

采用动态滑模算法的注射机压力控制器

师 辉¹, 王树臣², 王俊领³

(1.江苏省丰县中等专业学校高职部, 江苏 徐州 221700; 2.徐州工程学院, 江苏 徐州 221008;

3.江苏省丰县中等专业学校, 江苏 徐州 221700)

摘 要: 注射机在注射过程中, 需要采用非线性控制理论解决保压过程的非线性问题。滑模变结构控制方法具有良好的鲁棒性, 控制精度高, 但是存在抖振现象。为了抑制传统滑模控制方法存在的抖振问题, 采用动态滑模控制方法设计二阶保压压力系统的控制律, 构造辅助滑模面函数, 将滑模收敛过程分为两个阶段, 并给出系统收敛条件下控制器参数所满足的条件。通过仿真实验验证动态滑模控制器对非线性保压压力系统控制的有效性。

关键词: 注射机; 保压控制; 动态滑模

中图分类号: TP306⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3360(2020)05-0092-03

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2020.05.022

Pressure Controller of Injection Molding Machine with Dynamic Sliding Mode Algorithm

SHI Hui¹, WANG Shu-chen², WANG Jun-ling³

(1. Advanced Vocational Department of the Secondary Vocational School in Fengxian, Xuzhou 221700, China;

2. Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Secondary Vocational School in Fengxian, Xuzhou 221700, China)

Abstract: In the injection process of the injection molding machine, it is necessary to use the nonlinear control theory to solve the nonlinear problem of the pressure holding process. Sliding mode variable structure control method has good robustness, high control accuracy, but chattering phenomenon. In order to suppress the chattering problem of the traditional sliding mode control method, the dynamic sliding mode control method is used to design the control law of the second-order holding pressure system, and the auxiliary sliding mode surface function is constructed. The conditions satisfied by the controller parameters under the system convergence condition are given. Simulation experiments verify the effectiveness of the dynamic sliding mode controller to control the nonlinear pressure holding system.

Key words: Injection molding machine; Packing pressure control; Dynamic sliding mode

随着塑料产品的发展, 社会对塑料产品的质量要求越来越高, 其制备工艺和成品质量受到极大关注^[1]。由于高温熔融塑料流体性质的不同导致压力传递不均匀且不确定, 注射的保压过程表现出强烈的非线性特性^[2]。注射的保压压力的控制精度很大程度上限制了产品质量, 压力传递不均匀导致塑料产品出现毛边、漏料、脱模, 严重影响产品质量^[3]。

为了改良注射成型设备中保压过程的非线性问题, Kazmer^[4]将预测灰色系统、鲁棒模糊推理和PI控制相结合, 采用C语言编程技术, 将GFPI控制器实现到单片机中。以积分离散PID控制器和固体模糊控制器作对比进行实验研究。实验结果表明, GFPI控制器在减小超调量和静

态误差、提高响应速度和重复精度方面具有较好的性能。Pramujati^[5]介绍了一种在冷却过程中控制腔体压力分布策略的设计。对受控变量参数作为压力分布的时间常数进行定义, 控制冷却循环过程中腔体压力的形状, 并设计预测控制系统, 实现了对多个设定点的监测和控制, 有效控制空腔压力。Hopmann^[6]根据PVT优化生成的参考值来控制空腔压力, 采用迭代学习控制(ILC)得到较好的控制结果。Zheng^[7]设计了一种填充阶段和填充阶段无扰动切换的学习控制方案, 描述了一种高增益无扰传输方案, 并在实验注射机上进行了测试。

以上控制器设计均为固定结构的控制器, 而滑模控制理论属于变结构控制理论^[8], 能够根据系统状态更改控制器的结构。但是, 传统的滑模控制理论在控制中存在抖振现象^[9]。为消除抖振, 主要措施分为三类: 连续函数法^[10]、动态滑模法^[11]和高阶滑模法^[12-13]。考虑到动态滑模法不仅能够有效消除抖振, 并且相比于连续函数法和高阶滑模法而言, 具有更高的控制精度的优势, 因此, 本实验针对注射

收稿日期: 2019-09-11

基金项目: 江苏省职业技术教育学会2019年度课题(XHYBXL2019136)

联系人, shihui2019@126.com

过程中的二阶非线性保压控制设计了动态滑模控制器,构造辅助滑模面函数并设计动态滑模控制律,抑制保压系统的非线性问题。此外,在simulink环境下进行仿真实验,验证动态滑模控制器的有效性。

1 保压过程动态滑模控制算法

1.1 动态滑模控制算法

传统的滑模面函数 $S^{[14]}$ 为:

$$S = \dot{e} + ce \quad (1)$$

式(1)中: $c>0$; e 为给定输入信号与系统实际输出信号的差值。

在注射过程的保压控制应用中,有:

$$e = x_p - y_{\text{actual}} \quad (2)$$

式(2)中: x_p 为设定的理想压力值; y_{actual} 为系统实际输出的压力值。

令 $x_1 = x_p, x_2 = \dot{x}_p$,并将式(2)带入式(1),可以得到滑模面 S 的具体表达式:

$$\dot{S} = \ddot{e} + c\dot{e} = \dot{x}_2 - \ddot{y}_{\text{actual}} + c(\dot{x}_1 - \dot{y}_{\text{actual}}) \quad (3)$$

为了实现在有限时间内系统状态到达滑模面($S=0$)且系统状态保持在滑模面上运动($\dot{S}=0$),动态滑模算法构造辅助滑模面函数 $J^{[15]}$:

$$J = S + \xi$$

$$\dot{\xi} = \rho_1 |S|^{0.5} \text{sign}(S) - \rho_2 |J|^{0.5} \text{sign}(J) \quad (4)$$

式(4)中: $\rho_1 > 0, \rho_2 > 0$; ξ 为滑模面函数 S 和辅助滑模面函数 J 的差值; $\text{sign}(x)$ 为符号函数, $x>0$ 时, $\text{sign}(x)=1$, $x=0$ 时, $\text{sign}(x)=0$, $x<0$ 时, $\text{sign}(x)=-1$ 。

将式(3)代入式(4),得到辅助滑模面函数 J :

$$\dot{J} = \dot{S} + \dot{\xi} = \dot{x}_2 - \ddot{y}_{\text{actual}} + c(\dot{x}_1 - \dot{y}_{\text{actual}}) + \dot{\xi}$$

$$\dot{J} = \dot{x}_2 - \ddot{y}_{\text{actual}} + c(\dot{x}_1 - \dot{y}_{\text{actual}}) + \rho_1 |S|^{0.5} \text{sign}(S) - \rho_2 |J|^{0.5} \text{sign}(J) \quad (5)$$

为了证明滑模面函数 S 的收敛性,定义Lyapunov能量函数 $V = \frac{1}{2} S^2$ ^[16],得到:

$$\dot{V} = S\dot{S} = \dot{S} \left[-\rho_1 |S|^{0.5} \text{sign}(S) \right] = -\rho_1 |S|^{1.5} < 0 \quad (6)$$

计算式(6)的解为:

$$V(t)^{1/4} - V(t_j)^{1/4} = -2^{1.5} \rho_1 \cdot t \quad (7)$$

$$\text{有 } V \left(t \geq \frac{V(t_j)^{0.25}}{2^{1.5} \rho_1} = \frac{|S(t_j)|^{0.5}}{2^{1.75} \rho_1} \right) = 0, t_s \text{ 为传统滑模面 } S$$

收敛趋于0的时间; t_j 为辅助滑模面 J 收敛趋于0的时间。

可以看出,传统滑模面 S 以及辅助滑模面 J 都可以在有

限的时间内控制系统误差收敛于0,且滑模面 J 的收敛时间比滑模面 S 短。

在传统滑模面 S 经过 t_s 时间后, $S(t \geq t_s) = 0$ 。利用式(1)得到, $\dot{e} = -ce$ 。

定义误差变量的Lyapunov函数 $V_2 = \frac{1}{2} e^2$ ^[16],得:

$$\dot{V}_2 = e\dot{e} = -ce^2 \quad (8)$$

由稳定性判据得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$,即控制器的给定输入信号与系统实际输出信号的差值在有限时间内能够趋于0,所设计的动态滑模控制器收敛。

1.2 应用保压过程模型的动态滑模控制算法

保压的非线性过程采用二阶系统进行描述,相应传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{ms^2 + ks + c'} \quad (9)$$

式(9)中: m, k, c' 为系统待识别参数。

采用最小二乘法进行系统参数辨识。令 $x_1 = x_p, x_2 = \dot{x}_p$,在状态空间中式(7)表示为:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-c'x_2 - kx_1) + \frac{k}{m} \cdot u$$

$$= G(x_1, x_2) + bu \quad (10)$$

式(10)中:定义函数 $G(x_1, x_2) = \frac{1}{m}(-c'x_2 - kx_1)$, $b = \frac{k}{m}$

将状态空间表达式规范化。

联立式(3)和式(10),保压过程的滑模面函数微分为:

$$\dot{S} = \ddot{e} + c\dot{e} = G(x_1, x_2) - \ddot{y}_{\text{actual}} + c(x_2 - \dot{y}_{\text{actual}}) + b \cdot u \quad (11)$$

利用式(4)中构造的辅助滑模面 J ,得到控制器的收敛条件。

为了使得滑模面函数 S 和辅助滑模函数 J 能够在有限的时间内收敛,设计动态滑模控制律:

$$u_c = -b^{-1} \rho_3 \int \text{sign}(J) \quad (12)$$

其中控制器参数需要满足的条件为: $\rho_3 > 0$,

$$\text{且 } \rho_3 \geq 4 \left[b \|x_p\| + \frac{k}{m} + \rho_1 |S|^{0.5} \text{sign}(S) \right],$$

$$\rho_2 \geq 0.5 \sqrt{b \|x_p\| + \frac{k}{m} + \rho_1 |S|^{0.5} \text{sign}(S)}。$$

当控制器参数 ρ_1, ρ_2, ρ_3 满足以上公式时,动态滑模控制器的滑模面 S 和辅助滑模函数 J 能够在有限时间内保证收敛,所使用的动态滑模控制算法收敛。

2 保压过程控制实验

在simulink平台中对注射机的保压过程应用动态滑

模算法进行非线性控制。图1为保压过程的控制系统结构图。控制对象为注射机的保压系统,将保压系统用二阶的状态空间表示,并采用最小二乘法对该二阶系统进行参数辨识得到: $m=0.3516$, $k=4.6571 \times 10^2$, $c'=1.6211$ 。将所涉及的动态滑模控制器与二阶系统串联,控制器参数为: $c=300$, $\rho_1=1.3$, $\rho_2=14$, $\rho_3=68$ 。在simulink平台中,在 k 时刻,输入设定压力值 $x_p(k)$ 与二阶模型的实际输出压力值 $y_{\text{actual}}(k)$ 相减,得到的系统误差 $e(k)$ 作为动态滑模控制的控制输入,控制器根据式(12)自适应律计算下一时刻的控制量 $u_c(k+1)$ 。保压过程二阶模型对控制量 $u_c(k+1)$ 做出反应,得到下一时刻的系统输出值 $y_{\text{actual}}(k+1)$ 。

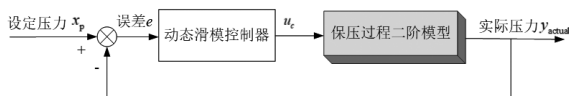


图1 动态滑模控制系统结构图

Fig.1 Structure diagram of dynamic sliding mode control system

图2为基于以上控制系统设计得到的仿真实验结果图。系统给定输入量 x_p , 输入 x_p 为方波, 幅值5 MPa, 周期4 s, 最大值为6 MPa, 最小值为1 MPa。黑色点划线为在动态滑模控制器输出的控制信号的作用下输出的实际压力 y_{actual} 。从图2可以看出, 在0~0.5 s时间内, 设定压力值为6 MPa时, 动态滑模控制器产生了较大的误差, 实际输出曲线发生了抖振。而在1 s后, 在动态滑模控制下保压过程的实际压力能够精确跟踪设定压力的变化, 对非线性保压过程具有非常优秀的跟踪效果。

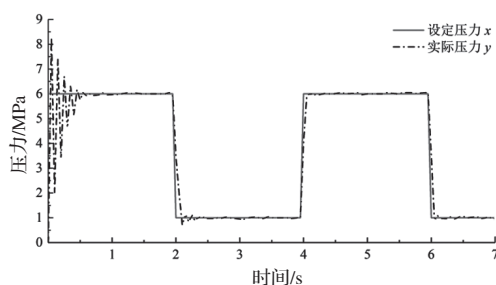


图2 采用动态滑模控制器进行保压过程控制实验结果

Fig.2 Experimental results of packing pressure process control with dynamic sliding mode controller

图3为仿真结果中动态滑模控制器产生的系统压力误差图。可以看出, 在0.5 s前, 动态滑模控制器产生了非常明显的控制误差在0~0.5 s的时间内, 控制误差迅速收敛。在第2、4、6 s的时间内均出现了控制误差的峰值(波峰和波谷), 这是由于在输入的设定电压信号发生突变的情况下, 动态滑模控制器需要一个过渡过程, 而且动态滑模控制器能够迅速收敛到滑模面, 没有抖振情况的发生。

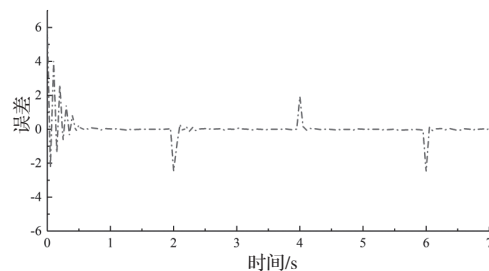


图3 采用动态滑模控制器进行保压过程控制实验误差

Fig.3 Experimental errors of packing pressure process control with dynamic sliding mode controller

图2和图3表明, 所采用的动态滑模策略对保压非线性过程具有很高的控制精度, 只需要0.5 s的算法收敛时间, 就能将保压压力稳定在给定值。

3 结论

鉴于动态滑模算法对于非线性系统控制的优越性能, 针对注射机的二阶保压系统设计了动态滑模控制器。利用传统滑模面函数和辅助滑模面函数构建动态滑模控制算法, 设计相应的控制律, 给出系统收敛需要满足的参数调节。采用二阶状态空间模型对注射机的保压系统建模, 并利用最小二乘法辨识系统模型参数; 通过simulink仿真平台对保压系统进行非线性控制实验。

实验结果表明, 在动态滑模控制器的作用下保压系统能够精确跟踪设定压力的变化, 具有很高的控制精度。此外, 动态滑模算法能够使得系统状态在0.5 s的时间内收敛到给定滑模面。系统所需调节时间短, 具有很快的收敛速度, 对于实际系统控制有很强的参考意义。

参考文献

- [1] Jung I, Kang T G, Shin D S, et al. Modeling of Magnetic Particle Orientation in Magnetic Powder Injection Molding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(11): 1 361-1 369.
- [2] Ogorodnyk O, Martinsen K. Monitoring and control for thermoplastics injection molding a review[J]. Procedia Cirp, 2018, 67: 380-385.
- [3] 袁卫明. 伺服注塑机高速响应的液压控制系统[J]. 轻工机械, 2018, 36(5): 87-91.
- [4] Kazmer D, Barkan P. Multi-cavity pressure control in the filling and packing stages of the injection molding process[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(11): 1 865-1 879.
- [5] Pramujati B, Dubay R, Samaan C. Cavity pressure control during cooling in plastic injection molding[J]. Advances in Polymer Technology, 2016, 25(3): 170-181.
- [6] Hopmann C, Abel D, Heinisch J, et al. Self-optimizing injection molding based on iterative learning cavity pressure control[J]. Production Engineering, 2017, 11(2): 97-106.
- [7] Zheng D, Alleyne A. Learning control of an electro-hydraulic injection molding machine with smoothed fill-to-pack transition[C]//American Control Conference. Chicago: IEEE, 2002.
- [8] Hsu Y C, Chen G R, Li H X. A fuzzy adaptive variable structure controller with applications to robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-part B: Cybernetics, 2014, 31(3): 331-340.

基于注射机健康监测的能量俘获技术研究

秦志新¹, 裴东兴², 郭树杰³

(1.山西水利职业技术学院, 山西 运城 044000; 2.中北大学电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;

3.山西运城农业职业技术学院, 山西 运城 044000)

摘要: 结合悬臂梁结构提出一种注射机非线性压电式能量俘获系统。针对能量俘获系统, 基于非线性理论和压电方程, 建立系统控制方程。采用Matlab软件对系统输出进行模拟仿真实验。模拟实验结果表明: 在0.5 g幅值和0~80 Hz频率的加速度扫频激励下, 所设计非线性系统的输出电压有效宽度能达到20 Hz, 最大幅值能达到50 V, 相对于线性系统输出电压最大值39 V和频带范围2 Hz, 所设计的系统输出性能有明显提高。

关键词: 注塑机; 能量俘获; 状态检测; 非线性

中图分类号: TQ320.63

文献标识码: A

文章编号: 1005-3360(2020)05-0095-04

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2020.05.023

Study on Energy Harvesting Based on Condition Monitoring for Plastic Injection Molding

QIN Zhi-xin¹, PEI Dong-xing², GUO Shu-jie³

(1. Shanxi Water Resources Vocational and Technical College, Yuncheng 044000, China;

2. School of Electrical and Control Engineering North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Shanxi Yuncheng Vocational and Technical College of Agricultural, Yuncheng 044000, China)

Abstract: This paper proposes a nonlinear piezoelectric energy capture system for injection molding machines in combination with the cantilever structure. For the energy harvesting system, based on the nonlinear theory and piezoelectric equations, the system control equations are established; MATLAB software is used to simulate the system output. Then, the simulation experiment results show that under 0.5 g amplitude and 0~80 Hz frequency sweep, the effective width of the output voltage of the designed nonlinear system can reach 20 Hz, and the maximum amplitude can reach 50 V. Compared with the maximum amplitude 39 V and bandwidth 2 Hz of linear systems, the output performance of proposed system can be improved significantly.

Key words: Plastic injection molding; Energy harvesting; Condition monitoring; Nonlinearity

收稿日期: 2019-11-12

联系人, xiner935386@126.com

近年来, 塑料注射成型作为一种简单、可靠和高效率的塑胶加工方式, 在各行各业中具有非常广泛的应用^[1-3]。为了提高塑料加工的质量, 采取无线传感器对注射机的状

- [9] Laghrouche S, Plestan F, Glumineau A. Practical higher order sliding mode control: an optimal control based approach with application to electromechanical systems[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2006, 334: 169-191.
- [10] Merida J O, Davila J A, Aguilar L T. Robust quasi-continuous sliding-mode control of a variable-speed wind turbine[C]//2012 9th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE). Mexico City: IEEE, 2013.
- [11] Amer A F, Sallam E A, Sultan I A. Adaptive sliding-mode dynamic controller for nonholonomic mobile robots[C]//2016 12th International Computer Engineering Conference (ICENCO). Cairo: IEEE, 2017.
- [12] Kamal S, Moreno J A, Chalanga A, et al. Continuous terminal sliding-mode controller[J]. Automatica, 2016, 69: 308-314.

- [13] Hernandez A G, Monsalve C R, Fridman L, et al. Experimental glucose regulation with a High-Order Sliding-Mode [C]//2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. San Diego: IEEE, 2012.
- [14] Yuan L, Ma G, Dong J W, et al. Terminal sliding mode control for close-range rendezvous[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(2): 195-205.
- [15] Ali K M, Hamed T. Adaptive fuzzy fault tolerant control using dynamic sliding mode[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2018, 16(10): 1-8.
- [16] Utkin V. Mechanical energy-based Lyapunov function design for twisting and super-twisting sliding mode control[J]. Ima Journal of Mathematical Control & Information, 2018, 32(4): 675-688.