子集 $\{D_{j_1}^v, \dots, D_{j_i}^v\}$ 的线性组合 $\alpha_1 D_{j_1}^v + \dots + \alpha_i D_{j_i}^v (\alpha_i > 0, \sum \alpha_i = 1, i \in \{1, 2, \dots, k\})$ 为子过程 v 局部 SBM 有效, 则定义这些单元子集构成的集合 $\{D_{j_1}^v, \dots, D_{j_i}^v\}$ 为子过程 v 的有效面集.

定义 6 (子过程最大有效面集、整体最大有效面集) 如果一个有效面集增加任何一个单元子集 $\{D_{j_i}^v\}$ 便不再满足有效面集的条件, 则定义该有效面集为子过程 v 的最大有效面集, 简称为 D_{\max}^v . 定义所有子过程最大有效面集组成的集合为整体最大有效面集, 简称为 D_{\max} , 此时生产单元子过程 v 的参考集为

$$R_{o_{\max}}^v = \{j | \lambda_j^{v\#} > 0\}, \quad j \in \{1, 2, \dots, m\}, v \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (7)$$

定义 7 (子过程权重) 假设子过程 v 的投入为 $x_i^v (i = 1, 2, \dots, r_v)$ 、产出为 $y_i^v (i = 1, 2, \dots, s_v)$, 中间产品 $z_i^{(v \rightarrow n)} (i = 1, 2, \dots, q_v)$ 的单位价值分别用 $p_{x_i}^v$ 、 $p_{y_i}^v$ 和 $p_{z_i}^{(v \rightarrow n)}$ 表示, 则定义子过程 v 的权重为 w^v , 并且有 $\sum_{v=1}^N w^v = 1$. 其中

$$w^v = \frac{1}{\sum_{v=1}^N (r_v + s_v + q_v)} \left[\sum_{i=1}^{r_v} \left(\frac{p_{x_i}^v x_i^v}{\sum_{v=1}^N p_{x_i}^v x_i^v} \right) + \sum_{i=1}^{s_v} \left(\frac{p_{y_i}^v y_i^v}{\sum_{v=1}^N p_{y_i}^v y_i^v} \right) + \sum_{i=1}^{q_v} \left(\frac{p_{z_i}^{(v \rightarrow n)} z_i^{(v \rightarrow n)}}{\sum_{v=1}^N p_{z_i}^{(v \rightarrow n)} z_i^{(v \rightarrow n)}} \right) \right]. \quad (8)$$

本文提出的基于最大有效面集的网络 SBM 评价方法的基本思想是, 在网络 SBM 模型评价获得生产系统有效面集的基础上, 以系统最大有效面集为低效生产单元的参考集, 对原 SBM 无效单元进行二次评价. 以生产系统子过程 1 为例, 其最大有效面集的示意图见图 1.

假设 A、B、C、D 四个生产单元的子过程 1 为局部 SBM 有效, 对于 SBM 无效生产单元 DMU_o, 若在传统 NSBM 模型评价其子过程 1 的效率下, 满足 $\lambda_C^{1\#} > 0, \lambda_D^{1\#} > 0$, 则其参考集为 $R_o^1 = \{C1, D1\}$. MFS-NSBM 模型的评价思想是: 在上述评价的基础上, 首先以 A1 作为最大有效面集, 在添加 B1 后满足定义 6,

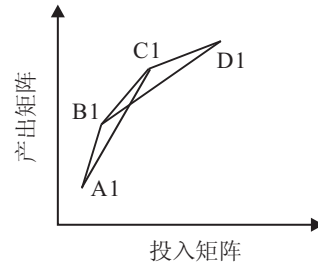


图 1 子过程 1 最大有效面集的示意图

即 $\alpha_1 D_A^1 + \alpha_2 D_B^1 (\alpha_i > 0, \alpha_1 + \alpha_2 = 1)$ 为子过程 1 局部 SBM 有效, 因此, A1、B1 构成的超平面构成了一个有效面集. 然后依次添加 C1、D1 判断其是否满足定义 6 的要求, 发现 A1、B1、C1 构成的超平面也构成了一个有效面集, 然而 $\alpha_1 D_A^1 + \dots + \alpha_4 D_D^1 (\alpha_i > 0, \alpha_1 + \dots + \alpha_4 = 1)$ 不满足定义 6, 从而认为超平面 (A1, B1, C1) 即为生产可能集的一个最大有效面集 (如图 1), 此时进行生产单元 DMU_o 效率的二次评价时, 其参考集变为 $R_{o_{\max}}^1 = \{A1, B1, C1\}$. 同理可获得生产系统子过程 1 的全部最大有效面集, 其参考集也相应发生变化, 最终取生产单元 DMU_o 效率的最大评价值为 MFS-NSBM 模型的评价结果, 应用步骤如下.

Step 1 根据投入、产出和中间产品的实际市场价格确定各个生产单元子过程 v 的权重 w^v .

Step 2 运用网络 SBM 模型对多阶段关联复杂生产系统的各生产单元的效率进行评价, 得到生产系统所有生产单元的整体效率和子过程效率.

Step 3 对于 $\forall v(v \in \{1, 2, \dots, N\})$, 挑选出该子过程局部 SBM 有效的所有生产单元, 再运用算法 1 得到其最大有效面集 D_{\max}^v 和参考集 $R_{o_{\max}}^v$.

算法 1 1) 在不失代表性的前提下, 先假设子过程 $v(v \in \{1, 2, \dots, N\})$ 的最大有效面集为 $\{D_{j_1}^v\}$. 2) 代入集合 $\{D_{j_2}^v\}$ 和 $\{D_{j_1}^v\}$ 形成线性组合, 若该线性组合为子过程 v 局部 SBM 有效, 则两者构成新的最大有效面集; 若该线性组合为子过程 v 局部 SBM 无效, 则代入 $\{D_{j_3}^v\}$, 依次循环直到找到子过程 v 局部 SBM 有效的线性组合, 即找到新的最大有效面集. 3) 重复过程 2) 直到最大有效面集不再变化. 4) 先假设 $\{D_{j_2}^v\}$ 为最大有效面集, 重复上述过程 1)~3). 算法 1 能得到若干个最大有效面集.

Step 4 获得参考集 $R_{o_{\max}}^v (\forall v \in \{1, 2, \dots, N\})$ 后, 采用本文提出的 MFS-NSBM 模型

$$\theta_o'' = \max_{\lambda^n, s^{n-}, s^{n+}} \frac{\sum_{n=1}^N w^n \left[1 - \frac{1}{r_n} \left(\sum_{p=1}^{r_n} \frac{s_{po}^{n-}}{x_{po}^n} \right) \right]}{\sum_{n=1}^N w^n \left[1 + \frac{1}{s_n} \left(\sum_{q=1}^{s_n} \frac{s_{qo}^{n+}}{y_{qo}^n} \right) \right]}. \quad \text{s.t.} \quad \sum_{j \in R_{o_{\max}}^n} x_j^n \lambda_j^n + s^{n-} = x_o^n, n = 1, 2, \dots, N;$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in R_{o \max}^n} y_j^n \lambda_j^n - s^{n+} = y_o^n, \quad n = 1, 2, \dots, N; \\
 & \sum_{j \in R_{o \max}^n} z_j^{(n \rightarrow v)} \lambda_j^n = \sum_{j \in R_{o \max}^n} z_j^{(n \rightarrow v)} \lambda_j^v = z_o^{(n \rightarrow v)}; \\
 & s^{n-} \geq 0, s^{n+} \geq 0, \lambda_j^n \geq 0, \\
 & \sum_{n=1}^N w^n = 1, \sum_{j=1}^m \lambda_j^n = 1, \lambda_j^n \geq 0, \forall j, n \quad (9)
 \end{aligned}$$

进行子过程 v 局部 SBM 无效单元的二次评价。

在具体求解过程中, 可将模型转化为线性规划问题^[14], 转化方法参见文献 [14]。

Step 5 文献 [12] 的研究表明, 生产系统整体最大有效面集可能不唯一, 其对应 $\forall v (v \in \{1, 2, \dots, N\})$ 的最大有效面集也不唯一。在这种情况下, 本文取整体 SBM 无效单元的效率值

$$\theta_o''' = \max \theta_o'' \quad (10)$$

3 应用研究

本文采用 10 家电力公司作为案例来检验改进模型的有效性。该生产系统共有 3 个阶段, 每个子过程都有一个投入变量, 子过程 2 和子过程 3 分别有一个产出变量, 子过程 1 与子过程 2 之间存在一个中间产品, 子过程 2 与子过程 3 之间存在一个中间产品, 具体原始数据如表 1 所示 (部分数据来源于文献 [13])。

表 1 各电力公司原始数据

生产单元	子过程 1		子过程 2		子过程 3		中间产品	
	投入 1	投入 2	产出 2	投入 3	产出 3	(1,2)	(2,3)	
A	0.838	0.277	0.879	0.962	0.337	0.894	0.362	
B	1.233	0.132	0.538	0.443	0.180	0.678	0.188	
C	0.321	0.045	0.911	0.482	0.198	0.836	0.207	
D	1.483	0.111	0.570	0.467	0.491	0.869	0.516	
E	1.592	0.208	1.086	1.073	0.372	0.693	0.407	
F	0.790	0.139	0.722	0.545	0.253	0.966	0.269	
G	0.451	0.075	0.509	0.366	0.241	0.647	0.257	
H	0.408	0.074	0.619	0.229	0.097	0.756	0.103	
I	1.864	0.061	1.023	0.691	0.380	1.191	0.402	
J	1.222	0.149	0.769	0.337	0.178	0.792	0.187	

由于 3 个子过程的投入变量都是人力资本, 本文分别取生产单元中该过程的月平均工资作为其价值; 子过程 2、子过程 3 的产出分别是各个电力公司卖给公司大客户和小客户的电能, 分别取其单位价格为其价值; 各种中间产品都是本公司生产的, 并且在本公司运转过程中消耗电能, 因此, 中间产品的价值也分别取产出 2 和产出 3 的单位价格。进而, 可以确定各生产单元 3 个子过程的权重如表 2 中第 4、6、8 列所示。在子过程权重确定的基础上, 采用网络 SBM 模型测算各生产单元的整体效率和子过程效率值如表 2 所示。

由 Step 3 可以得到子过程 1 共有 3 个最大有效面集, 分别为 $\{C1, F1\}$ 、 $\{C1, G1\}$ 和 $\{F1, I1\}$; 子过程 2 共

表 2 网络 SBM 模型对各电力公司效率的评价值

生产单元	整体效率	子过程 1		子过程 2		子过程 3	
		效率	权重	效率	权重	效率	权重
A	0.4592	0.6328	0.3602	0.3392	0.3186	0.3851	0.3212
B	0.6529	0.3485	0.5327	1.0000	0.2684	1.0000	0.1989
C	0.9718	1.0000	0.3668	1.0000	0.2859	0.9188	0.3473
D	0.6434	0.2967	0.5071	1.0000	0.2548	1.0000	0.2381
E	0.5279	0.2634	0.3946	1.0000	0.3240	0.3621	0.2814
F	0.6796	1.0000	0.4634	0.3194	0.2749	0.5902	0.2617
G	0.9570	1.0000	0.4228	1.0000	0.2771	0.8578	0.3001
H	0.9598	0.9216	0.5126	1.0000	0.2829	1.0000	0.2045
I	0.9082	1.0000	0.5321	1.0000	0.2517	0.5773	0.2162
J	0.4261	0.2875	0.5455	0.3681	0.2925	1.0000	0.1620

有 5 个最大有效面集, 分别为 $\{B2, E2, G2, H2\}$ 、 $\{C2, D2, E2, G2\}$ 、 $\{C2, D2, E2, I2\}$ 、 $\{C2, H2, I2\}$ 和 $\{C2, E2, G2, H2\}$; 子过程 3 共有 3 个最大有效面集, 分别为 $\{B3, D3, J3\}$ 、 $\{B3, H3, J3\}$ 和 $\{D3, H3, J3\}$ 。从而构成的整体最大有效面集共有 45 个, 分别由 3 个子过程的最大有效面集组合而成, 本文不再赘述。

根据 Step 4 和 Step 5 对子过程局部 SBM 无效生产单元的效率进行二次评价, 评价结果见表 3。

表 3 各电力公司效率的二次评价值

生产单元	整体		子过程 1		子过程 2		子过程 3	
	效率	排名	效率	权重	效率	权重	效率	权重
A	0.4756	9	0.6328	0.3602	0.3787	0.3186	0.4130	0.3212
B	0.6529	6	0.3485	0.5327	1.0000	0.2684	1.0000	0.1989
C	0.9729	2	1.0000	0.3668	1.0000	0.2859	0.9219	0.3473
D	0.6434	7	0.2967	0.5071	1.0000	0.2548	1.0000	0.2381
E	0.5329	8	0.2634	0.3946	1.0000	0.3240	0.3795	0.2814
F	0.6992	5	1.0000	0.4634	0.3194	0.2749	0.6698	0.2617
G	0.9944	1	1.0000	0.4228	1.0000	0.2771	0.9817	0.3001
H	0.9598	3	0.9216	0.5126	1.0000	0.2829	1.0000	0.2045
I	0.9145	4	1.0000	0.5321	1.0000	0.2517	0.6066	0.2162
J	0.4511	10	0.2875	0.5455	0.4524	0.2925	1.0000	0.1620

对比表 2 和表 3 的评价结果, 无论是整体效率还是子过程效率, 基于最大有效面集的网络 SBM 模型的二次评价结果均大于等于原模型的评价结果, 主要原因在于二次评价选择了 SBM 无效单元改进为有效单元的最短路径。为了更加直观地反映最大有效面集网络 SBM 模型的优势, 本文将其与传统 NSBM 模型评价的投入产出松弛量作对比, 见表 4。表 4 直观地反映了被评价单元投入产出无效率的主要来源, 通过对比传统 NSBM 模型与 MFS-NSBM 模型的投入产出松弛量, 能获得被评价单元 3 个子过程改进为有效单元的路径。在 MFS-NSBM 模型与传统 NSBM 模型的评价中, 以 F 为例, 子过程 1 与子过程 2 的投入产出松弛矩阵相同, 但其子过程 3 的投入产出松弛矩阵为 $(0.2203, 0.0024)^T$ 和 $(0.1757, 0.0021)^T$ 。可见, 在 MFS-NSBM 模型下生产单元 F 子过程 3 改进为有效需要减少的投入量和提升的产出量均减小, 即 MFS-NSBM 模型优化了 SBM 无效单元改进为有效单元的路径。

表 4 两类网络 SBM 模型投入、产出松弛对比

生产 单元	传统 NSBM 模型投入、产出松弛					MFS-NSBM 模型投入、产出松弛				
	投入1	投入2	投入3	产出2	产出3	投入1	投入2	投入3	产出2	产出3
A	0.3078	0.1830	0.5837	0.0000	0.0071	0.3078	0.1721	0.4550	0.0000	0.0931
B	0.8033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C	0.0000	0.0000	0.0391	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0376	0.0000	0.0000
D	1.0429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	1.1726	0.0000	0.6688	0.0000	0.0150	1.1726	0.0000	0.6485	0.0000	0.0158
F	0.0000	0.0830	0.2203	0.1882	0.0024	0.0000	0.0830	0.1757	0.1882	0.0021
G	0.0000	0.0000	0.0483	0.0000	0.0029	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000	0.0068
H	0.0320	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0320	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
I	0.0000	0.0000	0.2897	0.0000	0.0022	0.0000	0.0000	0.2690	0.0000	0.0026
J	0.8707	0.0929	0.0000	0.0176	0.0000	0.8707	0.0745	0.0000	0.0134	0.0000

因此, 根据最大有效面集网络 SBM 模型的评价结果(见表 3), 10 家电力公司的优劣排名为 G、C、H、I、F、B、D、E、A、J, 其中效率最高的是 G。

4 结 论

本文提出了基于最大有效面集的网络 SBM 评价方法, 该方法改进了大多数传统 DEA 方法(包括 SBM 模型)仅以生产可能凸集的顶点作为参考集的缺陷, 能够发现 SBM 无效生产单元改进为 SBM 有效生产单元的最短路径, 更加符合生产系统效率提升的实际目标。其次, 在生产系统子过程权重的设定中充分考虑了各类投入、产出和中间产品在子过程中的价值分布, 三者的价值分布共同决定了子过程的权重。本文为多阶段关联复杂生产系统的效率评价提供了一个新的视角, 但是子过程的权重是否应当由模型内生化的尚待进一步讨论。

参考文献(References)

- [1] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European J of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [2] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European J of Operational Research*, 2002, 143(1): 32-41.
- [3] Erkut Dzakın, Hatice Duzakın. Measuring the performance of manufacturing firms with super slacks based model of data envelopment analysis: An application of 500 major industrial enterprises in Turkey[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 182(3): 1412-1432.
- [4] Zhou P, Ang B W, Poh K L. Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(1): 111-118.
- [5] Sebastian Lozano, Ester Gutierrez. Slacks-based measure of efficiency of airports with airplanes delays as undesirable outputs[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(1): 131-139.
- [6] Li L B, Hu J L. Ecological total-factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2012, 46(4): 216-224.
- [7] Cook W D, Zhu J, Bi G, et al. Network DEA: Additive efficiency decomposition[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 207(2): 1122-1129.
- [8] Fukuyama H, Weber W L. A slacks-based inefficiency measure for a two-stage system with bad outputs[J]. *Omega*, 2010, 38(5): 398-409.
- [9] Chen Y, Liang L, Yang F, et al. Evaluation of information technology investment: A data envelopment analysis approach[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(5): 1368-1379.
- [10] Tsutsui M, Goto M. A multi-division efficiency evaluation of US electric power companies using a weighted slacks-based measure[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2009, 43(3): 201-208.
- [11] Zhou Y, Liang D P, Xing X P. Environmental efficiency of industrial sectors in China: An improved weighted SBM model[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2013, 58(9): 990-999.
- [12] Kaoru Tone. Variations on the theme of slacks-based measure of efficiency in DEA[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 200(3): 901-907.
- [13] Tone K, Tsutsui M. Network DEA: A slacks-based measure approach[J]. *European J of Operational Research*, 2009, 197(1): 243-252.
- [14] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European J of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.

(责任编辑: 孙艺红)