

欠驱动桥式吊车系统自适应控制

马博军¹, 方勇纯¹, 王宇韬¹, 姜钟平²

(1. 南开大学 机器人与信息自动化研究所, 天津 300071; 2. 纽约科技大学 电气与计算机工程系, 纽约 11201)

摘要: 针对桥式吊车这类非线性欠驱动系统, 提出了一种基于耗散理论的自适应控制器. 它能够有效地抑制运输过程中负载的摆动, 并将其快速准确地运送到指定的位置. 相比其他吊车控制系统, 这种控制器无需准确测量台车和负载质量以及吊绳长度, 可以根据系统响应情况来对这些参数进行在线估计, 这将极大地方便控制器在实际吊车系统中的推广应用. 对于闭环系统的稳定性, 文中通过李雅普诺夫理论及拉塞尔不变性原理进行了证明, 仿真结果也证实了这种自适应控制器能够对吊车系统进行良好的控制.

关键词: 自适应控制; 耗散系统; 桥式吊车; 欠驱动系统; 抗摆控制
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive control for an underactuated overhead crane system

MA Bo-jun¹, FANG Yong-chun¹, WANG Yu-tao¹, JIANG Zhong-ping²

(1. Institute of Robotics and Automatic Information Systems, Nankai University, Tianjin 300071, China;
2. Department of Electrical and Computer Engineering, Polytechnic University, New York 11201, USA)

Abstract: A dissipativity-based adaptive controller is designed for an underactuated overhead crane system. This controller controls the crane system to transport the payload to a desired location with little swing. Being different from conventional crane control laws, the proposed controller does not measure the system parameters such as the mass of trolley and payload, and the length of the rope; instead, the control algorithm estimates those parameters online according to the system responses. The stability of the closed-loop system is proven by Lyapunov techniques and LaSalle's Invariance Theorem. Simulation results demonstrate that the designed adaptive controller achieves a superior performance for the overhead crane system.

Key words: adaptive control; dissipativity; overhead crane; underactuated system; anti-swing control

1 引言(Introduction)

欠驱动系统是指一类驱动器个数少于系统自由度的系统, 它需要通过较少的控制量实现对更多状态量的控制, 控制难度很大, 因而针对此类系统的控制问题成为了近年来研究的一个热点^[1,2]. 桥式吊车是一种典型的非线性欠驱动系统, 由于它具有负载能力强, 操作灵活等优点而被广泛应用到港口、仓库、建筑工地等场所. 对于桥式吊车的控制一方面要求台车快速准确地到达目标位置, 另一方面还要求能够有效地抑制负载的摆动. 长期以来, 在工业生产中一般是通过有经验的工人来操纵吊车. 为了提高吊车的工作效率与安全性能, 国内外学者提出了许多关于桥式吊车系统的控制方法^[3~6]. 但是这些控制方法通常都需要假定台车与负载的质量以及吊绳长度都是已知的, 而在实际操作中一般很难准确

地得到这些系统参数, 这些不足严重地限制了上述控制方法在实际吊车系统上的应用.

耗散性的概念广泛地存在于数学、物理等各个领域. 近年来, 在自动控制领域中, 通过对系统耗散性的研究得到了系统设计与分析的新方法, 实现了许多非线性系统的高性能控制^[7,8].

本文应用耗散理论对欠驱动桥式吊车系统进行了分析, 提出了一种自适应控制策略, 该控制器不需要准确知道台车和负载质量以及吊绳长度等系统参数, 而是根据系统状态对这些参数进行在线估计, 并最终实现误差渐近收敛的控制性能, 这种良好的自适应特性将为它的实际应用带来很大的方便. 在此基础上, 为了更好地抑制负载的摆动, 本文充分利用台车与负载摆动之间的耦合, 对上述自适应控制器进行了改进, 有效地改善了系统的暂态性能. 仿真结

果表明本文设计的自适应控制策略能够实现台车的快速准确定位,同时可以较好地抑制系统中负载的摆动。

2 桥式吊车系统动态特性分析(Analysis of overhead systems dynamics)

在本文中,将主要探讨针对桥式吊车这类非线性欠驱动系统,如何对其实现高性能自适应控制。为此,考虑如下的二维桥式吊车系统^[5]:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u. \quad (1)$$

其中: $q(t) = [x \ \theta]^T$ 表示系统状态, $u(t) = [F \ 0]^T$ 表示系统控制量, $M(q) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $V_m(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $G(q) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 则分别表示系统的惯量矩阵,向心-柯氏力矩阵,以及重力因子,它们的具体定义如下:

$$\begin{cases} M(q) = \begin{bmatrix} m_c + m_p & -m_p l \cos \theta \\ -m_p l \cos \theta & m_p l^2 \end{bmatrix}, \\ V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & m_p l \dot{\theta} \sin \theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ G(q) = [0 \ m_p g l \sin \theta]^T. \end{cases} \quad (2)$$

其中: m_c, m_p 分别是台车与负载的质量; l 是吊绳的长度; x, θ 分别表示台车的位置和吊绳与竖直方向的夹角,它们是系统的状态量; F 表示加在台车上的驱动力,它是系统的控制输入。

在运送负载过程中,桥式吊车的吊绳长度保持不变,而且正常情况下,负载不会摆动到台车的上方,因此可以进行如下合理假设:

假设 1 吊绳长度为一个未知常数,而且台车与负载之间为刚性连接。

假设 2 负载的摆角(与竖直方向的夹角)始终保持在 $\pm\pi$ 之间,即: $\theta \in (-\pi, \pi)$ 。

根据式(2)中的定义可以知道 $M(q)$ 为一个正定对称矩阵。此外,对于式(1)所示的吊车系统,容易证明如下斜对称性质:

$$\xi^T \left(\frac{1}{2} \dot{M}(q) - V_m(q, \dot{q}) \right) \xi = 0, \quad \forall \xi \in \mathbb{R}^2. \quad (3)$$

注 1 在系统(1)中,台车与负载的质量 m_c 和 m_p , 以及吊绳长度 l 均为常数,但是在吊车实际操作过程中,一般难以对它们进行准确测量。在以下的控制器设计中,将对这些参数进行在线估计。

3 基于耗散理论的自适应控制器的设计(Dissipativity-based adaptive controller design)

系统的耗散性与稳定性之间有着紧密的联系,本文将桥式吊车系统的耗散性进行分析,利用其存

储函数来设计一种基于李雅普诺夫稳定性的自适应控制器,从而对吊车系统进行有效控制。

3.1 系统耗散性分析(Analysis of system dissipativity)

对于式(1)所表示的桥式吊车,考虑系统的机械能 $E(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^1$:

$$E(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + m_p g l (1 - \cos \theta). \quad (4)$$

其中:前一项是系统的动能,而后一项则代表系统的势能。很显然, $E(q, \dot{q})$ 是一个半正定函数。对式(4)两边求导,并利用式(1)~(3)进行化简后可以得到

$$\dot{E} = \dot{q}^T M \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M} \dot{q} + m_p g l (\dot{\theta} \sin \theta) = \dot{x} F. \quad (5)$$

对式(5)两边关于时间积分:

$$E(t) - E(0) = \int_0^t \dot{x}(\tau) F(\tau) d\tau.$$

从上式可以看出,以 $F(t)$ 为输入, $\dot{x}(t)$ 为输出的系统是一个无源系统^[9],系统机械能 $E(t)$ 就可以看作是系统的存储函数。无源系统是一类非常重要的耗散系统。因此我们可以利用这个性质来设计非线性自适应控制器以实现预定的控制目标。

3.2 自适应控制器设计(Design of adaptive controller)

本文的控制目标是设计一种自适应控制器,在有效抑制吊绳摆角的同时,使台车快速准确地到达指定的位置。在桥式吊车系统中,台车的位移可以通过作用力 $F(t)$ 直接进行控制,而对于负载摆动的抑制则需要通过其与台车之间的耦合来间接实施。基于以上原因,通过对吊车模型(1)进行相应的数学处理以后,可以把它拆分为以下两个子系统^[6]:

$$\begin{cases} m(\theta) \ddot{x} = F - m_p \sin \theta (l \dot{\theta}^2 + g \cos \theta), \\ \ddot{\theta} = (1/l) \ddot{x} \cos \theta - (g/l) \sin \theta. \end{cases} \quad (6)$$

其中 $m(\theta)$ 表示如下辅助函数:

$$m(\theta) = m_c + m_p \sin^2 \theta > 0.$$

为了便于随后的控制器设计与稳定性分析,定义台车定位误差 $e(t) \in \mathbb{R}^1$ 如下:

$$e(t) = x(t) - x_d. \quad (7)$$

其中 $x_d \in \mathbb{R}^1$ 表示要求台车到达的目标位置。针对以上的误差系统,构造半正定函数 $V_1(t) \in \mathbb{R}^1$:

$$V_1 = k_E E + \frac{1}{2} k_v m(\theta) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} k_p e^2.$$

其中 $k_E, k_v, k_p \in \mathbb{R}^+$ 是随后定义的控制增益。对 $V_1(t)$ 关于时间进行求导,并利用式(5)~(7)进行整理后得到

$$\dot{V}_1 = \dot{x} ((k_E + k_v) F + k_p e + k_v g(t)). \quad (8)$$

其中 $g(t) \in \mathbb{R}^1$ 代表如下定义的非线性函数:

$$g(t) = -m_p l \dot{\theta}^2 \sin \theta - m_p (g - \dot{\theta} \dot{x}) \sin \theta \cos \theta.$$

为了实现预定的控制目标, 需要设计控制器 $F(t)$ 使之有效补偿动态特性 $k_p e(t)$ 以及非线性函数 $g(t)$, 从而使函数 $V_1(t)$ 单调递减. 注意到 $g(t)$ 中含有未知参数 m_p, l , 且它满足线性参数化条件, 因此可以将函数 $g(t)$ 改写成如下形式:

$$g(t) = Y(q, \dot{q})^T \omega.$$

其中 $Y(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^2$ 为可测向量:

$$Y = [-\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad -(g - \dot{\theta} \dot{x}) \sin \theta \cos \theta]^T. \quad (9)$$

而 $\omega \in \mathbb{R}^2$ 则是系统中的未知参数向量:

$$\omega = [m_p l \quad m_p]^T. \quad (10)$$

根据以上分析, 可以设计具有如下形式的自适应控制器:

$$F(t) = \frac{-k_p e - k_d \dot{x} - k_v Y^T \hat{\omega}}{k_E + k_v}. \quad (11)$$

其中: $k_E, k_v, k_p, k_d \in \mathbb{R}^+$ 是控制增益, 而 $\hat{\omega}(t)$ 则代表对参数向量 ω 的在线估计, 其更新规律设计为

$$\dot{\hat{\omega}}_i(t) = \text{Proj}_i(\tau_i y_i \dot{x}), \quad i = 1, 2. \quad (12)$$

其中: $\hat{\omega}_i(t)$ 与 $y_i(t)$ 分别是向量 $\hat{\omega}(t)$ 与 $Y(t)$ 中的元素, $\tau_i \in \mathbb{R}^+$ 为控制增益. 投影函数 $\text{Proj}_i(\mu), i = 1, 2$ 的定义如下^[10]:

$$\text{Proj}_i(\mu) = \begin{cases} \mu, & \hat{\omega}_i(t) < \bar{\omega}_i, \\ \mu, & \hat{\omega}_i(t) = \bar{\omega}_i, \mu \leq 0, \\ 0, & \hat{\omega}_i(t) = \bar{\omega}_i, \mu > 0. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\bar{\omega}_i = (1 + k_E/k_v)\omega_i - \varepsilon_i$, ω_i 是向量 ω 中的元素, $\varepsilon_i \in \mathbb{R}, i = 1, 2$ 为任意满足如下条件的常数:

$$0 < \varepsilon_i \leq (k_E/k_v)\omega_i, \quad i = 1, 2.$$

投影函数 $\text{Proj}_i(\mu), i = 1, 2$ 是为了保证参数更新方向的正确性, 从式(13)可以得到

$$\hat{\omega}_i(t) \leq \bar{\omega}_i < (1 + k_E/k_v)\omega_i, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

注 2 从式(12)(13)中可以看出, 在本文所设计的自适应控制器中, 不需要准确知道吊绳长度以及负载质量等系统参数, 只需要粗略地估计出一个不超过这些参数 $(1+k_E/k_v)$ 倍大小的值作为估计参数的上界 $\bar{\omega}_i$. 因此, 比值 k_E/k_v 越大, 控制器(11)对于参数的先验知识要求越少, $\bar{\omega}_i$ 的选取也越容易. 但是, 当 k_E/k_v 过大, 即 $k_E \gg k_v$ 时, 由式(11)所构造的自适应控制器, 将退化成PD控制器, 从而导致控制效果恶化.

4 闭环系统的稳定性分析(Stability analysis of close-loop system)

定理 1 对于桥式吊车系统(1), 采用自适应控

制器(11)能够使得台车渐近收敛到目标位置, 并且吊绳的摆角也会渐近收敛到零, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [x(t) \quad \theta(t)] = [x_d \quad 0].$$

证 将自适应控制器(11)代入 $\dot{V}_1(t)$ 的表达式后, 可以将式(8)改写为

$$\dot{V}_1 = k_v \dot{x} Y^T \tilde{\omega} - k_d \dot{x}^2. \quad (15)$$

其中 $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}(t)$ 表示参数估计误差. 为了完成稳定性分析, 选取李雅普诺夫函数如下:

$$V(t) = V_1 + \frac{1}{2} k_v \tilde{\omega}^T \Gamma^{-1} \tilde{\omega}. \quad (16)$$

其中 $\Gamma = \begin{bmatrix} \tau_1 & 0 \\ 0 & \tau_2 \end{bmatrix}$, τ_1 与 τ_2 是在式(12)下面定义的控制增益. 对上式关于时间求导, 并利用式(12)(15)进行化简得到

$$\dot{V} = -k_d \dot{x}^2 + k_v \tilde{\omega}_1 (y_1 \dot{x} - \text{Proj}_1(y_1 \dot{x})) + k_v \tilde{\omega}_2 (y_2 \dot{x} - \text{Proj}_2(y_2 \dot{x})). \quad (17)$$

对于式(13)所定义的函数 $\text{Proj}_i(\mu), i = 1, 2$, 可以证明^[11]

$$\tilde{\omega}_i (y_i \dot{x} - \text{Proj}_i(y_i \dot{x})) \leq 0, \quad i = 1, 2. \quad (18)$$

将上式代入式(17)可得

$$\dot{V} \leq -k_d \dot{x}^2. \quad (19)$$

故由式(16)(19)可知 $V(t) \in L_\infty$. 在此基础上, 通过对闭环系统中的信号进行跟踪分析可以得知

$$E, e, \dot{x}, \hat{\omega} \in L_\infty, \dot{x}, \dot{\theta} \in L_\infty, F \in L_\infty, \ddot{x}, \ddot{\theta} \in L_\infty.$$

接下来将利用拉塞尔不变性原理^[11](LaSalle's Invariance Theorem)来完成定理1的证明. 为此, 定义一个域:

$$S = \{q | \dot{V}(t) = 0\},$$

那么根据式(19)可以得知, 在 S 中具有如下性质:

$$\dot{x}(t) = 0, \quad (20)$$

即在 S 中 x 为常数, 故

$$\ddot{x} = 0. \quad (21)$$

把式(20)(21)分别代入式(5)(7)(12)可以得到

$$\dot{E} = 0, \dot{e} = 0, \dot{\hat{\omega}} = 0. \quad (22)$$

接下来, 分如下两种情况来完成稳定性证明:

1) 假设在 S 中 $\dot{\theta} \equiv 0$, 则 θ 为常数, 故

$$\ddot{\theta} = 0. \quad (23)$$

将式(21)和(23)代入式(6)中第2个方程, 并根据假

设2可得

$$\theta = 0.$$

再由式(6)中第1个方程和式(9)(11)可知

$$F(t) = 0, Y(t) = 0, e(t) = 0.$$

2) 假设在 S 中 $\dot{\theta}(t)$ 不恒等于零,即在 S 中至少有一点 $\dot{\theta}(t_\xi) \neq 0$.又因为 $\ddot{\theta}(t) \in L_\infty$,因而 $\dot{\theta}(t)$ 连续,所以存在一个 $\dot{\theta}(t_\xi)$ 的领域 S_θ ,在 S_θ 中:

$$\dot{\theta}(t) \neq 0.$$

在 S_θ 中可以进行如下分析:把式(11)(21)代入式(6)可以得到

$$a\dot{\theta}^2 \sin \theta + bg \sin \theta \cos \theta + \frac{k_p}{k_E + k_v} e = 0. \quad (24)$$

其中辅助变量 $a, b \in \mathbb{R}^1$ 定义如下:

$$a = \omega_1 - \frac{k_v}{k_E + k_v} \hat{\omega}_1, \quad b = \omega_2 - \frac{k_v}{k_E + k_v} \hat{\omega}_2.$$

根据式(22)知道: $\dot{\hat{\omega}} = 0$, 故 a, b 均为常数. 而且根据式(14)可以得到

$$a > 0, \quad b > 0. \quad (25)$$

对式(24)关于时间求导后,两边除以 $\dot{\theta}$,并根据式(22)(21)(6)得

$$a(\dot{\theta}^2 \cos \theta - (2g/l) \sin^2 \theta) + bg \cos(2\theta) = 0. \quad (26)$$

对式(26)再进行两次类似的求导和数学运算,可以得到

$$a(-\dot{\theta}^2 \cos \theta + (8g/l) \sin^2 \theta - (6g/l) \cos^2 \theta) - 4bg \cos(2\theta) = 0. \quad (27)$$

将式(26)与(27)两式左右分别相加,并根据式(25)可得

$$\cos(2\theta) = 0. \quad (28)$$

因为 $\dot{\theta}(t) \in L_\infty$,所以由上式可知在 S_θ 中 $\theta(t)$ 为常数,因而

$$\dot{\theta} \equiv 0. \quad (29)$$

上式与假设在 S 中存在某点 $\dot{\theta}(t_\xi) \neq 0$ 矛盾,故假设不成立. 综上分析,在 S 中 $\dot{\theta}(t) \equiv 0$,故 $x(t) = x_d$, $\dot{x}(t) = 0$, $\theta(t) = 0$, $\dot{\theta}(t) = 0$,所以由拉塞尔不变性原理可知定理1成立.

5 自适应控制器的改进(Improvement of adaptive controller)

在上一节中已经证明了控制器(11)能使台车渐近收敛到目标位置,并且可以同时使吊绳摆角及其速度渐近收敛到零.为了更好地抑制运输过程中负载的摆动,笔者在自适应控制器的微分项前引入包

含负载摆角的因素($k_\theta \theta^2 + 1$),并且为了表示方便,将分母中的控制增益($k_E + k_v$)与分子中的控制增益进行了合并,从而将控制器(11)修改如下:

$$F = -k_p e - k_d(k_\theta \theta^2 + 1)\dot{x} - Y^T \hat{\omega}. \quad (30)$$

其中: $k_\theta \in \mathbb{R}^+$ 是控制增益,它可以用来调整微分环节中摆角的有关权重;而参数估计值 $\hat{\omega}(t)$ 则仍然根据式(12)中所定义的更新规律来在线获得.对于控制器(30),当负载摆角过大时,控制器可以通过加强微分预测环节来限制台车的加速度,而当摆角比较小时,则会减少微分预测项以尽快提高台车的运动速度,使之能快速达到目标位置.对于改进的控制器,同样可以利用李雅普诺夫方法及拉塞尔不变性原理证明它能够使台车渐近收敛到目标位置,并且负载摆角也会渐近收敛到零.换言之,该控制器同样可以实现定理1所示的稳态性能,而且通过仿真结果可以验证这种改进的控制器能将负载的摆动限制在一个更小的范围之内,从而提高吊车系统的安全性.

6 仿真实验(Simulation)

为了测试控制器(30)对于吊车系统的控制性能,在MATLAB SIMULINK环境中,利用变步长ode45算法进行了仿真实验.实验中台车的目标位置设定为 $x_d = 1$,吊车系统实验平台的有关参数为^[6]

$$m_c = 3.5, \quad m_p = 0.5, \quad l = 0.9, \quad g = 9.8.$$

系统状态的初始值取为

$$x(0) = 0, \quad \theta(0) = 0, \quad \hat{\omega}(0) = 0.$$

将控制器(30)应用于上述吊车系统,并选取如下的控制增益:

$$k_d = 10, \quad k_p = 5, \quad k_\theta = 450, \quad \Gamma = I_2.$$

其中: I_2 表示2阶单位方阵,选取控制参数 $\bar{\omega}_1 = \bar{\omega}_2 = 0.7$,此时得到的控制效果如图1和图2所示,其中图1绘制了在控制器(30)作用下系统状态量 $x(t), \theta(t)$,以及控制输入 $F(t)$ 随时间变化的曲线,从该图可以看出:吊车用了不到时10s的时间即到达了指定的位置,并且没有发生台车在目标点附近大幅往复运动的现象.在整个运输过程中负载的摆角维持在一个较小的范围之内,并且它很快向零收敛.从图1中可以看出摆角的最大值不到 4° (0.0698 rad),而且在不到4s就已经收敛到 0.8° (0.014 rad)的范围之内,此后负载与吊车在水平方向上的最大位置差为 $0.9 \text{ m} \times 0.014 = 0.0126 \text{ m}$,图2则记录了系统参数在线估计值的变化情况,不难看出,经过10s左右的时间,各个参数的估计值都分别收敛到某一个恒定值.

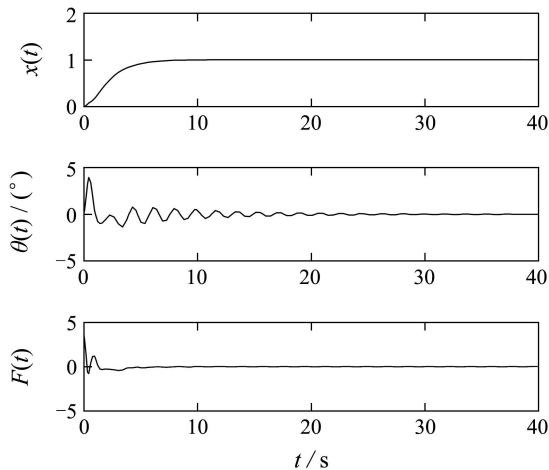


图1 系统状态量及控制输入

Fig. 1 System states and control input

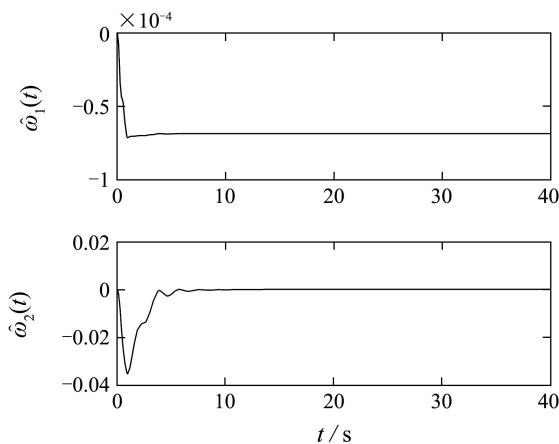


图2 系统参数在线估计

Fig. 2 Estimation of system parameters

仿真结果表明本文所设计的自适应控制器在具有参数不确定性的情况下, 仍然能够实现台车的快速准确定位, 并且同时能有效抑制运输过程中负载的摆动, 因此可以提高吊车系统的安全性能与工作效率。

7 结论(Conclusions)

针对欠驱动非线性桥式吊车系统, 本文提出了一种基于耗散理论的自适应控制器。它实现了对台车的准确定位, 并且有效地抑制了运输过程中负载的摆动。而且该控制器无需准确测量台车和负载质量以及吊绳长度, 它可以根据系统响应情况来对这些参数进行在线估计, 并自动调整控制量, 最终实现预定的控制性能。通过理论分析和仿真测试证实了这种控制方法能够实现高性能的吊车控制。后续工作

将对本文所设计的控制方法进行实验测试, 并将尝试把这种自适应控制方法应用于其他欠驱动系统的控制。

参考文献(References):

- [1] HUSSEIN I, BLOCH A. Optimal control of underactuated nonholonomic mechanical systems[C]//*Proceedings of the 2006 American Control Conference*. Minnesota, USA: IEEE Press, 2006, 6: 5590 – 5595.
- [2] AGUILAR L T, BOIKO I, FRIDMAN L, et al. Generation of periodic motions for underactuated mechanical system via second-order sliding-modes[C]//*Proceedings of the 2006 American Control Conference*. Minnesota, USA: IEEE Press, 2006, 6: 5396 – 5400.
- [3] CHANG C, HSU S, CHIANG K. The switching fuzzy controller of the overhead crane system[C]//*Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Control Applications*. Taiwan, China: IEEE Press, 2004, 12: 753 – 758.
- [4] LIU D, YI J, ZHAO D, et al. Adaptive sliding mode fuzzy control for a two-dimensional overhead crane[J]. *Mechatronics*, 2005, 15(5): 505 – 522.
- [5] FANG Y, ZERGEROGLU E, DIXON W E, et al. Nonlinear coupling control laws for an overhead crane system[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications*. Mexico: IEEE Press, 2001, 12: 639 – 644.
- [6] FANG Y, DIXON W E, DAWSON D M, et al. Nonlinear coupling control laws for an overhead crane system[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, (8)3: 418 – 423.
- [7] NERSESOV S G, HADDAD W M. On the stability and control of nonlinear dynamical systems via vector Lyapunov functions[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(2): 203 – 215.
- [8] ZHAO J, HILL D J. Dissipativity theory for switched systems[C]//*Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*. Seville, Spain: IEEE Press, 2005, 12: 7003 – 7008.
- [9] VANDER A J. *L₂-gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*[M]. London: Springer-Verlag, 2000.
- [10] BEHAL A, SETLUR P, DIXON W E, et al. Adaptive position and orientation regulation for the camera-in-hand problem[J]. *Journal of Robotic Systems*, 2005, 22(9): 457 – 473.
- [11] KHALIL H K. *Nonlinear Systems*[M]. 3rd Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2002.

作者简介:

马博军 (1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非线性系统控制、欠驱动系统、移动机器人, E-mail: mabj@robot.nankai.edu.cn;

方勇纯 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 主要研究方向为复杂系统非线性控制、机器人视觉控制等, E-mail: yfang@robot.nankai.edu.cn;

王宇韬 (1983—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为非线性系统、移动机器人, E-mail: wangyt@robot.nankai.edu.cn;

姜钟平 (1966—), 男, 教授, 主要研究方向为稳定性理论、非线性控制理论及应用, E-mail: zjiang1@poly.edu.