

# 机械制浆过程磨机负荷内模 PI 控制

李明杰, 周 平

(东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对双盘磨机在运行过程中具有大滞后、大惯性及非线性等特点, 内模控制作为一种先进控制策略, 鉴于其对过程模型精度要求不高等优点, 提出了一种基于内模控制原理的 PI 控制方法, 该方法设计的控制器仅有一个可调参数, 且通过最大灵敏度指标实现其整定, 有效避免了控制器整定的复杂性与随机性. 仿真结果表明, 与常规 PID 控制相比, 所提方法可有效减小模型参数变化及各种干扰对系统性能的影响, 满足机械制浆生产过程对控制器性能的要求, 保证磨机安全稳定运行, 实现了磨机负荷的稳定化控制, 为机械制浆过程综合自动化系统的实施奠定基础.

**关 键 词:** 机械制浆过程; 磨机负荷; 内模控制; PI 控制; 鲁棒性

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)06-0783-06

## Internal Model PI Control of Refiner Load for Mechanical Pulping Process

LI Ming-jie, ZHOU Ping

(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Ming-jie, E-mail: limingj88@126.com)

**Abstract:** The double disks refiner has large time delay, large inertia and nonlinear characteristics during operation, whereas the internal model control, as an advanced control strategy, given its advantages of not requiring high accuracy in the process model. A PI control method was proposed based on internal model control principle, which has only one adjustable parameter in the designed controller, achieving tuning by maximum sensitivity indicator, thus the complexity and randomness of controller tuning could be effectively avoided. Simulation results show that, compared with the conventional PID control, the model parameters variations and alleviate various interference on system performance can be effectively reduced by using the proposed method, and the requirements of mechanical pulping process for controller properties can be satisfied to ensure the stable control of the mill load, laying the foundation for the implementation of the integrated automation system for pulping process.

**Key words:** mechanical pulping process; refiner load; internal model control; PI control; robustness

机械制浆过程是造纸行业中最关键环节之一, 而磨机负荷直接决定纸浆产品质量的稳定性及生产安全, 同时与过程能耗和产量也有直接关系<sup>[1]</sup>. 在实际生产中, 由于受到原材料木片种类、密度、尺寸大小和磨盘磨损等因素影响, 使磨机负荷的工作点发生变化. 而磨机负荷控制的目的是当受到外部因素影响后导致过程参数发生改变

时, 能够始终保证磨机稳定运行, 并使产量最高, 所以能否准确地控制磨机负荷是整个机械制浆过程控制的关键. 研究表明, 磨机负荷是影响纸浆产品质量及磨浆效率的重要因素<sup>[2-3]</sup>. 所以实现磨机负荷的准确控制, 不但能获得质量均匀、稳定的纸浆, 而且能有效降低整个机械制浆生产过程中能量消耗.

在机械制浆过程中影响磨机负荷的因素很多,如磨盘间隙、磨盘压力、喂料螺旋转速、稀释水流量等<sup>[4-5]</sup>,磨机在运行过程中动态特性十分复杂.文献[6-7]分别研究磨盘压力、稀释水流量和喂料螺旋转速对磨机负荷的影响,提出了非线性模型预测控制方法.文献[8]针对磨盘间隙与磨机负荷之间动态模型,研究了木片种类、尺寸和密度等外部随机因素的影响,提出了磨机负荷自校正控制方法.文献[9]将磨盘间隙作为过程输入,磨机负荷作为控制目标,研究具有非线性、时变特性模型自适应控制方法.文献[10]基于机械制浆过程提出了一种模糊关系模型并结合优化技术,使得纸浆质量控制在满足生产要求的合理范围内,但此方法主要依赖工程经验,且需要获取大量数据,缺乏相关理论指导.

本文针对机械制浆生产过程中的磨机在运行过程中存在大滞后、大惯性及非线性等特点,鉴于内模控制对过程数学模型精度要求不高,将内模控制应用于机械制浆过程磨机负荷控制中,提出基于内模控制原理的 PI 控制方法,该方法控制器设计简单,参数整定方便,且控制器唯一的参数可通过最大灵敏度指标解析得到.

### 1 机械制浆过程描述

机械制浆过程主要包括木片预处理、磨浆过程和纸浆处理三个阶段.首先,木片预处理就是将筛掉过大或者过小尺寸的木片,然后将合适尺寸的木片经皮带运输进入木片预蒸仓,预蒸仓温度 50~60℃,去除蒸煮后木片内的沙土、料屑和石块等杂质,将处理后的木片在计量螺旋作用下进入木片洗涤机,经洗涤后木片进入木片泵前槽.为了将木片中的多余水分、空气以及树脂等挤出,通常将双脱水螺旋脱水后的木片经过输送螺旋和喂料螺旋进入螺旋挤压机,木片在螺旋挤压的作用下进入料塞,在螺旋挤压机末段加入预浸渍化学药品,在预浸器里木片吸收药品后,经输送螺旋后进入反应仓.木片在经过螺旋挤压机疏解后进入化学反应仓,在反应仓里经过进一步化学处理后,通过卸料螺旋输送到螺旋喂料器,螺旋喂料器通常调节螺旋转速控制进入盘磨的木丝量,由螺旋喂料器将预处理木片送进磨室进行磨浆.其次,磨浆过程主要是将预处理后的木片经过盘磨机组成的闭路过程,木片经过磨机进一步破碎后提供满足生产需要的纸浆纤维.

典型的双磨盘机结构如图 1 所示,主要由动

盘、定盘、液压驱动装置和调速装置等组成,其动盘依靠电机驱动,当预处理后的木片进入磨室后,通过液压驱动装置调整两磨盘之间的压力,实现磨机的定压磨浆.同时由于磨盘高速旋转产生的离心力和纤维间的摩擦力,经过破碎的浆料会缓慢地向磨盘外移动.因此在进料一定的情况下,通常采用调节动、定盘之间的间隙实现对盘磨负荷的有效控制.经过磨机破碎后,得到纸浆纤维会喷放到旋风分离器.最终得到生产需要的纸浆纤维.

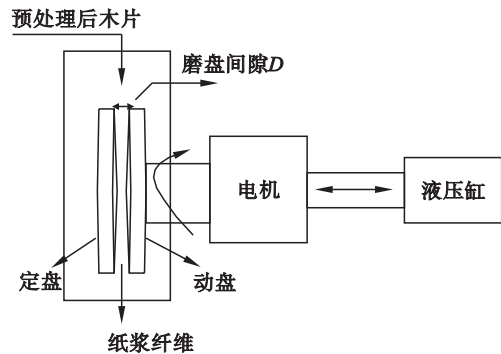


图 1 双盘磨浆机结构图  
Fig. 1 Structure of a double-disc refiner

### 2 内模控制及 PI 控制器设计

由图 1 分析可知,磨盘间隙是磨机负荷建模过程中的一个关键变量,它决定了磨区面积和浆料体积比.在实际工程中,常将磨盘间隙  $u$  作为输出变量,制浆过程中磨机负荷  $y$  作为输入变量,其动态过程通常用一阶加纯滞后模型近似表示<sup>[8,11-12]</sup>:

$$P(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls}. \tag{1}$$

式中: $K$ 、 $T$  和  $L$  分别为过程增益、过程时间常数和滞后时间常数.由式(1)可知磨盘间隙与磨机负荷可以视为带有纯滞后的开环稳定非最小相位系统.鉴于内模控制具有对过程模型精度要求较低等诸多优点,本文将内模控制方法推广应用到机械制浆过程中.其中内模控制系统结构如图 2 所示, $P(s)$  和  $M(s)$  分别为实际被控过程和被控过程的数学模型, $Q(s)$  为内模控制器, $r$  和  $y$  分别为

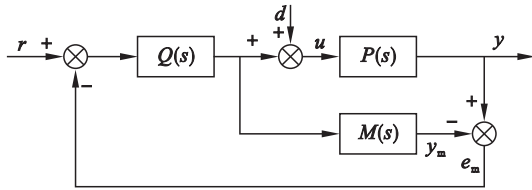


图 2 内模控制结构  
Fig. 2 Structure of IMC

系统的输入、输出,  $u$  为控制作用,  $d$  为输入扰动,  $y_m$  为模型的输出,  $e_m$  为由于建模误差及其扰动等因素造成过程输出与模型输出的误差。

由图 2 可以得到

$$y = \frac{Q(s)P(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]} \cdot r + \frac{[1 - Q(s)M(s)]P(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]} \cdot d. \quad (2)$$

当模型不存在误差, 即  $P(s) = M(s)$  时, 式 (2) 可简化为

$$y = Q(s)P(s) \cdot r + [1 - Q(s)M(s)]P(s) \cdot d. \quad (3)$$

式 (3) 表明, 假如模型的逆存在且可实现, 同时若内模控制器满足  $Q(s) = M^{-1}(s)$ , 此时系统输出等于设定值输入。但是理想的控制特性在实际应用中是难以实现的, 通常情况下, 为保证  $Q(s)$  是稳定的, 内模控制器的设计通常采用两步设计法。首先将过程模型  $M(s)$  分解为两部分:

$$M(s) = M_{-}(s)M_{+}(s). \quad (4)$$

式中:  $M_{+}(s)$  为模型中含有所有右半平面零点和时滞的部分,  $M_{-}(s)$  为模型中的最小相位部分。

其次, 在确保内模控制器  $Q(s)$  可实现的情况下, 为了增强系统的鲁棒性, 同时抑制由于模型误差对系统造成的影响, 通常在控制器  $Q(s)$  中引入一个低通滤波器, 这时  $Q(s)$  可设计为

$$Q(s) = M^{-1}(s)f(s). \quad (5)$$

式中,  $f(s)$  为低通滤波器, 且其通常采用式 (6) 形式:

$$f(s) = \frac{(\mu s + 1)^{\beta}}{(\lambda s + 1)^{\alpha}}. \quad (6)$$

式中:  $\alpha > \beta \geq 0$ ;  $\mu$  和  $\lambda$  为滤波器时间常数。将式 (4) 和式 (5) 代入式 (3), 可得

$$y = M_{+}(s)f(s) \cdot r + [1 - M_{+}(s)f(s)]M(s) \cdot d. \quad (7)$$

式 (7) 表明闭环控制系统的动态特性由  $M_{+}(s)$  和  $f(s)$  决定, 而  $M_{+}(s)$  是过程所固有的, 因此可以灵活调整  $f(s)$  得到系统的期望输出。

为了便于实际应用, 常将图 2 所示内模控制结构等效转换为图 3 所示的常规反馈控制系统, 结合图 2 和图 3 可知, 常规的反馈控制器  $C(s)$  与内模控制器  $Q(s)$  的关系:

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - M(s)Q(s)}. \quad (8)$$

根据内模控制原理, 本文低通滤波器取  $f(s) = 1/(1 + \lambda s)$ , 其中  $\lambda$  为滤波时间常数。此时内模控制器  $Q(s)$  为

$$Q(s) = \frac{Ts + 1}{K(1 + \lambda s)}. \quad (9)$$

进一步可得等效反馈控制器为

$$C(s) = \frac{Ts + 1}{K(1 + \lambda s - e^{-Ls})}. \quad (10)$$

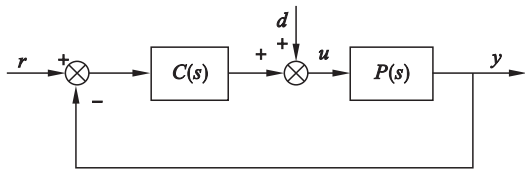


图 3 内模控制等效反馈控制结构  
Fig. 3 Equivalent feedback control structure of IMC

鉴于目前国内 DCS 系统的实际情况, 内模控制通常转化成经典 PID 控制形式才能应用, 这里将式 (10) 用一阶泰勒表达式逼近时滞项, 即  $e^{-Ls} \approx 1 - Ls$ , 则可得 PI 控制器为

$$C(s) = \frac{T}{K(\lambda + L)} \left( 1 + \frac{1}{Ts} \right). \quad (11)$$

式 (11) 所示磨机负荷 PI 控制器仅含一个可调参数  $\lambda$ , 这比常规 PID 控制器参数整定要方便许多。同时参数  $\lambda$  决定着系统的动态特性和鲁棒性, 通常情况下, 当  $\lambda$  较小时, 系统的动态响应速度较快, 但鲁棒性变差;  $\lambda$  取值过大, 虽然鲁棒性得到改善, 但动态响应速度会变慢。因此, 在实际应用中可以通过系统期望的性能来调整  $\lambda$  值。

为了降低由于模型的不确定性和过程参数变化对系统控制性能的影响, 鲁棒性常作为控制器设计时考虑的一个重要指标。最大灵敏度  $M_s$  常被作为设计控制系统时一个有效的鲁棒性能指标, 其定义:

$$M_s = \max_{0 \leq \omega < \infty} |1/(1 + L(j\omega))|. \quad (12)$$

式中:  $L(j\omega)$  为系统的开环传递函数。  $M_s$  通常在  $[1.3, 2.0]$  范围内取值。文献 [13] 针对系统的开环传递函数具有一阶积分加时滞形式, 并给出了开环增益  $K$  与最大灵敏度  $M_s$  的解析表达式:

$$K = \left( 1.451 - \frac{1.508}{M_s} \right) \frac{1}{L}. \quad (13)$$

基于式 (1) 和 (11) 得到本文系统的开环传递函数为  $L(s) = C(s)P(s) = e^{-Ls}/((\lambda + L)s)$ , 所以根据式 (13) 可得 PI 控制器可调参数  $\lambda$  与  $M_s$  之间的关系为

$$\lambda = \frac{1.508 - 0.451M_s}{1.451M_s - 1.508} L. \quad (14)$$

通过式 (14) 可以方便地通过最大灵敏度实现 PI 控制器参数的整定, 避免了控制器参数选择的随机性。

### 3 鲁棒稳定性分析

在实际工程中,系统的控制效果很大程度上取决于被控过程模型的精确度,然而被控过程受到自身的模型化误差和外部扰动信号的影响,因此不确定性是普遍存在的.为了保证系统能够获得良好的控制效果,不确定性在控制系统设计过程中必须要考虑.常见的不确定性有乘性和加性不确定性,乘性不确定性又可分为乘性输入不确定性和乘性输出不确定性两种,其中乘性输入不确定性大多由实际控制系统中执行机构的输出即过程输入引起,其用于描述不确定过程集合  $\Pi_i = \{P'(s): P'(s) = P(s)(I + \Delta_i)\}$ ; 另外在实际工程中,乘性输出不确定性通常是传感器在测量时造成的误差引起的,其用于描述不确定过程集合  $\Pi_o = \{P'(s): P'(s) = (I + \Delta_o)P(s)\}$ . 此外,加性不确定性通常是由模型参数辨识与实际过程参数之间的误差造成的,这时不确定性过程集合可以描述为  $\Pi_p = \{P'(s): P'(s) = P(s) + \Delta_p\}$ . 其中,  $\Delta_i$ ,  $\Delta_o$  和  $\Delta_p$  均是稳定正则的,其结构如图 4 所示,其中  $u$  为 PI 控制器输出,  $y$  为扰动系统输出.

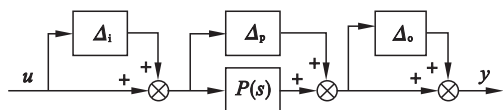


图 4 过程加性、乘性输入、输出不确定结构

Fig. 4 Structure with the process additive, multiplicative input, and output uncertainties

将图 4 所示过程加性、乘性输入、输出不确定结构结合图 3 所示的经典反馈控制系统,通常将被控过程在受到不确定性的影响后构造便于鲁棒稳定性分析的标准  $M - \Delta$  形式,此时易得到加性、乘性输入和输出不确定性部分的输出和输入之间传递函数分别为

$$M_i(s) = -C(s)(I + P(s)C(s))^{-1}P(s), \quad (15)$$

$$M_o(s) = -P(s)C(s)(I + P(s)C(s))^{-1}, \quad (16)$$

$$M_\Delta(s) = -C(s)(I + P(s)C(s))^{-1}. \quad (17)$$

根据小增益定理,保证闭环控制系统鲁棒稳定性的充要条件:  $\|M\Delta\|_\infty < 1$ . 另外,根据小增益定理和广义 Nyquist 稳定性判据可知,如果被控过程分别发生乘性输入、输出不确定和加性不确定的情况时,系统鲁棒稳定的充要条件分别如式(18)~(20)所示:

$$\rho(C(s)(I + P(s)C(s))^{-1}P(s)\Delta_i) < 1, \quad (18)$$

$$\rho(P(s)C(s)(I + P(s)C(s))^{-1}\Delta_o) < 1, \quad (19)$$

$$\rho(-(I + C(s)P(s))^{-1}C(s)\Delta_p) < 1. \quad (20)$$

式中,  $\rho(\cdot)$  为系统的谱半径. 因此在实际中如果给定过程的不确定性界,可以通过谱半径曲线来方便地判断系统的鲁棒稳定性.

### 4 仿真研究

为了验证本文所提控制方法的有效性,针对文献[12]中给出典型机械制浆生产过程中磨机负荷模型进行仿真研究,其中过程输入和输出分别为磨盘间隙( $D$ )和磨机负荷( $M$ ),其传递函数为

$$P(s) = \frac{M(s)}{D(s)} = \frac{K}{Ts + 1}e^{-Ls}. \quad (21)$$

式中:  $K = 0.2$ ,  $T = 7$ ,  $L = 4$ . 另外,磨机在运行过程中,通常受到木片种类、尺寸和密度不均匀等因素的影响,在仿真过程中本文将其作为扰动变量. 将本文方法和基于 Ziegler - Nichols (Z - N) 整定方法得到 PID 控制器作对比,采用本文方法最大灵敏度  $M_s$  取 1.5,通过式(14)可得到基于本文方法的 PI 控制器,同时采用 Z - N 整定方法控制器参数分别为  $K_p = 10.5$ ,  $T_i = 8$ ,  $T_d = 2$ . 假设磨机负荷设定值为 8 MW,并且在  $t = 100$  s 时加入幅值为 4.0 的阶跃扰动,系统的输出响应如图 5 所示. 由图 5 可以明显看出,当采用 Z - N 方法设计 PID 控制器时,系统的动态响应有着明显的振荡过程,且存在较大超调. 而本文方法系统的输出响应较为平稳且超调量较小(图 6),这在实际过程中可以有效降低对执行机构的损害.

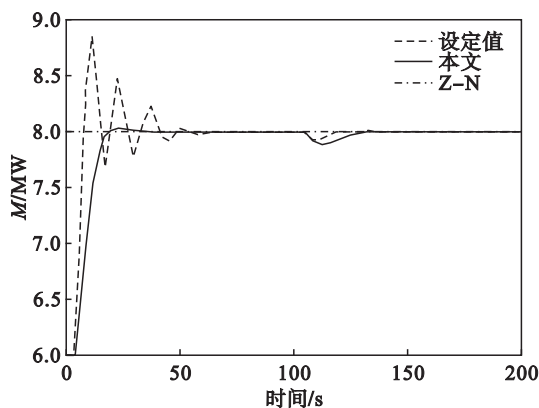


图 5 标称过程磨机负荷输出响应

Fig. 5 Output responses of refiner load with nominal process

另外,考虑到模型参数发生摄动时,这里假设使过程增益增大 20%,同时时间常数和时滞常数分别增加 20% 和 10% 时,由图 7 和图 8 所示的系



统输出响应和控制器输出曲线可见,当系统参数发生变化时,与 Z-N 方法设计 PID 控制器相比,本文方法依然表现出良好的目标值跟随特性和较强的鲁棒性,同时控制器输出较为平稳,可以降低由于模型参数发生摄动给系统性能造成的影响。

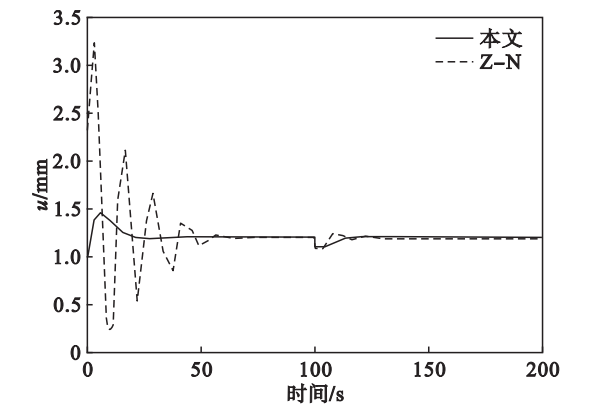


图 6 标称过程控制器输出

Fig. 6 Output of controllers with nominal process

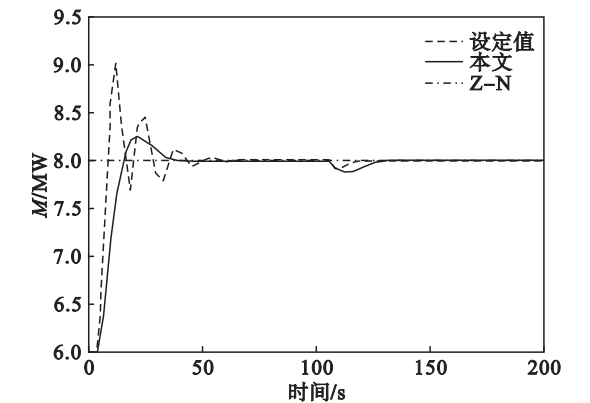


图 7 摄动过程磨机负荷输出响应

Fig. 7 Output responses of refiner load with perturbed process

为验证本文方法的系统鲁棒稳定性,这里假设被控过程发生乘性输入、输出不确定性分别为  $\Delta_i = (s + 0.2)/(s + 1)$  和  $\Delta_o = -(s + 0.2)/(2s + 1)$ ,其中  $\Delta_i$  可以看作是执行器如压力控制在低频段和高频段处分别产生约 20% 和 100% 的不确定性;同样, $\Delta_o$  可以看作传感器测量过程中在低频段和高频段分别产生约 20% 和 50% 的检测误差.另外,这里将加性不确定性  $\Delta_p$  看作由被控过程模型参数增益  $K$ ,时间常数和时滞常数分别发生 20%,20% 和 10% 的摄动后与实际过程模型之间误差引起的不确定性.此时摄动系统的谱半径曲线如图 9 所示,基于式(18)~式(20)的鲁棒稳定性判据可知,系统在发生上述 3 种不确定情况下,摄动系统的最大谱半径幅值都明显小于 1,这表明系统在发生不确定性时依然能够保持良好的鲁棒稳定性。

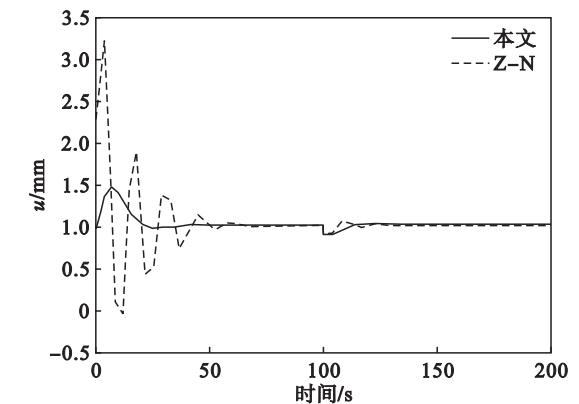


图 8 摄动过程控制器输出

Fig. 8 Output of controllers with perturbed process

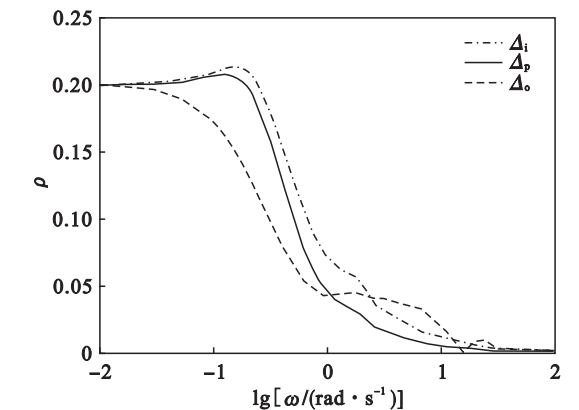


图 9 摄动过程的谱半径幅值曲线

Fig. 9 Magnitude-frequency curves of spectral radius for perturbed process

## 5 结 论

针对在制浆过程中磨机运行具有大滞后、大惯性及非线性等特点,本文将内模控制方法应用到磨机负荷控制中,通过对时滞环节的近似处理得到工业中广泛使用的 PI 控制器.仿真结果表明,本文方法可以使系统获得良好的跟踪能力,而且可有效克服模型参数摄动及扰动对系统性能的影响.能够满足机械制浆生产过程对控制器性能的要求,实现了磨机负荷的稳定化控制。

### 参考文献：

[1] Muhić D,Huhtanen J P,Sundström L,et al. Energy efficiency in double disc refining—influence of intensity by segment design [J]. *Nordic Pulp & Paper Research*,2011,26(3):224–230.

[2] Lama I,Perrier M,Stuart P. Controllability analysis of a TMP newsprint refining process[J]. *Pulp & Paper Canada*,2006,107(10):44–48.

[3] Tervaskanto M, Ikonen E, Ahvenlampi T. Refiner quality control in a CTMP plant [C]// *Proceedings of the 2009*

IEEE International Conference on Control and Automation. Christchurch,2009;1266 – 1270.

[ 4 ] Kankanamge E H P. Identification, control and optimization strategies for thermo-mechanical pulping ( TMP ) processes [ D ]. Vancouver; University of British Columbia,2012.

[ 5 ] Harinath E, Biegler L T, Dumont G A. Control and optimization strategies for thermo-mechanical pulping processes; nonlinear model predictive control[ J ]. *Journal of Process Control*,2011,21(4) :519 – 528.

[ 6 ] Du H. Multivariable predictive control of a TMP plant[ D ]. Vancouver; University of British Columbia,1998.

[ 7 ] Harinath E, Biegler L T, Dumont G A. Predictive optimal control for thermo-mechanical pulping processes with multi-stage low consistency refining [ J ]. *Journal of Process Control*,2013,23(4) :1001 – 1011.

[ 8 ] Dumont G A. Self-tuning control of a chip refiner motor load [ J ]. *Automatica*,1982,18 ( 3 ) :307 – 314.

[ 9 ] Allison B J, Ciarniello J E, Tessierg P J C, et al. Dual adaptive control of chip refiner motor load[ J ]. *Automatica*, 1995,31(8) :1169 – 1184.

[ 10 ] Qian Y, Liu H B, Zhang X P, et al. Optimization of a wood chip refining process based on fuzzy relational models[ J ]. *Computers & Chemical Engineering*, 1997, 21 ( 10 ) : 1137 – 1142.

[ 11 ] Rogers J H. Automatic control of chip refining[ J ]. *Pulp & Paper Canada*,1980,81(10) :89 – 96.

[ 12 ] Kooi S B L. Adaptive inferential control of wood chip refiner [ C ]// The 2nd IEEE Conference on Control Applications. Vancouver,1993;13 – 16.

[ 13 ] Wang Y G, Shao H H. PID auto-tuner based on sensitivity specification[ J ]. *Chemical Engineering Research & Design*. 2000,78(2) :312 – 316.

(上接第 765 页)

[ 4 ] 查亚兵,张涛,黄卓,等. 能源互联网关键技术分析[ J ]. 中国科学:信息科学,2014,44(6) :702 – 713.  
( Zha Ya-bing, Zhang Tao, Huang Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies [ J ]. *Scientia Sinica Informationis*,2014,44(6) :702 – 713. )

[ 5 ] Li Y, Vilathgamuwa D M, Loh P C. Microgrid power quality enhancement using a three phase four wire grid interfacing compensator[ J ]. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 2005,41(6) :1707 – 1719.

[ 6 ] De D, Ramanarayanan V. Decentralized parallel operation of inverters sharing unbalanced and nonlinear loads [ J ]. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2010, 25 ( 12 ) : 3015 – 3025.

[ 7 ] Lee T L, Cheng P T. Design of a new cooperative harmonic filtering strategy for distributed generation interface converters in an islanding network [ J ]. *IEEE Transaction on Power Electronics*,2007,22(5) :1919 – 1927.

[ 8 ] Cheng P T, Chen C A, Lee T L, et al. A cooperative imbalance compensation method for distributed generation interface converters [ J ]. *IEEE Transaction on Industrial Applications*,2009,45(2) :805 – 815.

[ 9 ] Majumder R, Ghosh A, Ledwich G, et al. Load sharing and power quality enhanced operation of a distributed microgrid [ J ]. *Renewable Power Generation*,2009,3(2) :109 – 119.

[ 10 ] Savaghebi M, Jalilian A, Vasquez J C, et al. Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop controlled microgrid [ J ]. *IEEE Transaction on Industrial Applications*,2013,60(4) :1390 – 1402.

[ 11 ] Delghavi M B, Yazdani A. Islanded-mode control of electronically coupled distributed-resource units under unbalanced and nonlinear load conditions [ J ]. *IEEE Transaction on Power Delivery*,2011,26(2) :661 – 673.

[ 12 ] Hamzeh M, Karimi H, Mokhtari H. A new control strategy for a multi-bus MV microgrid under unbalanced conditions[ J ]. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2012, 27 ( 4 ) : 2225 – 2232.

[ 13 ] Savaghebi M, Jalilian A, Vasquez J C, et al. Secondary control for voltage quality enhancement in microgrids [ J ]. *IEEE Transaction on Smart Grid*,2012,3(4) :1893 – 1902.

[ 14 ] Savaghebi M, Jalilian A, Vasquez J C, et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid [ J ]. *IEEE Transaction on Smart Grid*,2012,3(2) :797 – 807.

[ 15 ] 孙秋野,滕菲,张化光,等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[ J ]. 中国电机工程学报,2015,35(14) :3667 – 3677.  
( Sun Qiu-ye, Teng Fei, Zhang Hua-guang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet [ J ]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35 ( 14 ) :3667 – 3677. )

[ 16 ] 曹军威,孟坤,王继业. 能源互联网与能源路由器[ J ]. 中国科学:信息科学,2014,44(6) :714 – 727.  
( Cao Jun-wei, Meng Kun, Wang Ji-ye. An energy internet and energy routers[ J ]. *Scientia Sinica Informationis*,2014, 44(6) :714 – 727. )