



# 结晶器液位机理模型及其在 极限环抑制中的应用<sup>1)</sup>

刘金利<sup>1</sup> 王伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(东北大学自动化研究中心 沈阳 110006)

<sup>2</sup>(大连理工大学信息与控制研究中心 大连 116024)

(E-mail: wangwei@dlut.edu.cn)

**摘要** 针对结晶器液位极限环抑制中 dither 抖动参数难于确定的问题,建立了整个连铸机结晶器液位的机理模型,正确预测了液位控制中的极限环现象.以此模型为基础,提出了一种 dither 抖动参数工程整定方法.

**关键词** 结晶器液位控制,摩擦力,机理建模,参数整定

**中图分类号** TP391.9

## A MOLD LEVEL MECHANISM MODEL IN CONTINUOUS CASTING WITH APPLICATION TO SUPPRESSION OF LIMIT CYCLE

LIU Quan-Li<sup>1</sup> WANG Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110006)

<sup>2</sup>(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

(E-mail: wangwei@dlut.edu.cn)

**Abstract** This paper proposes a mold level mechanism model in continuous casting. It captures the limit cycle oscillation in mold level control. Based on this model, a parameter-tuning method of dither signal is proposed, which can be used to suppress the limit cycle oscillation.

**Key words** Mold level control, friction, mechanism model, parameters tuning

### 1 引言

结晶器液位绕设定值呈周期性波动的极限环振荡是液位控制中的难题<sup>[1,2]</sup>,它制约着液位控制精度的进一步提高.由于缺乏合适的能够预测极限环振荡的机理模型,控制器对极限

1) 国家杰出青年基金(69825106)和高等学校骨干教师资助计划资助

收稿日期 2000-06-09 收修改稿日期 2001-01-15

环振荡的抑制能力不能在仿真实验中得到检验. 目前, 抑制结晶器液位极限环振荡的通用方法是在滑动水口或塞棒位置设定信号上叠加 dither 抖动信号. 这一信号周期和振幅的整定主要依赖于现场凑试, 凑试过程缺乏一定的指导原则, 限制了这一方法的应用效果.

本文将摩擦力模型引入到塞棒位置伺服系统, 建立了包括各主要非线性在内的整个结晶器液位机理模型, 该模型正确预测了液位极限环振荡, 并且与文献[1,2]的观测结果一致. 以此模型为基础, 通过大量的仿真分析, 提出了一种 dither 抖动参数的工程整定方法.

## 2 结晶器液位机理建模

整个结晶器液位控制系统结构如图 1 所示. 所建的模型即为塞棒位置给定值  $x_r$  与结晶器液位输出  $y$  之间的动态关系, 其中  $x_t$  为塞棒的实际位置,  $q_{in}$  为结晶器钢液流入量,  $q_o$  为拉坯引起的钢液流出量.

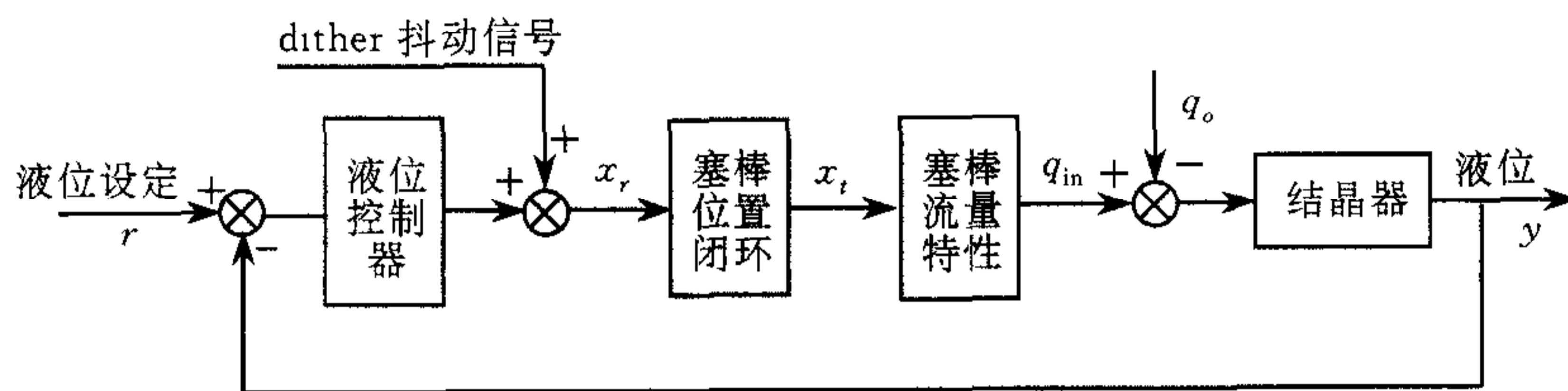


图 1 结晶器液位控制系统框图

### 2.1 塞棒位置内环机理建模

基于摩根公司的电液伺服阀力矩马达响应曲线, 滑阀位置  $x_v$  与给定伺服阀电流信号  $u$  的关系可由下式的二阶动态方程来描述

$$\frac{d^2 x_v}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dx_v}{dt} + \omega_n^2 x_v = \omega_n^2 u \quad (1)$$

进而由流体动力学定律得到滑阀负载流量

$$q_f = C_v \omega x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s - \text{sgn}(x_v) p_f)} - C_v \text{sgn}(x_v) f_2 \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s + \text{sgn}(x_v) p_f)} \quad (2)$$

式中  $\xi$  为等效的力矩马达阻尼,  $\omega_n$  为等效的力矩马达自然振荡频率,  $C_v$  为流量系数,  $\omega$  为滑阀节流口的面积梯度,  $\rho$  为液压油密度,  $p_s$  为能源压力,  $p_f$  为折算后的负载压力,  $f_2$  为重迭量折算成的滑阀泄漏面积,  $\text{sgn}$  为符号函数.

由流量守恒得液压缸流量模型

$$q_f = A_t \frac{dx_t}{dt} + \frac{V_t}{4E_y} \frac{dp_f}{dt} + C_{sl} p_f \quad (3)$$

由牛顿运动定律得到液压缸作用力模型

$$A_t p_f = m \frac{d^2 x_t}{dt^2} + B_t \frac{dx_t}{dt} + k_t x_t + f_\mu + f_l \quad (4)$$

式(3)和(4)中  $A_t$  为液压缸活塞面积,  $V_t$  为包括管路在内的液压缸总容积,  $E_y$  为液压系统的弹性模量,  $C_{sl}$  为液压缸的泄漏系数,  $m$  为折算成的运动部件总质量,  $B_t$  为等效阻尼系数,  $k_t$  为弹性负载刚度,  $f_\mu$  为摩擦力,  $f_l$  为外干扰力.

式(4)中摩擦力  $f_\mu$  的计算是整个模型的关键,本文选用文献[3]的动态摩擦力模型,摩擦力的计算公式为

$$f_\mu = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (5)$$

摩擦力状态挠度  $z$  的动态方程为

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0 |v|}{f_c + (f_s - f_c) e^{-(v/v_s)^2}} z \quad (6)$$

活塞运动速度  $v$  的定义为

$$v = \frac{dx_t}{dt} \quad (7)$$

式中  $f_s$  为最大静摩擦力,  $f_c$  为库仑摩擦力,  $v_s$  为 Stribeck 速率,  $\sigma_0$  为摩擦力刚度系数,  $\sigma_1$  为摩擦力阻尼系数,  $\sigma_2$  为粘性摩擦力系数.

式(1)~(7)描述了从伺服阀电流信号  $u$  到塞棒实际位置  $x_t$  的塞棒位置内环液压被控对象,引入反馈形成闭环控制后可得到整个塞棒位置内环的机理模型.

## 2.2 塞棒流量特性建模

由于极限环振荡与塞棒几何流量特性以及堵塞、熔损等时变特性没有关系<sup>[1]</sup>,为简单起见,本文基于节流阀理论得到塞棒水口静态流量模型为

$$K_Q = \frac{dq_{in}}{dx_t} = \frac{c_{qk}}{x_{t \max}} f' \left( \frac{x_t}{x_{t \max}} \right) \left\{ \frac{1}{\left( \left( \frac{1}{p_v} - 1 \right) \left[ f \left( \frac{x_t}{x_{t \max}} \right) \right]^2 + 1 \right)^{3/2}} \right\} \sqrt{g \Delta h} \quad (8)$$

式中  $K_Q$  为流量增益,  $q_{in}$  为结晶器钢液流入量,  $c_{qk}$  为塞棒节流口的流通能力,  $x_{t \max}$  为塞棒的最大开度,  $p_v$  为塞棒全开时塞棒节流口处压降占总压降的百分比,  $f(\cdot)$  为塞棒节流口的理想流量特性(也称设计流量特性),  $g$  为重力加速度,  $\Delta h$  为中间包液位到结晶器液位的高度降.

## 2.3 结晶器模型

结晶器是一个典型的容积对象,由流量守恒得流出量模型为

$$q_o = A_m \times C_s \quad (9)$$

液位模型为

$$\frac{dy}{dt} = \frac{q_{in} - q_o}{A_m} \quad (10)$$

式中  $q_o$  为拉坯引起的结晶器钢液流出量,  $C_s$  为拉速,  $A_m$  为结晶器截面积.

上面建立了整个结晶器液位被控对象的机理模型,模型的参数可由液压机构的设计数据和塞棒节流口的设计数据得到,摩擦力模型的参数可在文献[3]给定的单位质点数据基础上结合所用润滑添加剂的技术数据获得.

## 3 dither 抖动参数工程整定方法

上面所建的机理模型能够正确预测结晶器液位中的极限环振荡.本节以所建的机理模型为基础,提出了如下的 dither 抖动参数工程整定方法.整定在正常生产情况下在线进行,液位控制系统保持原有结构,dither 抖动信号加入方式如图 1.需要整定的参数是 dither 抖动信号的振幅和频率.

第 1 步. 不加入 dither 抖动信号, 观测液位输出, 计算液位自振极限环的周期, 将 dither 抖动信号的周期取为液位自振极限环周期的 1/10.

第 2 步. 固定 dither 抖动信号频率, 振幅从 1mm 开始以 1mm 的步距增加, 每改变一次振幅, 观测一次液位输出, 直到液位输出中极限环的周期与外加信号的周期相同为止.

第 3 步. 提高 dither 抖动信号振幅 5mm, 并提高频率, 保持一个周期, 再恢复到原有抖动信号, 观测液位输出能否在较短时间内回到第 2 步的极限环振荡. 若能, 记下此时 dither 抖动信号的振幅, 至第 4 步; 若不能, 则将第 2 步得到的振幅增加 2mm, 重做第 3 步. 若最后得到的振幅大于 20mm, 回到第 1 步, 重新给定频率(按增加方向).

第 4 步. 加入第 3 步得到的 dither 抖动信号, 观测强迫振荡形成的液位极限环, 看精度是否满足要求. 若过大, 则增大频率, 直至精度满足要求.

此方法中的第 3 步实际上是对 dither 抖动信号形成的强迫振荡稳定性进行判别.

## 4 仿真研究

仿真以自动开浇开环控制结束切换到闭环控制为背景, 其中结晶器长度 780mm, 液位检测范围 180mm, 拉速为 1m/min.

图 2 为某钢厂连铸机在未加入 dither 抖动情况下采用 PI 控制时实测的结晶器液位极限环振荡曲线(周期 24s, 幅度  $\pm 3$ mm), 图中曲线的不规则性是由于实际生产中环境变化及干扰造成的. 图 3 为采用该钢厂连铸机的技术数据和控制器参数, 利用本文模型预测的结晶器液位的极限环振荡.

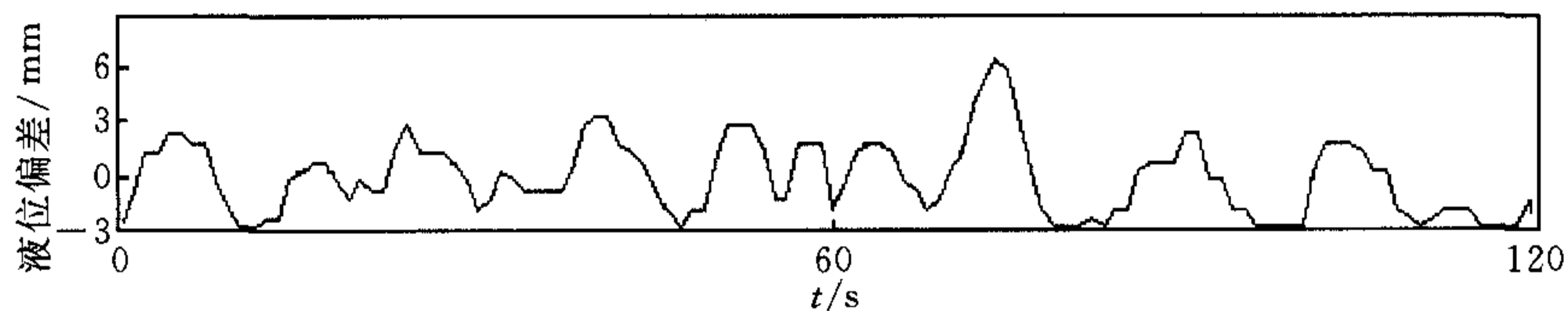


图 2 实测极限环振荡曲线

采用图 1 的控制系统结构, 在仿真中加入 dither 抖动补偿信号, 由本文给出的整定方法确定 dither 抖动参数的幅度为 10mm, 频率为 0.5Hz. 图 4 是加入 dither 抖动补偿后的液位控制效果, 表明采用本文整定方法得出的 dither 抖动参数能够大大减小液位极限环振荡.

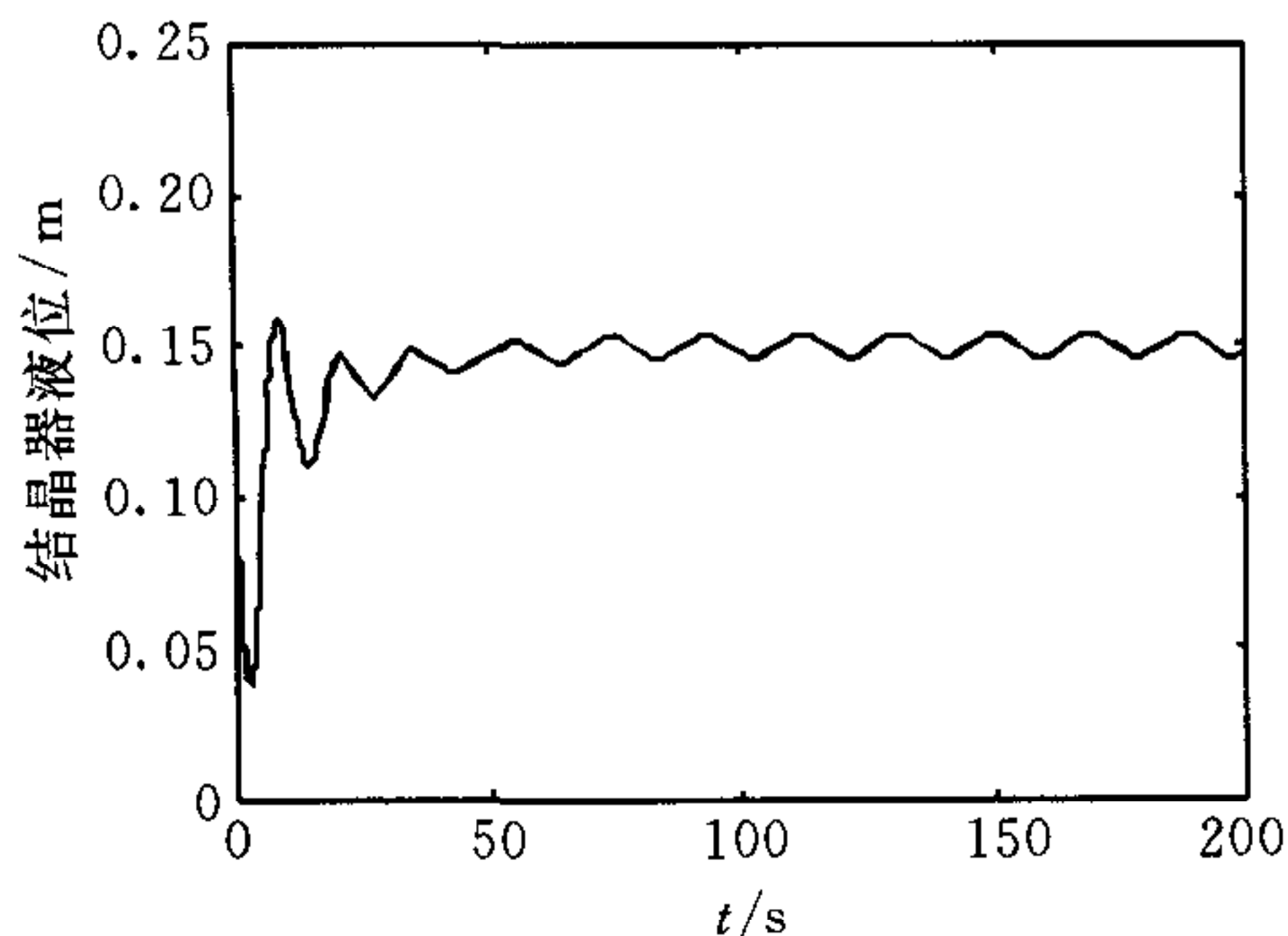


图 3 仿真得到的极限环

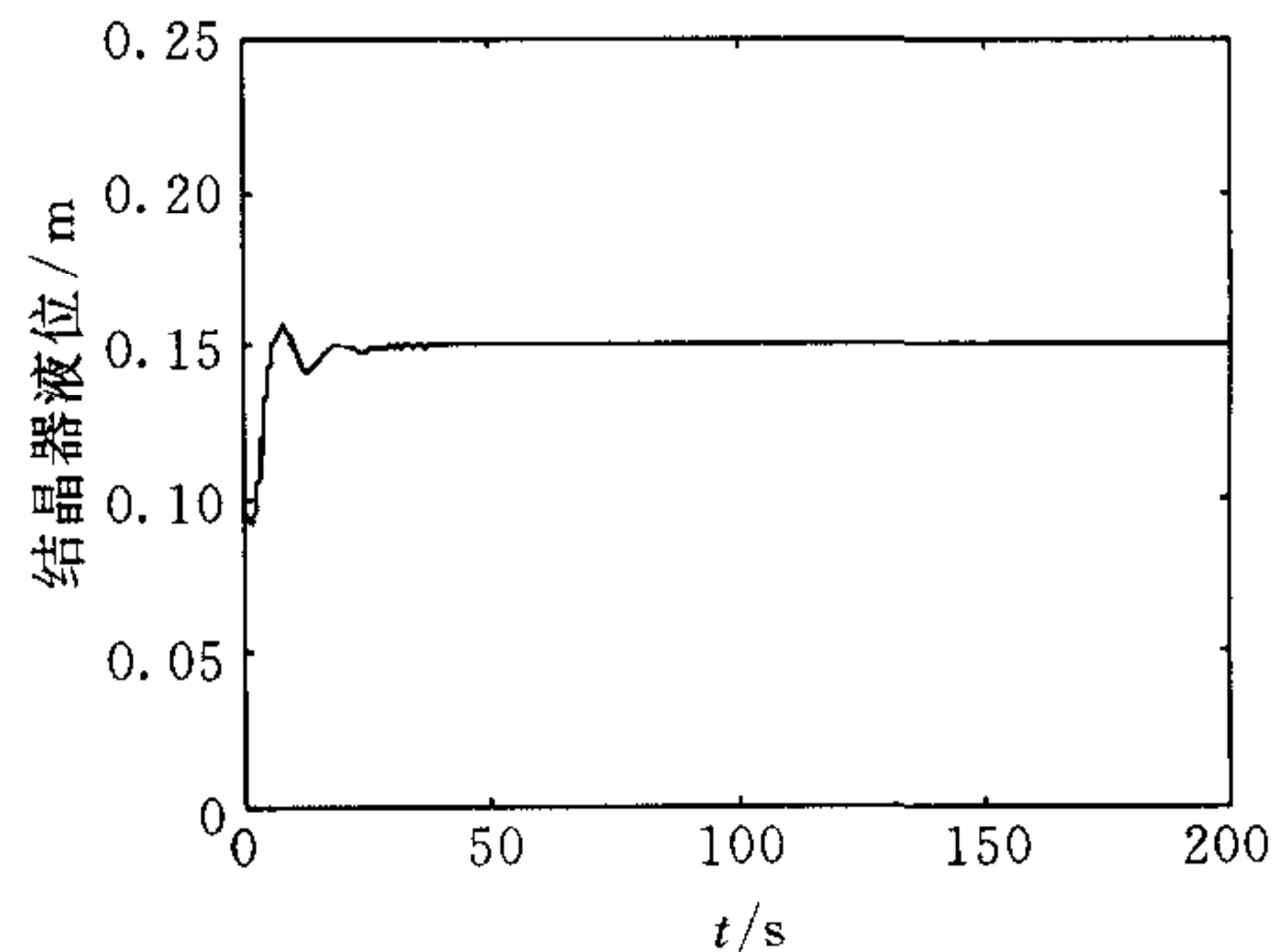


图 4 dither 抖动补偿效果图

## 5 结论

本文建立了结晶器液位控制系统的机理模型,给出了 dither 抖动参数工程整定方法. 仿真实验表明本文所提模型正确俘获了结晶器液位控制系统的极限环振荡,给出的整定方法实用有效,便于工程应用.

## 参 考 文 献

- 1 Graebe S F, Goodwin G C, Elsley G. Control design and implementation in continuous steel casting. *IEEE Control Systems Magazine*, 1995, **15**(8):64~71
- 2 Keyser R D. Predictive mould level control in a continuous steel casting line. In: Proc. IFAC, 1996. 487~492
- 3 Canudas de Wit, Olsson H, Astrom K J, Lischinsky P. A new model for control of systems with friction. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1995, **40**(3):419~425

刘全利 分别于 1998 年 7 月和 2000 年 8 月在东北大学获学士学位和硕士学位,目前在大连理工大学攻读博士学位. 感兴趣的研究方向为复杂系统的建模与控制、预测控制等.

王 伟 见本刊第 26 卷第 3 期.

~~~~~  
(上接第 449 页)

5. 参考文献按文中出现的先后次序排列,文献如为期刊时,按编号,作者(姓在前如 Wiener L N, Kalman R E, Wang H.). 文章题目,期刊名(外文可根据国际惯例使用缩写词),年份,卷号(期号):页码顺序编排. 文献如为图书时,则按编号,作者(姓在前). 书名,版次(初版不写),出版地点:出版者,年份,页码顺序排列. 文中未引用的文献不得列入参考文献栏目.

6. 来稿请用 A4 纸 1.5 倍行距打印.

七、作者必须对稿件内容的真实性和可靠性负责.

八、本编辑部在收稿后一周内通知作者,并在稿件修订过程中与作者保持联系. 如果作者在来稿中不作特殊说明,编辑部将只与第一作者联系.

九、已被本刊接受发表的稿件,按审查意见和“作者加工稿件须知”修改后一式两份同软盘一起寄编辑部. 并需附所有作者的简介.

十、来稿刊登与否由编委会最后审定. 编委会有权对来稿作适当文字删改或退请作者修改. 来稿一经发表,按篇酌付稿费,并赠送当期杂志 1 本及 30 份抽印本. 经审查后不拟刊登的文稿,一般情况在半年内退还.

十一、来稿(一式叁份)请寄北京市中关村中国科学院自动化研究所转《自动化学报》编辑部,邮政编码 100080. E-mail:aas@iamail.ia.ac.cn