

结晶器多变量耦合系统的自抗扰控制

乔国林, 童朝南, 孙一康

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 主要研究新颖实用非线性自抗扰控制算法, 在结晶器多变量耦合系统中的应用. 自抗扰控制主要特性是实时估计对象模型摄动和外扰的总和和作用量, 并在控制信号中补偿掉, 实现不确定性强非线性对象的实时动态反馈线性化. 结合控制对象, 建立了结晶器多变量耦合自抗扰控制系统. 数值仿真试验表明自抗扰耦合控制的协调性、自适应跟随性和抗干扰性优于传统的PID解耦控制.

关键词: 液位控制; 铸坯表面温度; 耦合系统; 跟踪微分器; 扩张状态观测器; 自抗扰控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Active disturbance rejection control for mould multivariable coupled system

QIAO Guo-lin, TONG Chao-nan, SUN Yi-kang

(Information Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A new nonlinear control algorithm-active disturbance rejection control (ADRC) is introduced, and a new ADRC control scheme for mould multivariable coupled system is proposed in this paper. The key element of ADRC is extended state observer (ESO). The real-time dynamic linearization is then implemented by disturbance estimation via ESO and disturbance compensation with control law. The mould multivariable coupled system based on ADRC is also established in combination with control objects. Finally, the principal analysis and simulation results show that the ADRC coupled control scheme not only has good coordination, but also provides satisfactory performance outperforming the traditional PID decoupling control.

Key words: level control; billet surface temperature; coupled system; tracking differentiator; extended state observer; active disturbance rejection control

1 引言 (Introduction)

结晶器系统既是复杂系统, 又是连铸的核心, 对结晶器采取综合控制, 会达到更好的控制指标和效果. 钢液在结晶器内的行为对铸坯品质有决定性的影响^[1]. 结晶器内钢水通过其器壁的传热, 使得钢水的温度下降, 并部分达到凝固温度, 在结晶器内壁附近形成坯壳; 与此同时, 结晶器内钢水又进行着强烈的流动, 其流动方式又强烈地影响着其内部的传热过程. 钢液的流动方式和规模是由液位和拉速决定, 内壁附近形成坯壳是由结晶器内钢水温度决定, 这就充分地体现了液位、拉速与结晶器内钢水温度之间的机理控制关系, 即液位和拉速可直接影响结晶器内钢水温度; 液位给定和拉速又控制着实

际现场液位. 结晶器出钢口处钢水温度是以该处钢水凝固坯壳表面温度来体现的, 由于钢水凝固坯壳表面温度与结晶器铜板上热电偶相关联, 可通过结晶器铜板上热电偶温检器件构成反馈系统, 最终实现控制结晶器内钢水温度或间接了解结晶器内钢水结壳厚度及匹配铸坯拉速. 查阅国内外相关文献, 也未见关于液位, 拉速联合控制结晶器内钢水温度的研究报道.

本文基于自抗扰控制技术, 对结晶器多变量耦合系统进行综合控制研究. 借助连铸控制实时仿真平台, 研究出结晶器多变量耦合系统解耦控制方案. 该研究成果为实际结晶器多变量系统耦合控制的设计提供了理论依据和试验基础.

2 受控对象的描述 (Statement of controlled object)

2.1 结晶器液位系统(Mould level system)

1) 伺服阀负载流量方程:

$$Q_L(s) = K_q x(s) - K_c p_L(s). \quad (2.1)$$

式中: $Q_L(s)$ 为负载流量, K_c 为流量为压力系数, K_q 为流量增益, $p_L(s)$ 为负载压力.

2) 液压缸负载流量方程:

$$Q_L(s) = C_t p_L(s) + A_p s \gamma(s) + \frac{V}{4\beta_e} s p_L(s). \quad (2.2)$$

式中: β_e 为液体容积模数, V 为管路总容积, A_p 为活塞有效面积, $\gamma(s)$ 为活塞位移, C_t 为系统总泄漏系数.

3) 液压缸力方程:

$$A_p p_L(s) = m s^2 \gamma(s) + c s \gamma(s) + K_i \gamma(s) + F(s). \quad (2.3)$$

式中: m 为质量, c 为阻尼系数, K_i 为负载弹性系数, $F(s)$ 为负载.

4) 结晶器液位模型^[2]:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{A c_{zr} \sqrt{2gh} - V_{speed} A_m}{A_m}. \quad (2.4)$$

式中: H 为液面高度, A_m 为截面积, V_{speed} 为拉速, A 为水口面积, c_{zr} 为注入系数, h 为钢液高度差, g 为重力加速度.

2.2 拉速系统(Casting speed system)

拉速系统的建模实质是交流电机调速系统的矢量控制建模. 设 ω_d 等于 x_{d1} , $\dot{\omega}_d$ 等于 x_{d2} , 拉速系统状态方程^[3]为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_{d1} \\ \dot{x}_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{d1} \\ x_{d2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T_i} \end{bmatrix} u_g, \\ y_d = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_{d1} \\ x_{d2} \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (2.5)$$

2.3 铸坯表面温度控制变量(Billet surface temperature control at mould spout)

铸坯和结晶器铜板界面热流^[4]关系:

$$Q = h_f(T_{坯壳} - \frac{1}{h_w} K_{cast} \rho L \sqrt{v} \cdot \frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{1}{h_w} h_l \Delta T_l + T_{冷}), \quad (2.6)$$

式中: h_w 为冷却水铜板对流换热系数, 且 h_w 为 $1/(\Delta T_{wb} A_{heat}) \cdot C_w I \Delta T_W$, ΔT_{wb} 为冷却水铜板温度差, A_{heat} 为有效换热面积, K_{cast} 为凝固系数, ρ 为钢密度, L 为钢凝固潜热, v 为拉速, 拉坯方向为 Z 轴正向, ΔT_l 为钢液液相线温度差, h_l 为钢液坯壳对

流换热系数, $T_{冷}$ 为冷却水温度, $T_{坯壳}$ 为铸坯表面温度; h_f 为界面换热系数.

2.4 结晶器多变量系统的控制结构(Structure of multivariable control for mould)

根据以上各数学方程分析, 液位、拉速、钢水凝固坯壳温度之间存在着强耦合关系. 将以上各方程各变量进行联系, 可得到结晶器多变量耦合控制系统. 其结构原理见图1.

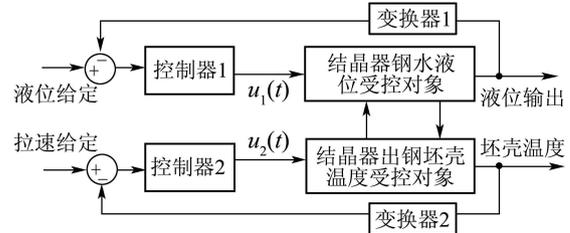


图1 结晶器多变量控制结构示意图

Fig. 1 Structure of multivariable control for mould

3 自抗扰控制策略 (Strategy of ADRC)

3.1 采用自抗扰控制算法的原因(Reason of ADRC adopted)

结晶器多变量耦合系统的非线性主要表现为电液伺服环节, 滑动水口环节, 带有强耦合高阶方程的矢量控制电机, 它们各自的时间常数和增益会随负荷的变化而变化, 而且范围大. 当系统运行在变负荷工况下, 传统的解耦PID控制方法不能保证控制器的鲁棒性. 对于这一控制难题虽然有基于微分几何理论的反馈线性化方法和直接反馈线性化方法(DFL)^[5], 但这些都需有系统的精确数学模型, 其算法也较复杂, 而难以实施. 自抗扰控制器理论^[6]继承PID的不依赖于对象模型的优点, 从根本上改进经典PID所固有的缺陷而提出的新的控制器设计思想. 将自抗扰控制器用于多变量系统的控制, 不同通道的相互影响同样可以看作是一种外扰, 各通道用扩张状态观测器各自独立地进行在线跟踪及补偿, 从而轻松实现解耦控制^[5]; 再使用非线性配置构成来提高其闭环系统的控制性能^[5].

3.2 自抗扰控制器的构成(Structure of ADRC)

自抗扰控制器(ADRC: active disturbance rejection controller)是针对一类非线性不确定系统提出的一种非线性控制器. 其由跟踪微分器(TD: tracking differentiator), 扩张状态观测器(ESO: extended state observer)和非线性状态误差反馈律(NLSEF: non-linear states error feedback)3部分构成, 见图2.

3.3 自抗扰控制算法(Control algorithm of ADRC)

选用参数较少而实用的二阶的ADRC作为本控制系统的控制器.

1) TD是能够合理提取微分信号的非线性动态

环节. 输入 $y_0(t)$ 产生一个跟踪信号 $x_1(t)$ 及其微分信号 $x_2(t)$. 其离散形式是

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k), \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \cdot R \cdot \text{sat}(x_1(k) - y_0 + \frac{|x_2(k)| \cdot x_2(k)}{2R}, \delta_0). \end{cases} \quad (3.1)$$

其中非线性函数 $\text{sat}(\cdot)$ 是

$$\text{sat}(x, \delta) = \begin{cases} \text{sgn } x, & |x| \geq \delta, \\ \frac{x}{\delta}, & |x| < \delta. \end{cases} \quad (3.2)$$

2) ESO由系统输出 $y(t)$ 产生3个信号: $z_1(t), z_2(t), z_3(t)$, 其中 $z_1(t)$ 为 $y(t)$ 的跟踪信号, $z_2(t)$ 为 $z_1(t)$ 的微分信号, $z_3(t)$ 为总扰动的估计. 常用的3阶ESO的离散化方程为

$$\begin{cases} e(k+1) = z_1(k) - y(k+1), \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h \cdot (z_2(k) - \beta_{01} \cdot e(k)), \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h \cdot (z_3(k) - \beta_{02} \text{fal}(e, a_1, \delta_1) + b_0 u(k)), \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \cdot \beta_{03} \text{fal}(e, a_2, \delta_1). \end{cases} \quad (3.3)$$

其中: $a_1 = 0.5, a_2 = 0.25$. 非线性函数 $\text{fal}(\cdot)$ 是

$$\text{fal}(x, a, \delta) = \begin{cases} |x|^a \text{sgn } x, & |x| > \delta, \\ \frac{x}{\delta^{1-a}}, & |x| \leq \delta. \end{cases} \quad (3.4)$$

3) NLSEF的离散化方程为

$$\begin{cases} e_1(k+1) = x_1(k+1) - z_1(k+1), \\ e_2(k+1) = x_2(k+1) - z_2(k+1), \\ u_0(k+1) = \beta_1 \text{fal}(e_1(k+1), a, \delta) + \beta_2 \text{fal}(e_2(k+1), 2a, \delta), \\ u(k+1) = u_0(k+1) - \frac{z_3(k+1)}{b_0}. \end{cases} \quad (3.5)$$

其中: $0 < a < 1$. 非线性函数 $\text{fal}(\cdot)$ 是

$$\text{fal}(x, a, \delta) = \begin{cases} |x|^a \text{sgn } x, & |x| > \delta, \\ \frac{x}{\delta^{1-a}}, & |x| \leq \delta. \end{cases} \quad (3.6)$$

3.4 控制方案(Control project)

依ADRC算法, 编制函数模块、TD模块、函数模块、ESO模块, 然后将这些模块搭接成ADRC单元, 见图2.

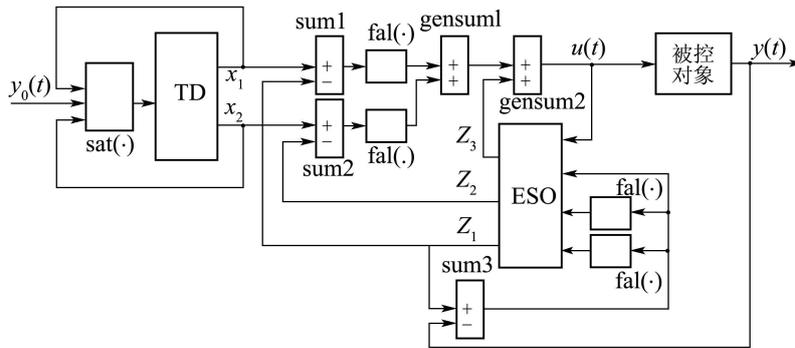


图2 结晶器多变量协调系统自抗扰控制器单元

Fig. 2 Controller unit structure based on ADRC of mould multivariable coordinated system

系统控制不仅与控制律算法有关, 还与控制系统的结构有关, 见图3所示. ① 在液位控制子模型中, 采用一个ADRC, 承担该子系统的主控制; 对于该子系统中, 由于电液伺服环节的大滞后和强非线性, 为提高跟踪和控制效果, 在该环节处又增设一个TD和NLSEF. ② 在拉速-温度控制子模型中, 采用另一个ADRC, 承担该子系统的主控制. ③ 基于 $e(k+1) = z_1(k) - y(k) \rightarrow 0$ 的原则, 经数字仿真反复试选后, 最终确定函数模块、TD模块、函数模块、ESO模块参数.

该方案中TD起到安排系统过渡过程并提取相关的微分信号; ESO起到估计各自控制对象状态和不确定扰动作用; NLSEF起到安排各自过渡过

程与各自状态估计之间误差的非线性组合和扰动估计量的补偿来生成各自控制值. 利用ESO能对系统不确定因素和外扰实时估计的特点, 将通道2的输入对通道1输出的影响视为通道1的外扰; 将通道1的输入对通道2输出的影响视为通道2的外扰. 分别设计通道1和通道2的ADRC, 在控制过程中各自对其进行动态补偿, 从而实现系统的解耦控制.

4 试验结果与分析 (Results and analysis of test)

选定国内某家从国外引进的连铸厂结晶器系统的工况条件作为仿真基础. 其现场参数: 结晶器断面尺寸230 mm × 1450 mm, 结

晶器高度904 mm, 液压阀控缸系统固有频率 $141.3\omega_v/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$, 液压阀控缸系统体积弹性模量 β_e 为700 MPa, 浇铸温度1557 °C, 减速装置的减速比为1:521.96, 结晶器冷却进口温度40 °C. 仿真所需动态参数均为现场在线采集.

调整原有的PID控制系统使其稳定, 然后分别调整TD和ESO的参数, 使其尽可能快速而准确地估计参考输入及其微分、总和扰动. 最后用非线性组合替代PID控制器, 调整其参数使闭环系统的性能指标满意.

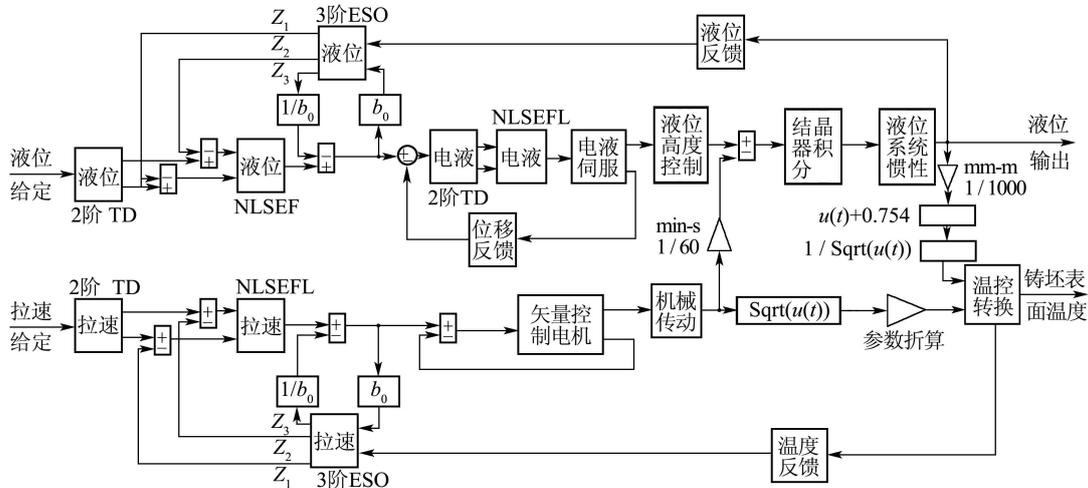


图3 基于ADRC控制的结晶器多变量耦合系统

Fig. 3 Structure of mould multivariable coupled system based on ADRC control

选定拉速给定1.51 m/min和液位给定50 mm时, 基于ADRC控制的液位和坯壳表面温度耦合系统仿真实验曲线, 见图4. 坯壳温度线平稳, 响应时间也较为理想; 结晶器内钢水液位超调量为10 mm. 由于各自通道的输入对于非各自通道就是一种扰动, 采用ADRC控制策略后, 能够对结晶器多变量系统进行解耦控制.

PID协调控制策略较快地进入稳定输出阶段. 采用不同控制策略的钢水坯壳温度控制品质的对比见图6, 采用传统的解耦PID协调控制策略, 温度超调大, 而且有下浮; 基于ADRC控制的结晶器出钢口处钢水凝固坯壳外侧温度, 超调非常小, 比采用传统的解耦PID协调控制策略, 较快地进入稳定输出阶段, 更加体现出ADRC控制的具有较强跟随性, 抗干扰性的特点.

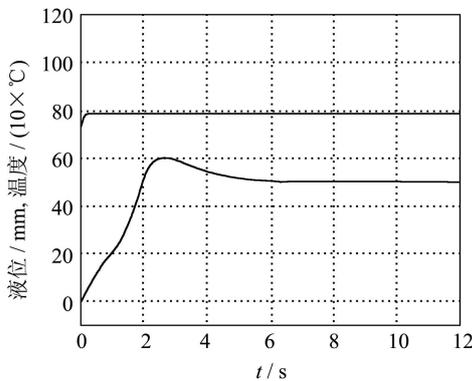


图4 基于ADRC的液位和坯壳温度的协调控制

Fig. 4 Coupled control of mould level and shell temperature using ADRC

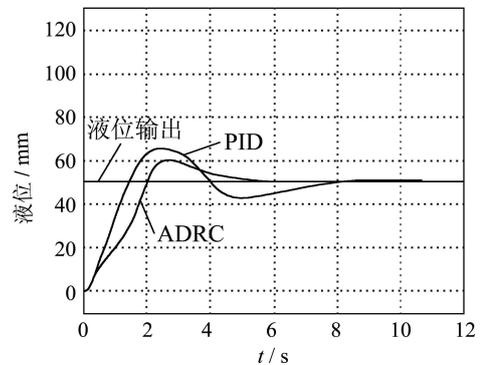


图5 不同控制策略的控制品质对比

Fig. 5 Curves contrasting of different control strategy

基于ADRC和传统的解耦PID协调控制液位控制品质曲线对比, 见图5, ADRC控制要比传统的解耦PID协调控制特性好得多. 首先传统的解耦PID协调控制的液位输出有振荡, 而基于ADRC控制的液位无振荡, 低超调, 比采用传统的解耦

文中仿真值是在某一钢种, 冷却强度、浇铸温度等特定工艺条件下获得, 对不同工况可修正模型中参数, 即对于某种特定的结晶器系统的控制可调节模型中的预置参数和ADRC控制参数. 其机理模型和控制手段带有普遍性. 由于各自通道的

输入本身对于异己通道就是一个很强的干扰, 仿真试验结果表明该方案能够达到了控制结晶器液位, 出钢口钢水凝固坯壳表面温度的联合控制的目的, 实现了结晶器温度多变量系统的耦合控制.

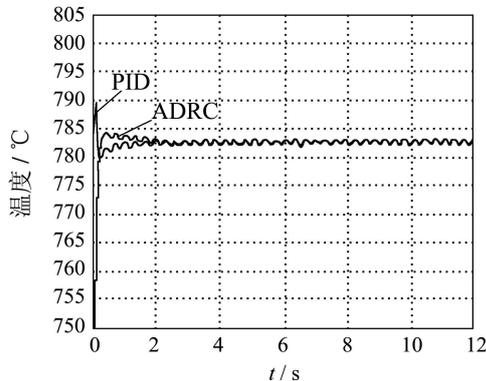


图6 坯壳温度两种控制策略控制品质的对比

Fig. 6 Contrasting curves of shell temperature

5 结论(Conclusion)

1) 有效解决了结晶器系统相关输出指标易受干扰问题.

2) 自抗扰控制技术对于解决一类不确定性、非线性、强耦合多变量系统, 大时滞系统等控制是一个非常有效的可行方法.

3) 结晶器多变量自抗扰控制系统的应用研究是基于从国外引进并带有较为先进生产工艺和技术水平的连铸结晶器系统, 所以该研究成果具有一定的实际意义和继续深入研究的价值.

参考文献 (References):

[1] 李志国, 伍成波, 王逢春. 连铸结晶器中钢液行为数值模拟研究进展[J]. 铸造技术, 2002, 23(4): 197 – 200.

(LI Zhiguo, WU Chengbo, WANG Fengchun. Recent developments of modeling the metal behaviors in continuous casting mould[J]. *Foundry Technology*, 2002, 23(4): 197 – 200.)

[2] 肖文栋, 王克明, 张森. 连铸过程结晶器液面控制的模糊控制方法[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 167 – 174.

(XIAO Wendong, WANG Keming, ZHANG Sen. Fuzzy logic approach for mold level control in continuous steel casting process[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(2): 167 – 174.)

[3] 何贤佳. 交流调速系统的模型控制[J]. 润滑与密封, 2003, 4: 68 – 76.

(HE Xianjia. Model control of AC motor speed adjusting[J]. *Lubrication Engineering*, 2003, 4: 68 – 76.)

[4] 乔国林, 童朝南, 孙一康. 拉速液位与结晶器出钢温度的关系研究[J]. 铸造技术, 2005, 26(10): 906 – 909.

(QIAO Guolin, TONG Chaonan, SUN Yikang. Study on relationship between casting speed and liquid level and mould tapping temperature[J]. *Foundry Technology*, 2005, 26(10): 906 – 909.)

[5] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485 – 492.

(HUANG Yi, ZHANG Wenge. Development active disturbance rejection controller[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 19(4): 485 – 492.)

[6] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19 – 23.

(HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and it's applications[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19 – 23.)

作者简介:

乔国林 (1964—), 男, 北京科技大学信息工程学院博士生, 主要研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: qiaoguolin@sina.com;

童朝南 (1955—), 男, 北京科技大学信息工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: tcn@ies.ustb.edu.cn;

孙一康 (1933—), 男, 北京科技大学信息工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: yksun@public3.bta.net.cn.