

控制与决策

Control and Decision

基于智能优化算法的Pendubot轨迹规划与控制方法设计

王乐君, 王亚午, 赖旭芝, 吴敏

引用本文:

王乐君, 王亚午, 赖旭芝, 等. 基于智能优化算法的Pendubot轨迹规划与控制方法设计[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1085–1090.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0899>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四旋翼无人机轨迹稳定跟踪控制

Trajectory stable tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2020, 35(2): 349–356 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0639>

四旋翼无人机轨迹稳定跟踪控制

Trajectory stable tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2020, 35(2): 349–356 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0639>

离散时变多智能体系统有限时间一致性迭代学习控制

Finite-time consensus iterative learning control of discrete time-varying multi-agent systems

控制与决策. 2019, 34(4): 891–896 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1362>

基于改进QPSO的两轮移动机器人区间二型模糊逻辑控制

Interval type-2 fuzzy logic control for a two-wheeled mobile robot based on improved QPSO

控制与决策. 2019, 34(2): 261–268 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0702>

考虑参数不确定性的移动机器人轨迹跟踪控制

Trajectory tracking control of mobile robot with parameter uncertainties

控制与决策. 2019, 34(1): 81–88 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0997>

一种基于时变干扰观测器的高超声速飞行器容错控制策略设计

A FTC scheme for hypersonic vehicle based on adaptive disturbance observer

控制与决策. 2018, 33(10): 1893–1900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0645>

增强耦合的TORA系统镇定控制方法设计

Enhanced coupling stabilization controller design for TORA systems

控制与决策. 2015(6): 1039–1043 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0631>

基于引导角的轮式移动机器人轨迹跟踪控制

Guidance angle based trajectory tracking for wheeled mobile robots

控制与决策. 2015(4): 635–639 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0158>

基于智能优化算法的Pendubot轨迹规划与控制方法设计

王乐君, 王亚午, 赖旭芝[†], 吴敏

- (1. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 武汉 430074;
2. 复杂系统先进控制与智能化湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 以垂直Pendubot为研究对象,提出一种基于智能优化算法的轨迹规划与控制方法,以解决Pendubot控制过程中难以从摇起区过渡至平衡区的问题.为Pendubot的驱动连杆规划一条从初始角度到中间角度的正向轨迹和一条从中间角度到目标角度的反向轨迹.欠驱动连杆在系统耦合关系作用下进行运动,对应的Pendubot末端点也运动至相应位置.通过遗传算法优化轨迹参数,将正向和反向轨迹拼合为一条由初始角度到目标角度的驱动连杆轨迹的同时,对应的Pendubot末端点轨迹拼合为一条由垂直向下平衡位置到垂直向上平衡位置的完整轨迹,然后设计跟踪控制器跟踪优化后的驱动连杆轨迹至目标角度,由于耦合关系的存在,Pendubot末端点也运动至垂直向上平衡位置.由于Pendubot受重力作用,其末端点很难长时间稳定在垂直向上平衡位置,故设计镇定控制器,实现Pendubot末端点在垂直向上平衡位置的镇定控制.最后通过仿真实验验证所提出方法的有效性,并通过对比说明所提出方法在奇异点规避、控制器设计和控制效果方面的优势.

关键词: Pendubot; 轨迹规划; 遗传算法; 跟踪控制器; 镇定控制器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Trajectory planning and control method for Ppendubot based on intelligent optimization algorithm

WANG Le-jun, WANG Ya-wu, LAI Xu-zhi[†], WU Min

- (1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan 430074, China)

Abstract: Taking the Pendubot moving in vertical plane motion as the research object, a trajectory planning and control method based on the intelligent optimization algorithm is proposed to solve the problem that it is difficult to transit from swing-up area to balance area in the control process. Firstly, a forward trajectory from the initial angle to the middle angle and a reverse trajectory from the middle angle to the target angle are planned for the Pendubot. The unactuated link moves under the action of system coupling relation, and the corresponding end point of the Pendubot moves to the relevant position. The genetic algorithm is used to optimize the trajectory parameters, so that the forward and reverse trajectories are combined into a driving link trajectory from the initial angle to the target angle, and the corresponding Pendubot terminal trajectory moves from the vertical downward balance position to the vertical upward balance position. Then, a tracking controller is designed to make the driving link move to the target angle along the optimized trajectory of the driving link, the end point of Pendubot also moves to the vertical upward balance position in virtue of the existence of coupling relationship. Due to the influence of gravity, it is difficult for the Pendubot to stabilize the end point at the vertical upward position for a long time. Thus, the stabilization controller is designed to keep the end point stable at the vertical upward balance position. Finally, the effectiveness of the proposed method is proved by simulation experiments, the advantages of this method in singularity avoidance, controller design and control effect are illustrated by comparison.

Keywords: Pendubot; trajectory planning; genetic algorithm; tracking controller; stabilization controller

0 引言

欠驱动系统^[1]是控制输入维数小于自由度维数的一类系统,在控制领域较为常见.欠驱动系统由于

成本低、能耗低的特点受到越来越广泛的关注,已成为机械系统领域研究的新热点.然而,部分驱动器的缺失给此类系统的控制带来很大的挑战.欠驱动系

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-09-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773353); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2015CFA010); 高等学校学科创新引智计划项目(B17040).

责任编辑: 王燕舞.

[†]通讯作者. E-mail: laixz@cug.edu.cn.

统在减少执行元件个数、减轻系统重量以及降低成本方面具有很大优势^[2],对欠驱动系统的研究能有效地推动非线性、轨迹跟踪、镇定等问题的研究,因此其研究具有重要的理论意义和实用价值。

根据是否受重力作用,欠驱动系统分为垂直欠驱动系统^[3-5]和平面欠驱动系统^[6-8]。受重力影响的Pendubot是典型的垂直欠驱动系统,在运动区域内只有有限个平衡点,控制目标通常将其末端从垂直向下位置移动,并稳定在垂直向上位置^[9-10]。其次,该系统属于二阶非完整系统^[11],不满足Brockett必要条件^[12],很难使用光滑的控制器实现系统的位置控制。国内外学者普遍采用分区方法将运动区间分为摇起区和平衡区,分别设计控制器实现各区间内的控制要求^[13]。但是,分区方法对于摇起区和平衡区的范围并不统一,当区域划分不合适时,Pendubot很难从摇起区平稳过渡至平衡区。在控制器切换时力矩突变较为明显,容易造成系统的不稳定。部分学者利用智能优化算法调整欠驱动系统的能量、姿态以及保证分区控制中各控制器的切换平滑性^[14]。文献[15]通过智能优化方法设计连续控制器实现平面PAA系统的位置控制,克服了机械臂在几何可达范围内的某些位置不能连续控制的缺点。也有学者利用轨迹规划方法实现了欠驱动系统的控制目标^[16-19]。然而,轨迹规划方法在垂直欠驱动机械臂上的应用却很少涉及。

鉴于上述分析,本文针对Pendubot提出一种基于遗传算法的轨迹规划与控制方法。首先,为驱动连杆设计正向和反向轨迹,并借助遗传算法优化轨迹参数,使正向和反向轨迹拼合的同时,对应的Pendubot末端点轨迹拼合为一条由垂直向下平衡位置到垂直向上平衡位置的完整轨迹;然后,设计滑模控制器跟踪优化后的驱动连杆轨迹,并通过镇定控制器设计将系统末端点稳定在垂直向上平衡位置;最后,通过仿真实验表明所提出方法的有效性,并对比说明所提出方法的优越性。

1 Pendubot 动力学模型

图1为Pendubot模型示意图。图中: m_i 、 L_i 、 J_i 分别为第*i*连杆的质量、长度和转动惯量; l_i 为第*i*连杆质心到前一关节的长度, $i = 1, 2$; τ_1 为力矩。

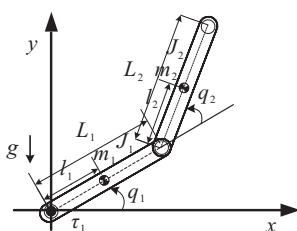


图1 Pendubot 模型示意图

由欧拉-拉格朗日方程可得Pendubot的动力学模型为

$$M_{11}\ddot{q}_1 + M_{12}\ddot{q}_2 + H_{11}\dot{q}_1 + H_{12}\dot{q}_2 + G_1 = \tau_1, \quad (1)$$

$$M_{21}\ddot{q}_1 + M_{22}\ddot{q}_2 + H_{21}\dot{q}_1 + H_{22}\dot{q}_2 + G_2 = 0. \quad (2)$$

其中

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 + a_2 + 2a_3 \cos q_2 & a_2 + a_3 \cos q_2 \\ a_2 + a_3 \cos q_2 & a_2 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_3\dot{q}_2 \sin q_2 & -a_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ a_3\dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 g \cos q_1 + a_5 g \cos(q_1 + q_2) \\ a_5 g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$g = 9.8 \text{ N/kg}$; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 为模型参数,表达式见文献[20]。

式(1)和(2)可改写为

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = F_1 + b_1 \tau_1, \\ \ddot{q}_2 = F_2 + b_2 \tau_1. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$F_1 = \frac{-M_{22}(H_{11}\dot{q}_1 + H_{12}\dot{q}_2) + M_{12}(H_{21}\dot{q}_1 + H_{22}\dot{q}_2)}{M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}}, \quad (7)$$

$$F_2 = \frac{M_{21}(H_{11}\dot{q}_1 + H_{12}\dot{q}_2) - M_{11}(H_{21}\dot{q}_1 + H_{22}\dot{q}_2)}{M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}}, \quad (8)$$

$$b_1 = \frac{M_{22}}{M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}}, \quad (9)$$

$$b_2 = \frac{-M_{21}}{M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}}. \quad (10)$$

2 轨迹规划

由于Pendubot的欠驱动特性,只能为驱动连杆设计轨迹,无法直接为欠驱动连杆进行轨迹规划。驱动连杆沿设计的轨迹运动时,利用系统连杆间的耦合关系,实现对欠驱动连杆的间接控制。

2.1 轨迹设计

系统控制目标是将Pendubot末端点由垂直向下平衡位置移动并最终稳定在垂直向上平衡位置。由控制目标可知,驱动连杆的初始角度和目标角度分别为 $q_{10} = -\pi/2$, $q_{1d} = \pi/2$,因此分别从驱动连杆的初始角度和目标角度出发进行轨迹规划。

为驱动连杆设计从初始角度 q_{10} 到中间角度的

正向轨迹 Γ_1 , 有

$$\Gamma_1 : \begin{cases} \vec{q}_1 = q_{10} + (q_{1m} - q_{10}) \left(k_1 t - \frac{\sin(2\pi k_1 t)}{2\pi} \right), \\ \dot{\vec{q}}_1 = k_1 (q_{1m} - q_{10}) (1 - \cos(2\pi k_1 t)), \\ \ddot{\vec{q}}_1 = 2\pi k_1^2 (q_{1m} - q_{10}) \sin(2\pi k_1 t). \end{cases} \quad (11)$$

其中: $q_{10} = -\pi/2$ 为驱动连杆的初始角度, q_{1m} 为驱动连杆的中间角度, k_1 为轨迹参数.

设计从中间角度到目标角度的反向轨迹 Γ_2 , 有

$$\Gamma_2 : \begin{cases} \overleftarrow{q}_1 = q_{1m} + (q_{1d} - q_{1m}) \left(k_2 t - \frac{\sin(2\pi k_2 t)}{2\pi} \right), \\ \overleftarrow{\dot{q}}_1 = k_2 (q_{1d} - q_{1m}) (1 - \cos(2\pi k_2 t)), \\ \overleftarrow{\ddot{q}}_1 = 2\pi k_2^2 (q_{1d} - q_{1m}) \sin(2\pi k_2 t). \end{cases} \quad (12)$$

其中: $q_{1d} = \pi/2$ 为目标角度, k_2 为轨迹参数.

当 q_{1m} 确定后, Γ_1 和 Γ_2 拼合为一条由初始角度 q_{10} 到目标角度 q_{1d} 的完整轨迹, 记为 Γ . 图2为轨迹 Γ 的示意图.

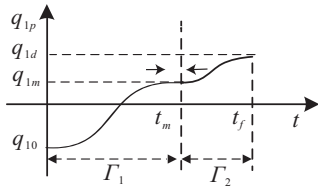


图2 轨迹 Γ 示意图

轨迹 Γ 到达中间角度的时刻和末端时刻分别为

$$t_m = \frac{1}{k_1}, \quad t_f = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}. \quad (13)$$

驱动连杆沿 Γ_1 和 Γ_2 运动时, 欠驱动连杆在耦合关系作用下以一定速度运动至相应角度. 记在 t_m 时刻 Γ_1 和 Γ_2 所对应的欠驱动连杆的角度、角速度分别为 \vec{q}_{2m} 、 $\vec{\dot{q}}_{2m}$ 和 \overleftarrow{q}_{2m} 、 $\overleftarrow{\dot{q}}_{2m}$. 当 $\vec{q}_{2m} = \overleftarrow{q}_{2m}$, $\vec{\dot{q}}_{2m} = \overleftarrow{\dot{q}}_{2m}$ (n_1 为整数) 时, Γ_1 与 Γ_2 对应的 Pendubot 末端点轨迹拼合为一条从垂直向下平衡位置到垂直向上平衡位置的完整运动轨迹.

2.2 轨迹参数优化

为使 Pendubot 末端点运动轨迹拼合为一条完整轨迹, 需选取合适的参数 q_{1m} 、 k_1 、 k_2 . 目前大多通过试凑方法选择参数, 不易获得理想的运动轨迹. 本文引入遗传算法求解一组较优的轨迹参数 q_{1m} 、 k_1 、 k_2 , 解决欠驱动机械臂轨迹规划中参数难选择的问题.

将评价函数设计为

$$f = abs(\vec{q}_{2m} - \overleftarrow{q}_{2m} - 2n_1\pi) + abs(\vec{\dot{q}}_{2m} - \overleftarrow{\dot{q}}_{2m}). \quad (14)$$

遗传算法的具体执行流程如下.

step 1: 设定基本参数: 种群数目 N , 遗传代数 gen ,

最大遗传代数 G , 变量数 N_{var} , 参数初始范围, 选择因子 n_s , 交叉因子 n_c , 变异因子 n_m .

step 2: 初始化参数 (q_{1m}, k_1, k_2) , 将 (q_{1m}, k_1, k_2) 代入设计的轨迹 (11) 和 (12) 中, 结合系统动力学模型 (1) 和 (2), 计算 \vec{q}_{2m} 、 $\vec{\dot{q}}_{2m}$ 和 \overleftarrow{q}_{2m} 、 $\overleftarrow{\dot{q}}_{2m}$.

step 3: 将 \vec{q}_{2m} 、 $\vec{\dot{q}}_{2m}$ 和 \overleftarrow{q}_{2m} 、 $\overleftarrow{\dot{q}}_{2m}$ 代入式 (14), 计算评价函数 f .

step 4: 如果 $f < \delta$ (δ 为正数), 则 $(q_{1m}, k_1, k_2) = (q_{1m}, k_1, k_2)|_{gen}$, 算法结束; 否则, 经过变异、交叉和选择操作, 更新 (q_{1m}, k_1, k_2) , $gen = gen + 1$, 转至 step 2.

将优化的参数 q_{1m} 、 k_1 、 k_2 代入式 (11) 和 (12) 中, Γ_1 和 Γ_2 拼合为一条完整的驱动连杆轨迹 Γ . 此时, 末端点运动轨迹也拼合为一条垂直向下平衡位置到垂直向上平衡位置的轨迹, 记为 Γ_y . 当驱动连杆在跟踪控制器作用下沿 Γ 由初始角度 q_{10} 运动到目标角度 q_{1d} 时, 欠驱动连杆在系统耦合关系作用下运动至相应角度. 根据驱动连杆和欠驱动连杆角度的变化, 对应的 Pendubot 末端点沿着轨迹 Γ_y 由垂直向下平衡位置运动至垂直向上平衡位置.

3 控制器设计

本节通过设计相应控制器, 实现 Pendubot 末端点从垂直向下平衡位置运动并稳定至垂直向上平衡位置的控制目标.

3.1 跟踪控制器设计

设计滑模面 s_1 为

$$s_1 = (\dot{q}_1 - \dot{q}_{1p}) + c_0(q_1 - q_{1p}). \quad (15)$$

其中: c_0 为常数, q_{1p} 和 \dot{q}_{1p} 为轨迹 Γ 对应的驱动连杆角度和角速度. 对 s_1 求导, 得到

$$\dot{s}_1 = (F_1 + b_1\tau_1 - \ddot{q}_{1p}) + c_0(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1p}). \quad (16)$$

设计跟踪控制器 τ_{1t} 为

$$\tau_{1t} = -\frac{F_1 - \ddot{q}_{1p} + c_0(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1p}) + c_1 s_1 + \varepsilon_1 \text{sign}(s_1)}{b_1}, \quad (17)$$

其中 c_1 、 ε_1 为正数. 构造李雅普诺夫函数 V_1 为

$$V_1 = \frac{1}{2} s_1^2. \quad (18)$$

对 V_1 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_1 \dot{s}_1 = s_1(-c_1 s_1 - \varepsilon_1 \text{sign}(s_1)) = \\ &= -c_1 s_1^2 - \varepsilon_1 |s_1| \leq 0. \end{aligned} \quad (19)$$

令 $\dot{V}_1 = 0$, 则 $s_1 \equiv 0$. 根据 LaSalle 不变集原理, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s_1 \rightarrow 0$, 驱动连杆跟踪轨迹 Γ 运动到 q_{1d} . 由第2节分析可知, 当驱动连杆沿优化后的轨迹 Γ 由初始角度 q_{10} 运动到目标角度 q_{1d} 时, 对应的 Pendubot

末端点沿着轨迹 Γ_y 由垂直向下位置运动至垂直向上平衡位置.

3.2 镇定控制器设计

受重力影响, Pendubot 末端点不能在垂直向上平衡位置保持长时间稳定, 因此, 设计镇定控制器使其维持在垂直向上平衡位置. 记 $e_1 = q_1 - \pi/2, e_2 = q_2$, 则 $\dot{e}_1 = \dot{q}_1, \dot{e}_2 = \dot{q}_2, \ddot{e}_1 = \ddot{q}_1, \ddot{e}_2 = \ddot{q}_2$.

设计滑模面 s_{21}, s_{22} 为

$$\begin{cases} s_{21} = \gamma_1 e_1 + \dot{e}_1, \\ s_{22} = \gamma_2 e_2 + \dot{e}_2, \end{cases} \quad (20)$$

其中 γ_1, γ_2 为大于0的常数.

设计二级滑模面 s_2 为

$$s_2 = \beta s_{21} + \alpha s_{22}, \quad (21)$$

其中 $\alpha > 0, \beta > 0$. 结合式(20)和(21), 可展开为

$$s_2 = d_1 \dot{e}_1 + d_2 e_1 + d_3 \dot{e}_2 + d_4 e_2. \quad (22)$$

其中: $d_1 = \beta, d_2 = \beta\gamma_1, d_3 = \alpha, d_4 = \alpha\gamma_2$. 对 s_2 求导, 可得

$$\dot{s}_2 = d_1(F_1 + b_1\tau_1) + d_2\dot{e}_1 + d_3(F_2 + b_2\tau_1) + d_4\dot{e}_2. \quad (23)$$

设计镇定控制器 τ_{1s} 为

$$\tau_{1s} = -\frac{1}{d_1 b_1 + d_3 b_2} (d_1 F_1 + d_3 F_2 + d_2 \dot{e}_1 + d_4 \dot{e}_2 + \varepsilon_2 \text{sign}(s_2) + c_2 s_2). \quad (24)$$

其中 c_2, ε_2 为正数. 同样地, 构造李雅普诺夫函数

$$V_2 = \frac{1}{2} s_2^2. \quad (25)$$

对 V_2 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= s_2 \dot{s}_2 = s_2 (-c_2 s_2 - \varepsilon_2 \text{sign}(s_2)) = \\ &-c_2 s_2^2 - \varepsilon_2 |s_2| \leq 0. \end{aligned} \quad (26)$$

当 $\dot{V}_2 = 0, s_2 \equiv 0$, 即 $t \rightarrow \infty$ 时, $s_2 \rightarrow 0$. 虽然在 $t \rightarrow \infty$ 时, 滑模跟踪控制器可以实现 $s_2 \rightarrow 0$, 但却无法保证 $e_1 \rightarrow 0, \dot{e}_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, \dot{e}_2 \rightarrow 0$.

当控制器(24)参数满足如下关系^[21]时:

$$\begin{cases} d_1 = 1, d_3 = \frac{\lambda_2 a_2 + a_5}{a_5 + \lambda_2(a_2 + a_3)}, \\ d_4 = -\frac{(\lambda_1 a_5 + \lambda_3 a_2)[a_2 - d_3(a_2 + a_3)]}{a_3 a_5}, \\ d_2 = d_4 - \frac{a_3[a_2 - d_3(a_2 + a_3)]}{a_5}, \end{cases} \quad (27)$$

可使 $e_1 \rightarrow 0, \dot{e}_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, \dot{e}_2 \rightarrow 0$, 其中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为通过极点配置方法得到的闭环特征方程的各项系数. 结合系统模型参数, 由式(27)可求出镇定控制器参数 d_1, d_2, d_3, d_4 .

通过上述分析, 整个控制过程可分为跟踪控制阶段和镇定控制阶段. 当 $0 \leq t < t_f$ 时, $\tau_1 = \tau_{1t}$, 在跟踪控制器作用下 Pendubot 末端点运动到垂直向上平衡位置; 当 $t > t_f$ 时, 系统控制切换为镇定控制, $\tau_1 = \tau_{1s}$, 从而保证 Pendubot 末端点稳定在垂直向上平衡位置. 控制过程如图3所示.

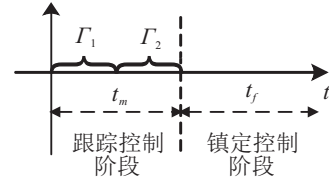


图3 Pendubot控制过程

4 仿真实验及分析

利用 Matlab/Simulink 仿真平台, 选择两组不同模型参数进行仿真, 验证所提出基于遗传算法的轨迹规划与控制方法的有效性和优越性.

4.1 仿真1

选取 Pendubot 的模型参数为

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.0104, a_2 = 0.0052, a_3 = 0.0047, \\ a_4 &= 0.0082, a_5 = 0.0035. \end{aligned} \quad (28)$$

控制器(17)、(24)及遗传算法中各参数取为

$$\begin{aligned} c_0 &= 1.2, c_1 = 1, c_2 = 10, \varepsilon_1 = 0.3, \varepsilon_2 = 0.1, \\ N &= 40, \text{gen} = 0, G = 500, N_{\text{var}} = 3, \\ n_s &= 0.9, n_c = 0.7, n_m = 0.1, \delta = 10^{-4}. \end{aligned} \quad (29)$$

轨迹参数 k_1, k_2 的取值范围为

$$5 \leq k_1 \leq 10, 0.5 \leq k_2 \leq 5. \quad (30)$$

由式(28)~(30), 通过遗传算法可得

$$q_{1m} = -2.5261 \text{ rad}, k_1 = 9.7775, k_2 = 1.1167, \quad (31)$$

因此 $t_m = 0.1023 \text{ s}, t_f = 0.9978 \text{ s}$.

由极点配置方法得到 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. 令 $(\lambda + 3)^3 = 0$, 则 $\lambda^3 + 9\lambda^2 + 27\lambda + 27 = 0$, 可得 $\lambda_1 = 9, \lambda_2 = 27, \lambda_3 = 27$. 结合式(27)和(28)可求得

$$d_1 = 1, d_2 = 1.8642, d_3 = 0.6319, d_4 = 1.6188. \quad (32)$$

仿真结果见图4. 当 $t = t_m = 0.1023 \text{ s}$ 时, 完成轨迹拼合. 当 $0 \leq t < t_f = 0.9978 \text{ s}$ 时, 在控制器(17)作用下, $[q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2]$ 收敛到 $[\pi/2, 0, 0, 0]$, 力矩也收敛到0, Pendubot 末端点从垂直向下平衡位置运动到垂直向上平衡位置. 当 $t \geq t_f = 0.9978 \text{ s}$ 时, 系统控制从跟踪控制转换到镇定控制, 在控制器(24)作用下, Pendubot 末端点稳定在垂直向上平衡位置, 实现

控制目标. 控制力矩保持在 $[-3.88, 5.75]$ N·m 范围内.

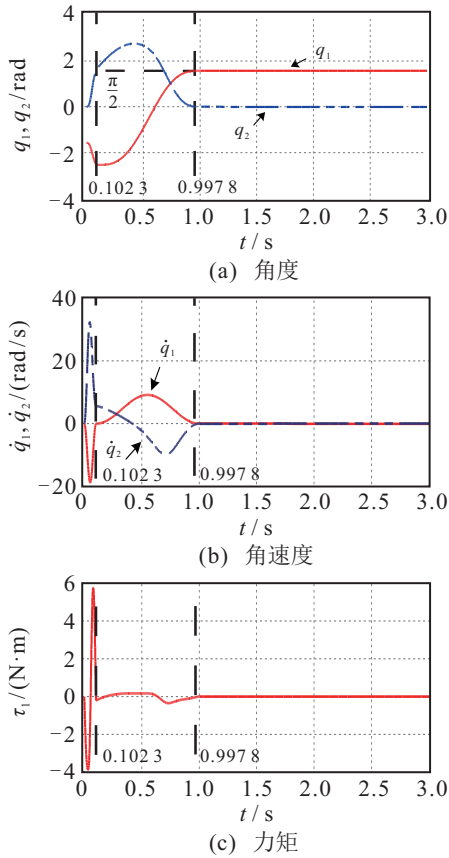


图4 第1组仿真结果

4.2 仿真2

为与文献[22]中的控制效果进行比较, 选取模型参数为

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.0761, a_2 = 0.0662, a_3 = 0.0316, \\ a_4 &= 0.9790, a_5 = 0.3830. \end{aligned} \quad (33)$$

轨迹参数 k_1, k_2 的取值范围为

$$0.5 \leq k_1 \leq 5, 0.5 \leq k_2 \leq 5. \quad (34)$$

控制器(17)、(24)及遗传算法中各参数取值同(29). 由式(29)、(33)和(34), 通过遗传算法求得

$$q_{1m} = 6.2269 \text{ rad}, k_1 = 0.9637, k_2 = 1.7140, \quad (35)$$

因此 $t_m = 1.0377 \text{ s}, t_f = 1.6212 \text{ s}$. 取 $\lambda_1 = 9, \lambda_2 = 27, \lambda_3 = 27$, 由式(27)和(33)可得

$$d_1 = 1, d_2 = 4.6103, d_3 = 0.8763, d_4 = 4.5278. \quad (36)$$

仿真结果如图5所示. 当 $t = t_m = 1.0377 \text{ s}$ 时, 轨迹(11)、(12)拼合为一条完整轨迹. 当 $0 \leq t < t_f = 1.6212 \text{ s}$ 时, 在跟踪控制器(17)作用下, $[q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2]$ 收敛至 $[\pi/2, 0, 2\pi, 0]$, Pendubot 末端点运动到垂直向上目标位置, 控制力矩 $\tau_1 \rightarrow 0$. 当 $t \geq t_f = 1.6212 \text{ s}$ 时, 系统控制转换为镇定控制. 在镇定控制器(24)作

用下, Pendubot 末端点保持在垂直向上目标位置, 实现控制目标. 力矩保持在 $[-8.77, 15.20]$ N·m 范围内. 与文献[22]中控制效果比较, 控制时间和控制力矩均减小. 文献[22]图2力矩在控制器切换时出现较大的突变, 本文方法在跟踪控制阶段结束时刻连杆角速度、控制力矩均收敛到零, 因此, 在控制器切换时力矩变化很小, 整个控制过程快速且平滑.

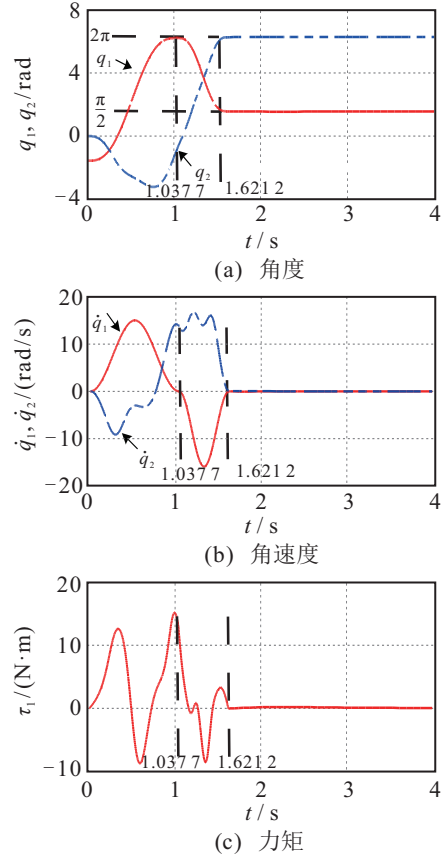


图5 第2组仿真结果

5 结论

本文针对垂直 Pendubot 提出了一种基于智能优化算法的轨迹规划与控制方法, 解决了分区控制中 Pendubot 难以从摇起区平稳过渡至平衡区的问题. 为驱动连杆设计正向和反向轨迹, 利用遗传算法优化轨迹参数, 使正向轨迹反向轨迹拼合的同时, Pendubot 末端点由垂直向下位置直接运动至垂直向上目标位置. 设计相应控制器实现了系统位置控制目标, 控制过程中无需限定摇起区和平衡区的范围, 在控制器切换时, 控制力矩收敛到零, 力矩不会出现较大突变, 控制器切换更加平滑.

本文主要创新点如下:

- 1) 将轨迹规划方法应用于垂直 Pendubot, 利用遗传算法优化轨迹参数, 从而间接得到由垂直向下位置直接运动至垂直向上位置的末端点轨迹. 控制过程中无需限定摇起区和平衡区的范围, 解决了分区控制

中难以从摇起区过渡至平衡区的问题。

2) 控制器设计简单。当跟踪优化后的驱动连杆轨迹运动至目标角度时,各连杆角度、角速度均收敛到目标值,控制力矩收敛到零,在控制器切换时力矩不会出现较大的突变,切换更加平滑。

参考文献(References)

- [1] Fantoni I, Lozano R. Nonlinear control for underactuated mechanical systems[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2001: 18.
- [2] Panagou D, Kyriakopoulos K. Viability control for a class of underactuated systems[J]. Automatica, 2013, 49(1): 17-29.
- [3] Eom M, Chwa D. Robust swing-up and balancing control using a nonlinear disturbance observer for the Pendubot system with dynamic friction[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(2): 331-343.
- [4] Sun N, Fang Y C, Zhang X B. Energy coupling output feedback control of 4-DOF underactuated cranes with saturated inputs[J]. Automatica, 2013, 49(5): 1318-1325.
- [5] Wu X, He X. Enhanced damping-based anti-swing control method for underactuated overhead cranes[J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 9(12): 1893-1900.
- [6] Reyhanoglu M, Schaft A V D, Mcclamroch N H, et al. Dynamics and control of a class of underactuated mechanical systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 44(9): 1663-1671.
- [7] Zhang P, Lai X Z, Wang Y W, et al. Effective position-posture control strategy based on switching control for planar three-link underactuated mechanical system[J]. International Journal of Systems Science, 2017, 48(3): 1-10.
- [8] 左宗玉, 王欣欣. 欠驱动飞艇平面路径跟踪控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(6): 983-988.
(Zuo Z Y, Wang X X. Planar path-following control for an under-actuated airship[J]. Control and Decision, 2017, 32(6): 983-988.)
- [9] Xin X, Tanaka Seiji, She Jinhua, et al. New analytical results of energy-based swing-up control for the Pendubot[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2013, 52(3): 110-118.
- [10] Jeong S, Lee S, Hong Y D. Adaptive robust swing-up and balancing control of Acrobot using a fuzzy disturbance observer[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2016, 22(5): 346-352.
- [11] 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: IEEE, 1991: 2398-2403.
- [12] Brockett R. Asymptotic stability and feedback stabilization[J]. Differential Geometric Control Theory, 1983, 27(1): 181-191.
- [13] Yang X, Zheng X. Swing up and stabilization control design for an underactuated rotary inverted pendulum system: Theory and experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7229-7238.
- [14] Xia Q X, Yu Y Q, Liu Q B. Fuzzy control for underactuated manipulator[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013(397/398/399/400): 1490-1493.
- [15] Zhang P, Lai X Z, Wang Y W, et al. A quick position control strategy based on optimization algorithm for a class of first-order nonholonomic system[J]. Information Sciences, 2018(460/461): 264-278.
- [16] Wang P C, Fang Y C, Jiang Z Y. A direct swing constraint-based trajectory planning method for underactuated overhead cranes[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(11): 2414-2419.
- [17] Ashrafiuon H, Nersesov S, Clayton G. Trajectory tracking control of planar underactuated vehicles[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(4): 1959-1965.
- [18] Gregory J, Olivares A, Staffetti E. Energy-optimal trajectory planning for the Pendubot and the Acrobot[J]. Optimal Control Applications & Methods, 2013, 34(3): 275-295.
- [19] Sun N, Fang Y C, Zhang Y D, et al. A novel kinematic coupling-based trajectory planning method for overhead cranes[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 23(1): 166-173.
- [20] Liu Y, Xin X. Set-point control for folded configuration of 3-link underactuated gymnastic planar robot: New results beyond the swing-up control[J]. Multibody System Dynamics, 2015, 34(4): 1-24.
- [21] 牛瑞燕, 许午啸, 刘金琨. 欠驱动机械臂滑模控制与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 348-355.
(Niu R Y, Xu W X, Liu J K. Sliding mode control and experiment study for underactuated manipulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 348-355.)
- [22] 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, 2008, 39(2): 389-398.

作者简介

王乐君(1991—),男,博士生,从事智能机器人控制技术的研究, E-mail: wanglejun@cug.edu.cn;

王亚午(1990—),男,副教授,博士,从事欠驱动机器人控制、非线性系统控制等研究, E-mail: wangyawu@cug.edu.cn;

赖旭芝(1966—),女,教授,博士生导师,从事智能控制、机器人控制、非线性系统控制等研究, E-mail: laixz@cug.edu.cn;

吴敏(1963—),男,教授,博士生导师,从事鲁棒控制、智能控制、过程控制等研究, E-mail: wumin@cug.edu.cn.