

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2020.07.029

本文引用格式: 赵博, 李嘉波, 李忠玉, 等. 基于模糊控制的旋转倒立摆稳定性仿真研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(7): 131-134.
ZHAO Bo, LI Jiabo, LI Zhongyu, et al. Simulation Research on Stability of Rotary Inverted Pendulum Based on Fuzzy Control[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(7): 131-134.

基于模糊控制的旋转倒立摆稳定性仿真研究

赵博¹, 李嘉波¹, 李忠玉², 叶敏¹, 徐信芯¹

- (1. 长安大学公路养护装备国家工程实验室, 陕西西安 710064;
2. 河南省高远高速公路养护技术有限公司, 河南新乡 453003)

摘要: 倒立摆是一个复杂的、非线性、不稳定的系统, 通常采用数学建模的方法研究倒立摆系统, 该方法复杂繁琐且在建模过程中简化约束条件, 使仿真结果存在一定误差。在 Matlab Simulink 环境中基于 Simscape 模块进行倒立摆系统的建模; 根据倒立摆系统的运行特征设计了新的模糊规则表, 并基于此表建立模糊控制器; 采用该模糊控制器在不同的条件下对倒立摆进行控制, 取得了良好的控制效果。

关键词: Simscape; 倒立摆模型; 模糊控制

中图分类号: TP273+.4

Simulation Research on Stability of Rotary Inverted Pendulum Based on Fuzzy Control

ZHAO Bo¹, LI Jiabo¹, LI Zhongyu², YE Min¹, XU Xinxin¹

- (1. National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Equipment, Changan University, Xi'an Shaanxi 710064, China; 2. Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co., Ltd., Xinxian Henan 453003, China)

Abstract: The inverted pendulum is a complex, nonlinear and unstable system. The study of the inverted pendulum system is usually use the method of mathematical modeling, however the method is too complicated and the constraint conditions need to be simplified in the modeling process, which results in some errors in the simulation results. Based on Simscape module the inverted pendulum system was modeled in Matlab Simulink environment. A new fuzzy rule table was designed according to the operation characteristics of the inverted pendulum system, and a fuzzy controller was built based on the table. The fuzzy controller was used to control the inverted pendulum under different conditions, and a good control effect was obtained.

Keywords: Simscape; Inverted pendulum model; Fuzzy control

0 前言

倒立摆系统因为其高阶次、多变量、非线性、不稳定等特征, 一直被认为是控制领域的难点^[1]。倒立摆系统在日常生活和工业控制中的应用十分广泛, 最为常见的有人造卫星姿态调整、行走机器人稳定控制及电动自平衡车等^[2]。

1 阶旋转倒立摆系统主要构件是悬臂和摆杆, 包含了 2 个自由度, 控制器的主要任务就是通过控制悬臂的旋转运动从而实现摆杆轴线的位置在水平面上。传统的倒立摆控制方法如 PID 控制^[3]、极点配置法^[4]只是采用近似手段去解决非线性问题, 虽然其结构简单便于实现, 但控制结果通常不太理想; 关于倒

立摆的控制, 大多数学者采用拉格朗日方程对倒立摆系统建立数学模型及进行分析^[5], 该方法过程繁琐且建模不精确。

事实上, 对于非线性系统, 模糊控制可以提供一种更灵活、直观、成本低且更接近于真实对象的控制方法^[6-7]。“模糊”代表了机器所做的决定并不能准确地说是“正确”或“错误”, 但是却能间接地表现出对于定义变量的“正确”或“错误”程度^[8]。本文作者在 Simscape 环境中对倒立摆系统进行建模, 并依据倒立摆的动态特性设计了新的模糊规则控制表, 并基于此表建立模糊规则控制器。利用该控制器在不同工况下对倒立摆系统进行稳定性仿真研究。

收稿日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805041); 陕西省自然科学基金资助项目 (2017JQ5081); 陕西省交通运输厅科研项目 (18-187k)

作者简介: 赵博 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为动力匹配、电机控制。E-mail: 865220618@qq.com。

1 倒立摆系统建模

1.1 一级旋转倒立摆

一级旋转倒立摆系统主要由控制对象、电位器、力矩电机、底座、控制器组成,控制对象包括旋臂和摆杆^[9]。旋臂由力矩电机驱动,在垂直于电机转轴的水平平面内转动。旋臂和摆杆之间通过旋转副连接,使得当旋臂转动时,摆杆在垂直于关节转轴的竖直平面内转动。

该系统有 2 个角度电位器,分别安装在悬臂和摆杆的转轴处,用于测量 2 个构件的角位移量。由 2 个角度电位器提供的电压信号分别定标后,作为旋转倒立摆系统的 2 个输出,经过 A/D 转换,送入计算机,由计算机按照一定的控制算法计算出数字控制信号,再经 D/A 转换及功率放大器放大后用于驱动直流力矩电动机,从而实现对接摆杆的控制^[10]。如图 1 所示, r 表示悬臂的长度,其相对于水平方向零位的角位移为 θ ; L 表示摆杆的长度,其相对于竖直方向零位的角位移为 α ; 相应的 $\dot{\theta}$ 表示悬臂的角速度, $\dot{\alpha}$ 表示摆杆的角速度。

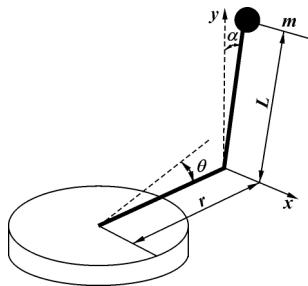


图 1 旋转倒立摆理论模型

1.2 旋转倒立摆系统的建模

本文作者在 Matlab Simscape 中对倒立摆进行建模。如图 2 所示,首先在 Matlab Simscape 环境中添加 solver configuration 求解配置模块、world frame 世界坐标系、mechanism configuration 机构配置块,然后进行参数设置,选择求解方式、修改重力大小和方向。

图 2 配置模块

如图 3 所示,分别添加底座构件、悬臂构件和摆杆构件并设置参数。最后添加旋转副,设置驱动方式,并打开 Sensing 接口,采集连接旋转副的角度与角速度。

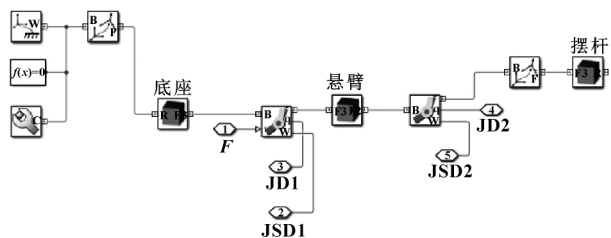


图 3 连接框图

运行后得到的倒立摆系统模型如图 4 所示。

通过扩展 Sensing 接口,可以观察到倒立摆系统在摆杆自身重力的作用下呈现不稳定的状态,图 5、

6 所示为自然状态下悬臂的角位移和角速度变化曲线;图 7、8 所示为自然状态下摆杆的角位移和角速度变化曲线。



图 4 倒立摆模型

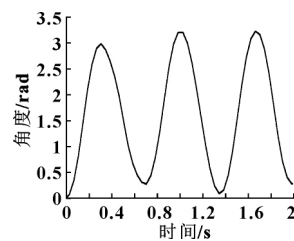


图 5 悬臂的角度响应曲线

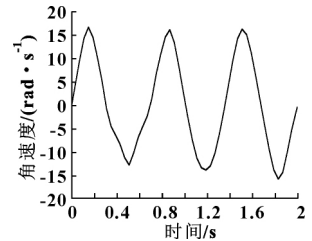


图 6 悬臂的角速度响应曲线

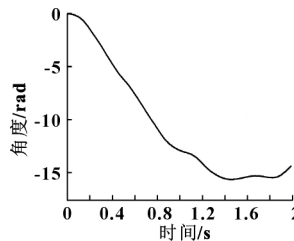


图 7 摆杆的角度响应曲线

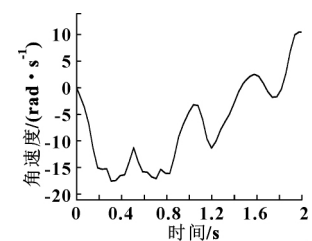


图 8 摆杆的角速度响应曲线

从图 7、8 可以看出,在没有控制的情况下,倒立摆的摆杆在自身重力的作用下,在 $-15 \sim 0$ rad 进行摆动并逐渐趋于稳定即摆杆完全倒下,摆杆角速度更是在 $-18 \sim 9$ rad/s 的范围内无规则变化。针对这种复杂的、非线性的、不稳定的系统,传统的控制方法如 PID 控制^[11]等已经无法满足控制要求,而模糊控制能针对此类系统达到很好的控制效果。本文作者根据倒立摆系统运动特性设计了一种新的模糊规则表,并基于此表建立了模糊控制器。

2 模糊控制器的设计

模糊控制器是模糊控制的核心部分,如图 9 所示,根据模糊控制的原理进行模糊控制器的设计^[12]。该设计的关键就是利用摆杆角度、角速度 2 个变量与驱动力矩的模糊关系,在系统运行中进行不断调整,最终获得良好的控制效果。

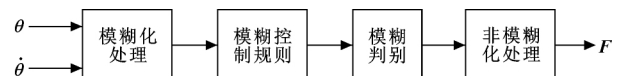


图 9 模糊控制器结构

取输入 α 为摆杆相对于竖直方向零位的角位移, $\dot{\alpha}$ 为摆杆的角速度, F 为驱动悬臂的力矩。隶属度函

数全部采用三角函数, 将角度全部量化到 $[-\pi/4, \pi/4]$, 角速度量化到 $[-\pi/2, \pi/2]$, F 量化到 $[-50, 50]$ 。

模糊规则表如表 1 所示, 以表中某一状态为例, 当 JD2 处于状态 Z, JSD2 处于状态 NL 时, 表示此时摆杆虽然位置处于中位, 但是角速度向左, 此时悬臂应该受到状态为 NL 的力矩驱动向左运动, 带动摆杆向左运动从而克服倒下的趋势。

表 1 模糊规则表

JSD2	JD2						
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL				NL			
NM				NM			
NS			NM	NS	PS		
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PS			NS	PS	PM		
PM				PM			
PL				PL			

为了更加直观地描述模糊规则^[13], 建立如图 10 所示的模糊规则曲面。

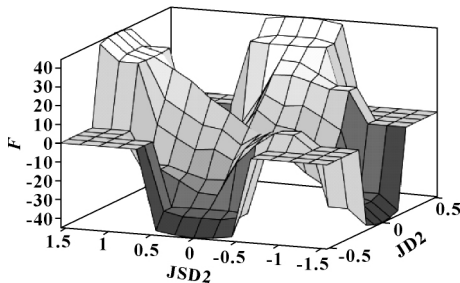


图 10 模糊规则曲面

3 模型仿真

3.1 无干扰情况

使用 Matlab 所提供的 Simulink 平台^[14] 对该模型进行仿真, 将所建模型进行封装, 作为一个子系统连接整个控制框图, 仿真模型图如图 11 所示。

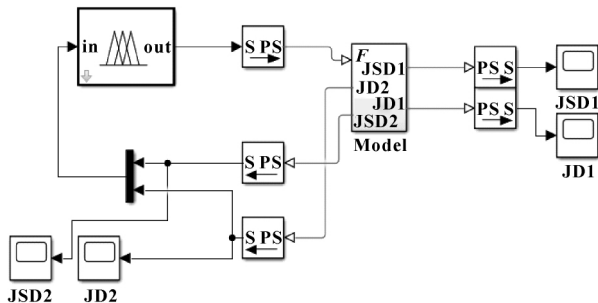


图 11 仿真模型

通过仿真, 可以得到悬臂的角度及角速度响应曲线如图 12、13 所示; 摆杆的角度及角速度响应曲线如图 14、15 所示。

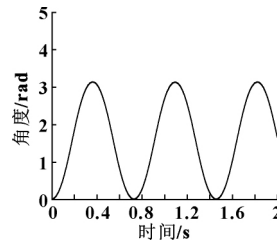


图 12 悬臂的角度响应曲线

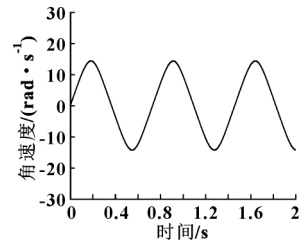


图 13 悬臂的角速度响应曲线

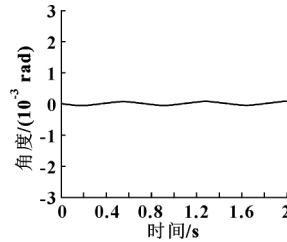


图 14 摆杆的角度响应曲线

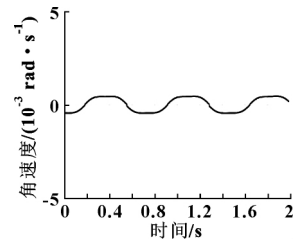


图 15 摆杆的角速度响应曲线

在该倒立摆系统进行模糊控制后, 由图 12、13 可知, 悬臂的角度和角速度变动图均为光滑曲线且周期为 0.7 s。由图 14、15 可得, 摆杆的角度呈现角度大约为 $\pm 0.1 \times 10^{-3}$ rad、周期为 0.7 s 的变化。由此可以看出在模糊控制器的作用下, 倒立摆系统进入一个稳定的状态并成功实现摆杆的倒立。图 16 所示为传统 PID 控制下摆杆的角度响应曲线^[15], 与图 14 相比, 可以看出相比于传统的控制方法, 在该控制器的控制下, 摆杆不断的进行小角度、周期性的动态调整, 体现了该系统超调量小、调整时间短等良好的动态响应特性。

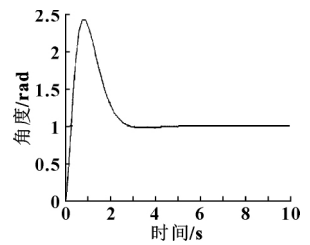


图 16 传统 PID 控制下摆杆角度响应曲线

3.2 有干扰情况

在 Simscape 环境中添加幅值为 1、周期为 1 s、占空比为 0.5 的脉冲信号作为干扰源进行仿真, 具体模型如图 17 所示。

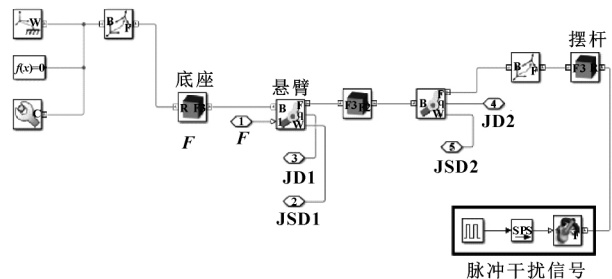


图 17 干扰模型

通过仿真, 可得到摆杆的角度和角速度响应曲线如图 18、19 所示。

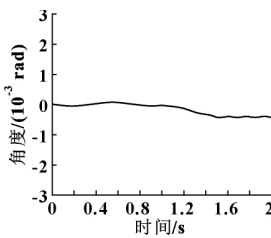


图 18 干扰情况下, 摆杆的角度响应曲线

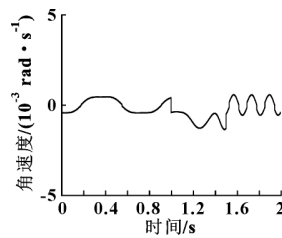


图 19 干扰情况下, 摆杆的角速度响应曲线

由图 18、19 可得, 在有干扰的情况下, 在 1 s 内摆杆的角度和角速度基本实现小范围、周期性变动, 在 1~1.5 s 之间摆杆角度变化呈现不稳定趋势且角速度呈现非周期变化, 但在 1.5 s 之后, 系统又重新趋于稳定, 说明在经过 0.5 s 的调整之后, 摆杆进入一个新的稳定状态。证明了在存在干扰的情况下, 通过该模糊规则表建立的模糊控制器使得倒立摆系统可实现自我调节并趋于稳定, 体现了该控制器调整时间短、稳定性强等特点。

4 结论

1 阶旋转倒立摆存在的非线性、不稳定等典型问题一直是控制领域的难点。本文作者通过在 Matlab Simscape 环境中建立 1 阶旋转倒立摆的模型。在没有控制的环境下运行倒立摆系统, 摆杆的角度位移量展示了倒立摆系统的不稳定性。为了使倒立摆系统稳定, 设计了一种含有 17 条控制规则的模糊规则表。在无干扰的情况下, 从摆杆的响应结果来看, 通过基于此表建立的模糊控制器的调节, 摆杆已基本趋于稳定。在干扰工况下, 通过此模糊控制器的控制, 摆杆的摆动也被控制在小范围内, 基本实现倒立摆系统的稳定。相比于传统控制方法, 本文作者所设计的模糊规则控制器相对于传统的控制方法具有稳定性强、抗干扰能力强、调节时间短等特点。

参考文献:

- [1] ROOSE A I, YAHYA S, AL-RIZZO H. Fuzzy-logic Control of an Inverted Pendulum on a Cart [J]. Computers and Electrical Engineering 2017 61: 31-47.
- [2] 丛爽, 张冬军, 魏衡华. 单级倒立摆三种控制方法的对比研究 [J]. 系统工程与电子技术 2001 23(11): 47-49.
CONG S, ZHANG D J, WEI H H. Comparative Study on Three Control Methods of the Single Inverted-pendulum System [J]. Systems Engineering and Electronics 2001 23(11): 47-49.
- [3] 宋国杰. 采用自适应模糊 PID 的二阶倒立摆控制 [J]. 华侨大学学报(自然科学版) 2016 37(1): 74-78.
SONG G J. Research on Double Inverted Pendulum Control Using Adaptive Fuzzy PID [J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science) 2016 37(1): 74-78.
- [4] PRASAD L B, TYAGI B, GUPTA H O. Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum System Using PID Controller and LQR: Performance Analysis Without and with Disturbance Input [J]. International Journal of Automation & Computing 2014 11(6): 661-670.
- [5] 张丽娟, 涂亚庆, 王保中. 小车-倒立摆系统数学模型 [C]//2005 年中国智能自动化会议 (ICAC'2005) 论文集. 青岛: 2005.
- [6] SAEDIAN A, ZARABADIPOUR H, SHOOREHDELI M A, et al. Inverted Pendulum Fault Tolerant Control Based on Fuzzy Backstepping Design and Anti-control of Chaos [C]//Proceedings of 2012 IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems. Cancun: IFAC 2012.
- [7] BECERIKLI Y, CELIK B K. Fuzzy Control of Inverted Pendulum and Concept of Stability Using Java Application [J]. Mathematical and Computer Modelling 2007 46(1/2): 24-37.
- [8] 王哲, 钱庆文. 基于倒立摆系统的模糊控制研究 [J]. 黄山学院学报 2014 16(3): 31-33.
WANG Z, QIAN Q W. A Research on Fuzzy Control Based on the Inverted Pendulum System [J]. Journal of Huangshan University 2014 16(3): 31-33.
- [9] 王来志, 杨雨浓. 一级旋转倒立摆及其控制装置的研究与实现 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版) 2016 41(8): 145-150.
WANG L Z, YANG Y N. Research and Implementation of a Rotary Inverted Pendulum and Its Control Device [J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition) 2016 41(8): 145-150.
- [10] 叶晓燕, 傅保川, 王俭, 等. 基于模糊控制的旋转倒立摆系统 [J]. 电机与控制学报 2005 9(5): 508-511.
YE X Y, FU B C, WANG J, et al. The Arm-driven Inverted Pendulum System Based on Fuzzy Control [J]. Electric Machines and Control 2005 9(5): 508-511.
- [11] AKHTARUZZAMAN M, SHAFIE A A. Modeling and Control of a Rotary Inverted Pendulum Using Various Methods, Comparative Assessment and Result Analysis [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Xi'an 2010.
- [12] 王永, 孙颖娥, 周烽. 多级旋转式倒立摆的建模与分析 [J]. 电机与控制学报 2004 8(3): 258-262.
WANG Y, SUN Y E, ZHOU F. Modeling and Analysis of the Multiple Rotational Inverted Pendulum [J]. Electric Machines and Control 2004 8(3): 258-262.
- [13] 王海燕. 基于模糊控制的单臂旋转倒立摆系统研究 [J]. 长春大学学报 2014 24(10): 1326-1329.
WANG H Y. Research on the Single-arm Rotary Inverted Pendulum System Based on Fuzzy Control [J]. Journal of Changchun University 2014 24(10): 1326-1329.
- [14] ZHAI X H, YAO S X, XU Z H. Research on Fuzzy Control of Inverted Pendulum in the MATLAB Environment [J]. Applied Mechanics & Materials 2012 182/183: 1211-1214.
- [15] 吴学前, 马杰, 赵顺, 等. 基于环形倒立的不同控制方法仿真及实验研究 [J]. 建设机械技术与管理 2017 30(7): 55-59.
WU X Q, MA J, ZHAO S, et al. Simulation and Experimental Research on Different Control Methods to Be Based on Rotary Inverted Pendulums [J]. Construction Machinery Technology & Management 2017 30(7): 55-59.