

一种机械臂模糊控制系统的设计与实现

田野

(忻州师范学院计算机系,山西 忻州 034000)

摘要:随着“中国制造 2025”计划的推进,现代工业对机械臂控制的精确度提出了越来越高的要求。基于模糊 PID 理论,设计了一种基于模糊控制的模糊自适应机械臂控制系统。该系统建立了输入、输出变量的调整规则,利用系统测量值和期望值的差值得出修正参数,完成 PID 参数的校正。经过在 MATLAB2019a 上的仿真对比试验,当机械臂预设轨迹产生波动时,相较于传统 PID 控制算法,基于模糊控制的自适应机械臂控制系统使由电动舵机驱动的小型机械臂达到稳态的时间有了明显的缩短。

关键词:控制系统;机械臂;PID;模糊控制

中图分类号:TP241 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2021)03-0048-03

Design and Implementation of a Fuzzy Control System for Robotic Arms

TIAN Ye

(Department of Computer, Xinzhou Teachers University, Xinzhou, Shanxi 034000, China)

Abstract: With the advancement of the "Made in China 2025" initiative, modern industry has put higher requirements on the accuracy of manipulator control. Based on fuzzy PID theory, a fuzzy adaptive manipulator control system based on fuzzy control is designed. The system establishes adjustment rules for input and output variables, and uses the difference between the measured value and the expected value of the system to obtain the correction parameters, and then completes the correction of PID parameters. Through the simulation and comparison test on Matlab2019A, when the preset trajectory of the manipulator is fluctuating, compared with the traditional PID control algorithm, the adaptive manipulator control system based on fuzzy control can largely shorten the time for the small manipulator driven by electric steering gear to reach a steady state.

Keywords: control system; robotic arm; PID; fuzzy control

0 引言

随着工业智能化水平越来越高,需要高精度的机械臂作为智能工业向前发展的重要支撑,因为机械臂使用环境复杂,在工作过程中因为工况的不同会产生抖动,对机械臂的精度产生较大的影响。因此对机械臂控制技术的深入研究具有一定的价值^[1]。随着 AI 技术的不断向前发展,AI 技术与传统控制理论相结合,并在机械臂控制领域中成为一个热点研究方向。文献[2]网络动态面控制法解决了机械臂外界扰动及输入受限问题;文献[3]采用机械臂控制方法,对机械臂控制抖动情况有着较好的适应性。上述研究成果使用不同方法解决了机械臂轨迹跟踪控制问题,且设置了不同的控制目

标,达到了不同的控制效果,但由于实现成本较高不利于在低成本小型机械臂上推广。本文主要针对外界不同干扰情况下的小型机械臂轨迹跟踪控制问题,以模糊数学理论为基础,在传统机械臂 PID 控制的基础上,提出了具有模糊自适应的 PID 控制系统,最终实现了减小由舵机提供动力的小型六轴机械臂运行轨迹误差的目的。

1 模糊自适应 PID 算法原理

在传统工业控制领域,经常用到的是比例-积分-微分控制系统,该控制系统可分为比例控制模块、积分控制模块和微分控制模块 3 个子部分,简称为 PID 系统^[4]。传统 PID 控制系统工作原理如图 1 所示。

收稿日期:2021-03-08

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y0009)。

作者简介:田野(1988—),男,山西长治人,助教,硕士,研究方向:计算机系统结构。

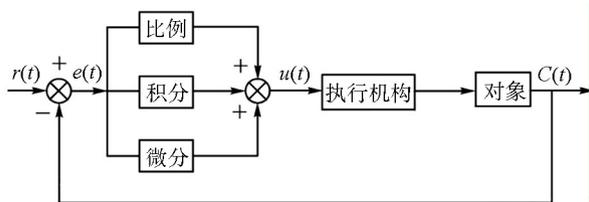


图 1 PID 控制系统工作原理

在机械臂控制领域中,整定 PID 参数的办法不胜枚举,如神经网络自整定算法,遗传自整定算法等^[5]。但是在工程实践中,基于对象特征的整定方法最为主流。围绕着人工智能技术的不断进步,将使用机械臂工作产生积累的经验存入计算机内存,从而使计算机可以实时根据机械臂现场工作情况调整各项参数,根据以上原理发展演变而来的控制系统成为专家 PID 控制系统。通过控制规则对使用机械臂过程的产生的经验进行模型化处理,同时参数进行最优化调整。专家方法存在一定的不足,因为在控制过程中把实际经验进行准确的描述是有很难度的。为了解决专家方法的不足,在运用模糊推理的基础上,使用模糊数学学科领域内的方法和理论,把初始 PID 参数,相关的模糊规则以及评价指标等存储在计算机的知识库中,让计算机根据机械臂控制系统工作中的真实响应情况,对 PID 各项参数进行适合的调整。模糊自适应控制系统原理如图 2 所示。

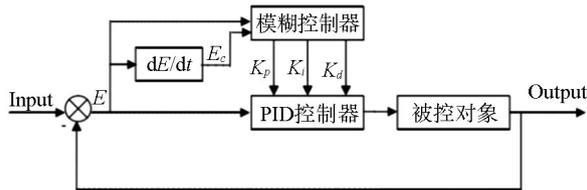


图 2 模糊自适应 PID 控制器原理

综合从机械臂控制系统的控制系统响应速度、控制系统超调量、控制系统稳态精度以及机械臂稳定性 4 个主要维度进行衡量,各系数发挥的作用如下:(1)比例系数 K_p 在机械臂控制系统中的作用主要体现在 2 个方面,首先它可以用来优化控制系统运行时的响应速度,其次它可以优化控制系统运行时的控制精度。比例系数取值的大小与控制系统的响应速度以及控制系统的精度成正相关关系。(2)积分系数 K_i 在机械臂控制系统中的作用是消除机械臂工作产生的稳态误差。 K_i 与系统静态误差消除的时间成正相关。但是 K_i 不能取值过大,否则系统在开始响应时有积分饱和现象,更严重会使系统在响应过程中产生较大超调; K_i 取值过小时,系统静态误差不易消去,对控制系统调节精度的提

升肯能产生负面影响^[6]。(3)微分系数 K_d 的作用是提高控制系统工作时所表现出的动态性能,因为它在控制系统对指令响应的过程中可以起到积极抑制不同方向偏差的作用,还可以超前感知和预测偏差所产生的变化。若 K_d 取值过大时,会造成调节系统的耗时增加,系统抗干扰水平同时降低的现象。模糊 PID 算法可以看作是传统 PID 算法的改进,PID 算法如公式(1)所示。

$$u(t) = K_p C(t) + K_i \int C(t) dt + K_d \frac{dC(t)}{dt} \quad (1)$$

若把得到的正在工作的机械臂所产生的偏移量以和偏移率带入模糊规则,重新计算可得新的微分系数 K_d 、积分系数 K_i 和比例系数 K_p' ,如式(2)所示。

$$\begin{cases} K'_i = K_i + K_{ii} \\ K'_p = K_p + K_{pp} \\ K'_d = K_d + K_{dd} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{ii}, K_{pp}, K_{dd} 为基于模糊调节规则重新计算得到的新值,由新数值重新构造产生的 PID 算法,被称之为模糊 PID 算法。

2 模糊自适应 PID 控制器设计

进行模糊自适应 PID 控制系统设计的首要任务是找到 PID 参数 K_i, K_p, K_d 与输入量 ec, e 。参照机械臂控制系统的专家经验,同时结合 PID 控制曲线,在输入量为不同数值的前提下, K_i, K_p, K_d 满足下列一些调整规则^[7]。PID 控制曲线如图 3 所示。

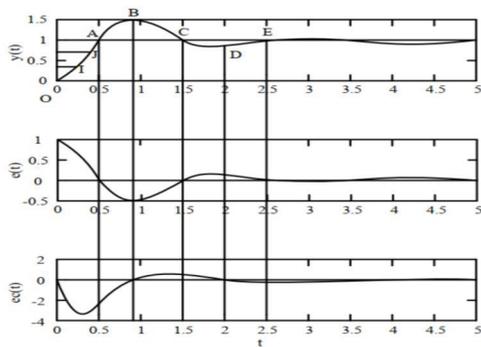


图 3 PID 参数调整曲线

1) OA 范围内

为了达到控制性能更优的目标,可以进行变增益控制。将偏差以及偏差率的变化趋势将 OA 范围分别截成为 OI, IJ 和 JA 共 3 个子段。OI 子段:产生了较大的偏差,|ec| 从零开始递增,此时 K_p 取较大的数值, K_i 取较小数值, K_d 取较小的数值或者直接取零,这样在加快响应速度的同时还防止了积分饱

和;IJ 子段:偏差适中,最大值附近在 $|ec|$ 范围内,在防止超调的前提下,确保系统可以及时响应,3 个参数 K_i, K_p, K_d 的取值都能始终适中或者较小, K_p 和 K_i 取适中, K_d 取较小;JA 子段:偏差较小并且趋向零, $|ec|$ 从大逐渐小, K_p 应适当减小,同时增大 K_i 值,为了防止超调, K_d 取中间值即可。

2) AB 范围内

$|ec|$ 从 0 逐渐增大且 $|ec|$ 开始递减。此时需要采用的应对措施有 2 点,首先要加大比例控制子模块的控制,其次要加大积分控制子模块的控制,目的是为了超调变小,减轻稳态误差的影响。在此基础上,也要对微分作用的进行强化。这样可以使整个控制系统维持在稳态。可以得出在 AB 范围内的操作如下: K_p 取较大值, K_i 同样取较大值, K_d 取值适中^[8]。

3) BC 范围内

$|e|$ 递减且趋向 0, $|ec|$ 从 0 变大。应对措施是弱化对积分作用,强化微分作用,目的是让控制系统反向超调变小。可以得出在 BC 范围内的操作如下: K_p 取值适中, K_i 取值较小或取值为零, K_d 取值适中。

4) CD 范围内

$|e|$ 从 0 开始递增,且 $|ec|$ 递减并趋于 0。系统在该区域内大致趋于稳态,因为超调现象过于微小可不考虑。可以得出在 BC 范围内的操作如下: K_p, K_i, K_d 取中间值与较小值均可。

5) DE 范围内

$|e|$ 递减趋于 0,0 在 $|ec|$ 范围内。DE 范围内趋于稳态,但是还是有微小的偏差存在。应对措施是对积分作用进行弱化,比例作用和微分作用不变,使系统保持稳态。可以得出在 BC 范围内的操作如下: K_p 取值适中, K_i 取值较小, K_d 取值适中。

$$\begin{cases} K_p = K_{p1} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i1} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d1} + \Delta K_d \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)中,模糊控制系统整定后的 PID 参数用 K_i, K_d, K_p 表示, PID 控制器初始参数为 K_{p1}, K_{i1}, K_{d1} , PID 调整量是 $\Delta K_d, \Delta K_i, \Delta K_p$,由此可以推出模糊表^[9]。首先由系统测量值与期望值做差得到 ec 和 e 的值,同时以模糊规则表为依据,该表依据参数 K_p, K_i, K_d 在 ec 和 e 不相等时满足的调整原则确定,最后通过使用模糊处理后的 e 和 ec 查出修正参数 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 完成 PID 参数校正的工作^[10],利用已校正参数的 PID 控制系统完成系统控制。

该控制系统适用于小型六轴电力驱动机械臂,

动力系统是由电力驱动的数字舵机,输入信号为 PWM 信号。使用 Simulink 对该设计进行系统仿真,其中阶跃函数为输入信号量,核心为一个两输入、三输出的模糊 PID 控制器,用于控制机械臂的舵机的传递函数为式(4)。

$$G(s) = \frac{s+3}{s^2+4s+5} \quad (4)$$

以传递函数作为受控对象,建立控制系统仿真模型,最后结果输出在滤波器中。仿真模型如图 4 所示。

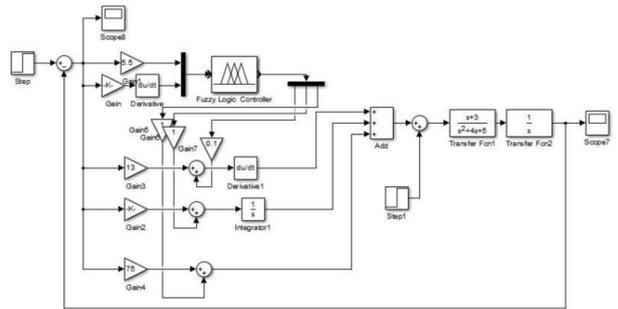


图 4 机械臂模糊自适应 PID 控制器仿真

3 模糊自适应机械臂控制系统性能仿真对比实验

在硬件配置为 Ryzen 5 3600 处理器,16 G 内存,1 T 硬盘,WIN10,64 位操作系统的 PC 机上,使用 MATLAB2019a 进行仿真实验,选取传统 PID 控制方法和本文提出的模糊自 PID 控制方法作为对比实验对象。主要考察 2 种算法对预设轨迹的追踪情况和追踪用时,仿真结果如图 5~6 所示。

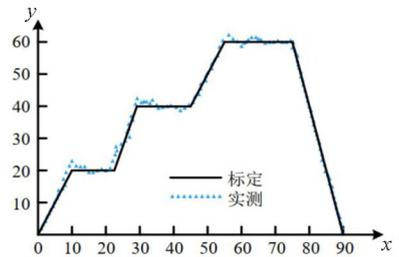


图 5 采用 PID 运动轨迹仿真结果

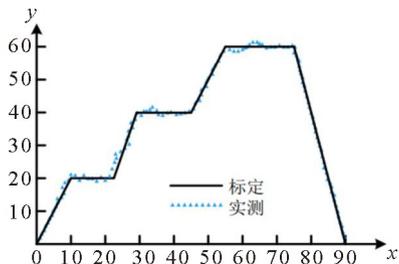


图 6 模糊自适应 PID 运动轨迹仿真结果

gion 10. IEEE International Conference of IEEE Region 10. Xi' an, China;IEEE,2013.

[9] WASKE B, Van Der LINDEN S, BENEDIKTSSON J A, et al. Sensitivity of support vector machines to random feature selection in classification of hyperspectral data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7): 2880-2889.

[10] CHIH-FONG T. Feature selection in bankruptcy prediction[J]. Knowledge-Based Systems, 2009, 22(2):120-127.

[11] PATHASARATHY R, VADLAMANI R. Financial distress prediction in banks using group method of data handling neural network, counter propagation neural network and fuzzy ARTMAP[J]. Knowledge-Based Systems, 2010. 23(8): 823-831.

[12] LI Jianwu, WEI Haizhou, HAO Wangli. Weight-selected attribute bagging for credit scoring[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013:1-13.

[13] 孙勤,蒋艳凤,胡维,等.多准则赋权排序与 CSVM 相结合的特征选择算法[J].计算机工程与应用,2018,54(3):125-130.

[14] AGRAWAL R, IMIELINSKI T, SWAMI A. Mining association rules between set of items in large databases[C]//? Proc. of the 1993 ACM SIGMOD Conference, Washington DC, USA:ACM, 1993.

[15] 王晓龙.基于关联规则属性约简的树增广朴素贝叶斯分类器及应用[D].长春:吉林大学,2014.

[16] 刘亚波.关联规则挖掘方法的研究及应用[D].长春:吉林大学,2005.

(上接第 50 页)

从图 5、6 得出,在机械臂运动轨迹发生抖动的情况下,模糊自适应 PID 机械臂控制系统对比传统 PID 机械臂控系统可以更快地进行调整达到稳态,对预设的运动轨迹有着更好的重合度,机械臂波动较小。2 种算法花费时间如表 1 所示。

表 1 2 种算法花费时间的对比

所用算法	PID 机械臂控制系统	模糊自适应 PID 机械臂控制系统
花费时间/s	7.716 1	7.583 1

4 结语

运用模糊数学原理,基于传统机械臂的 PID 控

制系统,提出了一种适用于机械臂控制的模糊自适应控制系统,该控制系统将机械臂运行中的误差变化率和误差值输入模糊控制系统,依靠模糊控制系统的输出参数的变化来实时对 PID 控制参数进行调整优化。在 PC 机上用 MATLAB2014a 进行了的仿真对比实验,模糊自适应 PID 机械臂控制系统在缩短过渡时间和减小调量方面相较于传统 PID 机械臂控制系统具有较高的优势,对在 STM32F103C8T6 控制芯片控制下的舵机驱动小型六轴械臂具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] 毛龙锐,薛涛,曹秀芳,等.基于 MATLAB 的 7 自由度液压重载机械臂的工作空间分析[J].天津理工大学学报,2020,160(3):43-47.

[2] 刘士荣.机械臂轨迹跟踪控制研究进展[J].控制工程,2011(1):120-126+136.

[3] 姚月琴,王影星,张磊.刚性机械臂系统的抗饱和和神经网络动态面控制[J].机床与液压,2019,47(3):27-31.

[4] 田苗,史玉琴.基于 PID 技术的工业自动控制系统的优化改进研究[J].现代电子技术,2015(13):132-133.

[5] 陈家俊,贺云波.伺服系统中 PID 控制器参数整定的研究[J].机床与液压,2021,49(1):13-16.

[6] 舒蕾.基于光学偏振成像技术的机械臂运动结构稳定性检测[J].自动化与仪器仪表,2020(8):172-176.

[7] 李素若.机械臂动态响应传递函数矩阵模型[J].辽宁工程技术大学学报,2014(5):670-674.

[8] 王娜.基于 Simulink 的机械臂 PID 算法优化设计与实现[J].电子设计工程,2020,28(4):158-162.

[9] 邬合林.PID 在机械臂位置控制中的应用[J].冶金管理,2020(19):46-47.

[10] 宁煜.基于改进 PID 控制的三关节机械臂运动轨迹跟踪误差研究[J].机械设计与制造工程,2018(8):107-110.