第 23 卷 第 4 期 控 制 与 决 策 2008 年 4 月
Vol. 23 No. 4 Control and Decision Apr. 2008

文章编号: 1001-0920(2008)04-0435-04

一类非线性系统的自适应无源化控制

张侃健, 冯纯伯
(东南大学 自动化所, 南京 210096)

摘　要: 讨论了一类含未知参数的非线性系统的自适应无源化问题. 通过引入切换拓宽可反馈无源化对象的范围, 在控制项前面的系数是未知参数线性函数的条件下构造出自适应无源反馈规律. 在该条件不满足时, 基于无源性分析给出了鲁棒自适应控制器, 可以保证闭环系统是全局渐近稳定的. 仿真结果表明了所提出算法的有效性.

关键词: 无源性; 逻辑切换; 自适应; 非线性; 未知参数
中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Adaptive passivation for a class of nonlinear systems

ZHANG Kan-jian, FENG Chun-bo
(Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: ZHANG Kan-jian, E-mail: kjzhang@seu.edu.cn)

Abstract: Adaptive passivation for a class of nonlinear systems with unknown parameter is discussed. The range of the systems which can be passivated is enlarged by using switching control. Adaptive feedback controllers that render the closed systems passivation are constructed under the condition that the unknown parameters enter linearly into the coefficient of the control item. Robust adaptive controllers are given based on passive system theory, which guarantee the closed system is global asymptotic stable. Simulation example results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Passivity; Switching; Adaptive; Nonlinearity; Unknown parameter

1 引　　言

无源系统理论是分析和设计非线性系统控制的重要工具, 非线性系统的无源性和其鲁棒控制、自适应控制、H_∞控制及优化控制等都有密切的联系[1]. 无源系统理论的一个核心问题是如何使系统无源化. 文献[2]将非线性系统的几何理论与无源系统理论结合起来, 对于何时一个仿射非线性系统可以通过状态反馈无源化的问题给出了较完美的解答. 近年来, 无源性分析在非线性系统控制上得到了更为广泛应用[3-5]. 然而, 虽然基于无源系统的控制设计具有一定的鲁棒性, 但这种鲁棒性一般是指系统具有圆盘稳定裕度, 有其狭窄面[1]. 为此, 文献[6,7]研究了系统含未知参数时的自适应无源化问题; 文献[8]讨论了一类含未建模动态的不确定非线性系统的鲁棒无源化问题, 给出了这类系统能光滑反馈无源化的条件.

本文讨论一类含未知参数的非线性系统的无源控制问题, 并考虑了系统存在干扰等不确定性的情形. 文中放宽了已有一些文献要求无源化反馈规律光滑的条件, 给出了含切换的自适应无源控制方案, 进一步设计了基于无源性分析的镇定控制器.

2 问题描述

先引入非线性系统无源性的基本定义, 考虑如下仿射非线性系统:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u,\quad y = h(x). \tag{1}$$

其中: $x \in R^n$; $u, y \in R^m$; $f(x), g(x), h(x)$ 为相应维数的光滑函数, 且有 $f(0) = 0, h(0) = 0$.

定义 1[1]　称系统(1) 是 C^r 无源的, 若存在半正定 $V(x) \in C^r, V(0) = 0$, 满足

$$\dot{V}(t) \leq y^{\mathrm{T}}(t)u(t),\ \forall t \geq 0.$$

若存在常数 $\rho > 0$ 使得

$$\dot{V}(t) \leq y^{\mathrm{T}}(t)u(t) - \rho y^{\mathrm{T}}(t)y(t),\ \forall t \geq 0,$$

则称该系统是输出严格无源的, 其中 $V(x)$ 称为储

收稿日期: 2006-12-27; 修回日期: 2007-03-28.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60404006).
作者简介: 张侃健(1972 —), 男, 江苏张家港人, 博士生, 从事非线性系统鲁棒控制的研究; 冯纯伯(1928 —), 男, 江苏金坛人, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 从事无源性分析、复杂系统控制等研究.

能函数.

根据文献[2]的结论,一个仿射非线性系统能通过光滑反馈无源的充要条件是其相对阶为 1 且是零动态稳定的. 因此,在很大程度上,一个含未知参数的系统能通过反馈无源化的一个必要条件是系统能转化为如下标准形式[6]:

$$\dot{z} = f_{zd}(z,\theta) + p(z,y,\theta)y,$$
$$\dot{y} = a(z,y,\theta) + b(z,y,\theta)u. \quad (2)$$

下面直接针对系统(2)来讨论含未知参数的不确定系统的无源化问题. 为使描述简单化,引入如下定义.

定义 2 称系统(2)为可自适应无源化的,若存在自适应反馈控制

$$\dot{\xi} = \Phi(z,y,\xi,v),$$
$$u = \phi(z,y,\xi,v), \quad (3)$$

使得闭环系统从新的输入 v 到输出 y 是无源的.

假设 1 对任意 z,y,θ,函数 $b(z,y,\theta)$ 可逆且存在函数 $b_0(z,y)$ 和 $b_1(z,y)$ 满足

$$b(z,y,\theta) = b_0(z,y) + b_1(z,y)\theta. \quad (4)$$

假设 2 存在正定函数 $W(z) \in C^1$ 满足

$$L_{f_{zd}}W(z,\theta) \leq 0, \quad (5)$$

其中 $L_{f_{zd}}W(z,\theta) = \frac{\partial W}{\partial z}(z)f_{zd}(z,\theta)$ 表示 $W(z)$ 沿 $f_{zd}(z,\theta)$ 的李导数.

假设 3 存在函数 $p_0(\cdot),p_1(\cdot),a_0(\cdot),a_1(\cdot)$ 满足

$$\|\Delta_p\| \leq \bar{\rho}_1(z,y), \ \|\Delta_a\| \leq \rho_2(z,y). \quad (6)$$

其中:$\bar{\rho}_1(\cdot),\rho_2(\cdot)$ 为已知非负函数,

$$\Delta_p := p(z,y,\theta) - p_0(z,y) - p_1(z,y)\theta,$$
$$\Delta_a := a(z,y,\theta) - a_0(z,y) - a_1(z,y)\theta. \quad (7)$$

3 控制设计

定理 1 若假设 1～假设 3 成立,则系统(2)是可自适应无源化的. 此时相应的自适应律和控制律分别为

$$u = \phi(z,y,\xi,v) =$$
$$-(b_0 + b_1\xi)^{-1}\Big[(L_{p0}W(z))^{\mathrm{T}} + a_0 +$$
$$(\rho_1 + \rho_2)\frac{y}{\|y\|}((L_{p1}W(z))^{\mathrm{T}} + a_1)\xi - v\Big],$$
$$\dot{\xi} = \Phi(z,y,\xi,v) =$$
$$y^{\mathrm{T}}[(L_{p1}W(z))^{\mathrm{T}} + a_1 + b_1u]. \quad (8)$$

其中:当 $y = 0$ 时,$\frac{y}{\|y\|} := 0$;非负函数

$$\rho_1(z,y) \geq \bar{\rho}_1(z,y)\left\|\frac{\partial W(z)}{\partial z}\right\|. \quad (9)$$

证明 取正定连续可微函数

$$V(z,y,\xi) = W(z) + \frac{1}{2}y^{\mathrm{T}}y + \frac{1}{2}(\xi - \theta)^2,$$

则 $V(z,y,\xi)$ 沿系统(2)关于时间的导数有

$$\dot{V} =$$
$$L_{f_{zd}}W(z) + L_{p_0}W(z)y + L_{p_1}W(z)\theta y +$$
$$\frac{\partial W}{\partial z}\Delta_p y + y^{\mathrm{T}}(a_0 + a_1\theta) + y^{\mathrm{T}}\Delta_a +$$
$$y^{\mathrm{T}}(b_0 + b_1\theta)u + (\xi - \theta)\dot{\xi} =$$
$$L_{f_{zd}}W(z) + y^{\mathrm{T}}(L_{p_0}W(z) + L_{p_1}W(z)\theta)^{\mathrm{T}} +$$
$$y^{\mathrm{T}}(b_0 + b_1\xi)u + y^{\mathrm{T}}b_1(\theta - \xi)u + (\xi - \theta)\dot{\xi}.$$

将式(8)代入得

$$\dot{V} =$$
$$L_{f_{zd}}W(z) + \frac{\partial W}{\partial z}\Delta_p y + y^{\mathrm{T}}\Delta_a -$$
$$\|y\|(\rho_1 + \rho_2) + y^{\mathrm{T}}v + y^{\mathrm{T}}[(L_{p_1}W(z))^{\mathrm{T}} +$$
$$a_1 + b_1u](\theta - \xi) + (\xi - \theta)\dot{\xi} =$$
$$L_{f_{zd}}W(z) + \frac{\partial W}{\partial z}\Delta_p y +$$
$$y^{\mathrm{T}}\Delta_a - \|y\|(\rho_1 + \rho_2) + y^{\mathrm{T}}v. \quad (10)$$

又由假设 3 和式(9)得

$$\frac{\partial W}{\partial z}\Delta_p y + y^{\mathrm{T}}\Delta_a - \|y\|(\rho_1 + \rho_2) \leq 0. \quad (11)$$

根据式(10)和(11),有

$$\dot{V} \leq L_{f_d}W(z) + y^{\mathrm{T}}v, \quad (12)$$

从而由假设 2 知,系统(2)在反馈(8)下从新的输入 v 到输出 y 是无源的. □

根据定理 1,由无源系统理论可知系统(2)在无源化控制规律(8)下,进一步引入任何输出严格无源的系统作负反馈后是输入输出稳定的. 从而有如下推论.

推论 1 若假设 1～假设 3 满足,且系统(2)是零状态可检测的,则对任意正数 κ,自适应反馈规律(8)中取 $v = -\kappa y$ 可以全局渐近镇定系统(2).

在定理 1 中,假设 1 要求系统(2)中控制项前面系数 $b(z,y,\theta)$ 恰好为 θ 的线性函数. 当这一条件不能满足时,通过自适应反馈使系统无源化一般是不可能的. 但对单输入单输出系统,类似推论 1 的渐近镇定结论仍可以得到,此时需要将假设 1 作如下更改.

假设 4 存在正数 α,β 满足 $0 < \alpha \leq b(z,y,\theta) \leq \beta$.

下面来求自适应反馈控制使得它和系统(2)组成的闭环系统渐近稳定. 由于 $W(z),p_0,a_0,p_1,a_1$ 均为已知函数,从而存在非负函数 ρ_3,ρ_4 满足

$$\|L_{p_0}W(z) + a_0\| = \rho_3(z,y),$$
$$\|L_{p_1}W(z) + a_1\| = \rho_4(z,y). \quad (13)$$

仍取正定连续可微函数

$$V(z,y,\xi) = W(z) + \frac{1}{2}y^{\mathrm{T}}y + \frac{1}{2}(\xi - \theta)^2,$$

则 $V(z,y,\theta)$ 沿系统(2) 关于时间的导数有

$$\begin{aligned}\dot V =\ & L_{f_{zd}}W(z) + L_{p_0}W(z)y + L_{p_1}W(z)\theta y + \\ & \frac{\partial W}{\partial z}\Delta_p y + y(a_0 + a_1\theta) + y\Delta_a + \\ & yb(z,y,\theta)u + (\xi - \theta)\xi = \\ & L_{f_{zd}}W(z) + y(a_0 + L_{p_0}W(z)) + y\Delta_a + \\ & \frac{\partial W}{\partial z}\Delta_p y + y(L_{p_1}W(z) + a_1)\theta + \\ & y\frac{\alpha+\beta}{2}\left(1 + \frac{b(z,y,\theta) - \frac{\alpha+\beta}{2}}{\frac{\alpha+\beta}{2}}\right)u + (\xi - \theta)\xi.\end{aligned} \tag{14}$$

取

$$\xi = \phi(z,y,\xi,v) = y(L_{p_1}W(z) + a_1), \tag{15}$$

则式(14) 变为

$$\begin{aligned}\dot V =\ & L_{f_{zd}}W(z) + y(a_0 + L_{p_0}W(z)) + \frac{\partial W}{\partial z}\Delta_p y + \\ & y\Delta_a + y(L_{p_1}W(z) + a_1)\xi + \\ & y\left(1 + \frac{b(z,y,\theta) - \frac{\alpha+\beta}{2}}{\frac{\alpha+\beta}{2}}\right)\frac{\alpha+\beta}{2}u \le \\ & L_{f_{zd}}W(z) + \|y\|(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4|\xi|) + \\ & y\left(1 + \frac{b(z,y,\theta) - \frac{\alpha+\beta}{2}}{\frac{\alpha+\beta}{2}}\right)\frac{\alpha+\beta}{2}u.\end{aligned} \tag{16}$$

又根据假设 4 有

$$1 + \frac{b(z,y,\theta) - \frac{\alpha+\beta}{2}}{\frac{\alpha+\beta}{2}} \ge 1 - \frac{\beta-\alpha}{\beta+\alpha} > 0, \tag{17}$$

从而取

$$u = -\frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4|\xi|}{\alpha}\operatorname{sgn}(y) + \frac{2}{\alpha+\beta}v. \tag{18}$$

代入式(16) 即得

$$\dot V \le L_{f_{zd}}W(z) + \left(1 + \frac{b(z,y,\theta) - \frac{\alpha+\beta}{2}}{\frac{\alpha+\beta}{2}}\right)yv. \tag{19}$$

由式(19) 无法得到从 v 到 y 无源的结论,但对比式(19) 和(12) 即知,其镇定控制结论相仿.

定理 2　若假设 2～假设 4 满足,则对任意正数 κ,在自适应律(15) 和反馈规律(18) 中取 $v = -\kappa y$ 即可全局渐近镇定零状态可检测系统(2).

4　仿真算例

考虑系统

$$\begin{aligned}\dot z &= \theta_1(z + 2z^2) + \theta_2(1 + z^2)y, \\ \dot y &= z + d(t) + (1 + \omega(t))u.\end{aligned} \tag{20}$$

其中:θ_1,θ_2 为未知常参数;$d(t)$ 为干扰;$\theta_1 \le -1$,$|d(t)| \le 1$,$|\omega(t)| \le 0.5$.

式(20) 与系统(2) 对比,出现了干扰 $d(t)$. 但本文方法在此类干扰存在的情况下仍然适用,此时只要将 $d(t)$ 作为 $a(z,y,\theta)$ 的一部分并入 Δ_a 考虑.

取正定函数 $W(z) = \frac{1}{2}z^2$,并根据式(2) 取

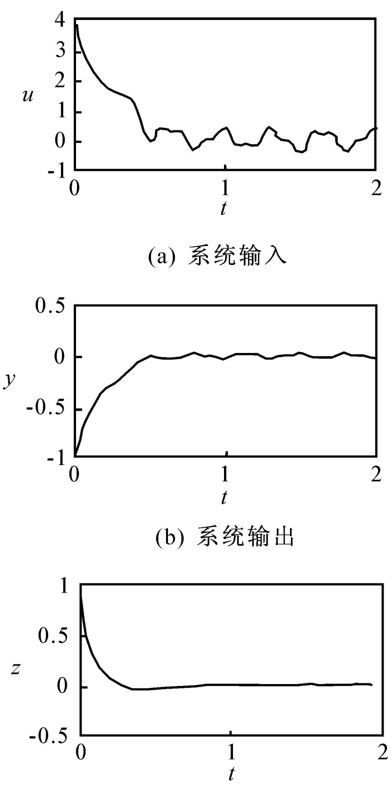
$$f_{zd}(\theta,z) = \theta_1(z + 2z^2),$$

则有 $L_{f_{zd}}W(z) \le -z^2(1 + 2z^2)$. 从而根据式(6),(7),(9) 可取 $\rho_1 = 0$,$\rho_2 = 1$. 根据式(13) 取 $\rho_3 = |z|$,$\rho_4 = |z(1 + z^2)|$. 取假设 4 中 $\alpha = 0.5$,$\beta = 1.5$,得到相应于式(15) 和(18) 的控制规律为

$$\begin{aligned}u &= -2(|z| + 1 + |z(1 + z^2)\xi|)\operatorname{sgn}(y) + v, \\ \xi &= y(1 + z^2).\end{aligned} \tag{21}$$

容易验证系统(20) 是零状态可检测的,从而进一步取 $v = -\kappa y$,$\kappa > 0$ 即可全局镇定系统.

仿真中取 $d(t) = 0.5\sin 7t$,$\theta_1 = -5$,$\theta_2 = 3$,$w_t = 0.5\sin 3t$. 初值 $z = 1$,$y = -1$,$\kappa = 1$. 为减少高频颤抖,符号函数 $\operatorname{sgn}(y)$ 取为 $\operatorname{sat}(ky)$,其中函数 $\operatorname{sat}(\cdot)$ 定义为



(a) 系统输入

(b) 系统输出

(c) 子系统状态

图 1　仿真结果

$$\mathrm{sat}(x) = \begin{cases} x, & |x| < 1; \\ \mathrm{sgn}(x), & |x| \geq 1. \end{cases}$$

取 $k = 5$,则在控制器(21) 和 $v = -y$ 的作用下得到仿真结果如图 1 所示.

5 结 论

本文利用逻辑切换,给出了一类非线性系统的自适应无源控制规律,进一步基于无源性分析得到了鲁棒自适应控制器. 分析表明,当系统中存在干扰等不确定性时,利用本文方法可以将不确定项作合并处理. 由此可以看出,本文结论能直接推广到鲁棒无源化方面.

参考文献(References)

[1] Sepulchre R, Jankovic M, Kokotovic P. Constructive nonlinear control[M]. London: Springer, 1997.

[2] Byrnes C, Isidori A. Asymptotic stabilization of minimum phase nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1991, 36(10): 1122-1137.

[3] 关新平, 华长春, 唐英干. 一类非线性系统的鲁棒无源化控制[J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 599-601.
(Guan Xin-ping, Hua Chang-chun, Tang Ying-gan. Robust passive control for a class of nonlinear systems [J]. Control and Decision, 2001, 16(5): 599-601.)

[4] Mei S W, Shen T L. Passivation control of nonlinear systems with disturbance [J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(6): 797-801.

[5] Kokotovic P V, Arcak M. Constructive nonlinear control: A historical perspective[J]. Automatica, 2001, 37(5): 637-666.

[6] Seron M M, Hill D J, Fradkov A L. Nonlinear adaptive control of feedback passive systems[J]. Automatica, 1995, 31(7): 1053-1060.

[7] Alessandro D D. On passivity and adaptive stabilization of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(7): 1083-1086.

[8] Lin W, Shen T L. Robust passivity and feedback design for minimum-phase nonlinear systems with structural uncertainty[J]. Automatica, 1999, 35(1): 35-47.

(上接第 434 页)

参考文献(References)

[1] 王先进, 徐树成. 钢管连轧理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
(Wang Xian-jin, Xu Shu-cheng. Multimandrel mill theory of steel tube[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press of China, 2005.)

[2] 王北明. 热轧钢管的质量[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
(Wang Bei-ming. Hot rolled steel tubes quality[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press of China, 1987.)

[3] Lévesque D, Kruger S E, Lamouche G, et al. Thickness and grain size monitoring in seamless tube-making process using laser ultrasonics[J]. NDT and E Int, 2006, 39(8): 622-626.

[4] Reggio M, McKenty F, Gravel L, et al. Computational analysis of the process for manufacturing seamless tubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(4): 459-470.

[5] 刘东东, 王焱. 基于 RBF 神经网络的热连轧精轧厚度的预报[J]. 济南大学学报, 2006, 20(4): 312-314.
(Liu Dong-dong, Wang Yan. Prediction of rolling thickness based on RBF neural network[J]. J of Ji'nan University, 2006, 20(4): 312-314.)

[6] Nomikos P, MacGregor J F. Multi-way partial least square in monitoring batch processes[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1995, 30(1): 97-108.

[7] Leo H Chiang, Riccardo Leardi, Randy J Pell. Industrial experiences with multivariate statistical analysis of batch process data[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2006, 81(2): 109-119.

[8] Yale Zhang, Michael Dudzic. Industrial application of multivariate SPC to continuous caster start-up operations for breakout prevention [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(11): 1357-1375.

[9] Dae Sung Leea, Jong Moon Parka. Adaptive multiscale principal component analysis for on-line monitoring of a sequencing batch reactor[J]. J of Biotechnology, 2005, 116(2): 195-210.

[10] 宋箭平, 周志杨, 吴跃泉. 连轧管横向壁厚精度初探[J]. 宝钢技术, 1997, 21(6): 39-41.
(Song Jian-ping, Zhou Zhi-yang, Wu Yue-quan. Tube transverse wall thickness of multiMandrel mill [J]. Baosteel Technology, 1997, 21(6): 39-41.)

[11] Junghui Chen, Hsin-Hung Chen. On-line batch process monitoring using MHMT-based MPCA[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(10): 3223-3239.