

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.02.015

应用 GPC-PLC-PID 的电镀线镀槽液温度抗干扰 稳定控制方法

方小明^{1*}, 刘艳梨¹, 田大海^{1,2}(1. 江苏安全技术职业学院, 江苏 徐州 232001; 2. 中国矿业大学
信息与控制工程学院, 江苏 徐州 232001)

摘要: 在电镀线镀槽液化学反应热效应干扰下, 电镀线镀槽需要不断补偿散失热量或增加冷却负荷以维持槽液设定温度, 难以在每个电镀反应周期内对温度变化进行稳定控制, 导致温度控制偏差较大。为此, 提出应用 GPC-PLC-PID 的电镀线镀槽液温度抗干扰稳定控制方法。考虑电镀反应温度变化, 基于灵敏度系数校准电镀线镀槽液温度传感数据, 能够在温度干扰下捕捉温度变化; 在 PLC 控制器上, 运用广义预测控制方法(Generalized Predictive Control, GPC)预测镀槽在化学反应热效应干扰下补偿热量或增强冷却时的温度变化趋势, 对温度控制律进行校正滚动抗干扰优化; 将最优控制律输出的温度调整实时扰动偏差前馈值作为 PID 控制器的输入, 通过前馈偏差补偿跟踪响应温度变化, 实现电镀线镀槽液温度抗干扰稳定控制。实验结果表明, 所提方法能够准确感知电镀线镀槽液温度, 通过 GPC 预测电镀线镀槽液温度变化趋势, 降低了电镀线镀槽液温度控制的偏差, 增强了控制抗干扰能力, 为电镀线镀槽液温度稳定控制提供了强大支撑。

关键词: PID 控制器; PLC 技术; 广义预测控制方法; 温度传感器; 温度控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Application of GPC-PLC-PID for temperature anti interference and stable control of electroplating bath solution in electroplating line

Fang Xiaoming^{1*}, Liu Yanli¹, Tian Dahai^{1,2}(1. Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 232001, China; 2. School of Information
and Control Engineering, China University of Mining
and Technology, Xuzhou 232001, China)

Abstract: Under the interference of chemical reaction heat effect in the plating tank solution of the electroplating line, the plating tank of the electroplating line needs to continuously compensate for the heat loss or increase the cooling load to maintain the set temperature of the tank solution. It is difficult to stably control the temperature change during each electroplating reaction cycle, resulting in significant temperature control deviation. Therefore, a method for anti-interference and stable control of plating bath

收稿日期: 2024-12-06 修回日期: 2025-01-08

通信作者: 方小明(1982—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为智能控制及自动化和数字孪生技术, email: hzs0510@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目“柔性并联机器人辅助细胞微操作系统的设计与容错定位技术研究”(51975277)

引用信息: 方小明, 刘艳梨, 田大海. 应用 GPC-PLC-PID 的电镀线镀槽液温度抗干扰稳定控制方法[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(2): 99-105.

Fang Xiaoming, Liu Yanli, Tian Dahai. Application of GPC-PLC-PID for temperature anti interference and stable control of electroplating bath solution in electroplating line[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(2): 99-105.

temperature in electroplating lines using GPC-PLC-PID is proposed. Considering the temperature changes in electroplating reactions, calibrating the temperature sensing data of the plating solution in the electroplating line based on sensitivity coefficients can capture temperature changes under temperature interference; On the PLC controller, the Generalized Predictive Control (GPC) method is used to predict the temperature change trend of the plating tank during compensating heat or enhancing cooling under the interference of chemical reaction thermal effects, and the temperature control law is calibrated and optimized for rolling anti-interference; The real-time disturbance deviation feed forward value output by the optimal control law is used as the input of the PID controller for temperature adjustment. Through feed forward deviation compensation, the response temperature changes are tracked to achieve anti-interference and stable control of the plating solution temperature in the electroplating line. The experimental results show that the proposed method can accurately perceive the temperature of the plating solution in the electroplating line, predict the trend of temperature changes in the plating solution through GPC, reduce the deviation of temperature control in the plating solution, enhance the anti-interference ability of control, and provide strong support for stable temperature control of the plating solution in the electroplating line.

Keywords: PID controller; PLC technology; generalized predictive control method; temperature sensor; overheated steam temperature control

镀槽内镀液温度对电镀层的晶体结构有着显著影响。合适的温度有助于形成均匀、细致的晶体结构。如果镀液温度过低,可能导致镀层晶体生长不均匀,表面出现粗糙、麻点等缺陷。而温度过高时,晶体生长速度过快,容易形成粗大的晶体结构,使镀层的外观质量下降,失去镀层光泽等^[1-2]。同时,温度影响着镀层与基体金属之间的附着力,如果温度控制不当,可能会导致镀层与基体之间的结合力减弱,在使用过程中镀层容易脱落,降低镀件的使用寿命。因此,如何实现电镀自动线镀槽液温度有效控制,成为了当前电镀领域研究的热点之一。

对此,有学者提出了一些研究成果。王臻卓^[3]等首先实时采集温度数据,然后构建模糊PID控制器,输入温度数据,在模糊控制规则引入修正因子完成电镀槽液温度的自动控制。在该方法中采用的传感器采集方法无法迅速捕捉到温度的细微变化,温度数据不够准确,降低了温度控制准确性。唐卫斌^[4]等基于STM32对反应槽液体进行PWM智能控制。基于STM32利用热电偶仪表和模数转换电路实时测得反应槽液体温度。利用PWM控制算法加热反应槽液体,远程控制目标温度保持在目标温度。该方法仅能依据实时测温结果远程控制槽液温度,未对温度进行提前预测,温度控制响应具有滞后性,在各种扰动因素下控制精度不理想。Taler D^[5]等基于PID控制器控制槽液温度保持恒定。使用二阶温

度计热传导模型计算液温。使用数字滤波器消除温度计干扰,利用PID完成槽液温度控制。但该方法使用二阶温度计热传导模型计算液温具有一定延迟性,难以准确反映温度的实时状态,那么控制效果可能会受到影响。李中望^[6]利用状态观测器反馈控制电镀液温度状态。通过延迟状态反馈实现电镀液温度控制。该方法的前馈控制依赖于控制律的设置,缺乏明确的反馈校正机制,在干扰因素的影响下无法及时进行调整,导致控制的精确性不佳。

上述传统的温度控制方法多采用PID控制器,其简单可靠、易于实现,但在面对扰动时,往往难以达到理想的控制效果。为了解决上述问题,本研究提出了基于PLC融合PID补偿的电镀自动线镀槽液温度控制方法。

1 校准温度传感器灵敏度

电镀液通常包含各种金属盐、酸、碱以及添加剂等化学成分,具有一定的腐蚀性。传统的金属温度传感器,如热电偶或热电阻,在长时间接触电镀液时,其金属外壳和导线容易被腐蚀,导致传感器性能下降甚至失效。电镀时槽内发生的化学反应在适合温度下才具有最佳的反应速率,温度偏差可能会导致镀层的结晶结构、硬度等性能发生变化,因此对温度传感精度有较高要求。但在外界温度干扰下,电镀线镀槽需要不断增补散失热量或加大冷却

负荷以保持合适温度。采用传统温度计测量槽内镀液温度, 温度计因无法适应溶液温度快速细微变化, 无法保持较高的测量精度。

光纤光栅温度传感器的测温单元器件由石英光纤制成。石英光纤几乎不受电镀液中各种化学物质的腐蚀, 可在强腐蚀环境中长期稳定使用。而光纤光栅温度传感器以其高敏感度、高准确性测量优势, 能够迅速捕捉到电镀槽内溶液因增补物质、热量散失或加大冷却负荷时引起的细微温度变化量, 确保了产线控制系统可以基于准确温度信号作出及时有效的工艺调控^[7-8]。

光纤光栅温度传感器基于“波长位移”原理实现温度值测量^[9], 其温度采集过程示意图见图1。

光纤光栅温度传感基础参数有效折射率 m_{eff} 、光纤光栅的中心波长 μ_B 和光栅周期 M 三者之间的关系如下:

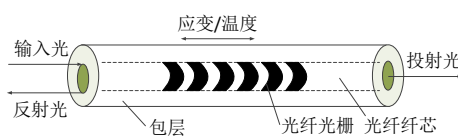
$$\mu_B = 2m_{\text{eff}}M \quad (1)$$


图1 光纤光栅温度传感器温度采集过程

Fig.1 Temperature acquisition process of fiber Bragg grating temperature sensor

引入温度值 T , 进一步推导出中心波长变化率 $d\mu_B/\mu_B$ 与有效折射率变化率 dm_{eff}/dT 和光栅周期变化率 dM/dT 之间的关系, 其表达式如下:

$$\frac{d\mu_B}{\mu_B} = \left(\frac{1}{m_{\text{eff}}} \frac{dm_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{M} \frac{dM}{dT} \right) dT \quad (2)$$

在电镀线镀槽液发生化学反应时, 温度产生非线性变化, 使电镀自动线镀槽光纤光栅传感器的光栅周期产生变化, 间接影响有效折射率, 造成温度传感值误差。因此本文引入灵敏度系数对传感数据误差进行校准, 以获得准确实时温度数据。引入两个灵敏度系数 ψ 、 β 来定义有效折射率随温度变化和光栅周期随温度变化这两个变量, 得到了综合灵敏度系数 L_T :

$$L_T = \mu_B(\psi + \beta) \quad (3)$$

基于温度灵敏度系数, 光纤光栅温度传感器可通过中心波长的变化量来计算电镀液反应温度的变化误差量 ΔT , 其公式表达如下:

$$\Delta T = \frac{\Delta\mu_B}{L_T} \quad (4)$$

根据光纤光栅温度传感器的初始温度值 t_0 , 即可得到电镀自动线镀槽液温度传感校准值 T' , 其公式表达如下:

$$T' = t_0 + \Delta T \quad (5)$$

2 GPC-PLC-PID 控制器抗干扰稳定性

在电镀过程中, 电镀槽内镀件(阴极)、镀液和阳极等发生着复杂的化学反应。反应热与电镀电流密度、主镀层离子浓度等因素有关。当电流密度增大时, 反应速率加快。反应时的热效应并非按照简单的线性关系增加, 会对镀槽液温度产生非线性影响。同时, 镀槽内溶液温度与电流密度、溶液浓度等之间存在耦合关系。电流密度、沉积速率、溶液离子扩散速率、电极反应等都会与镀槽内溶液温度相互影响。这种相互影响对溶液温度产生复杂干扰。因此, 镀槽液溶液的化学反应具有非线性、时变性和耦合性等特点。电镀线镀槽在每个电镀反应周期内直接对温度进行控制具有滞后性, 无法及时响应温度的瞬态变化, 导致控制效果出现偏差。

为解决这个问题, 提出基于PLC控制器的模糊温度调控方法。该方法用广义预测控制(GPC)提前预测电镀槽液在每个电镀反应周期内的温度变化趋势, 设定控制阈值。将预设的阈值与实时监测温度值之差, 作为PID控制器前馈输入信号。通过前馈补偿调节, 控制参数响应温度的实时变化量, 实现电镀线镀槽内溶液温度抗干扰的稳定控制。

2.1 基于 GPC 的 PLC 控制器滚动抗干扰响应优化

将校准后温度传感数据 T' 经过信号调理电路输入到PLC控制器中^[10-11], PLC控制器结构见图2。

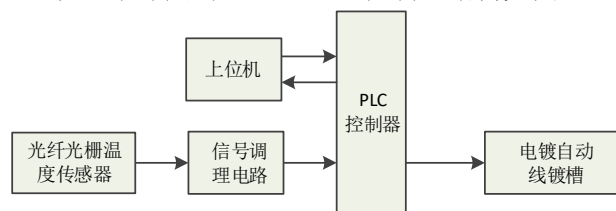


图2 PLC 控制器结构

Fig.2 Structure of PLC controller

PLC控制器通过接收传感器采集的电镀自动线镀槽液温度数据, 经过内部算法处理后, 输出控制信号给执行机构(PID)实现对电镀线镀槽溶液温度的精确控制。

然而PID前馈控制如果依赖于固定的控制律, 在电镀线镀槽溶液反应热效应、电流密度、溶液离子扩散速率等干扰因素的影响下无法及时进行温

度调整,导致温度控制的准确性较差。因此本文在PLC控制器基础上引入GPC模型^[12-13]。基于当前和过去的PLC控制器温度传感数据,应用GPC模型预测电镀自动线镀槽补偿散失热量或增加冷却负荷时温度变化输出值。在扰动或设定值发生变化之前,根据预测信息预先对PLC控制器的温度控制律进行反馈校正和滚动优化,从而加快PLC控制器对温度扰动因素的响应速度,提高温度实时跟踪控制的精度和稳定性。

电镀自动线镀槽温度变化预测GPC模型输出的温度预测结果公式如下:

$$S(T) = u(l)w^{-1}i(l-1) + \psi(l)/\Delta \quad (6)$$

式中: $i(l-1)$ 表示电镀自动线镀槽温度在 $l-1$ 时刻的输入; w 表示控制周期位移算子; Δ 表示向后差分算子; $u(l)$ 、 $\psi(l)$ 分别表示电镀自动线镀槽在采样时刻 l 的输出温度信号和槽液反应热效应温度扰动值。

基于温度变化预测输出与期望槽液加热温度之间的误差,构建温度控制目标函数 K :

$$K = \sum_{k=1}^n S(T)[u(l+k) - e(l+k)]^2 + \sum_{k=1}^m \mu(k)[\Delta i(l-1+k)]^2 \quad (7)$$

式中: n 表示补偿散失热量或增加冷却负荷最大周期长度; $e(l+k)$ 表示 $l+k$ 时刻的温度调整轨迹; k 表示电镀反应周期时间步; m 表示控制温度最大幅度; $\mu(k)$ 表示大于0的温度控制偏差加权序列。

基于指数平滑形式设计参考轨迹,以描述槽液温度随时间变化到达设定值的过程,其公式表达如下:

$$e^{(l+k)} = s^k u(l) + (1-s^k)u_r \quad (8)$$

式中: s^k 表示柔化系数; u_r 表示温度恒定设定值。

则PLC控制器的温度变化预测输出控制律为:

$$\hat{u} = \|H[\Delta i(l), \Delta i(l+1), \dots, \Delta i(l+n-1)]^T\| + Ke^{(l+k)} \quad (9)$$

式中: H 表示预测增益矩阵。

通过比较实际输出与预测值,实时反馈校正PLC控制器的温度控制律。在每个控制周期内,根据最新的预测值和实时获取的反馈信息,展开有限时间范围内的温度调整值滚动优化。这一过程目的是确定当前最佳的控制输入,持续地对PLC控制器的控制律进行调整和优化,以及时响应可能出现的

电镀线镀槽液反应热效应对温度的提升值。PLC控制律的GPC反馈校正滚动优化结果(最优控制律)为:

$$U(l) = i(l-1) + \hat{u} \|h^T(E-g)\| \quad (10)$$

式中: h^T 表示预测增益矩阵的第一行矩阵; E 表示理想温度调节轨迹矩阵; g 表示实际温度调节轨迹矩阵。

在预测设定值后,通过不断地校正、优化和实施最优控制律,输出电镀线镀槽液温度调整的最准确实时前馈值。

2.2 PID 前馈补偿下温度稳定控制实现

考虑镀槽液局部温度不均匀扩散对槽液温度稳定控制影响,将GPC反馈校正滚动优化后的电镀线镀槽液温度最优控制律前馈输出作为PID控制器的前馈指令, PID控制器对电镀自动线镀槽温度偏差实行前馈补偿控制,即根据温度偏差迅速计算出需要的镀槽液内部热传递额外控制量,补偿调节量,以进一步减小误差,使PLC控制器输出更加接近设定的电镀自动线镀槽温度值^[14-15]。

基于GPC—PID控制器的电镀自动线镀槽温度前馈补偿控制结构如图3所示:

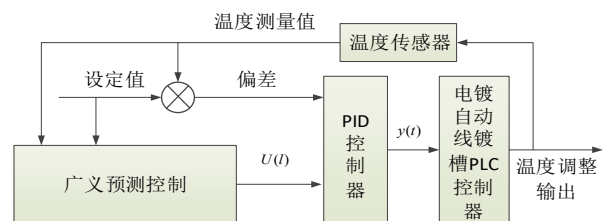


图3 温度控制结构

Fig.3 Temperature control structure

用 $r(t)$ 表示电镀反应温度设定值与实际温度值的偏差,基于最优控制律PID控制器的补偿调节量 $y(t)$ 公式表达如下:

$$y(t) = L_b \left[U(l)r(t) + \frac{1}{L_j} \int_0^t r(t)dt + L_w \frac{dr(t)}{dt} \right] \quad (11)$$

式中: L_b 、 L_j 、 L_w 表示PID比例、积分、微分常数; t 表示温度值。

通过前馈补偿PID算法实现电镀自动线镀槽液温度控制,其公式表达如下:

$$y(t)' = y(t-1) + L_b \left\{ [r(l) - r(l-1)] + \frac{T}{L_j} r(l) + \frac{L_w}{T} [r(l) - 2r(l-1) + r(l-2)] \right\} + i(l) - i(l-1) \quad (12)$$

根据输出的电镀自动线镀槽液温度控制值,运

行基础PLC控制器,保证电镀自动线镀槽液温度保

持在设定值。

3 实验与分析

为了验证基于PLC融合PID补偿的电镀自动线镀槽液温度控制方法的有效性,对其完成如下测试。

选择某地电镀自动线镀槽作为实验对象。实验现场如下图4所示:

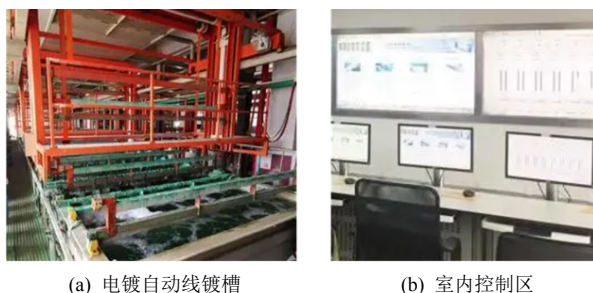


图 4 实验现场图

Fig.4 Experimental site map

实验设置:通过电缆将PLC控制器的数字量输出模块与电镀自动线镀槽液温度控制的执行机构连接以输出控制信号;通过通信接口将PLC控制器与数据采集与监控系统连接,实现数据的实时传输和监控;通过温度传感器采集温度信号。

实验设备及所需参数如下:

PLC控制器型号为S7-1200,其处理速度为100 MHz,输入输出点数为16 DI/16 DO,通信接口采用以太网;温度传感器类型为光纤光栅温度传感器,测量范围 $0^{\circ}\text{C}\sim 1\,300^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,响应时间小于1 s;PID控制器比例系数为30%,积分系数为240 s,微分系数为30 d;执行机构(电动调节阀)型号为DN100,其工作压力为1.6 MPa,工作温度 $0^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$,控制精度 $\pm 1\%$;数据采集与监控系统的采样频率为1 s/次,显示分辨率为 0.1°C 。

采用文献[3]和文献[4]方法对镀槽内溶液温度进行测试与控制,并与采用本文方法进行测试控制的效果进行比对。分别用设定值预测效果、设定值跟踪控制效果、抗干扰响应效果等三个指标来验证所提方法的适用性与精准性。

3.1 溶液温度传感校准效果

光纤光栅温度传感器有效折射率为1.45,光纤光栅中心波长为1 550 nm,光栅周期为 $0.5\,\mu\text{m}$ 。分别测试未校正和校正后的电镀自动线镀槽溶液温度,数据见图5。

由图5可知,随着镀槽内溶液温度变化,用未经校准的光纤光栅温度传感器进行测量,测量值与真实值存在较大偏差。对光纤光栅温度传感器进行敏感度校正后,温度测量偏差稳定在 2°C 以下。这说明传感器的敏感度校正对减小测量偏差、提升传感数据精度有明显作用。

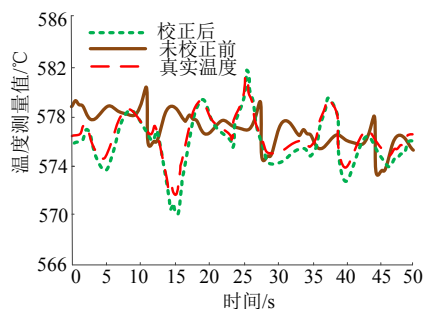


图 5 温度传感数据校准效果

Fig.5 Calibration effect of temperature sensing data

3.2 GPC 对电镀槽温度变化趋势的预测效果

控制周期设为1 min。采用本文方法,根据实测的电镀自动线镀槽运行工况数据,预测下一时刻镀槽增加冷却负荷时温度变化值,记录预测值与实际值,其对比数据见图6。

由图6可知,本文方法预测电镀自动线镀槽下一时刻增加冷却的温度预测值与实际变化值之间的偏差较小。这一结果充分验证了本文方法在预测温度设定值方面的有效性和准确性。

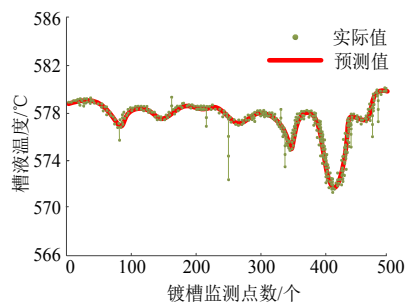


图 6 变化值预测效果

Fig.6 Prediction effect of change value

3.3 GPC 预测反馈校正滚动抗干扰响应效果

在控制系统的内回路中,引入幅度为 8°C 的电镀反应热效应温度干扰量,分别在电镀自动线镀槽运行负荷为50%、75%、100%情况下,采用本文方法、模糊PID自修正方法(文献[3]方法)、PWM控制方法(文献[4]方法)完成电镀自动线镀槽液温度控制,记录三种方法的抗干扰响应。三种方法的抗干扰响应数据见图7。

由图7可知,在施加干扰后,与模糊PID自修正方法和PWM控制方法相比,本文方法在三种负荷条件下展现出更短的温度变化响应时间和更强的抗干扰能力。这表明本文方法在抗干扰响应方面表现更优,对电镀反应热效应干扰响应变化的控制效果也更佳。

本文方法的优势在于结合了前馈控制的预测

性和反馈控制律的滚动校正优化策略,充分利用了前馈控制基于预测值的提前反应能力和反馈控制根据实际偏差进行的校正能力。这种组合不仅使系统能够更迅速地响应变化,还提升了温度控制的动态性能。尤其是在面对干扰时,所提方法能够更快地调整控制策略,有效减少温度的波动,从而展现出更强的抗干扰能力和更优的控制效果。

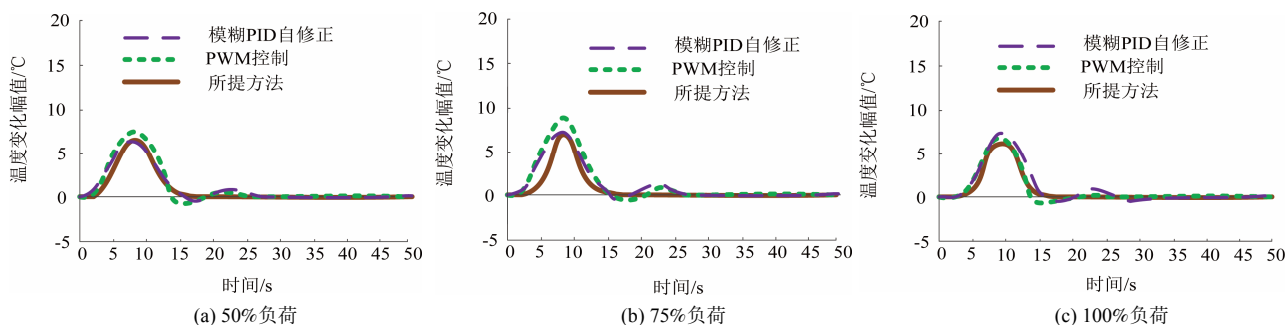


图7 三种方法的抗干扰响应情况

Fig.7 Prediction effect of change value

3.4 PID 前馈补偿温度稳定控制效果

在本次实验中,将槽液温度恒定值设置为初始值(500℃),并稳定一段时间,确保系统处于稳定状态。使用传统方法(阈值结合PID控制)对槽液温度进行调节。在控制过程中,记录温度随时间变化的数据。使用本文提出的PID前馈补偿方法对温度进行控制。同样记录这一过程中温度变化。将这两种控制方法下的温度变化数据进行对比,见图8。

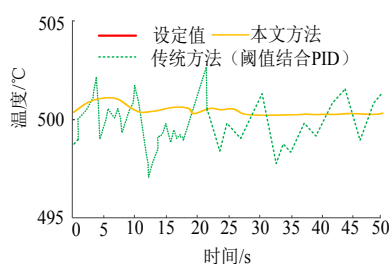


图8 两种控制方法下温度控制变化曲线

Fig.8 Temperature control variation curves under two control methods

由图8可以看出,采用传统方法(阈值结合PID)时,温度在接近500℃时出现了较大的波动,有时甚至超出了 ± 3 ℃的范围。此时,PID控制器会进行校正,但由于其响应速度较慢,导致温度在恒定值附近反复波动。相比之下,经过本文方法进行PID前馈补偿后,温度在接近恒定温度值时的波动明显较小,电镀槽内温度较为稳定。这主要在于所提方法

中的前馈补偿控制确保了系统能够快速响应并稳定在恒定值附近。因此,采用本文方法得到的温度变化曲线更加平滑,没有显著的超调或欠调现象。这表明所提方法的控制稳定性和精确性效果更佳,温度控制效果更优。通过该方法,系统能够更有效地应对温度的波动,保持其在恒定值附近的稳定状态。

4 结语

本文提出了GPC-PLC-PID电镀线镀槽溶液温度抗干扰稳定控制方法。该方法能够通过光纤光栅温度传感器准确感知电镀线镀槽液温度,能够有效通过GPC预测温度变化趋势,并提高电镀自动线镀槽液温度控制的稳定性和响应速度,增强系统抗干扰能力。为电镀自动线镀槽的安全、高效运行提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 肖江,张超,张伟,等. 温度和电流密度对亚硫酸盐电镀金的影响[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(1): 1-5.
- [2] 丁耀,沈岳军,付定国,等. 热处理温度对电镀 Ni-Co-P 镀层的性能影响[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(8): 25-29.
- [3] 王臻卓,周方,巴文兰. 应用模糊 PID 自修正的电镀槽液温度控制方法[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(5): 77-84.

- [4] 唐卫斌, 杨博文. 基于 PWM 控制的恒温液体反应槽系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(6): 9-12.
- [5] Taler D, Sobota T, Jaremkiewicz M, et al. Control of the temperature in the hot liquid tank by using a digital PID controller considering the random errors of the thermometer indications[J]. Energy, 2022(1): 122771.1-122771.14.
- [6] 李中望. 基于状态观测器的电镀液温度状态反馈控制系统[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(4): 269-273..
- [7] 杨丽, 陈雪, 王子涵, 等. 基于激光诱导石墨烯的柔性超疏水温度传感器研究[J]. 电工技术学报, 2023,38(增1): 257-266.
- [8] 赵勇, 赵健, 吕日清, 等. 基于无芯光纤与光栅级联的反射式大量程高分辨力海水温度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 178-185.
- [9] 郭宁, 李晓青. 基于自适应模糊 PID 的电气设备温度调试仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2): 56-60.
- [10] 梁吟曦. 基于 PLC 技术的联合收割机电气控制系统设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(2): 221-224.
- [11] 曹琳, 张峻霞, 房德磊, 等. 基于可编程逻辑控制器 (PLC) 的专用组合机床电气控制系统[J]. 天津科技大学学报, 2023, 38(3): 45-51.
- [12] 王鹏程, 崔佳伦, 申江卫, 等. 基于广义预测控制和滑模观测器的永磁同步电机级联控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(10): 83-87.
- [13] 刘颖明, 王树旗, 王晓东. 基于广义预测控制的风电场调频控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 405-410.
- [14] 李光保, 高栋, 路勇, 等. 基于卡尔曼滤波的模糊 PID 热处理温度控制系统的设计[J]. 金属热处理, 2023, 48(8): 235-241.
- [15] 陈云霞, 李松青. 基于 PLC 的镀槽温度控制系统设计[J]. 机械与电子, 2021, 39(2): 30-33.

上接 93 页

- [9] 韩力, 李明键, 杨晓冬, 等. 无氰镀银新工艺在新东北电气集团的应用[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(8): 26-29.
- [10] 张磊, 熊永亮. 铝合金在船舶工程中的应用实践[J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(8): 7-9.
- [11] 高建宝, 李志诚, 刘佳, 等. 计算辅助高性能增材制造铝合金开发的研究现状与展望[J]. 金属学报, 2023, 59(1): 87-105.

上接 98 页

- [13] Moteshakker A, Danaee I. Microstructure and corrosion resistance of dissimilar weld-joints between duplex stainless steel 2205 and austenitic stainless steel 316L[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2016, 32: 282-290.
- [14] Sánchez-Tovar R, Montañés M, García-Antón J. Effect of the micro-plasma arc welding technique on the microstructure and pitting corrosion of AISI 316L stainless steel in heavy LiBr brines[J]. Corrosion Science, 2011, 53: 2598-2610.