

学术论文

基于滑模控制的可拓控制器设计

陈珍源，翁庆昌

(1. 中华技术学院电子系，台湾 台北；2. 淡江大学电机系，台湾 淡水)

[摘要] 根据滑模控制概念，提出一种新的可拓控制器。在控制策略设计上分为两个部分，第一个部分是根据系统已知部分设计滑模控制的等效控制，另一部分为鲁棒控制以解决系统的不确定性因素及外部干扰问题。首先，构造一基本可拓控制器，用所定可拓集的关联函数作为系统状态信息的评价指针，并在其中植入一组待调增益参数，经参数修正来综合滑模可拓控制的鲁棒控制（滑模的撞击控制），以保证系统的稳定性。最后以一个非线性控制系统的仿真为例来说明所设计的可拓控制器的控制性能。

[关键词] 可拓集合；可拓控制；滑模控制；系统稳定性

1 前言

自1983年蔡文教授提出可拓集合理论后^[1,2]，可拓工程方法已成为实际工程应用上一重要的数值分析工具。近年来，该方法已成功地应用在最佳化处理、模式识别、系统辨识、分类器、决策与控制的分析设计上^[3~9]。然而，如何依据设计者所定义的可拓关联函数，提出控制规律的设计方法，仍有待研究者参与探讨。所以在现有可拓概念的情况下，提出系统设计的思维策略，是值得加以重视和刻不容缓的工作。

众所周知，滑模控制是一种鲁棒控制的方法，尤其是在模式的不确定性因素及外在的干扰状况下，可借指定的滑动面和迫使状态轨迹在面上的滑动达到抗干扰和满足低灵敏度要求^[10,11]。笔者将滑模控制的设计策略植入可拓控制中，提出滑模可拓控制器的可行性结构。

文中简述滑模控制，介绍可拓控制器的结构和基于滑模控制的可拓控制器的设计方法，并将所设计的控制规律应用在非线性的简单倒单摆系统上，以检验其控制性能。

2 系统描述

将滑模控制的设计方法引入可拓集，用以构建可拓控制器。

设n阶动态系统为：

$$x^{(n)} = f(x)g + (x)u, \quad (1)$$

其中 $u \in R$ 为控制输入， f 和 g 为未知的非线性连续函数，但已知其可能边界值为 $|f| \leq F$, $0 \leq g \leq g_{\bar{g}}$; $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ 为状态向量。控制的目标是希望提供适当的控制输入 u ，使得误差向量 $e = x - x_d$ 最小，其中 $x_d = [x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{(n-1)}]^T$ 是期望的目标状态向量。

根据滑模控制原理，定义滑动面为：

$$S = e^{(n-1)} + a_1e^{(n-2)} + \dots + a_{n-1}e, \quad (2)$$

其中 a_1, \dots, a_{n-1} ，均为正的常数。为保证状态轨迹逼近预设的滑动面 ($S=0$)，所设计的控制输入 u 必须满足滑动条件：

$$\dot{S} \leq -\eta |S|, \quad (3)$$

其中 η 为正常数。根据式(1)和式(2)可得

$$\begin{aligned} \dot{S} &= e^{(n)} + a_1e^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}e \\ &= f + gu - x_d^{(n)} + a_1e^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}e. \end{aligned} \quad (4)$$

[收稿日期] 2000-11-08；修回日期 2001-03-16

[作者简介] 陈珍源 (1960-)，男，台湾新竹市人，中华技术学院电子系副教授

定义

$$\hat{g} = \sqrt{\bar{g}g}, \quad (5)$$

$$g = \sqrt{\frac{\bar{g}}{g}}. \quad (6)$$

因 $0 \leq g \leq \bar{g} < \bar{g}$, 得

$$g^{-1} \leq \frac{\hat{g}}{g} \leq \bar{g}. \quad (7)$$

一般滑模控制器的控制量由两部分组成：等效控制 u_{eq} 和撞击控制 (hitting control) u_h 。此处，定义控制规律为

$$u = u_{eq} + u_h = g^{-1}\hat{u} - \hat{g}^{-1}G\text{sgn}(S), \quad (8)$$

其中： G 为增益参数，

$$\hat{u} = x_d^{(n)} - a_1e^{(n-1)} - \dots - a_{n-1}e. \quad (9)$$

由式 (4) 和式 (8)，可以得到

$$\dot{S} = f + (\hat{g}g^{-1} - 1)\hat{u} - \hat{g}g^{-1}G\text{sgn}(S). \quad (10)$$

为满足滑动条件， G 的最佳值 G^* 可选为

$$G^* = \eta g^{-1}\hat{g} + |g^{-1}\hat{g}f + (1 - g^{-1}\hat{g})\hat{u}|. \quad (11)$$

由于式中有未知的 f 和 g 函数，该式无法实现。但可根据系统的可能边界以获得其上边界值

$$\bar{G} = (\eta + F)\bar{g} + |1 - \bar{g}| |\hat{u}|. \quad (12)$$

由于 \bar{G} 值太大，在实际应用中难以实现，而且，当状态轨迹越过滑动面时会引起严重的抖动现象，因此， G 需要适当地动态调整。本文采用可拓集概念并植入待调参数以建立 G 值，以期能很好地估算出近似理想的 G 值。

3 可拓控制器设计

设可拓控制规律为：

$$u = \begin{cases} u_h, & S \in E_R \\ u_{eq} + u_h, & S \notin E_R \end{cases} \quad (13)$$

其中 E_R 为可拓区。依据可拓理论的基本概念，可分别在合格区及可拓区设计适宜的控制规律。式 (13) 表示状态轨迹在合格区时采用撞击控制与等效控制，而状态轨迹落在可拓区时采用击撞控制，以期将状态轨迹拉回至合格区。在合理设计 G 值时，还要确保系统的稳定性要求。可拓控制器内 G 参数需要很好地自适应，使状态轨迹从可拓区移入合格区。设存在常数 \hat{G}_E 及最佳 G^* 可使得 $\epsilon = \hat{G}_E - G^*$ 为最小。针对每个误差变量，定义如图 1 所示之可拓关联函数。

假定 G 为

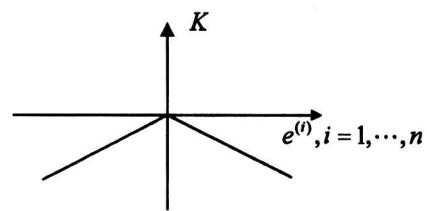


图 1 可拓关联函数

Fig.1 Extension characteristic function

$$G = \xi^T K \quad (14)$$

其中 $\xi = [c_1, c_2, \dots, c_n]^T$ 为植入的一组参数， $K = [k_1, \dots, k_n]^T$ 为误差状态相对应的可拓关联函数权重值，即

$$k_i = \frac{K(e^i)}{\sum_i K(e^i)}. \quad (15)$$

并定义

$$\hat{G}_E = \xi^{*T} K, \quad (16)$$

$$\bar{\xi} = \xi - \xi^*. \quad (17)$$

设李雅普诺夫函数为：

$$V = \frac{1}{2} \left(S^2 + \frac{1}{\gamma} \bar{\xi}^T \bar{\xi} \right), \quad (18)$$

则

$$\dot{V} = S\dot{S} + \frac{1}{\gamma} \bar{\xi}^T \dot{\bar{\xi}} =$$

$$S[f + (\hat{g}g^{-1} - 1)\hat{u} - \hat{g}g^{-1}G\text{sgn}(S)] + \frac{1}{\gamma} \bar{\xi}^T \dot{\bar{\xi}} =$$

$$S[f + (\hat{g}g^{-1} - 1)\hat{u}] - \hat{g}g^{-1}G|S| + S| + \frac{1}{\gamma} \bar{\xi}^T \dot{\bar{\xi}} +$$

$$\hat{g}g^{-1}G^*|S| - \hat{g}g^{-1}G^*|S| +$$

$$\hat{g}g^{-1}\hat{G}_E|S| - \hat{g}g^{-1}\hat{G}_E|S| \leq$$

$$-\eta|S| - \bar{g}^{-1}\epsilon|S| - \bar{g}^{-1}(\xi - \xi^*)K|S| + \frac{1}{\gamma} \bar{\xi}^T \dot{\bar{\xi}} \leq -(\eta + \bar{g}^{-1}\epsilon|S| + \frac{1}{\gamma} \bar{\xi}^T (\bar{\xi} - \bar{g}^{-1}K|S|)). \quad (19)$$

依上式 (19) 选择

$$\bar{\xi} = \bar{g}^{-1}\gamma K|S|, \quad (20)$$

使得

$$\dot{V} \leq -(\eta + \bar{g}^{-1}\epsilon|S|) < 0, \quad (21)$$

表明系统为稳定的可拓控制系统。为了在合格区降低撞击控制所造成的抖动现象，修正撞击控制为：

$$u_h = -\hat{g}^{-1}G\text{sat}(S) \quad (22)$$

其中 $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和函数。

所提出的可拓控制器的设计流程归结如下：

- a. 定义适当的滑动面 S ；

b. 根据式(8)、式(9)和式(14)建立等效控制及撞击控制;

c. 根据 S 值决定可拓区与合格区, 并定义可拓关联函数;

d. 依式(20)调整撞击控制的增益参数;

e. 可拓控制器设计完成。

4 仿真案例

将所设计的可拓控制器用于控制一个简化的倒单摆非线性系统, 设参考输入为 $x_d = \sin(t)$ 。

$$\ddot{x} + (0.5 + 0.2\sin(t))\dot{x} + 3.2\cos x = (1 + 0.2\sin(x))u, \quad (23)$$

明显地, $\bar{g} = 1.2$ 和 $\underline{g} = 0.8$, 可得 $\hat{g} = 0.98$ 和 $g = 1.22$ 。滑动面定为

$$S = \dot{e} + 2e \quad (24)$$

根据式(8), 等效控制及撞击控制分别为:

$$u_{eq} = \hat{g}^{-1}\hat{u} = \frac{1}{0.98}(-\sin(t) - 2e), \quad (25)$$

$$u_h = -\frac{1}{0.98}G \operatorname{sgn}(S). \quad (26)$$

其中

$$G = \xi^T K, \quad (27)$$

$$\xi = g^{-1} \gamma K + S = \frac{1}{1.22} \gamma K + S. \quad (28)$$

可拓区定为 $E_R = [1, \infty]$ 。输出响应、控制信号及 S 轨迹分别示于图2至图4上。图2中实线为 x_d , 虚线为 x_1 。根据仿真结果, 可知所设计的可拓控制器获得不错的控制效果。

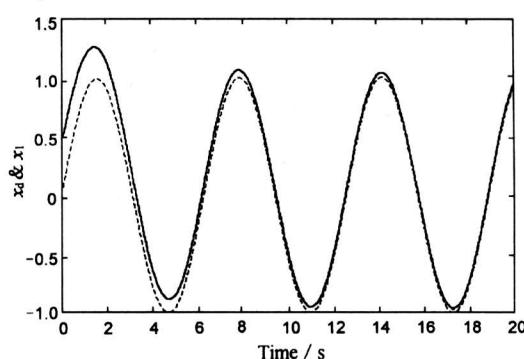


图2 输出响应

Fig.2 Output trajectory

5 结论

本文提出了基于滑模控制的可拓控制器结构,

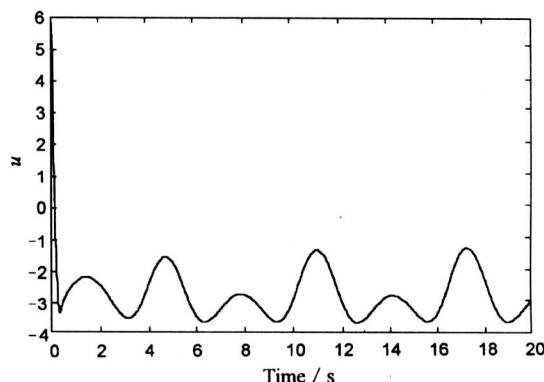


图3 控制信号

Fig.3 Control signal trajectory

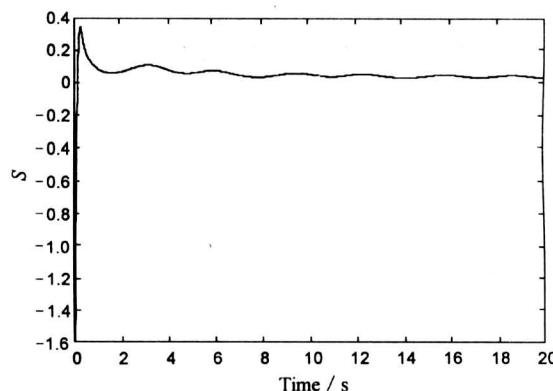


图4 S 轨迹

Fig.4 S trajectory

分别针对可拓区及合格区运用不同的控制规律, 其一为撞击控制, 当状态轨迹落在可拓区时采用撞击控制, 另一为合格区中的等效控制与撞击控制的综合。同时为降低抖动现象, 在合格区中, 撞击控制时可用一饱和函数予以平滑处理。最后, 用简单非线性系统的仿真例子说明所设计的可拓控制器效能。

参考文献

- [1] Cai W. The extension set and incompatible problem [J]. Journal of Science Exploration, 1983, 1: 81~93
- [2] 蔡文, 杨春燕, 林传初. 可拓工程方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1997
- [3] 张光宇. 土地资源优化配置的物元模型 [J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(1): 108~112
- [4] 李志林. 物元模型在股市预测中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(1): 121~124, 130
- [5] 陈巨龙. 可拓决策 [A]. 从物元分析到可拓学 [C],

1995. 217~224
- [6] 王鸿绪. 可拓聚类分析 [A]. 从物元分析到可拓学 [C], 1995. 337~342
- [7] 赵恩昌, 钟漫如, 蓝 荣. 人体健康定量评估模型 [A]. 从物元分析到可拓学 [C], 1995. 334~336
- [8] 王行愚, 李 健, 胡 琦. 可拓控制 [A]. 从物元分析到可拓学 [C], 1995. 166~172
- [9] 胡 琦, 王行愚. 可拓语言控制器的设计 [A]. 从物元分析到可拓学 [C], 1995. 173~179.
- [10] Chen J Y. Fuzzy sliding mode controller design: indirect adaptive approach [J]. Cybernetics and Systems: An International Journal, 1999, 30(1): 9~27
- [11] Chen J Y. Design of adaptive fuzzy sliding mode controller for nonlinear systems [J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 1999, 7(5): 463~474
- [12] Chen J Y. Rule regulation of fuzzy sliding mode controller design: direct adaptive approach [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 120(1): 159~168
- [13] Chen J Y. Expert SMC-based fuzzy control with genetic algorithms [J]. Journal of Franklin Institute, 1999, 336(4): 589~610

Extension Controller Design via Sliding Mode Control

Chen Jenyang¹, Wong Chingchang²

(1. Department of Electronic Engineering, China Institute of Technology, Taipei, Taiwan, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tamkang University, Tamsui, Taipei Hsien, Taiwan, China)

[Abstract] In this paper, a novel extension controller based on the scheme of sliding mode control is investigated. The control strategy of the proposed controller is divided into two parts. One part is the equivalent control of sliding mode control. It can be directly obtained from the known nominal system. The other part is the well-known robust control. This control term is used to compensate the system uncertainty and external disturbance. By integrating the essential concept of extension set theory with the sliding mode control, the robust extension controller can be easily realized. In this study, a basic extension controller is organized first without any specific expert knowledge about the controlled system. The extension dependent functions are employed to provide system states' information under control. A set of parameter is incorporated in the extension controller so that a robust control, also called as a hitting control, is established to guarantee the system robust stability. Actually, the proposed extension controller is stable in the sense of the Lyapunov. Finally, the proposed extension controller is applied to controlling a nonlinear system to verify its effectiveness and ability.

[Key words] extension set; extension control; sliding mode control; system stability

《中国工程科学》2001年第3卷第10期要目预告

- | | | | |
|----------------------|------|-----------------------|------|
| 钱学森与力学 | 谈庆明 | 波浪与外壁透空双筒柱的互相作用 | 滕 斌等 |
| 钱学森与控制论 | 郑应平 | 深海采矿扬矿管横向运动动态分析 | 刘 江等 |
| 海水西调与我国沙漠和沙尘暴的根治 | 陈昌礼 | 指数量型粘度修正模型及应用 | 曲庆文等 |
| 纯碱生产中新型碳酸化塔的开发 | 周光耀 | 有限元模型修正技术的工程应用 | 陈德成等 |
| 城市排水系统的现代观 | 张 杰 | 激光熔覆 NiCrAl 陶瓷涂层的显微组织 | |
| 大力测量技术的新发展——附着式超轻型 | | 研究 | 陈庆华等 |
| 大力传感器 | 沈久珩 | 造纸提取黑液污染零排放新工艺研究 | 黄立新等 |
| 六自由度并联平台特性分析及其电液位置伺服 | | 三峡工程质量管理的实践和探索 | 王家柱等 |
| 系统的 CMAC 神经网络控制 | 翟传润等 | 纳米技术及其对科技产业革命的影响 | 袁 俊 |
| 基于知识的多变量非线性系统结构解耦 | | 铜冶金清洁生产工艺——闪速熔炼 | 周松林 |
| 控制 | 涂承媛等 | | |