

文章编号: 1001-0920(2006)10-1097-06

## 基于循环经济的开放动态投入产出智能决策系统

张文红, 施建军

(南京大学 商学院, 南京 210093)

**摘 要:** 基于循环经济模式的经济系统的本质是一个开放的复杂巨系统, 对此, 提出一种开放的动态投入产出智能决策系统的设计方法。该方法以建立的动态投入产出反馈控制模型为核心, 分别建立系统整体和各个决策单元的非线性多目标动态优化模型, 再通过多级递阶智能协调器确定满意解集, 使决策结果是或者近似于全局优化, 并满足开放性和稳定性的要求。最后通过案例分析, 表明该方法具有实际应用价值。

**关键词:** 循环经济; 复杂巨系统; 投入产出; 反馈控制; 智能协调; 非线性多目标

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

## An Open Dynamic Input-output Intelligent Decision-making System Based on Circular Economy

ZHANG Wen-hong, SHI Jian-jun

(Business School, Nanjing University, Nanjing 210093, China. Correspondent: ZHANG Wen-hong, Email: zhangwenhong@tom.com)

**Abstract:** An economic system based on the mode of circular economy is in essence an open complex giant system. An open dynamic input-output intelligent decision-making system is established. Using the dynamic input-output feedback control model, the nonlinear multiobjective dynamic optimization models are established respectively for the entire system and each decision-making unit. Then through a multilevel hierarchic intelligent harmony mechanism, the set of satisfactorial solutions is confirmed. The ultimate decision based on the set provides or approximates the overall optimization, which makes the system have the openness and robustness. Finally, an illustrative example is given to show the effectiveness of the method.

**Key words:** Circular economy; Complex giant system; Input-output; Feedback control; Intelligent harmony; Non-linear multiobjective

### 1 引 言

循环经济是树立科学发展观, 实现可持续发展的主要方向之一, 也是我国今后投资体制改革的重要内容之一, 能从根本上解决资源、能源和环境的可持续发展问题<sup>[1,2]</sup>。由文献[3,4]可知, 基于循环经济模式的经济系统(ESCE)的本质是一个开放的复杂巨系统, 受自然、社会和经济等因素的影响; 同时在市场经济条件下, 经济系统的整体目标常与各个企业的局部目标不一致, 使得企业间的共生关系具有不稳定性, 所以用现有的决策分析方法<sup>[5~8]</sup>解决是

很困难的。

本文设计一个开放的动态投入产出智能决策系统, 它以动态投入产出反馈控制模型为核心, 分别建立系统整体和各个决策单元的非线性多目标动态优化模型, 再通过多级递阶智能协调器确定满意解集, 使得最终的决策在开放的环境中易于适应变化, 较好地反映自然、社会与经济的协调发展。

### 2 基于循环经济的动态投入产出模型

由循环经济的定义<sup>[3]</sup>, 把经济系统的结构分为 3 个部分, 即生产者、消费者和还原者。下面将基于

收稿日期: 2005-08-15; 修回日期: 2005-12-21

基金项目: 中国博士后科学基金项目(0104003038); 江苏省环保厅环保科技项目(2003063)。

作者简介: 张文红(1975—), 女, 南京人, 博士后, 从事循环经济、复杂系统建模等研究; 施建军(1955—), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 从事统计学理论和方法、软科学理论等研究。

物质流建立 ESCE 的动态投入产出模型(该方法可同样运用于能量流和现金流)。

图1 给出一个简单的 ESCE 结构示例

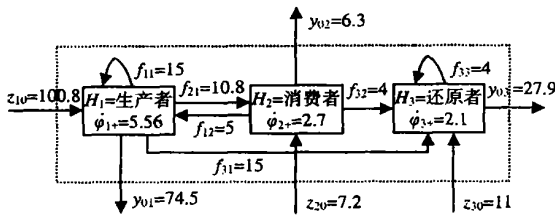


图1 简化的 ESCE

图1中,  $H_k$  为第  $k$  个过程;  $z_{i0}$  为从系统外输入到第  $i$  个过程的输入流(每单位时间的物质或能量);  $y_{0j}$  为从第  $j$  个过程输出到系统外的输出流(每单位时间的物质或能量);  $f_{ij}$  为从第  $j$  个过程流向第  $i$  个过程的流(每单位时间的物质或能量);  $x_k$  为通过  $H_k$  的总流量 所有流的单位是万 t/a

用  $Q_k$  表示第  $k$  个过程的积累量规模, 则

$$Q_k = \sum_{i=1}^n b_{ik} x_i, k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

其中  $b_{ik}$  表示第  $k$  个过程单位积累量的变化占第  $i$  个过程的总流量的变化比例,  $0 < b_{ij} < 1, 0 < \sum_{i=1}^n b_{ij} < 1$ .

这里把  $Q_k$  分为正积累状态导数  $Q_k^+$  和负积累状态导数  $Q_k^-$ , 即

$$Q_k = \begin{cases} Q_k^+, Q_k < 0; \\ 0, \text{其他}; \end{cases} \quad Q_k^+ = \begin{cases} Q_k^-, Q_k > 0; \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$Q_k^+$  表示过程积累量规模的增长, 而  $Q_k^-$  表示过程积累量规模的下降 所以这样的状态导数使得所有的  $Q_k^+$  都可以看作是输出流(在过程中通过把流转化为存贮量使得流量下降), 而所有的  $Q_k^-$  都可以看作是输入流(在过程中通过降低存贮规模使得流量上升).

根据物质守恒定律, 建立系统的平衡流(即输入流 = 输出流 + 积累规模的变化) 为

$$x_k = \sum_{j=1}^n f_{kj} + z_{k0} - Q_k^-, k = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

$$x_k = \sum_{i=1}^n f_{ik} + y_{0k} + Q_k^+, k = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

用  $a_{ik}$  表示从第  $k$  个过程流向第  $i$  个过程的流占第  $i$  个过程的总流量  $x_i$  的比例,  $0 < a_{ik} < 1, 0 < \sum_{i=1}^n a_{ik} < 1$ , 则有

$$f_{ik} = a_{ik} x_i, i, k = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

考虑在输出流的基础上建立模型, 所以将式(1), (5) 代入(4) (基于输入流时代入(3)), 有

$$x_k = \sum_{i=1}^n a_{ik} x_i + y_{0k} + \sum_{i=1}^n b_{ik} x_i \quad (6)$$

将式(6) 转化为矩阵形式

$$x = A x + B x + y, \quad (7)$$

称

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

分别为过程流系数矩阵和状态增长系数矩阵 通过式(7) 建立一年的时滞动态离散投入产出模型为

$$x(t) = A(t)x(t) + B(t)(x(t+1) - x(t)) + y(t). \quad (8)$$

在确定 ESCE 的发展决策时, 必须要考虑到外界一些因素对 ESCE 的扰动作用(这里主要考虑社会需求量的变化), 使 ESCE 对于外界的变化具有稳定性, 实现供求的动态平衡 下面将在式(8) 的基础上, 建立 ESCE 的动态投入产出反馈控制模型

### 3 基于循环经济的动态投入产出反馈控制模型

设第  $i$  个过程的输出流的社会需求量为  $d_i(t)$ , 需求变化率为  $\alpha_i(t), i = 1, 2, \dots, n, \alpha_i(t)$  可正可负, 也可以是  $\sin(t), \cos(t)$  等其他形式, 受季节、政策等因素扰动的影响 设

$$d_i(t+1) = (1 + \alpha_i(t))d_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

则有

$$d(t+1) = (I + D)d(t). \quad (10)$$

其中:  $d(t) = (d_1(t), d_2(t), \dots, d_n(t))$  为第  $t$  年输出流的社会需求量;  $D = \text{diag}(\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_n(t))$  为对角阵;  $I$  为单位阵

为解决扰动问题, 需建立相应的状态空间模型 为此, 选取状态向量为  $x(t)$ , 外部干扰变量为  $d(t)$ , 控制向量和输出向量分别为

$$\mu(t) = x(t+1) - x(t), \quad (11)$$

$$y^*(t) = d(t) - y(t). \quad (12)$$

$\mu(t)$  的意义是总流量的增量向量, 有较高的实际调控可行性;  $y^*(t)$  的意义是系统输出流的社会需求量与实际输出量之间的向量之差

将模型(8) 代入(12), 得

$$y^*(t) = d(t) - (I - A(t))x(t) + B(t)\mu(t). \quad (13)$$

将(10), (11), (13) 合在一起, 便得到所要的动态投入产出反馈控制模型

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + \mu(t), \\ d(t+1) = (I + D)d(t), \\ y^*(t) = - (I - A(t))x(t) + \\ \quad d(t) + B(t)\mu(t). \end{cases} \quad (14)$$

其中: (10) 为外部干扰变量的状态方程, (11) 为被控系统的状态方程, (13) 为输出方程

证明 由文献[9]可证明(14)确定的动态投入产出反馈控制模型是完全可控且完全可观的

动态投入产出反馈控制模型对于 ESCE 的外部干扰表现较为稳定, 能够较好地进行中长期宏观预测设计, 但具体到每一年的实际规划中, 存在以下问题:

- 1) 由于受生产条件、资金、资源等方面的限制, 每年的  $\mu(t)$  应有上、下限约束;
- 2) 基于自然、经济和社会的决策目标(比如 GDP 最大、能耗最小等) 都必须综合考虑;
- 3) 需协调 ESCE 整体与局部过程的目标, 否则会使企业间终止相互间的共生关系

基于以上问题, 下面将建立一个以(14)为核心的开放的动态投入产出智能决策系统, 确保最终的决策在开放的环境中易于适应变化, 较好地反映自然、社会与经济的协调发展

#### 4 开放的动态投入产出智能决策系统

开放的动态投入产出智能决策系统以式(14)的动态投入产出反馈控制模型为核心, 在系统整体和各个过程的决策单元中分别建立非线性多目标动态优化模型, 通过多级递阶智能协调器确定满意解集, 使决策的最后结果是或者近似于全局优化的结果, 满足开放性和稳定性的要求, 具体结构和过程见图 2

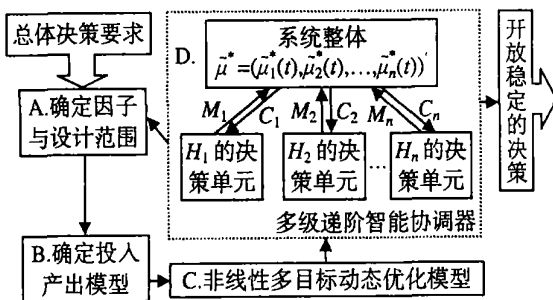


图 2 开放的动态投入产出智能决策系统

##### 4.1 非线性多目标动态优化模型

令  $H_p (p = 1, 2, \dots, g), H_c (c = 1, 2, \dots, m)$  和  $H_r (r = 1, 2, \dots, h)$  分别表示 ESCE 中所有的生产过程、消费过程和还原过程的集合,  $g + m + h = n$  这里考虑 ESCE 中的 5 个目标函数(实际运作中可有

所增减), 它们的表达式均用(14)的动态投入产出反馈控制模型确立:

1) 产出收益最大

$$\max_{i=1}^g y_i(t);$$

2) 还原水平最高

$$\max_{i=1}^h y_i(t);$$

3) 尽可能动态供需平衡

$$\min_{i=1}^n y_i^*(t);$$

4) 能耗降低最快

$$\min P(t) \mu(t),$$

其中  $P(t) = (p_1(t), p_2(t), \dots, p(t)_n)$  为各个过程的能耗向量;

5) 污染最小

$$\min_{i=1}^m y_i(t);$$

约束条件为  $a_i(t) \mu_i(t) \leq b_i(t), i = 1, 2, \dots, n$ , 其中  $a_i(t), b_i(t) \geq 0$

非线性多目标动态优化模型比较适合于人机交互决策<sup>[10]</sup>, 所以在 5 个目标函数的基础上, 建立系统整体和各个决策单元的非线性多目标动态优化模型

注 1 系统整体和各个决策单元的目标函数、优先级别和权系数可以是不一样的, 根据实际情况确定

##### 4.2 满意解集的确定策略

非线性多目标动态优化模型的最优解在现实生活中很少是最优的(甚至可能不存在), 且系统整体和决策单元的最优解一般不一致, 由此提出满意解集的概念 它优于最优化的点集, 能使整体与局部过程的目标较易协调, 决策者在满意解集中选择一个决策, 更能接近开放的真实世界, 在环境变化中更加稳定

定义 1 通过非线性多目标动态优化模型得到最优控制  $\mu^* = (\mu_1^*(t), \mu_2^*(t), \dots, \mu_n^*(t))$ , 称  $\mu_i^*(t) (i = 1, 2, \dots, \mu_n^*)$  为每个控制变量  $\mu_i(t)$  的基本点

定义 2 满意解集是指通过基本点来建立探索点和启发性规则, 形成控制变量的解集, 该解集中的任何解的性能指标值都在最优控制性能指标值  $f$  的一定范围内

探索点的启发性确定策略如下:

- 1) 若一个控制变量的基本点不在上下限上, 即  $a_i(t) < \mu_i^*(t) < b_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$ , 则在  $\mu_i^*(t)$  两

边的启发式<sup>[9]</sup> 各取若干点作进一步探索; 反之则在其界限内的一侧取若干点作探索 这些用于进一步探索的点称为探索点

2) 决策者对最优控制的性能指标值设置一定的范围(如 5%), 选择一个探索点输入非线性多目标动态优化模型, 若得到的性能指标值在这个范围内, 则该探索点在满意解范围内; 反之则不是满意解 具体过程详见表 1 ~ 4

表 1 整数探索点

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$f$
Base points	10	2	2	61.2
2	10.5	2	2	63.25
3	10.5	2	2.2	63.47
4	10.5	2	2.5	64.3
5	10.5	2.5	2	64.25
6	10.5	2.5	2.2	64.67
7	10.5	2.5	2.5	65.3
8	10.5	2.8	2	64.85
9	10.5	2.8	2.2	65.27
10	10.5	2.8	2.5	65.9
11	11	2	2	65.3
12	11	2	2.2	65.72
13	11	2	2.5	66.35
14	11	2.5	2	66.3
15	11	2.5	2.2	66.72
16	11	2.5	2.5	67.35
17	11	2.8	2	66.9
18	11	2.8	2.2	67.32
19	11	2.8	2.5	67.95
20	10	2.5	2	62.2
21	10	2.5	2.2	62.62
22	10	2.5	2.5	63.25
23	10	2.8	2	62.8
24	10	2.8	2.2	63.22
25	10	2.8	2.5	63.85
26	10	2	2.2	61.62
27	10	2	2.5	62.25

表 2 生产过程探索点

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$D_1$
Base points	10	[2, 4]	2	40
2	10.5	/	2	41.5
3	10.5	/	2.2	41.5
4	10.5	/	2.5	41.5
5	10.5	/	2	41.5
6	10.5	/	2.2	41.5
7	10.5	/	2.5	41.5
8	10.5	/	2	41.5
9	10.5	/	2.2	41.5
10	10.5	/	2.5	41.5
11	11	/	2	43
12	11	/	2.2	43
13	11	/	2.5	43
14	11	/	2	43
15	11	/	2.2	43
16	11	/	2.5	43

续表

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$D_1$
17	11	/	2	43
18	11	/	2.2	43
19	11	/	2.5	43
20	10	/	2	40
21	10	/	2.2	40
22	10	/	2.5	40
23	10	/	2	40
24	10	/	2.2	40
25	10	/	2.5	40
26	10	/	2.2	40
27	10	/	2.2	40

表 3 消费过程探索点

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$D_2$
Base points	14	2	3.5	13
2	13.5	2	3.5	13
3	13.5	2	3.2	13
4	13.5	2	3	13
5	13.5	2.5	3.5	14
6	13.5	2.5	3.2	14
7	13.5	2.5	3	14
8	13.5	2.8	3.5	14.6
9	13.5	2.8	3.2	14.6
10	13.5	2.8	3	14.6
11	13	2	3.5	13
12	13	2	3.2	13
13	13	2	3	13
14	13	2.5	3.5	14
15	13	2.5	3.2	14
16	13	2.5	3	14
17	13	2.8	3.5	14.6
18	13	2.8	3.2	14.6
19	13	2.8	3	14.6
20	14	2.5	3.5	14
21	14	2.5	3.2	14
22	14	2.5	3	14
23	14	2.8	3.5	14.6
24	14	2.8	3.2	14.6
25	14	2.8	3	14.6
26	14	2	3.2	13
27	14	2	3	13

表 4 还原过程探索点

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$D_3$
Base points	10	[2, 4]	2	10
2	10.5	/	2	10
3	10.5	/	2.2	10.3
4	10.5	/	2.5	10.75
5	10.5	/	2	10
6	10.5	/	2.2	10.3
7	10.5	/	2.5	10.75
8	10.5	/	2	10
9	10.5	/	2.2	10.3
10	10.5	/	2.5	10.75
11	11	/	2	10
12	11	/	2.2	10.3
13	11	/	2.2	10.75

续表

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$D_3$
14	11	/	2	10
15	11	/	2 2	10 3
16	11	/	2 5	10 75
17	11	/	2	10
18	11	/	2 2	10 3
19	11	/	2 5	10 75
20	10	/	2	10
21	10	/	2 2	10 3
22	10	/	2 5	10 75
23	10	/	2	10
24	10	/	2 2	10 3
25	10	/	2 5	10 75
26	10	/	2 2	10 3
27	10	/	2 2	10 75

注 2 这种选取探索点和满意解的策略有两大好处: 1) 基于启发式的确定方法更加灵活, 易于控制; 2) 保证满意解集不会偏离最优解太远

### 4.3 多级递阶智能协调器的结构和运行步骤

建立系统整体和各个决策单元的非线性多目标动态优化模型后, 为了协调 ESCE 整体利益与局部过程的利益, 构建如图 2 虚框(D)中表示的多级递阶智能协调器, 确定满意解集, 使决策的最后结果是或者近似于全局优化的结果 具体运行步骤如下:

1) 在 D 中, 系统整体和决策单元求解出各自的最优控制  $\mu^*$  和性能指标值  $f$ .

2) 系统整体和决策单元以各自的最优控制为基本点在性能指标值的一定范围内寻找满意解集  $M_i$ .

3) 决策单元将各自的满意解集  $M_i$  传递给系统整体, 若与系统整体的满意解集有交集, 则将其作为最终满意解集, 由决策者在其中选择一个综合最优控制  $\tilde{\mu}^* = (\tilde{\mu}_1^*(t), \tilde{\mu}_2^*(t), \dots, \tilde{\mu}_n^*(t))$  传给各个决策单元; 若没有交集, 则智能协调器: 发出干预信号 C, 重新调整探索点或扩大性能指标值的范围, 再寻找满意解集; 或 结合实际情况, 对于牺牲局部性能指标的过程, 在财税和政策等方面给予优惠政策

## 5 应用实例

考察江苏省无锡新区, 以环氧树脂这种产品作为主线, 建立 ESCE, 见图 1. 以图 1 的数据作为初始值, 此时社会需求量  $d(0) = (75, 9, 28)$ , 3 个过程的期望值为  $E = (85, 0, 35)$ . 为简单起见, 设每年过程流系数矩阵 A 和状态增长系数矩阵 B 不变, 见表 5 和表 6; 由图 2 的步骤建立动态投入产出反馈控制模型和相应的非线性多目标动态优化模型, 用 Hooke-Jeeves 的直接搜索法得到整体满意解集和各个过程的满意解集(见表 1~ 4)(因篇幅所限, 具体过程略, 详见文献[9]). 经过专家系统和决策者共同

参与, 最终确定出各个控制变量的满意解集(见表 7).

表 5 过程流系数矩阵 A

A	$H_1$	$H_2$	$H_3$
$H_1$	0.124	0.041	0
$H_2$	0.6	0	0
$H_3$	0.441	0.118	0.118

表 6 状态增长系数矩阵 B

B	$H_1$	$H_2$	$H_3$
$H_1$	0.4	0.2	0.15
$H_2$	0	0	0
$H_3$	0.2	0.1	0.1

表 7 最终满意解集

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
协调器	[10 ~ 10.5]	2	[2 ~ 2.2]
环氧树脂生产过程	[10 ~ 10.5]	[2 ~ 4]	[2 ~ 1.5]
环氧树脂消费过程	[13 ~ 14]	2	[3 ~ 3.5]
环氧树脂还原过程	[10 ~ 11]	[2 ~ 4]	[2 ~ 2.2]
最终满意解集	[10 ~ 10.5]	2	[2 ~ 2.2]

由表 7 可以发现, 最终满意解集中系统整体、生产和还原过程的利益都得到了满足, 而消费过程的性能指标超出了范围 这是因为消费过程的期望值设置为废弃物的零输出, 是 ESCE 的最理想模式, 但根据无锡新区的实际情况, 目前还达不到, 只能牺牲消费过程的利益, 相信随着 ESCE 的进一步发展, 最终一定能达到生产、消费和还原的整体协调发展

## 6 结 语

作为发展中国家, 我们迫切需要尽可能地有效利用有限资源, 减少现代化过程中付出的巨大环境成本, 所以跨越式发展循环经济的可能性和必要性更大, 一张白纸上所绘的图画有可能更新更美 循环经济的许多设想和国内外实践对于指导当前经济发展有着重要的意义, 将为我国的可持续发展开辟一条新的道路

## 参考文献 (References)

[1] 蒋正华, 张羚广, 可持续发展与复杂自循环经济系统 [J]. 管理科学学报, 2002, 4(1): 1-6  
(Jiang Z H, Zhang L G. Sustainable Development and Complex Circular Economy System [J]. J of Management Sciences in China, 2002, 4(1): 1-6 )

[2] 诸大建. 可持续发展呼唤循环经济 [J]. 科技导报, 1998, 16(9): 39-42  
(Chu D J. Sustainable Development and Circular Economy [J]. J of Science and Technology, 1998, 16(9): 39-42 )

[3] 张文红, 陈森发, 施建军. 生态工业、循环经济与可持续发展 [J]. 东南大学学报, 2004, 7(3): 59-62

- (Zhang W H, Chen S F, Shi J J. Eco-industry, Circular Economy and Sustainable Development [J]. *J of Southeast University*, 2004, 7(3): 59-62 )
- [4] 张文红, 陈森发. 生态工业系统——一个开放的复杂巨系统[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(3): 20-25  
(Zhang W H, Chen S F. Eco-industry System—An Open Complex Giant System [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(3): 20-25 )
- [5] Farreell A. Sustainability and the Design of Knowledge Tools [J]. *IEEE Technology and Society Magazine*, 1996, 15(4): 11-20
- [6] Bailey R. Designing Robust Industrial Ecosystems: A Systems Approach [DB/OL]. <http://www.srl.gatech.edu/people/reid/rb.thesis.html>, 1997.
- [7] Koenig H E, Cantlon J E. Quantitative Industrial Ecology [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, Part C: Application and Review*, 1998, 28(1): 16-28
- [8] 陈定江, 李有润, 沈静珠, 等. 生态工业园区的M NLP模型[J]. *过程工程学报*, 2002, 2(1): 75-80  
(Chen D J, Li Y R, Shen J Z, et al. A M NLP Model of Eco-industrial Parks [J]. *J of Process Engineering*, 2002, 2(1): 75-80 )
- [9] 张文红. 生态工业发展的模式、途径及定量仿真模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2004  
(Zhang W H. *The Modes and Ways of Developing Ecological Industry and Its Quantitative Simulation Models* [D]. Nanjing: Southeast University, 2004 )
- [10] 唐焕文, 秦学志. 实用最优化方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2000  
(Tang H W, Qin X Z. *Practicality Optimization Method* [M]. Dalian: Dalian University Technology, 2000 )

(上接第 1086 页)

- [52] 吴文海, 耿昌茂, 罗德林, 等. 现代战机超机动攻击研究 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, 36(4): 417-421.  
(Wu W H, Geng C M, Luo D L, et al. Modern Fighter Study on PST-A tacking [J]. *J of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 36(4): 417-421.)
- [53] 连葆华, 崔祐涛, 崔平远. 再入飞行器自动驾驶仪的自适应退步控制设计[J]. *中国空间科学技术*, 2003, (1): 7-13  
(Lian B H, Cui H T, Cui P Y. Adaptive Backstepping Control Based Autopilot Design for Reentry Vehicle [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2003, (1): 7-13 )
- [54] Guang Li, Amir K. Robust Control of a Hydraulically Driven Flexible Arm Using Backstepping Technique [J]. *J of Sound and Vibration*, 2004, (208): 759-775
- [55] 王家军, 赵光宙, 齐东莲. 基于反推的永磁同步电动机伺服系统的位置跟踪控制[J]. *电路与系统学报*, 2004, 9(6): 19-21.  
(Wang J J, Zhao G Z, Qi D L. Backstepping Position Tracking Control for Permanent Magnetic Synchronous Motor Servo System [J]. *J of Circuits and Systems*, 2004, 9(6): 19-21.)
- [56] 张春朋, 林飞, 宋文超, 等. 异步电机鲁棒控制及其 Backstepping 设计[J]. *控制与决策*, 2004, 19(3): 267-271.  
(Zhang C P, Lin F, Song W C, et al. Backstepping Design for Robust Controller of Induction Motor [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(3): 267-271.)
- [57] 纪志成, 李三东, 沈艳霞. 自适应积分反步法永磁同步电机伺服控制器的设计[J]. *控制与决策*, 2005, 20(3): 329-331.  
(Ji Z C, Li S D, Shen Y X. Adaptive Backstepping Design for the Servo Controller of Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(3): 329-331.)