第 28 卷第 1 期
2011 年 1 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 28 No. 1
Jan. 2011

文章编号: 1000−8152(2011)01−0031−06

一种非线性观测器和能量结合的反馈控制系统

许清媛, 杨　智, 范正平, 李晓东

(中山大学 信息科学与技术学院, 广东 广州 510275)

摘要: 文中利用高增益观测器和状态反馈控制器设计的分离性原理, 提出了一种结合非线性观测器和能量的基于估计状态的反馈控制系统. 针对垂直欠驱动具有旋转激励的平移振荡器非线性系统, 首先, 利用高增益观测器, 选取合适的增益, 使得观测值迅速收敛到系统的状态, 其次, 从系统能量的角度出发, 选取一个恰当的李雅普诺夫函数, 证明了所得到的反馈控制系统的渐进稳定性, 系统分析及仿真结果表明该方法在动态性方面优于采用高增益观测器和滑模相结合的控制方法, 便于工程实现.

关键词: 高增益观测器; 基于能量法状态反馈; 李雅普诺夫函数; 非线性系统; 非线性观测器

中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

A combination feedback system of nonlinear observer and energy-based control

XU Qing-yuan, YANG Zhi, FAN Zheng-ping, LI Xiao-dong

(School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou Guangdong 510275, China)

Abstract: According to the separation principle of the high gain observer and state feedback control, we propose a feedback control system based on the estimated states. In a vertical underactuated translational oscillator with nonlinear rotating actuator, we choose a proper gain to make the observed values converge rapidly to the state values, and choose an appropriate Lyapunov function based on the system energy to ensure the asymptotic stability for the feedback system. System analysis and simulation results show that the method proposed is better than the method based on nonlinear observer and sliding model in dynamics, and it is easier to be implemented in engineering.

Key words: high gain observers; energy-based state feedback; Lyapunov function; nonlinear systems; nonlinear observers

1　引言(Introduction)

非线性系统的稳定和优化控制问题一直是研究的热点和难点. 目前已有的控制方法如反馈线性化法、滑模变结构法、反步设计法和逆系统神经网络法等都离不开系统的状态, 但由于系统状态不易直接全部测量, 这样就限制了这些方法的直接应用, 因此观测器的设计显得非常重要.

最近高增益观测器作为一个研究热点分别在系统的跟踪、镇定、鲁棒、切换和自适应控制中得到了广泛的应用[1~5], 高增益的概念首先出现于1979年, 将它用于线性系统的控制[6], 随后Marino将其拓展到一类能精确线性化且关系度(relative degree)为1的特殊非线性系统的反馈控制中[7]. 而Esfandiari和Khalil讨论了一种比卡尔曼观测器更容易实现的非线性观测器——高增益观测器的设计[8], 这种高增益观测器不仅可以估计系统状态, 而且可以估计不确定系统的不确定性和未知参数, 对不确定性具有一定的鲁棒性. 文献[9]针对一类基于高增益观测器的反馈控制系统进行了讨论, 指出只要观测器增益足够高时可以使观测值任意接近真值, 从而得到近似状态反馈的控制性能. 文献[10,11]证明了一类关系度确定且能够转化成规范型非线性系统的全局有界状态反馈控制器设计和高增益观测器设计满足分离性原理, 极大地方便了高增益观测器与其他方法结合实现控制的应用. 文献[12]利用非线性观测器和滑模控制相结合的方法(nonlinear observer and sliding model-based method, NOSMM)设计了一类基于高增益观测器的反馈控制系统, 并针对水平的平移振荡器(translational oscillators with rotating actuator, TORA)系统进行了仿真, 显示该方法具有较好的控制性能, 但是其控制器的设计很复杂且有很多参数需要调节, 不恰当的参数选取甚至导致系统的不稳定, 而参数的选取往往比较困难又没有一定规则. 文献[13]针对垂直的TORA系统, 从能量的角度出发设

收稿日期: 2009−07−27; 收修改稿日期: 2010−03−07.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60704045, 60874115).

计了其基于李雅普诺夫稳定的状态反馈控制系统, 但是需要测量角位移和角速度这两个状态才能实现状态反馈, 这就限制了该方法的工程应用.

本文利用高增益观测器和状态反馈控制器设计的分离性原理, 结合高增益观测器和能量方法, 针对垂直欠驱动具有旋转激励的平移振荡器(TORA)非线性系统, 设计了一种结合高增益观测器和能量的基于估计状态的反馈控制系统(nonlinear observer and energy-based control system, NOECS), 并对其动态性进行了仿真研究, 结果是令人满意的.

2 高增益观测器设计(Design of high gain observers)

考查一个关系度为ρ的SISO非线性系统:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})u,\\ y = h(\boldsymbol{x}).\end{cases} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}$, $\mathbb{R}$分别表示状态向量、控制输入和系统输出, f, g, h均为光滑的向量函数. 假设该系统可经过一个合适的非线性微分同胚变换转换为输出为$y = \xi_1$的如下规范型[5]:

$$\begin{cases}\dot{\eta} = \phi(\eta, \xi),\\ \dot{\xi}_i = \xi_{i+1},\\ \xi_\rho = b(\eta, \xi) + a(\eta, \xi)u.\end{cases} \tag{2}$$

其中: $\eta \in \mathbb{R}^{n-\rho}, \xi \in \mathbb{R}^\rho$; $a(\cdot)$和$b(\cdot)$连续且局部Lipschitz可导, $\phi(\cdot)$也是局部Lipschitz的, 且$a(\cdot), b(\cdot)$和$\phi(\cdot)$满足

$$\begin{cases}a(\mathbf{0}, \mathbf{0}) \neq 0,\\ b(\mathbf{0}, \mathbf{0}) = 0,\\ \phi(\mathbf{0}, \mathbf{0}) = 0.\end{cases}$$

这里基于该规范型非线性系统设计高增益观测器, 且假设存在控制量能使该规范型系统在平衡点$[\xi \ \ \eta]^{\mathrm{T}} = [\mathbf{0} \ \ \mathbf{0}]^{\mathrm{T}}$稳定. 利用非线性高增益观测器设计方法得到$\xi$和$b(\eta, \xi)$的观测值为[5]

$$\begin{cases}\dot{\hat{\xi}}_i = \hat{\xi}_{i+1} + h_i(\xi_1 - \hat{\xi}_1), 1 \leqslant i \leqslant \rho - 1,\\ \dot{\hat{\xi}}_\rho = \hat{\sigma} + \hat{a}(\hat{\eta}, \hat{\xi})u + h_\rho(\xi_1 - \hat{\xi}_1),\\ \dot{\hat{\sigma}} = h_{\rho+1}(\xi_1 - \hat{\xi}_1).\end{cases} \tag{3}$$

则得到相应的观测误差为

$$\begin{pmatrix}\tilde{\chi}_1\\ \vdots\\ \tilde{\chi}_\rho\\ \tilde{\chi}_{\rho+1}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\xi_1 - \hat{\xi}_1\\ \vdots\\ \xi_\rho - \hat{\xi}_\rho\\ b(\eta, \xi) - \hat{\sigma}\end{pmatrix}. \tag{4}$$

要设计高增益观测器的增益$\boldsymbol{H} = [h_1 \ \cdots \ h_{\rho+1}]^{\mathrm{T}}$使得满足$\lim\limits_{t\to\infty} \tilde{\chi}(t) = 0$, 通常设计$\boldsymbol{H}$使

$$A = \begin{pmatrix}-h_1 & 1 & 0 & \cdots & 0\\ -h_2 & 0 & 1 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots\\ -h_\rho & 0 & \cdots & 0 & 1\\ -h_{\rho+1} & 0 & \cdots & 0 & 0\end{pmatrix} \tag{5}$$

为Hurwitz矩阵, 就能实现渐近误差收敛, 而对任意正数$h_i(1 \leqslant i \leqslant \rho + 1)$该矩阵都是Hurwitz的. 特别地, 取

$$h_1 = \frac{\alpha_1}{\varepsilon}, \cdots, h_\rho = \frac{\alpha_\rho}{\varepsilon}, h_{\rho+1} = \frac{\alpha_{\rho+1}}{\varepsilon}. \tag{6}$$

其中ε是一个尚需确定的小的正常数, 这样由式(6)得到的$h_i(1 \leqslant i \leqslant \rho + 1)$较大, 故称这样的观测器为高增益观测器. 通常可用实验法观察系统状态观测值与实际值的误差来选取ε, $\alpha_i(1 \leqslant i \leqslant \rho + 1)$是特征方程$\lambda^{\rho+1} + \alpha_1\lambda^\rho + \cdots + \alpha_\rho\lambda + \alpha_{\rho+1} = 0$的系数, 选取该系数使得方程的全部特征值均在左半平面.

3 TORA系统数学模型(TORA mathematic model)

一个由驱动的小球和与弹簧连接的移动小车组成的垂直TORA系统如图1所示. 小车和弹簧在水平面内做一维运动, 小车质量为M, 小球在输入转矩τ作用下在垂直平面内运动, 其质量为m, 转动半径为r, 小球关于其质心的转动惯量为I, 其相对垂直方向角位移为θ, 小车位移x, 重力加速度为g.

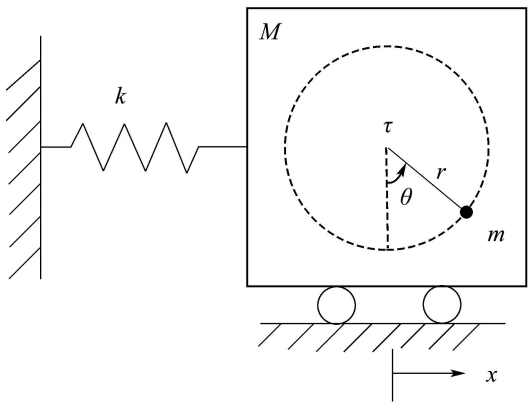


图 1 TORA系统结构

Fig. 1 TORA system configuration

下面采用拉格朗日方程来建立TORA系统的数学模型. 首先计算系统的动能和势能. 系统的动能是小车和小球的动能之和:

$$K = K_1 + K_2 = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + mr\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{2}(mr^2 + I)\dot{\theta}^2. \tag{7}$$

系统的势能是小球重力势能和弹簧弹性势能之和:

$$P = -mgr\cos\theta + \frac{1}{2}kx^2. \tag{8}$$

系统的拉格朗日算子函数为

$$L = K - P = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + mr\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{2}(mr^2+I)\dot{\theta}^2 + mgr\cos\theta - \frac{1}{2}kx^2. \tag{9}$$

根据拉格朗日方程, 系统对应的动力学方程为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\dfrac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{x}}}) - \dfrac{\partial L}{\partial \boldsymbol{x}} = 0, \\ \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\dfrac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}) - \dfrac{\partial L}{\partial \theta} = \tau. \end{cases} \tag{10}$$

式(9)代入式(10)得到TORA系统的数学模型为

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + mr\ddot{\theta}\cos\theta - mr\dot{\theta}^2\sin\theta + kx = 0, \\ mr\ddot{x}\cos\theta + (mr^2+I)\ddot{\theta} + mrg\sin\theta = \tau. \end{cases} \tag{11}$$

由式(11)可以看出, 垂直TORA是一非线性系统. 为获得其状态方程式, 定义其状态变量为

$$\boldsymbol{x} = [x_1\ \ x_2\ \ x_3\ \ x_4]^{\mathrm{T}} = [x\ \ \theta\ \ \dot{x}\ \ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}}.$$

再令控制输入为$u = \tau$, 并以小球的角位移x_2作为系统的输出, 代入式(11)得到该非线性系统的状态方程式为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})u, \\ y = h(\boldsymbol{x}). \end{cases} \tag{12}$$

其中:

$$f(\boldsymbol{x}) = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \\ \dfrac{(mr^2+I)(mrx_4^2\sin x_2 - kx_1) + m^2r^2\mathrm{g}\sin x_2\cos x_2}{(M+m)(mr^2+I) - m^2r^2\cos^2 x_2} \\ \dfrac{-mr\cos x_2(mrx_4^2\sin x_2 - kx_1) - (M+m)mgr\sin x_2}{(M+m)(mr^2+I) - m^2r^2\cos^2 x_2} \end{pmatrix},$$

$$g(\boldsymbol{x}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{-mr\cos x_2}{(M+m)(mr^2+I) - m^2r^2\cos^2 x_2} \\ \dfrac{(M+m)}{(M+m)(mr^2+I) - m^2r^2\cos^2 x_2} \end{pmatrix},$$

$h(\boldsymbol{x}) = x_2$.

对于$\theta \in (-\pi, \pi]$, 系统式(12)具有两个平衡点, 即$[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$和$[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0\ \pi\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$.

4 基于估计状态的反馈控制系统设计 (Design of feedback control system based on estimated state)

4.1 基于能量的状态反馈控制设计(Design of state feedback control based on energy)

这里以垂直TORA系统为例[13], 由式(7)(8)得到系统的总能量为

$$E = K + P = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + mr\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{2}(mr^2+I)\dot{\theta}^2 - mgr\cos\theta + \frac{1}{2}kx^2. \tag{13}$$

计算系统能量的导数, 并联合式(12)化简为

$$\dot{E} = (M+m)\dot{x}\ddot{x} + mr\ddot{x}\dot{\theta}\cos\theta + mr\dot{x}\ddot{\theta}\cos\theta - mr\dot{x}\dot{\theta}^2\sin\theta + (mr^2+I)\dot{\theta}\ddot{\theta} + mgr\dot{\theta}\sin\theta + kx\dot{x} = \dot{\theta}\tau = x_4u. \tag{14}$$

从系统能量的角度出发, 构造如下李雅普诺夫函数:

$$V(\boldsymbol{x}) = c_1(E + mgr) + \frac{c_2x_2^2}{2}. \tag{15}$$

式中c_1和c_2为正常数, 当$x_2 = \theta \in (-\pi, \pi]$时, 由式(13)知$(E + mgr) > 0$, 而$x_2^2 \geqslant 0$, 故都有$V(\boldsymbol{x}) > 0$, 即$V(\boldsymbol{x})$是正定的. 对所选的李雅普诺夫函数求导, 可得

$$\dot{V}(\boldsymbol{x}) = x_4(c_1u + c_2x_2). \tag{16}$$

再令

$$(c_1u + c_2x_2) = -c_3x_4, \tag{17}$$

其中取$c_3 > 0$, 于是可得系统的状态反馈控制律为

$$u = -\frac{1}{c_1}(c_2x_2 + c_3x_4). \tag{18}$$

代入式(16)得李氏函数导数为

$$V(\boldsymbol{x}) = -c_3x_4^2. \tag{19}$$

显然, 它对所有x是负半定的, 故由李雅普诺夫稳定性理论知设计的该状态反馈控制系统是稳定的. 又根据拉萨尔(LaSalle)不变集原理, 可以证明系统(12)和状态反馈控制器(18)组成的闭环系统是渐进稳定的. 证明如下:

这里根据式(19)选取不变集$\Gamma: (x_1, x_2, x_3, x_4): x_4 = 0$, 由不变集中$x_4 = 0$, 有

$$V(\boldsymbol{x}) = 0. \tag{20}$$

$$u=-\frac{c_2}{c_1}x_2. \tag{21}$$

故$x_2,u,V(\boldsymbol{x})$都是常量. 把其带入系统(12)可推出$x_1=0,x_3=0$, 则证明了在不变集Γ中有$(x_1,x_2,x_3,x_4)=(0,0,c,0)$. 又由式(21)(12)得

$$u=mgr\sin x_2. \tag{22}$$

在$x_2\in(-\pi,\pi]$内有唯一解$x_2=0$, 因此不变集Γ有最大不变集为$(x_1,x_2,x_3,x_4)=(0,0,0,0)$. 从而根据拉萨尔不变集原理, 知控制系统是渐进稳定的, 并稳定于能量为$-mgr$的稳定平衡点$[0\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$处.

4.2 结合高增益观测器的反馈控制系统设计 (Design of feedback control system combining high gain observer)

根据高增益观测器的设计理论, 首先要计算TORA系统的关系度ρ. 这里根据关系度的定义[14], 计算式(12)表示的TORA系统对应的李导数:

$$\begin{cases} L_gh(\boldsymbol{x})=\dfrac{\partial h}{\partial \boldsymbol{x}}g(\boldsymbol{x})=0,\\ L_fh(\boldsymbol{x})=\dfrac{\partial h}{\partial \boldsymbol{x}}f(\boldsymbol{x})=x_4,\\ L_gL_fh(\boldsymbol{x})=\dfrac{\partial L_fh(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}g(\boldsymbol{x})\neq 0. \end{cases} \tag{23}$$

由式(23)知道TORA系统的关系度为$\rho=2$.

再由式(18)知, 只需要利用高增益观测器通过测量输出角位移x_2来观测小球的角位移和角速度, 就可以得到该系统基于估计状态的反馈控制律. 假设这里对应的观测值为$\hat{\xi}_1$和$\hat{\xi}_2$, 将系统(12)经过以下非线性微分同胚变换:

$$\begin{cases} \eta_1=x_1+\dfrac{mr\sin x_2}{M+m},\\ \eta_2=x_3+\dfrac{mrx_4\cos x_2}{M+m},\\ \xi_1=x_2,\\ \xi_2=x_4. \end{cases} \tag{24}$$

得到该系统的规范型:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1=\eta_2,\\ \dot{\eta}_2=\dfrac{k}{M+m}(\dfrac{mr\sin\xi_1}{M+m}-\eta_1),\\ \dot{\xi}_1=\xi_2,\\ \dot{\xi}_2=b(\eta_1,\xi_1,\xi_2)+a(\xi_1)u. \end{cases} \tag{25}$$

式中:

$$a(\xi_1)=\frac{M+m}{(mr^2+I)(M+m)-m^2r^2\cos^2\xi_1},$$

$$b(\eta_1,\xi_1,\xi_2)=\frac{mr\cos\xi_1(k(\eta_1-\dfrac{mr\sin\xi_1}{M+m})-mr\xi_2^2\sin\xi_1)}{(mr^2+I)(M+m)-m^2r^2\cos^2\xi_1}.$$

于是由式(3)~(6)得到高增益观测器方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}}_1=\hat{\xi}_2+(\alpha_1/\varepsilon)(y-\hat{\xi}_1),\\ \dot{\hat{\xi}}_2=\hat{\sigma}+\hat{a}(\hat{\xi}_1)u+(\alpha_2/\varepsilon^2)(y-\hat{\xi}_1),\\ \dot{\hat{\sigma}}=(\alpha_3/\varepsilon^3)(y-\hat{\xi}_1). \end{cases} \tag{26}$$

其中

$$\hat{a}(\hat{\xi}_1)=\frac{M+m}{(mr^2+I)(M+m)-m^2r^2\cos^2\hat{\xi}_1},$$

ε是待定的正常数, $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$是满足特征方程$\lambda^3+\alpha_1\lambda^2+\alpha_2\lambda+\alpha_3=0$的全部特征值在左半平面时对应的系数. 因此结合控制律式(18)和观测器式(26)可得到基于高增益观测器估计状态的反馈控制律为

$$u=-\frac{1}{c_1}(c_2\hat{\xi}_1+c_3\hat{\xi}_2). \tag{27}$$

这样设计的基于高增益观测器估计状态的反馈控制系统是稳定的, 从而实现了只需检测小球角位移, 即可实现带观测器的反馈控制系统, 减小了直接测量系统多个状态的困难性, 便于工程实现.

5 仿真实验研究(Simulation research)

为了检验观测器的观测效果以及本文所提出的结合非线性观测器和能量的反馈控制系统(NO-ECS)的有效性, 这里进行仿真比较实验. TORA系统的参数取文献[15]中实验平台参数: 小车质量$M=1.2608\,\mathrm{kg}$, 小球质量$m=0.096\,\mathrm{kg}$, 其半径$r=0.0592\,\mathrm{m}$, 转动惯量$I=0.0002175\,\mathrm{kg{\cdot}m^2}$, 弹簧的弹性系数$k=186.3\,\mathrm{N/m}$.

5.1 高增益观测器参数的确定(Identifying the parameters of high gain observer)

根据式(26)知, 高增益观测器参数有$\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$和$\varepsilon$, $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$是特征方程$\lambda^3+\alpha_1\lambda^2+\alpha_2\lambda+\alpha_3=0$的系数, 满足该方程的全部特征值均在左半平面即可, 这里取为$\alpha_1=2,\alpha_2=30,\alpha_3=5$.

再通过实验来选取高增益观测器的另一个参数ε, 仿真初始值选为$[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}}=[0\ 60\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$, 通过不同$\varepsilon$下角位移和角速度实际值与观测值的比较, 如图2和图3所示可以看出当$\varepsilon=0.3$时大概需要5 s, 观测值才近似收敛于实际值, 且角速度的观测值与实际值相差较大, 观测效果不理想. 慢慢减小ε不断观察, 直到$\varepsilon=0.09$时, 在小于1 s时间内观测值就收敛到实际值了, 之后ε再减小收敛性能变差, 故这里选择$\varepsilon=0.09$可使该高增益观测器性能

更佳.

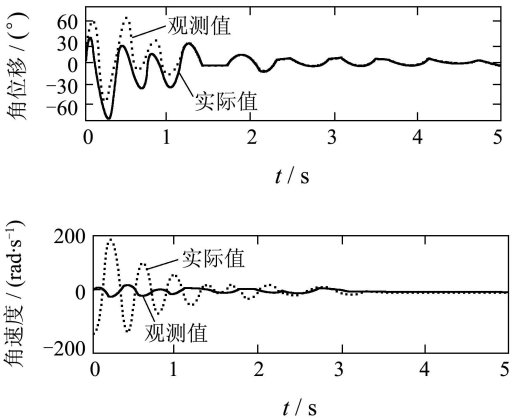


图 2 $\varepsilon = 0.3$时角位移和角速度实际值与观测值比较

Fig. 2 The comparison of angular displacement and velocity actual value and observed value with $\varepsilon = 0.3$

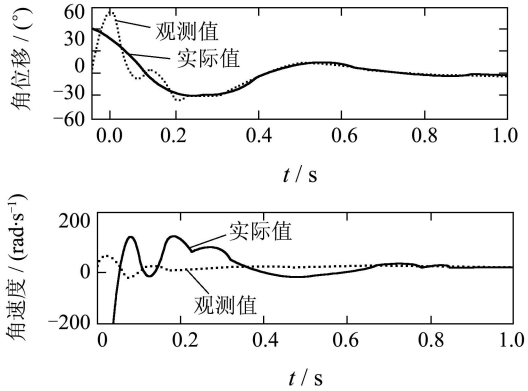
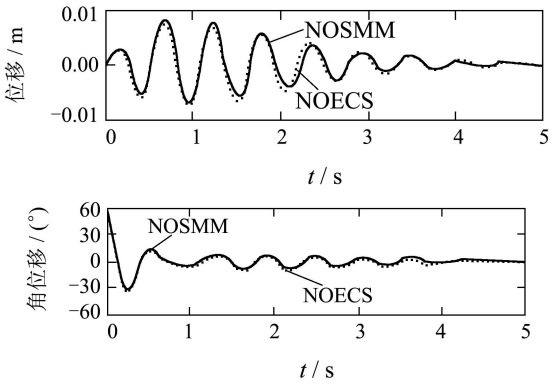


图 3 $\varepsilon = 0.09$时角位移和角速度实际值与观测值比较

Fig. 3 The comparison of actual value and observed value of angular displacement and velocity with $\varepsilon = 0.09$

5.2 动态性比较(Comparison of dynamics)

为了比较所研究的基于非线性观测器和能量相结合的控制系统(NOECS)和文献[12]中的非线性观测器和滑模控制相结合的控制系统(NOSMM)的动态性能, 图4和图5分别是在初始条件$[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0\ 60\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$和$[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0.1\ 60\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$下实验得到的仿真结果. 其中控制器的参数取为$c_1 = 450, c_2 = 5.3, c_3 = 1$.



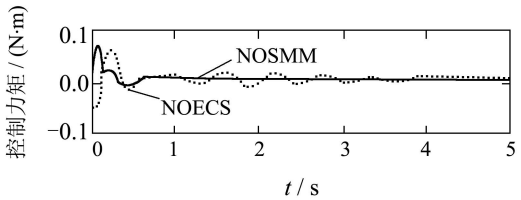


图 4 初始值为$[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0\ 60\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$的仿真结果

Fig. 4 Simulation results with initial condition $[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0\ 60\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$

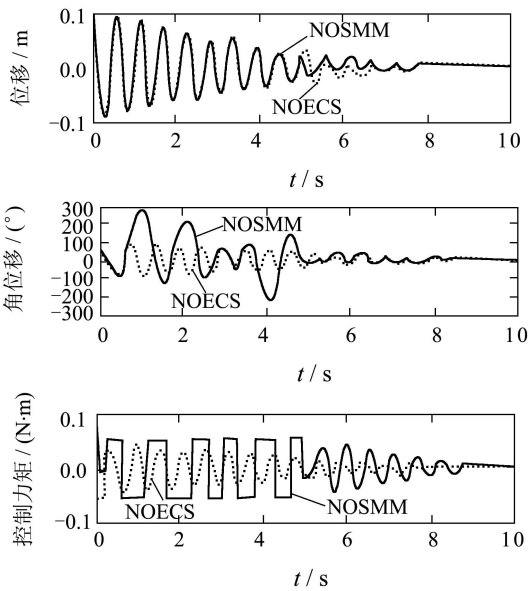
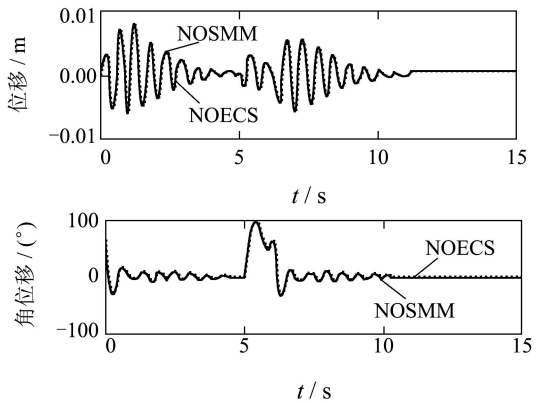


图 5 初始值为$[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0.1\ 60\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$的仿真结果

Fig. 5 Simulation results with initial condition $[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0.1\ 60\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$

从图5可以看出NOSMM法的角位移响应超调为300%, 振荡很大, 而NOECS方法的角位移响应超调量和振荡较小, 且其控制力矩变化也比较小, 显示了本文方法具有较好的动态性能.

进一步考察系统的抗干扰能力, 在控制输入处加入一干扰$r = 0.06(\varepsilon(t-5) - \varepsilon(t-6))$的系统响应, 仿真初始值为$[x\ \theta\ \dot{x}\ \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = [0\ 60\ 0\ 0]^{\mathrm{T}}$. 从图6可以看出干扰消失后小球角位移与小车位移在小于5 s时间内又回到稳定平衡状态, 显示了所设计控制系统的抗干扰性能较好.



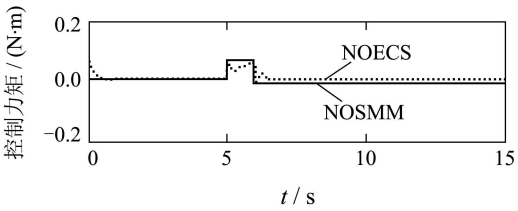


图 6 u处加入干扰$r = 0.06(\varepsilon(t-5) - \varepsilon(t-6))$的仿真结果

Fig. 6 Simulation results with disturbance $r = 0.06(\varepsilon(t-5) - \varepsilon(t-6))$ in control input u

6 结论(Conclusion)

本文基于高增益观测器和能量法状态反馈系统结构, 利用其分离性原理, 提出了一种结合非线性观测器和能量的基于估计状态的反馈控制系统(NOECS). 以垂直欠驱动具有旋转激励的平移振荡器(TORA)系统的设计和仿真实验, 显示了NOECS方法对这类零动态不稳定非线性系统的稳定控制具有较好的动态性能, 而且该方法只需要检测小球的角位移即可实现带观测器的基于估计状态的反馈控制系统, 便于工程应用.

参考文献(References):

[1] ANDRIEU V, PRALY L, ASTOLFI A. High gain observers with updated gain and homogeneous correction terms[J]. *Automatica*, 2008, 45(2): 422 – 428.

[2] FREIDOVICH L B, KHALIL H K. Performance recovery of feedback-linearization-based designs[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(10): 2324 – 2334.

[3] KHALIL H K, STRANGAS E G, JURKOVIC S. Speed observer and reduced nonlinear model for sensorless control of induction motors[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(2): 327 – 339.

[4] MEMON A, KHALIL H K. Output regulation of linear systems subject to input constraints[C] //*Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*. Cancun, Mexico: IEEE, 2008: 3504 – 3509.

[5] NAZRULLA S, KHALIL H K. Robust stabilization of non-minimum phase nonlinear systems using extended high gain observers[C] //*Proceedings of American Control Conference*. Seattle, Washington, USA: IEEE, 2008: 1734 – 1739.

[6] DOYLE J C, STEIN G. Robustness with observers[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1979, 24(4): 607 – 611.

[7] MARINO R. High-gain in nonlinear control systems[J]. *International Journal of Control*, 1985, 42(6): 1369 – 1385.

[8] ESFANDIARI F, KHALIL H K. Observer-based design of uncertain systems: recovering state feedback robustness under matching conditions[C] //*Proceedings of Allerton Annual Conference on Communication, Control and Computing*. Monticello, IL: Allerton House, 1987: 97 – 106.

[9] TORNAMBE A. Use of asymptotic observers having high-gain in the state and parameter estimation[C] //*Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*. Tampa, Florida, USA: IEEE, 1989: 1791 – 1794.

[10] ATASSI A N, KHALIL H K. A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(9): 1672 – 1687.

[11] TEEL A, PRALY L. Global stabilizability and observability imply semi-global stabilizability by output feedback[J]. *Systems and Control Letters*, 1994, 22(5): 313 – 325.

[12] NAZRULLA S, KHALIL H K. A novel nonlinear output feedback control applied to the TORA benchmark system[C] //*Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*. Cancun, Mexico: IEEE, 2008: 3565 – 3570.

[13] 高丙团. TORA的动力学建模及基于能量的控制设计[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1221 – 1224.
(GAO Bingtuan. Dynamical modeling and energy-based control design for TORA[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(9): 1221 – 1224.)

[14] KHALIL H K. *Nonlinear Systems*[M]. 3rd Edition. EnglewoodCliffs, NJ: Prentice Hall, 2002.

[15] ROBERT T B, DENNIS S B, VINCENT T C. A benchmark problem for nonlinear control design[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1998, 8(4): 307 – 310.

作者简介:

许清媛 (1986—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为非线性控制等, E-mail: pc31xqy@126.com;

杨 智 (1961—), 男, 教授, 目前研究方向有复杂系统的建模仿真与控制策略研究、智能检测与自动化仪表等, E-mail: issyz@mail.sysu.edu.cn;

范正平 (1977—), 男, 讲师, 研究方向为复杂网络的动力学分析等, E-mail: zhpfan@yahoo.com.cn;

李晓东 (1966—), 男, 教授, 主要研究方向为优化控制理论及应用等, E-mail: lixd@mail.sysu.edu.cn.