

一类非确定欠驱动系统的串级模糊滑模控制

王伟^{1,2}, 易建强², 赵冬斌², 柳晓菁²

(1. 北京理工大学 信息科学技术学院, 北京 100081; 2. 中国科学院 自动化研究所 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

摘要: 本文针对一类含有非确定项的欠驱动系统提出了一种串级模糊滑模控制方法. 该方法先选取状态变量中两个相关联的系统状态构造第一级滑动平面, 然后将第一级滑模函数作为一个广义状态, 与剩下系统状态中的一个状态构造第二级滑动平面, 直到所有的系统状态都包含在内构造最后一级滑动平面. 同时考虑到系统模型中存在的不确定项, 利用模糊逻辑的逼近功能进行估计, 文中采用 Lyapunov 方法求取了控制器的控制律以及模糊逼近的有关参数的自适应律. 该串级模糊滑模控制器能够保证各级滑动平面的稳定性, 并且在仿真实验中得到了验证.

关键词: 串级; 滑模控制; 模糊逻辑; 欠驱动系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Cascade fuzzy sliding mode control for a class of uncertain underactuated systems

WANG Wei^{1,2}, YI Jian-qiang², ZHAO Dong-bin², LIU Xiao-jing²

(1. School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100080, China;

2. Laboratory for complex systems and intelligence science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, a new cascade fuzzy sliding-mode controller (CFSMC) for a class of uncertain underactuated systems is presented. Firstly, the system states are divided into several parts, and two related states are chosen to construct the first-level sliding-mode surface which can be considered as a general state variable. Secondly, the first-level sliding plane and one of the remaining state variables are used to construct the second-level sliding surface. This process continues till the last-level sliding surface is obtained. Considering there are uncertainties in the system's model, fuzzy logic is adopted as an approximator to identify the uncertainties. Using Lyapunov law, we derive the sliding-mode control law and the related parameters adaptive law of fuzzy approximator. The CFSMC can guarantee the stability of all the sliding planes, and the simulation results show the validity of this method.

Key words: cascade; sliding-mode control; fuzzy logic; underactuated system

1 引言 (Introduction)

欠驱动系统是指系统的独立控制变量个数小于系统自由度个数的一类非线性系统. 欠驱动控制系统的例子很多, 例如空间机器人、移动机器人、倒立摆、欠驱动机器人 (Pendubot, Arcobot 等) 以及吊车系统等等. 欠驱动系统的研究对于非线性控制研究和非线性动力学研究等都具有重要的价值, 同时欠驱动系统在实际应用中的优点也是显而易见的, 由于驱动器的减少, 将使整个控制系统重量减轻、成本降低, 同时体积也减少了. 但是从控制的角度上讲, 用较少的控制量来实现多个控制要求往往是相当困难的. 总之, 对于欠驱动系统的控制方法的研究具有

重要的理论价值和应用价值, 同时也存在着较大的难度.

目前关于各种欠驱动系统模型的控制方法的研究有很多. 文献[1]从能量的角度提出了一种稳定控制方法, 解决了 Pendubot 的稳定控制问题; 文献[2]中研究的是一种线性时变的吊车模型, 采用了最优控制策略, 同时针对对象的变参数的特点提出了一种变反馈增益的状态反馈控制法; 其他关于欠驱动系统研究的文章也很多^[3,4]. 但是, 这些文献都是基于系统较精确的数学模型的, 当系统中存在未建模部分时, 上述的这些方法往往就不适用了, 因此有必要考虑采用其他的方法来解决非确定欠驱动系

统的控制问题.

模糊滑模控制方法目前正在以其独特的优越性得到各国学者的重视. 模糊逻辑与滑模控制的结合主要有3种方式: 1) 采用模糊逻辑对滑模控制器中的符号函数或饱和函数进行调节^[5]; 2) 采用模糊逻辑对滑模控制器的控制量进行补偿^[6]或对其参数进行调节^[7,8]; 3) 采用模糊逻辑对系统中的未知部分进行估计^[9]等等. 对于带有不确定项的非线性系统, 采用模糊逻辑对不确定项进行估计^[10]是目前解决非线性系统不确定性的一个理想的方案. 关于控制器结构的研究目前各国学者也都进行了大量工作, Wang^[11]提出了一种分层模糊控制器结构, 将系统分成若干层, 然后再将各层模糊控制器逐层连接起来, 这样就将高维系统降低成低维模糊系统来设计, 因此减少了模糊规则的数量, 从而简化了整个控制器的设计; Yi^[12]提出了一种基于单输入规则模式(SIRMs)的模糊推理模型, 同样是将系统状态拆开考虑, 分别设计规则库, 在确定控制量时再将各种情况综合起来进行设计从而达到简化设计的目的. 总之, 对于复杂系统来说, 采用合适的结构可以大大简化设计的复杂程度, 并将对复杂的控制器的实现起到至关重要的作用. 本文就是在此思想上针对一类非确定欠驱动系统的模型提出了一种串级模糊滑模控制器(CFSMC), 该方法将系统的状态分成若干部分, 首先选取两个相关联的系统状态构造第一级滑动平面, 然后将第一级滑模函数作为一个广义状态, 从剩下的系统状态中挑选一个进行组合构造第二级滑动平面, 如此下去直到将所有的系统状态都包含在内构造最后一级滑动平面. 同时考虑系统模型中存在的项, 利用模糊逻辑的逼近功能进行逼近, 从而构造了具有串级结构的等效控制律, 采用Lyapunov方法进一步求取了控制器的切换控制律以及模糊逼近的有关参数的自适应律. 该串级模糊滑模控制器能够保证各级滑动平面的稳定性, 并且通过吊车系统的仿真实验得到了验证.

2 串级滑模控制器结构设计 (Structure design of cascade sliding-mode controller)

考虑如下结构形式的单输入多输出非线性耦合系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = f_1(X) + b_1(X)u(t) + d_1(t), \\ \dot{x}_3(t) = x_4(t), \\ \dot{x}_4(t) = f_2(X) + b_2(X)u(t) + d_2(t), \\ y(t) = [x_1(t), x_3(t)]^T. \end{cases} \quad (1)$$

这里 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ 为系统的状态变量; $f_1(X), f_2(X)$ 为非确定的非线性函数; $b_1(X), b_2(X)$ 为已知的控制项非线性函数; $d_1(t), d_2(t)$ 为有界的外部扰动和系统参数扰动项; $u(t)$ 为系统的控制输入. 为方便起见, 将 $f_i(X), b_i(X), d_i(X)$ 简写为 $f_i, b_i, d_i (i = 1, 2)$. (x_1, x_2) 和 (x_3, x_4) 作为两组状态变量, 两者之间是相对耦合的, 控制的目的是通过一个控制输入 $u(t)$ 使得两组系统状态分别达到各自的期望指标. 这种形式显然是二阶欠驱动控制系统 (如 Acrobot, Pendubot, 二级倒立摆以及桥式吊车系统等) 的一个统一的表示方式.

对于 (x_1, x_2) 作为一组系统状态变量, 构造滑动平面 s_1 , 作为整个串级滑模控制器的第1级, 其形式如下:

$$s_1 = c_1 x_1 + x_2. \quad (2)$$

将 s_1 看作一个广义状态变量, 这样它与其他子系统的状态又可以构成第2级滑动平面 s_2 , 其形式如下:

$$s_2 = c_2 x_3 + s_1. \quad (3)$$

同样, 再将 s_2 看作一个广义状态变量与剩下的系统状态在进行组合从而构成了第3级滑动平面 s_3 , 其形式如下:

$$s_3 = c_3 x_4 + s_2. \quad (4)$$

采用等效控制法分别求取各级滑动平面的等效控制量 $u_{eq1}, u_{eq2}, u_{eq3}$:

$$u_{eq1} = -\frac{f_1 + c_1 x_2}{b_1}, \quad (5)$$

$$u_{eq2} = -\frac{c_2 x_4 + c_1 x_2 + f_1}{b_1}, \quad (6)$$

$$u_{eq3} = -\frac{c_3 f_2 |\operatorname{sgn} s_2| + c_2 x_4 + c_1 x_2 + f_1}{c_3 b_2 \cdot |\operatorname{sgn} s_2| + b_1}. \quad (7)$$

从上式可以看出, 当选择合适的控制量控制第3级滑动平面 s_3 收敛到零时, 等效控制量 u_{eq2} 将保证滑动运动保持在 $s_3 = 0$ 上滑动, 当 s_3 收敛到原点时, 它的各个状态也将同时等于零, 即 $x_4 = s_2 = 0$, 这样串级滑模控制器将退化成二级滑模控制器, 等效控制量 u_{eq3} 也将退化成等效控制量 u_{eq2} , 系统将沿 $s_2 = 0$ 平面运动; 同样, 当第2级滑动平面收敛到原点时, 它的各个状态也将同时收敛到零, 即 $s_1 = x_3 = 0$, 这是串级滑动平面将退化成一级的, 其控制量也将退化成一级的滑模控制器, 这样在保证最后一级稳定的情况下实现了整个系统各个状态的控制.

但是, 当系统模型中含有不确定项时, 即 f_1, f_2 未知情况下, 系统的等效控制量也就无法获得, 因此下面考虑采用模糊逻辑的方法来对不确定项进行估

计来实现整个控制器的设计。

3 模糊估计器设计 (Design of fuzzy approximator)

针对系统模型中含有的不确定项 f_1, f_2 , 这里采用模糊逻辑系统的逼近能力来进行逼近。对于一个模糊系统的设计主要包括输入变量模糊化, 建立模糊规则库, 模糊推理机制以及输出变量的反模糊化四个部分。Wang^[13] 证明了模糊系统在闭集上能够逼近任意给定的连续函数到任意给定精度。这里采用文献[14]给出的模糊系统的构造方法来设计模糊估计器。因此 f_1 的模糊推理的形式如下所示

$$\begin{aligned} & \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^{r_1} \text{ and } \cdots \text{ and } x_4 \text{ is } A_4^{r_4}, \\ & \text{THEN } \hat{f}_1 \text{ is } \theta_1^{r_1 r_2 \cdots r_4}, \end{aligned} \quad (8)$$

同理, 可选择 f_2 的模糊推理形式为

$$\begin{aligned} & \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^{l_1} \text{ and } \cdots \text{ and } x_4 \text{ is } A_4^{l_4}, \\ & \text{THEN } \hat{f}_2 \text{ is } \theta_2^{l_1 l_2 \cdots l_4}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中系统的状态 x_i 为模糊估计器的输入, $A_i^{r_i}, A_i^{l_i}$ 为定义在输入空间上的模糊集; 模糊估计器的输出为待估计的未知函数; θ_1, θ_2 为定义在输出空间上的估计函数的系数。因此, 采用单点模糊化 (singleton), 乘积推理规则 (product) 以及中心平均法 (center average) 进行反模糊化, 可以得到未知项 f_1, f_2 的估计表达式如下所示:

$$\hat{f}_1(x|\theta_1) = \frac{\sum_{r_1=1}^{p_1} \cdots \sum_{r_4=1}^{p_4} \theta_1^{r_1 r_2 \cdots r_4} \left(\prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^{r_i}}(x_i) \right)}{\sum_{r_1=1}^{p_1} \cdots \sum_{r_4=1}^{p_4} \left(\prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^{r_i}}(x_i) \right)}, \quad (10)$$

$$\hat{f}_2(x|\theta_2) = \frac{\sum_{l_1=1}^{q_1} \cdots \sum_{l_4=1}^{q_4} \theta_2^{l_1 l_2 \cdots l_4} \left(\prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)}{\sum_{l_1=1}^{q_1} \cdots \sum_{l_4=1}^{q_4} \left(\prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)}. \quad (11)$$

进一步定义模糊基函数 $\xi_1^{r_1 r_2 \cdots r_4}(x), \xi_2^{l_1 l_2 \cdots l_4}(x)$ 来简化对 f_1, f_2 的一个逼近, 其表达式如下:

$$\xi_1^{r_1 r_2 \cdots r_4}(x) = \frac{\prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^{r_i}}(x_i)}{\sum_{r_1=1}^{p_1} \cdots \sum_{r_4=1}^{p_4} \left(\prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^{r_i}}(x_i) \right)}, \quad (12)$$

$$\xi_2^{l_1 l_2 \cdots l_4}(x) = \frac{\prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{q_1} \cdots \sum_{l_4=1}^{q_4} \left(\prod_{i=1}^4 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)}. \quad (13)$$

则未知项 f_1, f_2 的估计函数进一步可以表示成:

$$\hat{f}_1 = \hat{f}_1(x|\theta_1) = \theta_1^T \xi_1(x), \quad (14)$$

$$\hat{f}_2 = \hat{f}_2(x|\theta_2) = \theta_2^T \xi_2(x). \quad (15)$$

这里, $\theta_1 = [\theta_1^{11 \cdots 1}, \cdots, \theta_1^{p_1 p_2 \cdots p_4}]^T, \xi_1 = [\xi_1^{11 \cdots 1}, \cdots, \xi_1^{p_1 p_2 \cdots p_4}]^T; \theta_2 = [\theta_2^{11 \cdots 1}, \cdots, \theta_2^{q_1 q_2 \cdots q_4}]^T, \xi_2 = [\xi_2^{11 \cdots 1}, \cdots, \xi_2^{q_1 q_2 \cdots q_4}]^T$.

这样, 串级滑模控制器的等效控制量可以表示成如下形式:

$$\hat{u}_{eq} = -\frac{c_3 \hat{f}_2 \cdot |\operatorname{sgn} s_2| + c_2 x_4 + c_1 x_2 + \hat{f}_1}{c_3 b_2 \cdot |\operatorname{sgn} s_2| + b_1}. \quad (16)$$

4 串级模糊滑模控制器的控制律设计 (Design of control law of cascade fuzzy sliding-mode controller)

设总的控制量如式(17)所示

$$u = \hat{u}_{eq} + u_{sw}. \quad (17)$$

这里 u_{sw} 为系统在趋近阶段的切换控制分量。

针对上一节中的模糊估计器, 定义最优的估计参数如下所示:

$$\theta_1^* = \arg \inf_{\theta_1 \in \mathbb{R}^p} [\max_{x \in \mathbb{R}^n} |f_1(x) - \hat{f}_1(x|\theta_1)|], \quad (18)$$

$$\theta_2^* = \arg \inf_{\theta_2 \in \mathbb{R}^q} [\max_{x \in \mathbb{R}^n} |f_2(x) - \hat{f}_2(x|\theta_2)|]. \quad (19)$$

因此估计参数的误差可以表示为:

$$\varepsilon_1 = \theta_1 - \theta_1^*, \quad (20)$$

$$\varepsilon_2 = \theta_2 - \theta_2^*. \quad (21)$$

下面按照 Lyapunov 稳定定理来求取切换控制量 u_{sw} 以及 θ_1, θ_2 的自适应率。

Lyapunov 能量函数取为

$$V = \frac{1}{2} s_3^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \varepsilon_1^T \varepsilon_1 + \frac{1}{2\gamma_2} \varepsilon_2^T \varepsilon_2. \quad (22)$$

这里 γ_1, γ_2 为大于零的常数:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_3 \dot{s}_3 + \frac{1}{\gamma_1} \varepsilon_1^T \dot{\theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \varepsilon_2^T \dot{\theta}_2 = \\ &= s_3 (c_3 \dot{x}_4 + \dot{s}_2) + \frac{1}{\gamma_1} \varepsilon_1^T \dot{\theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \varepsilon_2^T \dot{\theta}_2 = \\ &= s_3 [c_3 (f_2 + b_2 u + d_2) + c_2 x_4 + c_1 x_2 + \\ &+ f_1 + b_1 u + d_1] + \frac{1}{\gamma_1} \varepsilon_1^T \dot{\theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \varepsilon_2^T \dot{\theta}_2 = \\ &= s_3 [(c_3 f_2 + f_1) + (c_3 d_2 + d_1) + (c_2 x_4 + c_1 x_2) + \\ &+ (c_3 b_2 + b_1) (\hat{u}_{eq} + u_{sw})] + \frac{1}{\gamma_1} \varepsilon_1^T \dot{\theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \varepsilon_2^T \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (23)$$

当 $s_3 \neq 0$ 时,有

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s_3 [c_3(f_2 - \hat{f}_2) + (f_1 - \hat{f}_1) + (c_3 d_2 + d_1) + \\ & (c_3 b_2 + b_1) u_{sw}] + \frac{1}{\gamma_1} \varepsilon_1^T \dot{\theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \varepsilon_2^T \dot{\theta}_2 = \\ & s_3 c_3 \varepsilon_2^T \xi_2(x) + s_3 \varepsilon_1^T \xi_1(x) + s_3 (c_3 d_2 + d_1) + \\ & s_3 (c_3 b_2 + b_1) u_{sw} + \frac{1}{\gamma_1} \varepsilon_1^T \dot{\theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \varepsilon_2^T \dot{\theta}_2 = \\ & s_3 (c_3 d_2 + d_1) + s_3 (c_3 b_2 + b_1) u_{sw} + \\ & \varepsilon_1^T \left(s_3 \xi_1(x) + \frac{1}{\gamma_1} \dot{\theta}_1 \right) + \varepsilon_2^T \left(c_3 s_3 \xi_2(x) + \frac{1}{\gamma_2} \dot{\theta}_2 \right) \end{aligned} \quad (24)$$

按如下形式设计模糊估计器参数的自适应率以及选取切换控制量

$$\dot{\theta}_1 = -\gamma_1 s_3 \xi_1(x), \quad (25)$$

$$\dot{\theta}_2 = -\gamma_2 c_3 s_3 \xi_2(x), \quad (26)$$

$$u_{sw} = -(c_3 b_2 + b_1)^{-1} \cdot k \cdot \text{sgn } s_3. \quad (27)$$

其中 k 为大于零的常数. 同时定义 $d_m = \sup_{t \geq 0} |c_3 d_2(t) + d_1(t)|$, 如果 k 满足 $k > d_m$, 则有,

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s_3 (c_3 b_2 + b_1) u_{sw} + s_3 (c_3 d_2 + d_1) \leq \\ & -k s_3 \text{sgn } s_3 + |s_3| \cdot |c_3 d_2 + d_1| = \\ & -k |s_3| + |s_3| \cdot |c_3 d_2 + d_1| \leq \\ & -|s_3| (k - d_m) \leq 0. \end{aligned} \quad (28)$$

最后可得到系统的总的控制律 u 如下:

$$\begin{aligned} u = & \hat{u}_{eq} + u_{sw} = \\ & -\frac{c_3 \hat{f}_2 \cdot |\text{sgn } s_2| + c_2 x_4 + c_1 x_2 + \hat{f}_1}{c_3 b_2 \cdot |\text{sgn } s_2| + b_1} - \\ & \frac{k}{c_3 b_2 + b_1} \text{sgn } s_3, \end{aligned} \quad (29)$$

该控制量能够保证第3级滑动平面的稳定.

讨论1 系统状态运动轨迹收敛的示意图如图1所示. 从上面的推导过程中可以看出采用(29)所示的滑模控制律能够保证最后一级的滑动平面的稳定性, 即该控制律的切换控制部分保证其能够从任意初始状态(状态0)到达滑动平面 $s_3 = 0$ (状态1), 同时该等效控制部分能够保证其保持在滑动平面上并沿着该滑动平面渐近收敛到原点(状态2), 在原点上, 有 $s_2 = 0$, 也就是说, 此时系统状态退化成二级滑动平面, 且系统状态已经到达了第2级滑动平面上(状态3, 可以看出状态2和状态3为同一状态), 由于等效控制量同样退化成第2级滑动运动的等效控制量, 因此该等效控制量能够保证此时的系统状

态保持在第2级滑动平面上并沿着该平面直到渐近收敛到原点(状态4), 这样, 系统就从最初的三级滑动平面退化成一二级滑动平面(状态5, 可以看出状态4和状态5为同一状态), 并最终保证稳定收敛到原点(状态6). 同时该串级模糊滑模控制器通过扩展可以实现高维欠驱动系统的控制, 因此就有较强的通用性.

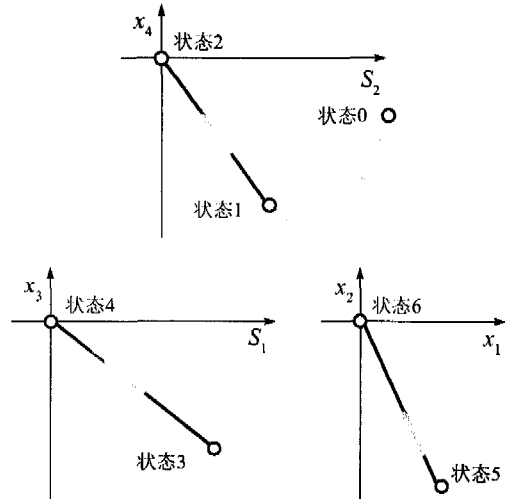


图1 系统状态收敛曲线示意图

Fig. 1 Sketch map of convergent curves of system's states

讨论2 从前文的证明过程可以看出, 第3层的滑模面总是收敛的(稳定的), 但是对于滑模控制而言, 在实际应用中, 由于控制作用在空间上的滞后和在时间上的延迟, 往往会产生抖振现象, 这样就会使系统状态无法精确到达原点, 但是由于第3层滑模面的稳定性, 使其总是可以收敛到原点的某个小领域内, 这样可以采用边界层法来解决这一问题, 即用饱和函数来代替符号函数, 其形式如下:

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) = \begin{cases} \frac{s}{\phi}, & \left|\frac{s}{\phi}\right| \leq 1, \\ \text{sgn}\left(\frac{s}{\phi}\right), & \left|\frac{s}{\phi}\right| > 1. \end{cases} \quad (30)$$

ϕ 表示边界层的厚度. 这样当第3层滑模面收敛到某一领域内时, 就可以切换到第2层滑模面上, 当然, 此时第2层滑模面也不可能正好在 $s_2 = 0$ 上, 而同样是在其附近滑动切换, 此时滑模控制的参数扰动不变性的优点将有所下降, 滑模控制也就变成了准(伪)滑模控制. 关于边界层法的研究目前已经相当成熟, 在这里不是本文讨论的重点, 因此就不再进行具体证明.

讨论3 在本文中引入多级滑模控制的目的就

是将一个由多个子系统构成的欠驱动大系统进行简化,将其划成多级的二阶滑模控制器来设计,各级组成的约束条件难于定量地确定,但是可以遵循以下的选取原则:选择一个子系统的状态变量作为第一层的滑动平面,然后逐级加入一个状态变量,同时考虑系统的控制目标,将主要的状态变量放在最后一层,因为,最后一层是最先收敛的,所以首先要考虑对它的控制要求,例如:对于吊车系统的抗摆控制,为了安全起见,往往要求在满足水平位移精度的前提下重点实现抗摆控制,因此后面吊车系统的仿真实例中,将该摆角变量放在最后一层使其最先收敛。总之,各级的组成可以按照系统状态的重要性来约束,但是对于重要性又是通过控制目标来定性确定。

5 仿真分析(Simulation analysis)

桥式吊车系统(见图2)是一种典型的二阶欠驱动系统,通过一个电机来控制台车移动并且在移动的过程中实现抗摆控制。

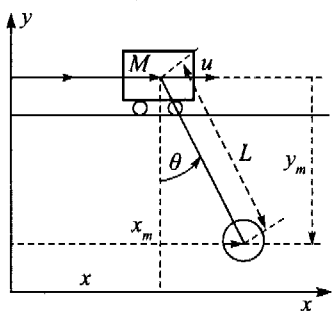


图2 桥式吊车系统

Fig. 2 Overhead crane system

现作如下假设:

- 台车和负载可以看作作为质点,并且一直处于x-y平面内运动;
- 台车与轨道之间的摩擦力可以忽略不计;
- 绳子的长度L保持不变。

采用欧拉-拉格朗日方法可求得吊车系统的数学模型为:

$$x: (m+M)\ddot{x} + mL(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta) = u, \quad (31)$$

$$\theta: x\ddot{\theta} + L\ddot{x}\cos\theta + g\sin\theta = 0. \quad (32)$$

其中M表示台车的质量;m表示负载的质量;x, x-dot分别表示台车的水平位移和水平速度;theta, theta-dot分别为绳子的摆角以及摆角的角速度;L为绳长。

这里设 $x_1 = x - x^d$, $x_2 = \dot{x} - \dot{x}^d$, $x_3 = \theta$, $x_4 = \dot{\theta}$, 因此可得到式(1)中的 f_1 , b_1 , f_2 , b_2 .

$$\begin{cases} f_1 = \frac{mL\dot{\theta}^2\sin\theta + mg\sin\theta\cos\theta}{M + m\sin^2\theta}, \\ b_1 = \frac{1}{M + m\sin^2\theta}, \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} f_2 = -\frac{(m+M)g\sin\theta + mL\dot{\theta}^2\sin\theta\cos\theta}{(M + m\sin^2\theta)L}, \\ b_2 = -\frac{\cos\theta}{(M + m\sin^2\theta)L}. \end{cases} \quad (34)$$

由于 f_1 , f_2 与台车的水平位移 x 和水平速度 $\dot{x}$ 无关, 因此在进行估计时, 规则的数目也将大量减少。具体实现时, f_1 的规则描述将变为:

$$\begin{aligned} R^j: & \text{IF } x_3 \text{ is } A_3^{r3j} \text{ and } x_4 \text{ is } A_4^{r4j}, \\ & \text{THEN } \hat{f}_1 \text{ is } \theta_1^{r3r4j}, \end{aligned} \quad (35)$$

其中 $A_3^{r3j} = e^{-\frac{(x_3-j)^2}{2}}$, $A_4^{r4j} = e^{-\frac{(x_4-j)^2}{2}}$ 。同样, 可实现对 f_2 的模糊逼近。

吊车系统的各个参数分别取为: $M = 1\text{ kg}$, $m = 0.8\text{ kg}$, $L = 0.305\text{ m}$ 。对于串级滑模控制器, 其参数分别为: $c_1 = 1$, $c_2 = 2$, $c_3 = 0.1$, $k = 1$ 。

图3为短距离运输($x^d = 2\text{ m}$)情况下, 吊车系统水平位移和速度以及摆角和角速度的输出曲线, 从图中可以看出台车能够在较快的时间到达给定位置并且在到达期望值之前实现了抗摆控制, 由于距离较短, 因此对于水平位移只是经过一个加速和减速阶段就实现了, 对于抗摆控制也只是经过一个周期就实现了。

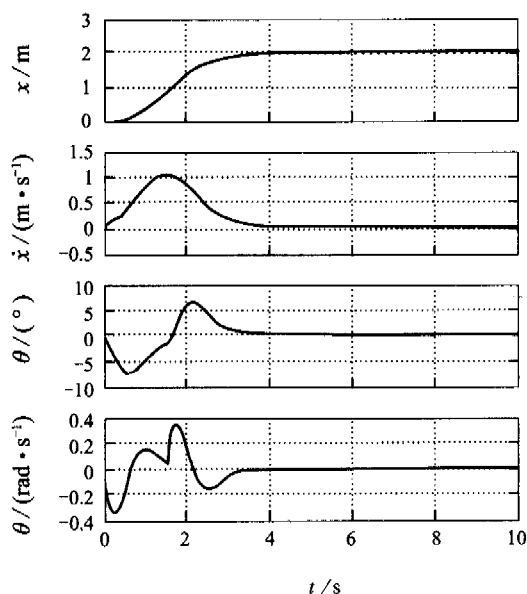


图3 短距离运输时台车水平位移和速度以及负载摆角和角速度的输出

Fig. 3 Output of trolley displace, velocity and load swing angle, swing angle velocity with short distance

图4为短距离运输情况下各级滑动平面的收敛曲线, 图中可以看出最后一级滑动平面最先收敛到零, 然后第二级滑动平面也随之收敛到零, 直到第一级滑动平面收敛到零为止系统的所有的状态都将达

到期望值. 图5为长距离运输($x^d = 10$ m)情况下, 吊车系统水平位移和速度以及摆角和角速度的输出曲线, 可以看出台车在运行中不但有了启动加速、制动减速过程而且还经历了一个匀速运行过程, 对于负载摆角也同样经历启动抗摆——匀速无摆动——减速抗摆这样一个三阶段过程.

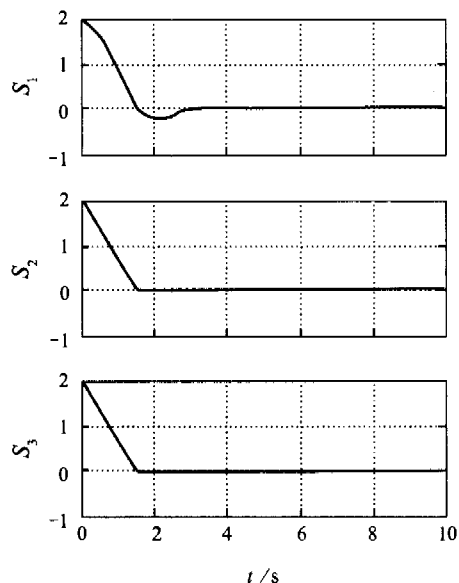


图4 各级滑动平面收敛曲线

Fig. 4 Convergent curves of all sliding planes

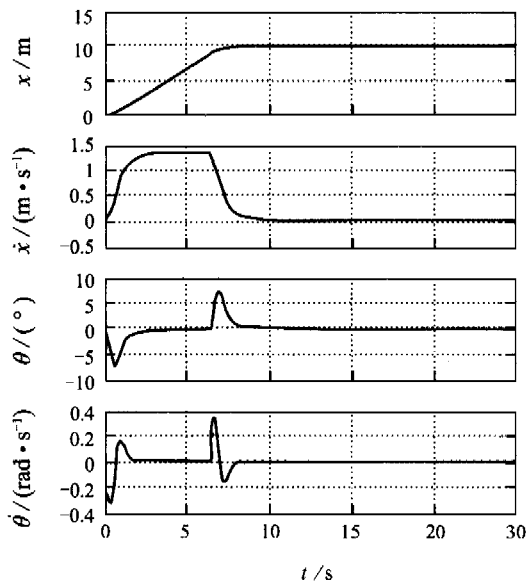


图5 长距离运输时台车水平位移和速度以及负载摆角和角速度的输出

Fig. 5 Output of trolley displace, velocity and load swing angle, swing angle velocity with long distance

图6为相应的长距离情况下各级滑动平面的收敛曲线. 同样验证了该串级模糊滑模控制器的有效性.

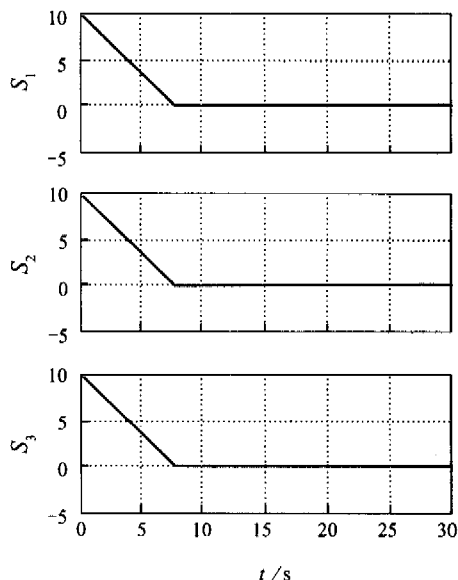


图6 长距离运输时各级滑动平面收敛曲线

Fig. 6 Convergent curves of all sliding planes with long distance

6 结论 (Conclusion)

本文针对一类具有不确定项的欠驱动系统非线性模型提出了一种串级模糊滑模控制, 该方法可以实现单输入多输出非线性系统的有效控制; 同时由于采用模糊逻辑实现了不确定项的估计, 而且不确定项中包含了参数的扰动部分, 因此该控制器对系统参数的摄动具有较强的鲁棒性. 仿真结果进一步验证了这种串级模糊滑模控制方法的有效性, 因此该方法对于欠驱动被控对象的控制是一个可行的解决方案.

参考文献 (References):

- [1] ISABAELE F, ROGELIO L, MARK W S. Energy control of the pendubot [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(4): 725-729.
- [2] GIORGIO C, ALESSANDRO G, GIAMPAOLO U. An implicit Gain-scheduling controller for Cranes [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1998, 6(1): 15-20.
- [3] YI J Q, YUBAZAKI N, HIROTA K. A new fuzzy controller for stabilization of parallel-type Double inverted pendulum System [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 126(1): 105-119.
- [4] WILLIAM S, LISA P, MICHAEL K, ERIC K. Effect of hoisting on the input shaping control of gantry cranes [J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(10): 1159-1165.
- [5] LEE H, KIM E, KANG H J, MIGNON P. A new sliding-mode control with fuzzy boundary layer [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 120(1): 135-143.
- [6] TU K Y, LEE T, WANG W J. Design of a multi-layer fuzzy logic controller for multi-input multi-output systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 111(2): 199-214.

- [7] RYU S H, PARK J H. Auto-Tuning of sliding mode control parameters using fuzzy logic[C]// *Proceedings of the American Control Conference*. NY, USA: IEEE Press, 2001: 618-623.
- [8] MON Y J, LIN. Hierarchical fuzzy sliding-mode Control[C]// *The 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence*. USA: IEEE Neural Network Society Press, 2002: 656-661.
- [9] HSU Y C, CHEN G R, LI H X. A fuzzy adaptive variable structure controller with applications to robot manipulators[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics-part B: Cybernetics*, 2001, 31(3): 331-340.
- [10] 张天平, 冯纯伯. 一类非线性系统的自适应模糊滑模控制. 自动化学报, 1997, 23(3): 361-369.
(ZHANG Tianping, FENG Chunbo. Adaptive fuzzy sliding mode control for a class of nonlinear systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(3): 361-369.)
- [11] WANG LiXin. Analysis and design of hierarchical fuzzy systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1999, 7(5): 617-624.
- [12] YI Jianqiang, NAO Youshi, HIROTA K. Anti-swing and positioning control of overhead traveling crane [J]. *Information Sciences*, 2003, 155(1-2): 19-42.
- [13] WANG LX, MENDEL J M. Fuzzy basis functions, universal approximation and orthogonal least-squares learning[J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1992, 3(5): 807-814.
- [14] SU H, CHEN T, WANG C. Adaptive fuzzy sliding mode control with GA-based reaching laws[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 120(1): 145-158.

作者简介:

王伟男, (1977—), 2005年获中科院自动化所博士学位, 现在北京理工大学信息学院从事博士后研究, 目前研究方向为纳米定位控制、滑模控制和智能控制等, E-mail: w. wang@mail.ia.ac.cn;

易建强男, (1963—), 1992年获日本九州工业大学博士学位, 现为中国科学院自动化研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、机器人、机电一体化等;

赵冬斌男, (1972—), 2000年获哈尔滨工业大学博士学位, 现为中国科学院自动化研究所副研究员, 主要研究方向为智能控制、机器人、机电一体化;

柳晓菁男, (1976—), 2003年获燕山大学硕士学位, 现为中国科学院自动化研究所博士研究生, 目前研究方向为欠驱动系统、自适应逆控制、智能控制等。

(上接第18页)

作者简介:

陈跃鹏 (1971—), 男, 教授, 在武汉理工大学做博士后研究, 主要研究方向为系统故障诊断与容错控制, E-mail: chen Yuepeng@etang.com;

周祖德 (1946—), 男, 武汉理工大学校长, 机电学院教授, 博士生导师, 主要从事微型计算机控制与应用、现代制造系统的可靠性与故障诊断、数控基本理论与系统、柔性制造系统、智能制造与虚拟制造等研究方向的研究;

刘焕彬 (1956—), 男, 黄冈师范学院副院长, 数学系教授, 主要研究方向为应用数理统计、随机控制等;

张庆灵 (1956—), 男, 东北大学理学院院长, 控制理论与控制工程学科教授, 博士生导师, 主要研究方向为分散控制、鲁棒控制与广义系统理论等;

姚波 (1963—), 男, 沈阳师范大学教授, 主要研究方向为广义系统故障诊断与容错控制。

(上接第37页)

- [11] 刘涛, 张卫东, 顾诞英. 一类开环不稳定串级控制系统的解析设计[J]. 控制与决策, 2004, 19(8): 872-876.
(LIU Tao, ZHANG Weidong, GU Danying. Analytical design for a class of open-loop unstable cascade control systems [J]. *Control & Decision*, 2004, 19(8): 872-876.)
- [12] DOYLE J C, FRANCIS B A. *Feedback Control Theory* [M]. New Jersey: Macmillan Publishing Company, 1992.

作者简介:

刘涛 (1974—), 男, 现在上海交通大学自动化系攻读博士

学位, 主要研究领域为工业过程鲁棒控制理论与应用、时滞系统, E-mail: liurouter@ieee.org;

张卫东 (1967—), 男, 现为上海交通大学教授, 博士生导师, 德国洪堡基金访问学者, 主要研究领域为过程控制理论、鲁棒控制理论与应用、系统辨识, E-mail: wdzhang@sjtu.edu.cn;

欧林林 (1980—), 女, 现在上海交通大学自动化系攻读博士学位, 主要研究领域为时滞系统的稳定性分析和设计、过程鲁棒控制理论与应用, E-mail: oulinlin@sjtu.edu.cn.