

文章编号: 1000-8152(2005)03-0417-06

Pendubot 的一种分层滑模控制方法

王 伟¹, 易建强¹, 赵冬斌¹, 刘殿通²

(1. 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;

2. 烟台大学 计算机科学与技术学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 针对 Pendubot 这类二阶欠驱动系统提出了一种分层滑模控制方法. 该方法将系统状态分成两个子系统, 分别构造滑动平面, 采用 Lyapunov 方法求取总控制量, 该控制量可以实现 Pendubot 的摆起控制, 当系统接近平衡位置附近时, 双层滑模控制器退化成单层控制器, 这样又保证了 Pendubot 能够稳定在最终的平衡位置上. 从理论上证明了各层滑动平面的渐近稳定性, 并且通过仿真实验验证了该方法的有效性以及该控制器对各类扰动的自适应性.

关键词: Pendubot; 分层; 滑模控制; 欠驱动系统

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A

Hierarchical sliding-mode control of Pendubot

WANG Wei¹, YI Jian-qiang¹, ZHAO Dong-bin¹, LIU Dian-tong²

(1. Laboratory of complex systems and intelligence science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Institute of Computer Science and Technology, Yantai University, Yantai Shandong 264005, China)

Abstract: Aiming at Pendubot, a new hierarchical sliding-mode control method is presented. The system's states are divided into two parts. Using Lyapunov law, the sliding-mode control law can be derived. The control law can swing Pendubot up to its uppermost unstable equilibrium position. When the system's states reach the equilibrium position, the hierarchical sliding-mode controller degenerates to the monolayer controller, then the controller guarantees the Pendubot to stabilize at the uppermost equilibrium position. The asymptotic stability of all sliding planes is also proved theoretically, and the simulation results show the controller's validity and its adaptive abilities for outer disturbances.

Key words: Pendubot; hierarchical; sliding-mode control; under-actuated 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. 欠驱动系统结构简单, 便于进行整体的动力学分析和试验, 同时输入输出关系又足够复杂, 便于研究和验证各种算法的有效性. 欠驱动控制系统的例子很多, 例如空间机器人、水下机器人、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. 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.

Pendubot 是一种两关节平面欠驱动机器人 (见图 1), 它的第 1 关节 (肩部关节) 有一个驱动器 (电机), 而第 2 个关节 (肘部关节) 则是自由的, 因此属于一种典型的欠驱动机械系统. 目前, 对于 Pendubot 的研究文章很多, 如文献 [1~6] 等, 但是总的来说, 控制方法主要有基于能量的方法^[2], 基于无源性的方法^[3], 混杂控制算法^[9] 以及智能控制方法^[1,4,6] 等. 这些控制方法都存在着控制力矩大、调节时间长或是抗扰性能差等缺点, 因此有必要进行进一步研究. 同时在目前的诸多方法中, 对 Pendubot 的控制往往需要分为两步, 第 1 步是从稳定的下垂位置运动到竖直位置附近的摆起控制; 第 2 步是使 Pendubot 保持在竖直位置的稳定控制, 因此对于 Pendubot 研究也相应地分为摆起控制和平衡控制两个方向来研究, 这样在整个控制过程中存在两者之间切换, 这样

又会使切换力矩增大. 由于滑模控制对非线性对象具有较强的控制作用, 因此本文考虑采用滑模控制方法来实现对 Pendubot 这类欠驱动系统的控制.

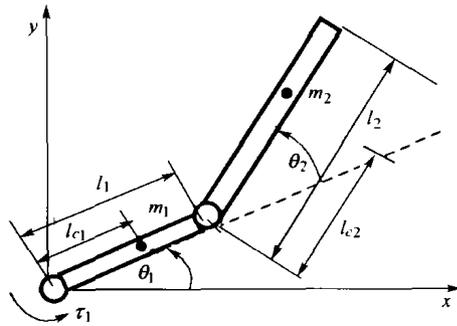


图1 Pendubot 系统
Fig. 1 Pendubot system

文献[5]提出了一种分层模糊滑模控制方法, 它将一个非线性系统分成若干个子系统, 以渐近稳定性为性能指标来设计模糊自适应律从而保证各个子系统之间的相互解耦, 该方法在非线性解耦方面是一个很好的尝试, 但是在构造控制量时只考虑了一个子系统的等效控制量, 因此要想实现对其他子系统的控制就必须不断调节最后一层滑动面系数, 该作者采用了模糊逻辑的方法来实现这一功能. 本文提出了一种分层滑模控制方法, 在保证最后一层滑模平面的稳定的条件下来确定滑模控制量, 该滑模控制量含有各个子系统的等效控制分量, 因此可以保证各个子系统分别进入其各自的滑动平面, 并沿滑动平面运动. 这样整个系统就具有了滑模控制对外界干扰具有不变性的优点, 而且也实现了对两个被控输出量的同时控制. 本文不仅从理论上证明了各层滑动平面是渐近稳定的, 而且通过仿真实验验证了该结果. 值得注意的是, 本文的双层滑模控制器可以实现 Pendubot 的摆起控制, 当系统状态接近竖直平衡位置时, 一个子系统的滑动平面趋近于零, 这样整个双层滑动平面就退化成单层滑模结构, 由于第一层滑动平面也是稳定的, 因此可以实现 Pendubot 在平衡域的稳定控制, 定性地讲, 可以将双层滑动平面退化成单层滑动平面看成从摆起控制向稳定控制的切换. 仿真实验结果表明该分层滑模控制器能够有效地控制 Pendubot 从下垂位置摆起到最上方的平衡位置并且能够稳定在该位置, 同时该控制器对各类外界扰动具有较强的自适应性.

2 Pendubot 系统的数学模型 (Mathematical model of Pendubot system)

Pendubot 系统的结构图如图 1 所示, m_1, m_2 是连杆的质量, θ_1 表示连杆 1 与水平面的夹角, θ_2 表示连杆 2 与连杆 1 的夹角, l_1, l_2 是连杆长, l_{c1}, l_{c2} 表示

连杆的质心距, I_1, I_2 是连杆质心的转动惯量, τ_1 表示作用在连杆 1 上的控制力矩. 利用欧拉-拉格朗日公式可得到系统的动力学方程:

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau. \quad (1)$$

其中

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$D(\theta) = \begin{bmatrix} q_1 + q_2 + 2q_3 \cos \theta_2 & q_2 + q_3 \cos \theta_2 \\ q_2 + q_3 \cos \theta_2 & q_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = q_3 \sin(\theta_2) \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_2 & -\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} q_4 g \cos \theta_1 + q_5 g \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ q_5 g \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式(3)~(5)中的参数为

$$\begin{cases} q_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1, \\ q_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2, \\ q_3 = m_2 l_1 l_{c2}, \\ q_4 = m_1 l_{c1} + m_2 l_1, \\ q_5 = m_2 l_{c2}. \end{cases} \quad (6)$$

可以证明系统的惯性矩阵 D 是可逆的.

由式(1)可得

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= D^{-1}[\tau - C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} - G(\theta)] = \\ &= D^{-1}[C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta)] + D^{-1}\tau = \\ &= F(\theta, \dot{\theta}) + B\tau. \end{aligned} \quad (7)$$

因此系统的动力学方程可以转化为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = f_1(\theta, \dot{\theta}) + b_1 \tau_1, \\ \dot{\theta}_2 = f_2(\theta, \dot{\theta}) + b_2 \tau_1. \end{cases} \quad (8)$$

令 $x_1 = \theta_1, x_2 = \dot{\theta}_1, x_3 = \theta_2, x_4 = \dot{\theta}_2, X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$.

进一步可以将 Pendubot 系统数学模型转化为如下所示的标准形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f_1(X) + b_1(X)u, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = f_2(X) + b_2(X)u, \\ y(t) = [x_1 \ x_3]^T. \end{cases} \quad (9)$$

这种形式显然是二阶欠驱动控制系统的一个统一的表示方式.

3 Pendubot 系统的分层滑模控制器的设计 (Design of hierarchical sliding-mode controller of Pendubot)

考虑式(9)所示的 Pendubot 系统模型, 对于 (x_1, x_2) 和 (x_3, x_4) 这两组子系统状态变量, 分别构

造子系统的滑动平面 s_1, s_2 作为整个分层滑模控制器的第1层, 其形式如下:

$$s_1 = c_1 x_1 + x_2; s_2 = c_2 x_3 + x_4. \quad (10)$$

采用等效控制法分别求取各个子系统在滑动平面上的等效控制量:

$$u_{eq1} = -\frac{f_1(X) + c_1 x_2}{b_1(X)}, \quad (11)$$

$$u_{eq2} = -\frac{f_2(X) + c_2 x_4}{b_2(X)}, \quad (12)$$

对于欠驱动系统, 采用较少的控制量来控制较多的状态是有一定困难的, 因此在这里为了使各个子系统能够沿各自的滑动平面运动, 必须在总的控制量中包含有各子系统的等效控制分量. 取总的控制量为

$$u = u_{eq1} + u_{eq2} + u_{sw}, \quad (13)$$

这里 u_{sw} 为系统在趋近阶段的切换控制分量.

构造第2层滑动平面:

$$S = \alpha s_1 + s_2, \quad (14)$$

这里 α 为常数.

下面按照 Lyapunov 稳定定理来构造切换控制量 u_{sw} .

Lyapunov 能量函数取为

$$V = \frac{1}{2} S^2. \quad (15)$$

所以有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} = S(\alpha \dot{s}_1 + \dot{s}_2) = \\ &S[\alpha(c_1 \dot{x}_1 + \dot{x}_2) + c_2 \dot{x}_3 + \dot{x}_4] = \\ &S[\alpha(c_1 x_2 + f_1(X) + b_1(u_{eq1} + u_{eq2} + u_{sw})) + \\ &(c_2 x_4 + f_2(X) + b_2(u_{eq1} + u_{eq2} + u_{sw}))] = \\ &S[ab_1(u_{eq2} + u_{sw}) + b_2(u_{eq1} + u_{sw})] = \\ &S[(b_2 u_{eq1} + ab_1 u_{eq2}) + u_{sw}(b_2 + ab_1)]. \quad (16) \end{aligned}$$

这里将 $b_1(X), b_2(X)$ 简写成 b_1, b_2 .

令

$$u_{sw}(b_2 + ab_1) + (b_2 u_{eq1} + ab_1 u_{eq2}) = -\eta \operatorname{sgn}(S) - kS,$$

这里 η, k 为大于零的常数. 所以可求得

$$u_{sw} = -(ab_1 + b_2)^{-1} [b_2 u_{eq1} + ab_1 u_{eq2} + \eta \operatorname{sgn}(S) + kS]. \quad (17)$$

最后可得到系统的切换控制 u_{sw} 和总的控制量 u .

$$u_{sw} = -\frac{b_2}{ab_1 + b_2} u_{eq1} - \frac{ab_1}{ab_1 + b_2} u_{eq2} - \eta^* \operatorname{sgn}(S) - k^* S \quad (18)$$

$$\begin{aligned} u &= u_{eq1} + u_{eq2} + u_{sw} = \\ &u_{eq1} + u_{eq2} - \frac{b_2}{ab_1 + b_2} u_{eq1} - \end{aligned}$$

$$\frac{ab_1}{ab_1 + b_2} u_{eq2} - \eta^* \operatorname{sgn}(S) - k^* S =$$

$$\frac{ab_1}{ab_1 + b_2} u_{eq1} + \frac{b_2}{ab_1 + b_2} u_{eq2} - \eta^* \operatorname{sgn}(S) - k^* S \quad (19)$$

这里

$$\eta^* = (ab_1 + b_2)^{-1} \eta, k^* = (ab_1 + b_2)^{-1} k.$$

所以有

$$\dot{V} = -\eta |S| - kS^2. \quad (20)$$

4 各层滑动平面的稳定性分析 (Stability analysis of all sliding planes)

下面证明前面所设计的分层滑模控制器的各层滑动平面不仅是稳定的, 而且是渐近稳定的.

定理 1 对于系统(9), 采用式(10), (14)所构造的双层滑动平面, 如果采用式(19)所示的控制量, 则整个第2层的滑模控制是渐近稳定的.

证 对式(20)两边同时积分

$$\int_0^t \dot{V} d\tau = \int_0^t (-\eta |S| - kS^2) d\tau,$$

$$V(t) - V(0) = \int_0^t (-\eta |S| - kS^2) d\tau,$$

所以

$$V(0) = V(t) + \int_0^t (\eta |S| + kS^2) d\tau \geq$$

$$\int_0^t (\eta |S| + kS^2) d\tau \quad (\text{因为 } V(t) \geq 0).$$

可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t (\eta |S| + kS^2) d\tau \leq V(0) < \infty. \quad (21)$$

根据 Barbalat 定理, 有 $t \rightarrow \infty$ 时 $(\eta |S| + kS^2) \rightarrow 0$, 所以有 $\lim_{t \rightarrow \infty} S = 0$. 证毕.

定理 2 对于式(10), (14)所构造的双层滑动平面, 采用式(19)所示的控制量, 如果 α 的选择满足式(22)所示, 则第1层子系统的滑动平面 s_1, s_2 也是渐近稳定的.

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0, & s_1 s_2 \geq 0, \\ -\alpha_0, & s_1 s_2 < 0. \end{cases} \quad (\alpha_0 > 0) \quad (22)$$

证 I) 首先要证 $s_1 \in L_2, s_2 \in L_2$, 即

$$\int_0^\infty s_1^2 d\tau < \infty; \int_0^\infty s_2^2 d\tau < \infty. \quad (23)$$

由式(21)可知

$$\begin{aligned} \int_0^\infty S^2 d\tau &= \int_0^\infty (\alpha s_1 + s_2)^2 d\tau = \\ &\int_0^\infty (\alpha^2 s_1^2 + 2\alpha s_1 s_2 + s_2^2) d\tau < \infty, \quad (24) \end{aligned}$$

同时由于有

$$\int_0^\infty 2\alpha s_1 s_2 d\tau \leq \int_0^\infty (\alpha^2 s_1^2 + s_2^2) d\tau,$$

所以可得

$$\int_0^\infty 4\alpha s_1 s_2 d\tau \leq \int_0^\infty S^2 d\tau < \infty. \quad (25)$$

现在只要保证式(25)左边大于零即可得到式(23).

显然当 $s_1 s_2 \geq 0$ 时,只要保证 $\alpha \geq 0$, 由式(24)总是可以得到式(23).

现在讨论 $s_1 s_2 < 0$ 的情况. 由于系统的第2层滑动平面的稳定性与 α 的选择无关, 因此当 $s_1 s_2 < 0$ 时, 可以取 $\alpha = -\alpha_0 (\alpha_0 > 0)$, 这时有 $\alpha s_1 s_2 = -\alpha_0 s_1 s_2 > 0$, 同样可以得到式(23)的结论, 即

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0, & s_1 s_2 \geq 0, \\ -\alpha_0, & s_1 s_2 < 0, \end{cases} \quad (\alpha_0 > 0)$$

时式(23)恒成立.

II) 现在证明 $s_1 \in L_\infty, \dot{s}_1 \in L_\infty, s_2 \in L_\infty, \dot{s}_2 \in L_\infty$.

由式(21)可以得到

$$V(t) = \frac{1}{2} S^2 = V(0) + \int_0^t (-\eta |S| - kS^2) d\tau \leq V(0) < \infty. \quad (26)$$

所以可以得到 $S \in L_\infty$, 即

$$\sup_{t \geq 0} |S| = \|S\|_\infty < \infty. \quad (27)$$

同时由式(16)有

$$\dot{V} = S\dot{S} = -\eta |S| - kS^2 < \infty. \quad (28)$$

因此可以得到 $\dot{S} \in L_\infty$, 即

$$\sup_{t \geq 0} |\dot{S}| = \|\dot{S}\|_\infty < \infty. \quad (29)$$

由于 α 的选择保证了 $\alpha s_1 \cdot s_2 \geq 0$ (即 αs_1 与 s_2 同号), 因此从式(14)可以得到 $s_1 \in L_\infty, s_2 \in L_\infty$, 即

$$\begin{aligned} \sup_{t \geq 0} |s_1| &= \|s_1\|_\infty < \infty; \\ \sup_{t \geq 0} |s_2| &= \|s_2\|_\infty < \infty. \end{aligned} \quad (30)$$

因为 $s_1 = c_1 \dot{x}_1 + \dot{x}_2$, \dot{x}_1, \dot{x}_2 分别表示 Pendubot 的第1个关节的角速度和角加速度, 并且直接受到固定在其上的电机控制, 而电机输出的控制量总是有界的, 这样 \dot{x}_1, \dot{x}_2 的值不可能发生突变, 因此总是有界的, 即 $s_1 \in L_\infty$, 再由式(14), (29)可以得到 $\dot{s}_2 \in L_\infty$. 由于已经证明 $s_1 \in L_2, s_2 \in L_2$, (平方可积), 因此根据 Barbalat 定理, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_1 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} s_2 = 0$. 所以第1层子系统的滑动平面 s_1, s_2 不仅是稳定的, 而且是渐近稳定的. 证毕.

这样在不改变第2层滑动平面稳定性的前提下, 保证了第1层子系统滑动平面的稳定性.

5 仿真分析 (Simulation analysis)

Pendubot 系统的参数选择可参照文献[8], 见表

1. 构造滑模控制器时, 令 $e = \theta_1 - \frac{\pi}{2}, \dot{e} = \dot{\theta}_1$, 然后构造第1层滑动平面 $s_1 = c_1 e + \dot{e}, s_2 = c_2 \theta_2 + \dot{\theta}_2$, 这样就能保证当系统的滑动平面趋近于零时, 系统的状态就能够趋近于期望值.

表1 Pendubot 参数

Table 1 Paramters of Pendubot

q_1/vs^2	q_2/vs^2	q_3/vs^2	$q_4/(vs^2 \cdot m^{-1})$	$q_5/(vs^2 \cdot m^{-1})$
0.0308	0.0106	0.0095	0.2086	0.0630

图2是系统的输出角度曲线, 从图中可以发现系统从最初的下摆平衡位置 ($\theta_1 = -\frac{\pi}{2}, \theta_2 = 0$, 该位置为垂直向下的一个稳定的初始平衡点) 通过分层滑模控制器能够到达系统的期望位置 ($\theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = 0$, 该位置为垂直向上的不稳定的目标平衡点) 并能够保持稳定, 同时 Pendubot 的两个杆摆角虽然有一定的振荡, 但最终总是能够稳定在其期望的位置上. 值得一提的是, 在已有的控制方法中由于将摆起控制和平衡控制分开实现, 因此在两种控制器切换的过程中存在较大的切换力矩 (此切换力矩不同于滑模控制中控制器延迟或时滞所引起的抖振), 而本文提出的分层滑模控制器能够有效地避免这一缺点.

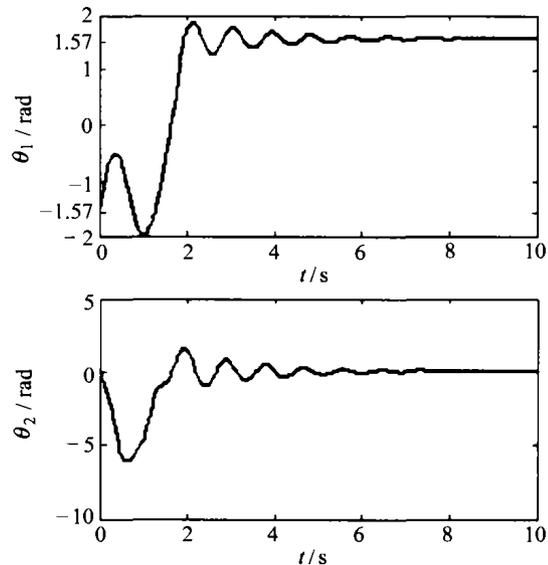


图2 Pendubot 的输出角度曲线
Fig. 2 Output angles of the Pendubot

图3是系统的滑动平面输出曲线, 从图中可以看出系统滑动平面的收敛性; 图4是 Pendubot 系统的控制力矩曲线; 结合这两个图可以进一步发现滑模参数的切换并不会产生控制力矩的较大切换, 因此控制力矩能够满足实际系统的需要.

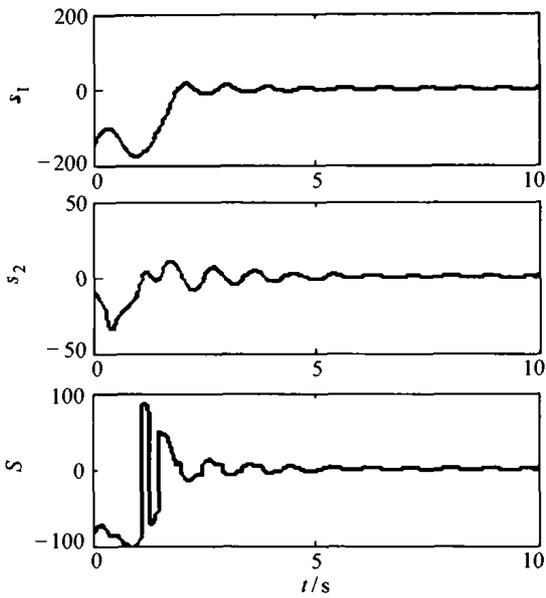


图 3 Pendubot 系统的滑动平面输出曲线
Fig. 3 Output curves of all sliding planes

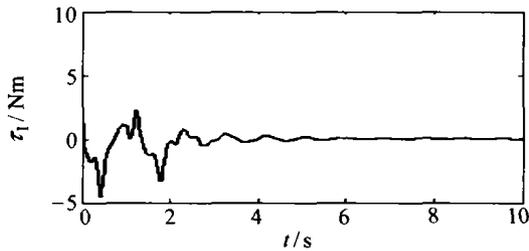


图 4 Pendubot 系统的控制力矩曲线
Fig. 4 Control torque of the HSMC

图 5~7 是系统在各种外界扰动条件下的输出角度曲线,图 5 是系统在 10~15 s 之间加入随机扰动条件下的输出角度曲线;图 6 是 Pendubot 系统在 10~15 s 之间加入 $y = 2\sin 10t$ 的周期扰动条件下的输出曲线;图 7 是系统在 10~15 s 之间加入幅值为 1

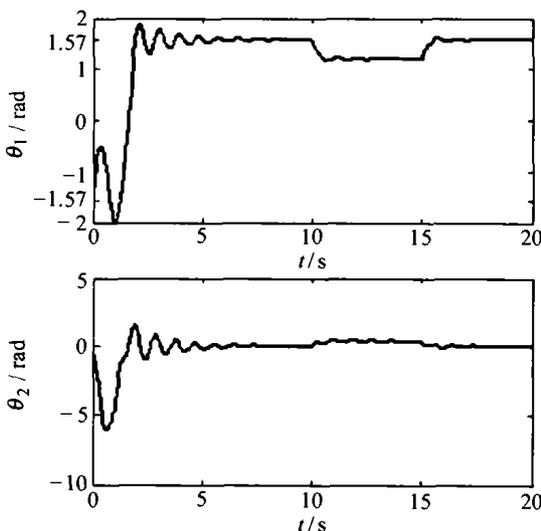


图 5 随机扰动条件下 Pendubot 系统的输出曲线
Fig. 5 Output when random disturbance is added

rad 的脉冲扰动条件下的输出角度曲线.从抗扰实验中可以看出尽管 Pendubot 的垂直向上的位置是一个不稳定的平衡点,但是在分层滑模控制器的控制下仍然能够在扰动作用下保持稳定,这也是 Pendubot 控制目标中至关重要的一点.因此,从 Pendubot 系统的扰动实验曲线看出,本文所采用的分层滑模控制器在各类外界扰动条件下具有较强的鲁棒性.

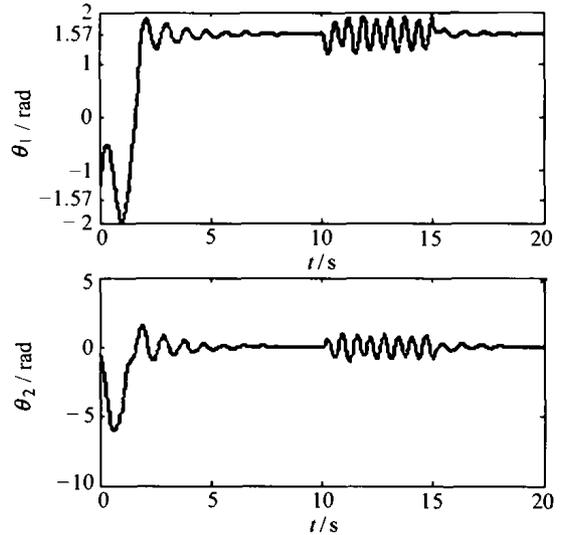


图 6 正弦周期扰动下 Pendubot 系统输出曲线
Fig. 6 Output when periodic disturbance is added

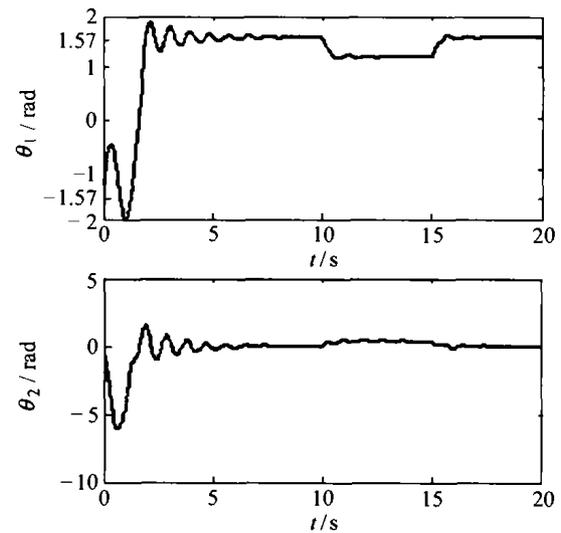


图 7 脉冲扰动条件下 Pendubot 系统输出曲线
Fig. 7 Output when impulse disturbance is added

6 结论 (Conclusions)

针对 Pendubot 这类欠驱动系统,本文提出了一种分层滑模控制方法,该方法的各层滑动平面均具有渐近稳定性,能够实现 Pendubot 的摆起控制和平衡控制.由于滑模控制具有抗外界干扰的作用,因此本文设计的这种分层滑模控制器对外界的各类扰动均具有较强的自适应性.

参考文献(References):

- [1] BEGOVICH O, SANCHEZ E N, MALDONADO M. Takagi-Sugeno fuzzy scheme for real-time trajectory tracking of an underactuated robot [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 2002, 10(1): 14 - 20.
- [2] FANTONI I, LOZANO R, SPONG M W. Energy control of the Pendubot [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(4): 725 - 729.
- [3] SHIRIAEV A S, KOLESNICHENOKO O. On passivity based control for partial stabilization of underactuated systems [C]// *Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control*. Sydney, Australia: IEEE Control Systems Society, 2000: 2174 - 2179.
- [4] SANCHEZ E N, FLORES V. Real-time fuzzy PI + PD control for an underactuated robot [C]// *Proc of the 2002 IEEE Int Symposium on Intelligent Control*. Vancouver, British Columbia, Canada: IEEE Control Systems Society, 2002: 137 - 141.
- [5] DE LUCA A, MATTONE R, ORIOLO G. Stabilization of an underactuated planar 2R manipulator [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2000, 10(4): 181 - 198.
- [6] LARA-ROJO F, SANCHEZ E N, CUEVAS E V. Real-time neuro-fuzzy control an underactuated robot [C]// *The 1999 Int Joint Conf on Neural Networks*. Washington, DC: IEEE Neural Network Society Press, 1999: 2220 - 2225.
- [7] MON Yi-Jen, LIN Chih-Min. Hierarchical fuzzy sliding-mode control [C]// *The 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence*. Hawaii, USA: IEEE Neural Network Society Press, 2002: 656 - 661.
- [8] ZHANG Mingjun, TARN Tzyh-Jong. Hybrid control of the Pendubot [J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2002, 7(1): 79 - 86.

作者简介:

王伟 (1977—),男,2002年获国立华侨大学硕士学位,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、滑模控制和智能控制等,E-mail: ww99hq@sina.com;

易建强 (1963—),男,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 (1972—),男,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;

刘殿通 (1972—),男,2004年获中科院自动化所博士学位,现为烟台大学计算机科学与技术学院讲师,主要研究方向为智能控制、欠驱动系统控制。

(上接第416页)

2) 蚂蚁算法具有自适应性的分布式计算特点,适于未来并行式计算机的计算,从而降低交叉口信号控制系统的运行时间;

3) 精英蚂蚁寻优策略既避免模型求解陷于局部最优又进一步提高了收敛的速度从而使得计算量可为路口信号机所能接受。

综上所述,精英蚂蚁寻优策略为解决单路口交通信号实时配时问题提供了一种新的、有效的解决思路或方法。

参考文献(References):

- [1] ALLOP R E. Delay at a fixed time traffic signal; theoretical analysis [J]. *Transportation Science*, 1972, 6(3): 260 - 285.
- [2] 杨锦冬, 杨东援. 城市信号控制交叉口信号周期时长优化模型 [J]. 同济大学学报, 2001, 29(7): 789 - 794.
(YANG Jingdong, Yang Dongyuan. Optimized signal-timing model in signaled intersection [J]. *J of Tongji University*, 2001, 29(7): 789 - 794.)
- [3] 顾怀中, 王伟. 交叉口交通信号配时模拟退火全局优化算法 [J]. 东南大学学报, 1998, 28(3): 69 - 72.
(GU Huaizhong, WANG Wei. A global optimization simulated annealing algorithm for intersection signal timing [J]. *J of Southeast University*, 1998, 28(3): 69 - 72.)
- [4] COLORNI A, DORIGN M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies [C]// *Proc of the First European Conf on Artificial Life*. Paris, France: Elsevier Publishing, 1991: 134 - 142.
- [5] Colorni A, Dorigo M, Maniezzo V. An investigation of some properties of an ant algorithm [C]// *Proc of the Parallel Problem Solving from Nature Conference (PPSN'92)*. Brussels, Belgium: Elsevier Publishing, 1992: 509 - 520.
- [6] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI. An ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1996, 26(1): 29 - 41.
- [7] DORIGO M, GAMBARDILLA L M. An ant system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53 - 66.
- [8] 周晶. 城市交通系统分析与优化 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2001, 102 - 103.
(ZHOU Jing. *Analysis and Optimization of Urban Traffic System* [M]. Nanjing: Publication of Southeast University, 2001, 102 - 103.)

作者简介:

徐勋倩 (1973—),女,南通大学建工学院讲师,东南大学博士研究生,主要研究方向为交通运输规划与管理,E-mail: chendak@163.com;

黄卫 (1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为 ITS 控制、交通工程和智能控制决策系统的研究。