

研究与开发

非线性系统鲁棒渐进跟踪

周玉成,程放,李晓群

(中国林业科学研究院木材工业研究所,北京 100091)

摘要: 本文讨论了在木材工业计算机集成制造系统中,抽象出的一类含不确定因素的非线性系统的鲁棒渐进跟踪问题,其中的未知参变量是时变的,且取值于一紧集 Ω 上。当未知参变量以线性和非线性形式出现时,给出了静态自校正控制器的设计。

关键词: Lyapunov 函数;鲁棒渐进跟踪;非线性不确定系统;控制器

中图分类号: TS6,024 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8654(2003)05-0011-03

Robust Asymptotic Tracing of a Nonlinear System

ZHOU Yu-cheng, CHENG Fang, LI Xiao-qun

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: In this paper, we discuss the problem of a nonlinear systems robust tracing containing uncertain diathesis, which is abstracted from Computer Integrated Manufacturing Systems (CIMS) in wood industry, in which unknown parameters from a compact set Ω are time-varying. Furthermore, static self-tuning controller of a robust tracking problem is given when unknown parameters appear both linear and nonlinear.

Key words: Lyapunov function; Robust asymptotic tracing; Nonlinear uncertain system; Controller

考虑在木材工业计算机集成制造系统中,抽象出的一类含不确定因素的多变量非线性不确定系统:

$$\dot{x} = f(x) + q(x, \theta(t)) + [g(x) + g(x)Q(x, \theta(t))]u \dots\dots\dots (1.1a)$$

$$y = h(x) \dots\dots\dots (1.1b)$$

其中 状态变量 $x \in R^n$, 输入 $u \in R$, 输出 $y \in R$, 未知参变量 $\theta(t)$ 为时变的分段连续的、且取值于一紧集 Ω 上, $f(x)$ 和 $g(x)$ 为标称或未被扰动的解析向量, 且 $g(x) \neq 0$, 对 $\forall x \in R^n$, $h(x)$ 是 R^n 上的实函数, $Q(x, \theta)$ 是定号非零函数, 即有: $Q(x, \theta(t)) > 0$ 或 $Q(x, \theta(t)) < 0$, 对 $\forall \theta \in \Omega, x \in R^n$, 假设 $q(x, \theta(t))$ 为向量函数并且和函数 $Q(x, \theta(t))$ 包含了系统的所有不确定性。

控制目的是寻找一个光滑的半全局(局部)状态反馈控制器,使得对于给定的理想输出 y_d 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} (y - y_d) = 0$, 同时保证闭环系统是有界的,且对于 $\forall \theta \in \Omega$ 都成立。对于这类含不确定因素的非线性系统控制问题的进行了研究,本文作者已经作了一些工作取得了一些有益的结果^[1~6],并讨论了非线性系统的鲁

棒自校正控制器的设计。文中出现的引理、定理等可参考文献[5]、[6]。

1 鲁棒跟踪静态控制器的设计

当未知参变量 θ 以非线性形式出现时,通过选择 Lyapunov 函数,可以构造出静态的鲁棒跟踪控制器。

定理 1 考虑系统(1.1),若假设 2.2, 2.3 和 2.4 成立 参数严格反馈条件(2.4)成立 参变量 $\theta \in \Omega$, 一已知紧集上,那么存在一鲁棒跟踪静态的控制器,使闭环系统的所有信号有界,且 $\lim_{t \rightarrow \infty} (y - y_d) = 0$, 对所有的在 R^n 上的初始值都成立。

证明 因为系统(1.1)满足假设 2.2, 且参数严格反馈条件(2.4)成立,由引理 2.4 知,系统(1.1)全局等价于式(2.6)。首先考虑子系统(2.6a),与定理 3.1 的设计过程类似,构造出适当的 Lyapunov 函数,然后再给出静态控制器的设计。过程如下 Step 0: 令 $\bar{z}_1 =$

$z_1 - y_d$ Step 1 定义 Lyapunov 函数 $V_1(\bar{z}_1) = \frac{1}{8} \bar{z}_1^2$

令 $\bar{z}_2 = z_2 - z_2^*$, 其中 z_2^* 为待定的光滑函数。那么子系统(2.6a)的第一个方程可表示为:

$$\dot{\bar{z}} = \bar{z}_2 + z_2^* + \Phi_1(\bar{z}_1, z', \theta(t)) - \dot{y}_d$$

令 $z_2^* = -c_1 \bar{z}_1 + \dot{y}_d - s_1(\bar{z}_1, z')$, c_1 为大于 0 的

收稿时间: 2003-06-20
基金项目: 中国林科院特殊人材基金、863 基金、十五攻关基金、科技部基金资助课题。
作者简介: 周玉成(1959—),男,中国林科院木材工业研究所副研究员,博士。

常数, s_1 为待定的光滑函数。

则 Lyapunov 函数的时间导数为 $\dot{V}_1 = -c_1 \bar{z}_1^2 + \bar{z}_1 \bar{z}_2 - \bar{z}_1 (s_1 - \Phi_1)$ 。因为 $\theta \in \Omega$, 一已知紧集上, 故存在光滑函数 $\bar{s}_1 = (\bar{z}_1, z')$, 使得 $|\Phi_1(\bar{z}_1, z', \theta)| \leq \bar{s}_1(\bar{z}_1, z')$ 。

$$\text{令 } s_1(\bar{z}_1, z') = \begin{cases} \bar{s}_1(\bar{z}_1, z'), & \text{当 } |\bar{z}_1| \geq \Delta \\ s_1^0(\bar{z}_1, z'), & \text{当 } |\bar{z}_1| < \Delta \\ -\bar{s}_1(\bar{z}_1, z'), & \text{当 } \bar{z}_1 \leq -\Delta \end{cases}$$

其中 Δ 为大于 0 的设计常数。 s_1^0 的选择是用来保证 s_1 为光滑函数的。则当 $|\bar{z}_1| \geq \Delta, \bar{z}_2 = 0$ 时有 $\dot{V}_1 < 0$ 。选择与定理 3.1 一样的边界函数 r_1^+, r_1^- 和目标域 A , 可以构造出新的 Lyapunov 函数 $V_2(\bar{z}_1, \bar{z}_2)$ 。

Step 2 定义 Lyapunov 函数 $V_2(\bar{z}_1, \bar{z}_2) = V_1(\bar{z}_1) + \xi_2(\bar{z}_1, \bar{z}_2)$

其中：

$$\xi_2(\bar{z}_1, \bar{z}_2) = \begin{cases} \frac{1}{16}(\bar{z}_2 - r_1^+(\bar{z}_1))^2, & \text{当 } \bar{z}_2 > r_1^+(\bar{z}_1) \\ 0, & \text{当 } r_1^-(\bar{z}_1) < \bar{z}_2 < r_1^+(\bar{z}_1) \\ \frac{1}{16}(\bar{z}_2 - r_1^-(\bar{z}_1))^2 & \text{当 } \bar{z}_2 < r_1^-(\bar{z}_1) \end{cases}$$

令 $\bar{z}_3 = z_3 - z_3^*, z_3^*$ 为待定的光滑函数。本步的目的就是设计 z_3^* 使得在域 A, B, C 上 V_2 的时间导数的符号为负。

Step ρ 假设已由上面的方法定义 Lyapunov 函数 $V_{\rho-1}(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_{\rho-1})$, 并且选择了适当的光滑函数 z_ρ^* 使在 $D^{\rho-2} \leq \{(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_{\rho-1}) : \|(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_{\rho-1})\|_\infty < \Delta\}$ 以外的区域当 $\bar{z} = z_\rho - z_\rho^* = 0$ 时有 $\dot{V}_{\rho-1} < 0$ 。定义与定理 3.1 的 Step ρ 相同的目标域 $A^{\rho-2}$, 选择与定理 3.1 的 Step ρ 相同的边界函数 $r_{\rho-1}^+$ 和 $r_{\rho-1}^-$ 。定义 Lyapunov 函数 $V_\rho(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_\rho) = V_{\rho-1}(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_{\rho-1}) + \xi_\rho(\bar{z}, \dots, \bar{z}_\rho)$ 。其中 ξ_ρ 与定理 3.1 的 Step ρ 中的 ξ_ρ 相同。下面设计控制 $u = z_{\rho+1}^*$, 使得区域在 $A^{\rho-1}, B, C$ 上有 $\dot{V}_\rho < 0$ 。在域 $A^{\rho-2}$ 上, 由目标条件知 $\dot{V}_\rho = \dot{V}_{\rho-1}^*$, 故 $\dot{V}_\rho \leq -W_\rho - 1$, 并且对任意的 $z_{\rho+1}^*$ 在 $A^{\rho-2}$ 都有 $\dot{V}_\rho \leq -W_{\rho-1}$ 。

当 $\|(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_{\rho-1})\|_\infty \geq \Delta$ 时, 在 $B^{\rho-2}$ 上有：

$$\dot{V}_\rho \leq -W_{\rho-1} + (\bar{z}_\rho - r_{\rho-1}^+) \left\{ (\bar{z}_{\rho-1} + a(z)) + \bar{b}(z, \theta) u + \Phi_\rho - \sum_{i=1}^{\rho-1} \frac{\partial z_\rho^*}{\partial z_i} (z_{i+1} + \Phi_i) - \sum_{i=2}^{\rho} \frac{\partial z_\rho^*}{\partial y_d^{i-1}} y_d - \frac{\partial r_{\rho-1}^+}{\partial z_1} (z_2 + \Phi_1 - \dot{y}_d) - \sum_{i=2}^{\rho-1} \frac{\partial r_{\rho-1}^+}{\partial z_i} [z_{i+1} + \Phi_i - \sum_{k=1}^i \frac{\partial z_1^*}{\partial z_k} (z_{k+1} + \Phi_k) - \sum_{k=2}^i \frac{\partial z_i^*}{\partial y_d^{(k-1)}} y_d^{(k)}] \right\}$$

因 $\theta \in \Omega$, 一已知紧集, 故存在光滑函数 $s_\rho^B(\bar{z}, \dots, \bar{z}_\rho, z')$ 使得：

$$|\Phi_\rho| + \left| \sum_{i=1}^{\rho-1} \frac{\partial z_\rho^*}{\partial z_i} \Phi_i \right| + \left| \frac{\partial r_{\rho-1}^+}{\partial z_1} \Phi_1 \right| + \left| \sum_{i=2}^{\rho-1} \frac{\partial r_{\rho-1}^+}{\partial z_i} \left(\Phi_1 - \sum_{k=1}^i \frac{\partial z_i^*}{\partial z_k} \Phi_k \right) \right| \leq S_\rho^B(\bar{z}, \dots, \bar{z}_\rho, z')$$

令控制器 $u^B = z_{\rho+1}^{*B}$, 因为 $\theta \in \Omega$, 一已知紧集, $Q(\chi, \theta)$ 是非 0 的定号函数, 故可找到 $\hat{b}(z) \neq 0$, 使得 $|\hat{b}(z, \theta)| \leq \hat{b}(z)$ 。令：

$$z_{\rho+1}^* = \frac{1}{\hat{b}(z)} \left\{ -\bar{z}_{\rho-1} - c_\rho \bar{z}_\rho - a(z) + \sum_{i=1}^{\rho-1} \frac{\partial z_\rho^*}{\partial z_i} z_{i+1} + \sum_{i=2}^{\rho} \frac{\partial z_\rho^*}{\partial y_d^{i-1}} y_d^i + \frac{\partial r_{\rho-1}^+}{\partial z_1} (z_2 - \dot{y}_d) + \sum_{i=2}^{\rho} \frac{\partial r_{\rho-1}^+}{\partial z_i} \left(z_{i+1} - \sum_{k=1}^i \frac{\partial z_i^*}{\partial z_k} z_{k+1} \right) - \sum_{k=2}^i \frac{\partial z_i^*}{\partial y_d^{k-1}} y_d^k - S_\rho^B(\bar{z}, \dots, \bar{z}_\rho, z') \right\}$$

将控制 U^B 代入 Lyapunov 函数的时间导数不等式中可得 $\dot{V}_\rho \leq -W_{\rho-1} - c_\rho \bar{z}_\rho (\bar{z}_\rho - r_{\rho-1}^+)$, 而上式在 B 中当 $\|(\bar{z}, \dots, \bar{z}_{\rho-1})\|_\infty \geq \Delta$ 时, 有 $\dot{V}_\rho < 0$

在域 $B^{\rho-2}$ 上, 当 $\|(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_{\rho-1})\|_\infty < \Delta, \bar{z}_\rho \geq \Delta$ 时, 则控制 U^B 会使下列不等式成立 $\dot{V}_\rho \leq -\sum_{i=1}^{\rho} c_i \bar{z}_i (\bar{z}_i - r_{i-1}^+) + \sum_{i=1}^{\rho-1} \lambda_i$ 其中 $r_0^+ = 0, \lambda_i$ 是很小的正数, $i = 1, \dots, \rho - 1$ 。又由于 $\bar{z}_i (\bar{z}_i - r_{i-1}^+) > 0$, 所以可选择 C_i 足够大。从而当 $\|(\bar{z}, \dots, \bar{z}_{\rho-1})\|_\infty < \Delta, \bar{z}_\rho \geq \Delta$ 时, 仍有 $\dot{V}_\rho < 0$ 。在 $C^{\rho-2}$ 上, 与在 $B^{\rho-2}$ 上的设计方法相同, 这里不再重复。在 $D^{\rho-2}$ 上, Lyapunov 函数的时间导数符号可能是不定的。因为 $B^{\rho-2}$ 到 $C^{\rho-2}$ 的距离是严格非负的正数。所以总可以找到在 $B^{\rho-2}$ 和 $C^{\rho-2}$ 上的光滑函数 $z_{\rho+1}^*$, 能同时表示 $B^{\rho-2}$ 中的 $z_{\rho+1}^*$ 和 $C^{\rho-2}$ 中的 $z_{\rho+1}^*$ 。从而使在 $A^{\rho-2}, B^{\rho-2}, C^{\rho-2}$ 上有 $\dot{V}_\rho < 0$

对任意的 $\varepsilon > 0$, 令设计常数 Δ 满足 $\Delta \sqrt{\rho} \leq \varepsilon$, 则由文献[4]中知: 有 $|\bar{z}_1| < \varepsilon$, 且子系统 (2.6a) 的状态在任意的紧球域 $\Delta \subset R^n$ 中有界。

又由于 ε 可以是任意小的正数, 故有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{z}_1| = \lim_{t \rightarrow \infty} |y - y_d| = 0$ 。又由假设 2.4 成立知 y_d 是有界的, 故有 y 有界, 从而由假设 2.3 知 z' 有界。根据文献[3]中定理 6.7 知, 静态控制器 $u = z_{\rho+1}^*$ 是系统 (1.1) 的鲁棒跟踪控制器。故定理得证。

本文假设 2.1 和 2.2 中, 经过变换后的 z' 子系统中, 不含有 $(z_2 \dots z_\rho)$, 如果 z' -子系统中的 Φ_0 中含有 $(z_2 \dots z_\rho)$, 则本文的结果不一定成立, 但假设 2.1 和 2.2 也不是不能满足的, 文献[7]中给出该两个假设成立的充要条件。而假设 2.5 成立的充要条件为：

i) 系统 (2.5) 和 (2.6) 的零动态系统是全局指数稳定的；

ii)系统(2.5)和(2.6)中的向量场 $\Phi_0 + \Phi$ 和 $\Phi_0 + \sum \theta_i \Phi_i$ 关于 z 满足全局 Lipschitz 条件。

从而也可以得如下结论：
考虑系统(1.1),如果 :假设 2.1,假设 2.3 和假设 2.4 成立 参数严格反馈条件(2.4)成立 ;参变量 $\theta \in \Omega$,一已知紧集上 ;那么存在一鲁棒跟踪静态的局部控制器,使得闭环系统的所有信号有界。且 $\lim_{t \rightarrow \infty} (y - y_d) = 0$,对所有的在领域 U^0 上的初始值都成立。

2 结论

本文讨论了非线性不确定系统的局部鲁棒跟踪问题。当未知参变量以线性和非线性形式出现时,给出了局部鲁棒跟踪自校正控制器和静态自校正控制器的设计。本文设计方法克服了文献[5]中的设计方法给控制器带来的不良“硬性”。本文考虑的是更加一般的输入—输出线性化系统的局部鲁棒跟踪问题。

(上接第 10 页)

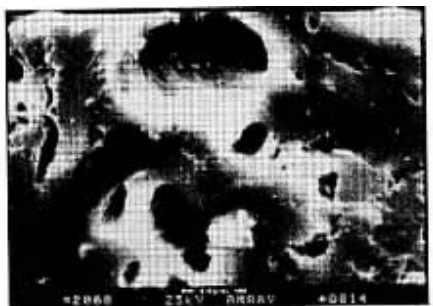


图 3 木陶瓷断面细胞腔的扫描电子显微图(×2000)
Fig.3 SEM analysis of WCS

生。由于气泡会给材料带来缺陷,揭示了添加阻燃剂处理不能进一步提高炭化材料力学性质的原因。

3 结论

- 1)酚醛树脂处理对提高炭化产品耐磨性有明显作用。在水润滑状态下,各试件的耐磨性提高,且以未处理试件的耐磨性提高幅度为最大。
木陶瓷的抗弯性能随树脂质量分数的提高而增大 表面硬度随处理树脂质量分数的增高而增大,随烧结温度增高而略有增加 断面抗压强度随树脂质量分数升高而增加,随烧结温度的提高而增加 ;阻燃剂尽管能提高成炭率,但是不能提高产品力学性质。
- 2)酚醛树脂对木材细胞壁有润胀、填充作用,增

参考文献：

- [1] 周玉成,刘晓平. 教育含约束的非线性不确定系统的鲁棒控制[J]. 控制与决策,1998, 13(2) 7-15.
- [2] 周玉成,刘晓平. 具有最小相位的非线性时变不确定系统的鲁棒镇定[J]. 信息与控制, 1996(5) 13-21.
- [3] 周玉成,刘晓平. 一类离散时间广义非线性控制系统的动态不可测扰动解耦[J]. 系统工程理论与实践, 1998(12) 16-23.
- [4] 周玉成,刘晓平. 一类离散时间非线性系统的局部状态反馈解耦[J]. 信息与控制. 1997(6) 17-26.
- [5] 周玉成,程放,李晓群. 一类非线性系统的鲁棒自校控制器设计[J]. 木材工业,2003,17(3) 10-12.
- [6] 周玉成,程放,肖天际,等. 一类含不确定因素的非线性系统鲁棒跟踪[J]. 林业科学,2003,39(2) 130-136.
- [7] Corless M R, Leitmann G. Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems[J]. IEEE AC-26, 1981 : 1139-1144.
- [8] Kanellakopoulos I, Kokotovic P V, Marino R. An Extend Scheme for Robust Adaptive Nonlinear Control[J]. Automatica. 1991, 27(2) :247-255.
- [9] Kanellakopoulos I, kokotovic P V, Morse A S. Systematic Design of Adaptive Controllers for Feedback Linearizable Systems[J]. IEEE AC-36, 1991 :1241-1252.

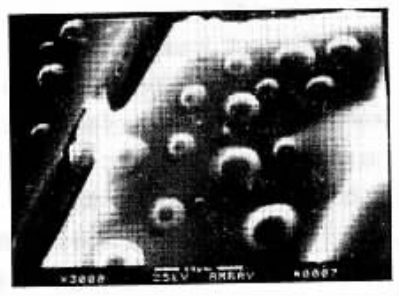


图 4 P-木陶瓷平面纤维的扫描电子显微图(×3000)
Fig.4 SEM analysis of P-WCS

强了细胞壁。而阻燃剂只改变了木陶瓷烧结过程中的热解机理,不能进一步提高炭化材料的力学性质。

参考文献：

- [1] Toshihiro O, Kouji S, Kazuo H. New Porous Carbon Materials, Wood-ceramics :Development and Fundamental Properties [J]. Journal of Porous Materials, 1996(2) 207-213.
- [2] 马荣. 木材陶瓷[J]. 兵器材料科学与工程,1998, 21(6) 45-48.
- [3] 马荣. 木材陶瓷的制备与性能研究[J]. 西安交通大学学报, 1998,32(8) 57-61.
- [4] 李淑君,刘一星,李坚. 木陶瓷的制造(Ⅰ)—实木陶瓷[J]. 东北林业大学学报,2002,30(4) 5-7.
- [5] 刘一星,李淑君,李坚. 木陶瓷的制造(Ⅱ)—中密度纤维板木陶瓷[J]. 东北林业大学学报,2002,30(5) 47-49.
- [6] GB 1927 ~ 1943-92, 木材物理力学试验方法[S].