

注射机中不稳定时滞对象的PI-PD控制器设计研究

张 玥,张 辉*,刘晓燕

(河北交通职业技术学院,河北 石家庄 050035)

摘 要: 针对注射机在运行过程中存在不稳定的时滞对象问题,提出一种基于改进的WGC方法实现的PI-PD控制系统。确定一个封闭的稳定区域,计算出凸稳定区域的中心,确定PI-PD控制器参数。该方法精确、计算量小且能保证系统稳定性。仿真案例表明,该方法优于现有的几种方法,能够快速达到稳定状态,可有效地抵抗参数扰动和负载扰动。

关键词: 注射机;不稳定时滞对象;PI-PD控制器;WGC方法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1005-3360(2020)08-0080-04

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2020.08.020

Design and Research of PI-PD Controller for Unstable Object with Time Delay in Injection Molding Machine

ZHANG Yue, ZHANG Hui*, LIU Xiao-yan

(Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: Aiming at the problem of unstable time-delay objects during the operation of the injection machine, a PI-PD control system based on the improved WGC method is proposed. First determine a closed stable area, calculate the center of the convex stable area, and determine the PI-PD controller parameters. This method is accurate, has a small amount of calculation and can ensure system stability. The simulation case shows that this method is superior to several existing methods, can quickly reach a steady state, and can effectively resist parameter disturbance and load disturbance.

收稿日期:2020-01-15

*联系人, bianfeng1981@126.com

Key words: Injection molding machine; Unstable time-delay objects; PI-PD controller; WGC method

识别准确率较高;多通道模型1对湖面塑料袋、湖面塑料瓶、湖面其他漂浮物的识别准确率分别为73.41%、74.90%和86.52%,优于HOG和LBP模型,具备较好的湖面塑料漂浮物识别性能。

3 结论

(1)设计实现4个基于不同深度VGG的湖面塑料识别分类模型,称为模型1、模型2、多通道模型1、多通道模型2;研究模型训练阶段的收敛情况后,确定训练至500代、600代、700代、1 000代的模型2、多通道模型1、多通道模型2、模型1并开展后续研究。

(2)研究模型对塑料制品的识别分类准确率和精确率,并将其与传统HOG、LBP模型做比较。多通道模型1应用深层网络结构从多颜色通道提取更多样、更丰富的塑料特征信息,对湖面塑料袋、湖面塑料瓶、湖面其他漂浮物的识别准确率分别为73.41%、74.90%和86.52%,优于其他模型;多通道模型1对塑料制品的测试精确率为0.88,应用多通道模型1识别湖面塑料制品漂浮物的可信度优于其他模型,同时,识别分类性能优于传统HOG和LBP模型。

参考文献

- [1] 熊一舟. 循环经济有助消除海洋塑料污染[N]. 社会科学报, 2020-02-20(007).
- [2] 杨秉倬,黄河. 微塑料对水生生物的生态毒理效应研究进展[J]. 环境与发展, 2019, 31(9): 126-130.
- [3] 马乃龙,程勇,张利兰. 微塑料的生态毒理效应研究进展及展望[J]. 环境保护科学, 2018, 44(6): 117-123.
- [4] 陈刘,邓培煌,黄凤艳,等. 微塑料污染现状及控制对策[J]. 环境与发展, 2020, 32(2): 34-35.
- [5] 闻讯. 中国海洋塑料治理的“厦门模式”[J]. 绿色包装, 2020(2): 87-89.
- [6] 陈玲玲. 基于拉曼光谱的塑料检测技术与识别算法研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- [7] 王娜. 废旧混合塑料的近红外识别方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [8] 刘红莎. 基于近红外光谱的废混合塑料识别研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [9] 闫伟,张金宁,高庆吉. 基于GMM和HOG的自助行李托运行人入侵方法研究[J]. 民航学报, 2020, 4(2): 17-20.
- [10] 贾小云,潘德燃. 基于最大稳定极值区域与主要旋转不变局部二值模式的复杂场景车牌检测方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1 509-1 513.
- [11] 顾思思,李文. 基于VGGNet卷积神经网络的车辆颜色识别[J]. 湖南科技学院学报, 2019, 40(10): 65-67.

注射机是常见的塑料制品生产机械设备。在塑料制品的生产过程中,需要对很多参数进行控制,比如温度、压力、注射速度等^[1-2],将每个参数视为一个被控对象,这些被控对象普遍存在时间滞后现象,即给定控制信号经过一定时间后才作用于被控系统,当出现大的时间滞后时会导致控制失调、系统不稳定^[3-4]。有时被控系统原本稳定,但是受到外界干扰,比如注射机受到电磁干扰^[5-6]、噪声干扰^[7],导致系统输出反常,难以回到稳定状态,最终导致整个系统不稳定^[8]。因此,注射机中不稳定时滞对象的控制是决定其正常运行及保证塑料制品品质的重要因素^[9]。

目前,针对不稳定时滞对象进行控制研究的文献较少,其中文献[10]介绍了一个简单的方法来调整PI-PD控制器的参数,以控制积分和不稳定系统。该方法使用了平方误差积分(ISE)和平方时间加权误差积分(ISTE)的最小化的调谐公式。文献[11]提出基于模型的PI-PD的稳定系统控制器,其中,PD反馈用于将被控对象传递函数的极点转换到更理想的位置,而PI控制器用于实现稳定控制。文献[12]提出基于稳定边界位点绘制的方法,并结合Kharitonov定理,为不确定被控对象设计了鲁棒PI-PD控制器,该方法使用了阻尼比,在不同系统中的应用有限。这些文献中的方法虽具备较好的性能,但还需进一步改进。

由此,本研究将针对注射机中的不稳定时滞对象,提出一种改进的PI-PD控制器。并将其与现有的几种方法进行仿真对比。

1 实验设计

1.1 PI-PD控制结构的设计

本研究所设计的PI-PD控制器的结构图如图1所示。

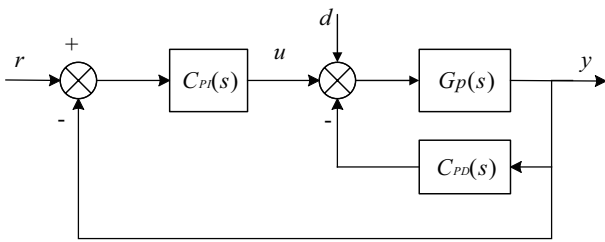


图1 本研究所设计的PI-PD控制结构

Fig.1 PI-PD control structure designed by this research institute

其中, u 为过程输入量或者控制器输出量; r 为系统输入量; y 为被控变量; $C_{PI}(s)$ 为外环上的PI控制器; $C_{PD}(s)$ 为内环上的PD控制器; d 为扰动; $G_P(s)$ 为不稳定时滞对象模型。 $G_P(s)$ 、 $C_{PI}(s)$ 和 $C_{PD}(s)$ 的传递函数为:

$$G_P(s) = \frac{N_P(s)}{D_P(s)} e^{-\tau s} \quad (1)$$

$$C_{PD} = \frac{N_{PD}}{D_{PD}} = k_f + \frac{100k_d s}{s+100} \quad (2)$$

$$C_{PI} = \frac{N_{PI}}{D_{PI}} = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (3)$$

式中: k_f 和 k_d 分别为PD控制器的比例增益和微分增益; k_p 和 k_i 分别为PI控制器的比例增益和积分增益。

带有PD控制器的内反馈回路的闭环特征方程为:

$$\Delta_{PD} k(s) = D_P(s) D_{PD}(s) + N_P(s) N_{PD}(s) e^{-\tau s} = 0 \quad (4)$$

1.2 本研究提出的方法

求解PI-PD控制器参数的7个步骤:

步骤1: 处理内环 C_{PD} 的调稳参数。稳定域通过 k_d - k_f 域的几何关系决定。

将 $s = jw$ 和 $e^{-\tau jw} = \cos(\tau w) - j\sin(\tau w)$ 带入式(4)中,得到:

$$\Delta_{PD}(s) = D_P(jw) D_{PD}(jw) + N_P(jw) N_{PD}(jw) \times (\cos(\tau w) - j\sin(\tau w)) = 0 \quad (5)$$

整理式(5),将其分为实部和虚部得到:

$$\Delta_{PD} = R_{\Delta,PD} + jI_{\Delta,PD} = 0 \quad (6)$$

此时, $R_{\Delta,PD}$ 和 $I_{\Delta,PD}$ 是 k_d 、 k_f 和 w 的方程式。将式(6)中实部和虚部的 Δ_{PD} 归为0,得到带有2个未知参数(k_d , k_f)的2个方程式:

$$R_{\Delta,PD}(k_f, k_d, w) = 0 \quad (7)$$

$$I_{\Delta,PD}(k_f, k_d, w) = 0 \quad (8)$$

根据频率 w 解方程系统,在 k_d - k_f 平面内将 k_d 和 k_f 参数画出,得到稳定性区域。若不止1个 w 满足式(7)和式(8),频率轴可划分为有限个分区,通过对各分区的测试,可以计算出各分区的稳定区域。

步骤2: 利用凸稳定区域边界轨迹尖点和角点来描述凸稳定区域。尖点和角点的坐标分别是 $(\bar{k}_{d1}, \bar{k}_{f1})$, $(\bar{k}_{d2}, \bar{k}_{f2})$ …… $(\bar{k}_{dn}, \bar{k}_{fn})$ 和 $(\bar{\bar{k}}_{d1}, \bar{\bar{k}}_{f1})$, $(\bar{\bar{k}}_{d2}, \bar{\bar{k}}_{f2})$ …… $(\bar{\bar{k}}_{dm}, \bar{\bar{k}}_{fm})$ 。其中, n 和 m 分别为尖点和角点的数量。

步骤3: 凸稳定区域的中心在 k_d - k_f 中计算得到。中心坐标的计算公式如式(9)和式(10)所示。中心控制器参数(k_{dc} 和 k_{fc})由PD控制器参数决定。

$$k_{dc} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{k}_{di} + \sum_{i=1}^m \bar{\bar{k}}_{di}}{n+m} \quad (9)$$

$$k_{fc} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{k}_{fi} + \sum_{i=1}^m \bar{\bar{k}}_{fi}}{n+m} \quad (10)$$

步骤4: 通过使用选定的PD控制器参数(k_{dc} 和 k_{fc}),内环

可以简化为一个传递函数:

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{C_p(s)}{1 + C_{PD}(s)G_p(s)} = \frac{N_p(s)D_{PD}(s)e^{-\tau s}}{D_p(s)D_{PD}(s) + N_{PD}(s)N_p(s)e^{-\tau s}} \quad (11)$$

步骤5: 采用简化在 k_p - k_i 平面上的外环PI控制器的传递函数可以计算出稳定区域, 通过使用以上计算 C_{PD} 的参数过程, PI控制器的参数也可计算出来, 将 $s=jw$ 带入外环特征方程得到:

$$\Delta_{PI}(jw) = D(jw)D_{PI}(jw) + N(jw)N_{PI}(jw) = 0 \quad (12)$$

将 Δ_{PI} 重组为实部和虚部, 得到:

$$\Delta_{PI} = R_{\Delta, PI} + jI_{\Delta, PI} = 0 \quad (13)$$

此时, $R_{\Delta, PI}$ 和 $I_{\Delta, PI}$ 是 k_p 、 k_i 和 w 的方程式。将式(13)中的实部和虚部的 Δ_{PI} 归为0, 得到带有2个未知参数(k_p , k_i)的2个方程式:

$$R_{\Delta, PI}(k_p, k_i, w) = 0 \quad (14)$$

$$I_{\Delta, PI}(k_p, k_i, w) = 0 \quad (15)$$

根据频率 w 解方程系统, 在 k_p - k_i 平面内将 k_p 和 k_i 参数画出, 得到稳定性区域。

步骤6: 利用凸稳定区域边界轨迹尖点和角点来描述凸稳定区域。尖点和角点的坐标分别是 $(\bar{k}_{p1}, \bar{k}_{i1})$, $(\bar{k}_{p2}, \bar{k}_{i2})$ $(\bar{k}_{pv}, \bar{k}_{iv})$ 和 $(\bar{k}_{p1}, \bar{k}_{i1})$, $(\bar{k}_{p2}, \bar{k}_{i2})$ $(\bar{k}_{pw}, \bar{k}_{iw})$ 。其中, v 和 w 分别为尖点和角点的数量。

步骤7: 凸稳定区域的中心在 k_p - k_i 中计算得到的。中心坐标的计算公式如式(16)和式(17)所示。中心控制器参数(k_{pc} 和 k_{ic})将由PI控制器的参数决定。

$$k_{pc} = \frac{\sum_{i=1}^v \bar{k}_{pi} + \sum_{i=1}^w \bar{k}_{pi}}{v + w} \quad (16)$$

$$k_{ic} = \frac{\sum_{i=1}^v \bar{k}_{ii} + \sum_{i=1}^w \bar{k}_{ii}}{v + w} \quad (17)$$

以上步骤为PI-PD控制器的设计方法。PI-PD控制器的结构比常规PID控制结构更适合不稳定或积分系统的控制, 在内环使用PD控制器可以将开环不稳定过程转换为开环稳定过程。对于积分过程系统中, 可以确保开环稳定过程系统极点的适当位置。PI-PD控制器只有4个可调参数(k_f 、 k_d 、 k_p 和 k_i)。因此, PI-PD控制器结构优于常规PID和PID-P控制结构。其次, 这种PI-PD控制系统的设计基于优化的WGC方法, 即加权几何中心方法^[13]。且在WGC方法的基础上引入了凸稳定区域的中心, 中心坐标直接确定

了PI-PD控制器参数, 没有任何迭代优化过程, 确保了闭环的稳定性。该方法具有以下优点: (1)精确度高, 不涉及任何方式的模拟和错误校验。因为这种方法只使用与曲线相关的几个特殊点的坐标以确定稳定控制。(2)与常规的WGC方法相比, 该法设计过程计算量非常小。适用于实际工程系统, 工程师只需要确定稳定控制器参数区域, 就可以简单地设计出PI-PD控制器。(3)所提出的方法可用于稳定区域为封闭的过程系统中。

2 实例仿真

进行由注射机控制系统的一阶积分时滞不稳定系统模型来进行PI-PD控制器的设计。

$$G_p(s) = \frac{4e^{-s}}{4s-1} e^{-2s} \quad (18)$$

对于内环, 稳定区域在 k_d - k_f 域得到。执行步骤1, 计算出的稳定域和它的凸域如图2所示。所解出的稳定域有1个尖点和2个角点, 凸域由这3个点组成, 是一个三角形。读出这些点的坐标, 使用式(9)和(10)计算出凸稳定区域。由此得到PD控制器的参数 $k_f=k_{fc}=0.3412$; $k_d=k_{dc}=0.4390$ 。

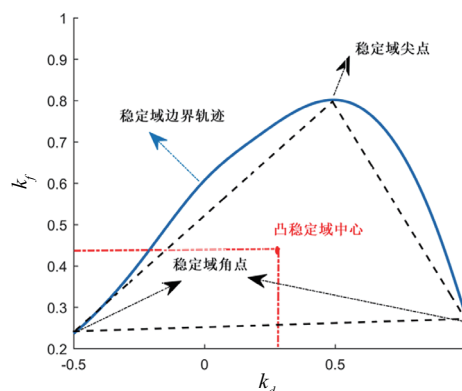


图2 内环凸稳定区域的质心

Fig.2 Centroid of the convex stability region of inner loop

将得到的PD控制器的参数带入内环中, 通过式(11)将其简化成一个传递函数。使用这个传递函数, 可计算出外环的PI控制器参数域。 k_p - k_i 域和凸域如图3所示。

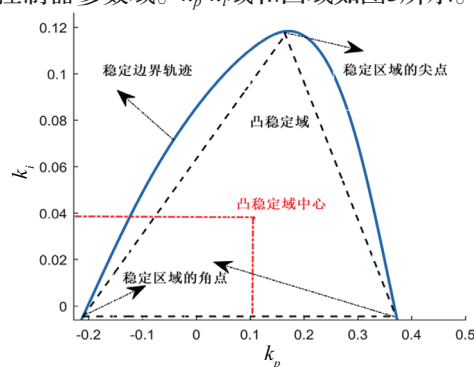


图3 外环凸稳定区域的质心

Fig.3 Centroid of the convex stability region of outer loop

这个稳定域有1个尖点和2个角点, 这些点将组成凸

域。凸稳定区域就是一个三角形,读出这些点的坐标,使用式(16)和(17)计算出凸稳定区域。由此得到PI控制器的参数 $k_d=k_{pc}=0.107\ 0$; $k_i=k_{ic}=0.039\ 3$ 。此时,PI-PD控制器的参数分别为: $k_d=0.341\ 2$, $k_f=0.439\ 0$, $k_p=0.107\ 0$ 和 $k_i=0.039\ 3$ 。

本研究设计的PI-PD控制器和文献[14-16]设计的控制器在单位阶跃信号下的响应曲线图如图4所示。

为了充分说明本研究方法的有效性和实用性,也将本研究提出算法的性能进行量化,方便与其他方法进行对比,采用了性能指标即积分性能指标—IAE指标,代表对误差的积分。IAE值越小代表响应误差积分越小,表征系统稳定性高,跟随性能较好。IAE计算公式:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \quad (19)$$

同时使用稳定时间、超调量、上升时间、峰值时间作为评价标准。

本研究方法与其他方法指标的数值如表1所示。根据总体评价标准,所提出方法具有最低的稳定时间、最小的超调量和IAE值。

文献[15-16]的控制器响应快,其他性能不理想。PI-PD控制结构的性能优于PID控制结构。

因此,总结出本研究所改进的PI-PD控制器兼具良好的追踪性能和稳定性能,并且能够实现较快速度响应,达到了注射机中不稳定时滞对象的控制要求。

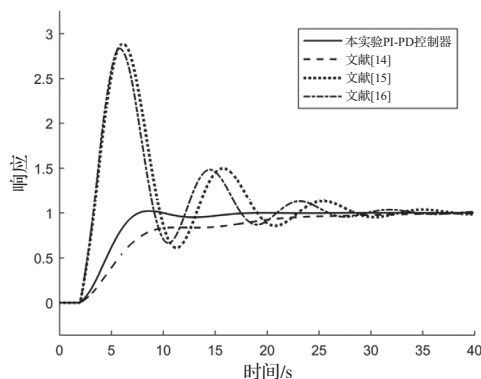


图4 闭环系统的伺服响应

Fig.4 Servo response of the closed-loop systems

表1 闭环性能指标对比

Tab.1 Performance comparison of closed-loop responses

方法	稳定时间/s	超调量	上升时间/s	峰值时间/s	IAE
本研究方法	16.04	2.13	3.78	8.63	4.87
文献[14]	20.26	6.24	4.64	10.62	5.89
文献[15]	17.70	174.16	0.45	5.01	8.57
文献[16]	24.15	191.65	0.32	4.00	9.18

3 结论

本研究针对注射机中带有时滞的不稳定对象,提出一种改进的WGC方法实现的PI-PD控制器。

确定一个封闭的稳定区域,计算出凸稳定区域的中

心,使用中心坐标确定PI-PD控制器参数。

使用稳定时间、超调量、上升时间、峰值时间作为评价标准,进行系统仿真实验。结果表明,本研究提出的方法精确、计算量小,并能保证系统稳定性。适用于注射机中的不稳定时滞对象的控制。

参考文献

- [1] 张鹏,冯显英,霍睿,等. 基于变论域自适应模糊PID的注塑机温控系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(7): 107-109.
- [2] 沈良聪. 绿色创新的高射速塑料包装注塑机的液压系统[J]. 塑料包装, 2017, 27(5): 21-26.
- [3] 张兆东,徐小亮,杨杨. 基于模糊PID控制策略的液压缸试验台加载系统设计[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2019, 43(1): 22-31.
- [4] 温晓花. 基于时滞系统IMC-PID的设计与整定[J]. 机械, 2019(2): 33-36.
- [5] 马宗明. 浅析注塑机PLG控制系统抗干扰[J]. 今日科苑, 2007(10): 30.
- [6] 叶锡标. 提高注塑机控制系统抗干扰能力的方法研究[J]. 塑料制造, 2009(8): 47-50.
- [7] 林荣川. 精密注塑机机筒温度控制与抗干扰研究[J]. 中国塑料, 2011(3): 94-98.
- [8] 朱贤德,康存锋,马春敏,等. 应用软PLC技术构建全电子注塑机温度控制系统[J]. 现代制造工程, 2007(2): 74-77.
- [9] 李明辉,张孝杰. 注塑机料筒多段温度控制系统的设计与实现[J]. 包装工程, 2017(19): 185-190.
- [10] Kaya I, Atherton D P. Simple analytical rules for PI-PD controllers to tune integrating and unstable processes[C]//International Control Conference. Glasgow:Univ. of Strathclyde Publ, 2006.
- [11] Kaya I. A PI-PD controller design for control of unstable and integrating processes[J]. ISA Trans, 2003, 42(1): 111-121.
- [12] Kharitonov V L. Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of systems of linear differential equations[J]. Differential Equations, 1979, 14(11): 1 483-1 485.
- [13] 陈彦涛. 基于模糊设定值加权IMC-PID算法的纸张定量控制[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 166-171.
- [14] Tan N. Computation of stabilizing PI-PD controllers[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2009, 7(2): 175-184.
- [15] Kaya I. Simple and optimal PI/PID tuning formulae for unstable time delay processes[C]//2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE, 2017.
- [16] Visioli A. Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes[J]. IET, 2001, 148(2): 180-184.