

文章编号:1000-6788(2006)01-0091-06

# 基于定向技术距离函数的投入产出型 Malmquist 指数

李光金, 张建辉, 李发勇

(四川大学 工商管理学院, 四川 成都 610064)

**摘要:** 指出了传统 Malmquist 指数所存在的两个局限并对其进行了修正. 修正后的 Malmquist 指数不仅考虑以非径向的定向技术距离函数取代径向的投入/产出距离函数, 而且考虑了规模收益, 从而使得 Malmquist 指数测量更准确, 同时还测度了影响生产力进步的两个因素: 技术进步和技术效率.

**关键词:** Malmquist 指数; 定向技术距离函数; 规模收益

**中图分类号:** F223

**文献标识码:** A

## Input-and-Output Oriented Malmquist Index Based on Directional Technology Distance Function

LI Guang-jin, ZHANG Jian-hui, LI Fa-yong

(School of Management, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** The paper indicates two limitations of traditional Malmquist index, and modifies the definition and measures of Malmquist index. The modified Malmquist index not only uses nonradial directional technology distance function instead of radial output or input distance function but also takes scale returns into consideration, so measures of Malmquist index are more accurate. Also it presents the measures of two factors: technical change and technical efficiency change which have effect on productivity growth.

**Key words:** Malmquist index; directional technology distance function; scale returns

### 1 引言

1953年,瑞典经济学家和统计学家 Sten Malmquist 在 *Trabajos de Estadística* 上发表文章,提出了用于分析消费的定量指数—Malmquist 指数,该指数通过输入距离函数来比较两个或更多的消费群体,以其中一个消费群体的无差异曲线作为参考集.其后 Caves, Christensen 和 Diewert (1982) 将 Malmquist 的思想用于分析生产力增长,提出了 CCD 模型<sup>[1]</sup>,从而极大地丰富了生产力增长的测算方法.随着生产力增长理论研究的发展, Malmquist 指数也不断地变化. BJUREK (1994, 1996) 提出不同于 CCD 模型的 Malmquist 指数<sup>[1]</sup>,该指数表示为 Malmquist 输出数量指数与 Malmquist 输入数量指数的比值,同期 Färe 等 (1994) 提出基于规模收益不变的 (FGNZ) Malmquist 指数<sup>[1]</sup>,考虑到 CCD 模型忽略了规模收益的影响, Grifell 和 Lovell (1995) 提出了 (GL) Malmquist 指数<sup>[1]</sup>, Ray 和 Desli (1997) 又提出了与 FGNZ 方法分解不同的 (RD) Malmquist 指数<sup>[1]</sup>, Grifell 和 Lovell (1999) 通过对 Malmquist 指数改进,使之在指数本身的准确性和因素分解方法的经济解释方面又更进了一步.

值得提出的是,上述的 Malmquist 指数研究都隐含有这样一个前提:首先假定一种规模收益特征,其结果可能会错误估计规模收益对生产力增长的影响,以致会直接影响 Malmquist 指数测算的准确性.

其次,上述 Malmquist 指数都是基于产出或投入的距离函数,仅考虑投入或产出的变化,而两种距离函数下所测算的结果通常又不一致,甚至迥然不同. Chambers, Chung 和 Färe (1996a, b, 1998) 提出定向技术距离函数<sup>[2]</sup>,该函数是 Shephard 径向距离函数<sup>[3]</sup>的推广,可以处理投入与产出同时变化的情况,在传统的径

收稿日期:2004-09-16

资助项目:国家自然科学基金(70371044)

作者简介:李光金(1965-),男,博士,教授,博士生导师;张建辉(1979-),男,硕士研究生;李发勇(1979-),男,硕士研究生.

向型投入/产出距离函数基础之上,提出了非径向的新思路.

本文把规模收益因素考虑到 Malmquist 指数的测算中,同时借鉴投入和产出同时变化的定向技术距离函数的思想,提出一种新的 Malmquist 指数测算方法,该方法修正了 Malmquist 指数,并提出了技术进步和技术效率两个因素的测量方法,并辅以经济解释.

### 2 定向技术距离函数

令  $x \in R^N_x$  为输入向量,  $y \in R^M_y$  为产出向量,则生产可能集定义如下:

$$T = \{ (x, y) : \text{产出 } y \text{ 能用投入 } x \text{ 生产出来} \}$$

假设生产可能集  $T$  满足:

- 1) 闭集.
- 2) 输入/输出可自由处理性,如果  $(x, y) \in T, x \geq x', y \leq y'$  那么  $(x', y) \in T$ .
- 3) 如果  $(x, y) \in T$  且  $x = 0$ ,那么  $y = 0$ .
- 4)  $(0, 0) \in T$  是可行的.
- 5)  $T$  是凸集<sup>[4]</sup>.

Chambers, Chung 和 Färe (1996 a, b, 1998) 提出定向技术距离

函数定义:

$$D(x, y, g_x, g_y) = \max\{ \lambda : (x - \lambda g_x, y + \lambda g_y) \in T \},$$

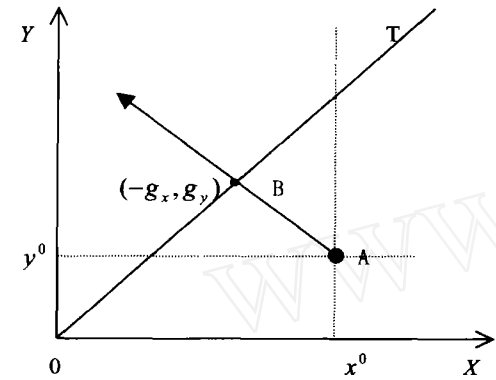


图 1 单投入单产出定向技术距离函数 其中  $(g_x, g_y) \neq 0$  为给定的方向向量,  $\lambda$  是常数.以单投入单产出、规模收益不变情况说明,其经济解释如图 1 所示.

规模收益不变的生产可能集中的某一点  $A$ ,沿方向  $(-g_x, g_y)$  逼近生产前沿面  $T$ ,与前沿面的交点为  $B$ ,显然,定向技术距离函数是表示在给定方向下,被观测点对生产前沿面偏离的测度,偏离越小,离生产前沿面越近,该点的生产率水平越高,则  $B$  点坐标为  $(x^0 - D(x, y, g_x, g_y) g_x, y^0 + D(x, y, g_x, g_y) g_y)$ .

### 3 定向技术距离函数下决策单元的规模收益特征

首先解释 4 个  $N$  维密度变量 的集合:

$$LAM_V = \left\{ \lambda_j : \lambda_j = 1, \lambda_j = 0 \right\}, LAM_{NI} = \left\{ \lambda_j : \lambda_j \leq 1, \lambda_j = 0 \right\},$$

$$LAM_{ND} = \left\{ \lambda_j : \lambda_j \geq 1, \lambda_j = 0 \right\}, LAM_C = \{ \lambda_j : \lambda_j = 0 \},$$

$LAM_V$  中的凸性条件  $\lambda_j = 1$  表示可变的规模收益<sup>[5]</sup>,  $LAM_{NI}$  中  $\lambda_j \leq 1$  和  $LAM_{ND}$  中  $\lambda_j \geq 1$  分别表示非增的规模收益 (nonincreasing returns to scale), 非减的规模收益 (nondecreasing returns to scale)<sup>[5]</sup>,  $LAM_C$  表示规模收益不变 (constant returns to scale) 的情况<sup>[5]</sup>. 考虑有决策单元集  $\{ (X_j, Y_j) : j = 1, 2, \dots, N \}$ , 输入向量  $X_m \times N$ , 产出向量  $Y_s \times N$ , 假设输入向量和产出向量为非负, 定义不同规模收益下的定向技术距离函数:

定义 1 规模收益不变条件下的定向技术距离函数可表示为:

$$\vec{D}_C(x, y, g_x, g_y) = \max\{ \lambda : X \leq x - \lambda g_x, Y \geq y + \lambda g_y, LAM_C \};$$

规模收益递减条件下的定向技术距离函数可表示为:

$$\vec{D}_{NI}(x, y, g_x, g_y) = \max\{ \lambda : X \leq x - \lambda g_x, Y \geq y + \lambda g_y, LAM_{NI} \};$$

规模收益递增条件下的定向技术距离函数为:

$$\vec{D}_{ND}(x, y, g_x, g_y) = \max\{ \lambda : X \leq x - \lambda g_x, Y \geq y + \lambda g_y, LAM_{ND} \}.$$

根据 Hirofumi Fukuyama (2003) 提出的在定向技术距离函数下判断规模收益的准则:

定义 2 对于任意决策单元  $(X_j, Y_j)$  :<sup>[5]</sup>

- 1) 如果  $\vec{D}_{NI}(x, y, g_x, g_y) < \vec{D}_{ND}(x, y, g_x, g_y)$ , 则该决策单元是规模收益递减的 (DRS).

- 2) 如果  $\vec{D}_{NI}(x, y, g_x, g_y) > \vec{D}_{ND}(x, y, g_x, g_y)$ , 则该决策单元是规模收益递增的 (IRS).
- 3) 如果  $\vec{D}_{NI}(x, y, g_x, g_y) = \vec{D}_{ND}(x, y, g_x, g_y)$ , 则该决策单元是规模收益不变的 (CRS).

#### 4 定向技术距离函数下的 Malmquist 指数及其测算方法

Shephard(1970) 产出距离函数定义为:  $D(x, y) = \min\{ \lambda : (x, y/\lambda) \in T \}$ ,  $T$  是生产可能集. 显然产出距离函数只是产出向量径向变化, 没有考虑投入和产出同时变化的情况, 而定向技术距离函数解决了投入和产出同时变化的非径向投影问题. 此外, Caves 等人(1982)提出的 CCD 型 Malmquist 指数忽略了规模收益的影响, Färe 等论证了 CCD 型 Malmquist 指数无法准确测算 Malmquist 指数, 其原因是假设规模收益可变, 因此他们提出了 FGZ 型 Malmquist 指数, 该指数定义基于距离函数在规模收益不变的生产可能集上, Grifell 和 Lovell 的实证研究表明, 尽管 FGZ 型 Malmquist 指数可以准确测量生产力进步情况, 可是它不能准确测量生产力进步的影响因素. 也就是说包括 Ray 和 Desli 提出的 RD 型 Malmquist 指数, 总共这 5 种 Malmquist 指数都有一个共同的缺陷, 没有充分考虑规模收益对生产力进步的影响.

定义 2 提供判断任意决策单元在不同时期规模收益特征的方法, 已知了特定时期决策单元的规模收益特征, 就可以选择该规模收益特征下的定向技术距离函数计算 Malmquist 指数. 考虑 CCD 模型<sup>[1]</sup>中 Malmquist 指数的定义思路, 修正后的 Malmquist 指数定义如下:

定义 3  $t$  期 Malmquist 指数定义为:

$$M^t(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{\vec{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)}{\vec{D}^t(x^t, y^t, g_x, g_y)} = \frac{\vec{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)}{\vec{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)} \cdot \frac{\vec{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)}{\vec{D}^t(x^t, y^t, g_x, g_y)} \quad (1)$$

其中下标  $t$  为变量, 表示由定义 2 确定的规模收益特征.  $(x^t, y^t), (x^{t+1}, y^{t+1})$  分别表示  $t, t+1$  时期生产可能集内某一点, 若定向技术距离函数的上标为  $t$ , 则在计算时采用  $t$  期的生产可能集; 若为  $t+1$ , 则采用  $t+1$  期的生产可能集.

式(1)中以生产可能集中两决策单元  $(x^{t+1}, y^{t+1}), (x^t, y^t)$  在  $t$  期的定向技术距离函数的比值表示生产力变化, 以同一个决策单元  $(x^{t+1}, y^{t+1})$  在  $t$  期和  $t+1$  期定向技术距离函数的比值表示生产前沿面的移动, 即技术进步因子 (technical change), 又以  $(x^{t+1}, y^{t+1}), (x^t, y^t)$  在对应时期定向技术距离函数的比值表示决策单元效率的变化, 即技术效率变化因子 (technical efficiency change). 式(1)表明  $t$  期 Malmquist 指数可分解为两个影响因素: 技术进步因子 (technical change) 和技术效率变化因子 (technical efficiency change). 分别用 TECH 和 EFFCH 表示如下.

$$TECH = \frac{\vec{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)}{\vec{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)}, \quad (2)$$

$$EFFCH = \frac{\vec{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)}{\vec{D}^t(x^t, y^t, g_x, g_y)}. \quad (3)$$

图 2 表示规模收益不变条件下  $t$  期 Malmquist 指数、TECH 和 EFFCH 的几何意义. 方向  $g$  表示  $(-g_x, g_y)$ . 点  $a(x_a, y_a)$  表示  $t$  期的输入-输出向量  $(x^t, y^t)$ ,  $d(x_d, y_d)$  点表示  $t+1$  期的输入-输出向量  $(x^{t+1}, y^{t+1})$ , 生产可能集分别为  $T^t$  和  $T^{t+1}$ , 于是

$$\begin{aligned} b &= a + \vec{D}^{T^t}(x_a, y_a, -g_x, g_y)g = a + \vec{D}^{T^t}(a, g)g, \\ c &= a + \vec{D}^{T^{t+1}}(x_a, y_a, -g_x, g_y)g = a + \vec{D}^{T^{t+1}}(a, g)g, \\ e &= d + \vec{D}^{T^t}(x_d, y_d, -g_x, g_y)g = d + \vec{D}^{T^t}(d, g)g, \\ f &= d + \vec{D}^{T^{t+1}}(x_d, y_d, -g_x, g_y)g = d + \vec{D}^{T^{t+1}}(d, g)g. \end{aligned}$$

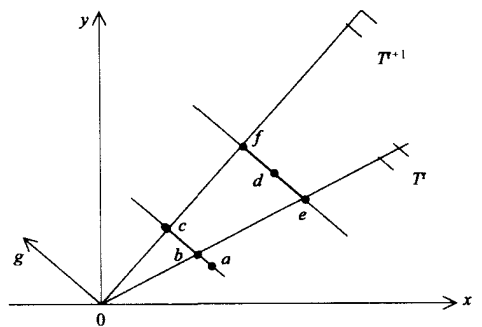


图 2  $t$  期 Malmquist 指数

则:

$$M'(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{e-d}{b-a},$$

$$TECH = \frac{e-d}{f-d},$$

$$EFFCH = \frac{f-d}{b-a}.$$

定向技术距离函数是表示在给定方向下,被观测点对生产前沿面偏离的测度,偏离越小,离生产前沿面越近,该点生产率水平越高,在(1)式中,以 $(x^{t+1}, y^{t+1})$ 与 $(x^t, y^t)$ 在 $t$ 期定向技术距离函数的比值计算 Malmquist 指数,则  $M'(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) < 1$  表示生产力进步,  $M'(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) > 1$  表示生产力退步,  $M'(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = 1$  为生产力不变. 同理可知 TECH 和 EFFCH 有如下性质:

性质1  $M'(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) > 1$ , 表示生产力退步;

$M'(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = 1$ , 表示生产力不变;

$M'(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) < 1$ , 表示生产力进步.

性质2  $TECH > 1$ , 表示技术进步对生产力增长有贡献;  $TECH = 1$ , 表示技术进步对生产力增长没有贡献;  $TECH < 1$ , 表示技术进步阻碍了生产力增长.

性质3  $EFFCH > 1$ , 表示技术效率阻碍了生产力增长;  $EFFCH = 1$ , 表示技术效率对生产力增长没有贡献;  $EFFCH < 1$ , 表示技术效率对生产力增长有贡献.

定向技术距离函数  $\vec{D}(x_0^t, y_0^t, g_x, g_y)$  用线性规划(4)求得:

$$\begin{aligned} & \max \\ & \text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^N y_{ij}^t \quad y_{r0}^t + g_{y_r}, r = 1, \dots, s, \\ & \quad \quad \sum_{j=1}^N x_{ij}^t \quad x_{i0}^t - g_{x_i}, i = 1, \dots, m, \\ & \quad \quad LAM, = ND, NI, \text{或} C. \end{aligned} \tag{4}$$

同理  $\vec{D}^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1}, g_x, g_y)$  可通过线性规划(5)求得,

$$\begin{aligned} & \max \\ & \text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^N y_{ij}^{t+1} \quad y_{r0}^{t+1} + g_{y_r}, r = 1, \dots, s, \\ & \quad \quad \sum_{j=1}^N x_{ij}^{t+1} \quad x_{i0}^{t+1} - g_{x_i}, i = 1, \dots, m, \\ & \quad \quad LAM, = ND, NI, \text{或} C. \end{aligned} \tag{5}$$

而在求  $\vec{D}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1}, g_x, g_y)$  时,生产可能集由  $T = \{(x^t, y^t) : (x_1^t, y_1^t), \dots, (x_0^t, y_0^t), \dots, (x_N^t, y_N^t)\}$  变化到  $T^t = \{(x^t, y^t) : (x_1^t, y_1^t), \dots, (x_0^{t+1}, y_0^{t+1}), \dots, (x_N^t, y_N^t)\}$ , 可通过线性规划(6)求得.

$$\begin{aligned} & \max \\ & \text{s. t.} \quad \sum_{j=1, j \neq 0}^N y_{ij}^t + {}_0 y_{i0}^{t+1} \quad y_{r0}^{t+1} + g_{y_r}, r = 1, \dots, s, \\ & \quad \quad \sum_{j=1, j \neq 0}^N x_{ij}^t + {}_0 x_{i0}^{t+1} \quad x_{i0}^{t+1} - g_{x_i}, i = 1, \dots, m, \\ & \quad \quad LAM, = ND, NI, \text{或} C. \end{aligned} \tag{6}$$

### 5 数值例子

为了说明本文方法的有效性,考虑单投入单产出的情况,取  $g = (1, 1)$ , 数据如表 1 所示. 根据定义 2 判断各决策单元在不同条件下的规模收益情况如表 2、3、4 所示.

最后计算  $t$  期 Malmquist 指数、技术进步因子、技术效率因子,得结果见表 5.

表 1 决策单元投入产出数据

DMU	1	2	3	4	5	6
$(x^t, y^t)$	(3, 3)	(4, 9)	(6, 18)	(10, 22)	(8, 5)	(8, 16)
$(x^{t+1}, y^{t+1})$	(3.5, 6)	(5, 15)	(7, 21)	(10, 3)	(6, 7)	(7, 17)

表 2  $(x^{t+1}, y^{t+1})$  在  $t$  期的规模收益

DMU	$\vec{D}_{NI}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)$	$\vec{D}_{ND}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)$	RS
1	1.125	0	IRS
2	0	0	CRS
3	0	0	CRS
4	6.75	6	IRS
5	2.75	2	IRS
6	1	1	CRS

表 3  $(x^{t+1}, y^{t+1})$  在  $t+1$  期的规模收益

DMU	$\vec{D}_{NI}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)$	$\vec{D}_{ND}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, g_x, g_y)$	RS
1	1.125	0	IRS
2	0	0	CRS
3	0	0	CRS
4	6.75	6	IRS
5	2.75	2	IRS
6	1	1	CRS

表 4  $(x^t, y^t)$  在  $t$  期的规模收益

DMU	$\vec{D}_{NI}^t(x^t, y^t, g_x, g_y)$	$\vec{D}_{ND}^t(x^t, y^t, g_x, g_y)$	RS
1	1.5	0	IRS
2	0.75	0	IRS
3	0	0	CRS
4	0	2	DRS
5	4.75	4	IRS
6	2	2	CRS

表 5 Malmquist 指数、技术进步因子、技术效率因子

DMU	Malmquist 指数	TECH	EFFCH
1	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
2	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
3	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
4	$\frac{6}{0}$	1	$\frac{6}{0}$
5	0.5	1	0.5
6	0.5	1	0.5

如表 5 所示,决策单元 1、2、3 生产力没有发生变化,决策单元 4 是生产力退步的,决策单元 5、6 是生产力进步的;技术进步因子计算结果显示,所有决策单元的技术进步对生产力进步没有贡献;技术效率因子结果列显示,决策单元 1、2、3 的技术效率对生产力进步没有贡献,决策单元 4 技术效率阻碍了生产力增长,决策单元 5、6 对生产力进步有正的贡献.

## 6 结论

经济增长理论始终是经济学家关注的热点,关于生产力进步的测量分为基于生产函数的参数法和以 DEA 为工具的非参数方法.参数法的发展背景是从新古典增长理论过渡到新增长理论,新古典增长理论假设规模收益不变,新增长理论的假设中含有规模收益递增,这都没有客观说明规模收益的本质对生产力进步的影响.以 DEA 为工具的非参数方法,尽管在方法本身具备优越性,可是仍然没有合理解决规模收益对生产力进步测量的影响.因而本文提出的方法至少有两个贡献:

1) 把规模收益考虑到生产力进步的测量中来,使得测算生产力进步的 Malmquist 指数更加准确,同时也保证了其分解部分:技术进步因子和技术效率因子的准确性;

2) 传统意义下 Malmquist 指数的测算都是投入或产出单方面变化的情况,这样导致从投入角度和产出角度测算的值不一致,把定向技术距离函数引入 Malmquist 指数的定义,就可以测算投入和产出同时变化的情况,使 Malmquist 指数测算生产力进步更加有意义.

在判断出决策单元的规模收益特征后,选择准确的定向技术距离函数计算 Malmquist 指数,数值例子

的结果显示,该指数合理解释了决策单元生产力变化的情况,并且其分解因素:技术进步因子(TECH)和技术效率变化因子(EFFCH)也能够解释技术进步和技术效率变化对生产力进步的影响情况,这对非参数的生产力进步测算方法是一个重要补充。

#### 参考文献:

- [1] Giffel-tatj éE, Lovell C A K. A generalized malmquist productivity index[J]. Sociedad de Estadística e Investigación Operativa, 1999, (7): 81 - 101.
- [2] Robert G. Chambers, Yangho Chung, Rolf Färe. Benefit and distance functions[J]. Journal of Economic Theory, 1996, (70): 407 - 419.
- [3] Shephard R W. Theory of Cost and Production Functions[M]. Princeton, Princeton Univ Press, 1970.
- [4] Chambers R, Chung G, Färe R. Profit, Directional distance functions, and neolovian efficiency[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1998, 2(8): 351 - 364.
- [5] Hirofumi Fukuyama. Scale characterizations in a DEA directional technology distance function framework [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 144: 108 - 127.
- [6] Robert G. Chambers, Rolf Färe. Showna Grosskopf. Productivity growth in Apec countries[J]. Pacific Economic Review, 1996: 181 - 190.

(上接第 52 页)

#### 参考文献:

- [1] 郭宇明. 论中药现代化[J]. 广东药学, 2003, 13(2): 2 - 4.  
Guo Yuming. Traditional chinese medicine modernization[J]. Guang Dong Medicine, 2003, 13(2): 2 - 4.
- [2] Berio, FB Vernadat. New developments in enterprise modeling using CIMOSA[J]. Computers in Industry, 1999, 2 - 3: 99 - 114.
- [3] Kosank K, Gernadat F. CIMOSA: enterprise engineering and integration[J]. Computer in Industry, 1999, 2 - 3: 83 - 97.
- [4] 陈禹六,等. 经营过程重构(BPR)与系统集成[M]. 北京:清华大学出版社. 2001.  
Chen Yuliu, et al. BPR and System Integration[M]. Beijing: Tsing Hua University Press. 2001.
- [5] Chen D, Vallespir B, Doumeings G. GRAI integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology[J]. Computers in Industry, 1997, 33(2 - 3): 387 - 394.
- [6] Rodim van Es. Dynamic Enterprise Innovation: Establishing Continuous Improvement in Business, BAAN Business Innovation[M]. The Netherland, 1998.
- [7] SCC(Supply-Chain Council). Supply Chain Operations Reference Model. <http://www.supply-chain.org/>, 2000.
- [8] Computer Associates International, Inc. BPwin Methods Guide. Islandia, New York 11749. 2001.
- [9] Rafael Batres, Ming L. Lu, Xue Z. Wang. Concurrent process engineering and integrated decision making[A]. Proceedings of the Process Systems Engineering Conference 2003[C], 160 - 165, P. R. China.
- [10] Paulien M. Herder, Margot P C. Weijnen. A concurrent engineering approach to chemical process design[J]. International Journal of Production Economics, 2000, 64(1 - 3): 311 - 318.