

模糊变结构控制器的研究*

王 灏 毛宗源 周其节

(华南理工大学自动控制工程系·广州, 510640)

摘要: 本文揭示了模糊监督控制的变结构本质, 并以到达条件的模糊化过程为例, 说明了它与传统的边界层方法的等价性. 因此可用以削弱在模糊监督控制中所出现的抖振, 文末给出了仿真结果.

关键词: 变结构控制; 模糊监督控制; 边界层; 抖振

Fuzzy Variable Structure Controller

Wang Hao, Mao Zongyuan and Zhou Qijie

(Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology·Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: By constructing method, the VSC essence of FSC is revealed. Fuzzification process of sliding mode is introduced, which is an extension of the conventional VSC theory, with supporting simulation results given.

Key words: variable structure control(VSC); fuzzy supervisory control(FSC); boundary layer; chattering

1 引言(Introduction)

为控制诸如机器人之类的具有动态不确定性的对象, 单纯采用传统的变结构方法或模糊控制方法都不能取得令人满意的效果. 另外, 无论使用哪种方法, 在控制过程中都会出现控制或状态的抖振现象.

在前期工作中^[1]我们曾指出: 在描述被控对象动特性的状态方程的右端表达式中, 模糊监督控制和变结构控制都具有不连续的函数, 从而可推测其间应具有某种本质的关系^[2]. 已经有同仁在这一方面进行了有益的探索^[3]. 本文将证明, 通过选择一特定形式的李亚普诺夫函数, 模糊监督控制本质上是一种变结构控制.

2 模糊变结构控制器(FVSC)的设计原理 (Design principle of fuzzy variable structure controller)

2.1 控制目标(Control objectives)

本文限于讨论满足匹配条件的情形, 即: 系统的不确定性可集总到控制输入的象空间. 此时, 单输入单输出的 n 阶仿射非线性系统可用下式来描述:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})u, \\ y = x. \end{cases} \quad (1)$$

其中 f 和 g 为未知的连续函数; 系统的不确定性已集总到 g 中; 系统输入和输出分别为 $u \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}$;

系统状态向量为 $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \in \mathbb{R}^n$ 且可观测; 设当 $\underline{x}$ 在可控区域内时, $g(\underline{x}) > 0$. 即此时 $\underline{x} \in U_c \subset \mathbb{R}^n$.

2.2 模糊变结构控制器(FVSC)的设计(Design of fuzzy variable structure controller)

从传统的变结构控制器的设计思想出发, 通过下列步骤设计 FVSC.

1) 非线性开关曲面的选取. 虽然变结构理论并没有一定要求选取的开关曲面为线性的, 但出于各种考虑, 目前绝大部分的文献都是选择线性开关曲面. 作者曾指出^[1]: 在 2 阶状态方程的情况下, 模糊监督控制的开关曲面从几何上来说是一族形心位于理想相轨迹上的椭圆. 并可用一个正定的二次型来描述. 鉴于此, 取下面的非线性开关曲面:

$$S = \frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{e} - \bar{V}, \quad (2)$$

其中 P 为某特定李亚普诺夫代数方程的正定解阵^[5], $\bar{V}$ 是由设计者指定的性能指标, 恒为正数; 跟踪误差(标量)定义 $e(t) = y_m(t) - x(t)$, 其中 $y_m(t)$ 为连续的理想目标跟踪轨迹. 再据此定义系统误差向量 $\underline{e}$ 为: $\underline{e} = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$.

选取上述开关曲面的原因是: 当且仅当 $\underline{e}$ 为零向量时, 开关曲面的第一项为零. 即系统正好运行于理想轨迹上(因为矩阵 P 为正定); 在其它任何情况

* 国家攀登计划认识科学(神经网络模型)重大关键项目及广东省自然科学基金(960304)资助项目.
本文于 1997 年 3 月 21 日收到, 1998 年 8 月 5 日收到修改稿.

下,它都大于零.设计者通过 $\bar{V}$ 来指定所要求的跟踪误差范围和允许的偏移误差. $\bar{V}$ 越大则控制精度越低; $\bar{V}$ 越小则控制精度越高.因此在式(2)中的第一项用于量度轨迹的偏移程度而第二项为这种度量意义下的偏差的上限值.

2) 类滑动模态.定义 FVSC 情形的滑动模态为 $S = \frac{1}{2}e^T P e - \bar{V} \leq \epsilon$, 其中 ϵ 是给定非负常数,表示允许误差.从而系统运行的精度必在 $\bar{V} + \epsilon$ 以内.此处的不等式可化为由两个等式所界定的一个区域.因此具有滑动模态的特性.

3) 类到达条件.由李亚普诺夫第二法: $\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 < 0$, 考虑到切换曲面式(2), 有以下的简化结果: “当 $S > 0$ 时, $\dot{S} < 0$; 当 $S < 0$ 时, $\dot{S}$ 符号任取但最好为负”.

4) 控制律.设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 已精确知道,则通过适当选取的参数向量 $\underline{k}$, 采用下面的控制律,可使系统误差渐近稳定到原点^[5]:

$$u_0 = \frac{1}{g(x)} [-f(x) + y_m^{(n)} + \underline{k}^T \underline{e}]. \quad (3)$$

设系统的 $f(x)$ 和 $g(x)$ 采用某种方法(包括各种辨识方法,当然也包括模糊算法)来估计,记为 $\hat{f}(x)$ 和 $\hat{g}(x)$.设:采用估值而产生的误差能由下式中的 u_{VSC} 来精确补偿,则仍能保持系统误差的渐近稳定性:

$$u_1 = \frac{1}{\hat{g}(x)} [-\hat{f}(x) + y_m^{(n)} + \underline{k}^T \underline{e}] + u_{VSC}. \quad (4)$$

由已有的条件和参数,采用与文[5]完全类似的方法,可推导出系统的误差方程 $\{\Delta, \underline{b}_c\}$ (系统矩阵和控制矩阵)和 $\dot{S}$. 设 Q 为设计者根据要求的收敛速度所选取的正定对称矩阵^[1], 则

$$\begin{aligned} \dot{S} = & \left(\frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{e} + \frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{e} \right) - 0 = \\ & - \frac{1}{2} \underline{e}^T Q \underline{e} + \underline{e}^T P \underline{b}_c [g(x) u_0 - g(x) u_1]. \end{aligned} \quad (5)$$

在上式的推导中,利用了系统误差方程和李亚普诺夫方程,从而消除了 $\underline{e}$ 项.

由此我们可得出:若实现精确估计,则 $\dot{S}$ 恒为负数,系统必渐近稳定到误差原点;否则,须借助于加入控制项 u_{VSC} 来迫使系统运行于上面已定义的一类滑动模态区之内,此时式(5)因不能保证为非负,而使系统的渐近稳定性不成立,而只能为一致终结有界(uniformly ultimately bounded)^[4].

将式(5)的第二项展开并记为:

$$\begin{aligned} \dot{S}_2 = & \underline{e}^T P \underline{b}_c [-f(x) + y_m^{(n)} + \underline{k}^T \underline{e} - \\ & \frac{g(x)}{\hat{g}(x)} (-f(x) + y_m^{(n)} + \underline{k}^T \underline{e}) - \\ & g(x) u_{VSC}] < 0. \end{aligned} \quad (6)$$

上式中除须估计的函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 以外,其它全部已知或可在控制时通过测量得到.取控制律^[1]

$$u_{VSC} = (f(x) - f_d(x) + (g(x) - g_d(x)) u_0) / g_L(x), \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} f_d(x) = & \begin{cases} f_L(x), \text{sgn}(\underline{e}^T P \underline{b}_c) = 1; \\ f^u(x), \text{sgn}(\underline{e}^T P \underline{b}_c) = -1; \end{cases} \\ g_d(x) = & \begin{cases} g_L(x), \text{sgn}(\underline{e}^T P \underline{b}_c u_0) = 1; \\ g^u(x), \text{sgn}(\underline{e}^T P \underline{b}_c u_0) = -1; \end{cases} \end{aligned}$$

而 f^u, f_L, g^u, g_L 分别为有关函数的上下界.

至此,将类到达条件可明确地表述为 If-Then 的形式: “If $S > 0$ Then $u = u_0 + u_{VSC}$ ”. 其中 “ $S > 0$ ”

以模糊集 F 来刻画,在以 $\frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{e}$ 为自变量论域上以连续形式的隶属度函数 $\alpha = \mu_F(x)$ 给出,例如可取为图 1 所示的带有死区的折线型. 取 Tagaki-Sugeno 型模糊算法 (IF X_1 is A_1 and ... and X_k is A_k THEN $y = P_0 + P_1 * X_1 + \dots + P_k * A_k$), 则得控制律: $u = u_0 + \alpha \cdot u_{VSC}$. 这样通过适当选取的模糊推理及去模糊化方法使 u_{VSC} 一直在起作用,从而达到了类似边界层削弱抖振的效果. 特别地,在图 1 的情况下,所得控制律与饱和型的边界层方法完全吻合. 这从另一方面也映证了模糊监督控制与变结构控制的本质联系.

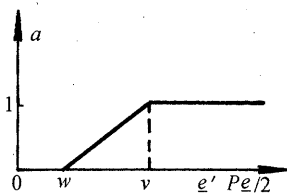


图 1 模糊集 $F: S > 0$

Fig. 1 Fuzzy set $F: S > 0$

3 仿真结果及讨论 (Simulation results and discussions)

为便于比较,选取文献^[5,1]的倒立摆模型

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{g \sin x_1 - \frac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} + \frac{\cos x_1}{m_c + m} u, \end{cases}$$

且跟踪同样的正弦位置函数

$$y_m = x_{1d} = \frac{\pi}{30} \sin t.$$

其中

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2, l = 0.5 \text{ m}, m_c = 1 \text{ kg}, m = 0.1 \text{ kg}.$$

图2为在 Matlab 下 Simulink 环境中的仿真方块图.

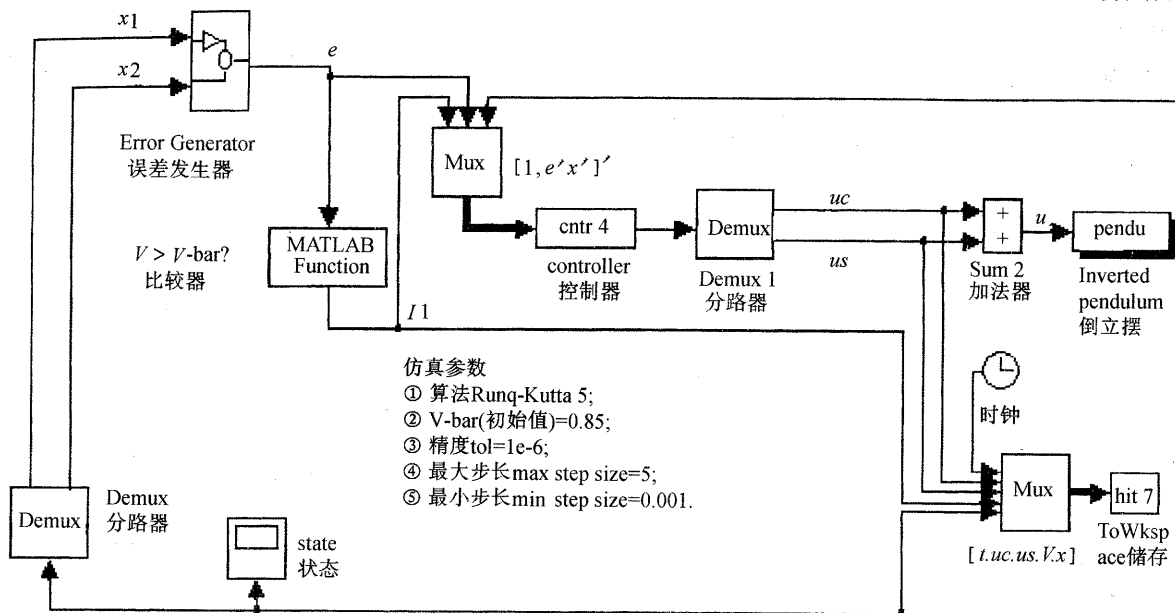


图2 Simulink 仿真方块图

Fig. 2 Simulink block diagram

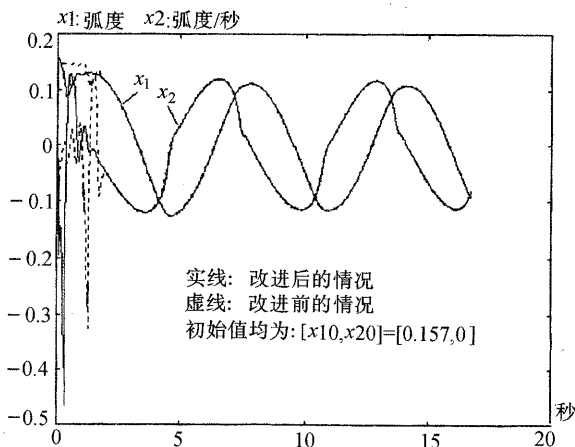


图3 状态轨迹

Fig. 3 State trajectories

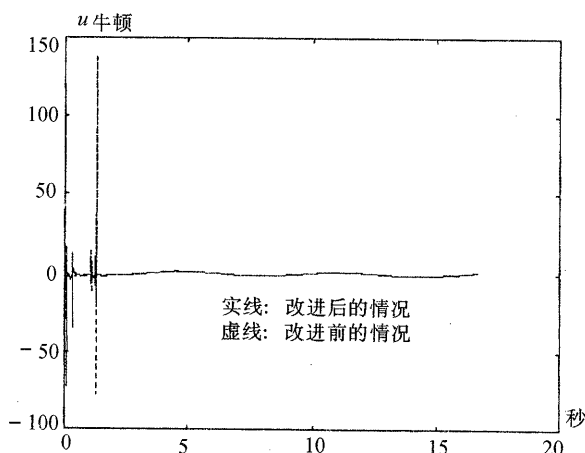


图4 控制轨迹

Fig. 4 Control trajectories

图3,4示出状态和控制轨迹.控制策略如下:类滑动模上进行参数的自适应调整^[1],在模糊边界层上进行变结构控制.这样就避免了可能出现的参数的自适应与变结构控制同时作用而可能产生不利的效果.

图3,4显示在同样的情况下状态抖振的频率明显下降,控制抖振幅度的降低达到文献^[5,1]算法的30%,效果令人满意.

4 结论(Conclusions)

应该指出,本文所说的模糊变结构控制器,类滑动模等与现有的文献所说的变结构的表达形式还是

有差别的.这表现在:① 希望的运行区域以不等式来表示,因此不局限于线或面,而是流型,即滑动模态流型;② 无论是滑动模态流型,还是到达条件,或是控制律,都可以赋予某种隶属度函数而实现模糊化.尤其是控制律,可直接加入 IF-THEN 形式的智能系统,从而使变结构方法有了一种质的扩展.

上述推导过程的本身即是用构造法证明了间接模糊监督控制器是一种变结构控制器.本文的重点在于用变结构的理论将有关模糊监督控制器和常规变结构控制器的分析统一到一个完全相同的框架里

(下转第 557 页)

从实验结果我们可以得出结论,加速度计的低频输出反馈确实能有效地消除末端振动,而其中的高频输出不但不能消除开端振动,而且对系统的稳定性不利。

6 结论(Conclusion)

本文采用非拘束模态分析方法,对单连杆柔性机械手的加速度反馈问题进行了研究,理论研究和实验研究的结果表明,经过滤波后的末端加速度计的反馈不会破坏系统稳定性,且能有效地抑制末端的振动。而不经滤波的高频加速度反馈对系统的稳定性不利,也无法消除末端振动。一般来说,非并置的传感器输出反馈可能使系统有不稳定倾向,但加速度反馈作为一种特殊的非并置的传感器输出反馈,由于其中含有低频的关节运动分量,这一分量能消除末端的振动并且使闭环系统保持稳定。

参考文献(References)

- 1 Sim E and Lee S W. Active vibration control of flexible structures with acceleration feedback. *J. of Guidance Control & Dynamics*, 1993, 16(2):413-415
- 2 Korrami F and Jain Sandeep. Nonlinear control with end-point acceleration feedback for a two-link flexible manipulator; experimental results. *J. of Robotic Systems*, 1993, 10(4):505-530
- 3 Park J H and Asada H. Design and analysis of flexible arms for minimum-phase end-point control. *Proc. Amer. Control Conf.*, 1990, 2:

1220-1225

- 4 Cetinkunt S and Yu W L. Closed-loop behavior of a feedback-controlled flexible arm; a comparative study. *Int. J. Robotics Research*, 1991, 10(3):263-275
- 5 张戎军. 基于传感器的柔性机械手控制研究:[博士后研究报告]. 北京:清华大学计算机系, 1996
- 6 Inman D J. Dynamics of asymmetric nonconservative systems. *Trans. ASME, J. Applied Mechanics*, 1983, 50(1):199-203

本文作者简介

张戎军 1968年生. 1994年在华中理工大学船舶与海洋工程力学专业获博士学位. 1995年至1996年在清华大学计算机系计算机应用专业从事博士后研究. 1997年1月起在美国普渡大学印第安纳分校电子工程系从事博士后二站研究. 主要从事柔性机械手和电动汽车的控制理论与实验系统研究. 在国内外期刊以第一作者发表论文20余篇.

孙增圻 1943年生. 1966年毕业于清华大学自动控制系, 1981年在瑞典获博士学位. 现为清华大学计算机系教授, 博士生导师, 并兼任国家航天863遥科学及空间机器人专家组组长, 全国智能自动化学会副主任等职务. 共鉴定8项成果, 三项获国家教委科技进步二等奖, 一项获三等奖, 发表论文100多篇, 编著书7本. 主要研究领域为神经网络控制, 模糊控制, 机器人智能控制与仿真.

孙富春 1964年生. 1998年在清华大学计算机系计算机应用专业获博士学位. 现在清华大学自动控制博士后流动站从事空间机器人及智能控制方面的研究. 共鉴定成果5项, 以第一作者在IEEE汇刊等国际刊物发表论文5篇, 国内刊物发表论文15篇. 目前研究兴趣为模糊逻辑和神经网络控制, 离散系统的滑动模控制和柔性机器人的建模与智能控制.

(上接第552页)

(而不是依赖于特定的控制律的形式), 便于进一步的研究. 事实上, 本文已经为设计全面融合模糊控制和变结构控制思想的新一代控制器(FVSC)作出了有意义的理论探索.

参考文献(References)

- 1 王灏, 毛宗源, 周其节. 结构自组织间接自适应模糊控制算法的研究. *控制理论与应用*, 1996, 13(增刊):141-146
- 2 Filipov A F. Differential Equations with Discontinuous Right Hand Sides. *Am. Math. Soc. Trans.*, 1964, 42:199-231
- 3 Yi S Y and Chung M J. Systematic design and stability analysis of a

fuzzy logic controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, 72:271-298

- 4 Corless M J and Leitmann G. Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems. *IEEE Trans.*, 1981, AC-26(5):1139-1144
- 5 Wang L X. *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis*. Singapore: PTR Prentice Hall, 1995

本文作者简介

王灏 1964年生. 博士研究生, 副教授. 研究领域: 智能控制, 机器人学及工业可编程控制系统.

毛宗源 见本刊1999年第1期第20页.

周其节 见本刊1999年第1期第42页.