

文章编号: 1000-8152(2008)01-0091-04

基于GFRF的二次调节流量耦联系统的频域非线性 H_∞ 控制

姜继海, 刘海昌, OKOYE Celestine

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 二次调节流量耦联系统为非线性系统, 在 Volterra 级数描述该系统的基础上, 通过 SISO 多项式类非线性系统的 GFRF 递推算式获得二次调节流量耦联系统的广义频率响应函数 GFRF (generalized frequency response function). 基于系统的 GFRF, 在频域内应用非线性控制理论为系统设计了镇定控制器和非线性 H_∞ 控制器, 不仅使系统稳定, 而且能达到无超调、无稳态误差. 此外, 在白噪声条件下证明该控制器比线性控制器抗干扰性强.

关键词: 广义频域响应函数; 流量耦联系统; Volterra 级数; 非线性 H_∞ 控制; 频域

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Nonlinear H-infinity control of flow-coupled system with secondary regulation using GFRF in frequency domain

JIANG Ji-hai, LIU Hai-chang, OKOYE Celestine

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The flow-coupled system with secondary regulation was a nonlinear system. Its generalized frequency response function (GFRF) was obtained through the iterative method of SISO system using Volterra series. On the basis of GFRF, the stabilized controller and the nonlinear H-infinity controller were designed by nonlinear control theory in frequency domain. The simulation results show that the system becomes stable after a linear controller was added. The nonlinear H-infinity controllers eliminate the system steady error and overshoot. They are working better in rejecting white noise disturbances than the linear H-infinity controller.

Key words: generalized frequency response function; flow-coupled system; Volterra series; nonlinear H-infinity control; frequency domain

1 引言 (Introduction)

二次调节流量耦联系统是把二次调节静液传动技术从恒压网络的压力耦联扩展到交变载荷的流量耦联的一种新型液压节能控制系统. 它实现了液压抽油机、卷绕装置和起重装置等的位能回收和重新利用, 使系统效率显著提高. 在能源日益紧缺的今天, 二次调节流量耦联系统具有重要的理论意义和实际应用价值. 由于二次调节流量耦联系统是非线性系统, 以前非线性控制理论不太完善, 通常的控制方法是利用通过泰勒展开得到的近似线性模型, 应用线性控制理论对系统进行综合分析, 虽然这种方法简单易用, 但忽略了系统的非线性特性, 有其局限性. 随着非线性系统控制理论的蓬勃发展, 很多专家尝试用非线性系统理论构造控制器, 取得了一定的成就. 参考文献[1,2]将微分几何方法分别应用到机器人和电机控制当中, 成功地解决了机

器和电机控制系统的非线性问题. 参考文献[3]用微分代数非线性控制方法为永磁同步电动机设计了控制器, 使系统具有快速性高、稳定性好, 无超调和抗负载扰动等. 本文利用系统广义频域响应函数 GFRF (线性系统频域响应函数在非线性的推广) 设计系统控制器. 其方法是在 Volterra 级数描述的基础上, 通过多维傅立叶变换和 SISO 多项式类非线性系统的 GFRF 递推算式获得二次调节流量耦联系统的广义频率响应函数 GFRF, 然后在频域内基于 GFRF 为系统设计了镇定控制器和非线性 H_∞ 控制器. 通过仿真与线性 H_∞ 控制器作了比较, 结果表明, 线性控制器和非线性控制器不仅使系统稳定, 而且可以大大改善超调量和稳态误差. 此外, 基于逆系统的非线性 H_∞ 控制器具有很强的抗干扰性, 这是线性 H_∞ 控制器所无法比拟的. 通过本文的研究将进一步增加对二次调节流量耦联系统及其控制规律的认

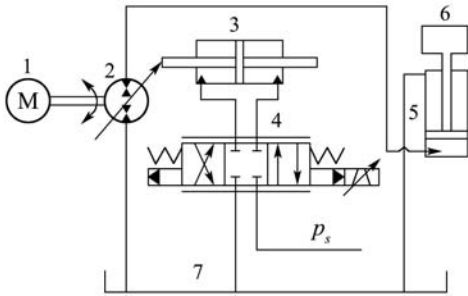
收稿日期: 2005-11-21; 收修改稿日期: 2006-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375033); 国防科技重点实验室基金项目(514570).

识,可以加快其在各行各业中的推广应用。

2 二次调节流量耦联系统模型 (Mathematical model of flow-coupled system with secondary regulation)

二次调节流量耦联系统是通过控制二次元件(液压泵/马达)的斜盘倾角来控制二次元件输出流量,从而达到控制负载液压缸速度的目的,其组成如图1所示。



1—电机; 2—二次元件; 3—变量油缸; 4—电液伺服阀;
5—负载液压缸; 6—负载; 7—油箱

图1 二次调节流量耦联系统

Fig. 1 Flow-coupled system with secondary regulation

假定: 1) 忽略油液的泄漏; 2) 油液为不可压缩流体. 则系统数学模型为:

电液伺服阀流量方程:

$$q_v = C_d w x_v \sqrt{\frac{1}{\rho}(p_s - p_L)}. \quad (1)$$

变量油缸连续性方程:

$$q_v = A_1 \frac{dy}{dt}. \quad (2)$$

变量油缸力平衡方程:

$$A_1 p_L = m \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} + K_y y. \quad (3)$$

二次元件排量方程:

$$V = \frac{V_{\max}}{y_{\max}} y. \quad (4)$$

二次元件高压腔连续性方程:

$$n_p V = A_2 v. \quad (5)$$

其中:

- q_v —变量油缸流量, (m^3/s);
- C_d —流量系数;
- y —变量油缸活塞位移, (m);
- w —伺服阀阀芯面积梯度, (m);
- x_v —伺服阀阀芯位移, (m);
- ρ —油液密度, (kg/m^3);
- p_s —伺服阀入口压力, (Pa);

p_L —变量油缸两腔压差, (Pa);

A_1 —变量油缸有效作用面积, (m^2);

m —变量油缸活塞质量, (kg);

B_c —变量油缸阻尼系数, ($\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})$);

K_y —等效弹簧刚度, (N/m);

V —二次元件的排量, (m^3/rad);

V_{\max} —变二次元件的最大排量, (m^3/rad);

y_{\max} —变变量油缸活塞最大位移, (m);

n_p —二次元件转速, (rad/s);

A_2 —负载液压缸有效作用面积, (m^2);

v —负载液压缸速度, (m/s).

3 基于GFRF的频域非线性控制理论 (Non-linear control theory in frequency domain based on GFRF)

3.1 Volterra级数和GFRF的提出 (Volterra series and GFRF)

非线性系统可由下式表示其输入输出关系:

$$y(t) = F[u(t'); t' \leq t], \quad (6)$$

将它表示成

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) \times \prod_{i=1}^n u(t - \tau_i) d\tau_i. \quad (7)$$

此为Volterra级数, Frecht应用Weierstrass多项式逼近理论证明所有连续函数都可以用上述泛函级数表示^[4,5]. 式中 $h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n)$ 称为非线性系统的 n 阶Volterra核, 或称为 n 阶广义脉冲响应函数, $y_n(t)$ 称为系统的 n 阶输出响应, 其傅立叶变换为

$$\hat{y}_n(\omega) = F(y_n)(\omega) = (2\pi)^{-(n-1)} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \hat{h}_n(\omega - \omega_2 - \cdots - \omega_n, \omega_2, \cdots, \omega_n) \hat{u}(\omega - \omega_2 - \cdots - \omega_n) \times \hat{u}(\omega_2) \cdots \hat{u}(\omega_n) d\omega_2 \cdots d\omega_n \quad n \in \mathbb{N}. \quad (8)$$

式中 \hat{y} , \hat{y}_n , \hat{u} 分别是 y , y_n , u 的傅立叶变换, 而 $\hat{h}_n(\omega_1, \cdots, \omega_n)$ 为 $h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n)$ 的多维傅立叶变换, 即定义

$$\hat{h}_n(\omega_1, \cdots, \omega_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n) \times e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \cdots + \omega_n \tau_n)} d\tau_1 \cdots d\tau_n. \quad (9)$$

$\hat{h}_n(\omega_1, \cdots, \omega_n)$ 称为 n 阶广义频率响应函数(GFRF), 是非线性系统的一种非参数模型, 有着明确的物理意义和应用价值^[6].

3.2 SISO多项式类非线性系统的GFRF递推算式(GFRF of SISO nonlinear system using iterative method)

SISO多项式类微分方程可以描述为^[5]

$$\sum_{n=1}^N \sum_{p_1=0}^M \cdots \sum_{p_n=0}^M \left[a_{n,p_1,\dots,p_n} \prod_{i=1}^n D^{p_i} y(t) + c_{n,p_1,\dots,p_n} \prod_{i=1}^n D^{p_i} u(t) + \sum_{1 \leq m \leq n-1} b_{n,m,p_1,\dots,p_n} \times \prod_{i=1}^m \prod_{k=m+1}^n D^{p_i} y(t) D^{p_k} u(t) \right]. \quad (10)$$

式中 D 表示微分算子, M 为微分方程的最大微分阶数, N 是最大的乘方次数, a, b, c 代表系统参数, $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别是系统的输入和输出变量. 令

$$A_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \sum_{p_1=0}^M \cdots \sum_{p_n=0}^M a_{n,p_1,\dots,p_n} \prod_{i=1}^n (j\omega_i)^{p_i}, \quad (11)$$

$$B_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \sum_{p_1=0}^M \cdots \sum_{p_n=0}^M \sum_{1 \leq m \leq n-1} b_{n,m,p_1,\dots,p_n} \times \prod_{i=1}^m (j\omega_i)^{p_i} \prod_{k=m+1}^n (j\omega_k)^{p_k}, \quad (12)$$

$$B_{n,m}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \sum_{p_1=0}^M \cdots \sum_{p_n=0}^M b_{n,m,p_1,\dots,p_n} \times \prod_{i=1}^m (j\omega_i)^{p_i} \prod_{k=m+1}^n (j\omega_k)^{p_k}, \quad (13)$$

$$C_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \sum_{p_1=0}^M \cdots \sum_{p_n=0}^M c_{n,p_1,\dots,p_n} \prod_{i=1}^n (j\omega_i)^{p_i}, \quad (14)$$

则其GFRF为

$$\hat{h}_1(\omega_1) = -A_1^{-1}(j\omega_1)C_1(j\omega_1), \quad (15)$$

$$\hat{h}_2(\omega_1, \omega_2) = -A_1^{-1}(j(\omega_1 + \omega_2)) \times [C_2(j\omega_1, j\omega_2) + A_2(j\omega_1, j\omega_2) \times \hat{h}_1(\omega_1)\hat{h}_1(\omega_2) + B_2(j\omega_1, j\omega_2)\hat{h}_1(\omega_1)], \quad (16)$$

⋮

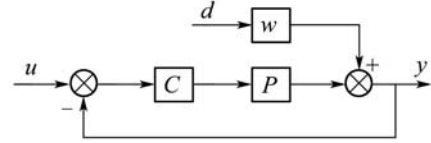
$$\hat{h}_n(\omega_1, \dots, \omega_n) = -A^{-1}(j(\omega_1 + \dots + \omega_n)) \times (C_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) + \sum_{s=2}^{\alpha_1} \sum_{k_1+k_2+\dots+k_s=n} [A_s(j(\omega_1 + \dots + \omega_{k_1}), j(\omega_{k_1+1} + \dots + \omega_{k_1+k_2}), \dots, j(\omega_{n-k_s+1} + \dots + \omega_n)) \hat{h}_{k_1}(\omega_1, \dots, \omega_{k_1}) \hat{h}_{k_2}(\omega_{k_1+1}, \dots, \omega_{k_1+k_2}) \times \dots \hat{h}_{k_s}(\omega_{n-k_s+1}, \dots, \omega_n)] + \sum_{s=1}^{\alpha_2} \sum_{k'_1+k'_2+\dots+k'_s=n-2s} [B_{2s}(j(\omega_1 + \dots + \omega_{k'_1}), j(\omega_{k'_1+1} + \dots + \omega_{k'_1+k'_2}), \dots, j(\omega_{n-2s-k'_s+1} + \dots + \omega_{n-2s}), j\omega_{n-2s+1}, \dots, j\omega_n) \times$$

$$\hat{h}_{k'_1}(\omega_1, \dots, \omega_{k'_1}) \hat{h}_{k'_2}(\omega_{k'_1+1}, \dots, \omega_{k'_1+k'_2}) \cdots \times \hat{h}_{k'_s}(\omega_{n-2s-k'_s+1}, \dots, \omega_{n-2s})) \quad k_i, k'_i \in \mathbb{N}. \quad (17)$$

4 非线性H_∞控制器设计 (Design of nonlinear H-infinity controller)

4.1 H_∞控制器设计思想(Design idea of H-infinity controller)

如图2所示的非线性闭环控制系统, 寻求合适的控制器 C , 使系统为FDBIBO稳定的, 并把非线性系统转换为线性系统或伪线性系统, 然后利用线性系统的H_∞控制方法对系统进行综合, 使干扰输入产生的输出 y 的能量为最小, 即 $\|y\|_{\infty}$ 为最小. 从图2可得到扰动输入到输出的非线性算子为 $(I+P \circ C)^{-1} \circ W$, 使得 $\|(I+P \circ C)^{-1} \circ W\|$ 最小的控制器就是所求的控制器.



P —被控制对象; W —加权函数; C —H_∞控制器;

u —输入信号; y —输出信号; d —干扰信号

图2 非线性闭环控制系统结构图

Fig. 2 Configuration of nonlinear closed-loop system

4.2 H_∞控制器设计(Design of H-infinity controller)

第1步 判断 P 是否是FDBIBO稳定的非线性算子, 如果不是, 先对系统进行镇定设计, 使得 P 为FDBIBO稳定的非线性算子. 然后可求得其闭环系统 H 的线性化算子 Q . 给定一个极小相位线性系统 G_1 , 使得 $K = P \circ Q = G_1 + \Delta K$.

整理二次调节流量耦联系统数学模型, 将其化为多项式类非线性微分方程, 并把参数 $p_s = 2 \times 10^6$ Pa, $A_1 = 1.85 \times 10^{-3}$ m², $m = 10$ kg, $K_y = 2 \times 10^4$ N/m, $V_{\max} = 6.37 \times 10^{-6}$ m³/rad, $y_{\max} = 0.014$ m, $n_p = 25$ rad/s, $A_2 = 2.82 \times 10^{-3}$ m², 代入微分方程得

$$\ddot{v} + \dot{v} - 620x_v + 6.2\ddot{v}x_v + 6.7 \times 10^3 \dot{v}x_v = 0.$$

令 $s = j\omega$, 由式(15)和(16)得系统的GFRF为

$$\hat{p}_1(s) = \frac{620}{s^2 + s},$$

$$\hat{p}_2(s_1, s_2) = 310 \times \frac{1.24 \times 10^{-2} s_1 s_2 + 6.7 \times 10^3 (s_1 + s_2) + 1.34 \times 10^4}{[(s_1 + s_2)^2 + (s_1 + s_2)](s_1 + 1)(s_2 + 1)}.$$

由参考文献[7]的判据可得系统不是FDBIBO稳定的, 所以必须首先为系统设计线性控制器使其

闭环系统是FDBIBO稳定的. 由于 $\hat{p}_1(s)$ 的分母阶次为2, 所以存在二次严格正则的线性控制器 C_0 , 不仅使闭环系统是FDBIBO稳定的, 而且闭环系统的子系统 $\hat{h}_1(s)$ 的极点可任意配置. 令 $\hat{h}_1(s)$ 的主导极点为 $-1, -1$, 远极点为 $-10, -10$, 则求得

$$\hat{c}_0(s) = \frac{0.0019s + 0.0016}{0.01s^2 + 0.21s + 1.2}.$$

从而使闭环系统 H 是FDBIBO稳定的, 它的GFRF为

$$\hat{h}_1(s) = \frac{1.2s + 1}{(s + 1)^2(0.1s + 1)^2},$$

$$\hat{h}_2(s_1, s_2) = \frac{\hat{c}_0(s_1)\hat{c}_0(s_2)\hat{p}_2(s_1, s_2)}{1 + \hat{c}_0(s_1 + s_2)\hat{p}_1(s_1 + s_2)} \times (1 - \hat{h}_1(s_1)\hat{h}_1(s_2)).$$

由于 $\hat{h}_1(s)$ 的分母比分子阶数高3阶, 所以选取极小相位线性系统 $\hat{g}_1(s) = 1/(s + 1)^3$. 假设 $\Delta K = 0$, 得 $K = G_1$, 记 $Q \triangleq Q_1 + Q_2$, 则 Q 为

$$\hat{q}_1(s) = \frac{(0.1s + 1)^2}{(s + 1)(1.2s + 1)},$$

$$\hat{q}_2(s_1, s_2) = \frac{-\hat{h}_2(s_1, s_2)\hat{q}_1(s_1)\hat{q}_1(s_2)}{\hat{h}_1(s_1 + s_2)}.$$

第2步 根据线性系统的 H_∞ 控制理论求出 H_∞ 控制器 $\tilde{q}_0 \in \Omega$, 即

$$\|W - G_1 \circ \tilde{q}_0 \circ W\|_\infty = \inf\{\|W - G_1 \circ \tilde{q}_0 \circ W\|_\infty, \forall \tilde{q}_0 \in \Omega_1\}.$$

这里 $\Omega_1 =$ (所有真的稳定的有理数), 取加权函数 $\hat{w}(s) = (s + 1)/(30s + 1)$, 扰动衰减度 $\gamma = 0.05$, 使满足 $\|W - G_1 \circ \tilde{q}_0 \circ W\|_\infty \leq 0.05$, 得到

$$\tilde{q}_0(s) = \frac{(s + 1)^2}{(0.1s + 1)^2}.$$

第3步 令 $\hat{q}_0 = Q \circ \tilde{q}_0$, 则 $C = \hat{q}_0 \circ (I - P \circ \hat{q}_0)^{-1}$ 即为所求的 H_∞ 控制器.

5 仿真(Simulation)

基于上述论述, 对系统进行仿真分析. 图3为镇定前、镇定后、设计了线性 H_∞ 控制器和非线性 H_∞ 控制器后负载液压缸速度对阶跃信号的响应, 图4为在白噪声信号干扰下, 负载液压缸速度在线性和非线性 H_∞ 控制器前后对阶跃信号的响应.

从图中可看出: 1) 二次调节流量耦联系统不是FDBIBO稳定的, 线性控制器可使系统成为FDBIBO稳定系统; 2) 线性 H_∞ 控制器和非线性 H_∞ 控制器都可以使系统的控制性能大为改善; 但线性 H_∞ 控制器略有超调; 3) 由于线性 H_∞ 控制器不是利用动态系统的“逆”的概念来设计的, 所以线性 H_∞ 控制器的抗干扰性不强; 4) 为系统设计非线性 H_∞ 控制器后, 系统无超调, 无稳态误差并且有很

好的抗干扰性.

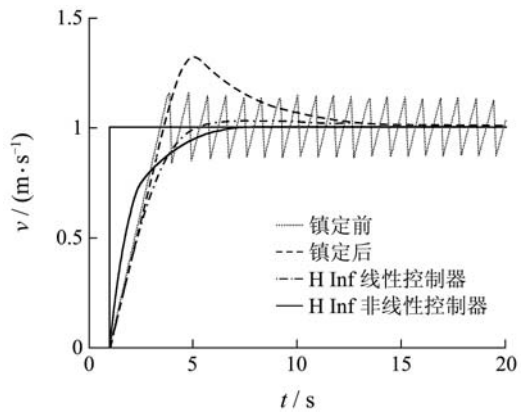


图3 阶跃信号响应图

Fig. 3 Step response of cylinder velocity

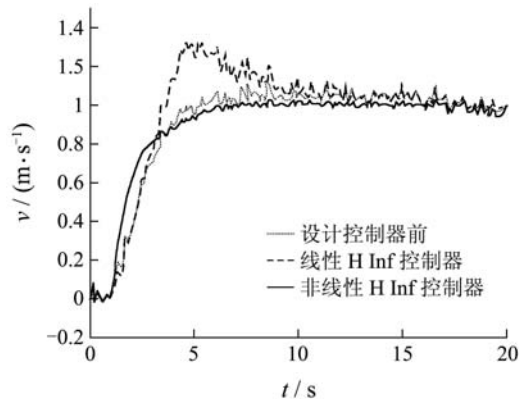


图4 白噪声干扰下的阶跃信号响应图

Fig. 4 Step response of cylinder velocity on condition of white noise

6 结论 (Conclusion)

由于频率响应法在线性系统分析和综合方面取得很大的成功, 工程师更熟悉传统的频域法来分析系统, 所以希望把线性系统频域分析方法推广到非线性控制系统中. 目前, 基于Volterra级数的非线性传递函数或广义频率响应函数为非线性系统频域研究提供了一个新的研究方法, 本文基于Volterra级数得到二次调节流量耦联系统的广义频域响应函数, 实现了利用频域响应法对非线性系统进行分析 and 综合, 为频域响应法应用于非线性系统作了有益的尝试, 仿真表明, 基于GFRF为二次调节流量耦联系统设计非线性频域 H_∞ 控制器后, 大大改善了系统动态性能, 使系统达到无超调、无稳态误差和强抗干扰性. 所以, 这种方法适用于该系统, 对改善系统的性能是行之有效的.

(下转第99页)

这一方法应用到卫星姿态控制系统的容错控制问题中, 对故障前后的卫星姿态控制系统控制过程进行了数学仿真, 仿真结果验证了文中所述方法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] STOYAN K. *Robust Fault-tolerant Control*[M]. Netherlands: Febo-Druk Press, 2004.
- [2] 孙金生, 王执铨. 鲁棒容错 H_∞ 控制系统设计[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(增刊): 47–49.
(SUN Jinsheng, WANG Zhiqian. Design of robust fault-tolerant H_∞ control systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(Suppl): 47–49.)
- [3] 孙金生, 王执铨. 不确定离散时滞系统的D稳定鲁棒容错控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(6): 968–971.
(SUN Jinsheng, WANG Zhiqian. D-stable fault-tolerant control for uncertain discrete-delay systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(6): 968–971.)
- [4] 宗臻, 王诗必. 基于LMI的输出反馈鲁棒完整性控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5): 682–971.
(ZONG Zhen, WANG Shifu. Design of output feedback controller with robust integrity based on LMI approach[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(5): 682–971.)
- [5] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 94–95.

(MEI Shengwei, SHEN Tielong, LIU Kangzhi. *Modern Robust Control Theory and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 94–95.)

- [6] YANG C D, SUN Y P. Mixed H_2/H_∞ state-feedback design for microsatellite attitude control[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(9): 951–970.
- [7] 陈雪芹. 基于在轨标定的卫星姿态确定与控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学工学硕士学位论文, 2005.
(CHEN Xueqin. *Research on satellite attitude determination and control system based on on-orbit calibration*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.)

作者简介:

陈雪芹 (1982—), 女, 哈尔滨工业大学控制理论与控制工程专业, 博士研究生, 主要从事卫星姿态控制及容错控制研究, E-mail: cxqhit@163.com;

耿云海 (1970—), 男, 哈尔滨工业大学飞行器设计专业, 教授, 主要从事卫星姿态控制与系统仿真研究;

张迎春 (1961—), 男, 哈尔滨工业大学控制理论与控制工程专业, 教授, 博士生导师, 主要从事卫星姿态控制、计算机控制研究;

王峰 (1980—), 男, 哈尔滨工业大学飞行器设计专业, 博士研究生, 主要从事卫星在轨服务及系统仿真研究。

(上接第94页)

参考文献 (References):

- [1] KYUCHEOL P, HAKYOUNG C, JANG G L. Point stabilization of mobile robots via state-space exact feedback linearization[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2000, 16(5): 353–363.
- [2] THEOCHARIS K B, THOMAS G H. High-performance induction motor speed control using exact feedback linearization with state and state derivative feedback[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2004, 19(4): 1022–1028.
- [3] 王江, 李韬, 曾启明, 等. 基于观测器的永磁同步电动机的微分代数非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 87–92.
(WANG Jiang, LI Tao, ZENG Qiming, et al. The research of state variable feedback linearization method on the CCM boost converter and nonlinear control law[J]. *Proc of the CSEE*, 2005, 25(2): 87–92.)
- [4] 方洋旺, 韩崇昭. SISO 非线性系统 H_∞ 控制: Volterra级数法[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(4): 561–564.
(FANG Yangwang, HAN Chongzhao. SISO nonlinear system H_∞ control: an approach of volterra series[J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(4): 561–564.)
- [5] 韩崇昭, 曹建福. 基于广义频率响应函数的非线性控制系统稳定性分析[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(5): 573–582.
(HAN Chongzhao, CAO Jianfu. Study on stability of nonlinear con-

trol system based on generalized frequency response function[J]. *Control Theory & Applications*, 1996, 13(5): 573–582.)

- [6] WEI R X, ZHANG Y Y, KONG X Y, et al. Study on GFRF modeling method for nonlinear system[C] // *Proc of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou China: IEEE Press, 2004, 1: 169–171.

- [7] 曹建福, 韩崇昭. 关于一类非线性控制系统的频域稳定性判据[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(3): 25–28.

(CAO Jianfu, HAN Chongzhao. Frequency stability criterion on a class of nonlinear control system[J]. *J of Xi'an Jiaotong University*, 1998, 32(3): 25–28.)

作者简介:

姜继海 (1957—), 男, 工学博士, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 目前研究方向为流体传动及控制和机电液一体化等;

刘海昌 (1977—), 男, 哈尔滨工业大学博士研究生, 目前研究方向为二次调节技术、电液伺服控制、液压系统节能等, E-mail: changhailiu@163.com;

OKOYE Celestine (1968—), 男, 哈尔滨工业大学博士研究生, 目前研究方向为流体传动及控制。