控制与决策
Control and Decision

基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定

潘昌忠，罗晶，周兰，熊培银

基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定

潘昌忠†, 罗 晶, 周 兰, 熊培银

(湖南科技大学 信息与电气工程学院，湖南 湘潭 411201)

摘 要: 针对受不确定性影响的平面Acrobot机器人,提出一种基于免疫优化的线性自抗扰鲁棒控制设计方法,实现机器人末端点从任意初始位置到达并镇定在目标位置. 首先,借助驱动关节与被动关节角度之间的状态约束获取机器人末端点位置与驱动关节角度的对应关系,使末端点的位置控制转换为驱动关节的角度控制;其次,为缩短运动路径加入最小角度位移限制条件,设计免疫算法求解目标位置所对应的驱动关节角度的最小期望值;再次,引入线性自抗扰控制技术,把机器人的模型不确定性、未知干扰等因素视为一个新的扩张状态变量,设计线性扩张状态观测器和基于状态误差的反馈控制器,在仅驱动关节角度可测的情况下实现Acrobot的鲁棒镇定;最后,通过仿真实验验证所提出方法具有更好的鲁棒控制性能.

关键词: 平面Acrobot；线性自抗扰控制；鲁棒控制；免疫优化；欠驱动系统；不确定性

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0289

引用格式: 潘昌忠, 罗晶, 周兰, 等. 基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (12): 3053-3058.

Robust stabilization of planar Acrobot using linear active disturbance rejection control with immune optimization

PAN Chang-zhong†, *LUO Jing*, *ZHOU Lan*, *XIONG Pei-yin*

(School of Information and Electrical Engineering，Hunan University of Science and Technology，Xiangtan 411201，China)

Abstract: A robust stabilization design method based on linear active disturbance rejection control (ADRC) with immune optimization is proposed for a planar Acrobot affected by uncertainties such that the end point of the robot can reach and be stabilized at the target position from any initial position. Firstly, the relationship between the position of the end point of the robot and the angle of the actuated joint is obtained by means of the state constraint relationship between the angle of the actuated joint and the angle of the underactuated joint. After that, the position control of the end point is converted to the angle control of the actuated joint. Secondly, in order to shorten the motion path, a condition of minimum angular displacement restriction is defined, and an immune algorithm is designed to obtain the minimum desired angle of the actuated joint corresponding to the target position. Thirdly, the linear ADRC control technique is introduced, and the uncertainties such as model uncertainties and unknown disturbances are regarded as an extended state of the system. A linear extended state observer and a feedback controller based on state error are designed to realize the robust stabilization of the Acrobot when only the angle of the actuated joint is measurable. Finally, simulations are conducted to show that the proposed method has better robust control performance.

Keywords: planar Acrobot；LADRC；robust control；immune optimization；underactuated system；uncertainty

0 引 言

平面Acrobot是一类在水平面上运动的两连杆机器人,其第1关节缺少驱动装置,属于典型的欠驱动机械系统. 这类系统工作在无重力或不受重力影响的环境下具有质量轻、低耗能、易维护等优点,在深海作业、外星探索等领域具有良好的应用前景[1-3]. 然而,要对平面Acrobot进行控制,特别是系统在不确定性干扰等情况下的鲁棒控制,具有非常大的难度和挑战性.

相较于平面Acrobot, 垂直Acrobot的稳定控制方

收稿日期: 2019-03-13；**修回日期:** 2019-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403135, 61673167)；湖南省自然科学基金项目(2019JJ50157).

责任编委: 关新平.

†通讯作者. E-mail: pancz@hnust.edu.cn.

法已经比较成熟,最具有代表性的是分区控制,即通过不同的控制方法完成摇起操作和平衡稳定[4]. 但是,由于平面Acrobot的动力学模型不含重力项,其平衡点从有限个位置扩展到运动空间中任意位置,而且平衡点附近的线性近似模型不满足可控条件,因此,分区的控制思想难以直接应用到平面Acrobot的控制中. Oriolo等[5]证明了平面Acrobot具有完全可积分的特性; Cao等[6]提出了基于轨迹特性的控制方法; 黄平等[7]提出了基于能量的控制方法,但是这些方法控制时间较长. 王亚午等[8]通过构造Lyapunov函数设计控制器,并将控制参数设计成一类非线性函数,减少了控制时间,但该方法主要针对无外部干扰的标称Acrobot模型,所设计控制器的鲁棒性不高.

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)是一种不依赖于被控对象模型的控制方法,具有超调小、抗干扰能力强等特点[9],因此,将ADRC技术引入到欠驱动机器人的控制中,可使系统具有更好的鲁棒性能. 例如, Hou等[10]研究了平面Pendubot的ADRC控制方法; 高强等[11]针对一级倒立摆设计了线性自抗扰控制器; 费蓝冰等[12]通过多通道自抗扰控制实现了欠驱动步行机器人的解耦控制; Shen等[13]针对无人水下航行器提出了一种改进自抗扰控制方法. 然而,关于平面Acrobot的ADRC研究却未见有文献报道.

本文针对受不确定性影响的平面Acrobot,提出一种线性自抗扰鲁棒镇定控制设计方法. 首先,借助驱动关节角度与被动关节角度之间的状态约束获取末端点位置与驱动杆角度的关系,提出通过控制驱动杆完成平面Acrobot位置控制的策略; 其次,为实现末端点的运动路径最短,在求解驱动杆角度的算法中加入最小角度位移的限制条件,并设计免疫算法寻求既符合位置要求又满足角度位移最短的最小期望解; 再次,设计线性自抗扰控制器,把求出的角度作为设定值输入,将模型不确定性、未知干扰等因素归结为总扰动,采用扩张状态观测器以进行实时估计并将系统补偿为串联积分器形式,进而构造误差反馈控制器以实现对总扰动的抑制; 最后,通过仿真实例验证所提出方法的有效性和优越性.

1 平面Acrobot模型

平面Acrobot的物理结构如图1所示. 对于第i连杆($i=1,2$), m_i为质量, L_i为长度, L_{c_i}为第i连杆的质心到第i关节的长度, J_i为转动惯量, q_1为第1连杆相对于坐标y轴方向的角度, q_2为第2连杆相对于第1连杆延长线方向的角度.

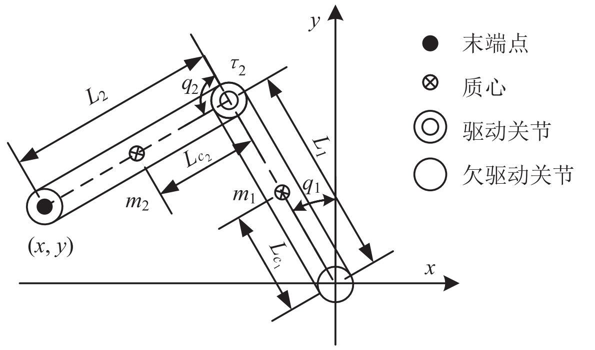


图1 平面Acrobot的物理结构

取$q=[q_1\ \ q_2]^{\mathrm{T}}, \dot{q}=\mathrm{d}q/\mathrm{d}t, \ddot{q}=\mathrm{d}\dot{q}/\mathrm{d}t$,则系统的动力学方程[8]为

$$M(q)\ddot{q}+H(q,\dot{q})=[0\ \ \tau_2]^{\mathrm{T}}. \tag{1}$$

其中: τ_2为实际驱动力,表示输入力矩τ_u与外部干扰w_2的总和; $M(q)$为正定对称的惯性矩阵; $H(q,\dot{q})$为科里奥利力与离心力的结合向量.

控制目标: 在平面Acrobot模型(1)的结构参数发生摄动及受外部干扰w_2影响时,设计控制律τ_u使机器人末端点从任意初始位置到达并镇定在目标位置.

2 基于免疫优化的期望角度求解

由图1所示的Acrobot物理结构及几何知识可知,末端点位置(x,y)与两杆角度$[q_1,q_2]^{\mathrm{T}}$之间存在如下变换关系:

$$\begin{cases} x=-L_1\sin q_1-L_2\sin(q_1+q_2), \\ y=L_1\cos q_1+L_2\cos(q_1+q_2). \end{cases} \tag{2}$$

因此,目标位置(x_d,y_d)可由任意一组满足式(2)的连杆角度$[q_{1d},q_{2d}]^{\mathrm{T}}$确定,控制两杆到达其中一组角度就能实现末端点的位置控制. 另外,由文献[8]的状态约束分析可知,驱动杆与欠驱动杆之间具有连带关系,即当控制驱动杆到达目标角度时,欠驱动杆也将被连带控制到目标角度,它们的函数关系表示为

$$q_1=f(q_2)= \\ A_1\Big[\arctan\Big(A_2\tan\Big(\frac{q_2}{2}\Big)\Big)+n\pi\Big]-\frac{q_2}{2}+c. \tag{3}$$

其中: n为整数, A_1、A_2与系统结构参数有关, c与初始状态有关,它们的具体形式见文献[8]. 将式(3)代入(2),得

$$\begin{cases} x=-L_1\sin[f(q_2)]-L_2\sin[f(q_2)+q_2], \\ y=L_1\cos[f(q_2)]+L_2\cos[f(q_2)+q_2]. \end{cases} \tag{4}$$

由此可见,通过目标位置(x_d,y_d)求解出期望角度q_{2d},并控制驱动杆角度到达q_{2d},即可完成末端点的位置控制.

定义末端点与目标位置之间距离的目标函数

$$J(q_2)=\sqrt{[x(q_2)-x_d]^2+[y(q_2)-y_d]^2}\leqslant e_{\max},\tag{5}$$

其中$e_{\max}$是q_2满足控制精度要求的最大允许误差. 因为q_{2d}具有多解,为了判别解的优劣,定义q_{2d}的角度位移为$\Delta q_{2d}=|q_{2d}-q_2(0)|$,其中$q_2(0)$为驱动杆的初始状态. 由于系统具有固定的运动轨迹[6], $\Delta q_{2\mathrm{d}}$越大,末端点移动的路径越长,因此,加入Δq_{2d}最小的限制条件以保证末端点的运动路径最短.

注意到, $J(q_2)$具有多解性和多峰值性,采用一般的优化算法通常会过早地收敛到解集中的某一个局部最优解. 为此,本文采用免疫算法对期望角度进行寻优,以较大的概率寻找到既满足控制精度又符合角度位移最短的最小期望角度. 免疫优化算法的流程如图2所示.

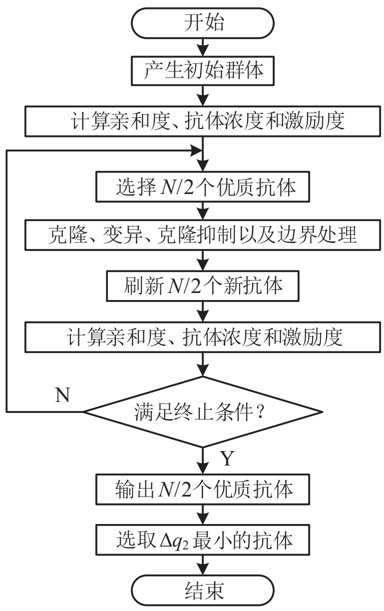


图 2　求解期望角度的免疫算法流程

求解期望角度的优化步骤如下.

step 1: 初始化免疫种群个体数目N,最大免疫代数G,变异概率p_m,领域范围初值δ_0,激励度系数α、β,相似度阈值δ_s,克隆个数N_c.

step 2: 记q_2为抗体ab_j,在解空间内随机产生一个初始种群,将式(5)作为亲和度函数计算出个体亲和度,再分别按如下规则计算出抗体间的亲和度、抗体浓度和激励度,并按激励度大小排序:

抗体j与抗体k间的亲和度计算方法为

$$\mathrm{aff}(\mathrm{ab}_j,\mathrm{ab}_k)=|\mathrm{ab}_j-\mathrm{ab}_k|.$$

取抗体间的相似度为

$$S(\mathrm{ab}_j,\mathrm{ab}_k)=\begin{cases}1,\ \mathrm{aff}(\mathrm{ab}_j,\mathrm{ab}_k)<\delta_s;\\0,\ \mathrm{aff}(\mathrm{ab}_j,\mathrm{ab}_k)\geqslant\delta_s.\end{cases}\tag{6}$$

抗体浓度评价规则为

$$\mathrm{den}(\mathrm{ab}_j)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}S(\mathrm{ab}_j,\mathrm{ab}_k).\tag{7}$$

抗体的激励度评价规则为

$$\mathrm{sim}(\mathrm{ab}_j)=\alpha\,\mathrm{aff}(\mathrm{ab}_j)-\beta\,\mathrm{den}(\mathrm{ab}_j),\tag{8}$$

其中α、β是激励度系数.

step 3: 取免疫种群激励度前$N/2$个优质抗体进行免疫操作,包括克隆、变异、边界处理和克隆抑制操作,并对种群进行激励度计算. 克隆算子对选定的抗体进行克隆复制,即抗体ab_j的N_c个克隆体组成的集合描述为$T_c(\mathrm{ab}_j)=\mathrm{clone}(\mathrm{ab}_j)$. 变异算子计算规则为

$$T_m(\mathrm{ab}_{j,m})=\begin{cases}\mathrm{ab}_{j,m},\ \mathrm{rand}\geqslant p_m;\\\mathrm{ab}_{j,m}+\dfrac{\delta_0}{G}(\mathrm{rand}-0.5),\ \mathrm{othewise}.\end{cases}$$

其中: $\mathrm{ab}_{j,m}$是抗体ab_j的第m个克隆体; rand是(0, 1)范围内的随机数; p_{m}是变异概率; δ_0/G是变异的领域范围,随免疫代数增长而自适应调整.

边界处理条件为:若变异后产生不在$[-\delta_0,\delta_0]$范围内的抗体,则用可行域中随机产生的参数替代. 克隆抑制操作对变异后的克隆体进行再选择,保留亲和度最高的变异个体.

step 4: 随机生成$N/2$个新抗体,并计算抗体间的亲和度、抗体浓度和抗体的激励度(方法与step 2相同),用新抗体替换掉原种群中激励度较低的$N/2$个抗体,再把所有抗体按激励度排序.

step 5: 若满足最大免疫代数,则结束搜索过程;否则,转到step 3.

step 6: 输出最后一代中前$N/2$个优质抗体,将它们按Δq_{2d}的大小排序,最后输出Δq_{2d}最小的期望解q_{2d},退出程序.

3　线性自抗扰控制器设计

下面设计线性自抗扰控制器(linear ADRC, LADRC)以实现平面Acrobot在目标位置的稳定控制.

平面Acrobot的LADRC结构框图如图3所示.

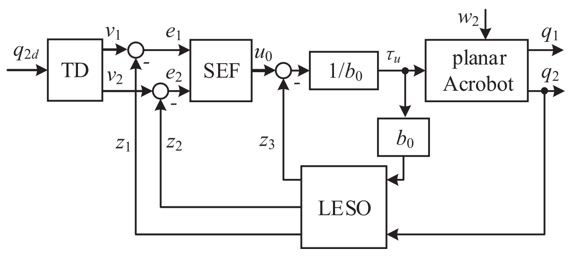


图 3　平面Acrobot的LADRC结构框图

图3中: TD (tracking differentiator) 是跟踪微分器, LESO (linear extended state observer) 是线性扩张状态观测器, SEF (state error feedback) 是状态误差反馈. TD通过设定值安排过渡过程 v_1, 并提取微分信号 v_2; LESO根据Acrobot的输入和输出提取状态估计值 z_1、z_2 以及总扰动估计值 z_3; SEF取状态误差 $e_1 = v_1 - z_1$ 和 $e_2 = v_2 - z_2$, 并将它们线性组合输出 u_0; 最后用 z_3 补偿 u_0 的方式得到控制力矩 τ_u.

对于平面Acrobot模型(1), 令 $[\theta_1, \theta_2]^{\mathrm{T}} = [q_2, \dot{q}_2]^{\mathrm{T}}$, 则驱动杆子系统可描述为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \theta_2, \\ \dot{\theta}_2 = F(\theta_1, \theta_2) + \dfrac{M_{11}}{M_{11}M_{22} - M_{12}^2}\tau_2. \end{cases} \tag{9}$$

其中

$$F(\theta_1, \theta_2) = \frac{a_3 \sin\theta_1 M_{12}(M_{12} - M_{11})}{M_{11}(M_{11}M_{22} - M_{12}^2)}\theta_2^2,$$

a_3 是系统结构参数; M_{11}、M_{12}、M_{22} 是惯性矩阵 M 的各元素, 它们的表达式详见文献[8].

首先, TD采用无超调形式的线性跟踪微分器

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2, \\ \dot{v}_2 = -r^2(v_1 - q_{2d}) - 2rv_2, \end{cases} \tag{10}$$

其中 r 是决定跟踪速度的速度因子, 可由系统的调节时间和承受能力确定.

其次, 把作用于平面Acrobot的总扰动扩展为系统的状态变量 θ_3, 并记为

$$\theta_3 = \frac{a_3 \sin\theta_1 M_{12}(M_{12} - M_{11})}{M_{11}(M_{11}M_{22} - M_{12}^2)}\theta_2^2 - b_0\tau_u + \frac{M_{11}}{M_{11}M_{22} - M_{12}^2}(w_2 + \tau_u) + \delta. \tag{11}$$

其中: δ 是由模型参数发生摄动而引起的不确定非线性项; b_0 是补偿因子且 $b_0 \approx M_{11}/(M_{11}M_{22} - M_{12}^2)$. 设计如下LESO对 θ_1、θ_2 以及 θ_3 进行实时估计:

$$\begin{cases} e = z_1 - x_2, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e, \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}e + b_0 u, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}e, \end{cases} \tag{12}$$

其中 β_{01}、β_{02}、β_{03} 是LESO增益. 为保证LESO的稳定, 将其特征方程按带宽 ω_o 配置为

$$s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03} = (s + \omega_o)^3. \tag{13}$$

再次, 采用状态误差的线性组合构造SEF, 即

$$u_0 = -\beta_1 e_1 - \beta_2 e_2, \tag{14}$$

其中 β_1、β_2 是SEF增益. 为使系统能够获得理想的动态性能和闭环稳定性, 将SEF的特征方程按带宽 ω_c 配置为

$$s^2 + \beta_1 s + \beta_2 = (s + \omega_c)^2. \tag{15}$$

带宽参数 ω_o 与 ω_c 的取值对系统的稳定性、鲁棒性等具有重要的影响[14]. 它们的优化思路为: 调试出合适初值 ω_o, 选择 ω_c 使 $\omega_o \approx (3\sim5)\omega_c$; 缓慢增加 ω_o 与 ω_c, 直到出现噪声或者震荡; 然后分别增加或者减小 ω_o 和 ω_c, 使其满足系统指标要求. 此外, ω_o 和 ω_c 也与目标值 q_{2d} 的大小有关: 当 q_{2d} 较小时, 两个带宽应适当增大以提高响应速度; 当 q_{2d} 较大时, 两个带宽应适当减小以避免控制力矩太大.

最后, LADRC控制器设计为

$$\tau_u = \frac{u_0 - z_3}{b_0}. \tag{16}$$

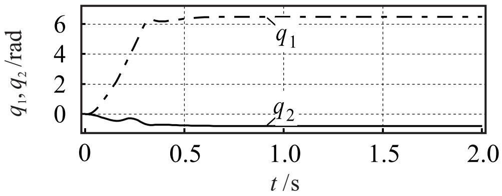
当LESO准确估计总扰动 θ_3 时, 有 $z_3 \approx \theta_3$, 控制律(16)能使子系统(9)变成单位反馈双积分系统. 若观测器和控制律是双积分稳定系统, 则线性自抗扰控制下的闭环系统为有界输入有界输出稳定系统[15]. 再由系统状态约束关系可知, 若子系统(9)稳定, 则欠驱动杆稳定, 故平面Acrobot系统能保持稳定.

4 仿真结果与分析

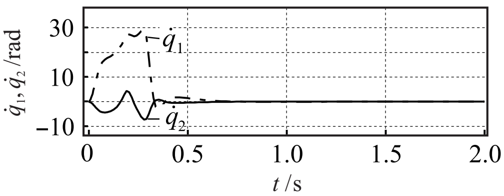
在Matlab/Simulink环境下对控制方法进行仿真实验. 取平面Acrobot的参数[9]为: $m_1 = 2\,\mathrm{kg}$, $m_2 = 1\,\mathrm{kg}$, $L_1 = 1\,\mathrm{m}$, $L_2 = 1\,\mathrm{m}$, $L_{c_1} = 0.5\,\mathrm{m}$, $L_{c_2} = 0.5\,\mathrm{m}$, $J_1 = 0.167\,\mathrm{kg\cdot m^2}$, $J_2 = 0.083\,\mathrm{kg\cdot m^2}$. 令系统的初始状态为 $[q_1(0), q_2(0)]^{\mathrm{T}} = [0,0]^{\mathrm{T}}$, $[\dot{q}_1(0), \dot{q}_2(0)]^{\mathrm{T}} = [0,0]^{\mathrm{T}}$; 末端点的初始位置为 $(x_0, y_0) = (0, 2)$, 设定目标位置为 $(x_d, y_d) = (1.25, 1.55)$.

在免疫算法中, 取种群个体数目 $N = 50$, 最大免疫代数 $G = 500$, 变异概率 $p_{\mathrm{m}} = 0.7$, 领域范围初值 $\delta_0 = 400\,\pi$, 激励度系数 $\alpha = 2$, $\beta = 1$, 相似度阈值 $\delta_s = 0.2$, 克隆个数 $N_c = 5$, 最大允许误差 $e_{\max} = 0.01$. 运行免疫算法, 在多个极值点附近寻找到 Δq_{2d} 最小时对应驱动杆期望角度 $q_{2d} = 6.481\,\mathrm{rad}$. 最后, 计算得到 $[q_{1d}, q_{2d}]^{\mathrm{T}} = [-0.778, 6.481]^{\mathrm{T}}$. 在式(10)、(11)、(13)、(15)中, 取LADRC控制参数为: $b_0 = 8$, $r = 10$, $\omega_o = 60$, $\omega_c = 15$. 对Acrobot在标称模型、受模型不确定性和干扰影响等情况进行仿真.

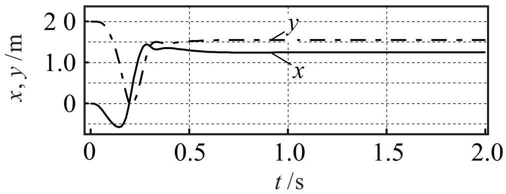
1) 标称模型. 仿真结果如图4所示. 其中: 图4(a)是两杆角度变化曲线, 图4(b)是两杆角速度变化曲线, 图4(c)是末端点位置变化曲线. 从图4(b)可以看出, 系统在0.8 s左右稳定在目标位置, 说明本文方法实现了Acrobot稳定的快速性.



(a) 两杆角度变化曲线



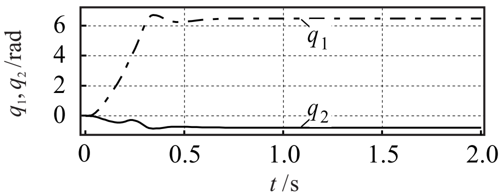
(b) 两杆速度变化曲线



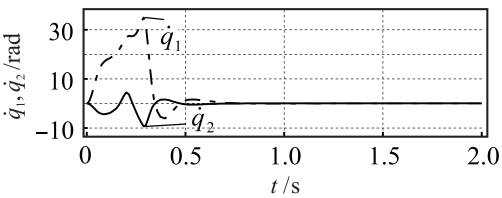
(c) 末端点位置变化曲线

图 4　标称模型情况下的仿真结果

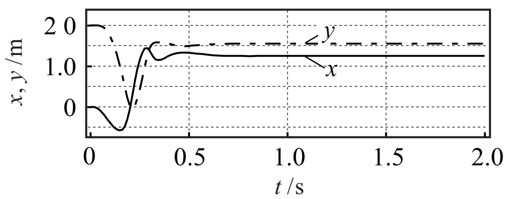
2) 模型不确定性. 当模型发生+10%的参数摄动时,将所提出方法应用到Acrobot的控制中,仿真结果如图5所示. 从图5中可以看出, Acrobot的模型参数虽然发生了摄动,但同样能够在0.8 s左右稳定在目标位置,表明该方法对模型不确定性具有较好的鲁棒性.



(a) 两杆角度变化曲线



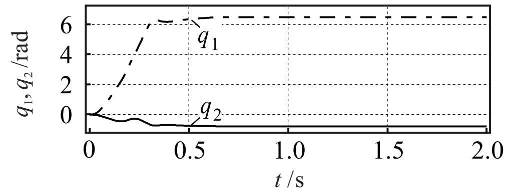
(b) 两杆速度变化曲线



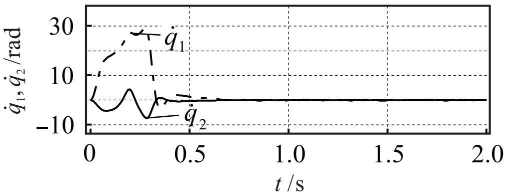
(c) 末端点位置变化曲线

图 5　加入+10%不确定性时的仿真结果

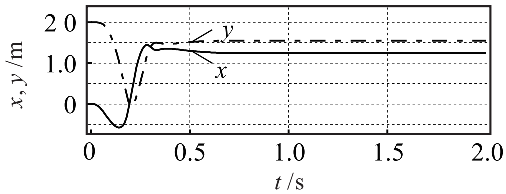
3) 外加干扰. 取正弦干扰$w_2 = 0.5\cos(40t+1)$作用于平面Acrobot,仿真结果如图6所示. 可以看到,虽然有外部干扰的影响,但平面Acrobot仍在1 s内稳定在目标位置,实现了鲁棒镇定.



(a) 两杆角度变化曲线



(b) 两杆速度变化曲线



(c) 末端点位置变化曲线

图 6　加入外部干扰 w_2 时的仿真结果

此外,当同时加入+10%的模型参数摄动和外部干扰$w_2 = 0.5\cos(40t+1)$时,仿真结果与图6相似,平面Acrobot同样在1 s内镇定在目标位置.

5　结　论

本文为平面Acrobot提出了一种基于免疫优化的驱动杆角度求解算法,并设计了LADRC控制器,实现了机器人末端点从任意初始位置到达并镇定在给定目标位置. 所提出的优化算法能够求解出目标位置所对应驱动杆角度的多个解,并选取满足最小角度位移的期望解以缩短末端点的运动路径. 同时,所设计的LADRC鲁棒控制器具有响应快、不依赖系统模型及抗干扰能力强等特点,实现了平面Acrobot在受不确定性影响下的镇定控制.

值得说明的是,本文根据驱动杆子系统设计了LADRC控制器,并根据双积分稳定性和有界稳定性对控制系统进行了分析. 但是,如何从理论上严谨地证明控制系统的稳定性以及搭建实物平台并对控制方法进行实验验证,是下一步需要重点研究的内容.

参考文献(References)

[1] Zhang A, Yang C, Gong S, et al. Nonlinear stabilizing control of underactuated inertia wheel pendulum based on coordinate transformation and time-reverse strategy[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 84(4): 2467-2476.

[2] Tong Y, Ning S, He C, et al. Motion trajectory-based

transportation control for 3-D boom cranes: Analysis, design, and experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 3636-3646.

[3] Uchiyama N, Ouyang H, Sano S. Simple rotary crane dynamics modeling and open-loop control for residual load sway suppression by only horizontal boom motion[J]. Mechatronics, 2013, 23(8): 1223-1236.

[4] Lai X Z, She J H, Yang S X, et al. Comprehensive unified control strategy for underactuated two-link manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2009, 39(2): 389-398.

[5] Oriolo G, Nakamura Y. Control of mechanical systems with second-order nonholonomic constraints: Underactuated manipulators[C]. Proceedings of 30th IEEE Conference on Decision and Control. Brighton, 1991: 2398-2403.

[6] Cao S, Lai X, Wu M. Motion control method of planar Acrobot based on trajectory characteristics[C]. Proceeding of the 31st Chinese Control Conference. Hefei, 2012: 4910-4915.

[7] 黄平, 戈新生. 基于能量法的平面Acrobot的控制稳定性[J]. 北京信息科技大学学报: 自然科学版, 2017, 32(4): 18-22.
(Huang P, Ge X S. Planar Acrobot control stability based on energy method[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University: Natural Science Edition, 2017, 32(4): 18-22.)

[8] 王亚午, 赖旭芝, 吴敏. 基于可变设计参数的平面Acrobot位置快速控制方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(9): 110-118.
(Wang Y W, Lai X Z, Wu M. Rapid position control approach based on variable design parameter for planar Acrobot[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(9): 110-118.)

[9] Han J Q. From PID to Active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.

[10] Hou Z G, Tan M, Han J Q. A non-smooth design method for underactuated mechanism control[C]. Proceedings of the 19th Chinese Control Conference. Hong Kong, 2000: 575-578.

[11] 高强, 陈莎莎, 李毅. 线性自抗扰控制在倒立摆系统的实现[J]. 电气传动, 2014, 44(10): 49-53.
(Gao Q, Chen S S, Li Y. Application of LADRC on inverted pendulum system[J]. Electrical Drive, 2014, 44(10): 49-53.)

[12] 费蓝冰, 楼飞, 缪国斌. 欠驱动步行机器人自抗扰控制系统的设计与分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2016, 37(5): 541-547.
(Fei L B, Lou F, Miu G B. Design and analysis of active disturbance rejection control system for underactuation walking robot[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2016, 37(5): 541-547.)

[13] Shen Y X, Shao K Y, Ren W J, et al. Diving control of autonomous underwater vehicle based on improved active disturbance rejection control approach[J]. Neurocomputing, 2016, 173(3): 1377-1385.

[14] Gao Z. Active disturbance rejection control: A paradigm shift in feedback control system design[C]. Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minneapolis, 2006: 2399-2405.

[15] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报. 2013, 39(5): 574-580.
(Chen Z Q, Sun M W, Yang R G. On the stability of linear active disturbance rejection control[J]. Acta Automatioca Sinica. 2013, 39(5): 574-580.)

作者简介

潘昌忠(1984−), 男, 副教授, 博士, 从事智能系统与机器人控制、非线性与鲁棒控制等研究, E-mail: pancz@hnust.edu.cn;

罗晶(1996−), 男, 硕士生, 从事非线性控制和自抗扰控制的研究, E-mail: 892899728@qq.com;

周兰(1975−), 女, 教授, 博士, 从事非线性控制和重复控制等研究, E-mail: zhoulan@hnust.edu.cn;

熊培银(1979−), 男, 讲师, 博士, 从事非线性系统控制的研究, E-mail: 29219055@qq.com.

(责任编辑: 李君玲)