

几种技术效率测量方法的比较研究

韩 松¹, 王 稳²

(1. 中国人民大学 运筹学与数量经济研究所, 北京 100872;

2. 对外经济贸易大学 金融学院, 北京 100029)

摘要:本文是对经验技术效率测量方法的综合研究。效率分析,是经济学研究的核心内容之一。技术效率测量,是经济学实证分析的重要组成部分。进行技术效率的经验研究,必须基于某种适当的技术效率测量方法。本文以 Koopmans 给出的技术效率的定义为基础,对技术及技术效率进行模型化描述,研究了距离函数、Farrell 测量及效率测量应满足的性质,比较了四种常用效率测量方法。并详细讨论了技术效率测量的非参数方法 - DEA 方法,说明 DEA 有效的生产单位为真正的技术有效,该方法具有其它方法不可比拟的优势。

关键词:技术效率;生产可能集;生产前沿面;数据包络分析(DEA 方法)

中图分类号:F062.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-9753(2004)04-0147-05

Comparative Study on Alternative Approaches to the Measurement of Technical Efficiency

HAN Song¹, WANG Wen²

(1. The Institute of Operational Research and Mathematical Economics, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. School of Finance, The University of International Business Economics, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper is a summary research of alternative approaches to the empirical measurement of technical efficiency. Efficiency analysis is one of the core topics in Economics. Measuring technical efficiency is an important part in economic empirical research. If the notion of technical efficiency is to have empirical content, it must be based on proper measurement approach. It is the purpose of this paper. Based on the definition of technical efficiency by Koopmans, we describe technique and technical efficiency by model, study the distance function, Farrell measurement and the properties of measurement of technical efficiency. Then we compare four approaches to the measurement of technical efficiency. We specially study the nonparametric approach of measuring technical efficiency and show that DEA efficiency is the true technical efficiency. So DEA approach has particular advantage compared with other approaches.

Key words: technical efficiency; productive set; productive frontier; Data Envelopment Analysis

一、引言

微观经济理论中,用生产可能集和生产前沿面描述厂商的技术情况^①。生产可能集描述在当前的技术水平下,所有可行的投入产出向量的集合。生产前沿面描述在当前技术水平下有效率的投入产出向量,即给定投入和其他产出不变时一种产出的最大值,或给定产出和其他投入不变时一种投入的最小值,即技术有效的投入产出向量集合^②。生产单位的实际产出接近其最大值的程度称为该生产单位的技术效率。技术有效的生产单位一定位于生产前沿面上,位于生产前沿面下方的生产单位一定是技术无效的。技术效率的经验研究,即测量生产单位的实际技术效率,从而研究造成生产单位技术有效或无效的原因,对于企业的经济分析和管理研究是非常重要的。进行技

术效率的经验研究,一定要基于某种适当的技术效率测量方法。目前广泛使用的技术效率测量方法有两大类:参数方法(统计方法)和非参数方法(数学规划方法)。本文是对技术效率测量方法的综合研究,即通过研究四种常用的测量方法,比较它们在构造生产前沿面、计算生产单位的效率、解释与前沿面的偏差等方面的异同。特别研究了技术效率测量的非参数方法——数据包络分析(Data Envelopment Analysis,简称 DEA)在这方面的优势与不足。

关于技术有效性的研究,开始于 Koopmans (1951)^[1], Debreu (1951)^[2], 和 Shephard (1953)^[3-4]。Koopmans 给出了技术效率的定义:一个可行的投入产出向量称为是技术有效的,如果在不减少其他产出(或增加其他投入)的情况下,技术上不可

收稿日期:2003-12-01

作者简介:韩松(1973-),女,辽宁沈阳人,中国人民大学运筹学与数量经济研究所,博士。

能增加任何产出(或减少任何投入)。技术有效的所有投入产出向量的集合构成生产前沿面。Debreu 和 Shephard 给出了描述多投入 - 多产出生产技术的模型化方法,即用距离函数测量生产单位与生产前沿面的距离,沿着产出增大方向(Debreu 产出有效)或投入减少方向(Shephard 投入有效)。

Farrell(1957)^[5]首次进行了经验技术效率测量。他是在产出不变的前提下,度量所有投入能够减少的最大值。其计算简单,是广泛使用的技术效率测量方法。但是正如 Fare 和 Lovell(1978)^[6]指出的,当生产单位达到 Farrell 有效时,仍然可能存在非零的松弛变量,从而并未达到 Koopmans 定义的技术有效。Fare 和 Lovell 对这一问题进行了深入研究,给出了技术效率测量应满足的性质,并给出了满足这些性质的 Russell 测量方法。

1970 年代后期,随着 DEA 方法的发展,技术效率测量重新被重视起来。DEA 方法是基于 Farrell 测量的数学规划方法,由 Charnes 等人(1978)^[7]提出,Banker 等(1984)^[8]和 Fare(1985,1994)加以推广。它是将 Koopmans, Debreu 和 Shephard 关于技术效率的理论研究推广到对生产单位的直接效率测量。DEA 方法应用观测数据(即生产单位的投入产出向量),包络出确定的实际最佳生产前沿面,并可得到每个生产单位的效率指数(即与生产前沿面的距离),是管理科学和经济分析中广泛使用的非参数效率测量方法。本文将系统地研究技术及技术效率的模型化方法,并讨论技术效率测量的非参数方法,给出实际的应用案例。

二、技术及技术效率的含义

设生产过程用 m 个投入 $x = (x_1, K, x_m) \in \mathbb{R}_+^m$ 生产 s 个产出 $y = (y_1, K, y_s) \in \mathbb{R}_+^s$ 。我们用生产可能集、投入可能集、产出可能集描述生产技术水平。生产可能集 T 代表所有技术上可行的投入产出向量的集合, $T = \{(x, y) | x \text{ 可以产出 } y\}$ 。投入可能集 $L(y)$ 代表可以生产出产量 y 的所有投入向量的集合, $L(y) = \{x | (x, y) \in T\}$ 。产出可能集 $P(x)$ 代表可以由投入 x 生产出来的所有产出向量的集合, $P(x) = \{y | (x, y) \in T\}$ 。

生产可能集 T 满足下列性质:

- (i) $(x, 0) \in T, (0, y) \in T \Rightarrow y = 0$;
- (ii) T 是闭集;
- (iii) T 在 $x \in \mathbb{R}_+^m$ 上有界;

$$(iv) (x, y) \in T \Rightarrow (x', y') \in T, \forall x' \geq x, y' \leq y;$$

(v) T 是凸集。

性质(i)说明没有免费的午餐,即没有投入就没有产出;性质(ii)说明生产可能集 T 中存在技术有效的投入产出向量,即具有生产前沿面;性质(iii)说明有限的投入不能生产无限的产出;性质(iv)是单调性,也称作自由处置性质;性质(v)不是必须的,如果生产过程是规模收益非增的,那么生产可能集 T 是凸集。相应地,可以得到集合 $L(y)$ 和 $P(x)$ 的各项性质。

由技术效率的定义(Koopmans),可知技术有效的生产单位一定在生产可能集的边界上,但是,生产可能集边界上的点不一定是技术有效的。本文讨论投入有效和投入方向的效率测量,定义投入可能集的边界和有效点集合。关于产出有效和产出方向的效率测量,可类似进行讨论。

定义 1:投入可能集 $L(y)$ 的边界,即等产量集合,记作 $L_1(y)$,

$$L_1(y) = \{x | x \in L(y), \lambda x \notin L(y), \lambda \in (0, 1)\}.$$

定义 2:投入可能集的有效点集合,即生产前沿面,记作 $L_E(y)$,

$$L_E(y) = \{x | x \in L(y), x' \notin L(y), x' \leq x\}$$

显然有 $L_E(y) \subseteq L_1(y)$,但是反之不对。我们称投入向量 x 在产出 y 上是技术有效的,当且仅当 $x \in L_E(y)$ 。进行经验的技术效率测量,就是对于生产单位的实际投入产出向量 (x^0, y^0) ,计算出实际投入 x^0 与产出 y^0 的投入有效面 $L_E(y^0)$ 的相差程度,了解该单位的技术效率,进行经济管理分析,解释造成生产单位技术有效或无效的原因。

三、技术效率测量方法的理论前提和基础

Shephard 定义了投入可能集的距离函数 $g(x, y)$,

$$g(x, y) = \frac{1}{h(x, y)}, \text{ 其中 } h(x, y) = \min\{\lambda | \lambda x \in L(y), \lambda \geq 0\}.$$

距离函数 $g(x, y)$ 充分描述了生产技术,特别的有:

$$L(y) = \{x | g(x, y) \geq 1\}$$

$$L_1(y) = \{x | g(x, y) = 1\}$$

$$L_E(y) = \{x | g(x, y) = 1, g(x', y) < 1, \forall x' \leq x\}$$

Farrell(1957)给出了第一个方便的技术效率测量方法,其对投入有效性的测量为,测量给定产出下所有投入能够减少的最大比例。即对投入向量 $x \in L(y)$, Farrell 的技术效率测量为

$$F(x, y) = \min\{\lambda | \lambda x \in L(y), \lambda \geq 0\}$$

上式表明, $F(x, y)$ 是技术效率的比例测量, 它给出了保持产量 y 投入 x 可以缩小的最大比例。显然, Farrell 测量是距离函数的反函数, 有 $F(x, y) \in (0, 1], \forall y > 0$, 并且有 $\{x | F(x, y) = 1\} = L_1(y)$ 。所以, 生产单位 (x, y) 为 Farrell 有效, 当且仅当 $x \in L_1(y)$ 。而 $x \in L_E(y)$ 可以得到 $F(x, y) = 1$, 但是反之不对。

因此, Farrell 测量具有以下特点: (i) 因为 $F(x, y)$ 是距离函数的反函数, 所以 $F(x, y)$ 与投入可能集 $L(y)$ 之间存在对偶关系, 即 $L(y) = \{x | 0 < F(x, y) \leq 1\}$, $F(x, y)$ 完全可以代表 $L(y)$ 的技术水平; (ii) Farrell 测量易于计算; (iii) Farrell 测量是一种比例测量方法。但是, Farrell 测量的最大缺点在于, 它是基于等产量集合 $L_1(y)$ 的效率测量, 所以 Farrell 测量有效的生产单位不一定是真正的技术有效 (Koopmans)。原因是 Farrell 测量使得所有投入同比例缩小, 这使得达到 Farrell 有效时, 可能存在非零的松弛变量, 从而没有达到真正的技术有效。

Farrell 测量的这一困难可通过技术效率的非比例测量来解决。Fare 和 Lovell (1978) 给出了测量真正技术效率的非比例测量方法 Russell 测量, 并讨论了效率测量应满足的性质。设 $E(x, y)$ 是关于 $x \in L(y)$ 的效率测量, 则 $E(x, y)$ 满足下列性质:

E1. $x \in L(y), E(x, y) = 1 \Leftrightarrow x \in L_E(y)$;

E2. 如果 $x \in L(y), x \notin L_E(y)$, 则 $E(x, y)$ 一定将 x 与某一有效点 $x^* \in L_E(y)$ 比较;

E3. 如果 $x \in L(y), \lambda x \in L(y)$, 则 $E(\lambda x, y) = \frac{1}{\lambda} E(x, y), \forall \lambda > 0$;

E4. 如果 $x \in L(y), x' \geq x$, 则 $E(x, y) > E(x', y)$ 。

这些性质保证 $x \in L(y), E(x, y) \leq 1; \forall x \in L_E(y), E(x, y) = 1$, 并且效率测量随着投入 x 的增加是单调递减的。

容易验证, Farrell 测量 $F(x, y)$ 只满足性质 E3。 $F(x, y) = 1$ 当且仅当 x 在投入可能集的等产量集上, 即 $x \in L_1(y)$, 得不到 x 是有效点, E1 不满足。 $F(x, y)$ 是将 x 与某些边界点 x^* 进行比较得到的测量值, E2 不满足。由于 $F(x, y)$ 测量的是边界点, 所以性质 E4 也不成立。

四、几种常用的技术效率测量方法的比较

(一) 数学规划方法

该方法利用一系列的线性规划构造生产前沿面 (转换前沿面), 计算生产单位的效率指数。最早由 Farrell (1957) 提出, 后由 Charnes, Cooper 等人

进一步发展, 即“数据包络分析”方法。

设有 n 个生产单位的投入产出数据 (样本数据), $(X_j, Y_j), j = 1, K, n$, 其中 $X_j = (x_{1j}, K, x_{mj})^T > 0$ 代表具有 m 个投入要素的投入向量, $Y_j = (y_{1j}, K, y_{sj})^T > 0$ 代表具有 s 个产出的产出向量。首先, 构造投入可能集为,

$$L(y) = \{x | \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \leq x, \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j = y, \lambda_j \geq 0, j = 1, K, n\} \quad (4.1)$$

然后, 计算每个生产单位的 Farrell 技术效率, 通过求解下面规划问题

$$F(x_j, y_j) = \min \{\lambda | \lambda x_j \in L(y_j), \lambda \geq 0\}. \quad (4.2)$$

这里由 (4.1) 式构造的投入可能集 $L(y)$ 是非参数的, 因为在 $L(y)$ 的构造中不涉及参数计算。样本数据由一系列凸的分段线性的曲面“包络”起来。并且由样本数据构造的投入可能集 $L(y)$ 是满足生产可能集性质的最小集合, 集合越小, 效率测量的精度越高。这是该方法的重大优势。该方法的不足在于: (i) 该方法是基于 Farrell 测量的数学规划方法, 因此得不到真正的技术效率测量; (ii) 该方法的最大问题是, 通过样本数据得到的是确定性的前沿面, 这使得所有对前沿面的偏离都解释为技术的无效性, 而忽略了外部随机项、数据噪声、测量误差等因素的影响。

(二) 修正的数学规划方法

该方法也是利用一系列线性规划构造生产前沿面, 计算效率指数。与数学规划方法唯一的区别在于, 修正的数学规划方法构造的前沿面是参数的。该方法最早由 Farrell (1957) 提出, 后由 Aigner and Chu (1968), Forsund and Jansen (1977), Forsund and Hjalmarsson (1979) 等进一步发展。

首先, 假设存在已知的生产函数 $f(x)$, 相对于这个生产函数的投入可能集为:

$$L(y) = \{x | y \leq f(x)\} \quad (4.3)$$

生产函数 f 为给定形式的生产函数, 如 Cobb-Douglas 形式的, 也就是:

$$L(y) = \{x | y \leq A \prod_{i=1}^m x_i^{a_i}, A > 0, a_i > 0, i = 1, K, m\} \quad (4.4)$$

然后, 通过求解线性规划计算函数中的参数, 即:

$$\begin{cases} \min \sum_{j=1}^n [1nA + \sum_{i=1}^m a_i 1nx_{ij} - 1ny_j] \\ \text{s. t. } 1nA + \sum_{i=1}^m a_i 1nx_{ij} - 1ny_j \geq 0, j = 1, K, n \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\ln \varepsilon_j = \ln A + \sum_{i=1}^m a_i \ln x_{ij} - \ln y_j \quad (4.6)$$

$$\text{则效率指数为 } F(x_j, y_j) \quad (4.7)$$

修正的数学规划方法有两个不足限制了它的发展: (i) 与数学规划方法一样, 它是完全确定性的; (ii) 该方法不能处理多输出的生产过程。

(三) 确定的统计前沿面方法

与前面两种方法不同, 该方法利用统计方法估计生产前沿面, 计算效率指数。最早由 Afriat (1972) 提出, 后由 Richmond (1974) 和 Greene (1980) 进一步发展。

首先, 与修正的数学规划方法一样, 建立含有参数的投入可能集

$$L(y) = \{x | y \leq A \prod_{i=1}^m x_i^{a_i}, A > 0, a_i > 0, i = 1, K, m\} \quad (4.8)$$

然后, 将 (4.8) 式中的不等式表示为等式

$$y = A \prod_{i=1}^m x_i^{a_i} \exp\{\varepsilon\} \quad (4.9)$$

其中 $\varepsilon \leq 0$ 服从已知的单边分布, 代表相对于确定生产前沿面 f 的技术无效性。与前面两种规划方法一样, 样本数据由确定的前沿面包络起来。与修正的规划方法一样, 确定的前沿面是参数形式的。与前面两种规划方法不同的是, 确定的前沿面是估计出来的, 而不是计算得到的。最后, 估计参数和 ε 的密度函数 $f(\varepsilon)$, 常用的估计方法如最小二乘法或极大似然估计。

该方法具有与修正的规划方法相同的缺点。与前面两种规划方法不同的是, 这里确定的前沿面是通过统计方法估计出来的, 而不是通过求解线性规划计算出来的。由于统计原因, 需要大规模的样本, 这也是该方法潜在的缺点。

(四) 随机前沿面方法

如同确定的统计前沿面方法, 随机前沿面方法利用统计方法估计生产前沿面, 估计相对于估计前沿面的效率指数。不同的是, 该方法允许前沿面是随机的。

首先, 建立投入可能集

$$L(Y) = \{x | y \leq A \prod_{i=1}^m x_i^{a_i} \exp\{\varepsilon_1\}, A > 0, a_i > 0, i = 1, K, m\} \quad (4.10)$$

这里, ε_1 服从双边分布, 允许观测值中的随机变量, 如噪声的影响, 测量误差, 生产单位无法控制的外生干扰等。因此, 生产前沿面是随机的。然后, 将 (4.10) 中的不等式变为等式

$$y = A \prod_{i=1}^m x_i^{a_i} \exp\{\varepsilon_1 + \varepsilon_2\} \quad (4.11)$$

这里 $\varepsilon_2 \leq 0$ 服从单边分布, 代表相对于随机前沿面的技术无效性。与前面三种方法相比, 该方法的数据由随机前沿面包络起来。与前沿面的偏差是由于两个原因造成的: 观测值中的随机变量 ε_1 和技术的无效性 ε_2 。显然, 确定的统计前沿面模型是随机前沿面方法的一种特殊情况, 这里 $\varepsilon_1 = 0$ 。最后, 估计参数 $f_1(\varepsilon_1)$ 、 $f_2(\varepsilon_2)$ 。估计的 Farrell 测量是 $F(x_j, y_j)$, 其样本均值为 $E(e^{\varepsilon_2})$, 它通常近似于 $1 + E(\varepsilon_2)$ 。

随机前沿面方法有以下不足: (i) 因为采取统计方法, 需要大规模样本; (ii) 是参数方法, 需要已知生产函数形式; (iii) 处理多输出生产过程存在困难。但与前面三种方法相比, 该方法最大的优势在于, 它估计的前沿面是随机的, 包含了噪声、测量误差和外生干扰。这是前三种方法都不具有的。

五、真正有效的非参数的技术效率测量方法

下面我们详细讨论经验技术效率测量的非参数方法——DEA 方法, 该方法得到的 DEA 有效即为真正的技术有效 (Koopmans)。经验技术效率测量, 是通过实际生产单位的投入产出数据 (样本数据), 构造经验生产可能集, 估计经验生产前沿面, 从而给出生产单位的效率测量。这里讨论的 DEA 方法, 是数学规划方法的一种。该方法测量的 DEA 有效的生产单位 (也称为决策单元) 一定在生产前沿面上, 即为技术有效。该方法得到的生产单位的效率测量, 代表生产单位与生产前沿面的距离, 满足效率测量应满足的性质 $E1 - E4$ 。

设有 n 个生产单位的投入产出数据 (样本数据), (X_j, Y_j) , $j = 1, K, n$, 其中 $X_j = (x_{1j}, K, x_{mj})^T > 0$ 代表具有 m 个投入要素的投入向量, $Y_j = (y_{1j}, K, y_{sj})^T > 0$ 代表具有 s 个产出的产出向量。根据前面给出的生产可能集的性质, 我们构造的经验生产可能集 T 满足下面公理性假设:

1. 凸性。如果 $(X_j, Y_j) \in T, j = 1, K, n, \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0$ 则

$$(\sum_{j=1}^n \lambda_j X_j, \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j) \in T;$$

2. 无效性 (自由处置性质)。如果 $(x, y) \in T, x' \geq x, y' \leq y$, 则 $(x', y') \in T$;

3. 锥性 (规模收益不变)。如果 $(x, y) \in T, k >$

0, 则 $(kx, yx) \in T$;

4. 最小性。经验生产可能集 T 是满足 1 - 3 的所有集合的交集。

满足上述 4 个条件的生产可能集 T 是唯一确定的,

$$T = \{x, y\} \mid \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \leq x, \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j \geq y, \lambda_j \geq 0, j = 1, K, n\}。$$

对于生产单位 $(x_0, y_0) \in T$, 投入方向的效率测量可通过下面线性规划模型计算,

$$(D) \begin{cases} \min h = h(x_0, y_0) \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \leq h x_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j \geq y_0 \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, K, n \end{cases}$$

其对偶问题为

$$(P) \begin{cases} \max \mu^T y_0 \\ \text{s. t. } \bar{\omega}^T X_j - \mu^T y_j \geq 0, j = 1, K, n \\ \bar{\omega}^T x_0 = 1 \\ \bar{\omega} \geq 0, \mu \geq 0 \end{cases}$$

这正好是 DEA 的 CCR 输入模型。线性规划问题 (D) 的最优值 $h(x_0, y_0)$ 即为生产单位 (x_0, y_0) 的效率测量。下面给出生产单位 (x_0, y_0) 为 DEA 有效和弱 DEA 有效的定义。

定义 3: 如果 (P) 的最优值 $\mu^{0T} y_0 = 1$, 则称生产单位 (x_0, y_0) 为弱 DEA 有效。

定义 4: 如果 (P) 的最优值 $\mu^{0T} y_0 = 1$, 且存在最优解 $\bar{\omega}^0 > 0, \mu^0 > 0$, 则称生产单位 (x_0, y_0) 为 DEA 有效。

由线性规划对偶定理, (P) 和 (D) 的最优值相等, 若 (x_0, y_0) 为弱 DEA 有效, 则效率测量 $h(x_0, y_0) = 1$; 若 (x_0, y_0) 为 DEA 有效, 则效率测量 $h(x_0, y_0) = 1$, 且 (D) 的所有最优解对应的松弛变量均为 0。所以, 有以下结论:

结论 1: (x_0, y_0) 为弱 DEA 有效, 当且仅当 $x_0 \in L_1(y_0)$ 。

结论 2: (x_0, y_0) 为 DEA 有效, 当且仅当 $x_0 \in L_E(y_0)$ 。

因此, DEA 方法进行技术效率测量, 得到的 DEA 有效的生产单位为真正的技术有效, 符合 Koopmans 的定义, 且效率测量 $h(x_0, y_0)$ 满足性质

E1 — E4。

六、结论

生产技术效率测量是经济学实证分析的一个重要内容, 它帮助分析者通过经济数据揭示经济学理论。本文对技术及技术效率测量进行了模型化描述, 详细讨论了四种常用的技术效率测量方法, 并论述了技术效率测量的非参数方法。这几种方法在以下几个方面有所不同: (i) 确定相对有效前沿面的方法 (参数的或非参数的); (ii) 构造前沿面的方法 (通过线性规划或统计方法); (iii) 解释与前沿面的偏差 (无效性或无效与噪声的综合影响)。虽然每一种方法都有其自身的优势和不足, 但只有技术效率测量的非参数方法能够方便地处理多输出生产过程, 计算简单, 不需大规模样本数据, 且 DEA 有效的生产单位为真正的技术有效。我们认为这是其它方法不可比拟的。

参考文献:

- [1] Koopmans, T. C. An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities[J]. In: T. C. Koopmans (Ed.), Activity Analysis of Production and Allocation, Cowles Commission for Research in Economics. Monograph No. 13, Wiley, New York, 1951.
- [2] Debreu, G. The coefficient of resource utilization[J]. Econometrica 1951, 19: 273 - 292.
- [3] Shephard, R. W. Cost and Production Functions[M]. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1953.
- [4] Shephard, R. W. The Theory of cost and Production Functions[M]. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1970.
- [5] Farrell, M. J. The Measurement of Productive Efficiency[J]. Journal of the Royal Statistic Society, 1957, Ser. A 120. 253 - 281.
- [6] Fare, R., Lovell, C. A. K. Measuring the Technical Efficiency of Production[J]. Journal of Economic Theory, 1978, 19: 150 - 162.
- [7] Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2: 429 - 444.
- [8] Banker, R., Charnes, A., Cooper, W. W. Some Models for Estimating Technical And Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis[J]. Management Science, 1984, 30: 1078 - 1092.
- [9] H. R., Varian, 1984. The Nonparametric Approach to Production Analysis[J]. Management Science, 1984, 52: 579 - 597.
- [10] S. C. Kumbhakar, Lovell, C. A. K. Stochastic Frontier Analysis[M]. Cambridge University Press, 2000.

(本文责编: 海洋)