

基于 Quanser 平台的旋转单级倒立摆 控制系统的研究与实现

戴彦, 吕宏丽

(唐山学院 a. 河北省智能数据信息处理与控制重点实验室;
b. 唐山市智能运动控制系统重点实验室, 河北 唐山 063000)

摘要: 倒立摆系统的稳定控制是控制理论中的典型问题, 在倒立摆的控制过程中能够有效反映控制理论中的许多关键问题, 如非线性、鲁棒性、跟踪问题等。文章基于 Quanser 平台, 在 Matlab/Simulink 中搭建了旋转单级倒立摆实时控制系统, 对其进行了建模分析, 并设计了 PID 控制器。从仿真结果可以看出, PID 控制器实时控制效果较好, 倒立摆摆杆角度响应平滑, 抖动小。

关键词: Quanser 平台; PID 控制器; 旋转单级倒立摆

中图分类号: TP273; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2021)06-0007-04

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2021.06.002

Research and Implementation of Rotary Single Inverted Pendulum Control System Based on Quanser Platform

DAI Yan, LV Hong-li

(a. Key Lab of Intelligent Data Information Processing and Control of Hebei Province;

b. Key Lab of Intelligent Motion Control System of Tangshan City, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: The stability control of the inverted pendulum system is a typical problem in control theory. During its control process, many key problems in the control theory could be effectively reflected, such as non-linearity, robustness and tracking problems, etc. Based on Quanser platform, a real-time control system of the rotary single inverted pendulum is built in Matlab/Simulink, and a PID controller is designed. The simulation results show that the PID controller has produced an effective real-time control, and the angle response of the inverted pendulum rod is smooth with small jitter.

Key Words: Quanser platform; PID controller; rotary single inverted pendulum

0 引言

在控制系统传统设计中, 多通过纯数字仿真的方式对系统进行分析, 而纯数字仿真大都以近似的数学模型为基础, 往往由于对一些参

数的忽略而得不到理想的控制效果, 甚至会出现仿真的结果与实际应用的效果相差很大的情况^[1-2]。为解决该问题, 可以考虑把实际系统放置在仿真系统中进行研究, 此过程称为半实

基金项目: 唐山市科技创新团队培养计划项目(20130208D)

作者简介: 戴彦(1982—), 女, 河北唐山人, 高级实验师, 硕士, 主要从事非线性控制、运动控制研究。

物仿真^[3-5]。加拿大 Quanser 公司开发的 Quanser 平台即可以把控制对象引入仿真系统中,通过 Quanser 的实时内核实现控制器参数的在线调整。倒立摆系统是典型的高阶次、多变量、强耦合的非线性系统。对倒立摆系统的仿真研究能有效反映许多关键问题,如非线性、鲁棒性、跟踪问题等。因此,本文基于 Quanser 平台,在 Matlab/Simulink 中搭建旋转单级倒立摆的实时仿真与控制平台。

1 旋转单级倒立摆系统动力学模型

旋转单级倒立摆系统模型如图 1 所示。旋转臂转轴连接于直流伺服电机 SRV02 系统上,且可被其驱动。该臂长度为 L_r ,转动惯量为 J_r 。当旋转臂逆时针旋转时,旋转臂旋转角 θ 增大。当直流电机电压为正时,旋转臂转向逆时针方向。摆杆与旋转臂的末端相连,长度为 L_p ,质心在 $L_p/2$ 处,质心的转动惯量为 J_p 。当摆杆完全处于直立即在垂直位置时,其摆杆角度 α 为 0;当它转向逆时针方向时,则摆杆角度 α 增大。

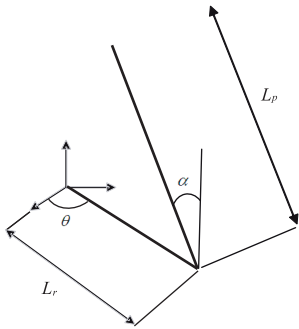


图 1 旋转单级倒立摆系统模型

由图 1 可知,旋转单级倒立摆系统的动能可由四部分组成:旋转臂在水平面内的转动动能、摆杆在竖直平面内的转动动能、摆杆质心在水平面内的移动动能、摆杆质心在竖直平面的移动动能。旋转臂所在的水平面为零势能面,则系统的势能即为摆杆的重力势能^[6-8]。

运用拉格朗日方程建立倒立摆系统的动力学模型^[9]。设整个系统的动能为 T ,势能为 V ,模型如式(1)、式(2)所示。

$$T = \frac{1}{2} J_r \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_p [L_r \dot{\theta} -$$

$$\frac{1}{2} L_p \cos(\alpha) \dot{\alpha}]^2 + \frac{1}{2} m_p [-\frac{1}{2} L_p \sin(\alpha) \dot{\alpha}]^2, \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} m_p L_p g \cos(\alpha), \quad (2)$$

式中, J_r 为旋转臂的惯性力矩($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), J_p 为摆杆的惯性力矩($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), m_p 为摆杆的质量(kg), L_r 为旋转臂的长度(m), L_p 为摆杆的长度(m), θ 为旋转臂的角度($^\circ$), α 为摆杆的角度($^\circ$), g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

动能与势能差设为 L ,则

$$L = T - V = (\frac{1}{2} J_r + \frac{1}{2} m_p L_r^2) \dot{\theta}^2 + (\frac{1}{2} J_p + \frac{1}{8} m_p L_p^2) \dot{\alpha}^2 - \frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos(\alpha) \dot{\theta} \dot{\alpha} - \frac{1}{2} m_p L_p g \cos(\alpha). \quad (3)$$

得到旋转单级倒立摆的拉格朗日方程式(4),

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \theta} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau - B_r \dot{\theta} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \alpha} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = -B_p \dot{\alpha} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, t 为时间(s), τ 为旋转臂扭矩($\text{N} \cdot \text{m}$), B_r 为旋转臂的粘滞摩擦力矩或粘性阻尼($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$), B_p 为摆杆的粘滞摩擦力矩或粘性阻尼($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)。

对式(4)进行线性化处理,得到线性方程组如式(5)所示。

$$\begin{cases} (m_p L_r^2 + J_r) \ddot{\theta} - \frac{1}{2} m_p L_p L_r \ddot{\alpha} = \tau - B_r \dot{\theta} \\ -\frac{1}{2} m_p L_p L_r \ddot{\theta} + (J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2) \ddot{\alpha} - \frac{1}{2} m_p L_p g \alpha = -B_p \dot{\alpha} \end{cases}. \quad (5)$$

设 $x_1 = \theta, x_2 = \alpha, x_3 = \dot{\theta}, x_4 = \dot{\alpha}$,整理可得状态空间方程,如式(6)(7)所示,

$$\dot{x} = \frac{1}{J_T} \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \mathbf{B} u, \quad (6)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{4}m_p L_p^2 L_r g & -(J_p + \frac{1}{4}m_p L_p^2)B_r - \frac{1}{2}m_p L_p L_r B_p \\ 0 & \frac{1}{2}m_p L_p g(m_p L_r^2 + J_r) & -\frac{1}{2}m_p L_p L_r B_r & -(m_p L_r^2 + J_r)B_p \end{bmatrix},$$

$$B \text{ 为 } \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_p + \frac{1}{4}m_p L_p^2 \\ \frac{1}{2}m_p L_p L_r \end{bmatrix}。$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \end{bmatrix}。 \quad (7)$$

2 控制器设计

本文采用PID控制器对旋转单级倒立摆进行控制,其仿真框图如图2所示。PID算法

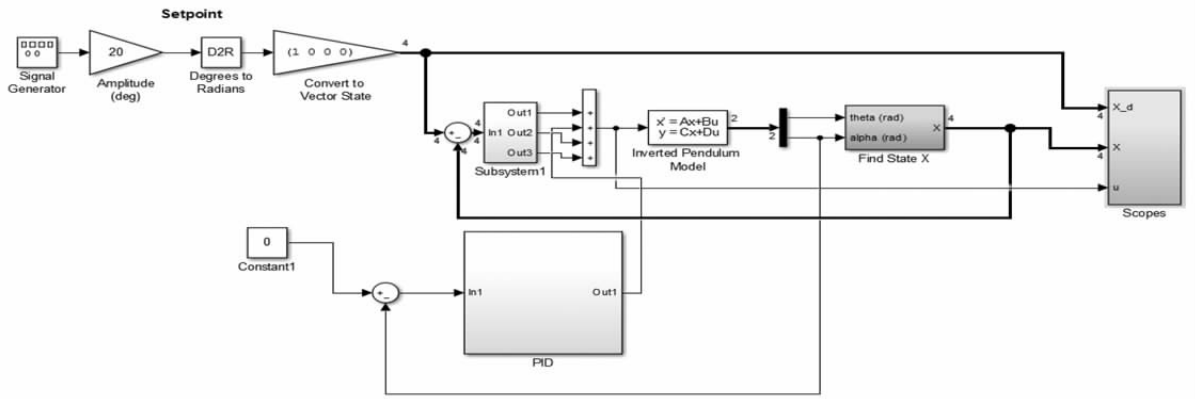


图2 旋转单级倒立摆控制系统仿真框图



图3 旋转单级倒立摆控制系统装置

3.2 对旋转单级倒立摆控制系统的实时控制

图4为旋转单级倒立摆控制系统实时控制Simulink框图。Swing-up模块为起摆模块;

的控制规律如式(8)所示。

$$u(t) = k_p[e(t) + \frac{1}{k_i} \int_0^t e(t)dt + \frac{k_d de(t)}{dt}], \quad (8)$$

式中, k_p 表示比例系数,显示误差信号的瞬时值大小,能改变系统响应的快速性; k_i 表示积分时间常数,显示误差信号的累加值,能改变系统响应的准确性; k_d 表示微分时间常数,显示误差信号的变化趋势,能改变系统响应的平稳性。

3 旋转单级倒立摆控制系统

3.1 硬件介绍

旋转单级倒立摆控制系统装置如图3所示。在此装置中,在水平面上刚性旋转臂的一端用一个旋转伺服电机来驱动,另外一端安装一个一自由度的转轴。在此转轴上安装摆杆,电机通过控制旋转臂的转动可使摆杆稳定于垂直倒立的状态。

Enable Balance Control 模块为角度比较模块,摆杆角度期望值为 12° ,当角度小于 12° 时启动PID控制模块,大于 12° 时开关不变继续执行起摆模块。SRV02-ET + ROTPEN-E 为直流伺服电机和倒立摆模块构成的旋转单级倒立摆控制系统硬件采集模块。

旋转单级倒立摆控制系统的硬件设备通过数据采集卡将计算机与受控对象相连,构成闭环控制结构^[10]。Quanser 软件兼容 Matlab 软件,在 Windows 环境中能够启动由 Matlab/Simulink 模型生成的硬件可识别代码,通过 USB 接口由数据采集卡向受控对象发送或收集数据,达到实时控制的目的。

(3)由相关文献可知,影响疲劳的众多复杂因素中,应力集中和较大的平均应力对疲劳强度危害最大。而由热应力等效应力分布云图可知,篦条两脚外侧应力集中现象严重,并且此处较其他部位平均应力大,因此此处是篦条疲劳的薄弱部位,所以,优化篦条两脚外侧结构,降低此处的应力集中,是提高篦条疲劳强度非常有力的措施。

5 结论

(1)篦条的破坏主要是由于激烈的热循环引起的热疲劳而造成的。

(2)篦条由于循环热载荷而产生的疲劳属于低周疲劳。

(3)在对篦条进行设计制造时,可优化两脚外侧结构,减小此处的应力集中,以提高篦条寿命。

参考文献:

- [1] 靳华东. 烧结机台车起拱现象的分析及处理研究[J]. 中国设备工程, 2020(17): 128 - 129.
- [2] 黎振兹. 烧结机台车热应变疲劳寿命的断裂力学计算以及提高其寿命的若干措施[J]. 重型机械, 1979(2): 13 - 19.
- [3] 白明华. 带式烧结机新结构原理与设计计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 56 - 57.
- [4] 周立平, 刘生, 王海平. 大型烧结机台车体的应力分析[J]. 一重技术, 2001(2): 29 - 30.
- [5] 赵琪昌, 孙东明. 烧结机台车栏板因热疲劳断裂的研究及其对策[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2008(2): 11 - 15.
- [6] 王会刚, 李振虎, 刘炳新. 带式烧结机台车篦条有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2009(4): 39 - 41.
- [7] SHIGAKI I, NARAZAKI H. A machine-learning approach for a sintering process using a neural network[J]. Production Planning & Control, 1999, 10(8): 727 - 734.
- [8] FAIS A. Processing characteristics and parameters in capacitor discharge sintering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2223 - 2230.
- [9] LI C Z, HONEYANDS T, O'DEA D. DEM study on size segregation and voidage distribution in green bed formed on iron ore sinter strand[J]. Powder Technology, 2019, 356: 778 - 789.
- [10] 马阳波. 带式烧结机台车有限元分析及轻量化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [11] 邓守梁, 万黎明. 高效生产高质量烧结机炉篦条工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 84 - 86.
- [12] 航空工业部科学技术委员会. 应力集中系数手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 63.
- [13] 裴元东, 熊军, 史凤奎, 等. 烧结篦条粘结机理研究及防治措施[J]. 烧结球团, 2018, 43(2): 1 - 4.

(责任编辑: 李秀荣)

(上接第10页)

- [6] 孙恺, 沈精虎. 单级倒立摆系统的设计与仿真[J]. 煤矿机械, 2018, 39(9): 8 - 11.
- [7] 任桢, 林都. 旋转倒立摆虚拟仿真模型构建与验证[J]. 现代电子技术, 2019, 42(6): 60 - 64.
- [8] 伍晓丽. 基于卡尔曼滤波的旋转倒立摆智能控制算法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2017.
- [9] 王贤明, 陈炜, 赵新华. 倒立摆系统起摆与稳摆控制算法研究综述[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(11): 5 - 8.
- [10] 梁婷婷. 基于 Quanser 半实物仿真实验平台的控制系统研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.

(责任编辑: 李秀荣)