

碳酸氢钠喷雾干燥过程的仿真研究

邓益平, 张雷*

(西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500)

摘要:以碳酸氢钠浆料的喷雾干燥过程为研究对象,应用 Aspen Plus 进行模拟计算,经喷雾干燥塔干燥后,所得苏打粉产品符合工业生产要求。通过灵敏度分析得出干燥空气的进口温度变化是影响喷雾干燥过程的主要因素。在此基础上,提出了在 Matlab 中建立以排风温度为主被控量、进风温度为副被控量的控制策略。并通过将单纯串级 PID 控制、复合模糊 PID 控制和带 Smith 预估器的复合模糊双回路串级控制的控制结果进行对比,得出带 Smith 预估器的复合模糊双回路串级控制系统超调小,进入稳定过程较快,控制品质好,是实现喷雾干燥温度控制的一种有效方法,适用于工业生产。

关键词:碳酸氢钠;喷雾干燥;模拟;模糊控制;PID 控制

中图分类号:TQ028

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)06-0210-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.06.045

Simulation study on spray drying process of sodium bicarbonate

DENG Yi-ping, ZHANG Lei*

(College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Taking the spray drying process of sodium bicarbonate slurry as the research object, Aspen Plus is used for the simulation calculation. After drying by the spray drying tower, the obtained sodium bicarbonate powder product can meet the industrial production requirements. Through sensitivity analysis, it is concluded that the change of inlet temperature of dry air is the main factor affecting the spray drying process. On this basis, a control strategy is established in Matlab with the exhaust air temperature as the main controlled quantity and the inlet air temperature as the secondary controlled quantity. By comparing the control results of simple cascade PID control, composite fuzzy PID control and compound fuzzy dual-loop cascade control with Smith predictor, it is shown that the composite fuzzy double-loop cascade control system with Smith predictor exhibits smaller adjustment, faster entry into the stabilization process and better control quality, which is an effective method to achieve spray drying temperature control and suitable for industrial production.

Key words: sodium bicarbonate; spray drying; simulation; fuzzy control; PID control

喷雾干燥技术是将湿物料干燥成粉末状态的一种方法,过程简单,干燥效率高,产品质量好。虽然该技术已发展 1 个多世纪,而我国真正使用该项技术时间不长。在 20 世纪中期,中国首台喷雾干燥机是由吉林染料厂引入的前苏联喷雾干燥机^[1]。紧接着松花江牛奶厂也开始使用干燥奶粉的离心喷雾干燥机^[2]。经过 30 多年发展,我国扭转了喷雾干燥设备靠进口的局面,有的已达到国际先进水平。喷雾干燥技术也逐渐应用于各个领域的工业生产中^[3]。第十六届全国干燥会议的召开,标志着智能、节能、高效、通用和环保的喷雾干燥技术成为了研究者们关注的焦点^[4]。

碳酸氢钠的喷雾干燥过程是碳酸氢钠溶液干燥成苏打粉产品工艺中的重要环节,由其原理和工艺流程可知,干燥塔的进风温度、排风温度、物料进量

和塔内压力等方面是影响该过程的部分因素,其中前两者常作为研究的主要控制变量^[5]。良好的控制方案不仅可以增强装置运行稳定性和安全性,还拥有质量和产量高、运行成本低、环境污染少等优势。常规 PID 的控制方法广泛应用在许多工厂的控温系统中^[6],但是喷雾干燥是一个非线性、大滞后的过程,随机干扰条件多,难以建立精确的数学模型^[7],要将温度等参数实时、准确、优化控制,常规 PID 控制喷雾干燥过程的效果并不是很理想,因此张勇^[8]提出了以排风温度为主被控量,进风温度为副被控量的复合模糊控制策略。但是由于系统存在滞后特性、容易产生超调、控制过程不灵敏等问题,冯颜^[9]便在串级 PID 控制中加入 Smith 预估器,大大降低排风系统的超调量。为了满足智能控制和节能技术 2 方面的要求,本文中提出了加入 Smith 预

收稿日期:2018-11-07;修回日期:2019-04-02

作者简介:邓益平(1993-),女,硕士生;张雷(1967-),男,教授,博士生导师,研究方向为化工过程模拟,通讯联系人,zgc166929@aliyun.com。

估器的复合模糊双回路串级控制方案,并通过仿真实验,比较单纯串级 PID 控制、复合模糊 PID 控制和带 Smith 预估器的复合模糊双回路串级控制分别对碳酸氢钠喷雾干燥过程的控制效果。

1 苏打粉喷雾干燥的模拟

本文中选择的干燥物料为碳酸氢钠浆料,在工业上,对于黏性溶液、悬浮液以至糊状物等可用泵输送的物料,通常选择喷雾干燥技术^[4],干燥介质为空气。由于碳酸氢钠是热敏性物料,因此雾滴与空气通过并流向下的方式迅速进行传热和传质^[10],得到符合要求的产品。

在 Aspen Plus 中建立完整的喷雾干燥模拟流程,如图 1 所示,前面为喷雾干燥部分,后面为气、固分离部分。碳酸氢钠浆料通过泵输送到喷雾干燥塔顶部的雾化器,与喷雾干燥塔顶部的空气接触、混合,通过并流向下的方式进行传热与传质,干燥后的产品由塔底引出,夹带在排放的废气中的细粉,经过旋风分离器和袋滤器分离出气体和固体产品,提高苏打粉产品的收率^[11]。

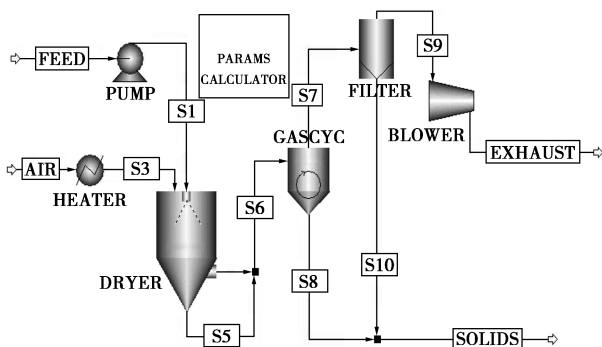
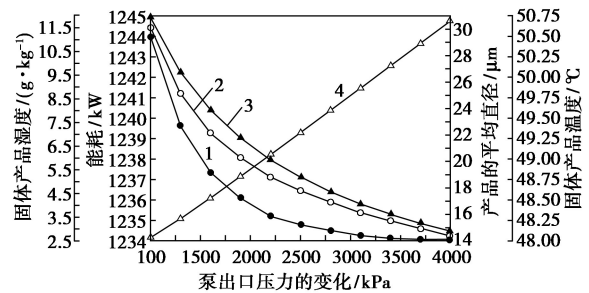


图 1 苏打粉干燥模拟流程

Aspen Plus 模拟结果的准确性受到物性方法选择的影响,当模拟过程中只有碳酸氢钠、水和空气 3 种物质时,可以不考虑水滴成型与颗粒团聚等情况,故选择 IDEAL 体系进行模拟计算^[12]。根据喷雾干燥塔工艺参数的设计,在系统中输入相应的物料流量、空气质量流量和温度等参数,成功运行后,碳酸氢钠浆料经喷雾干燥塔干燥后,所得苏打粉产品温度达到设计要求,水分含量未超出预期范围,粒度分布符合规格要求,总能耗较低。

对喷雾干燥过程进行灵敏度分析,在保证泵的出口压力和空气的质量流量不变的条件下,改变干燥空气的温度。由图 2 所示,随着温度的不断增加,苏打粉产品的平均直径和含水量均逐渐降低,加热

器的电力需求逐渐增加。由此可见,干燥空气的进口温度变化是影响喷雾干燥过程的主要因素。



1—固体产品温度;2—产品平均直径;3—固体产品湿度;4—能耗

图 2 干燥空气进口温度的变化

2 喷雾干燥过程的仿真

2.1 苏打粉喷雾干燥过程的数学模型

喷雾干燥是碳酸氢钠浆料加工成苏打粉工艺中的重要环节,由其原理和工艺流程模拟可知,干燥塔的进风温度、排风温度、物料进量和塔内压力等方面是影响该过程的部分因素,其中前两者常作为研究的主要控制变量^[13]。本文中设计的控制系统是将排风温度作为主被控量,进风温度作为副被控量,蒸汽调节阀开度作为控制量,构成一个串级调节系统。

由于喷雾干燥过程是一个大时滞、容积延迟的工业控制过程,数学模型无法精确建立,因此在满足精度的情况下,采用低阶的传递函数来拟合被控对象^[14]。根据大量实际生产实机测试,系统近似为一阶惯性系统。于是喷雾干燥系统传递函数近似为^[15]:

$$G(s) = (Ke^{-\tau s}) / (Ts + 1)$$

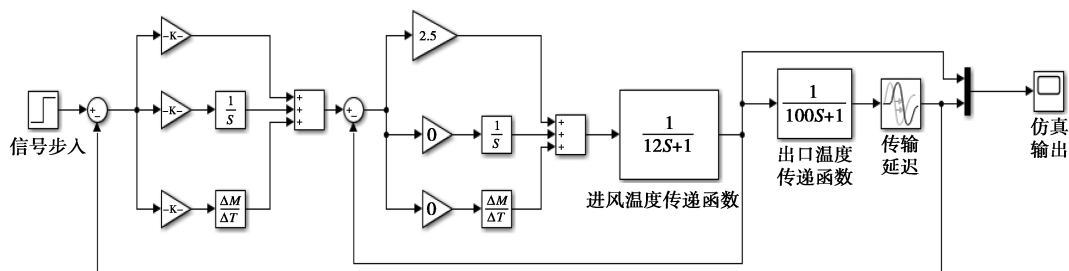
由单位阶跃响应的性质可知^[16], T 为系统的时间常数, τ 为延迟时间。对苏打粉喷雾干燥塔进行阶跃响应测试,得到进风温度反馈系统的延时时间为 0, 时间常数为 12 s, 出口温度反馈系统的延时时间为 50 s, 时间常数为 100 s, 进风温度反馈系统与出口温度反馈系统的数学模型分别如下:

$$G_1(s) = 1 / (12s + 1)$$

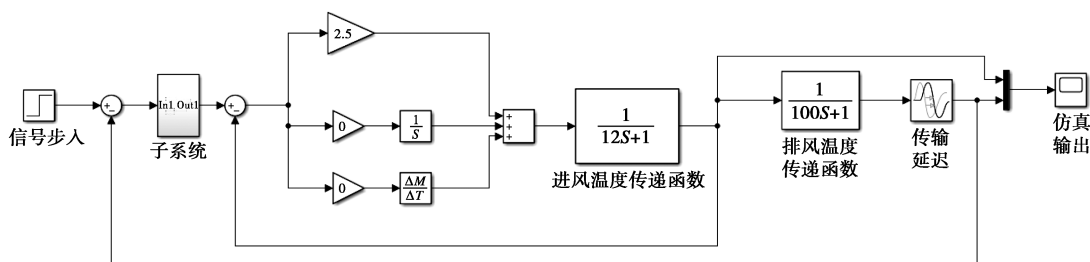
$$G_2(s) = [1 / (100s + 1)] e^{-50s}$$

2.2 喷雾干燥过程的控制模型

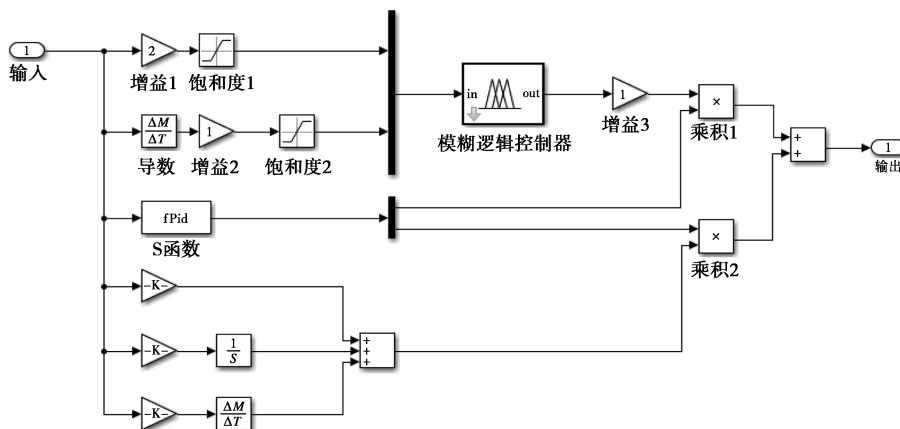
在 Matlab 的 Simulink 模型中分别建立串级 PID 双回路控制模型[图 3(a)], 复合模糊 PID 控制模型[图 3(b)和图 3(c)]和带 Smith 预估器的复合模糊 PID 控制模型[图 3(d)]。



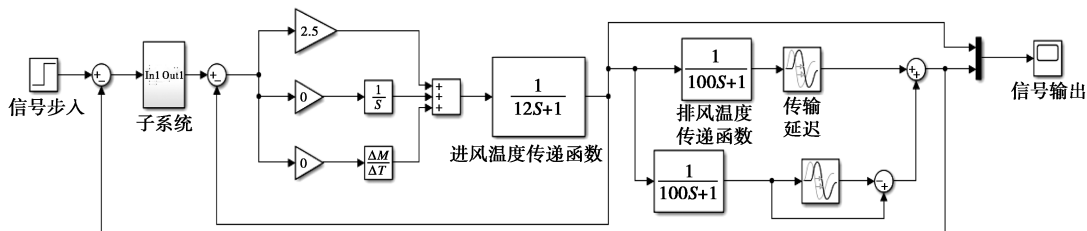
(a) 串级 PID 控制双回路模型



(b) 复合模糊 PID 控制模型



(c) 模糊-PID 内部封装结构



(d) 带 Smith 预估器的复合模糊 PID 控制模型

图 3 3 种不同控制方法的控制模型

串级 PID 双回路控制模型是将 2 个 PID 控制器串联,并通过控制蒸汽阀的开度来调节整个干燥系统的温度,进而实现对整个系统的控制。

复合模糊控制器是由模糊控制器、PID 调节器和参数整定等部分组成^[17]。如图 4 所示,模糊控制器的输入变量为喷雾干燥塔内给定值和实际温度的差值(e)和温差变化率(ec),输出变量为加热装置的供

电电压(u),离散论域均为 $[-5,5]$ 。模糊控制器和 PID 调节器并联,根据校正的参数 a 和 b 的值,对过程对象进行控制,然后通过复合模糊输出,作为下级温度的设定值,不断调整直到达到期望的系统控制性能。除此之外,为了达到更好的柔性调节作用,还在复合模糊 PID 控制系统中创建一个 S-function 函数,用于自动调节模糊控制器和 PID 控制器的加权系数^[18]。

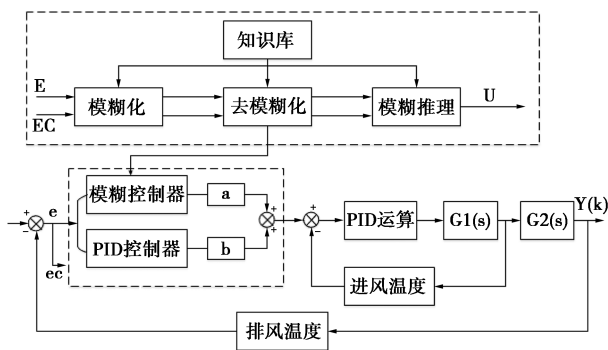


图4 模糊PID控制模型

在喷雾干燥过程中,为了满足输出能够达到动态性能的最佳状态,确定模糊控制规则时,根据专家的控制经验和实际要求,参考控制系统的响应曲线,制定了控制规则表,如表1所示,其中NB表示负大,NS表示负小,ZE表示零,PS表示正小,PB表示正大^[19]。本文中采用mamdani模型,解模糊方法为bisector,在模糊控制编辑窗口建立以温度偏差、温度偏差变化率为输入,阀门开度为输出的模型,再根据表1编辑模糊规则。

表1 控制规则表

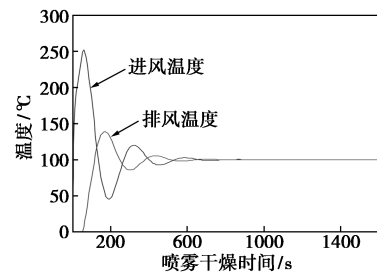
U/E/DE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PB	PS	NB
NS	PB	PS	PS	ZE	NB
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	PB	ZE	NS	NS	NB
PB	PB	NS	NB	NB	NB

通常情况下,喷雾干燥过程延迟滞后现象也非常明显,当干燥塔出口温度传感器的信号送到控制器,运算后驱动调节进风温度的执行器,即使执行器立刻反应,改变出口温度也需要一段时间,因此必定会出现较大的超调,严重时会引起系统不稳定,产品在干燥过程中出现焦糊,给生产过程带来安全性和经济损失^[20]。因此,带有纯滞后环节的控制过程是自动控制领域的难点,Smith预估器便是解决由滞后特性导致超调这类问题的经典方法,因此带Smith预估器的复合模糊PID控制能更好地解决上述问题。

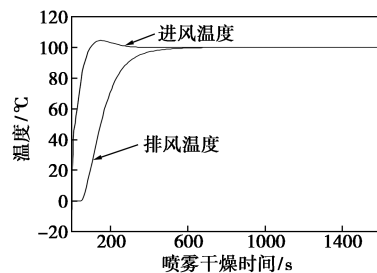
2.3 喷雾干燥过程的仿真实验

通过对3种控制模型分别进行仿真实验,当主调节器为单纯串级PID控制时,可以得到进风温度和排风温度的变化曲线如图5(a)所示,进风温度和排风温度曲线扰动均较大,600s左右达到稳定,超

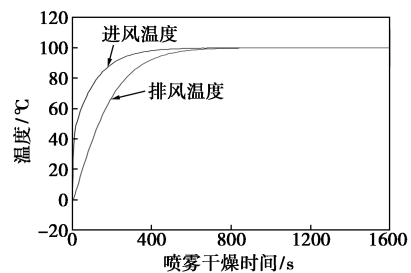
调量大,响应时间较长。而复合模糊PID控制模型中[图5(b)],进风温度经过一开时的跳动变化后,在300s左右达到了稳态值,排风温度的仿真曲线品质较好,超调量小,调节时间短,在500s左右达到稳定。通过以上分析,本控制器就是通过模糊逻辑控制器、S-function和PID控制器三者的共同调节来最终调节喷雾干燥过程中排风温度,控制效果优于单纯的串级PID控制。在带Smith预估器的复合模糊控制模型中[图5(c)],虽然控制对象带有纯滞后特性,但是加入补偿控制后的系统超调量与复合模糊控制比较,进风温度得到明显改善,控制效果更加良好,是三者中最好的控制方案。



(a)



(b)



(c)

图5 3种控制模型仿真实验结果

3 控制方案在干扰条件下的对比

喷雾干燥系统中,温度的干扰来源很多,存在的干扰可能有进风风机的进风量或者蒸汽加热时的蒸汽量发生突变等。采用在Simulink中调用一个Signal Builder输入端,在800~1000s之间加入一个干扰点,来模拟并测试系统的抗干扰性能。

经过 MATLAB 仿真,在控制对象不变的情况下,得到如图 6 所示的仿真结果曲线,3 种控制方法均在温度曲线加干扰的地方出现了很大的波动,单纯串级 PID 控制[图 6(a)]进风和排风温度的波动大,调节时间长,超调量大,抗扰动能力差;复合模糊 PID 控制[图 6(b)]进风温度有一定的波动,但经过 200 s 调整后,进入稳定状态,排风温度响应曲线波动相对较小;带 Smith 预估器的复合模糊 PID 控制[图 6(c)]系统超调最小,进入稳定过程较快,系统的控制品质好。

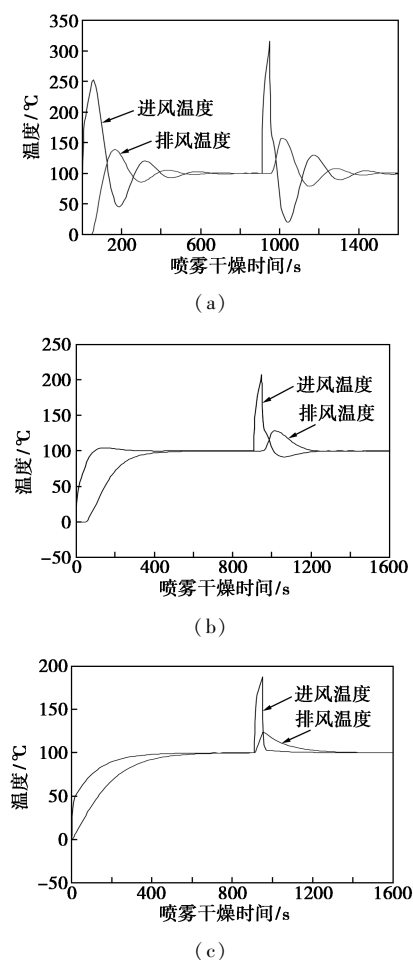


图 6 带干扰的控制模型仿真曲线

4 结论

以喷雾干燥原理和工艺流程为基础,借助 Aspen Plus 模拟了苏打粉喷雾干燥的过程,得到空气温度的变化对喷雾干燥系统具有较大影响。并以苏打粉喷雾干燥的温度控制为研究对象,将排风温度作为主被控量,进风温度作为副被控量,进风蒸汽调节阀开度作为控制量,加入 Smith 预估器,构成一个串级调节系统。再利用控制算法对温度控制数学

模型进行仿真、分析,验证了控制算法符合实际运行工况,比较了单纯 PID 控制、复合模糊 PID 控制与带 Smith 预估器的复合模糊控制对喷雾干燥过程的影响,结果表明,带 Smith 预估器的复合模糊控制的鲁棒性和稳定性较好,控制效果达到预期,适合在喷雾干燥过程控制中推广。在今后的研究课题中,可以运用 BP 神经网络、自适应遗传算法等方法对控制器的参数进行优化,在确保产品质量的同时,达到节能降耗的目的,进一步提高系统的控制品质。

参考文献

- [1] 黄立新,王宗濂,唐金鑫.我国喷雾干燥技术研究及进展[J].化学工程,2001,29(2):51-55.
- [2] 廖传华,王永德,黄振仁.奶粉干燥设备的现状及其研究进展[J].粮油加工与食品机械,2003,(3):55-57.
- [3] Deshmukh R, Wagh P, Naik J. Solvent evaporation and spray drying technique for micro- and nanospheres/particles preparation: A review[J]. Drying Technology, 2016, 34(15): 1758-1772.
- [4] 王喜忠,于才渊.喷雾干燥[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [5] Maas S G, Schaldach G, Littringer E M, et al. The impact of spray drying outlet temperature on the particle morphology of mannitol[J]. Powder Technology, 2011, 213(1): 27-35.
- [6] 任有志,杨亚威,曾谦,等. BP 神经网络 PID 控制器在聚合釜温控中的应用[J]. 现代化工, 2016, 36(2): 165-167.
- [7] 罗贤海,付福琪. 喷雾干燥塔模糊控制模型及仿真[J]. 中国陶瓷, 2000, 36(2): 19-21.
- [8] 张勇. 喷雾干燥过程复合模糊控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
- [9] 冯颜. 麦芽糊精喷雾干燥塔控制系统的研究与设计[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2014.
- [10] 孙兰义. 化工流程模拟实训[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [11] 张敏,张丽丽,王仁人,等. 气流式喷雾干燥的现状与展望[J]. 现代制造技术与装备, 2013, (4): 5-7.
- [12] 陈敏恒,丛德滋. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [13] Maas S G, Schaldach G, Littringer E M, et al. The impact of spray drying outlet temperature on the particle morphology of mannitol[J]. Powder Technology, 2011, 213(1): 27-35.
- [14] 袁玉苹,潘海涛. 阀门生产线控制系统的设计及仿真[J]. 职业, 2012, (15): 63-64.
- [15] 荆红莉,赵鹏,胡大伟. 奶粉喷雾干燥模糊控制器的设计与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(4): 91-93.
- [16] 宋明清,刘彤军. 喷雾干燥过程分析及其 PID 控制仿真[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(12): 35-38.
- [17] 余森,丁廷发. 氧化环境工艺中反硝化反应智能模糊控制器的模拟研究[J]. 现代化工, 2018, 38(2): 206-209.
- [18] 许亮,袁泉,祝岩青,等. 基于 MATLAB 的管式加热炉控制系统设计的研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2014, (11): 23-24.
- [19] 吕宽州,陈素霞,黄全振. 柔性机械臂的轨迹跟踪与振动模糊控制[J]. 工程设计学报, 2015, (1): 78-83.
- [20] 江宏玲,周成,戴新荣,等. 基于 DSP 异步电动机矢量控制系统仿真与实验研究[J]. 电气传动, 2017, 47(6): 14-18. ■