

机械与过程控制

基于内模解耦的注塑机料筒温度控制策略

李明辉, 杨星奎

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 为了对注塑机料筒各段温度进行精确控制, 提高注射制品质量, 采用内模解耦控制策略对其进行温度解耦控制。**方法** 针对料筒各段温度之间的耦合, 基于内模控制思想, 采用逆矩阵变换对料筒温度进行解耦, 设计出内模解耦控制器, 并与传统前馈解耦控制进行对比分析。**结果** 内模解耦控制策略较传统前馈解耦控制能更好地对料筒温度进行解耦控制, 有效提高了系统的动态性、抗干扰性和鲁棒性。**结论** 该控制方案设计简单、可调参数少, 实用性强。

关键词: 注塑机; 料筒温度; 前馈解耦控制; 内模解耦控制

中图分类号: TB486; TP273⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)05-0141-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.027

Temperature Control Strategy for Injection Modeling Machine Barrel Based on Internal Model Decoupling

LI Ming-hui, YANG Xing-kui

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to precisely control the temperature of each section of injection molding machine barrel accurately, improve the quality of injection products, and control the temperature decoupling with the internal model decoupling control strategy. With respect to the coupling between the temperatures of each section of the barrel, based on the internal model control thought, the decoupling of the barrel temperature was done with the inverse matrix transform, and the internal model decoupling controller was designed and compared with the traditional feed forward decoupling control through the analysis. Compared with the traditional feed forward decoupling control, the internal model decoupling control strategy could control the decoupling of the barrel temperature in a better way, which could effectively improve the dynamics, anti-interference ability and robustness of the system. The design of the control scheme is simple, the adjustable parameters are few and the practicability is strong.

KEY WORDS: injection modeling machine; barrel temperature; feed forward decoupling control; internal model decoupling control

塑料是包装行业中四大材料之一, 以其质量轻、耐腐蚀、易加工、美观等特性深受食品、饮食、化妆品、医疗等行业青睐^[1]。塑料包装加工机械数量众多, 其中注塑机是一种塑料成型的机电设备, 它是利用塑料的热塑性原理, 由料筒壁上加热丝将塑料颗粒加热至熔融后注射到模具中, 经冷却、开模等工序制成各种所需形状的塑料制品。由于塑料产品具有轻便性、耐磨性、廉价性等优点, 注塑机控制系统可以良好适

应于各种形状的模具, 并且具有较高的生产效率, 因此注塑机是塑料加工行业中主要的成型设备^[2-3]。在塑料的注塑成型过程中, 不同种类的塑料制品所需不同的塑料材料, 不同的塑料材料所需的最佳注射温度不尽相同。塑料在料筒中加热塑化, 若温度过低, 塑料熔化不均匀, 塑化不完全, 使熔融后的塑料颗粒中存在气泡, 若温度过高, 易造成塑料熔体热分解, 计量段容易出现流涎现象。由于加热丝是由电压控制,

收稿日期: 2017-09-28

基金项目: 陕西省科技厅攻关项目 (2014K06-10)

作者简介: 李明辉 (1972—), 男, 博士, 陕西科技大学教授、硕导, 主要研究方向为智能及高级过程控制。

电压的波动直接影响加热丝功率,螺杆与塑料之间存在剪切热,造成塑料在加热塑化过程中存在一定的干扰。料筒各段之间还存在热传递,温差越大耦合越严重,因此在注射成型中的料筒温度控制的好坏直接影响注射制品的质量^[4-5]。传统的PID控制技术已经非常成熟,广泛应用于工业控制中,注塑机的料筒温度控制采用PID控制虽能达到一定的控制效果,但在控制过程中,由于料筒温度具有时滞性、时变性,各段料筒之间存在温度耦合,单一PID控制无法满足控制要求。内模控制是根据过程数学模型设计的一种先进控制算法,不需要精确的数学模型,只有一个可调参数,对时滞性系统有很好的控制效果并具有较强的鲁棒性、抗干扰性^[6-7]。针对注塑机料筒温度的强耦合、时滞性、时变性等问题,文中采用内模解耦控制策略,通过研究注塑机料筒温度特性,分析料筒温度之间的耦合关系,基于内模结构思想,利用逆矩变换方法将耦合回路解耦成互不影响单回路通道,设计出多变量内模解耦控制器。

1 料筒温度特性研究

注塑机必须具有塑化、注射、定形这3个功能,它是将颗粒状或粉状塑料推进料筒中,经过料筒外加热器对塑料原料颗粒加热至熔融后,在油缸的作用下,螺杆以高速、高压的方式挤进合模腔中,经过冷却、开模后可得到所需的塑料制品。注射加热系统主要由料斗、机筒、加热器、喷嘴等组成,见图1^[8]。

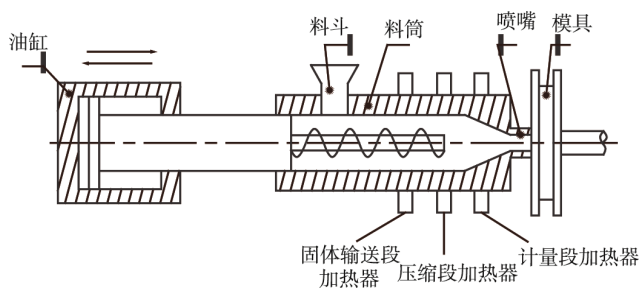


图1 注塑机注射加热系统

Fig.1 Injection heating system of injection molding machine

根据塑料颗粒在料筒中的塑化机理,可以分为固体输送段(第3段)、压缩段(第2段)、计量段(第1段)。输送段主要负责塑料的输送、预热。压缩段是为了熔融塑料的加压与排气,提高塑化质量。计量段则使塑化后的塑料保证一定的均匀性,为注塑成型做准备。注塑机料筒壁比较厚,在塑料加热过程中,各段加热是通过调节料筒外壁上各加热丝功率完成温度控制。大部分注塑机只是采用速度慢、效率低的自然散热方式降温,而外界温度变化影响各料筒的散热速率,因此料筒温度的加热与散热是一个典型的非线性大惯性过程。注塑机各段料筒温度的数学模型见

式(1)^[9]。

$$G(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts+1} \tag{1}$$

式中: k 为比例增益; T 为惯性时间常数; τ 为系统响应滞后时间。

注塑机在对塑料进行熔融塑化时,料筒3段加热丝各自完成加热工作,相邻段之间没有相互隔离,存在着热传导,热副射效应,造成各段之间存在较强的耦合现象。当某一段温度降低或升高时,其他段温度也会发生相应变化。3段加热区域的温度互不相同,固体输送段料筒温度设置在塑料熔点附近,其目的是防止温度过高使塑料过度熔化,造成螺杆打滑;温度过低使熔化不彻底,造成螺杆转矩过大。压缩段主要完成塑料的塑化,需要严格控制温度,避免温度过高使塑料分解,温度过低又不利于熔融。计量段温度应略低于压缩段,主要防止流涎现象发生。根据注塑机三段七分理论,压缩段与计量段温度相关不大,可忽略此段温度耦合的影响^[10-12]。固体输送段与压缩段温度相差过大,热传递效应大,料筒固体输送段与压缩段之间的传递函数见式(2)^[13]。

$$G_m(s) = \begin{bmatrix} g_{11}e^{-\theta_{11}s} & g_{12}e^{-\theta_{12}s} \\ g_{21}e^{-\theta_{21}s} & g_{22}e^{-\theta_{22}s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1.796e^{-s}}{72.3s+1} & \frac{1.012e^{-2s}}{133.7s+1} \\ \frac{1.087e^{-2s}}{134.6s+1} & \frac{1.499e^{-s}}{88.1s+1} \end{bmatrix} \tag{2}$$

由上述分析可知,料筒的固体输送段与压缩段之间有很强的耦合关系,有必要对其进行解耦控制。

2 内模解耦控制器

内模控制(Internal model control)是基于过程数学模型进行控制器设计的一种先进控制策略。其控制性能好,在模型失配,干扰情况存在下,能达到很好控制要求,并且内模控制无需精确的数学模型,其设计简单,可调节参数少,有很强实用性。解耦控制是消除各通道之间的影响,使其变成单一的控制回路,不受其他通道输入变量的影响^[14-16]。在工业控制中,受控对象往往存在干扰、模型失配等影响,内模解耦是利用内模控制原理,根据模型求逆得到控制器,通过引入低通滤波器,使控制系统达到一定的鲁棒性和抗干扰性。内模控制结构见图2。

对于多变量控制系统,与单变量控制系统类似,图2中控制器与对象模型都为矩阵形式,其闭环传递函数矩阵可以表示为:

$$H(s) = G_m(s)G_{imc}(s)[I + G_{imc}(s)(G_p(s) - G_m(s))] \tag{3}$$

式中: $G_m(s) = G_{m+}(s)G_{m-}(s)$, $G_{imc}(s) = G_{m+}^{-1}(s)F(s)$; $F(s)$ 为低通滤波矩阵。

若被控制对象模型 $G_m(s)$ 与过程模型 $G_p(s)$

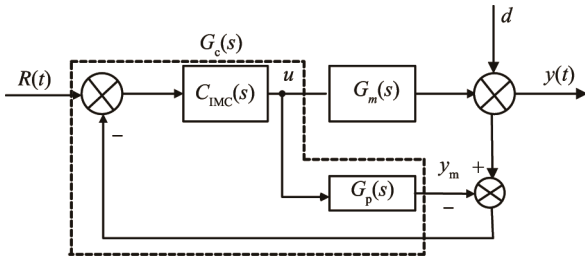


图 2 内模控制结构

Fig.2 Internal model control structure

完全匹配，由式 (2) 可得：

$$\mathbf{G}_m(s) = \mathbf{G}_p(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s)e^{-\theta_{11}s} & g_{12}(s)e^{-\theta_{12}s} \\ g_{21}(s)e^{-\theta_{21}s} & g_{22}(s)e^{-\theta_{22}s} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\mathbf{G}_m(s)$ 为非奇异矩阵，因此可实现对角解耦控制。由式 (2) 可知，在模型匹配情况下，解耦闭环传递函数的对角矩阵形式为：

$$\mathbf{H}(s) = \mathbf{G}_m(s)\mathbf{G}_{imc}(s) = \begin{bmatrix} h_{11}(s) & 0 \\ 0 & h_{22}(s) \end{bmatrix} = \text{diag}\{h_{ii}(s)\} \quad (5)$$

于是控制矩阵可求得：

$$\mathbf{G}_{imc}(s) = \mathbf{G}_m^{-1}(s)\mathbf{H}(s) = \frac{\mathbf{G}_m^*(s)}{\det \mathbf{G}_m(s)} \mathbf{H}(s) \quad (6)$$

$\mathbf{H}(s)$ 可以表示为：

$$\mathbf{H}(s) = \begin{bmatrix} f_1(s)e^{-\tau(h_{11})s} & 0 \\ 0 & f_2(s)e^{-\tau(h_{22})s} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： $\mathbf{G}_m^*(s)$ 为矩阵 $\mathbf{G}_m(s)$ 的伴随阵；

$\det \mathbf{G}_m(s)$ 为矩阵 $\mathbf{G}_m(s)$ 的行列式； $f_i(s) = \frac{1}{\lambda_i s + 1}$ 为低滤波器。

设 $g_M^{ij}(s)$ 是矩阵 $\mathbf{G}_m(s)$ 的代数余子式，则：

$$\mathbf{G}_m^*(s) = [g_M^{ij}(s)]_{n \times n}^T \quad (8)$$

由式 (6)，式 (8) 可得内模控制器矩阵对角线元素为：

$$g_{imcii}(s) = \frac{g_M^{ii}(s)}{\det \mathbf{G}_m(s)} h_{ii}(s) \quad (9)$$

内模控制器非对角线上元素为：

$$g_{imcji}(s) = \frac{g_M^{ij}(s)}{\det \mathbf{G}_m(s)} h_{ii}(s) = \frac{g_M^{ij}(s)}{g_M^{ii}(s)} g_{imcii}(s) \quad (10)$$

由式 (9) 及矩阵性质可知，若 $h_{ii}(s)$ 中的时滞因子和超前的时滞没有互相完全抵消，求得的控制器的时滞是超前的，这就造成控制器以预测的形式工作，在现实中是不可能实现，必需进行时滞条件约束，因此控制器矩阵的时滞条件必须满足 $\tau(g_{imcii}) \geq 0, \tau(g_{imcji}) \geq 0$ ，即 $\tau(g_{imcii}) \geq \tau(g_M^{ii}) - \min[\tau(g_M^{ij})]$ ， $\tau(h_{ii}) \geq \tau(\det \mathbf{G}_m) - \tau_i$ 。

由式 (2) 可知，被控对象模型没有右半平面零点，无需对其进行非最小相位零点约束。利用式 (2)

求得行列式，并用粒子群算法以 $J_{\min} = \int_0^{\infty} t |e(t)|^2 dt$ 作为目标函数将其近似为二阶加时滞模型：

$$\det \mathbf{G}_m(s) = \frac{1.689}{500s^2 + 85.959s + 1} e^{-10s} \quad (11)$$

根据式 (8) 可得伴随矩阵：

$$\mathbf{G}_m^*(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.796e^{-s}}{72.3s + 1} & \frac{-1.087e^{-2s}}{134.6s + 1} \\ \frac{-1.012e^{-2s}}{133.7s + 1} & \frac{1.499e^{-s}}{88.1s + 1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

可得时滞条件约束： $\tau(\det \mathbf{G}_m) = 10$ ， $\tau(g_M^{11}) = 1$ ， $\tau(g_M^{12}) = \tau(g_M^{21}) = 2$ ， $\tau(g_M^{22}) = 1$ ， $\tau_1 = \min[\tau(g_M^{11}), \tau(g_M^{12})] = 1$ ， $\tau_2 = \min[\tau(g_M^{21}), \tau(g_M^{22})] = 1$ 。

控制矩阵对角线元素时滞条件： $\tau(g_{imc11}) \geq \tau(g_M^{11}) - \tau_1 = 0$ ， $\tau(g_{imc22}) \geq \tau(g_M^{22}) - \tau_2 = 0$ 。

闭环传递函数矩阵对角线元素时滞条件： $\tau(h_{11}) \geq 9$ ， $\tau(h_{22}) \geq 9$ 。

闭环传递函数对角矩阵为：

$$\mathbf{H}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1 s + 1} e^{-9s} & \\ & \frac{1}{\lambda_2 s + 1} e^{-9s} \end{bmatrix} \quad (13)$$

将式 (11—13)，代入式 (9)，(10) 可求得系统的解耦控制器 $\mathbf{G}_{imc}(s)$ 。即内模控制器对角线元素为

$$g_{imc11} = \frac{1.796(500s^2 + 85.959s + 1)}{1.689(72.3s + 1)(\lambda_1 s + 1)}$$

$$g_{imc22} = \frac{1.449(500s^2 + 85.959s + 1)}{1.689(88.1s + 1)(\lambda_2 s + 1)}$$

内模控制器非对角线上元素为 $g_{imc12} = \frac{-1.012(500s^2 + 85.959s + 1)}{1.689(133.7s + 1)(\lambda_2 s + 1)} e^{-s}$ ，

$$g_{imc21} = \frac{-1.087(500s^2 + 85.959s + 1)}{1.689(134.6s + 1)(\lambda_1 s + 1)} e^{-s}$$

3 仿真对比分析

为了验证文中提出解耦控制策略的正确性，通过 Matlab 进行仿真对比分析。设固体输送段温度为 180 °C，压缩段温度为 230 °C，在 300 s 处给压缩段加入值为 20 的干扰信号，采用内模解耦控制器对其进行解耦。解耦前后，2 段料筒温度输出响应曲线见图 3。由图 3 可知，在未进行解耦时，由 PID 控制料筒温度，在 50 s 左右处出现了超调量，调整时间约 100 s。在固体输送段 300 s 处加入一个值为 20 的干扰信号，相应固体输送段出现了一定的超调。采用内模控制控制器对其进行解耦控制，2 段料筒温度输出响应曲线反应迅速且平滑，几乎没有超调量，在 50 s 左右达到设定值。在 300 s 处加入值为 20 的干扰信号

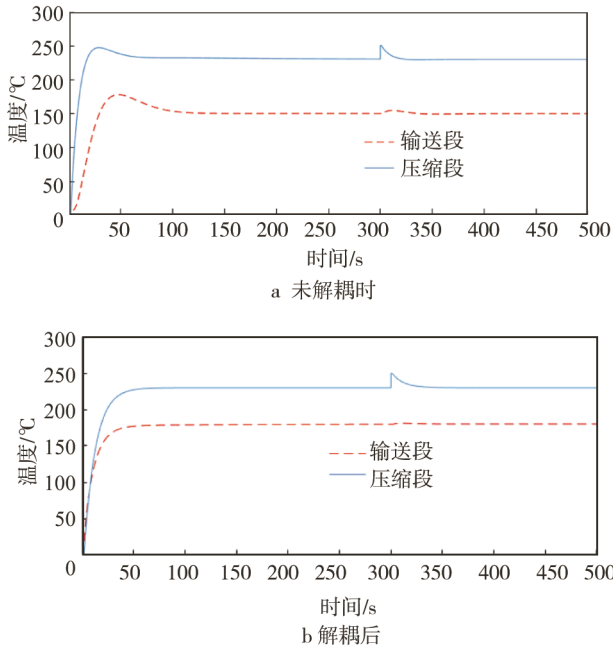


图3 料筒温度响应曲线
Fig.3 Temperature response curve of barrel

后，输送段温度并没有出现明显的温度波动。由此可见，该控制器具有良好的解耦能力。

注塑机在注射成型过程中，由于电压不稳定造成加热器温度出现波动，熔融塑料在输送过程中，由于塑料颗粒与螺杆之间产生摩擦剪切热等干扰影响，以及环境温度、塑料导热率不同，加热器的性能等造成的参数摄动。为验证内模解耦控制器对料筒温度抗干扰性能和鲁棒性，采用传统前馈解耦控制进行对比分析。设固体输送段温度为 180 °C，压缩段温度为 230 °C，料筒温度数学模型中比例增益、惯性时间常数、时滞时间都增大 20%后，在 300 s 处给压缩段温度加入值为 20 的干扰信号，2 段料筒温度输出响应曲线，见图 4。图 4 中 q_1 为前馈解耦控制压缩段温度响应曲线， q_2 为前馈解耦控制输送段温度响应曲线， n_1 为内模解耦控制压缩段温度响应曲线， n_2 为内模解耦控制输送段温度响应曲线，综合指标见表 1。由图 4、表 1 分析可知，前馈解耦控制在响应起始段存在大的超调量，而内模控制控制响应曲线光滑平稳几乎

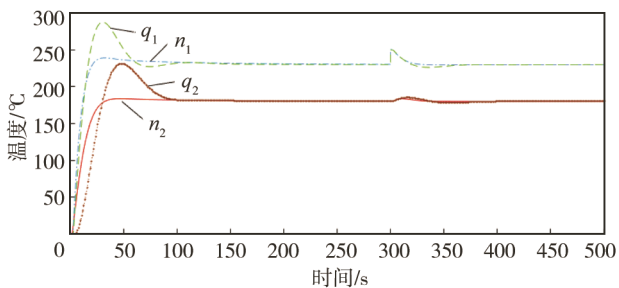


图4 鲁棒性分析对比
Fig.4 Robustness analysis and comparison

表 1 综合性能指标
Tab.1 Comprehensive performance index

响应曲线	最大超调量	调节时间/s	加干扰后调节时间/s
曲线 q_1	287.7	118.7	68.5
曲线 n_1	239.1	86.5	43.5
曲线 q_2	231.2	110.7	77.4
曲线 n_2	183.7	81.6	32.8

无超调量，约在 85 s 得达到设定值。300 s 处在压缩段加入值为 20 的干扰信号，虽然 2 种解耦控制器都在相应压缩段处出现了干扰波动，但由内模解耦控制的响应曲线 n_2 干扰超调量小，并且很快达到稳态值，表明内模解耦控制优于传统前馈解耦控制，具有一定的抗干扰性能和鲁棒性。

4 结语

注塑机料筒的 3 段区域温度具有强耦合、时滞性、时变性的特点。在料筒温度控制方面，传统的 PID 控制在强耦合、时滞性方面无法达到一定的温度控制要求，在工程应用中不能高效地适用于各种材料的加工成型。针对耦合、时滞性、时变性等问题，文中采用内模结构思想，利用多变量逆矩阵求得控制器。通过仿真对比分析表明，文中提出的内模解耦控制器能很好地对注塑机料筒各段温度进行解耦控制，减少了系统的超调量，提高了系统的稳态精度，使注塑机的料筒温度控制效果得到明显改善，并且具有一定的鲁棒性和抗干扰性，为注塑机料筒温度控制系统设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 马晓宇. 自动包装机热封温度自适应控制系统设计[J]. 包装工程, 2016, 37(31): 173—178.
MA Xiao-yu. Design of Temperature Adaptive Control System for heating Sealing Mechanism of Automatic Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(31): 173—178.
- [2] 翁嘉歆. 基于 PLC 的精密微型注塑机控制系统的研制[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
WENG Jia-xin. Development of Control System for Precision for Precision Micro Injection Molding Machine based on PLC[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [3] 赵婕, 许浩. 注塑机料筒温度分段控制的计算机仿真研究[J]. 合成树脂及塑料, 2016, 33(5): 61—63.
ZHAO Jie, XU Hao. Simulation of Segmentation Controlling on Barrel Temperature in Injection Molding Machine[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2016, 33(5): 61—63.
- [4] 张伦玠, 黄丽, 彭李. 全闭环控制注塑机的关键技术

- 研究[J]. 机床与液压, 2016, 21(4): 85—88.
ZHANG Lun-jie, HUANG Li, PENG Li. Research on Key Technology of Full Closed Loop Control Injection Molding Machine[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2016, 21(4): 85—88.
- [5] 罗海波, 杨达飞. 智能自整定注塑机 PID 闭环控制系统[J]. 塑料, 2016, 45(2): 113—116.
LUO Hai-bo, YANG Da-fei. Intelligent Self-tuning PID Loop Control System for Injection Molding Machine[J]. Plastics, 2016, 45(2): 113—116.
- [6] 薛洪武, 吴爱国, 温海棠. 基于集中逆向解耦结构的制冷系统内模控制[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 444—448.
XUE Hong-wu, WU Ai-guo, WEN Hai-tang. Internal Model Control in Refrigeration System Based on Centralized Inverted Decoupling Structure[J]. Computer Simulation, 2017, 34(1): 444—448.
- [7] 钟亮民, 刘吉臻, 张恒, 等. 基于多变量内模解耦的 CFB 锅炉燃烧控制研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(4): 298—306.
ZHONG Liang-min, LIU Ji-zhen, ZHANG Heng, et al. Study on CFB Boiler Combustion Control Based on Multivariable IMC Decoupling Strategy[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(4): 298—306.
- [8] 杜衡. 电液混合注塑机工艺过程控制及其参数优化研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
DU Heng. Electro-hydraulic Hybrid Injection Molding Machine Process Control and Parameter Optimization[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015.
- [9] 陶西孟, 罗亮, 刘知贵. 基于分段 PID 的注塑机料筒温度控制算法研究与仿真[J]. 塑料, 2015, 44(3): 68—70.
TAO Xi-meng, LUO Liang, LIU Zhi-gui. Control Algorithm Study and Simulation of Temperature for Injection Molding Machine based on Piecewise PID[J]. Plastics, 2015, 44(3): 68—70.
- [10] 杨达飞, 黄力. 混沌模糊神经网络算法在注塑机温度实时控制中的应用[J]. 塑料工业, 2016, 44(4): 64—68.
YANG Da-fei, HUANG Li. Application of Fuzzy Neural Network Algorithm in the Real-time Control of Injection Molding Machine Temperature[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(4): 64—68.
- [11] LIN J, LIAN R J. Self-organizing Fuzzy Controller For Injection Molding Machines[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 30: 884—903.
- [12] 李方浦. 全电动注塑机专用数控系统的关键技术研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
LI Fang-pu. Research and Implementation of Key Technology of the Special Numerical Control System for the Whole Electric Injection Molding Machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [13] 罗帆. 注塑机料筒温度控制算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
LUO Fan. Study of Injection Molding Machine Temperature Control Algorithms[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [14] 郑义民, 金福江, 吉国力. 基于解耦方法的 TITO 分散 PID 控制器研究[J]. 控制工程, 2017, 24(8): 1547—1552.
ZHENG Yi-min, JIN Fu-jiang, JI Guo-li. Decentralized PID Controller Design Based on Decoupled System for TITO Processes[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(8): 1547—1552.
- [15] 李敏. 时滞对象的内模控制方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
LI Min. Research on Internal Model Control for Processes with Time Delays[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [16] MANUEL G, ETIENNE V. Temperature Regulation and Tracking in a MIMO System with a Mobile Heat Source by LQG Control With a Low Order Model[J]. Control Engineering Practice, 2013, 38: 333—349.