

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.03.016

基于专家分段 PID 注塑机远程监控系统设计

胡亚南¹, 王鹏文¹, 丰会萍¹, 李明辉²

(1. 西京学院, 西安 710000; 2. 陕西科技大学, 西安 710000)

摘要: 针对注塑机料筒温度控制存在超调、震荡和自动化监控水平低的问题, 设计一套基于专家分段 PID 的注塑机远程监控系统。利用专家知识和经验, 设计 PID 参数分段规则库, 实现 PID 控制器参数的在线整定。以 Siemens CPU315-2PN/DP 控制器和 ET200S 从站为核心, 以 Step7+WinCC 平台开发监控系统下位机程序和上位机 HMI 界面, 实现生产报表、故障诊断及历史趋势功能; 搭建了车间环形光纤工业以太网, 实现了资源整合、数据共享, 完成了注塑机自动监控系统的升级。MATLAB 仿真和现场验证表明, 专家分段 PID 控制器超调量小、抗干扰能力强、鲁棒性好, 能够提升塑件质量。

关键词: 环形网络; CPU315-2PN/DP; 远程监控

中图分类号: TQ320.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)03-0092-06

Design of Remote Monitoring System for Injection Molding Machine Based on Expert Segmented PID

Hu Yanan¹, Wang Pengwen¹, Feng Huiping¹, Li Minghui²

(1. Xijing University, Xi'an 710000, China; 2. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: A remote monitoring system of injection molding machine based on expert segmented PID was designed to solve the problems of overshoot, vibration and low level of automatic monitoring of injection molding machine barrel temperature control. Based on the expert knowledge and experience, the segmented rule base of PID parameters was designed to realize the online tuning of PID controller parameters. With Siemens CPU315-2PN/DP controller and ET200S slave station as the core, the lower computer program and upper computer HMI interface of the monitoring system were developed on the platform of STEP7 + WinCC to realize production report, fault diagnosis and historical trend function. The workshop ring fiber industrial network was built, the resource integration and data sharing were realized, and the automatic monitoring system of injection molding machine was upgraded. Matlab simulation and field verification show that the expert segmented PID controller has small overshoot, strong anti-interference ability, good robustness and can improve the quality of plastic parts.

Keywords: ring network; CPU315-2PN/DP; remote monitoring

塑料被广泛应用于农业、工业、医疗、建筑、食品等各个行业, 但随着科技发展及生产、生活水平的提升, 消费者对塑料制品的质量和外观提出更高要求。料筒温度的超调和震荡, 容易出现塑料烧焦、粘附在筒壁、设备磨损等现象, 严重影响塑件质量。目前, 国内注塑自动监控系统存在系统落后、兼容性差、联网能力弱的问题, 无法实现注塑机生产参数的精确监控和数据实时记录; 同时缺乏可实施、成熟的先进控制算法进行参数控制, 所以塑件质量的稳

定性较弱^[1]。

注塑机料筒温度控制效果是决定塑件质量优劣的关键环节, 为确保生产出高质量且稳定的塑件, 要求料筒温度稳定在最佳工艺温度值, 无超调和震荡。PID 控制因简单、易实现、响应速度快等优点, 而被大多数厂家应用于料筒温度控制, 且 PID 的比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 3 个参数易整定, 是应用最广泛、最好的控制器。由于注塑过程中, 料筒温度受到摩擦生热、区间温度耦合、电压波动及外部因素

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2018GY-042), 西京学院科研基金项目 (XJ170129)

通讯作者: 胡亚南, 讲师, 硕士, 主要研究方向为机械制造及其自动化 E-mail: 2664961273@qq.com

收稿日期: 2019-12-26

引用格式: 胡亚南, 王鹏文, 丰会萍, 等. 基于专家分段 PID 注塑机远程监控系统设计 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3):92-97.

Hu Yanan, Wang Pengwen, Feng Huiping, et al. Design of remote monitoring system for injection molding machine based on expert segmented PID[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):92-97.

影响,固定参数的PID料筒温度控制易出现超调和震荡现象,控制效果和适应性较差。为提升料筒温度控制效果,研究人员将变论域模糊控制算法^[2]、单神经网络PID算法^[3]、模糊RBFNN算法^[4-5]、内膜解耦控制算法^[6]等智能控制算法应用于料筒温度控制,取得了一定的效果,但上述算法比较复杂、数据计算量大、实现难度高,对控制器速率和内存要求高,故需反复验证和高成本的投入。鉴于此,依据领域专家和现场技术人员的丰富经验和专业知识,设计分段PID参数库,构建专家分段PID控制算法,解决固定参数PID在不同工况、环境下控制精度和适应性较差的问题;利用西门子S7-300PLC和ET200S实现注塑机分布式控制,并与客户服务器、车间管理层搭建环形网络,实现车间数据共享,提升注塑机控制系统水平。

1 注塑工艺流程

图1为注塑工艺流程。注塑机主要由料筒、料斗、油缸、螺杆、温度控制等装置组成,料筒依据工艺分为固体输送段、压缩段、计量段。颗粒或粉末状塑

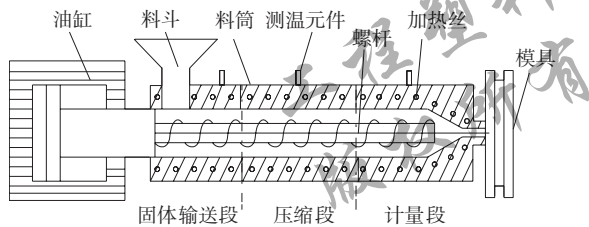


图1 注塑工艺流程示意图

料存放于料斗内,在螺杆旋转作用下将塑料送入料筒,塑料在固体输送段吸收热量并传输至压缩段加热为熔融状态并进行加压和排气,保证注射塑料原料质量;计量段主要是保证塑料塑化的均匀性并为注射做准备,熔融状态的塑料在一定压力作用下经喷嘴注入模具,经保压、冷却定型、脱模后获得所需塑件^[7]。

2 控制系统设计及硬件选型

针对注塑机自动控制系统落后、兼容性差、联网能力弱、数据共享困难的问题,采用Siemens S7-300PLC为控制器,以ET200S为分布式从站,设计注塑机集中分散控制系统(DCS控制系统),如图2所示。控制系统底层为执行层,主要包括加热丝、PT100温度传感器、压力传感器及电磁阀等仪表、执行装置,完成注塑机控制系统信号采集和控制动作执行;中间层为控制层,主要为PLC, ET200S从站等, PLC与ET200S从站采用Profibus-DP通讯,主要完成注塑机生产过程实时控制;顶层为管理层,主要由客户服务器、操作站、工程师站等组成,完成系统实时监测、数据记录、报表生成、故障报警等功能, PLC与操作站、工程师站、客户服务器、打印机、触摸屏之间采用Profinet通讯,构成环形网络,完成工厂车间各节点的连接,实现数据统一管理、资源共享、远程操作等功能^[8]。该控制系统具有以下优点:

(1) 以运算速度快、精度高、性能强的Siemens S7-300PLC为核心控制器,以体积小、经济性高的

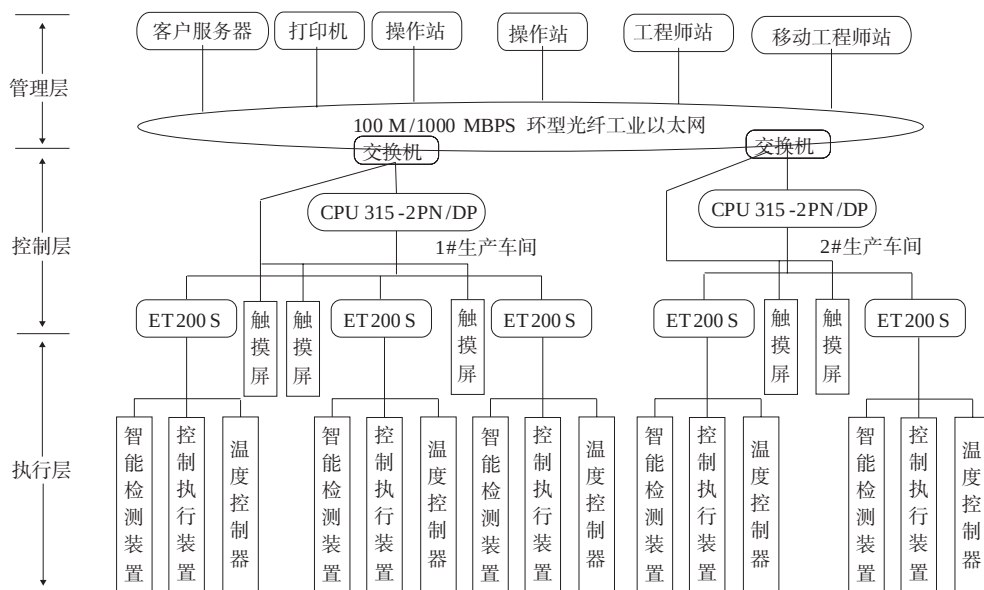


图2 注塑自动控制系统硬件网络图

ET200S 为从站,两者高低搭配、优势互补,实现高性能、经济性的注塑机 DCS 控制系统;

(2) 采用远程 PC 机(操作站)和现场触摸屏监控相结合,提高操作便捷性和系统安全保障性;

(3) 构建环形网络框架,实现车间数据共享、资源整合、远程操作及维护。

依据注塑机控制工艺流程和厂家功能要求,对控制系统 PLC 模块、IM 模块、SM 模块、PS 模块等硬件进行选型。从注塑机控制系统 I/O 点及冗余量、控制器性能、经济性等方面考虑,选择 CPU315-2PN/DP 控制为核心、IM151 为分布式从站。为便于控制系统硬件组态、选型、订货,利用 Siemens TIA Selection Tool 软件进行系统硬件选型,该软件具有可视化硬件选型、地址分配、故障诊断、网络连接及订单列表生产等功能,可清晰地看到模块型号及参数、机架位置、插槽号、订货号及设备标识符、电势分配等信息,单击属性和消息可查看模块信息和组态故障信息。S7-300PLC 与分布式从站 ET200S 通过 Profibus-DP 网络通讯,完成现场信息采集和控制信息输出;S7-300PLC 与触摸屏 KTP600 通过 Profinet 网络通讯,同时通过 8 口网络交换机与管理层构成环形网络,实现远程/现场操作和监控。

在 TIA Selection Tool 软件的 Portal 视图下,选择订单列表可自动生成控制系统模块订单,将订单信息导出到网上商城购买或导出为 Excel 文档传输给企业采购部门,操作方便、快捷,避免模块附件遗漏,如表 1 所示。

表 1 硬件选型订单列表

硬件名称	硬件参数	硬件型号	数量
CPU315-2PN/DP	2PN, 1DP, 256	6ES7315-2EH14-0AB0	1
导轨	160 mm, 用于安装 CPU	6ES7390-1AB60-0AA0	1
DIN 导轨	35 mm, 长 483 mm, 19" 机架	6ES7510-8MA11	3
CPU 电源	PS307; AC120/230V, DC24V	6ES7307-1BA01-0AA0	1
IM151 模块	PROFIBUS DP	6ES7953-8MA11	3
存储卡	8M	6ES7953-8LP31-0AA0	1
HMI	KTP600 Basic, PN	6AV6447-0AD11-3AX0	3
PM-E 模块	24V	6ES7138-4CA01-0AA0	3
DI 模块	8DI, 24VDC	6ES7131-4BF50-0AA0	9
DO 模块	8DO, 24VDC/0.5A	6ES7132-4BF00-0AA0	6
AI 模块	4AITC 标准型	6ES7134-4 JD00-0AB0	6
AI 模块	2/4AI, RTD, 标准型	6ES7134-4 JB51-0AB0	6
AO 模块	2AO, I	6ES7135-4GB01-0AB0	6
端子模块	AUX1 访问权限; 螺钉型 (5)	6ES7193-4CC20-1AA0	6
端子模块	螺钉型 (5)	6ES7131-4BF00-0AA0	12

3 专家分段 PID 控制系统设计

传统 PID 控制依据设定值 (SP) 和采样值 (PV) 的误差值 $e(t)$ 的比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 运算的叠加控制, 获得输出 $u(t)$, 其数学表达式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

增量式 PID 可表示为:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (2)$$

式中: K_p 是比例系数; T_i 是积分常数; T_d 是微分常数; $K_i = K_p / T_i$ 是比例系数; $K_d = K_p \times T_d$ 是微分系数。

专家分段 PID 控制器是基于传统 PID 控制的基础上, 利用领域专家和现场技术人员的丰富经验和知识, 依据注塑机料筒温度偏差及偏差变化速率, 建立专家分段参数规则库实时调整 PID 参数, 实现 PID 控制器由固定参数转变为可调参数。

3.1 控制器结构

专家 PID 控制器主要包括知识库、推理机、分段参数库、传统 PID 及 HMI 界面, 如图 3 所示。知识库主要存放与注塑机料筒温度控制相关的参数、数据及专家控制规则; 推理机依据注塑机现场运行情况、知识库资源及分段参数库逻辑推理出当前最佳分段参数并传输给 PID 控制器以实现参数调整; 分段参数库是由注塑机温度控制各种情况下的 PID 增量参数组成, 分段参数与专家控制规则相对应, 通过 HMI 界面可以增加、修改、优化分段参数库。

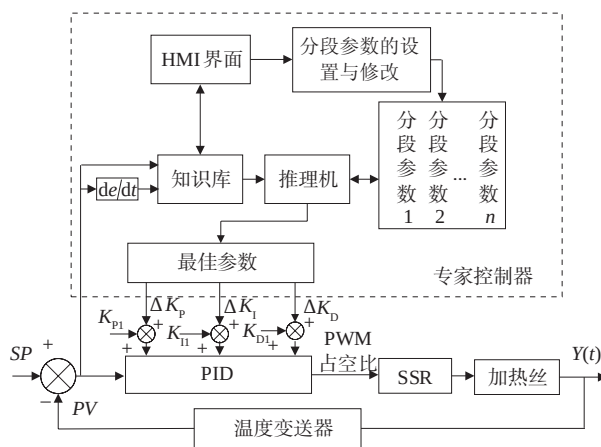


图 3 专家分段 PID 控制系统

3.2 专家分段 PID 控制规则

控制规则是专家分段 PID 控制器核心, 其依据专家知识、操作经验、控制规律总结出来的相应参数规则分段划分 PID 控制器, 然后反向作用于温度控

制。以注塑机料筒压缩段温度控制为例,设定温度为 200℃,要求精度误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内,由于目前国内注塑机温度控制偏差为 $\pm 5^\circ\text{C}$,故专家分段控制规则设计思路为^[9]:

(1) 当 $e(k) > 10^\circ\text{C}$ 时,温度 PV 值远大于温度 SP 值,停止加热。

(2) 当 $e(k) < -10^\circ\text{C}$ 时, PV 值远小于 SP 值,最大功率加热。

(3) 当 $-10^\circ\text{C} \leq e(k) \leq 10^\circ\text{C}$ 时,采用专家分段 PID 控制器控制料筒温度:

① 当 $|e(k)| < 0.05^\circ\text{C}$ 时,维持参数不变;

② 当 $0.05^\circ\text{C} \leq |e(k)| \leq 0.2^\circ\text{C}$ 时, PV 值与 SP 值偏差较小,增强积分作用,消除静态误差,则 $\Delta K_I(k) = I_1 \times \Delta K_I(k-1)$;

③ 当 $e(k)ec(k) > 0$ 时, $|e(k)|$ 往增大方向变化;若 $|e(k)| \geq 2^\circ\text{C}$,实施较强比例控制作用,则 $\Delta K_P(k) = K_1 \times \Delta K_P(k-1)$;若 $0.2^\circ\text{C} < |e(k)| < 2^\circ\text{C}$,实施一般强度比例控制作用,增加微分作用防止系统超调,则 $\Delta K_P(k) = K_2 \times \Delta K_P(k-1)$, $\Delta K_D(k) = D_1 \times \Delta K_D(k-1)$;

④ 当 $e(k)ec(k) < 0$ 且 $ec(k)ec(k-1) \geq 0$ 时,表明 $|e(k)|$ 往减小方向变化;若 $|e(k)| \geq 2^\circ\text{C}$,则偏差较大,实施中等强度控制, $\Delta K_P(k) = K_3 \times \Delta K_P(k-1)$;若 $0.2^\circ\text{C} < |e(k)| < 2^\circ\text{C}$,减小偏差、防止超调,则 $\Delta K_P(k) = K_4 \times \Delta K_P(k-1)$, $\Delta K_I(k) = I_2 \times \Delta K_I(k-1)$, $\Delta K_D(k) = D_2 \times \Delta K_D(k-1)$;

⑤ 当 $e(k)ec(k) < 0$ 且 $ec(k)ec(k-1) < 0$ 时,表明 $|e(k)|$ 处于极值状态;若 $|e(k)| \geq 2^\circ\text{C}$,实施较强控制, $\Delta K_P(k) = K_5 \times \Delta K_P(k-1)$;若 $0.2^\circ\text{C} < |e(k)| < 2^\circ\text{C}$,实施一般控制, $\Delta K_P(k) = K_6 \times \Delta K_P(k-1)$, $\Delta K_I(k) = I_3 \times \Delta K_I(k-1)$, $\Delta K_D(k) = D_3 \times \Delta K_D(k-1)$;

⑥ 当 $e(k)ec(k) = 0$ 时,表明误差为常值;若 $|e(k)| \geq 2^\circ\text{C}$,实施较强强度控制, $\Delta K_P(k) = K_7 \times \Delta K_P(k-1)$;若 $0.2^\circ\text{C} < |e(k)| < 2^\circ\text{C}$,实施一般控制, $\Delta K_P(k) = K_8 \times \Delta K_P(k-1)$, $\Delta K_I(k) = I_4 \times \Delta K_I(k-1)$, $\Delta K_D(k) = D_4 \times \Delta K_D(k-1)$ 。

其中, $e(k)$, $ec(k)$ 为料筒温度偏差及偏差变化率; $K_1 \sim K_8$, $I_1 \sim I_4$, $D_1 \sim D_4$ 为常数,依据专家经验和知识而设定。

3.3 MATLAB 仿真分析

注塑机料筒温度受到摩擦生热、温度耦合、热量传递、电压波动及其它干扰因素影响,温度控制系统具有非线性、时变、滞后特征,陶西孟等^[10]利用阶跃

响应曲线法获取注塑机料筒温度控制系统模型为:

$$G(s) = \frac{50e^{-20s}}{1750s + 1} \quad (3)$$

式中: $G(s)$ 是注塑机料筒温度; s 是拉氏变换因子。

为验证专家分段 PID 控制器的实用性和有效性,在 Simulink 软件中建立专家分段 PID 控制器和传统 PID 控制器对比仿真,设置料筒温度为 200℃,运行时间为 400 s, $K_{PI}=1.53$, $K_{II}=0.78$, $K_{DI}=0.57$, $t=200$ s 处增加幅值为 30℃ (15%) 的负向阶跃信号模拟现场干扰信号,以验证模型抗干扰能力,如图 4 所示。将料筒温度传递函数的 K 增加 30%,模拟现场干扰因素造成模型失配,以验证专家分段 PID 控制器模型失配鲁棒性,如图 5 所示。

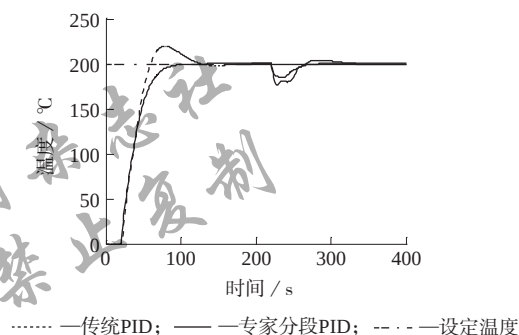


图4 控制器对比仿真曲线

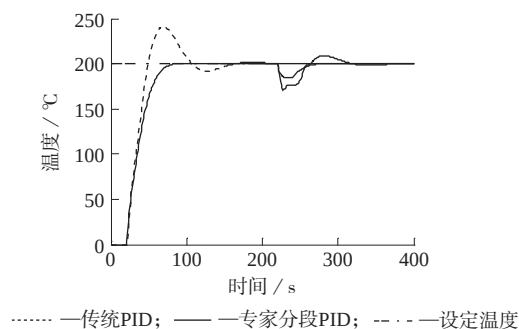


图5 模型失配后控制器对比仿真曲线

由图 4 可知,传统 PID 控制器的超调量、响应速度、到达稳态时间、干扰偏离稳态值、二次稳态时间分别为 19.6℃, 60 s, 195 s, 24℃, 150 s;专家分段 PID 控制器分别为 0.1℃, 120 s, 120 s, 15℃, 60 s;由图 5 可知,当模型失配后传统 PID 控制器的超调量、响应速度、到达稳态时间、干扰偏离稳态值、二次稳态时间分别约为 21.65℃, -10.93 s, 25 s, 5.04℃, 20 s;专家分段 PID 控制器分别约为 0.4℃, -18.4 s, 3 s, 0.7℃, 5 s。综合来看,专家分段 PID 控制器具有超调量小、抗干扰能力强、模型失配

表明:专家分段PID控制算法具有超调小、调节速度快、鲁棒性好及算法易实现的优点,能够满足注塑料筒温度控制需求

参考文献

- [1] 迟晓妮,何俊杰. 基于单神经元自适应PID的注射机料筒温度控制[J]. 塑料科技,2019,47(1):111-114.
Chi Xiaoni, He Junjie. Temperature control of injection machine barrel based on single neuron adaptive PID[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(1):111-114.
- [2] 马跃,杨迎,刘海波,等. 基于变论域模糊PID的混炼造粒机机筒温度控制[J]. 塑料,2018,47(1):122-125,130.
Ma Yue, Yang Ying, Liu Haibo, et al. Temperature control of mixer granulator barrel based on variable universe fuzzy PID[J]. Plastics, 2018, 47(1):122-125,130.
- [3] 党霞. 基于自适应神经网络PID的注塑机温度控制[J]. 合成树脂及塑料,2018,35(6):83-86.
Dang Xia. Temperature control of injection molding machine based on adaptive neural network PID[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2018, 35(6):83-86.
- [4] 王子剑,李庆川. 基于模糊控制的螺杆挤出机温度控制系统设计[J]. 工程塑料应用,2017,45(7):80-85.
Wang Zijian, Li Qingchuan. Design of temperature control system for screw extruder based on fuzzy control[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(7):80-85.
- [5] 胡亚南,张洪兴,丰会萍. 基于模糊神经网络的注塑机料筒温度控制策略[J]. 塑料,2019,48(4):91-95.
Hu Yanan, Zhang Hongxing, Feng Huiping. Temperature control strategy of injection molding machine barrel based on fuzzy neural network[J]. Plastics, 2019, 48(4):91-95.
- [6] 李明辉,杨星奎. 基于内模解耦的注塑机料筒温度控制策略[J]. 包装工程,2018,39(5):141-145.
Li Minghui, Yang Xingkui. Temperature control strategy of injection molding machine barrel based on internal mold decoupling [J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5):141-145.
- [7] 胡亚南,李明辉,霍蛟飞. 基于S7-1200PLC的注射机料筒温度控制系统[J]. 塑料科技,2019,47(12):93-98.
Hu Yanan, Li Minghui, Huo Jiaofei. Barrel temperature control system of injection molding machine based on S7-1200PLC[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(12):93-98.
- [8] 黄鹏,周彦佚. 基于PLC与触摸屏的镀液温度自动控制系统[J]. 电镀与环保,2018,38(4):50-52.
Huang Peng, Zhou Yanyi. Automatic control system of bath temperature based on PLC and touch screen[J]. Electroplating & Pollution Control, 2018, 38(4):50-52.
- [9] 隋涛,孔冬青,刘秋贺. 专家PID控制在矿井提升机直流调速系统中的应用[J]. 中国科技论文,2017,12(2):226-231.
Sui Tao, Kong Lingqing, Liu Qiuhe. The application of expert PID control in DC speed regulation system of the mine hoist[J]. China Science Paper, 2017, 12(2):226-231.
- [10] 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[J]. 塑料,2015,44(3):68-70.
Tao Ximeng, Luo Liang, Liu Zhigui. Temperature control algorithm of injection molding machine barrel based on piecewise PID [J]. Plastics, 2015, 44(3):68-70.
- [11] 程一斌,王祥傲. S7-200PLC与组态王在供胶监控系统设计上的应用[J]. 安徽农业大学学报,2019,46(3):554-558.
Cheng Yibin, Wang Xiangao. Design of glue supply monitoring system based on S7-200 PLC and kingview[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(3):554-558.
- [12] 罗帆,张云,崔树标. 规则自组织模糊PID注塑机料筒温度控制[J]. 工程塑料应用,2015,43(6):65-69.
Luo Fan, Zhang Yun, Cui Shubiao. Temperature control of barrel of regular self-organizing fuzzy PID injection molding machine[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(6):65-69.