

基于模糊设定值加权 IMC-PID 算法的纸张定量控制

陈彦涛

(安阳工学院 电子信息与电气工程学院, 安阳 455000)

摘要: **目的** 造纸机定量控制系统存在时滞性大、非线性和干扰多等困难, 传统的 PID 控制动静态性能差, 已无法满足越来越高的生产需求, 为了减小纸张定量的偏差拟研究新的控制策略。**方法** 在传统内模控制和内模 PID (IMC-PID) 控制的基础上, 结合模糊算法, 设计模糊设定值加权 IMC-PID 算法控制系统。该控制算法通过在线整定内模 PID 控制器比例作用部分的设定值加权系数, 改善控制系统性能指标, 并将该控制算法应用到纸张定量中, 与传统控制算法进行对比。**结果** 传统 PID 控制与内模 PID 控制相比较, 基于模糊设定值加权 IMC-PID 算法具有良好的跟踪性和抗干扰能力等。**结论** 基于模糊设定值加权 IMC-PID 算法可有效控制造纸机定量控制系统, 能够明显提高系统的控制精度等性能指标。

关键词: 纸张定量; 大时滞性; 内模控制; 模糊控制; 内模 PID 控制; 设定值加权系数

中图分类号: TS736 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)21-0157-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.028

Paper Quantitative Control Based on Fuzzy Set Value Weighted IMC-PID Algorithm

CHEN Yan-tao

(School of Electronic Information & Electrical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the new control strategy in order to reduce the paper quantification deviation, aiming at the difficulty of large time delay, nonlinearity and much interference in the quantitative control system of paper machine, and that the traditional PID control can no longer meet the increasingly higher production demand and good dynamic and static performances. On the basis of the traditional internal model control and internal model PID (IMC-PID) control, the fuzzy set value weighted IMC-PID algorithm control system was designed by combining the fuzzy algorithm. This control algorithm improved the performance index of the control system by setting the weighted coefficient of the set value of the proportional function part of the internal model PID controller online, and it was applied in the paper quantification for the comparison with the traditional control algorithm. Based on the comparison of traditional PID control and internal model PID control, the weighted IMC-PID algorithm based on fuzzy set value had good tracking ability and anti-jamming ability. The weighted IMC-PID algorithm based on fuzzy set value can effectively control the quantitative control system of paper machine, and can obviously improve the control accuracy and other performance indexes of the system.

KEY WORDS: paper quantification; large time delay; internal model control; fuzzy control; internal model PID control; set value weighted coefficient

随着社会的发展, 人类和机器对纸张的品质提出了越来越高的要求。尤其一些高速印刷机器为了能够实现快速印刷, 要求纸张的厚度等能够均匀分布^[1]。纸张的均匀度主要取决于纸张的定量控制, 若无法对它进行有效的控制, 将严重影响纸张的品质, 甚至影响到对纸张的使用, 造成纸张的浪费。造纸过程是一个

非常复杂的物理化学过程, 其过程控制系统中又广泛存在着时滞现象, 增加了控制的难度。此外, 纸张定量控制受很多因素的影响 (如非线性因素等), 无法得到准确的数学模型^[2], 因此, 传统的 PID 控制将无法满足纸张定量控制系统性能指标的要求。针对被控对象的特性, 结合纸张定量控制的难点, 文中在传统

收稿日期: 2018-06-08

作者简介: 陈彦涛 (1982—), 男, 硕士, 安阳工学院讲师, 主要研究方向为控制理论与控制工程。

的 PID 控制的基础上引入了内模及模糊理论算法,设计了模糊设定值加权 IMC-PID 算法。其中,将传统的 PID 控制算法的比例-积分-微分的 3 个参数由只含有 1 个未知量的表达式表示。另外,通过模糊控制来在线调整比例部分的参数,能够有效改善控制系统的性能,提高了纸张定量控制系统动静态性能指标以及鲁棒性等。

1 纸张定量控制系统的难点与抄纸过程

1.1 定量难点

在实际造纸过程中,很多环节都会影响纸张的定量精度如纸浆浓度、浆料流量、水分与纸张定量间的耦合以及生产过程周围的环境和自身的变化等。以上这些干扰在控制过程中将严重影响定量精度,同时也给控制带来了难度,常规的控制方法将很难满足要求。其中主要表现在以下几个方面^[3]。

1) 在整个抄纸过程中,从纸浆到卷纸形成纸品的整个过程中,由于定量控制系统在纸张卷取处到浆料调节阀出的距离,即纸张定量的监测点到系统执行机构的距离比较长由此带来的诸多问题。如:控制回路存在时滞性,滞后时间取决于造纸机车速,同时也伴随着很多复杂的扰动等。

2) 由于纸张定量的控制一般通过改变定量的阀门开度而纸张水分控制通过主蒸汽阀门开度来进行调节的。但是无论调节那个阀门开度都会改变另一个控制,由此可见,纸张定量和水分控制系统之间存在着耦合,通常需要解耦。由于造纸过程的复杂性,精确模型很难建立,因此,通过解耦很难满足要求。

3) 抄纸过程存在时变和非线性等,4ECE 使整个过程的很多环节将无法获得准确的数学模型。由于现在很多智能算法都需要有过程控制精确的数学模型,因此很多智能控制器都无法使用(如自适应控制等)。

以上这 3 点主要将影响着整个纸张的定量过程,进而影响纸张的质量,因此,文中将利用一些对被控模型要求不高的智能算法来提高整个纸张定量控制过程的精度、响应速度和抗干扰性等。

1.2 抄纸过程

纸张抄造过程工艺流程见图 1,它展示了纸的整个形成过程,由抄纸过程工艺流程图可知,整个过程主要由浆泵、除砂器、流浆箱、网部、压榨和定量仪等诸多环节构成^[4]。首先,将成浆池里的成浆经过白水池水稀释成一定的浓度送到稳浆箱,并经过除渣和筛选;之后将其喷射到铜网上,然后又经铜网尾部的吸水箱及伏辊脱水形成初纸;最后,经过压榨、烘干、施胶、压光和卷取便形成成品纸。

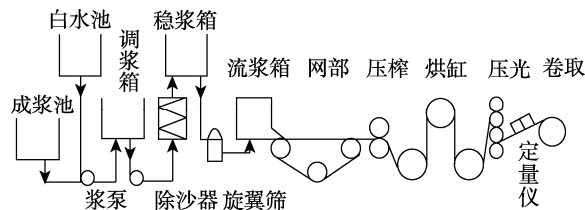


图 1 抄纸过程工艺流程

Fig.1 Process flow chart of papermaking process

2 模糊设定值加权 IMC-PID 的纸张定量控制系统

针对常规 PID 控制器的局限性,以及被控对象的特点,结合模糊控制和内模控制的优点,提出了模糊设定值加权的内模 PID (IMC-PID) 控制器,其结构见图 2。在常规 PID 控制的比例积分微分环节中,比例部分影响着一个控制系统中的性能。为此,文中在该环节中引入了模糊控制的思想,能够有效克服传统 PID 控制的不足。系统根据误差 e 和误差变化率 e_c 来在线调整 f 的大小,并在此基础上叠加 w 值, w 值为 0 到 1 之间的某个固定值^[5]。图 2 所示的控制系统,结合了 2 种控制算法的各自优点(模糊控制理论与 IMC-PID 控制),其更适合纸张定量控制系统,改善其控制系统的性能,改善纸张的质量。

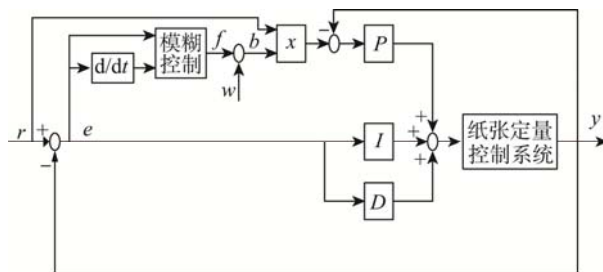


图 2 模糊设定值加权 IMC-PID 纸张定量控制原理

Fig.2 Quantitative control principle of fuzzy set value weighted IMC-PID

3 模糊设定值内模 PID 控制器设计

3.1 内模控制

传统的内模控制结构可以分为 2 部分,即内部模型和内模控制器。在内模控制中,将过程模型与被控对象作对比,两者输出的差值用于反馈在整个内模控制器的设计过程中,仅有 1 到 2 个整定参数,与 PID 相比,简化了调节规律,同时满足了所需的系统鲁棒性。在实际生产中,有些系统的模型具有不确定性,而内模控制设计考虑到了这一点,可以消除控制中出现的一些不可测干扰的影响^[6]。通常采用等效的控制结构图来描述其原理,见图 3。

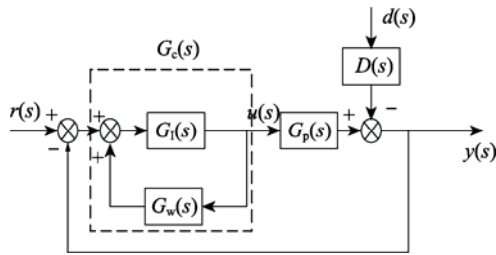


图 3 内模控制等价结构

Fig.3 Equivalent structure of internal model control

内模控制的等价结构见图 3, 其中分别包含了内模控制器、被控对象、过程模型、扰动通道传递函数等, 即: $G_I(s)$, $G_p(s)$, $G_w(s)$, $D(s)$ 等。图 3 中的输入与输出之间存在以下关系:

$$G_c(s) = \frac{G_I(s)}{1 - G_I(s)G_w(s)} \quad (1)$$

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (2)$$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{D(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (3)$$

可以得到内模系统的传递函数:

$$y(s) = \frac{G_I(s)G_p(s)}{1 + G_I(s)[G_p(s) - G_w(s)]} r(s) + \frac{[1 - G_I(s)G_w(s)]}{1 + G_I(s)[G_p(s) - G_w(s)]} D(s) \quad (4)$$

为了获得理想的内模控制器, 整个设计过程可以分为 2 步。

1) 过程模型 $G_w(s)$ 的分解。

$G_w(s)$ 可以分解成 2 项。

$G_{w+}(s)$ 和 $G_{w-}(s)$ 且 $G_w(s) = G_{w+}(s) \cdot G_{w-}(s)$ 。

其中, $G_{w+}(s)$ 为相平面 $s > 0$ 的平面, 即: 右半平面内的零点和时滞所组成的部分; 相反, 剩下的部分传递函数为 $G_{w-}(s)$ ^[7]。

2) 内模控制器设计。

内模控制器设计为:

$$G_{IMC}(s) = \frac{G_w(s)f(s)}{G_{PID}(s)} \quad (5)$$

其中 $f(s) = \frac{1}{(1 + \alpha s)^n}$ 为低通滤波器。

3.2 内模 PID 控制 (IMC-PID)

对于文中的控制系统, 根据实际经验可以把它等效成一阶加纯滞后的模型:

$$G'(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (6)$$

式中: K 为过程增益; L 为滞后时间; T 为时间常数。

对于时滞环节, 采用一阶 Pade 近似处理得^[8]:

$$e^{-Ls} = \frac{1 - 0.5Ls}{1 + 0.5Ls} \quad (7)$$

$$G_c(s) = \frac{1}{K} \cdot \frac{0.5LTs^2 + (T + 0.5L)s + 1}{(\lambda + 0.5L)s} \quad (8)$$

式 (8) 也可通过等效变换为:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

联立式 (8) 和式 (9) 可得:

$$K_p = \frac{T + 0.5L}{K(\lambda + 0.5L)} \quad (10)$$

$$T_i = T + 0.5L \quad (11)$$

$$T_d = \frac{LT}{2T + L} \quad (12)$$

3.3 模糊控制

模糊控制 (Fuzzy Control) 较于传统 PID 控制来说对被控对象的要求不需要那么准确的被控对象, 最早由 L.A.Zadeh 提出^[9]。这样可以大大减少设计时的工作量。此外, 对那些非线性、时滞、大惯性的被控对象, 模糊控制也表现出强大的能力。

1) 模糊控制的结构。Fuzzy Control 系统的框架可以大致分为以下几个的部分, 分别为定义变量、模糊化、规则库、推理和去模糊处理, 这 5 个部分都是整个系统的重要部分, 这是系统设计时缺一不可。其中, 最为重要的是规则库的制定, 其制定的好坏将决定着系统控制指标的优劣^[10]。通常, 都是通过现场工作人员总结得出。其工作原理^[11]: 首先进行模糊处理, 根据模糊输入信号, 在数据库和规则库的作用下, 利用模糊推理, 得到控制器的输出, 并将其信号做去模糊处理送给被控对象。一般的模糊控制系统见图 4。

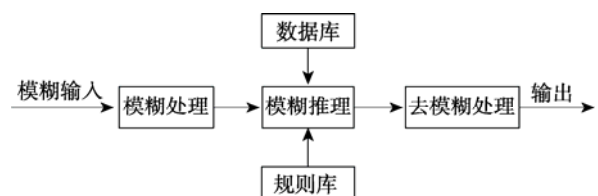


图 4 模糊控制概念

Fig.4 Fuzzy control concept

2) 模糊控制器维数。Fuzzy Control 系统的维数一般按照输入变量的个数来决定, 一个输入称为一维模糊控制器, 2 个输入 (即误差和误差的导数) 称为二维模糊控制器, 并以此类推^[12]。如图 5 所示给出了一维到三维的模糊控制器, 即图 5a, b, c。理论上, 维数越高, 控制精度就越好, 但是系统实现起来也越困

难。通常,只采用二维模糊控制器,以误差和误差的导数作为输入,完全能够实现系统的精确控制,且容易实现设计^[13]。

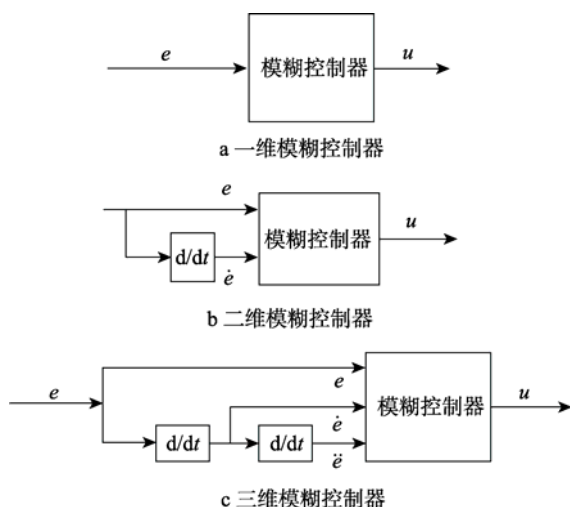


图5 模糊控制器结构
Fig.5 Fuzzy controller structure

3.4 模糊设定值加权 IMC-PID 控制器设计

针对传统 PID 控制的不足,并考虑到其中的比例环节对整个控制系统的影响,对传统 PID 控制器做了如下更改,即^[14]:

$$u(t) = K_p e_p(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

式中: $e_p(t) = br(t) - y(t)$, $r(t)$ 和 $y(t)$ 分别为系统的设定值输入和输出。

文中根据系统误差及误差的变化率来在线调整 b 的大小,令 $b(t) = w + f(t)$, $0 < w \leq 1$, 其中, $f(t)$ 为输出。根据模糊控制理论的设计要求,对输入输出变量都采用了三角函数的隶属度函数,根据实际经验可知,取误差及误差的变化率和输出变量的论域都取在 $[-1, 1]$ 之间。定义为 {NVB, NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB, PVB}, 分别对应{负极大、负大、负中、负小、零、正小、正中、正大、正极大}。根据实际经验及参考文献[5],设计出误差与输出之间,以及误差变化率与输出之间的控制规则见表 1。

表1 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rule

e	e_c				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NVB	NB	NM	NS	ZO
NS	NB	NM	NS	ZO	PS
ZO	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PVB

4 仿真结果与分析

参考文献[15],从放浆闸门开度变化到卷取处纸张定量变化过程可用式(1)表达,并得到纸张定量控制系统的近似模型:

$$G(s) = \frac{1.13}{2.42s + 1} e^{-8s} \quad (14)$$

仿真结构见图 6。从图 6 中可以看出,文中提出的方法(模糊设定值加权的内模 PID 控制器)较传统的控制(如 PID 控制和内模 PID 控制等)具有明显的优势性能,如:上升时间快,超调量小等。同时考虑到系统的抗干扰的性能,在仿真时间为 150 s 时加入扰动,由实际仿真实验可知,文中的方法能够最先恢复到设定值,其抗干扰能力要比传统控制的强。

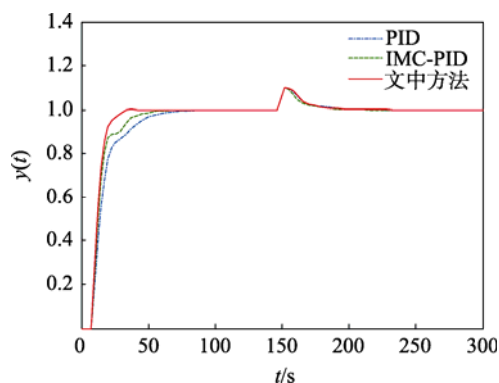


图6 单位阶跃仿真曲线
Fig.6 Unit step simulation curve

由于纸张定量控制回路中存在很多复杂的干扰,为了验证算法的鲁棒性能,将被控制对象的模型参数进行如下调整,将对象纯滞后时间常数 L 增大 20%,系统时间常数 T 减小 20%,开环增益 K 增大 15%。在模型失配的情况下,3 种控制算法的仿真结果见图 7。由图 7 可知,模糊设定值 IMC-PID 控制在参数摄动的情况下,仍然表现出强大的性能,具有良好的鲁棒性和抗干扰能力。

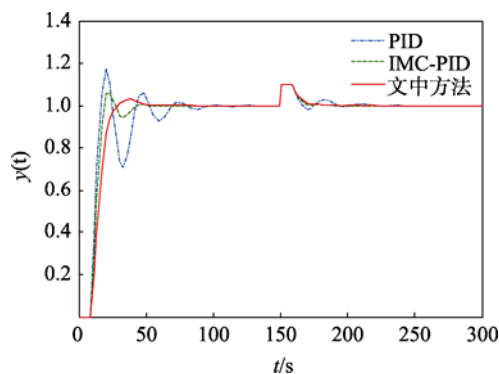


图7 模型失配时动态响应曲线
Fig.7 Dynamic response curve of model mismatch

5 实际运行情况

文中的抄纸流程的控制系统已经在很多地方成功运用。某地的抄纸厂 1760 长网纸机 60 s 的纸张定量纵向分布曲线见图 8。该厂纸机能够稳定连续地生产 52 g/m^2 新闻纸。在标准中定量的波动范围在 $-3 \sim 2 \text{ g/m}^2$ 之间, 运用该自动控制系统后, 定量的波动范围基本控制在正负 0.5 g/m^2 范围以内, 明显地提高了纸张定量的精度。

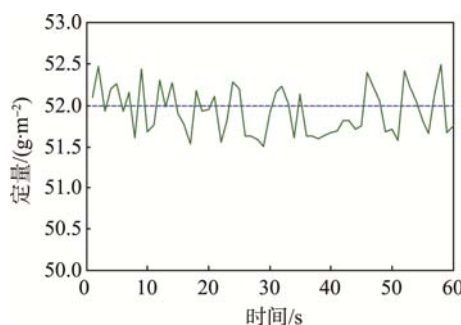


图 8 稳定工况下定量纵向分布曲线
Fig.8 Quantitative longitudinal distribution curve under steady working condition

6 结语

纸张定量控制系统是一个复杂的系统, 性能好坏直接决定了纸张的品质。在针对被控对象特性的基础上, 提出了模糊设定值加权 IMC-PID 控制算法。经过实际仿真可知, 文中提出的控制算法与内模 PID 控制和常规 PID 控制相比, 系统的上升时间、调节时间、超调量都显著减小, 提高了控制系统的鲁棒性, 通过实际运用, 明显提高了纸张的定量精度, 同时也验证了在实际应用的正确性。

参考文献:

- [1] 胡亚南, 马文明, 王孟效. 基于 FNN 解耦纸张定量水分控制策略的研究与应用[J]. 中国造纸, 2017, 36(7): 48—53.
HU Ya-nan, MA Wen-ming, WANG Meng-xiao. Research and Application of Basis Weight and Moisture Content Control Strategy Based on FNN Decoupling[J]. Chinese Paper Making, 2017, 36(7): 48—53.
- [2] 李刚阳, 李红星. 增益自适应神经元控制及其在纸张定量控制中的应用[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2005, 19(2): 74—77.
LI Gang-yang, LI Hong-xing. Neuron Control With Adaptive Adjusting Gain and Its Application to Paper Basis Weight Control[J]. Journal of Beijing Union University(Natural Sciences), 2005, 19(2): 74—77.
- [3] 蒋向军, 杨建桥, 李英春, 等. 模糊自整定 PID 在造纸定量控制中的应用[J]. 黑龙江造纸, 2009, 37(1): 14—17.
JIANG Xiang-jun, YANG Jian-qiao, LI Ying-chun, et al. The Application of Fuzzy Auto-tuning PID in the Paper Basis Weight Control[J]. Heilongjiang Pulp & Paper, 2009, 37(1): 14—17.
- [4] 汤伟, 施颂椒, 王孟效. 大时滞过程自整定 PID 及其在定量控制中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(4): 559—562.
TANG Wei, SHI Song-jiao, WANG Meng-xiao. Auto-Tuning PID for Large Time-Delay Processes and Its Application to Paper Basis Weight Control[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2002, 36(4): 559—562.
- [5] 葛晓静, 梁伟平. 基于模糊加权 IMC-PID 锅炉主汽温度控制仿真[J]. 仪器仪表用户, 2014, 21(6): 31—34.
GE Xiao-jing, LIANG Wei-ping. Simulation of Main Steam Temperature Control of Boiler Based on Fuzzy Weighted IMC-PID[J]. Instrument and Instrument User, 2014, 21(6): 31—34.
- [6] 聂盼盼. 自适应模糊内模控制在发酵系统中的应用研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
NIE Pang-pang. Application of Adaptive Fuzzy Internal Model Control in Fermentation System[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [7] MOUSA H M, KOUTB M A, EI-ARABY S M, et al. Design of Optimal Fuzzy Controller for Water Level of U-Tube Steam Generator in Nuclear Power Station[J]. Journal of American Science, 2011, 7(4): 20—33.
- [8] 赵志斌, 文新宇. 内模控制及其原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
ZHA Zhi-bing, WEN Xin-yu. Internal Model Control and Its Principle[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [9] 刘志成, 孙大刚, 梁建宗. 气动人工肌肉仿生行走机构模糊 PID 控制[J]. 工业机械, 2012, 43(5): 29—33.
LIU Zhi-cheng, SUN Da-gang, LIANG Jian-zong. Fuzzy PID Control of Pneumatic Artificial Muscle Bionic Walking Mechanism[J]. Industrial Machinery, 2012, 43(5): 29—33.
- [10] YANG Ben-kun, BIAN Xin-qian, GUO Wei-lai. Application of Adaptive Fuzzy Control Technology to Pressure Control of a Pressurizer[J]. Journal of Marine Science & Application, 2005, 4(1): 39—43.
- [11] 刘慧博, 王静, 吴彦合. 无刷直流电机模糊自适应 PID 控制研究与仿真[J]. 控制工程, 2014, 21(4): 583—587.
LIU Hui-bo, WANG Jing, WU Yan-he. Study and Simulation of Fuzzy Adaptive PID Control of Brushless DC Motor[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(4): 583—587.
- [12] 张嵩. 基于神经内分泌反馈机制的模糊 PID 串级主汽温度控制系统研究[D]. 北京: 华北电力大学,

- 2012.
- ZHANG Song. Fuzzy PID Cascade Main Steam Temperature Control System Based on Neuroendocrine Feedback Mechanism[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [13] 黄友锐. PID 控制器参数整定与实现[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- HUANG You-rui. PID Controller Parameters Setting and Implementation[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [14] 侯明冬, 张井岗, 赵志诚. 一种具有设定值加权的 IMC-PID 控制方法[J]. 智能系统学报, 2006, 1(2): 84—88.
- HOU Ming-dong, ZHANG Jing-gang, ZHAO Zhi-cheng. An IMC-PID Control Method with Set-point Weight[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2006, 1(2): 84—88.
- [15] 单文娟, 汤伟, 王孟效, 等. 基于分数阶 PID 的纸张定量双自由度 Smith 预估控制[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 143—147.
- SHAN Wen-juan, TANG Wei, WANG Meng-xiao, et al. Two-degree-of-freedom Smith Predictor Based on Fractional Order PID Controller in Paper Basis Weight[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 143—147.