

文章编号: 1001-0920(2009)07-1023-05

一类欠驱动机械系统的全局鲁棒控制

赖旭芝, 潘昌忠, 吴敏

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 针对具有质心参数不确定性的 Acrobot 系统, 提出一种全局的鲁棒控制方法. 首先, 给出系统具有质心参数不确定的系统模型; 其次在摇起区, 分析系统不确定性条件下的能量变化情况, 基于能量不断增加的思想设计出摇起控制器; 在平衡区, 把系统的不确定性转化为模型状态矩阵的不确定性, 引入 H 标准设计方法, 得出存在 H 状态反馈控制器的充要条件, 通过求解线性矩阵不等式使系统有效地克服不确定性的影响实现二次稳定; 最后通过仿真实验验证了所提方法的有效性.

关键词: 欠驱动; 体操机器人; 不确定性; 鲁棒控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Global robust control of a class of underactuated mechanical systems

LAI Xu-zhi, PAN Chang-zhong, WU Min

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: LAI Xu-zhi, E-mail: xuzhi@csu.edu.cn)

Abstract: This paper presents a global robust control strategy for a class of underactuated mechanical systems called Acrobot with centroid uncertainties. First, the system model with parameter uncertainties is given. Then, a swing up controller is proposed based on the ideal of increasing system's energy with each swing. In the balance area, the linear model with parameter uncertainties is deduced by reformulating the uncertainties of the system as the uncertainties of the model state matrix. A necessary and sufficient condition of existence of a robust state feedback controller is employed based on the method of H standard control. And the controller is designed by solving a term of linear matrix inequalities, which can effectively deals with the uncertainties and maintains the quadratic stability of the system. Simulation result shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: Underactuated; Acrobot; Uncertainties; Robust control

1 引言

欠驱动机器人控制策略的研究在机器人和控制领域都是一个巨大的挑战. 近十几年来, 欠驱动机器人已经广为人知, 并且被越来越多的人所关注. 欠驱动体操机器人 Acrobot 正是一类具有非完整约束的欠驱动机械系统^[1], 它具有两个自由度, 而只有一个控制输入. 由于它具有欠驱动特性, 在节约能量、降低成本以及增强灵活性等方面都优越于完全驱动系统, 同时由于系统具有多变量、非线性、强耦合以及不稳定等特点, 使之便于研究和验证各种控制算法. 因此, 对欠驱动机械系统的研究具有重要的理论意义和工业应用价值.

近年来, 针对 Acrobot 系统, 许多学者已经研究

出了各种控制方法, 如部分反馈线性化控制、模糊控制、Lyapunov 方法等用于实现摇起操作^[2-4], 同时采用 LQR 及滑模控制等方法实现了系统的平衡控制^[3,5,6], 都取得了不错的控制效果. 但是在众多的控制方法中, 几乎都是基于系统的理想模型(即忽略了诸多的不确定性等因素)得到的, 所得出的结论在实际应用中存在很大的局限性. 文献[7]虽然提出一种鲁棒控制方法用于实现系统的摇起控制, 但只是单纯把不平衡点附近连杆旋转的角速度当成一种不确定性来处理, 并未研究系统在参数不确定等情况下的鲁棒控制问题.

实际上, 对于体操机器人 Acrobot 系统, 其主要的模型参数有: 杆质量、杆长度和杆质心. 通常情况

收稿日期: 2008-07-04; 修回日期: 2008-11-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674044); 国家杰出青年科学基金项目(60425310).

作者简介: 赖旭芝(1966—), 女, 湖南益阳人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制、机器人和传感器网络等研究;

潘昌忠(1984—), 男, 江西赣州人, 硕士生, 从事欠驱动控制、非线性控制的研究.

下,两杆的质量和长度相对来说是给定不变的,它不会随系统的运动或环境的不同而发生变化;相反,杆的质心却可能是个不确定量,它可能会由于杆质量的不均匀或运动等特性而使得杆的质心不固定,呈现出在一定范围内摄动的情况.因此,在这种情况下研究系统在具有质心不确定条件下的全局鲁棒控制方法,对于欠驱动机械系统的应用具有十分重要的价值.

近十几年来, H 鲁棒控制理论^[8] 迅猛发展,已成为控制理论的一个研究热点,并取得了丰硕的成果.它给出了鲁棒控制系统的设计方法,并充分考虑系统不确定性的影响,不仅能保证控制系统的鲁棒稳定性,而且能优化一些性能指标.在实际应用中,多种控制问题均可变换为 H 鲁棒控制理论的标准问题,具有一般性.

本文针对具有质心不确定的 Acrobot 系统,提出一种全局的鲁棒控制方法.该控制方法分为摇起控制和平衡控制两部分.在摇起区,分析系统在不确定性条件下的能量变化情况,从摇起能量不断增加的角度出发设计摇起控制器;在平衡区,把系统的不确定性转化为模型状态矩阵的不确定性,针对参数不确定线性化模型,引入基于状态反馈的 H 标准设计方法,得出存在一个 H 状态反馈控制器的充分必要条件,通过求解线性矩阵不等式得出鲁棒状态反馈控制律,使系统有效地克服不确定性的影响,实现二次稳定.最后,通过仿真对比验证了结果的有效性.

2 系统的不确定模型

Acrobot 的模型结构如图 1 所示, $q_j (j = 1, 2)$ 为第 j 杆的角度,分别是坐标 y 轴正方向与杆 1 的角度和杆 1 的延长线与杆 2 所构成的角度; \dot{q}_j 为第 j 杆的角速度; L_j 为第 j 杆的长度; m_j 为第 j 杆的质量; L_{gj} 为从 j 关节到 j 杆质心的距离; I_j 为第 j 杆相对于质心的惯性; g 为重力加速度.令 $q = [q_1, q_2]^T$, 其数学模型可通过拉格朗日动力学知识得到,在存在质心参数不确定性时,系统的不确定动力学方程可描述为

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

其中: $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T = [0, \tau_2]^T$ 是力矩向量, $M(q)$ 为惯性矩阵, $H(q, \dot{q})$ 为利里奥利力和离心力的结合, $G(q)$ 是重力,它们分别定义为

$$\begin{aligned} M(q) &= M(q) + \Delta M(q), \\ H(q, \dot{q}) &= [H_1 \quad H_2]^T = H(q, \dot{q}) + \Delta H(q, \dot{q}), \\ G(q) &= [G_1 \quad G_2]^T = G(q) + \Delta G(q). \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $M(q)$, $H(q, \dot{q})$, $G(q)$ 分别代表标称值; $\Delta M(q)$, $\Delta H(q, \dot{q})$, $\Delta G(q)$ 则分别代表对应质心不

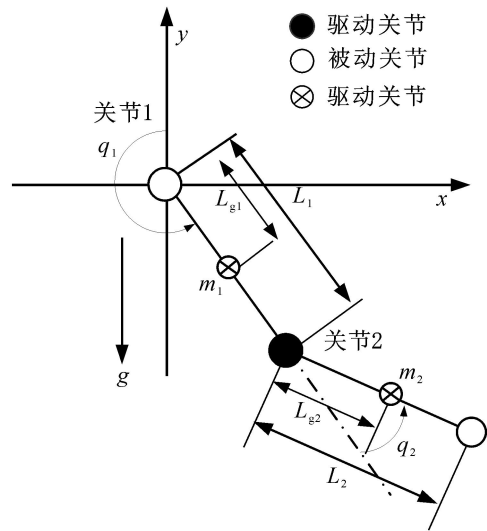


图1 Acrobot 结构

确定时相应的不确定项,且它们可表示为

$$\begin{cases} M(q) = \begin{bmatrix} 1 + 2 + 2 \quad 3 \cos q_2 & 2 + 3 \cos q_2 \\ 2 + 3 \cos q_2 & 2 \end{bmatrix}, \\ H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -3(\dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2) \sin q_2 \\ 3\dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{bmatrix}, \\ G(q) = \begin{bmatrix} -4 \sin q_1 - 5 \sin(q_1 + q_2) \\ -5 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}; \\ M(q) = \begin{bmatrix} 1 + 2 + 2 \quad 3 \cos q_2 & 2 + 3 \cos q_2 \\ 2 + 3 \cos q_2 & 2 \end{bmatrix}, \\ H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -3(\dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2) \sin q_2 \\ 3\dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{bmatrix}, \\ G(q) = \begin{bmatrix} -4 \sin q_1 - 5 \sin(q_1 + q_2) \\ -5 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (3)$$

其中 $i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 为系统的结构参数,它们定义为

$$\begin{aligned} 1 &= m_1 L_{g1}^2 + m_2 L_1^2 + I_1, \\ 2 &= m_2 L_{g2}^2 + I_2, \quad 3 = m_2 L_1 L_{g2}, \\ 4 &= m_1 g L_{g1} + m_2 g L_1, \quad 5 = m_2 g L_{g2}. \end{aligned} \quad (5)$$

假设质心摄动为 $\Delta L_{gi} (i = 1, 2)$, 则 $\Delta_j (j = 1, 2, \dots, 5)$ 为质心参数摄动而导致的不确定性项,即

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= m_1 \Delta L_{g1}^2 + 2m_1 \Delta L_{g1} L_{g1}, \\ \Delta_2 &= m_2 \Delta L_{g2}^2 + 2m_2 \Delta L_{g2} L_{g2}, \\ \Delta_3 &= m_2 \Delta L_1 L_{g2}, \\ \Delta_4 &= m_1 g \Delta L_{g1}, \quad \Delta_5 = m_2 g \Delta L_{g2}. \end{aligned} \quad (6)$$

令 $x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [q_1 \quad q_2 \quad \dot{q}_2 \quad \dot{q}_1]^T$, 则方程(1)可改写为

$$\dot{x}_1 = x_3, \quad \dot{x}_2 = x_4; \quad (7a)$$

$$\dot{x}_3 = f_1(x) + b_1(x) \Delta_2,$$

$$\dot{x}_4 = f_2(x) + b_2(x) \Delta_2. \quad (7b)$$

式中: $f_1(x)$, $f_2(x)$, $b_1(x)$, $b_2(x)$ 为非线性函数,分

别为

$$\begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = M^{-1}(x)[-H(x) - G(x)],$$

$$\begin{bmatrix} b_1(x) \\ b_2(x) \end{bmatrix} = M^{-1}(x) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

3 系统能量分析与摇起控制器设计

文献[5]给出了系统在标称模型下的能量表达式,并从能量出发设计了摇起控制器.然而,当系统存在质心参数不确定性的影响时,系统的能量会相应发生变化.因此,为了重新设计摇起控制器,有必要分析系统存在质心不确定性条件下的能量变化情况.

3.1 能量分析

参数摄动时系统的能量表达式为

$$E(x) = T(x) + V(x). \quad (8)$$

其中: $T(x)$ 为动能, $V(x)$ 为势能.它们又可表示为

$$T(x) = T(x) + T(x),$$

$$V(x) = V(x) + V(x). \quad (9)$$

式中: $T(x)$ 和 $V(x)$ 是标称情况下的动能和势能;

$T(x)$ 和 $V(x)$ 是参数变动后相应的摄动值,它们具有如下表达式:

$$T(x) = 0.5 \dot{q}^T M(q) \dot{q},$$

$$T(x) = 0.5 \dot{q}^T M(q) \dot{q}, \quad (10)$$

和

$$V(x) = 4 \cos q_1 + 5 \cos(q_1 + q_2),$$

$$V(x) = 4 \cos q_1 + 5 \cos(q_1 + q_2). \quad (11)$$

对式(8)求导,可得

$$\dot{E}(x) = \left[\frac{\partial T(x)}{\partial \dot{x}_1} \quad \frac{\partial T(x)}{\partial \dot{x}_2} \right] \begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} +$$

$$\left[\frac{\partial T(x)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial T(x)}{\partial x_2} \right] \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} +$$

$$\left[\frac{\partial V(x)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial V(x)}{\partial x_2} \right] \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

另外

$$\left[\frac{\partial T(x)}{\partial \dot{x}_1} \quad \frac{\partial T(x)}{\partial \dot{x}_2} \right] = [\dot{q}_1 \quad \dot{q}_2] M(q),$$

$$\left[\frac{\partial V(x)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial V(x)}{\partial x_2} \right] = [G_1(q) \quad G_2(q)], \quad (13)$$

$$\left[\frac{\partial T(x)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial T(x)}{\partial x_2} \right] = [H_1(q, \dot{q}) \quad H_2(q, \dot{q})], \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = M^{-1}(q) \begin{bmatrix} -H_1(q, \dot{q}) - G_1(q) \\ -H_2(q, \dot{q}) - G_2(q) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

将式(13), (14) 和(15) 代入(12), 经化简得

$$\dot{E}(x) = \dot{q}_2 = \dot{x}_2 = x_4. \quad (16)$$

从式(16) 中可以看出,系统能量的导数与质心参数摄动无关.

3.2 控制器设计

摇起控制器的作用是将系统从低部的平衡位置摇起到向上的不稳定平衡点处,实现摇起操作.一种有效的方法是让系统的能量逐渐达到并收敛至垂直位置时的最大能量,即满足 $E(x) = 0$.

为了使体操机器人从摇起区迅速过渡到平衡区,选择如下 Lyapunov 函数:

$$V(x) = \frac{1}{2} k_e (E - E_0)^2, \quad k_e > 0. \quad (17)$$

其中: E 为 $E(x)$ 的简写式; E_0 为系统垂直向上位置时的最大能量,它的数学描述为

$$E_0 = 4 + 5, \quad E = E_0. \quad (18)$$

对式(17)求导,可得

$$\dot{V}(x) = k_e (E - E_0) \dot{E}. \quad (19)$$

将式(16) 代入(19), 得

$$\dot{V}(x) = k_e (E - E_0) x_4, \quad (20)$$

当

$$x_4 = -k_e (E - E_0) x_4 \quad (21)$$

时,有

$$\begin{cases} \dot{V}(x) = -k_e^2 (E - E_0)^2 x_4^2 < 0, \quad \forall x_4 \neq 0, \\ \dot{E}(q, \dot{q}) = \dot{q}_2 = -k_e (E - E_0) x_4 = 0. \end{cases} \quad (22)$$

因此,当采用式(21) 的控制力矩时,能够保证系统在摇起的过程中有效地克服不确定性的影响,使能量向递增的方向变化,同时又使其具有收敛至垂直向上平衡位置时具有的最大能量.

4 平衡控制器设计

当系统在摇起控制器(21) 的作用下进入平衡区的范围时,由切换策略将系统切换到平衡控制器的作用下,实现系统的平衡稳定.文献[3]给出了系统位于吸引区附近的近似线性化模型,并设计了相应的平衡控制器.本文考虑存在不确定参数时的情况,将不确定性的表现形式化为不确定矩阵的形式,依据 H 鲁棒控制的方法设计平衡鲁棒控制器,实现系统的二次稳定.

在平衡区,利用不稳定平衡点处的参数不确定近似线性化模型,即

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u. \quad (23)$$

其中: A 和 B 是 Acrobot 系统标称参数情况下的系统矩阵; ΔA 和 ΔB 是质心参数变动后相应的不确定项,假定不确定项是有界的,且能化成如下结构:

$$[\Delta A \quad \Delta B] = DF(t) [E_1 \quad E_2]. \quad (24)$$

式中: D, E_1 和 E_2 是具有适当维数常数矩阵,反映了质心参数不确定项的结构; $F(t)$ 为可测的矩阵函

数,满足 $F(t) \mathbf{R} \mathbf{R} = \{ F(t) | F(t)^T F(t) = I \}$, I 为适当维数的单位矩阵.

定义1 对于式(23)所述的 Acrobot 平衡区近似模型,设计如下形式的状态反馈控制器:

$$\dot{x} = Kx, \tag{25}$$

使得闭环系统

$$\dot{x} = [A + BK + DF(E_1 + E_2 K)]x \tag{26}$$

二次稳定的充要条件是 $A + BK$ 为稳定阵且

$$(E_1 + E_2 K)(sI - A - BK)^{-1}D < 1 \tag{27}$$

成立.

引理1(有界实引理)^[9] 设 $\gamma > 0$,且一传递函数 $T(s)$ 的实现为 $T(s) = D + C(sI - A)^{-1}B$,则以下条件是等价的:

- 1) 系统渐近稳定,且 $\|T(s)\| < \gamma$;
- 2) 存在一个正定对称矩阵 X ,使得

$$\begin{bmatrix} A^T X + XA & XB & C^T \\ B^T X & -I & D^T \\ C & D & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{28}$$

定理1 对于 Acrobot 平衡区模型(23),存在一个 H 状态反馈控制器的充要条件是存在一个对称正定矩阵 X 和任意合适维数的矩阵 W ,使得如下 LMI:

$$\begin{bmatrix} AX + BW + (AX + BW)^T & D & (E_1 X + E_2 W)^T \\ D^T & -I & 0 \\ E_1 X + E_2 W & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \tag{29}$$

成立,则相应的 H 状态反馈控制器为

$$u = (WX^{-1})x. \tag{30}$$

证明 对于式(23)所对应的闭环控制系统(26),运用上述的有界实引理可得,当且仅当存在一个正定对称矩阵 P ,使得

$$\begin{bmatrix} (A + BK)^T P + P(A + BK) & PD & (E_1 + E_2 K)^T \\ D^T P & -I & 0 \\ E_1 + E_2 K & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \tag{31}$$

成立时,系统渐近稳定且 $\|T(s)\| < 1$.

对不等式(31)的左边和右边分别左乘右乘矩阵 $\text{diag}\{P^{-1}, I, I\}$,得到式(31)的等价形式为

$$\begin{bmatrix} P^{-1}(A + BK)^T + (A + BK)P^{-1} & D & P^{-1}(E_1 + E_2 K)^T \\ D^T & -I & 0 \\ (E_1 + E_2 K)P^{-1} & 0 & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{32}$$

定义 $X = P^{-1}$, $W = KX$,代入式(32)即得定理1中的式(29).由 $K = WX^{-1}$ 代入式(25)即可得式(30).

5 切换策略

为了实现两类控制器之间的平滑过渡,以下给出一种有效的切换策略.

令整个运动空间为 Ω ,则平衡区 Ω_2 定义为

$$\Omega_2 = \left\{ \theta \mid \left| \text{mod}\left(\frac{x_1}{2}\right) \right| < \frac{\pi}{6} \right. \\ \left. \mid \text{mod}\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right) \right| < \frac{\pi}{6} \right\}. \tag{33}$$

这里 $\text{mod}(x/y)$ 是 x 除以 y 的余数,摇起区 Ω_1 为

$$\Omega_1 = \Omega - \Omega_2. \tag{34}$$

理论上,由式(33)即可成为摇起区和平衡区的一种转换条件.当系统满足式(33)给定的条件时,由平衡控制器作用;反之,摇起控制器起作用.然而在实验中,为了提高系统的捕获成功率,一种有效的方法是保证系统进入吸引区时系统的总能量接近而略小于 E_0 ,因此,作如下定义:

$$\|E - E_0\| < 0.55J. \tag{35}$$

由以上分析可得系统的切换策略:

- 1) 计算 E .
- 2) 判断是否满足式(35).否,则控制规律取(21);是,则令 $\theta_2 = 0$.
- 3) 判断角度是否满足式(33).是,则取控制规律(29);否,则返回2).

6 仿真实验与结果

仿真中,Acrobot 的标称物理参数为: $m_1 = 1 \text{ kg}$, $I_1 = 0.083 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $L_1 = 1 \text{ m}$, $L_{g1} = 0.5 \text{ m}$, $m_2 = 1 \text{ kg}$, $I_2 = 0.33 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $L_2 = 2 \text{ m}$, $L_{g2} = 1 \text{ m}$;其初始状态为 $x(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$;式(19)中的 $k_e = 0.05$.

在具体实验系统中,两杆的质心往往具有不确定性,本文考虑其不确定的最大摄动为 $\pm 10\%$ 时,有 $|L_{g1}| < 0.05 \text{ m}$, $|L_{g2}| < 0.1 \text{ m}$,则可计算出

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix}. \tag{36}$$

其中

$$\|J_1\| = 0.5, \|J_2\| = 3.0, \|J_3\| = 0.7, \\ \|J_4\| = 3.9, \|J_5\| = 0.3, \|J_6\| = 0.5.$$

对应于式(24)中的 $D, E_1, E_2, F(t)$ 分别为

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.3 \ 0.5]^T,$$

$$F(t) = \text{diag}\left\{\frac{1}{0.5}, \frac{2}{3}, \frac{3}{0.7}, \frac{4}{3.9}, \frac{5}{0.3}, \frac{6}{0.5}\right\}.$$

通过 Matlab 鲁棒工具箱求解式(29),可得

$$u = 10^3 [1.4089 \ 0.5975 \ 0.6126 \ 0.2954]x. \tag{37}$$

图2所示为系统在质心参数摄动满足 ±10% 时的仿真结果,当 t = 3.25 s 时成功实现从摇起到平衡控制之间的平滑转换.从图中可以看出,虽然系统受

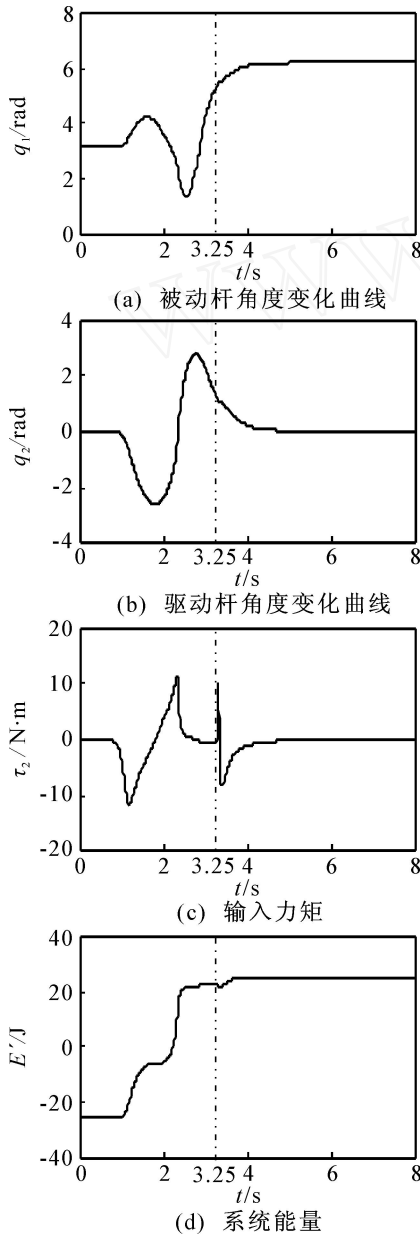


图2 质心参数摄动情况下的仿真结果

到质心参数性摄动的影响,但本文所提方法能有效地抑制不确定性的影响,成功实现系统的二次稳定.相比文献[7]中的控制方法而言,控制效果更为明显,克服了控制力矩过大、能量突变等缺点.

7 结 论

本文针对具有质心参数不确定性的 Acrobot 系统,提出了一种全局的鲁棒控制方法.该控制方法在摇起区充分地分析了系统在质心参数摄动情况下能量变化情况,基于能量递增及收敛的方法设计了摇起控制器;然后,设计了平衡鲁棒控制器以实现系统的二次稳定.仿真结果验证了所提出方法的有效性和优越性.

参考文献(References)

- [1] Oriolo G, Nakamura Y. Control of mechanical systems with second-order nonholonomic constraints: Underactuated manipulators[C]. Proc of 30th IEEE Conf on Decision and Control. Brighton, 1991: 2398-2403.
- [2] Spong M W. The swing up control problem for the acrobot[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995, 15(1): 49-55.
- [3] 赖旭芝,蔡自兴,吴敏. 一类欠驱动机械系统的模糊与变结构控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 850-854. (Lai X Z, Cai Z X, Wu M. Fuzzy and variable structure control of a class of underactuated mechanical systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(6): 850-854.)
- [4] 赖旭芝,吴敏,余锦华,等. Acrobot 控制器设计与全局稳定性分析[J]. 自动化学报, 2007, 33(7): 721-725. (Lai X Z, Wu M, She J H, et al. Controller design and global stability analysis of acrobot[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(7): 721-725.)
- [5] 赖旭芝,吴敏,余锦华,等. 欠驱动两杆机器人的统一控制策略和全局稳定性分析[J]. 自动化学报, 2008, 34(1): 55-63. (Lai X Z, Wu M, She J H, et al. Comprehensive unified control strategy and global stability analysis for underactuated two-link manipulators [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(1): 55-63.)
- [6] 郑艳,朱媛,井元伟. 一类欠驱动机械系统基于滑模的变结构控制[J]. 东北大学学报, 2005, 26(6): 511-515. (Zheng Y, Zhu Y, Jing Y W. Variable structure control based on sliding model for a class of underactuated mechanical system [J]. J of Northeastern University, 2005, 26(6): 511-515.)
- [7] Xin X, Kaneda M. A robust control approach to the swing up control problem for Acrobot[C]. Proc of the 2001 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Hawaii, 2001: 1650-1655.

(下转第 1032 页)

- 直线电机控制研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12): 164-167.
(Sun L N, Cui J, Qu D S. Research of discrete-time disturbance observer for linear motor[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2004, 40(12): 164-167.)
- [12] Umeno T, Hori Y. Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1991, 38(5): 363-368.
- [13] Kim B K, Chung W K. Advanced design of disturbance observer high performance motion control systems [C]. Proc of the American Control Conf. Anchorage, 2002: 2112-2117.
- [14] Ishikawa J, Tomizuka M. A novel add-on compensator for cancellation of pivot nonlinearities in hard disk drives[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1998, 34(4): 1895-1897.
- [15] Ryoo J R, Jin K B, Moon J H, et al. Track-following control using a disturbance observer with asymptotic disturbance rejection in high-speed optical disk drivers [J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2003, 49(4): 1178-1185.
- [16] 梅志千, 刘有德, 李向国. SCARA 机器人关节伺服系统中的干扰补偿控制[J]. 机床与液压, 2007, 35(7): 149-152.
(Mei Z Q, Li Y D, Li X G. Disturbance compensation to the joint servo system of SCARA-type manipulator [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35(7): 149-152.)
- [17] Komada S, Machii N, Hori T. Control of redundant manipulators considering order of disturbance observer [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 413-420.
- [18] 王祖温, 詹长书, 杨庆俊, 等. 气压伺服系统高性能鲁棒控制器的设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 15-19.
(Wang Z W, Zhang C S, Yang Q J, et al. Design of high performance robust controller of pneumatic servo system [J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 15-19.)
- [19] Ohnishi K, Matsui N, Hori Y. Estimation, identification, and sensorless control in motion control system[J]. Proc of the IEEE, 1994, 82(8): 1253-1265.
- [20] Bertoluzzo M, Buja G S, Stampacchia E. Performance analysis of a high-bandwidth torque disturbance observer [J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2002, 9(4): 653-660.
- [21] 黎坚, 杨耕, 窦曰轩. 数字控制时延对扰动观测器性能的影响[J]. 电气传动, 2003, 33(2): 18-20.
(Li J, Yang G, Dou Y X. The effect of time delay on the performance of disturbance observer in digital control[J]. Electric Drive, 2003, 33(2): 18-20.)
- [22] Hong Y G. Finite-time stabilization and stabilizability of a class of controllable systems [J]. Systems and Control letter, 2002, 46(2): 231-236.
- [23] Huang X Q, Lin W, Yang B. Global finite-time stabilization of a class of uncertain nonlinear systems [J]. Automatica, 2005, 41(5): 881-885.
- [24] 李世华, 丁世宏, 田玉平. 一类二阶非线性系统的有限时间状态反馈镇定方法[J]. 自动化学报, 2007, 33(1): 101-104.
(Li S H, Ding S H, Tian Y P. A finite-time state feedback stabilization method for a class of second order nonlinear system [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(1): 101-104.)
- [25] Bhat S P, Bernstein D S. Geometric homogeneity with applications to finite-time stability[J]. Mathematics of Control Signals and Systems, 2005, 17(2): 101-127.
- [26] Li S H, Tian Y P. Finite-time stability of cascaded time-varying systems [J]. Int J of Control, 2007, 80(4): 646-657.
- [27] Hong Y G, Wang J K, Xi Z R. Stabilization of uncertain chained form systems within finite settling time[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(9): 1379-1384.
- [28] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems [J]. SIAM J on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.
- [29] Godler I, Honda H, Ohnishi K. Design guidelines for disturbance observers filter in discrete time [C]. 7th Int Workshop on Advanced Motion Control. Piscataway: IEEE Press, 2002: 390-395.

(上接第 1027 页)

- [8] 申铁龙. H 控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
(Sheng T L. The theory and application of H control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.)
- [9] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(Yu L. Robust control — Linear matrix inequality method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)