第 18 卷 第 1 期　　控 制 与 决 策　　2003 年 1 月
Vol. 18 No. 1　　Control and Decision　　Jan. 2003

文章编号: 1001-0920(2003)01-0081-04

基于状态观测器的线性不确定时滞系统的保代价控制

段玉波[1], 邵克勇[1], 张　江[2]
(1. 大庆石油学院 电气与信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 大庆石油管理局 供电公司, 黑龙江 大庆 163453)

摘　要: 研究一类线性不确定时滞系统, 基于状态观测器给出了系统保代价控制的无记忆状态反馈控制器, 并给出了保代价控制器存在的充分条件。在某些条件满足的条件下, 基于LMI给出了系统保代价控制器。

关键词: 不确定系统; 时滞; 状态反馈; 保代价控制
中图分类号: TP13　　**文献标识码**: A

Guaranteed cost control of linear uncertain time-delay systems based on the state observer

DUAN Yu-bo[1], *SHAO Ke-yong*[1], *ZHANG Jiang*[2]
(1. School of Electric and Information Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China; 2. Power Supply Company, Daqing Petroleum Administration, Daqing 163453, China)

Abstract: The guaranteed cost control problem is studied for a class of linear uncertain time-delay systems. Memoryless state feedback controllers based on the state observer are designed. A sufficient condition for the existence of guaranteed cost controllers is given. Under some conditions the guaranteed cost controllers of the systems can be obtained via LMI.

Key words: Uncertain systems; Time-delay; State feedback; Guaranteed cost control

1　引　　言

不确定时滞系统在工程实际中广泛存在, 因而受到人们越来越多的关注。有关不确定时滞系统鲁棒稳定性及鲁棒镇定的研究工作, 也取得了令人瞩目的成果[1~4]。自从Chang 等提出保代价控制概念以来[5], 不确定系统保代价控制已取得了许多研究成果[6~8]。但这些结果大多是基于系统状态可测这一假设。在实际过程中, 这种假设并不总能得到满足, 因而有必要对不可测系统进行研究。

基于系统的状态观测器来设计不确定时滞系统的保代价控制器, 是解决这一问题的一种有效方法。目前, 这方面的研究尚不多见。本文提出一种基于系统状态观测器设计线性不确定时滞系统的保代价控制器的方法, 并给出了相应的条件。

2　问题描述

考虑如下线性不确定时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (A_1 + \Delta A_1) \times \\ \qquad x(t-d) + (B + \Delta B)u(t) \\ y(t) = Cx(t) \\ x(t) = \varphi(t), \quad t \in [-d, 0] \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 是系统的状态向量; $u(t) \in \mathbf{R}^m$ 是系统的控制向量; A, A_1, B, C 是已知的适当维数的常值矩阵; $\Delta A, \Delta A_1, \Delta B$ 是系统的不确定项; $d > 0$ 是系统的时滞常数; $\varphi(t)$ 是系统状态向量的初始值。

假设系统的不确定项满足

收稿日期: 2002-03-26; 修回日期: 2002-08-24。
作者简介: 段玉波(1951—), 男, 黑龙江木兰人, 院长, 教授, 博士生导师, 从事油气田集输系统及自动化等研究; 邵克勇(1970—), 男, 河南淮阳人, 讲师, 博士生, 从事复杂系统控制的研究。

$$[\Delta A, \Delta A_1, \Delta B] = DF(t)[E_1, E_2, E_3]$$

其中: D, E_1, E_2, E_3 是适当维数的常值矩阵; $F(t)$ 中的元素是 Lebesgue 可测的, 并满足 $F^{\mathrm{T}}(t)F(t) \leq I$, I 是适当维数的单位阵。与系统(1) 相应的代价函数为

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^{\mathrm{T}} Q x(t) + u(t)^{\mathrm{T}} R u(t)] \mathrm{d}t \quad (2)$$

其中 Q 和 R 是正定的对称矩阵。

本文所要研究的问题是: 对于不确定时滞系统(1), 设计动态输出反馈控制器

$$u(t) = -Kz(t) \quad (3)$$

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + L[y(t) - Cz(t)] \quad (4)$$

使对任意容许的不确定性, 由式(3), (4) 及(1) 组成的闭环系统是稳定的, 并且存在常数 J^* 满足 $J \leq J^*$。其中 J^* 称为代价值, 式(3) 是系统(1) 的保代价控制律。

3 主要结果

引理 1 设 A, B, C 为适当维数的常数矩阵, 且 A 和 C 满秩, 则如下矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B^{\mathrm{T}} & C \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

成立的充要条件为

$$A - BC^{-1}B^{\mathrm{T}} < 0, \quad A < 0$$

或

$$C - BA^{-1}B^{\mathrm{T}} < 0, \quad C < 0$$

定理 1 对不确定时滞系统(1), 如果存在正定对称矩阵 $P_1, P_2, S \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 满足如下矩阵不等式

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Sigma & M & \Psi \\ M^{\mathrm{T}} & T & Z \\ \Psi^{\mathrm{T}} & Z^{\mathrm{T}} & -S \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \Sigma = {} & Q + K^{\mathrm{T}}RK + S + \\ & (A + \Delta A - BK - \Delta BK)^{\mathrm{T}} P_1 + \\ & P_1(A + \Delta A - BK - \Delta BK) \\ M = {} & P_1(BK + \Delta BK) + \\ & P_2(\Delta A - \Delta BK) - K^{\mathrm{T}}RK \\ \Psi = {} & P_1(A_1 + \Delta A_1), \quad Z = P_2(A_1 + \Delta A_1) \\ T = {} & K^{\mathrm{T}}RK + (A + \Delta BK - LC)^{\mathrm{T}} P_2 + \\ & P_2(A + \Delta BK - LC) \end{aligned}$$

则 $u(t) = -Kz(t)$ 为系统(1) 的保代价控制律。

证明 令

$$e(t) = x(t) - z(t) \quad (7)$$

则由式(1), (3), (4), (7) 组成的闭环增广系统为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A - BK - \Delta BK)x(t) + \\ \qquad (A_1 + \Delta A_1)x(t-d) + \\ \qquad (BK + \Delta BK)e(t) \\ \dot{e}(t) = (A - LC + \Delta BK)e(t) + \\ \qquad (\Delta A - \Delta BK)x(t) + \\ \qquad (A_1 + \Delta A_1)x(t-d) \end{cases} \quad (8)$$

取李雅普诺夫函数

$$V(x(t), e(t)) = x^{\mathrm{T}}(t)P_1x(t) + e^{\mathrm{T}}(t)P_2e(t) + \int_{t-d}^{t} x^{\mathrm{T}}(\tau)Sx(\tau)\mathrm{d}\tau$$

则其对时间 t 的导数为

$$\dot{V}(x(t), e(t)) = \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \\ x(t-d) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \Omega \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \\ x(t-d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} -Q-K^{\mathrm{T}}RK & K^{\mathrm{T}}RK \\ K^{\mathrm{T}}RK & -K^{\mathrm{T}}RK \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}$$

由于 $\Omega < 0$, 所以

$$\dot{V}(x(t), e(t)) < \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} -Q-K^{\mathrm{T}}RK & K^{\mathrm{T}}RK \\ K^{\mathrm{T}}RK & -K^{\mathrm{T}}RK \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

由引理 1 知 $\dot{V}(x(t), e(t)) < 0$, 从而闭环系统是渐近稳定的。对式(9) 从 0 到 T 积分, 有

$$\begin{aligned} & \int_0^T \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} -Q-K^{\mathrm{T}}RK & K^{\mathrm{T}}RK \\ K^{\mathrm{T}}RK & -K^{\mathrm{T}}RK \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \mathrm{d}t > \\ & x^{\mathrm{T}}(T)P_1x(T) - x^{\mathrm{T}}(0)P_1x(0) + \\ & e^{\mathrm{T}}(T)P_2e(t) - e^{\mathrm{T}}(0)P_2e(0) + \\ & \int_{T-d}^{T} x^{\mathrm{T}}(t)Sx(t)\mathrm{d}t - \int_{-d}^{0} x^{\mathrm{T}}(t)Sx(t)\mathrm{d}t \end{aligned}$$

因为闭环系统是渐近稳定的, 故当 $T \to \infty$ 时, 有

$$x^{\mathrm{T}}(T)P_1x(T) \to 0, \quad e^{\mathrm{T}}(T)P_2e(T) \to 0$$

$$\int_{T-d}^{T} x^{\mathrm{T}}(t)Sx(t)\mathrm{d}t \to 0$$

从而

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} -Q-K^{\mathrm{T}}RK & K^{\mathrm{T}}RK \\ K^{\mathrm{T}}RK & -K^{\mathrm{T}}RK \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \mathrm{d}t > \\ & -x^{\mathrm{T}}(0)P_1x(0) - e^{\mathrm{T}}(0)P_2e(0) - \\ & \int_{-d}^{0} x(t)Sx(t)\mathrm{d}t \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} J = {} & \int_0^{\infty} [x(t)^{\mathrm{T}}Qx(t) + u(t)^{\mathrm{T}}Ru(t)]\mathrm{d}t < \\ & x^{\mathrm{T}}(0)P_1x(0) + e^{\mathrm{T}}(0)P_2e(0) + \\ & \int_{-d}^{0} x(t)Sx(t)\mathrm{d}t \end{aligned}$$

□

定理 2　如果存在 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3 > 0$, 使得如下矩阵不等式成立

$$
\Xi = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & \Xi_{12} & P_1A_1 + \epsilon_1^{-1}L^{\mathrm{T}}E_3 \\ \Xi_{21} & \Xi_{22} & P_2A_1 + \epsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}E_3 \\ \Xi_{31} & \Xi_{32} & \Xi_{33} \end{bmatrix} < 0
$$

其中

$$
\begin{aligned}
\Xi_{11} &= Q + K^{\mathrm{T}}RK + S + (A - BK)^{\mathrm{T}}P_1 + P_1(A - BK) + \epsilon_1 P_1DD^{\mathrm{T}}P_1 + \epsilon_2 P_2DD^{\mathrm{T}}P_2 + \epsilon_1^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}\Gamma \\
\Xi_{12} &= P_1BK - K^{\mathrm{T}}RK + \epsilon_1^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}H \\
\Xi_{21} &= (P_1BK - K^{\mathrm{T}}RK)^{\mathrm{T}} + \epsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}\Gamma \\
\Xi_{22} &= T + \epsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}H + \epsilon_2^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}\Gamma + \epsilon_3 P_2DD^{\mathrm{T}}P_2 \\
\Xi_{31} &= A_1^{\mathrm{T}}P_1 + \epsilon_1^{-1}E_3^{\mathrm{T}}\Gamma \\
\Xi_{32} &= A_1^{\mathrm{T}}P_2 + \epsilon_1^{-1}E_3^{\mathrm{T}}H \\
\Xi_{33} &= -S + (\epsilon_1 + \epsilon_3)^{-1}E_3^{\mathrm{T}}E_3 \\
\Gamma &= (E_1 - E_2K), \quad H = E_2K
\end{aligned}
$$

则闭环增广系统(8) 是渐近稳定的, 并存在保代价控制器。

证明　将式(6) 改写成

$$
Y = \begin{bmatrix} Q + K^{\mathrm{T}}RK + S + (A - BK)^{\mathrm{T}}P_1 + P_1(A - BK) & P_1RK - K^{\mathrm{T}}RK & P_1A_1 \\ (P_1BK)^{\mathrm{T}} - K^{\mathrm{T}}RK & T & P_2A_1 \\ A_1^{\mathrm{T}}P_1 & A_1^{\mathrm{T}}P_2 & -S \end{bmatrix}
$$

$$
\begin{aligned}
\Xi = {} & Y + \begin{bmatrix} P_1D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F \begin{bmatrix} E_1 - E_2K & E_2K & E_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 - E_2K & E_2K & E_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} F^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} P_1D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \\
& \begin{bmatrix} P_2D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F \begin{bmatrix} 0 & E_1 - E_2K & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & E_1 - E_2K & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} F^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} P_2D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \\
& \begin{bmatrix} 0 \\ P_2D \\ 0 \end{bmatrix} F \begin{bmatrix} 0 & 0 & E_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & E_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} F^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} 0 \\ P_2D \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}
\end{aligned}
$$

由文献[9] 中引理 2.4 知 $\Xi < 0$, 当且仅当存在 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$, 使得

$$
\begin{aligned}
& Y + \epsilon_1 \begin{bmatrix} P_1D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \epsilon_1^{-1}\begin{bmatrix} E_1 - E_2K & E_2K & E_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \times \begin{bmatrix} E_1 - E_2K & E_2K & E_3 \end{bmatrix} + \\
& \epsilon_2 \begin{bmatrix} P_2D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \epsilon_2^{-1}\begin{bmatrix} 0 & E_1 - E_2K & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} 0 & E_1 - E_2K & 0 \end{bmatrix} + \\
& \epsilon_3 \begin{bmatrix} 0 \\ P_2D \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ P_2D \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \epsilon_3^{-1}\begin{bmatrix} 0 & 0 & E_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} 0 & 0 & E_3 \end{bmatrix} < 0
\end{aligned}
$$

即

$$
Y + \begin{bmatrix} \epsilon_1 P_1DD^{\mathrm{T}}P_1 + \epsilon_2 P_2DD^{\mathrm{T}}P_2 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_3 P_2DD^{\mathrm{T}}P_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}\Gamma & \epsilon_1^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}H & \epsilon_1^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}E_3 \\ \epsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}\Gamma & \epsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}H + \epsilon_2^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}\Gamma & \epsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}E_3 \\ \epsilon_1^{-1}E_3^{\mathrm{T}}\Gamma & \epsilon_1^{-1}E_3^{\mathrm{T}}H & (\epsilon_1 + \epsilon_3)^{-1}E_3^{\mathrm{T}}E_3 \end{bmatrix} < 0 \quad \square
$$

定理 3　若存在 $P_1 = P_2 = P$, 则闭环增广系统(8) 渐近稳定并存在保代价控制器的充分条件为: 存在正定对称矩阵 $X, Y \in \mathbf{R}^{n\times n}$, 矩阵 $\Phi \in \mathbf{R}^{m\times n}$ 以及 $\epsilon_1, \epsilon_2 > 0$, 使得如下线性矩阵不等式成立

$$
\begin{bmatrix}
\hat{\Theta}_{11} & B\Phi & A_1 & (E_1X - E_2\Phi)^{\mathrm{T}} & \Phi^{\mathrm{T}} & I & I \\
(B\Phi)^{\mathrm{T}} & \hat{\Theta}_{22} & A_1 & (E_2\Phi)^{\mathrm{T}} & \Phi^{\mathrm{T}} & 0 & 0 \\
A_1^{\mathrm{T}} & A_1 & -S + \epsilon_2^{-1}E_3^{\mathrm{T}}E_3 & E_3^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 \\
E_1X - E_2\Phi & E_2\Phi & E_3 & -\epsilon_1 I & 0 & 0 & 0 \\
\Phi & \Phi & 0 & 0 & -R^{-1} & 0 & 0 \\
I & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q^{-1} & 0 \\
I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S^{-1}
\end{bmatrix} < 0
$$

其中

$$
\begin{aligned}
\hat{\Theta} &= X(A - BK)^{\mathrm{T}} + (A - BK)X + \epsilon_1 DD^{\mathrm{T}} \\
\hat{\Theta}_{22} &= X(A - BK - LC)^{\mathrm{T}} + (A - BK - LC)X + \epsilon_2 DD^{\mathrm{T}}
\end{aligned}
$$

证明 若 $P_1 = P_2 = P$，则式(6) 可写成

$$
Y + \begin{bmatrix} PD \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F [E_1 - E_2K \quad E_2K \quad E_3] + [E_1 - E_2K \quad E_2K \quad E_3]^{\mathrm{T}} F^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} PD \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \begin{bmatrix} 0 \\ PD \\ 0 \end{bmatrix} F [0 \quad 0 \quad E_1 - E_2K] + [0 \quad 0 \quad E_1 - E_2K]^{\mathrm{T}} F^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} 0 \\ PD \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} < 0 \tag{10}
$$

式(10) 成立等价于下式成立

$$
Y + \varepsilon_1 \begin{bmatrix} PD \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PD \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \varepsilon_1^{-1} [E_1 - E_2K \quad E_2K \quad E_3]^{\mathrm{T}} [E_1 - E_2K \quad E_2K \quad E_3] + \varepsilon_2 \begin{bmatrix} 0 \\ PD \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ PD \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \varepsilon_2^{-1} [0 \quad 0 \quad E_3]^{\mathrm{T}} [0 \quad 0 \quad E_3] < 0
$$

即

$$
Y + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 PDD^{\mathrm{T}}P & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 PDD^{\mathrm{T}}P & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}\Gamma & \varepsilon_1^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}H & \varepsilon_1^{-1}\Gamma^{\mathrm{T}}E_3 \\ \varepsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}\Gamma & \varepsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}H & \varepsilon_1^{-1}H^{\mathrm{T}}E_3 \\ \varepsilon_1^{-1}E_3^{\mathrm{T}}\Gamma & \varepsilon_1^{-1}E_3^{\mathrm{T}}H & (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^{-1}E_3^{\mathrm{T}}E_3 \end{bmatrix} < 0 \tag{11}
$$

式(11) 又与下式等价

$$
\begin{bmatrix}
\Theta_{11} & PBK & PA_1 & (E_1 - E_2K)^{\mathrm{T}} & K^{\mathrm{T}} & I & I \\
(PBK)^{\mathrm{T}} & \Theta_{22} & PA_1 & (E_2K)^{\mathrm{T}} & K^{\mathrm{T}} & 0 & 0 \\
A_1^{\mathrm{T}}P & A_1^{\mathrm{T}}P & -S + \varepsilon_2^{-1}E_3^{\mathrm{T}}E_3 & E_3^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 \\
E_1 - E_2K & E_2K & E_3 & -\varepsilon_1 I & 0 & 0 & 0 \\
K & K & 0 & 0 & -R^{-1} & 0 & 0 \\
I & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q^{-1} & 0 \\
I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S^{-1}
\end{bmatrix} < 0 \tag{12}
$$

其中

$$\Theta_{11} = (A - BK)^{\mathrm{T}}P + P(A - BK) + \varepsilon_1 PDD^{\mathrm{T}}P$$

$$\Theta_{22} = (A - BK - LC)^{\mathrm{T}}P + P(A - BK - LC) + \varepsilon_2 PDD^{\mathrm{T}}P$$

对式(12) 分别左乘、右乘下式

$$M = \mathrm{diag}[P^{-1}, P^{-1}, I, I, I, I, I]$$

令 $X = P^{-1}$，$\Phi = KP^{-1}$，则定理得证。□

4 结 论

本文基于系统状态观测器，给出了线性不确定时滞系统的保代价控制器的设计方法。在系统满足一定的条件下，基于系统的LMI给出了系统的保代价控制器存在的充分条件。它能克服一般保代价控制问题依赖于系统可测这一不足，使之更适合于实际系统，具有一定的实际意义。

参考文献(References)：

[1] Choi H H, Chung M J. Memoryless stabilization of uncertain dynamic systems with time-varying delay states and controls[J]. *Automatica*, 1995, 31(9): 1349-1351.

[2] 程储旺. 不确定性时滞大系统的分散鲁棒 H_∞ 控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 361-366.
(Cheng C W. Decentralized robust H_∞ control of time-delay systems with uncertainty[J]. *Acta Autom Sinica*, 2001, 27(3): 361-366.)

[3] 郑连伟, 刘晓平, 黄公胜. 一类不确定线性时滞系统的输出反馈鲁棒镇定[J]. 控制与决策, 2001, 16(4): 439-442.
(Zheng L W, Liu X P, Huang G S. Output feedback robust stabilization of a kind of linear time-delay systems with uncertainty[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(4): 439-442.)

[4] 王景成, 李志虎, 邵惠鹤. 一类不确定时滞系统的时滞依赖鲁棒可靠镇定[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(5): 779-781.
(Wang J C, Li Z H, Shao H H. Robust reliable stabilization of a kind of time-delay systems with uncertainty[J]. *Control Theory Appl*, 2001, 18(5): 779-781.)

[5] Chang S S L, Peng T K C. Adaptive guaranteed cost control of systems with uncertain parameters[J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 1972, 17(4): 474-483.

[6] Yu Li, Chu J. An LMI approach to guaranteed cost control of linear time-delay systems[J]. *Automatica*, 1999, 35(6): 1155-1159.

[7] 薛安克, 孙优贤. 不确定线性系统保代价控制的鲁棒性分析[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 346-351.

(下转第 88 页)

较长一段时间后标的资产价格变化的概率分布是对数正态分布,标的资产价格变动率等于 1 年内标的资产连续复利收益的标准差[10]。因此可根据历史数据估计 σ_c。σ_v 为 v 的变动率的标准差,估计方法与 σ_c 相同。

ρ 为 c 和 v 的瞬时相关系数,假设为常数,可根据历史数据确定。r 为连续折现的无风险利率,也假设为常数,它存在于风险中性的世界。风险中性世界中的投资不需要某种补偿促使投资承担风险。

由式(11)知,$\frac{1}{a-1}$ 与 α_v, σ_c 和 σ_v 正相关,与 α_c 和 ρ 负相关。

当 $v \geq \frac{a}{a-1}c$,即 $v - c \geq \frac{1}{a-1}c$ 时,$\frac{1}{a-1}$ 越大,即 α_v, σ_v, σ_c 越大,ρ 越小。此时投资收益高,投资价值变动率标准差大,风险高,生产要素市场风险也大,从而产业投资期权价值高,产业可获得更多的投资。随着 c 的增加,上述状况将得以调整,直至 c 减少。同时,α_c 减小,市场投资稀缺,产业投资会进一步增加。

当 $v < \frac{a}{a-1}c$,即 $v - c < \frac{1}{a-1}c$ 时,$\frac{1}{a-1}$ 越小,即 α_v, σ_v, σ_c 越小,ρ 越大。此时投资收益低,投资价值变动率标准差小,风险低,生产要素市场风险也小;而 α_c 越大,投资收益要求越高,从而产业投资活动相对稳定,等待信息的迹象明显。但在 $NPV = (v - c) - f \geq 0$ 的情况下,若投资收益明显,则可进一步投资。

5 结 论

运用期权的思想可以描述产业投资行为。在产业投资决策中,投资行为相当于看涨期权,执行价格为投资费用,标的价格为产业投资带来的净折现值。假定产业中一类投资具有相似技术条件和相似管理水平等同质性,便可得到与项目投资决策类似的期权模型。

本文在产业投资决策的期权模型的基础上,提出了产业投资结构的控制与优化的新思路。虽然仍需进一步实证研究,但作者认为产业投资决策期权模型及产业投资结构的控制与优化具有重要的现实意义,必将对产业经济的发展产生积极的作用。

参考文献(References):

[1] Schwartz E S. The stochastic behavior of commodity prices: Implication for valuation and hedging[J]. *J Finance*, 1997, 92(3): 923-973.

[2] Bernanke B. Irreversibility and cyclical investment[J]. *Quarterly J Economics*, 1983, 98(1): 85-106.

[3] McDonald R, Siegel D. Investment and the valuation of firm when there is an option to shut down[J]. *Int Economic Review*, 1985, 26(3): 331-349.

[4] Majd S, Pindyck R. Time to build, option vale and investment decisions[J]. *J Financial Economics*, 1987, 18(1): 7-27.

[5] Pindyck R S. Irreversibility, uncertainty and investment[J]. *J Economic Literature*, 1991, 29(3): 1110-1148.

[6] Dixit A, Pindyck R. The options approach to capital investment[J]. *Harvard Business Review*, 1995, 73(5): 87-93.

[7] 范龙振, 唐国兴. 投资机会的价值与投资决策——几何布朗运动模型[J]. 系统工程学报, 1998, 13(3): 8-12 (Fan L Z, Tang G X. The value of investment opportunity and investment decision — Geometric Brownian motion model[J]. *J of Systems Engineering*, 1998, 13(3): 8-12)

[8] Prahalad G Hamel. The core competence of the corporation[J]. *Harvard Business Review*, 1990, 68(5): 79-91.

[9] Porter M E. *Competitive Advantage*[M]. New York: Free Press, 1985. 18-110.

[10] 赫尔. 期权、期货和衍生证券[M]. 张陶伟译. 北京: 华夏出版社, 1997.

(上接第 84 页)

(Xue A K, Sun Y X. Robustness analysis of guaranteed cost control of uncertain linear systems[J]. *Acta Autom Sinica*, 2001, 27(3): 346-351.)

[8] Mahmoud M S, Xie L. Guaranteed cost control of uncertain discrete systems with delays[J]. *Int J Control*, 2000, 73(2): 105-114.

[9] Xie L. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainty[J]. *Int J Control*, 1996, 63(5): 741-750.