

基于分数阶 PID 的纸张定量双自由度 Smith 预估控制

单文娟¹, 汤伟¹, 王孟效¹, 刘炳²

(1. 陕西科技大学, 西安 710021; 2. 华为西安研究所, 西安 710077)

摘要: **目的** 研究纸张定量控制回路中的大时滞控制策略, 减小纸张定量偏差。**方法** 在传统 Smith 预估器的基础上, 结合分数阶 PID 算法, 设计由常规 PID 控制器和分数阶 PID 控制器组成的双自由度 Smith 预估控制系统, 完成设定值跟踪和负载扰动的独立控制。设定值跟踪采用传统 Smith 预估控制器, 负载扰动采用具有抗干扰和强鲁棒性的分数阶 PID 控制器。将控制算法应用到纸张定量中, 并与传统控制算法相比较。**结果** 相对于传统 Smith 控制, 基于分数阶 PID 的双自由度 Smith 预估控制的设定值跟踪及抗扰性能更优, 在纸张定量控制过程中, 将定量偏差减少到 $\pm 1.6 \text{ g/m}^2$ 。**结论** 基于分数阶 PID 的双自由度 Smith 预估器可有效控制时滞, 模型失配时具有较好的鲁棒性, 可有效提高定量回路的控制精度。

关键词: 纸张定量; 分数阶 PID; 双自由度; Smith 预估器

中图分类号: TS736 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0143-05

Two-degree-of-freedom Smith Predictor Based on Fractional Order PID Controller in Paper Basis Weight

SHAN Wen-juan¹, TANG Wei¹, WANG Meng-xiao¹, LIU Bing²

(1. Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. HUAWEI Xi'an Research Institute, Xi'an 710077, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the paper basis weight deviation by studying the large time delay control strategy in the paper basis weight control loop. On the basis of traditional Smith predictor and combined with fractional order PID algorithm, a two-degree-of-freedom Smith predictor composed of traditional PID controller and fractional order PID controller was designed to independently control set value tracking and load disturbance. Set point tracking adopted traditional Smith predictor. Fractional order PID controller with strong anti-interference and robustness was served for load disturbance. The control algorithm was applied in the paper basis weight and compared with the traditional control algorithm. With respect to traditional Smith control, the set value tracking and anti-interference of two-degree-of-freedom Smith predictor based on fractional order PID were more excellent. In the process of paper basis weight control, the paper basis weight deviation was reduced to $\pm 1.6 \text{ g/m}^2$. The two-degree-of-freedom Smith predictor based on fractional order PID can effectively control time delay. With its good robustness when the model is mismatched, the control accuracy of paper basis weight control loop can be effectively improved.

KEY WORDS: paper basis weight; fractional order PID; two-degree-of-freedom; Smith predictor

消费者对纸品质要求的提高和高速印刷机的引入对纸张纤维的匀度分布提出了更加严格的要求。纸张匀度主要反应在定量分布上, 如果纸张定量分布差异太大, 导致纸幅的厚度分布不均, 就难以顺利通过高速印刷机完成正常印刷, 经常出现“卡纸”现象, 严重影响印刷效率和质量^[1-2], 因此, 定量是纸张质量控制的重要内容, 但在抄纸过程中定量控制普遍存在

时滞性。造成定量过程的时滞主要是纸张定量检测点(纸张卷取处)与执行机构(定量调节阀, 流浆箱进浆口管道上)之间的距离较长, 滞后时间根据纸机车速的不同大约为一分钟到十几分钟不等^[3]。高速宽幅纸机, 车速可达 1500 m/min 左右, 纸张定量回路中滞后较小, 在设计时易达到控制要求。中小企业普遍应用的老纸机工艺相对落后, 对于车速小于 600 m/min

收稿日期: 2017-01-11

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划(2012KTCQ01-19); 陕西省重点科技创新团队计划(2014KCT-15)

作者简介: 单文娟(1986—), 女, 陕西科技大学博士生, 主要研究方向为轻化工过程建模及控制。

的纸机,时滞较大,难以控制,且抄纸过程自身的时变非线性因素导致抄纸过程难以得到精确的数学模型^[4-5]。同时,纸机运行时间不固定和扰动变量无法直接测得,进一步增加了纸张定量时滞控制的难度。

Smith 预估器对大时滞问题具有良好的控制效果,因而得到比较多的应用^[6],但传统 Smith 预估器要求模型精确,在存在扰动的情况下,模型失配会导致系统的鲁棒性变差,且由同一个控制器调节系统的设定值响应和负载扰动响应。考虑到定量控制存在的大时滞特性及对算法的实时性要求,需要设计鲁棒性强具有自整定功能的控制算法是纸张定量过程的关键。

分数阶 PID 控制器是在常规 PID 基础上改进而来的,将积分、微分的阶次推广到分数范围^[7],参数调节范围扩大,比传统的 PID 控制器更能灵活准确地控制受控对象,鉴于此,文中采用双自由度 Smith 预估器,将设定值跟踪和负载扰动分别独立控制。设定值跟踪采用传统 Smith 预估控制器,解决预估器对数学模型要求精确的问题。负载扰动采用具有抗干扰能力和强鲁棒性的分数阶 PID 控制器,提高系统的适应能力,降低建模误差和对象自身参数摄动等因素对系统稳定性的影响。从而克服抄纸过程定量控制系统的时变纯滞后等特性,满足消费者和高速印刷机对纸张定量均匀分布的严格要求。

1 被控对象数学模型

抄纸的定量过程是一个典型的大时滞过程,从放浆闸门开度变化到卷取处纸张定量变化过程的模型,可用典型的带有时间延迟的一阶模型 FOPDT(First Order Plus Dead Time)表示^[8]。

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (1)$$

式中: $G(s)$ 为控制对象; K 为对象静态增益; T 为惯性时间; L 为纯滞后时间。对国产的非高速纸机,纯滞后时间常数一般是系统时间常数的 3 倍以上,是典型的大滞后过程,时滞控制具有一定的难度。

对于 FOPDT 模型难以获得精确地参数,可采用实验建模法探求对象的近似数学模型。针对试点造纸厂车速为 450 m/min,定量为 66 g/m²,定量波动范围在 ±2 g/m² 的造纸过程,在定量回路相对稳定、控制算法采用常规 PID 控制且控制参数已知的情况下,将造纸车间纸张定量的设定值上调 0.05 个百分点,记录此后浓度测量值的数据,并把这些数据用 Matlab 进行拟合,得到一条近似 S 形曲线,见图 1,可认为此 S 形曲线是 FOPDT 模型的近似阶跃响应曲线。根据此响应曲线辨识被控对象模型,具体参数辨识过程如下所述。

1) 在变化速度最快 ($t=L$) 处作一切线。其切线在水平线 1 上的截距发生在 $t=T+L$ 处;系统响应 $y(t)$

在切点时刻达到终值的 39.3%。

2) 系统输出 $y(t)$ 从原来的稳态值 y_0 达到新的稳态值 $y(\infty)$, 比例增益 K =幅值增量/阶跃信号幅值增量,通过实验建模法,由曲线在线辨识得到: $K=1.13$, $T=2.42$, $\tau=8$ 。定量回路数学模型近似为:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1.13}{2.42s+1} e^{-8s} \quad (2)$$

式中: $Y(s)$ 为定量; $R(s)$ 为放浆闸门开度。

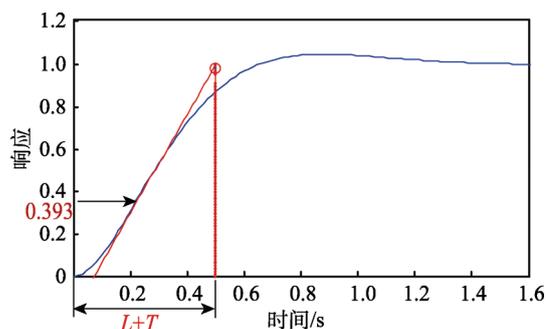


图 1 FOPDT 模型近似阶跃响应曲线

Fig.1 Approximate step response curve of FOPDT

2 控制算法设计

在传统 Smith 控制算法上,采用改进的双自由度 Smith 预估控制系统,针对纸张定量的纯滞后和对象自身参数摄动等因素,采用双控制器方案,对设定值响应和负载扰动单独控制。保证系统能够对设定值进行较好的跟踪,同时有效地对扰动进行抑制。

2.1 双自由度 Smith 预估系统

双自由度 Smith 预估器结构见图 2, $R(s)$ 为系统输入, $Y(s)$ 为系统输出, $D(s)$ 为扰动输入, $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$ 为双控制器, $G(s)=G_p(s)e^{-Ls}$ 为实际过程。在理想情况下, $G^*_p(s)=G_p(s)$, $L^*=L$, $D^*(s)=D(s)$, 图 2 可等效为图 3, 可分为上下 2 部分, 其中, 控制器 G_{c1} 对 $G_p(s)$ 闭环控制, 控制设定值响应; 下半部分对应于负载扰动响应。

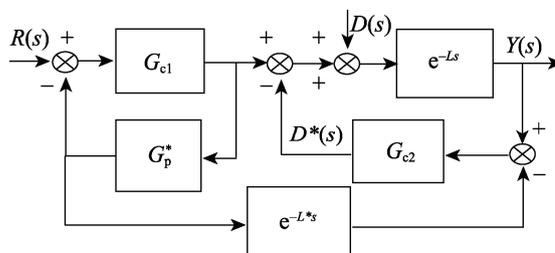


图 2 双自由度 Smith 预估器结构

Fig.2 Structure of Smith predictor with two degree of freedom

传统 Smith 控制采用单控制器,系统难以同时优化设定值响应与扰动响应。双自由度 Smith 预估控制采用可独立设计的双控制器 $G_{c1}(s)$ 和 $G_{c2}(s)$ 分别控制

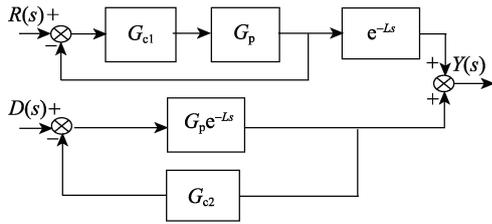


图 3 模型准确时等效结构
Fig.3 Equivalent structure diagram

这 2 种性能指标, 在保证闭环系统不仅能快速进行设定值跟踪, 并有效抑制负载扰动。

2.2 双控制器设计

在 $G_{c1}(s)$ 和 $G_{c2}(s)$ 的设计中, 要考虑到 CD 定量控制存在的时变时滞特性及对控制器的实时性要求, 对控制器需要寻找或设计鲁棒性强、运算速度快的控制算法或控制策略, 实现对具有类似特性的单回路时滞过程的有效控制。

2.2.1 设定值跟踪控制器设计

当模型准确时, 设定值跟踪回路不含纯滞后, 由控制器 $G_{c1}(s)$ 和被控对象不含纯滞后的 $G_p(s)$ 组成, 控制器设计相对容易, 文中采用常规 PID 控制器, $G_{c1}(s)$ 可表示为:

$$G_{c1}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

根据大林算法设计控制器 $G_{c1}(s)$, 令系统传递函数:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{\alpha s + 1} e^{-Ls}, \quad (\alpha \text{ 为大于 } 0 \text{ 的可调参数}) \quad (4)$$

根据图 2 计算系统传递函数代入式(4), 化简后得到:

$$G_{c1} = \frac{1}{\alpha s G_p(s)} \quad (5)$$

针对被控模型 $G(s) = \frac{K}{T_s s + 1} e^{-Ls}$, 其中, $G_p(s) = \frac{K}{T_s s + 1}$,

可求得控制器 $G_{c1}(s)$ 的比例环节 $K_p = \frac{T}{\alpha K}$, 积分环节 $T_i = T$, 微分环节 $T_d = 0$ 。控制器 $G_{c1}(s)$ 可表示为:

$$G_{c1} = \frac{T}{\alpha K} \left(1 + \frac{1}{T_s} \right) \quad (6)$$

可以看出, 在被控对象数学模型确定后, 控制器 $G_{c1}(s)$ 只随 α 变动, 参数整定比较容易。

2.2.2 干扰衰减控制器设计

在负载扰动控制回路中, 由抗干扰控制器 $G_{c2}(s)$ 和被控对象 $G_p(s)e^{-Ls}$ 组成, 闭环传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)e^{-Ls}}{1 + G_{c2}(s)G_p(s)e^{-Ls}} \quad (7)$$

由于闭环特征方程中含纯滞后项 e^{-Ls} , 增加了控

制器 $G_{c2}(s)$ 设计难度, 且随着不确定性的干扰信号加入, 普通的 PID 控制器在模型参数发生变化时, 不能保持系统的鲁棒性, 控制效果会变差, 严重的会导致系统不稳定, 因此 $G_{c2}(s)$ 不再采用常规的 PID 设计。

随着分数阶控制器设计的灵活性以及对系统性能的改善, 使其越来越受到控制界的广泛关注。分数阶 PID 控制器(简记 $PI^\lambda D^\mu$)的选择范围较常规的 PID 控制更广, 分数阶控制器的阶次(λ, μ)能灵活调整积分作用和微分作用的大小^[10]。特别是采用 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器时, 当扰动在一定范围变化时, 不影响已经整定好的控制器参数。对于有负载扰动的系统, 分数阶 PID 控制器可以有效控制扰动的局部变化, 使控制系统具有基本相同的控制效果, 因此, 对负载扰动控制回路的 $G_{c2}(s)$ 采用鲁棒性较好的 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器。 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器是整数阶 PID 控制器的推广, 传递函数为:

$$G_{c2}(s) = K_p + \frac{T_i}{s^\lambda} + T_d s^\mu \quad (8)$$

式中: K_p, T_i, T_d 分别为比例、积分和微分系数; λ, μ 为积分和微分的分数阶阶次, $\lambda, \mu \in [0, 1]$ 。

在 PID 控制器中, 由于纯微分运算不易实现, 工程应用中, 通过对纯微分环节增加近似一阶惯性环节进行改进。对于分数阶 PID, 也将微分环节 $T_d s^\mu$ 进行改进, $PI^\lambda D^\mu$ 控制器改进过程为:

$$G_{c2}(s) = K_p \left(\frac{T_i s^\lambda + 1}{T_i s^\lambda} \right) \left(\frac{T_d s^\mu + 1}{T_d s / N + 1} \right) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s^\lambda} + T_d s^\mu + \frac{T_d}{T_i} s^{\mu-\lambda} \right) \left(\frac{1}{T_d s / N + 1} \right) \quad (9)$$

式中: N 为常数。比例增益 K_p 可以快速的改变系统调节量, 提高动态性能, 但也会增大系统超调量, 降低系统的稳态性能, 为同时满足动态和稳态性能, 对式(9)进行设定值加权, 得到有加权系数 β 的 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器:

$$G_{c2}(s) = K_p \left(\beta + \frac{1}{T_i s^\lambda} + T_d s^\mu + \frac{T_d}{T_i} s^{\mu-\lambda} \right) \left(\frac{1}{T_d s / N + 1} \right) \quad (10)$$

由式(12)可知, 带加权系数的 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器包含 $K_p, T_i, T_d, \lambda, \mu, \beta$ 共 6 个整定参数, 整定比较复杂。为保证系统具有较强的鲁棒性, 文中采用 H_2/H_∞ 控制理论, 以积分绝对误差最小为最优目标, 以系统最大灵敏度 M_s 变化范围为可行域, 对系统参数进行优化求解, 推导出 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的 6 个参数, 优化过程可表示为:

$$\begin{cases} \min E_{IA} = \int_0^\infty |e(t)| dt = \int_0^\infty |r(t) - y(t)| dt \\ \text{条件} \begin{cases} M_s = \max_{\omega \in [0, +\infty)} \left| \frac{1}{1 + G_{c2}(j\omega)G(\omega)} \right| \\ M_s \in [1.2, 2.0] \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

得到带有加权系数的分数阶 PID 控制器参数:

$$\begin{cases} K_p = (0.164\eta^{-1.449} - 0.2108) / K \\ T_i = T[0.6426(\tau / T)^{0.8069} + 0.0563] \\ T_d = T^\mu[0.597(\tau / T)^{0.5568} - 0.0954] \\ \beta = 0.5325\eta^{1.962} + 0.5116 \\ \lambda = 1 \\ \mu = \begin{cases} 1.0, \eta < 0.1; \\ 1.1, 0.1 < \eta < 0.4; \\ 1.2, 0.4 < \eta. \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

式中: η 为相对时滞, $\eta = \frac{L}{T+L}$ 。由此, 可得到分数阶 PID 控制器 $G_{c2}(s)$, 完成负载扰动控制器的设计。

3 仿真分析

针对已测定的定量回路数学模型 $G(s) = \frac{1.13}{2.42s+1}e^{-8s}$, 采用 ZN 法整定的 PID 控制器 (ZN-PID)、传统 Smith 和双自由度 Smith 预估器分别进行仿真。3 种控制算法的控制器参数见表 1。其中, 传统 Smith 预估器的

主控制器 $G_c(s)$ 也采用 PID, 其参数整定与双自由度 Smith 预估在设计设定值跟踪控制器 $G_{c1}(s)$ 时采用的方法 (SP-Smith) 相同^[11]。基于 3 种算法进行仿真, 在 $t=0$ s 时, 加入单位阶跃信号; 在 $t=100$ s 时, 加入负载扰动 (幅度为 50% 的负单位阶跃信号)。标称情况时仿真见图 4。为了验证系统的鲁棒性, 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 20%, 得到模型失配时仿真结果见图 5。

结合图 4—5, 可以看出, 在标称情况下, 传统 Smith 预估器和基于分数阶 PID 的双自由度 Smith 预估器动态响应曲线几乎相同, 二者都能很好地跟踪设定值, 而 ZN-PID 控制器明显不适合控制大时滞过程。在参数摄动情况下, 三者表现完全不同。ZN-PID 控制器下, 系统已经发散。鲁棒性能是以牺牲响应速度为代价的, 对于传统 Smith 预估器, 响应速度降低, 但抗扰能力和鲁棒性也降低, 而基于分数阶 PID 的双自由度 Smith 预估器却能有效地抑制扰动, 并保证系统的强鲁棒性。可见, 基于分数阶 PID 的双自由度 Smith 预估器优于传统 Smith 预估器, 是一种改善鲁棒性和抗扰能力的有效途径。

表 1 3 种控制算法的控制器参数
Tab. 1 Controller parameters of three algorithms

被控对象 $G_p(s)e^{-\tau s}$	ZN-PID	传统 Smith (SP-Smith)	基于分数阶 PID 的双自由度 Smith	
			设定值跟踪 $G_{c1}(s)$ (SP-Smith)	干扰衰减 $G_{c2}(s)$
$\frac{1.13}{2.42s+1}e^{-8s}$	$K_p=0.363$ $T_i=16$ $T_d=4$	$K_p=2.14$ $T_i=2.42$ $T_d=0$	$K_p=2.14$ $T_i=2.42$ $T_d=0$	$\alpha=1.0$ $K_p=0.199$ $T_i=3.047$ $T_d=3.079$ $\lambda=1$ $\mu=1.2$ $\beta=0.8$

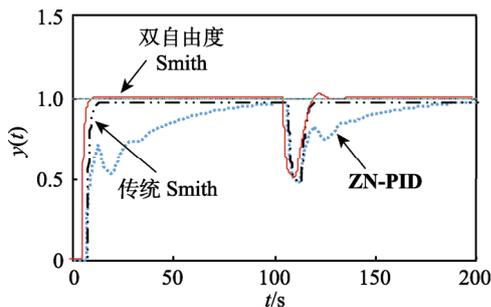


图 4 标称情况时动态响应曲线
Fig.4 Response curve in nominal condition

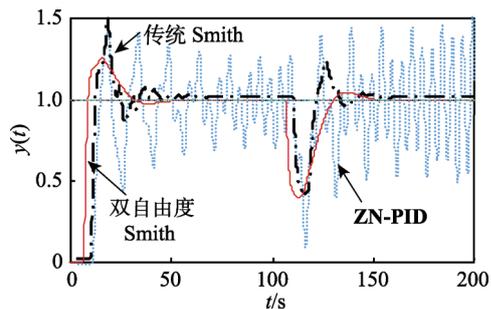


图 5 模型失配时动态响应曲线
Fig.5 Response curve of model mismatch

4 实际应用

在试点造纸厂的实际工程中, 将对于纸张定量回路提出的控制算法融入抄纸过程质量控制系统 (QCS) 中。上位机利用 Matlab 软件与组态软件进行数据交换, Matlab 通过获得的数据运行程序实现控制算法, 下位机控制器采用 S7-300PLC, 中央控制器利用自由通信与稀释水阀进行数据交换, 并利用现场总线与上位机之间进行数据交换, 以实现定量子系统的自动控制。当该厂生产时, 纸张定量设定 66 g/m^2 , 通过 S7-300PLC 控制稀释水阀, 在工况稳定后, 取某个时间段的定量监控画面见图 6, 并随机测取了 130 个扫描点, 得到的定量偏差曲线见图 7, 可以看出定量

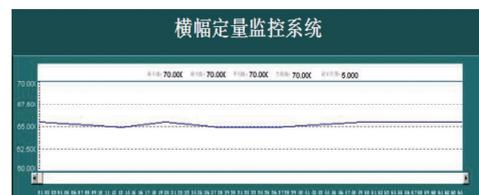


图 6 定量监控画面
Fig.6 Monitoring screen of paper basis weight

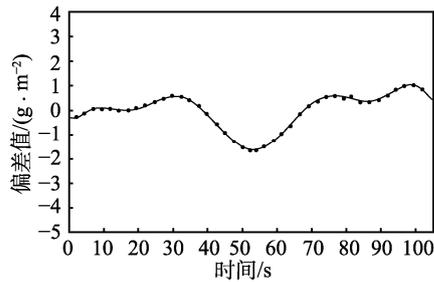


图 7 定量偏差曲线

Fig.7 Error curve of paper basis weight

值在设定值 66 g/m^2 上下波动, 波动范围为 $\pm 1.6 \text{ g/m}^2$, 偏差较小。证明该算法提高了纸品质量, 具有一定的实用意义。

5 结语

针对纸张定量本身具有的大时滞、非线性特性, 设计了基于分数阶 PID 控制器的双自由度 Smith 预估器算法, 双自由度的预估器不仅完成了跟踪控制器和扰动控制器的独立设计, 获得了良好的设定值跟踪特性和扰动抑制能力, 保证系统具有较好的稳定性。当被控对象参数改变导致模型失配时, 以分数阶 PID 设计的干扰衰减控制器, 使系统表现出良好的鲁棒性。通过与传统 Smith 预估控制比较, 基于分数阶 PID 的双自由 Smith 预估器提高了系统的自适应能力。将控制方案应用于造纸厂的定量系统, 从在线调试的效果可以看出, 控制精度良好, 实用性较强。

参考文献:

- [1] 熊智新, 胡慕伊, 陈朝霞, 等. 基于投影寻踪模型的纸和纸板质量综合评价[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 45—48.
XIONG Zhi-xin, HU Mu-yi, CHEN Zhao-xia, et al. Comprehensive Quality Evaluation of Paper and Cardboard Based on Projection Pursuit Model[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 45—48.
- [2] 李志健, 刘亮, 陈永常. 双胶纸印刷适性综合评价体系研究[J]. 包装工程, 2009, 30(1): 81—82.
LI Zhi-jian, LIU Liang, CHEN Yong-chang. Study of Printability Comprehensive Assessment System of Offset Paper[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(1): 81—82.
- [3] 刘焕彬, 白瑞祥, 胡慕伊. 制浆造纸过程自动测量与控制[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
LIU Huan-bin, BAI Rui-xiang, HU Mu-yi. Automatic Measurement and Control of Pulp and Paper Making Process[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009.
- [4] GHEORGHE C, LAHOUAOULA A, CHU Dan-lei. Multivariable CD Control With Adaptive Alignment for A High-Production Linerboard Machine[J]. Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes, 2012, 2(5): 32—40.
- [5] AMMAR M E, DUMONT G. Identification of Paper Machines Cross-directional Models in Closed-loop[C]// 2013 Proceedings of International Conference on Modeling, Identification & Control (ICMIC), 2013: 3—9.
- [6] 张爱娟, 胡慕伊, 黄亚楠. 改进型 Smith-专家 PID 算法在烘缸温度串级系统上的应用[J]. 化工自动化仪表, 2016, 43(2): 128—133.
ZHANG Ai-juan, HU Mu-yi, HUANG Ya-nan. Application of Improved Smith-Expert PID Algorithm in Dryer Temperature Cascade Control System[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2016, 43(2): 128—133.
- [7] 曾庆山, 曹广益, 王振滨. 分数阶 $PI^{\alpha}D^{\beta}$ 控制器的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 465—469.
ZENG Qing-shan, CAO Guang-yi, WANG Zhen-bin. Simulation Research on Fractional-order $PI^{\alpha}D^{\beta}$ Controller[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(3): 465—469.
- [8] 孙功武, 聂红伟, 苏义鑫, 等. 时滞系统的二自由度 IMC-PID 控制研究[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(8): 2357—2360.
SUN Gong-wu, NIE Hong-wei, SU Yi-xin, et al. Research on Two-degree-of-freedom IMC-PID Control for Time-delay Systems[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(8): 2357—2360.
- [9] 高艳丽, 蔡星光. 双自由度 Smith 预估器在啤酒发酵控制中的应用研究[J]. 中国酿造, 2009, 23(82): 109—112.
GAO Yan-li, CAI Xing-guang. Application of Two-Degree-of-Freedom Smith Predictor in Beer Fermentation Control[J]. China Brewing, 2009, 23(82): 109—112.
- [10] PADULA F, VISIOLI A. Set-point Weight Tuning Rules for Fractional-order PID Controllers[J]. Asian Journal of Control, 2013, 3(5): 678—690.
- [11] 汤伟, 施颂椒, 王孟效. 一种自整定 PID/PI 及其在纸张定量控制中的应用[J]. 中国造纸, 2002, 21(2): 31—35.
TANG Wei, SHI Song-jiao, WANG Meng-xiao. Auto-Tuning PID/PI Control and Its Application to Paper Basis Weight Control[J]. China Pulp & Paper, 2002, 21(2): 31—35.
- [12] CHEN S C, NAIMIMOHASSES R, ZEHNPfund A. Improving Reel-building with Multivariable CD Control[C]// Paper Conference and Trade Show, 2012, 2: 984—1002.
- [13] 刘文波, 王樾, 汤伟, 等. 稀释水横向定量控制系统的研究与应用[J]. 中国造纸, 2014, 33(8): 1—6.
LIU Wen-bo, WANG Xi, TANG Wei, et al. Study and Application of Cross Direction Basis Weight Control System Based on Dilution Water Adjustment[J]. China Pulp & Paper, 2014, 33(8): 1—6.
- [14] MOHAMMED E. Ammar, Dumont G.A. Automatic Tuning of Paper Machines Cross-direction Controllers Via Linear Matrix Inequalities[J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2015, 2(3): 283—295.
- [15] LU Qiu-gang, RIPPON L D, GOPALUNI R B. Cross-directional Controller Performance Monitoring for Paper Machines[C]// American Control Conference(ACC), 2015: 4970—4975.