第 30 卷 第 8 期　　控 制 与 决 策　　2015 年 8 月
Vol. 30 No. 8　　Control and Decision　　Aug. 2015

文章编号: 1001-0920 (2015) 08-1519-04　　DOI: 10.13195/j.kzyjc.2014.0984

基于 Razumikhin 方法的随机时变时滞非线性系统的状态反馈

王天成, 李　刚

(鲁东大学 数学与统计科学学院，山东 烟台 264025)

摘　要: 采用 Razumikhin 方法研究一类随机时变时滞非线性系统的状态反馈镇定问题. 利用随机系统的 Razumikhin-Mao 理论和反推设计方法, 设计系统的状态反馈控制器, 所设计的控制器能保证闭环系统的平衡点为依概率全局渐近稳定的. 所提出的方法能够彻底地去掉关于随机时变时滞非线性系统传统结果中所要求的时滞导数的限制. 仿真示例验证了所提出状态反馈控制器的有效性.

关键词: 时变时滞；随机非线性系统；Razumikhin 定理；状态反馈；镇定

中图分类号: TP273　　**文献标志码:** A

State feedback of stochastic nonlinear systems with time-varying delay base on Razumikhin-type approach

WANG Tian-cheng, *LI Gang*

(School of Mathematics and Statistical Science，Ludong University，Yantai 264025，China. Correspondent：WANG Tian-cheng，E-mail：cumt_wtc@163.com)

Abstract: The Razumikhin-type approach is introduced to solve the state feedback stabilization problem for a class of stochastic nonlinear systems with time-varying delay. Based on the Razumikhin-Mao theorem on stochastic systems and the backstepping design method, a state feedback controller is constructed to ensure the origin of closed-loop system globally asymptotically stable in probability. The limitations on the derivative of delay can be completely removed, which is the common assumption of stochastic nonlinear systems with time-varying delay. A simulation example is given to illustrate the effectiveness of the state feedback controller.

Keywords: time-varying delay；stochastic nonlinear systems；Razumikhin theorem；state feedback；stabilization

0 引　言

时滞和随机现象在实际控制系统中广泛存在, 时滞的出现使得随机控制系统的分析和设计变得更加困难[1-3]. 随机时滞非线性系统的稳定性问题是近年来的研究热点之一, 对此问题的研究, 既有重要理论价值, 又有较强的实际意义[4-5].

本文考虑如下一类随机时变时滞非线性系统:

$$\begin{cases} \mathrm{d}x_i(t) = \\ (x_{i+1}(t) + f_i(\bar{x}_i(t), \bar{x}_i(t-\tau(t))))\mathrm{d}t + \\ g_i^{\mathrm{T}}(\bar{x}_i(t), \bar{x}_i(t-\tau(t)))\mathrm{d}\omega,\ i = 1, 2, \cdots, n-1; \\ \mathrm{d}x_n(t) = \\ (u(t) + f_n(\bar{x}_n(t), \bar{x}_n(t-\tau(t))))\mathrm{d}t + \\ g_n^{\mathrm{T}}(\bar{x}_n(t), \bar{x}_n(t-\tau(t)))\mathrm{d}\omega; \\ x(t) = \zeta \in \mathcal{C}^b_{\mathcal{F}_0}([-\tau, 0]; \boldsymbol{R}^n),\ -\tau \leqslant t \leqslant 0. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \cdots, x_n(t))^{\mathrm{T}} \in \boldsymbol{R}^n$, $u(t) \in \boldsymbol{R}$ 分别为系统的可测状态和控制输入; $\bar{x}_i(t) = (x_1(t), x_2(t), \cdots, x_i(t))^{\mathrm{T}}$, $\bar{x}_i(t-\tau(t)) = (x_1(t-\tau(t)), x_2(t-\tau(t)), \cdots, x_i(t-\tau(t)))^{\mathrm{T}}$; $\bar{x}_n(t) = x(t)$; 时变状态时滞 $\tau(t)$ 是 Borel 可测函数, 满足 $0 \leqslant \tau(t) \leqslant \tau$; ω 为定义在概率空间 $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ 上的 m 维标准 Wiener 过程, Ω、$\mathcal{F}$、P 分别为样本空间、σ 代数域和概率测度; 函数 $f_i : \boldsymbol{R}^i \times \boldsymbol{R}^i \to \boldsymbol{R}$ 和 $g_i : \boldsymbol{R}^i \times \boldsymbol{R}^i \to \boldsymbol{R}^m$ 关于 $(\bar{x}_i(t), \bar{x}_i(t-\tau(t)))$ 是局部 Lipschitz 的, 并且 $f_i(0,0) = 0$, $g_i(0,0) = 0$, $i = 1, 2, \cdots, n$; $\mathcal{C}^b_{\mathcal{F}_0}([-\tau, 0]; \boldsymbol{R}^n)$ 定义为 $\mathcal{F}_0$ 可测 $\mathcal{C}([-\tau, 0]; \boldsymbol{R}^n)$ 有界随机变量 $\zeta = \{\zeta(\theta) : -\tau \leqslant \theta \leqslant 0\}$ 集合.

由于时滞和随机问题的复杂性, 针对 $\tau(t)$ 为时变函数的研究成果较少, 而针对时滞 $\tau(t)$ 为常数的研究

收稿日期: 2014-06-20；**修回日期:** 2015-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11371226)；山东省自然科学基金项目(ZR2012FL15)；山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2013DX001).

作者简介: 王天成(1967−), 男, 教授, 博士, 从事随机非线性控制等研究；李刚(1989−), 男, 硕士生, 从事随机控制的研究.

已有众多成果, 这其中更多的作者是讨论输出反馈的控制器设计问题[7-9]. 最近, 有学者将系统 (1) 推广至高阶系统, 解决了常数时滞高阶非线性系统[10]和时变时滞高阶非线性系统[11-12]的状态反馈和输出反馈镇定问题. 以往研究主要利用Lyapunov稳定性的直接方法, 这导致时变时滞函数的导数难以处理, 需要给出 $\dot\tau(t)\leqslant\gamma<1$ 的条件限制[11-12]. 显然这个条件过于苛刻, 限制了所得结果的推广和应用.

本文采用Razumikhin方法, 讨论随机时滞非线性系统 (1) 的状态反馈镇定问题, 同时去掉关于时变时滞导数的限制条件. 本文设计的控制器能够使系统的平衡点依概率全局渐近稳定.

1 预备知识

如下记号贯穿本文. $\mathrm{Tr}\{X\}$ 为方阵 X 的迹, $|X|$ 为欧几里得空间中向量的2范数, $\mathcal{C}^i$ 为相应定义域上的 i 阶连续可微函数, $\mathcal{C}^{1,2}([-\tau,\infty)\times\boldsymbol{R}^n;\boldsymbol{R}_+)$ 为 $[-\tau,\infty)\times\boldsymbol{R}^n$ 上的非负函数 $V(t,x)$, 其关于 t 是 $\mathcal{C}^1$ 的且关于 x 是 $\mathcal{C}^2$, $\mathcal{C}^{1,2}$ 为关于第1个分量是 $\mathcal{C}^1$ 且关于第2个分量是 $\mathcal{C}^2$ 的函数集合.

考虑如下随机时滞非线性系统:

$$\begin{aligned}\mathrm{d}x(t)=&f(t,x(t),x(t-\tau(t)))\mathrm{d}t+\\&g(t,x(t),x(t-\tau(t)))\mathrm{d}\omega,\ t\geqslant 0.\end{aligned}\tag{2}$$

初始条件

$$\{x(\theta):-\tau\leqslant\theta\leqslant 0\}=\zeta\in\mathcal{C}^b_{\mathcal{F}_0}([-\tau,0];\boldsymbol{R}^n).$$

Borel可测函数 $f:\boldsymbol{R}_+\times\boldsymbol{R}^n\times\boldsymbol{C}[-\tau,0]\to\boldsymbol{R}^n$ 和 $g:\boldsymbol{R}_+\times\boldsymbol{R}^n\times\boldsymbol{C}[-\tau,0]\to\boldsymbol{R}^{n\times m}$ 是局部Lipschitz的, 且 $f(t,0,0)\equiv g(t,0,0)\equiv 0$. 其他符号意义同系统 (1).

定义 1[9] 对于随机时滞系统 (2), 给定 $V(t,x(t))\in C^{1,2}$, 定义微分算子 $\mathcal{L}$ 为

$$\mathcal{L}V=\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial V}{\partial x}f+\frac{1}{2}\mathrm{Tr}\Big\{g^{\mathrm{T}}\frac{\partial^2 V}{\partial^2 x}g\Big\}.$$

引理 1[13] Razumikhin-Mao定理. 假设存在连续正定Lyapunov函数

$$V(t,x)\in\mathcal{C}^{1,2}([-\tau,\infty)\times\boldsymbol{R}^n;\boldsymbol{R}_+),$$

正常数 μ,p,c_1,c_2 和 $q>1$, 使得

$$c_1|x|^p\leqslant V(t,x)\leqslant c_2|x|^p,$$

并且对于 $t\geqslant 0$, 对任意 $-\tau\leqslant\theta\leqslant 0$, $x_t(\theta)=x(t+\theta)\in\mathcal{L}^p_{\mathcal{F}_t}([-\tau,0];\boldsymbol{R}^n)$, 当 $V(t+\theta,x_t(\theta))<qV(t,x(t))$ 时, 有

$$E\mathcal{L}V\leqslant-\mu EV(t,x(t)),$$

则对于所有 $\zeta\in\mathcal{C}^b_{\mathcal{F}_0}([-\tau,0];\boldsymbol{R}^n)$, 随机时滞系统 (2) 的平衡点 $x=0$ 是依概率全局渐近稳定的 (GAS). 这里 $\mathcal{L}^p_{\mathcal{F}_t}([-\tau,0];\boldsymbol{R}^n)$ 定义为 $\mathcal{F}_t$ 可测 $\mathcal{C}([-\tau,0];\boldsymbol{R}^n)$ 随机变量 $x_t(\theta)$ 集合, 且 $\sup\limits_{-\tau\leqslant\theta\leqslant 0}E|x_t(\theta)|^p<\infty$.

引理 2[10] 设 x,y 为实数, m,n 为正实数, 则对于任意 $c>0$, 如下不等式成立:

$$x^m y^n\leqslant c|x|^{m+n}+\frac{n}{m+n}\Big(\frac{m}{c(m+n)}\Big)^{m/n}|y|^{m+n}.$$

2 控制器设计与主要结果

对系统 (1) 作如下假设:

假设 1 对于 $i=1,2,\cdots,n$, 存在 $b>0$, 使得下式成立:

$$\begin{aligned}&|f_i(\bar x_i(t),\bar x_i(t-\tau(t)))|\leqslant\\&b\Big(\sum_{j=1}^{i}|x_j(t)|+\sum_{j=1}^{i}|x_j(t-\tau(t))|\Big),\\&|g_i(\bar x_i(t),\bar x_i(t-\tau(t)))|^2\leqslant\\&b\Big(\sum_{j=1}^{i}|x_j(t)|^2+\sum_{j=1}^{i}|x_j(t-\tau(t))|^2\Big).\end{aligned}$$

注 1 与文献 [11-12] 中的结果比较, 本文无需对时滞的导数作限制, 极大地推广了适用范围.

下面, 利用反推技术, 在假设1的条件下为系统 (1) 设计全局渐近稳定的状态反馈控制器. 为了简便, 记 $x_i=x_i(t),\xi_i=\xi_i(t)$, $\eta_i=\eta_i(t)=\xi_i(t-\tau(t))$, $i=1,2,\cdots,n$.

第1步. 定义 $\xi_1=x_1$, 选取Lyapunov函数 $V_1(\xi_1)=\dfrac{1}{4}\xi_1^4$, 由系统 (1)、假设1和引理2, 有

$$\begin{aligned}\mathcal{L}V_1(\xi_1)=&\xi_1^3(x_2+f_1(x_1,x_1(t-\tau(t))))+\\&\frac{3}{2}\xi_1^2|g_1(x_1,x_1(t-\tau(t)))|^2\leqslant\\&\xi_1^3(x_2-x_2^*)+\xi_1^3x_2^*+b|\xi_1|^3(|\xi_1|+|\eta_1|)+\\&\frac{3}{2}b|\xi_1|^2(|\xi_1|^2+|\eta_1|^2)\leqslant\\&\xi_1^3(x_2-x_2^*)+\xi_1^3x_2^*+\frac{5b}{2}\xi_1^4+c_1\xi_1^4+\frac{1}{n}\eta_1^4,\end{aligned}$$

其中

$$c_1=\frac{3b}{4}\Big[\Big(\frac{nb}{2}\Big)^{\frac{1}{3}}+\frac{3nb}{2}\Big].$$

显然, 选取虚拟控制器

$$x_2^*=-\Big(\lambda+n-1+\frac{5b}{2}+c_1\Big)\xi_1=-\alpha_1\xi_1,$$

其中 $\alpha_1=\Big(\lambda+n-1+\dfrac{5b}{2}+c_1\Big)$, 则有

$$\mathcal{L}V_1(\xi_1)\leqslant-(\lambda+n-1)\xi_1^4+\xi_1^3(x_2-x_2^*)+\frac{1}{n}\eta_1^4.$$

此时 $\lambda>0$ 是待设计的常数.

归纳步. 假设在第 $k-1$ 步 $(2\leqslant k\leqslant n)$, 有正定Lyapunov函数 $V_{k-1}(\bar\xi_{k-1})=\dfrac{1}{4}\sum\limits_{i=1}^{k-1}\xi_i^4$ 和如下的虚拟控制器 $x_1^*,x_2^*,\cdots,x_k^*$:

$$\left\{\begin{aligned}&x_1^*=0,\ \xi_1=x_1-x_1^*=x_1;\\&x_2^*=-\alpha_1\xi_1,\ \xi_2=x_2-x_2^*=x_2+\alpha_1\xi_1;\\&\quad\vdots\\&x_k^*=-\alpha_{k-1}\xi_{k-1},\ \xi_k=x_k-x_k^*=x_k+\alpha_{k-1}\xi_{k-1}.\end{aligned}\right.\tag{3}$$

这里 $\alpha_i\ (1\leqslant i\leqslant k-1)$ 是正常数, 使得

$$\mathcal{L}V_{k-1}(\bar{\xi}_{k-1})\leqslant-\sum_{i=1}^{k-1}(\lambda+n-k+1)\xi_i^4+\xi_{k-1}^3(x_k-x_k^*)+\frac{k-1}{n}\sum_{i=1}^{k-1}\eta_i^4. \tag{4}$$

由系统 (1) 和虚拟控制器 (3), 得到如下新系统:

$$\mathrm{d}\xi_i=\Big(x_{i+1}+\sum_{j=2}^{i}\alpha_{i-1}\times\cdots\times\alpha_{j-1}x_j+f_i+\sum_{j=1}^{i-1}\alpha_{i-1}\times\cdots\times\alpha_j f_j\Big)\mathrm{d}t+\Big(g_i^{\mathrm{T}}+\sum_{j=1}^{i-1}\alpha_{i-1}\times\cdots\times\alpha_j g_j^{\mathrm{T}}\Big)\mathrm{d}\omega. \tag{5}$$

考虑第 k 步时的 Lyapunov 函数

$$V_k(\bar{\xi}_k)=V_{k-1}(\bar{\xi}_{k-1})+\frac{1}{4}\xi_k^4,$$

由式 (3) ~ (5), 有

$$\begin{aligned}\mathcal{L}V_k(\bar{\xi}_k)\leqslant&-\sum_{i=1}^{k-1}(\lambda_i+n-k+1)\xi_i^4+\xi_{k-1}^3(x_k-x_k^*)+\frac{k-1}{n}\sum_{i=1}^{k-1}\eta_i^4+\xi_k^3x_{k+1}+\\&\xi_k^3\sum_{i=2}^{k}\alpha_{k-1}\times\cdots\times\alpha_{i-1}x_i+\xi_k^3f_k+\xi_k^3\sum_{i=1}^{k-1}\alpha_{k-1}\times\cdots\times\alpha_i f_i+\\&\frac{3}{2}\xi_k^2\Big|g_k+\sum_{i=1}^{k-1}\alpha_{k-1}\times\cdots\times\alpha_i g_i\Big|^2.\end{aligned} \tag{6}$$

利用文献 [10] 中的相似方法, 由引理 2 和假设 1, 得到

$$\xi_{k-1}^3(x_k-x_k^*)\leqslant\frac{1}{5}\xi_{k-1}^4+c_{k,1}\xi_k^4,$$

$$\xi_k^3\sum_{i=2}^{k}\alpha_{k-1}\times\cdots\times\alpha_{i-1}x_i\leqslant\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{k-1}\xi_i^4+c_{k,2}\xi_k^4,$$

$$\xi_k^3f_k\leqslant\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{k-1}\xi_i^4+c_{k,3}\xi_k^4+\frac{1}{3n}\sum_{i=1}^{k-1}\eta_i^4+\frac{k}{2n}\eta_k^4,$$

$$\xi_k^3\sum_{i=1}^{k-1}\alpha_{k-1}\times\cdots\times\alpha_i f_i\leqslant\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{k-1}\xi_i^4+c_{k,4}\xi_k^4+\frac{1}{3n}\sum_{i=1}^{k-1}\eta_i^4,$$

$$\frac{3}{2}\xi_k^2\Big|g_k+\sum_{i=1}^{k-1}\alpha_{k-1}\times\cdots\times\alpha_i g_i\Big|^2\leqslant\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{k-1}\xi_i^4+c_{k,5}\xi_k^4+\frac{1}{3n}\sum_{i=1}^{k-1}\eta_i^4+\frac{k}{2n}\eta_k^4,$$

其中 $c_{k,1},c_{k,2},\cdots,c_{k,5}$ 是正常数. 将上式代入不等式 (6), 得到

$$\mathcal{L}V_k(\bar{\xi}_k)\leqslant-\sum_{i=1}^{k-1}(\lambda+n-k)\xi_i^4+\frac{k}{n}\sum_{i=1}^{k}\eta_i^4+\xi_k^3(x_{k+1}-x_{k+1}^*)+\xi_k^3x_{k+1}^*+\xi_k^4(c_{k,1}+\cdots+c_{k,5}).$$

令

$$x_{k+1}^*=-\xi_k(\lambda+n-k+c_{k,1}+\cdots+c_{k,5})=-\alpha_k\xi_k, \tag{7}$$

其中 $\alpha_k=\lambda+n-k+c_{k,1}+\cdots+c_{k,5}$, 则有

$$\mathcal{L}V_k(\bar{\xi}_k)\leqslant-\sum_{i=1}^{k}(\lambda+n-k)\xi_i^4+\frac{k}{n}\sum_{i=1}^{k}\eta_i^4+\xi_k^3(x_{k+1}-x_{k+1}^*). \tag{8}$$

第 n 步. 对系统 (1) 考虑 Lyapunov 函数

$$V(\xi)=V_n(\bar{\xi}_n)=V_{n-1}(\bar{\xi}_{n-1})+\frac{1}{4}\xi_n^4=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\xi_i^4. \tag{9}$$

由式 (7) 和 (8), 得到

$$\mathcal{L}V(\xi)=\mathcal{L}V_n(\bar{\xi}_n)\leqslant-\sum_{i=1}^{n}\lambda\xi_i^4+\sum_{i=1}^{n}\eta_i^4+\xi_n^3(u-x_{n+1}^*).$$

系统 (1) 的状态反馈控制器取为

$$u=x_{n+1}^*=-\xi_n(\lambda+c_{n,1}+\cdots+c_{n,5})=-\alpha_n\xi_n, \tag{10}$$

这里 $\alpha_n=\lambda+c_{n,1}+\cdots+c_{n,5}$, 可以得到

$$\mathcal{L}V(\xi)=\mathcal{L}V_n(\bar{\xi}_n)\leqslant-\sum_{i=1}^{n}\lambda\xi_i^4+\sum_{i=1}^{n}\eta_i^4.$$

当

$$V(\xi(t-\tau(t)))=V(\eta(t))<qV(\xi(t)), \tag{11}$$

即 $\sum_{i=1}^{n}\eta_i^4<q\sum_{i=1}^{n}\xi_i^4$ 时, 有

$$\mathcal{L}V(\xi)\leqslant-(\lambda-q)\sum_{i=1}^{n}\xi_i^4(t)=-\mu V(\xi), \tag{12}$$

这里 $\mu=4(\lambda-q)$. 令 $\lambda>1$, 则必存在 $q>1$, 使 $\mu=4(\lambda-q)>0$.

依据上述反推技术, 得到本文的主要结果.

定理 1　若假设 1 成立, 则在状态反馈控制器 (10) 下, 随机时变时滞非线性系统 (1) 在 $[-\tau,\infty)$ 上几乎处处存在唯一解, 并且其平衡点 $x=0$ 是依概率全局渐近稳定的.

证明　首先, 由式 (3) 和 (10), 有

$$u=-\alpha_n(x_n+\alpha_{n-1}x_{n-1}+\cdots+\alpha_{n-1}\times\cdots\times\alpha_1x_1).$$

由于 $f_i,g_i\ (i=1,2,\cdots,n)$ 满足局部 Lipschitz 条件, 闭环系统 (1) 和 (10) 是局部 Lipschitz 的, 因此随机时滞非线性系统 (1) 在 $[-\tau,\infty)$ 上几乎处处存在唯一解. 其次, 由式 (9)、(11) 和 (12), 可知引理 1 的条件满足,

根据引理1, 系统(5)的平衡点$\xi=0$是依概率全局渐近稳定的, 又由式(3), 得到系统(1)的平衡点$x=0$也是依概率全局渐近稳定的, 由此定理得证. □

注2 值得指出的是, Razumikhin方法首次被用来讨论此类随机时变时滞系统(1)的稳定性和控制器设计问题. 主要困难在于引理1的条件较难验证, 这也是本文的主要创新点.

3 仿真示例

下面给出一个示例来说明本文设计方法的有效性. 考虑如下系统:

$$\begin{cases} \mathrm{d}x_1 = \\ x_2\mathrm{d}t + (x_1(t) + x_1(t-1.5|\sin t|))\mathrm{d}t + x_1(t)\mathrm{d}\omega, \\ \mathrm{d}x_2 = \\ u\mathrm{d}t + x_2(t-1.5|\sin t|)\mathrm{d}t + x_2(t-1.5|\sin t|))\mathrm{d}\omega. \end{cases} \tag{13}$$

由于时滞$\tau(t)=1.5|\sin t|$, 用以往方法无法解决其镇定问题. 这里

$$|f_1(x_1(t), x_1(t-\tau(t)))| \leqslant |x_1(t-\tau(t))| + |x_1(t)|,$$
$$|f_2(\bar{x}_2(t), \bar{x}_2(t-\tau(t)))| = |x_2(t-\tau(t))|,$$
$$|g_1(x_1)| = |x_1(t)|,$$
$$|g_2(\bar{x}_2(t-\tau(t)))| = |x_2(t-\tau(t))|.$$

显然, 假设1满足($b=1$), 利用第2节的设计方法, 令$\lambda=1.1$, 得到

$$u = -121(x_2 + 6.1x_1). \tag{14}$$

选取初始值$x_1(\theta)=0.2$和$x_2(\theta)=0.4\,(-1.5\leqslant\theta\leqslant 0)$, 图1和图2分别给出了闭环系统(13)和(14)的状态响应曲线和控制响应曲线, 图中曲线说明了状态反馈设计方法的有效性.

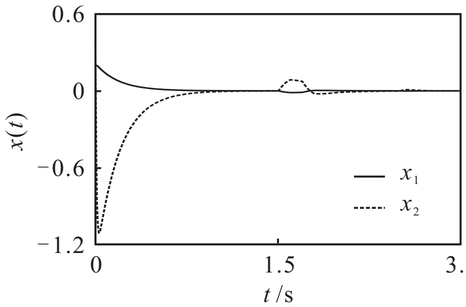

图1 状态响应曲线

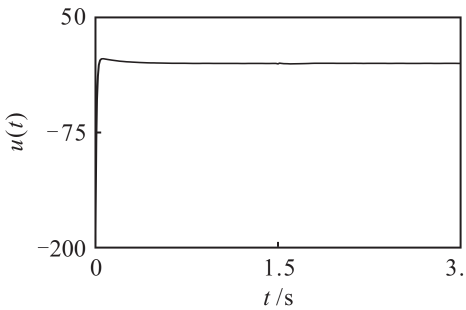

图2 控制响应曲线

4 结 论

本文利用Razumikhin方法, 反推和增加幂次积分器技术, 讨论随机时变时滞非线性系统的状态反馈镇定问题, 所设计的控制器能够使系统的平衡点依概率全局渐近稳定. 如何将本文的方法推广至高阶系统以及阶次不等的高阶系统, 是下一步的研究工作.

参考文献(References)

[1] Hales J K, Lunel S M V. Introduction to functional differential equations[M]. New York: Springer-Verlag, 1993: 126-140.

[2] Gu K, Kharitonov V L, Chen J. Stability of time-delay systems[M]. Boston: Birkhauser, 2003: 82-124.

[3] Arnold L. Stochastic differential equations: Theory and applications[M]. NewYork: Wiley, 1972: 91-130.

[4] Michiels W, Niculescu S L. Stability and stabilization of time-delay systems: An eigenvalued-based approach[M]. Philadelphia: SIAM, 2007: 5-46.

[5] Boukas E K, Liu Z K. Deterministic and stochastic time delay systems[M]. Boston: Birkhauser, 2002: 11-50.

[6] Nguang S K. Robust stabilization of a class of time-delay nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(4): 756-762.

[7] Fu Y S, Tian Z H, Shi S J. Output feedback stabilization for stochastic time-delay nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(6): 847-851.

[8] Xie L, He X, Xiong G. Decentralized output feedback stabilization for large scale stochastic nonlinear system with time delays[J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(6): 825-830.

[9] Liu S J, Ge S S, Zhang J F. Adaptive output-feedback control for a class of uncertain stochastic nonlinear systems with time delay[J]. Int J of Control, 2008, 81(8): 1210-1220.

[10] Chen W S, Wu J, Jiao L C. State-feedback stabilization for a class of stochastic time-delay nonlinear systems[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2012, 22(11): 1921-1937.

[11] Liu L, Xie X J. Output-feedback stabilization for stochastic high-order nonlinear systems with time-varying delay[J]. Automatica, 2011, 47(12): 2772-2779.

[12] Xie X J, Liu L. A homogeneous domination approach to state feedback of stochastic high-order nonlinear systems with time-varying delay[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2013, 58(2): 494-499.

[13] Mao Xue rong. Razumikhin-type theorems on exponential stability of stochastic functional differential equations[J]. Stochastic Processes And Applications, 1996, 65(2): 233-250.

(责任编辑：齐 霁)