自动化与智能化技术

原子沉积设备温度控制方法研究及实现

李壮举^{1*},宋北辰¹,史子棋¹,曹少中²,陈强²

(1.北京建筑大学 电气与信息工程学院,北京 102616; 2.北京印刷学院,北京 102600)

摘要:目的 为提高原子层沉积镀膜腔温度控制的快速性和稳定性,提高镀膜质量。方法 利用自抗扰控制(ADRC)算法,对各部分参数进行整定,结合组态软件和西门子 S7-200 Smart PLC 设计一种基于自抗扰的温度控制器。结果 利用自抗扰温度控制器达到了原子沉积镀膜温度控制在具有较小超调的前提 下快速、稳定控制的要求,实现了原子层沉积镀膜腔温度的高精度控制,提高了镀膜的质量。结论 经 仿真和实际应用证明,对温度控制这种具有较大惯性的控制系统,本文所设计的 ADRC 温度控制器的 快速性和准确性均优于传统的 PID 控制器,且具有明显的抗干扰能力。

关键词:原子层沉积;ADRC;PLC;温度控制

中图分类号: TB486; TP23 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)13-0202-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.023

Research and Realization of Temperature Control Method for Atomic Deposition Equipment

LI Zhuangju^{1*}, SONG Beichen¹, SHI Ziqi¹, CAO Shaozhong², CHEN Qiang²

 School of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the temperature control rapidity and stability of the atomic layer deposition coating chamber and to improve the coating quality. A temperature controller was designed by utilizing the active disturbance rejection control (ADRC) algorithm, rectifying the parameters of each part, and combining the configuration software and Siemens S7-200 Smart PLC. The active disturbance rejection temperature controller was used to achieve the requirement of fast and stable control of atomic deposition coating temperature under the premise of having small overshoot, realizing high-precision temperature control of the atomic layer deposition coating cavity and improving the quality of the coating. The simulation and practical application show that, for a temperature control system with high inertia, the ADRC temperature controller designed in this paper is faster and more accurate than the traditional PID controller, and has obvious disturbance rejection ability.

KEY WORDS: atomic layer deposition; ADRC; PLC; temperature control

原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)^[1] 镀膜是一种可以将物质以单原子膜的形式逐层镀在 基底表面的真空镀膜方法。自发明以来,原子层沉积 技术已经逐渐成为了一项沉积功能薄膜的重要技术, 具有保型性高、薄膜质量高、表面均匀性好、厚度可 精确控制、无孔性等优点^[2]。其在太阳能电池传输层 材料制备^[3]、减反薄膜制备^[4]及金属单质等材料的制 备^[5]等都表现出明显的优势,为太阳能电池电能优化

收稿日期: 2024-02-28

设计和高效利用提供重要支持,对国家制定的"双碳" 目标的实现影响重大^[6]。

相对常规工业控制技术,原子层沉积控制技术的 特点在于对薄膜沉积循环特别是前驱体源及反应腔 体温度、反应腔室真空度、工艺前驱体源配方及流量 等参数的精微控制,其高精度的系统控制特征是影响 原子层沉积工艺平台对基底薄膜生长的工艺指标及 薄膜生长速率至关重要的因素^[7]。

在传统的 ALD 设备控制器中,温度控制部分由 PID 算法实现,其存在微分信号提取难、超调量和快速性相互矛盾等局限性,而模糊 PID 算法虽然能够消除系统超调,但是并不能减小系统的调节时间,同时还会增加控制器计算量,难以满足系统的实时性要求,这就需要提出一种新的控制方案^[8]。

自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)把被控对象模型中的未知部分和未知干 扰都认为是系统的总扰动,通过扩张状态观测器对系 统总扰动的估计,进而使用非线性配置形成的控制量 来实现对被控对象的控制^[9]。由于自抗扰控制技术这 种独特的控制思想,使自抗扰控制器对非线性、大惯 性、不确定时滞的复杂系统具有较好的控制品质^[10], 同时能自动补偿由于工况变化等造成的各种扰动,算 法简单、易于实现^[11]。自抗扰控制的优点正好能够满 足 ALD 设备温控系统的要求。因此为了改善薄膜沉 积效果,提高温控系统的性能指标,本文提出一种原 子层沉积薄膜制备过程中自抗扰温度控制方案。

1 ALD 设备加热装置建模

通常情况下,测试分析建模法和机理建模法是获 取被控对象数学模型的2种主要方式。本文加热设备 的建模为将采用2种方式相互结合的方法,首先利用 机理建模,以等式方程形式推导数学模型的最终表达 式;再利用测试分析法,在系统的输入端施加一个阶 跃信号,随后对输出端得到的测试数据进行识别和处 理,进而得到最终的数学模型^[12]。

利用机理建模进行总体处理时,将加热执行机构 与被加热部分看作一个整体,检测环节由热电阻完 成。假设整体加热部分通过电能获得的总热量和为 Q,其中有效的加热能量为Q_e,且由于加热的同时 与外界生成温度差导致热量的损失为Q_{out},则根据能 量守恒的关系可以得出:

$$Q = Q_{\rm c} + Q_{\rm out} \tag{1}$$

假设加热设备平均热容为*C*,当电源上电且加热 系统正常工作时,加热设备的外部温度设为*T*₀,内部 的温度设为*T*₁,那么可以根据热力学第二定律得出有 效加热热量:

$$Q_{\rm c} = C \frac{\mathrm{d}(T_{\rm l} - T_{\rm 0})}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

与此同时,取整个加热设备的散热系数为*H*, 散热面积为*A*,同样可以通过此定律得出经过散热而 损失的热量:

$$Q_{\rm out} = HA(T_1 - T_0) \tag{3}$$

设系统的输入系数为 *K*_u,则通过电能转换的热量总和可记作:

$$Q = K_{\rm u} U(t) \tag{4}$$

当加热时,若设备内部温度远远大于外部温度,则可以近似取:

$$T_1 - T_0 \approx T_1 \tag{5}$$

那么式(3)可以写成:

$$Q_{\rm out} = HAT_1 \tag{6}$$

将式(2)、式(4)、式(6)代入式(1)中可得 新的等式:

$$K_{\rm u}U(t) = C \frac{\mathrm{d}(T_{\rm l})}{\mathrm{d}t} HAT_{\rm l} \tag{7}$$

将式(7)进行拉普拉斯变换可得:

$$K_u U(s) = sCT_1(s) + HA(s)$$
 (8)
化简得:

$$\frac{T_1(s)}{U(s)} = \frac{K_u}{sC + HA} \tag{9}$$

又有 T=C/HA、 $K=K_u/HA$,代入并化简方程(9)可得: T(s) = K

$$\frac{1}{U(s)} = \frac{\pi}{Ts+1} \tag{10}$$

其中, *K* 和*T* 分别为系统的增益系数和时间系数, 均可以写成常数形式。同时在系统的整个加热过程中, 电能转换成热能、内部热量向外部扩散都需要一定的时 间,导致系统延迟,且由于热量在传播的过程中必然会 对系统造成输入与相应的影响,导致一定的滞后时间, 那么可以在式(10)基础上加入一个滞后环节。则可得 出根据机理建模推导的加热系统数学模型,见式(11)。

$$\frac{T_1(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts+1}e^{-\tau s}$$
(11)

在机理建模得出的数学模型基础上,以阶跃响应 法进行数据测试,在系统上电且正常运行时,对加热 设备施加一个阶跃信号,以确保系统的输入端为被激 励的状态,得出实际温度数据的阶跃响应曲线。再根 据切线作图法求取(图1)中*K、T、*τ3个常数



如图 1 所示, y_0 为 0 时刻状态, $y(\infty)$ 为系统稳态时的状态,在曲线拐点 p 处作一条切线 AB 分别相交于 y_0 和 $y(\infty)$,则 A 到 t = 0 的距离为纯滞后环节的时间常数 τ ,切线 AB 在时间轴 t 上的投影为惯性环节的时间常数 T,增益 K 可根据切线 AB 的斜率得出:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta U} \tag{12}$$

式中: ΔU 为输入的阶跃信号幅值,取 100%, 综上可以得出 K≈151、T≈538、τ≈5,则本文加热系统 传递函数可以近似表示为:

$$G(s) = \frac{151}{538s+1} e^{-5s} \tag{13}$$

在自动控制系统中,当一阶系统传递函数的延时 环节非常小且对系统动态响应影响较小时,可以忽略 该延时环节。这种情况下,将传递函数简化为只有一 阶惯性项和一阶时间常数项的形式,可以更方便地进 行系统分析和设计,那么在用于仿真分析时,式(13) 也可以近似写作:

$$G(s) = \frac{151}{538s+1} \tag{14}$$

2 温度控制器设计

2.1 控制系统结构

在镀膜过程中,温度的准确控制对薄膜的成膜质 量和性能至关重要,过高或过低的温度都可能带来负 面影响。为满足精准控制的需求,本系统要求温度控 制系统的稳态误差小于±1 ℃,而过渡过程中的最大 超调量则需控制在小于 2 ℃的范围内。由于被控对象 的保温性能良好且没有散热措施,存在较大的惯性, 传统的 PID 控制会导致较大的超调,难以实现高精度 控制,可能会对镀膜质量产生不利影响,甚至导致镀 膜失效。因此,本文采用了 ADRC 控制方法来更好 地追踪设定温度,从而实现更精准的控制效果,图 2 为系统加热部分方框图。

2.2 ADRC 控制器

自抗扰控制是由韩京清研究员于 1998 年正式提 出的一种先进控制理论^[13]。其最大的创新在于重新定 义了"未知扰动"的概念。它将所有作用于被控对象的 干扰视为总扰动,并在总扰动还未影响到被控对象之 前就引入算法补偿,以抵消扰动的影响。这个理论所 蕴含的"自抗扰"含义在于系统具备了自我抵抗外部 扰动的能力,在扰动作用前就能够预测并应对,确保 系统稳定性和精准控制。

非线性 ADRC 控制器的基本结构如图 3 所示^[14], 系统输入设定目标值后,首先利用跟踪微分器 (Tracking Differentiator, TD)获取目标的微分信号, 同时安排过渡过程以减少超调量;其次,通过使用非 线性扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO) 对系统状态和扰动进行估计,然后采用非线性状态误 差反馈控制律(Nonlinear State Error Feedback, NLSEF)进行线性组合,从而提高系统的快速性并同 时减小扰动,从而使非线性 ADRC 有极强的适应性 和抗干扰能力。

现将详细介绍控制器3个组成部分的工作原理。

2.2.1 跟踪微分器

当输入给到跟踪微分器时,将会给出输入信号的去噪信号 $x_1(t)$ 与微分信号 $x_2(t)$,如图 4 所示。





图 3 自抗扰控制器结构 Fig.3 Structure diagram of ADRC



图 4 跟踪微分器结构 Fig.4 Structure diagram of TD

已知二阶纯积分器串联形式可写作:

$$\begin{cases}
\dot{x}_1 = x_2 \\
\dot{x}_2 = u, |u| < r
\end{cases}$$
(15)

其快速最优控制综合函数 u 如式(16)所示。

$$u(x_1, x_2) = -r_0 sign(x_1 + \frac{x_2 |x_2|}{2r_0})$$
(16)

将式(16)最速控制函数代入式(15)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1} = x_{2} \\ \dot{x}_{2} = -r_{0} sign(x_{1} + \frac{x_{2} |x_{2}|}{2r_{0}}) \end{cases}$$
(17)

可用 $x_1 - v_0(t)$ 将 x_1 替换,可得出非线性的跟踪微 分器如式(18)所示。

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -r_0 \cdot sign(x_1 - v_0(t) + \frac{x_2 |x_2|}{2r_0}) \end{cases}$$
(18)

式(18)可以视作非线性跟踪微分器的连续时间 形式,因系统的 $x_1(t)$ 的分量加速限制在 $|\ddot{x}_1| \leq r$ 之下 时, $x_1(t)$ 将最快地跟踪输入信号 $v_0(t)$,并且跟踪的 速度随数值r的增大而增快。显然,当 $x_1(t)$ 越接近 $v_0(t)$ 的时候,可以把 $x_2(t) = \dot{x}_1(t)$ 近似视作输入信号 $v_0(t)$ 的微分形式。将式(18)离散化可得到:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hf \\ f = -r_0 \cdot sign[(x_1(k) - v(k)] + \frac{x_2(k)|x_2(k)|}{2r_0} \end{cases}$$
(19)

当系统达到稳态时,式(19)在高频信号的影响 下将产生不稳定的高频抖振现象,此时,引入离散系 统的最速控制函数—— *fhan*(*x*₁,*x*₂,*r*₀,*h*)函数,如式 (20)所示。

$$fhan(x_{1}, x_{2}, r_{0}, h) = \begin{cases} d = r_{0}h^{2} \\ d_{0} = hd \\ y = x_{1} + hx_{2} \\ a = \begin{cases} x_{2} + \frac{a_{0} - d}{2}sign(y), |y| > d_{d} \\ x_{2} + \frac{y}{h}, |y| \le d_{0} \\ fhan = -\begin{cases} r_{0}sign(a), |a| > d \\ r_{0}\frac{a}{d}, |a| \le d \end{cases} \end{cases}$$
(20)

此时,式(20)中分别有|y|与d之间、|a|与d之 间 2 个比较条件,利用 fsg 函数简化最速控制函数 $u = fhan(x_1, x_2, r_0, h)$,如式(21)所示。

$$fsg(m,n) = \frac{sign(m+n) - sign(m-n)}{2}$$
(21)

其中 m、n 分别为系统变量,那么可以得到:

$$fhan(x_1, x_2, r_0, h) = \begin{cases} d = r_0 h^2 \\ a_0 = hx_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d+8|y|)} \\ a_2 = a_0 + sign(y)(a_1 - d) \\ a = (a_0 + y)fsg(y, d) + \\ a_2[1 - fsg(y, d)] \\ fhan = -r_0(\frac{a}{d})fsg(a, d) - \\ r_0sign(a)[1 - fsg(a, d)] \end{cases}$$
(22)

其中,由式(21)得:

$$\begin{cases} fsg(y,d) = [sign(y+d) - sign(y-d)]/2\\ fsg(a,d) = [sign(a+d) - sign(a-d)]/2 \end{cases}$$
(23)

用一个独立可调的参数 h_0 来替代式(22)中的时间步长 h,那么可以得到最速控制函数 *fhan*(x_1 , x_2 , r_0 , h_0),整理可得常用离散形式的跟踪微分器:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hu \\ u = fhan[x_1(k) - v(k), x_2(k), r_0, h_0] \end{cases}$$
(24)

2.2.2 扩张状态观测器

扩张状态观测器通过检测控制系统内部的输入 信号与输出信号进行实时的估计,并对系统的"内扰" 与"外扰"预作用,是整个自抗扰算法的核心环节^[15], 其不受被控对象数学模型和系统初始状态限制的同 时可以削弱系统的噪声信号,起到对整个系统的误差 观测与实时补偿的作用,其结构如图 5 所示。



图 5 17 张朳恋观侧畚结构 Fig.5 Structure diagram of ESO

图 5 中, *u*、*v*分别为系统的输入和输出信号, *z*₁ 为跟踪微分器输出 *v*₁的跟踪信号, *z*₂ 为 TD 输出 *v*₂ 的跟踪信号, *z*₃为系统扰动补偿作用信号。

以式(25)二阶系统为例推导扩张状态观测器。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f[x_1(t), x_2(t), t] + \omega(t) + bu \\ y = x_1 \end{cases}$$
(25)

式中: $f[x_1(t), x_2(t), t]$ 为非线性函数; $\omega(t)$ 为系 统未知扰动,将2项合并,视作系统的"总扰动"h(t), 并将其视作系统的第3个状态变量 $x_1(t)$,见式(26)。

$$x_{3}(t) = h(t) = f[x_{1}(t), x_{2}(t), t] + \omega(t)$$
将式(26) 带入式(25) 可得线性系统:

$$\begin{cases}
\dot{x}_{1} = x_{2} \\
\dot{x}_{2} = x_{3} + bu \\
\dot{x}_{3} = \dot{h} \\
y = x_{1}
\end{cases}$$
(27)

与式(27)相对应的扩张状态观测器的表达式可 写作:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} fal(e, a_{01}, \delta) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} fal(e, a_{02}, \delta) \end{cases}$$
(28)

式中的 $fal(e,a_i,\delta)$ 可写作:

$$fal(e, a_i, \delta) = \begin{cases} |e|^{a_i} sign(e), |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{(1-a_i)}}, |e| \le \delta \end{cases}$$
(29)

那么式(28)可以记作系统(25)的扩张状态观测器表达式。以式(25)二阶系统为例,通过提取作 用量 *z*₃后加上已知参数 *b*,可以生成控制器的控制信 号 *u*:

$$u = u_0 - \frac{z_3}{h}$$
(30)

得出式(30)后,通过线性变换,可以将原先的 非线性系统通过积分串联的方式进行转化,以实现动 态线性化的补偿过程。在此过程中,扰动对系统的影 响得以抵消,不再受被控对象模型是否线性的限制。 式(30)也可以写成:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b} \tag{31}$$

对式(28)离散化可得二阶系统常用扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h[z_2(k) - \beta_{01}e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h\{z_3(k) - (32) \\ \beta_{02}fal[e(k), a_{01}, \delta]\} + b_0u(k) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03}fal[e(k), a_{01}, \delta] \end{cases}$$

式中: $X = [x_1, x_2, x_3]^T$ 为系统的状态变量; $Z = [z_1, z_2, z_3]^T$ 为估计结果,误差估计的附加增益参数 记作 $L = [\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}]^T$; h为系统的真实采样率。

2.2.3 非线性状态误差反馈控制律

非线性状态误差反馈控制率的结构如图 6 所示。 其可以将系统的状态误差进行非线性组合,提高系统 的控制效率,改善有效信号的计算能力^[16]。



图 6 非线性状态误差反馈控制率结构 Fig.6 Structure diagram of NLSEF

图 6 中,将 TD 输出信号 v₁、v₂与 ESO 估计结果 *z*₁、*z*₂的差值 *e*₁、*e*₂作为输入信号,其中 *e*₁、*e*₂即为系 统的状态误差:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \end{cases}$$
(33)

根据式(33)得到的误差,采用式(34)组成比例-微分控制,得到控制率的输出:

$$u_0(t) = K_1 fal(e_1, \alpha_1, \delta) + K_2 fal(e_2, \alpha_2, \delta)$$
(34)

式中: a_1, a_2, δ 为 $fal(e, a, \delta)$ 函数的参数; K_1, K_2 为 非线性状态误差反馈控制率的控制系数。将控制律离 散化可以写成:

$$\begin{cases} e_{1}(k) = x_{1}(k) - z_{1}(k) \\ e_{2}(k) = x_{2}(k) - z_{2}(k) \\ u_{0}(k) = K_{1} fal(e_{1}(k), \alpha_{1}, \delta) + K_{2} fal(e_{2}(k), \alpha_{2}, \delta) \\ u(k) = u_{0}(k) - \frac{z_{3}(k)}{b_{0}} \end{cases}$$
(35)

3 仿真和实现

3.1 基于 MATLAB/Simulink 的自抗扰控制 器仿真搭建

根据 2.2 节中有关自抗扰控制器的结构介绍,接下来在 MATLAB/Simulink 进行自抗扰控制器各个模块的搭建。

在控制器仿真模型搭建的过程中,TD、ESO 与 NLSEF 三部分采用了 M 函数与 Simulink 块混合的方 式,相较于利用 S-Function 实现,这种方法可以使仿 真架构更好地对应自抗扰控制器架构,对系统输入输 出的观察更加直观^[17]。

自抗扰总体架构仿真模型的搭建如图7所示。



图 7 基于 MATLAB/Simulink 的自抗扰控制器仿真 Fig.7 Diagram of ADRC based on MATLAB/Simulink

3.2 自抗扰控制器与 PID 控制器仿真比较

根据 3.1 节基于 MATLAB/Simulink 所搭建的控制器仿真模型,以加热系统传递函数式(14)作为 被控对象进行实验仿真。以传统 PID 控制器作为对 照,以证明自抗扰控制器在原子层沉积控制系统的 适用性。

通过对自抗扰控制器的参数进行整定,设定各 个模块参数。TD: r=20、h=0.05; ESO: $\beta_{01}=270$ 、 $\beta_{02}=$ 24 300、 $\beta_{03}=72$ 900、 $b_0=1$; NLSEF: $K_1=36$ 、 $K_2=12$ 。 同时根据经验法多次整定后得出 PID 参数 $K_P=14$ 、 $K_I=1.5$ 、 $K_D=3$ 。

控制器在输入阶跃信号为 v=200 的情况下,进行了自抗扰控制算法和 PID 控制算法的仿真,并绘制了相应的曲线,结果如图 8 所示。可以看出,自抗扰控制器在上升时间更短的同时保证了较小的超调量。



Fig.8 Comparison diagram of control effect when input signal v=200

考虑到设备需要分段加热,首先将初始的输入阶 跃信号设为 120。在 t=30 时,引入另一个值为 60 的 阶跃信号,以使最终设定值达到 v=180。其控制效果 如图 9 所示。可以看出,2 个阶段达到稳定状态时, 自抗扰算法在保持输出具有较小超调量的情况下依 然比 PID 控制器更快。



为验证控制器的抗干扰能力,在上述实验的基础 上,当 t=40 时,引入一个幅值为 10 的阶跃信号视为扰 动量,其仿真效果如图 10 所示。经过对比可以得出, 在加入扰动后自抗扰控制器仍然可以迅速的使系统 恢复稳态,而 PID 控制器则需要较长时间调整。

通过比较2种控制器的结果,自抗扰控制器相较 PID表现出更优越的快速性和稳定性。通过合理的参 数调节,几乎可以忽略其超调量。此外,在应对具有 高滞后性被控对象、干扰抑制以及跟踪性能等问题 时,自抗扰控制器都展现出了良好的控制效果。



图 10 控制器抗扰能力对比 Fig.10 Comparison of disturbance rejection capability

3.3 基于 ADRC 的温度控制实际效果验证

对 3.2 节中基于自抗扰的温度控制系统进行实验 验证,并将其与 PID 控制相对比,ALD 设备如图 11 所示。首先将设定温度设置为 80 ℃,令设备以室温 为起点加热。实验完成后,根据组态导出数据形成曲 线,实际加热效果如图 12 所示。



图 11 ALD 设备 Fig.11 ALD equipment diagram



图 12 加热效果曲线对比 Fig.12 Comparison of heating effect curves

加热系统性能指标对比如表1所示,可以看出, 自抗扰控制在超调量与稳态误差较小的情况下,上升 时间较 PID 控制器提高了约15%。

同时,对分阶加热的效果进行验证,令设备在室 温情况下首先升至100 ℃,达到稳态后,再将设定温 度升至120 ℃。其温度曲线与占空比如图13所示, 可以看出在上升速度较快的前提下系统超调量极小, 且对设定值的改变可以快速跟踪,达到了原子层沉积 工艺的温度要求。

表 1 控制器性能指标对比 Tab.1 Comparison of controller performance indicators





4 结语

为解决原有 ALD 设备温度控制中调节时间与超 调的冲突问题提出了一种基于 ADRC 的温度控制算 法,详细论述了温度控制器的设计方法,并进行仿真 和实验研究。首先,通过 Matlab 仿真,运用 ADRC 算法对比 PID 算法搭建仿真控制系统,经仿真实验对 比,当设定温度为 200 ℃时,相较于 PID 算法,ADRC 算法具有较小的超调量,并且还具有更短的调节时 间。其次,在外部扰动下,ADRC 算法能够对扰动进 行快速抑制,具有更强的鲁棒性。通过对实际 ALD 设备温度控制系统进行对比实验,结果表明:文中所 述方法具有高精度、无超调、抗干扰的优势,上升时 间减小约 15%,同时控温精度优于±0.18 ℃。

参考文献:

[1] 赵丽丽,林晶,于贵文,等.基于响应面法的原子层

沉积高阻隔膜研究[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 167-173.

ZHAO L L, LIN J, YU G W, et al. Atomic Layer Deposition of High Barrier Films Based on Response Surface Method[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 167-173.

- [2] 杨丽珍,刘忠伟,桑利军,等.超薄薄膜的原子层沉积和应用[C]// TFC'17 全国薄膜技术学术研讨会论文. 合肥:中国真空学会薄膜专业委员会,2017:1.
 YANG L Z, LIU Z W, SANG L J, et.al. Atomic Layer Deposition and Application of Ultrathin Thin Films[C]// TFC'17 National Thin Film Technology Symposium Abstracts Collection. Hefei, 2017: 34.
- [3] 瞿诗瑜. 原子层沉积技术在电池能源领域的应用及展望[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(14): 163-164.
 QU S Y. Application and Prospect of Atomic Layer Deposition Technology in Battery Energy Field[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2021, 2(14): 163-164.
- [4] 秦利军,龚婷,闫宁,等.原子层沉积技术在含能材料表面修饰中的应用研究进展[J].火炸药学报,2019,42(5):425-431.
 QIN L J, GONG T, YAN N, et al. Research Progress on Application of Atomic Layer Deposition in Surface Fabrication of Energetic Materials[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(5): 425-431.
- [5] 金瑞,王恒伟,路军岭.基于原子层沉积技术的先进 能源材料设计[J].科学通报,2023,68(27):3670-3690.
 JIN R, WANG H W, LU J L. Design of Advanced Energy-Related Materials via Atomic Layer Deposition[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(27): 3670-3690.
- [6] 蒋超凡,易陈谊.半透明钙钛矿太阳能电池关键技术及其应用[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1739-1753.
 JIANG C F, YI C Y. Development and Prospects of Semitransparent Perovskite Solar Cells[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5):1739-1753.
- [7] 廖荣,康唐飞,邓世杰,等.原子层沉积技术的应用
 现状及发展前景[J].传感器与微系统,2021,40(10):
 5-9.

LIAO R, KANG T F, DENG S J, et al. Application Status and Development Prospect of ALD Technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(10): 5-9.

[8] 李皓之. 原子层沉积系统温度控制研究[D]. 盐城: 盐

城工学院, 2023: 29-33.

LI H Z. Research on Temperature Control of Atomic Layer Deposition System[D]. Yancheng: Yancheng Institute of Technology, 2023: 29-33

- [9] 王铭辉. 自抗扰控制在燃气轮机功率与排气温度控制中的应用[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(31): 50-54.
 WANG M H. Application of Active Disturbance Rejection Control in Power and Exhaust Temperature Control of Gas Turbine[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(31): 50-54.
- [10] ZHANG C B, LI G R, SUN L, et al. Experimental Study on Active Disturbance Rejection Temperature Control of a Mechanically Pumped Two-Phase Loop[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 129: 1-10.
- [11] SANGREGORIO-SOTO V, MAZZANTI G, CORT\'ES-ROMERO J A, et al. Active Disturbance Rejection Control: An Application to Continuous Microalgae Photobioreactors[J]. Journal of Chemical Technology \& Biotechnology, 2023, 98(12): 3004-3015.
- [12] LIU C L, WANG Y, ZHANG M R, et al. The Investigation of a Fuzzy-Internal Mode PID-Based Temperature Control System for Solid State Electric Storage Heaters[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2023, 23(5): 2579-2593.
- [13] DONG H, LI X P, HE X, et al. A Two-Degreeof-Freedom Controller for a High-Precision Air Temperature Control System with Multiple Disturbances[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 50: 103442.
- [14] YANG Y L. Application of a New Smith Fuzzy PID in Electric Boiler Temperature Control System[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3759(727/728): 633-636.
- [15] QIAN Y H. Research on Active Disturbance Rejection Controller for Electromechanical Servo System with Large Inertia Loads[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2457(1): 12-27.
- [16] GAO B W, GUAN H, ZHANG W, et al. Three Kinds of Improved Designs and Comparative Analysis Based on Active Disturbance Rejection Controller[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(2): 965-976.
- [17] WU Z L, MAKEXIMU, YUAN J, et al. A Synthesis Method for First-Order Active Disturbance Rejection Controllers: Procedures and Field Tests[J]. Control Engineering Practice, 2022, 127: 105286.