

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.05.011

应用模糊PID自修正的电镀槽液温度控制方法

王臻卓^{1*}, 周方², 巴文兰³

(1. 河南工业职业技术学院 自动化工程学院, 河南 南阳 473000; 2. 南阳技师学院 制造工程系, 河南 南阳 473000; 3. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 471000)

摘要: 电镀槽液温度自动控制过程属于典型的混沌过程, 在温度采集的过程中存在明显的非线性波动。典型的比例-积分-微分(PID)控制算法在这种混沌特性与非线性特性干扰下, 存在控制精度较低、稳定性和鲁棒性较差等问题。此外, 为解决非线性问题, PID算法需要循环迭代计算, 存在控制时滞问题。以模糊控制为基础, 提出了基于模糊PID的电镀槽液温度自动控制方法。该方法先设计温度数据采集结构, 并将移动平均滤波、温度修正算法引入到采用的数据采集结构中, 完成电镀槽液的实时温度数据采集。然后将采集到的温度数据作为构建的模糊PID控制器的输入。利用模糊控制规则引入修正因子, 实现电镀槽液温度的自动控制。考虑到电镀槽液的时滞特性, 在控制器中加入粗糙预估参考模型, 对该特性加以抑制, 提升控制性能。最后应用实验证明了所提方法的先进性。实验结果表明: 所提方法具有较高的控制精度和效率, 能够有效降低超调量和波动, 应用效果较好。

关键词: 模糊控制; PID算法; 修正因子; 虚拟仪器温度检测; 时滞特性抑制

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

A temperature control method for electroplating bath solution using fuzzy PID self correction

Wang Zhenzhuo^{1*}, Zhou Fang², Ba Wenlan³(1. Department of Automation Engineering, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China;
2. Department of Manufacturing Engineering, Nanyang Technical College, Nanyang 473000, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 471000, China)

Abstract: The automatic temperature control process of electroplating bath is a typical chaotic process, and there are obvious nonlinear fluctuations in the process of temperature acquisition. Under the interference of chaotic and nonlinear characteristics, the typical PID control algorithm leads to problems such as low control accuracy, poor stability and robustness. In addition, in order to solve the nonlinear problem, the PID algorithm needs cyclic iterative calculation, which has the problem of control time delay. Based on fuzzy control, an automatic control method of electroplating bath temperature based on fuzzy PID is proposed. The method designs the temperature data acquisition structure, then integrates moving average filtering and temperature correction algorithm into it for real-time temperature data acquisition of electroplating bath solution. Then the collected temperature data is used as the input of the fuzzy PID controller. Using fuzzy control rules and introducing correction factors, the automatic control of electroplating bath temperature is realized. Considering the time-delay characteristics of electroplating bath,

收稿日期: 2024-01-25

修回日期: 2024-03-20

作者简介: 王臻卓(1985—), 女, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 电气工程, email: wzzjianqiang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61502148)

the rough prediction reference model is added to the controller to suppress the characteristics and improve the control performance. Finally, the experimental results show that the proposed method is advanced. The experimental results demonstrate that the proposed method exhibits high precision and efficiency in control, effectively reducing overshooting and fluctuations, and yielding positive results in application.

Keywords: fuzzy control; PID algorithm; modifying factor; virtual instrument temperature detection; delay characteristic suppression

电镀是以电化学原理为基础的一种表面处理技术。电镀过程中,槽液温度对电镀膜质量有很大影响。通过控制槽液温度,可以优化结晶形貌、均匀性、致密性等电镀膜的物理属性,从而提高电镀质量。不同的电镀反应在不同温度下具有最佳的反应速率^[1],通过控制槽液温度,可以使电镀反应在适宜的温度范围内进行,提高反应速率,缩短电镀时间,提高电镀效率。为获得较好的电镀效果,开展电镀槽液的温度控制研究具有重要意义。

李中望^[2]针对实际生产中电镀槽的各方面影响因素,引入电镀过程中各情况的状态向量,建立了一个线性反馈闭环控制器,并加入积分环节实现无静差,在此基础上考虑到电镀槽液温度的滞后特性,对其传递函数实施转换处理,以此实现电镀槽液温度的自动控制。该方法在进行槽液温度采集后,未对其线性波动进行处理,存在控制精度较低的问题。许家忠等^[3]提出一种基于改进粒子群优化的比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制算法,该方法在建立基于PID的电镀槽液温度控制器的过程中,将粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法与模糊PID算法相融合,采用改进的粒子群算法实现控制器三个参数的优化与自动调整,以保证电镀槽液温度的控制效果。该方法在采集电镀过程中的温度参数后,未对由于环境等因素引起的数据波动进行修正,导致温度控制效果不佳、鲁棒性不强。薛迪杰等^[4]针对镀液温度难以控制的问题,应用ZigBee技术,设计了一种控制系统。该系统通过温度测控终端监测各槽槽液的温度,并采用PID算法进行实时温度控制。该方法虽然可以在一定程度上提升镀液的控制精度,但其对初始温度的数据预处理不到位,导致温度控制精度不佳。陈云霞等^[5]为了提高镀槽温度的控制精度,利用PLC技术设计了一种温度控制系统。该系统在硬件

结构的基础上,将模糊控制理论引入到PID控制中,增强了系统温度控制的自适应能力,并提高了控制精度。这种方法确实能够提升温度控制的精度,但由于该方法对温度数据监测采集不到位,导致其温度控制精度较差,鲁棒性和稳定性较低。为了解决上述方法中存在的问题,提出基于模糊PID的电镀槽液温度自动控制方法。

1 电镀槽液温度数据采集及控制方法设计

1.1 电镀槽液温度的数据采集设计

为实现对电镀槽液温度的良好控制,需对槽液温度数据进行实时采集。为了降低温度数据的采集成本,以电镀过程中电镀槽液的动态响应为基础,采用一种虚拟仪器作为电镀槽液温度的采集元件,实现数据采集。虚拟仪器结构图如图1所示。

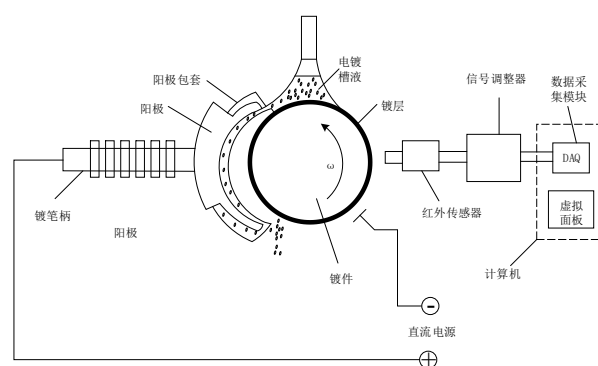


图1 虚拟仪器结构图

Fig. 1 Structure diagram of virtual instrument

图1所示的虚拟仪器中,当镀件温度增加时会发射辐射^[8]。只要能够检测到铸件辐射的能量,即可确定其温度,实现温度数据的采集。在电镀过程中,会出现一种名为“谐振”的电化学沉积电路现象。这一现象会导致电流密度产生变化,进而影响溶液中离子的迁移速度。电流密度的波动会导致沉积速率产生相应的波动,进一步引起电镀槽液温度

发生非线性变化。针对这一问题,以提升温度采集精度和效率为原则,设计了应用虚拟仪器进行温度采集的流程图,其如图 2 所示。

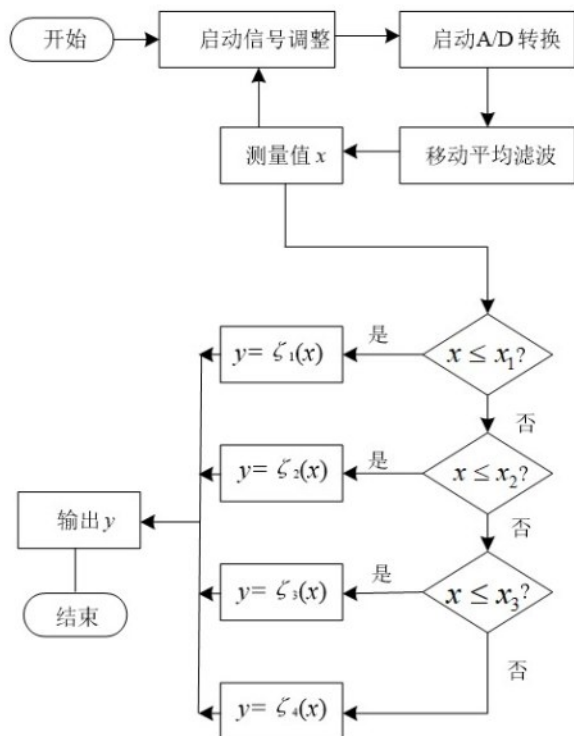


图 2 虚拟仪器采集控制流程图

Fig. 2 Flow chart of virtual instrument acquisition and control

图 2 中: x 代表经过滤波后的测量值; x_1, x_2, x_3 代表设定阈值; ζ_i 为修正系数; y 代表输出值。由图 2 可知,虚拟仪器采集控制主要分为两个部分,具体设计如下。

1.1.1 移动平均滤波

为减少电镀过程沉积电路谐振对温度引起的非线性干扰,将采集到的连续数据转换为长度为 n 的队列,并利用移动平均滤波算法^[9]求出第 $m(m \geq n)$ 次测量的算术平均值 \bar{y}_m :

$$\bar{y}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{m-1} y_{m-i} \quad (1)$$

式中: y_{m-1} 表示第 $m-1$ 次采样数据。在新一次检测后,将原始序列中的队首数字全部去除,其余数字按顺序前移,并插入新的采样数字成为新序列的队尾。在此基础上对该序列展开算术运算作为检测结果,通过移动平均滤波器的补充,实时检测电镀过程中电镀槽液的温度。

1.1.2 电镀槽液的温度修正

为得到更加准确的结果,针对移动平均滤波处理后的数据,再采用非模型修正算法^[10]以消除虚拟仪器测量到的背景辐射。该方法利用曲线拟合方式确定镀件实际温度 y_i 和测量值 x_i 之间的函数关系。将温度区间划分为 4 段,对于第 i 个区间有: $(x_{i0}, y_{i0}), (x_{i1}, y_{i1}), \dots, (x_{i4}, y_{i4}), x \in [a_i, b_i] (i=1, 2, 3, 4)$, 4 次插值多项式 $\gamma_i(\bar{y}_m)$ 可表示为:

$$\gamma_i(\bar{y}_m) = x_{i4} \bar{y}_m^4 + \dots + x_{i1} \bar{y}_m + x_{i0} \quad (2)$$

将 4 个插值函数合并即可求得电镀槽液温度的修正数据曲线,可表示为:

$$s = \zeta_1 \cdot \gamma_i(\bar{y}_m) \quad (3)$$

式中 ζ_1 代表修正系数。通过上述,即可获取更为精确的电镀槽液温度数据。

1.2 电镀槽液温度的控制方法设计

在完成电镀槽液温度的数据采集后,引入 PID 算法开展温度的精准控制。传统的 PID 控制算法在对电镀槽液温度进行控制时,无法很好地应对算法本身的混沌特性与非线性干扰,可能造成控制精度低、稳定性和鲁棒性较差的问题。为解决非线性带来的控制时滞问题,引入了模糊理论对 PID 算法进行循环迭代计算,并在 PID 控制器中引用修正因子,以更好地应对非线性引起的控制时滞问题。设计的电镀槽液温度的自动控制结构见图 3。

接下来,引入模糊控制^[11]完成 PID 算法的改进,

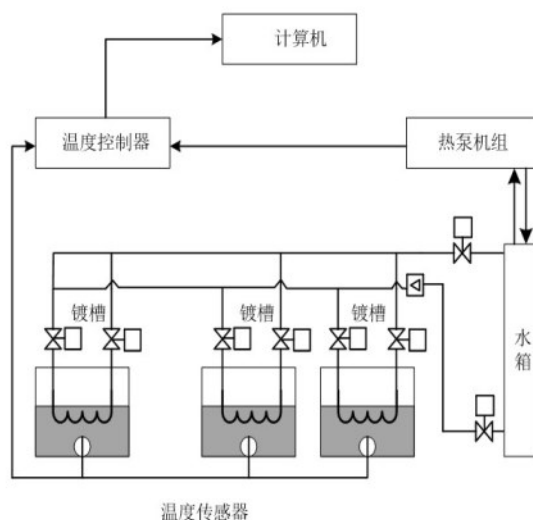


图 3 电镀槽液温度的控制结构

Fig. 3 Temperature control structure of electroplating bath solution

设计的模糊PID控制器结构见图4。

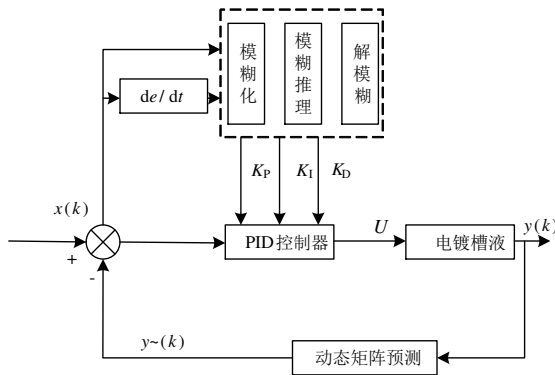


图4 模糊PID温度控制器原理

Fig. 4 Principle of fuzzy PID temperature controller

图4中: $x(k)$ 为输入; $y(k)$ 为输出; U 为控制器输出集合; $y\sim(k)$ 为输出反馈; K_p 为比例增益; K_i 为积分时间; K_d 代表微分时间; de/dt 为误差的微分值。如图4所示,PID控制器由微分、积分以及比例环节组成,表示为 K_p 、 K_i 、 K_d ,控制器数学表达式为:

$$u(t)_s = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式中: $e(t)$ 和 $u(t)_s$ 分别用于表示控制器的控制偏差值和输出值。在此基础上,将上述虚拟仪器获取的电镀槽液温度值作为输入,引入模糊控制机制。将误差变化率 ec 和温度偏差 e 作为计算指标展开计算,并将最后的计算结果输入到模糊PID控制器中实现控制。

电镀槽液温度的调控依赖于阀门的调节以及占空比^[12](占空比为阀门开启时间与周期 T 的比值)。在实际电镀过程中,由于加热能量的传输存在延迟,因此电镀槽液温度的控制会出现相应的延迟^[13-14]。为此,引入一个稳态增益 K ,并获取电镀槽液温度与蒸汽阀开通时间之间的传递函数 G_s :

$$G_s = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} u(t)_s \quad (5)$$

式中: T 指的是运行时间常数; s 代表运行时间; τ 则表示滞后时间。

具体设定如下:

(1)根据传递函数,在模糊PID控制器中,将被控对象的输入量转换为模糊集合的离散值,设定 e 和 ec 输入的论域为 $[-6, 6]$ ^[15]。温度模糊控制器输出集合 U 的论域设为 $[0, 6]$,并划分为7个量化等级,即 $U = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。 e 、 ec 和 U 的模糊集包括负

大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(0)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB)^[16]。

(2) ec 、 e 和控制量之间有相应的对应关系。为了便于描述,设定模糊子集,对子集中的各个变量分别赋予一个三角函数。

(3)离线建立模糊控制表,利用该控制表描述模糊控制关系,随机引入推理合成规律。将电镀槽液温度偏差 e 和偏差变化率 ec 模糊化为13级,其离散论域设为 $X = Y = \{-6, -5, \dots, 0, \dots, +5, +6\}$,求取相应控制量的变量 u 的论域,即:

$$Z = \{-6, -5, \dots, 0, \dots, +5, +6\}^{[17-18]}$$

(4)引入修正因子修正控制误差。设定 e 和 ec 的量化因子分别为 K_p 和 K_i ,输出量 U 的比例因子为 K_d ,这三个因子对控制结果有直接影响。为了使系统响应速度快且无超调,通常需要在线调整这些参数因子。设修正因子为 κ ,模糊化的变量为 N ,模糊集包括{高放(AB),中放(AM),低放(AS),不变(OK),小缩(CS),中缩(CM),大缩(CB)}; N 的论域 $N = \{1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8\}$;基本模糊控制器原量化因子、比例因子分别为 K_c^0 、 K_c^0 ,根据量化后的 e 和 ec 得到修正因子 κ ,调整后的量化因子为 $K_p = \kappa K_c^0$,比例因子为 $K_i = \kappa K_c^0$ 。

(5)根据上述数据,制定在线模糊控制表并将其保存在计算机中,对控制表实施查询,获取各个参数的变量数值,得到增量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。

(6)在整定PID控制参数的基础上得到相关控制量。令电热丝加热,将其能量传输至电镀槽中,结合PID控制算法,计算出控制量,用于自动控制电镀槽液的温度^[19]。

为有效抑制电镀槽液的时滞特性,在上述模糊PID控制器的基础上,引入一个粗糙预估参考模型到控制器中,进一步提高控制器的实时性,数学表达式为:

$$G_y(s) = K_c \cdot u(t)_s / (T_0 s + 1) \quad (6)$$

式中: $G_y(s)$ 代表模糊PID控制器函数; T_0 描述的是模型预测未来一段时间内系统行为所需的时间长度; K_c 表示被控对象的增益函数,根据实际情况,取 $K_c = 30$, $T_0 = 30 \sim 40$ s。模糊PID控制器的输入和输出为综合误差 e_s 和控制变量 u ,控制变量 u 作用于电镀槽液和预估模型。将电镀槽液的温度输出和预估模型的温度输出 \hat{y} 分别与设定温度值 r 对比,得到实际

误差 e 和预测误差 $\hat{e}^{[20]}$ 。在此基础上以 e 和 \hat{e} 作为误差综合环节的控制量,得到模糊PID控制器的最终输入 e_{Σ} :

$$e_{\Sigma} = G_y(s)(1-a)e + a \times \hat{e} \quad (7)$$

式中: a 用于表示取值范围为 $[0,1]$ 的误差权系数。 a 值越大表明 e_{Σ} 中预估误差的占比越大,此时预估数据在控制中发挥的作用也越大,进而可以消除电镀槽液时滞特性的影响,以获取更好的控制效果。

3 实验与分析

通过测试验证基于模糊PID的电镀槽液温度自动控制方法的整体有效性。实验选用台达DVP-SV系列PLC搭建电镀槽液的温度控制平台,通过RS232串口连接触摸屏,并使用DVPDNET-S L接口连接DeviceNet总线,以便输入和显示电镀槽液的相关参数,其硬件配置如表1所示。

表1 测试平台的硬件配置情况

Tab.1 Hardware configuration of the test platform

系统结构	硬件型号选取	功能设置
主站	DVP28SV11R	电镀主站 PLC
	MT6070IH	触摸屏
	DVPDNET-SL	通信模块
从站	DVP-12SA	电镀从站 PLC
	DVP08SP	数字量 I/O
	DVP06XA	模拟量 I/O
	DVP04PT	温度测量

以上述配置为基础,验证所提方法的控制过程鲁棒性,实验在多个工作环境下展开电镀槽液温度控制测试,设定2个环境:

(1)在恒温箱内展开测试,设定箱内温度为 $34.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在温控趋于平衡后,将温度降低为 $29.00\text{ }^{\circ}\text{C}$,并使其在 $29.00 \pm 0.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间快速波动。

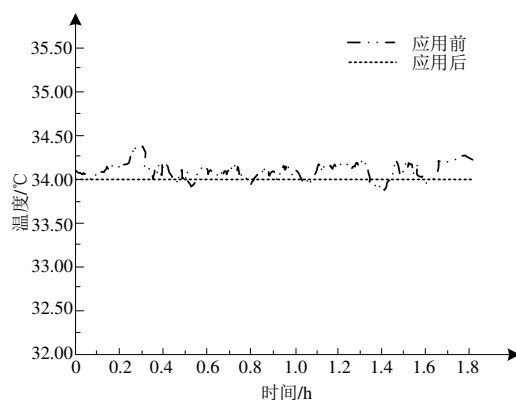
(2)在平台环境下展开测试,开始阶段设定环境温度为 $31.00\text{ }^{\circ}\text{C}$,使其温控趋于平衡,之后在 0.3 h 时使其温度在 $29.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $33.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间快速波动,其测试环境如图5所示。

先在两种环境下开展数据采集实验,设定箱内温度为 $34.00\text{ }^{\circ}\text{C}$,对比所提方法进行前后温度采集结果,得到的对比图像见图6。如图6所示,在恒温状态下应用所提方法前,采集的温度近似于设定温度,但受到非线性波动的影响,其误差为 $\pm 0.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而应用所提方法后,其采集的温度数据符合设定,为

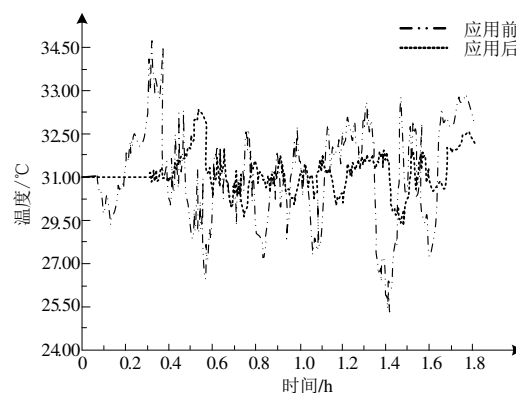


图5 电镀槽液温度控制测试环境图

Fig. 5 Temperature control test environment diagram of electroplating tank solution



(a) 恒温工况



(b) 变温工况

图6 温度数据采集测试

Fig. 6 Temperature data acquisition and test

34.00 °C,且稳定性较强,证明应用所提方法可对温度采集数据的非线性波动进行控制,应用效果较好。在变温状态下,应用所提方法前,温度受非线性波动影响,在0.1 h之前温度就开始波动,且波动温度在25.50~34.50 °C之间,未按照要求进行变温。应用文本方法,可实现恒温到变温的变化,应用效果较好。

在完成所提方法温度数据采集效果的验证后,设定两种工况测试所提方法控制稳定性,由此得到图7所示的测试结果。如图7所示,若输出的温度变

化曲线不平稳且出现过多“毛刺”,则说明应用所提方法控制,其鲁棒性较低,反之证明其控制稳定性较好。分析图7曲线可知,在两种工况下,所提方法均具有良好的控制效果,曲线平稳且未出现“毛刺”现象,由此可证明,所提方法能够在多种工况条件下,实现期望的电镀槽液温度控制精度。原因是所提方法在数据采集过程中对温度的非线性干扰进行了修正,并在应用模糊PID算法控制过程中引入修正因子修正了控制误差,以提高电镀温度的控制精度和稳定性。

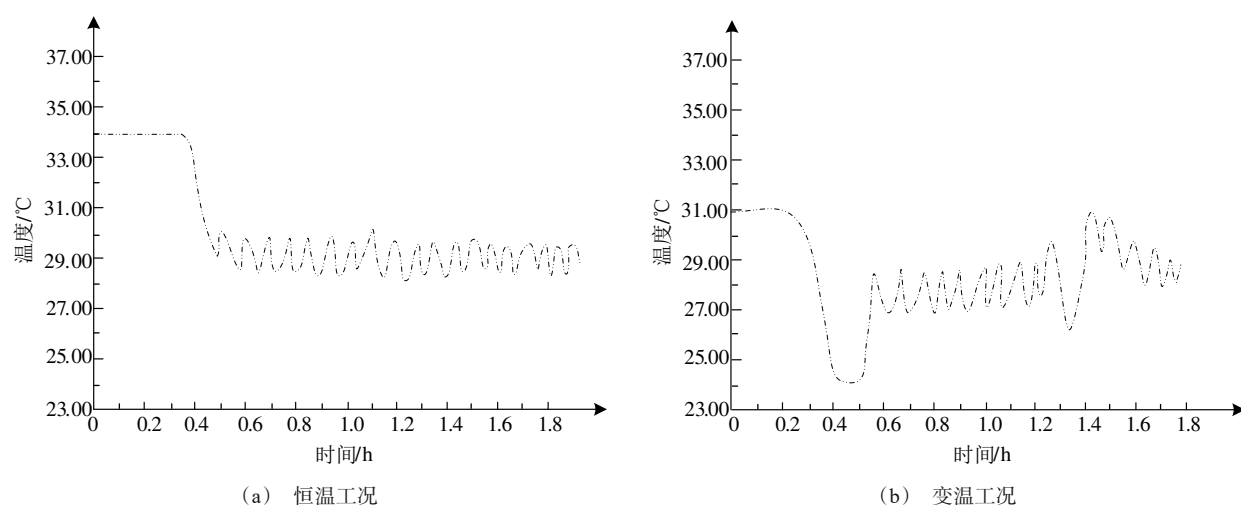


图7 不同环境下控制效果

Fig. 7 Control effects in different environments

经过上述验证,选择文献[2]和文献[3]中的方法作为对比方法,进行了对比实验。将超调量作为衡量电镀槽液温度控制方法的性能指标,测试三种控制方法对突然的温度变化响应的快速性和稳定性。如果一个温度控制方法的超调量过大,说明该方法在阶跃输入下的响应速度过快,无法有效抑制温度的波动。在实验过程中,不断改变电镀过程时的温度,得到对比结果如图8所示。

分析图8可知,随着测试次数的不断增多,所提方法能够有效地降低温控过程的超调量。说明所提方法在面对突然的温度变化时,能够更加稳定地实施调节控制,使电镀过程更快地恢复到设定温度,并且偏差较小。与其相比,文献[2]方法和文献[3]方法的超调量整体偏大,不能有效地控制温度的波动,导致温控过程中出现较大的偏差。原因是文献[2]的方法过于追求快速响应速度,忽略了温度控制稳

定性的考虑。文献[3]的方法在控制策略中没有充分考虑电镀过程中的非线性问题,导致控制效果不佳。相比之下,所提方法在数据采集阶段进行了数据非线性修正,并引入了修正因子来改善模糊PID控制算法的控制误差,使其能够更好地适应电镀过程中的混沌特性和非线性干扰,及时调整控制策略,在面对突然温度变化时具备更好的控制特性。

在面临干扰状态的情况下,高效的温度控制方法可以迅速响应温度控制过程中可能出现的波动,有效提高控制的精度和效率。为验证所提方法在温度控制上的卓越性,将理想温度设置为20.00 °C,在一个较嘈杂的恒温工作环境中开展电镀槽液温度的控制测试,并对三种方法的控制效果进行对比,其响应曲线如图9所示。

由图9可知,相比于两种传统方法,所提方法能够在更短时间和更稳定的状态下准确达到目标控制

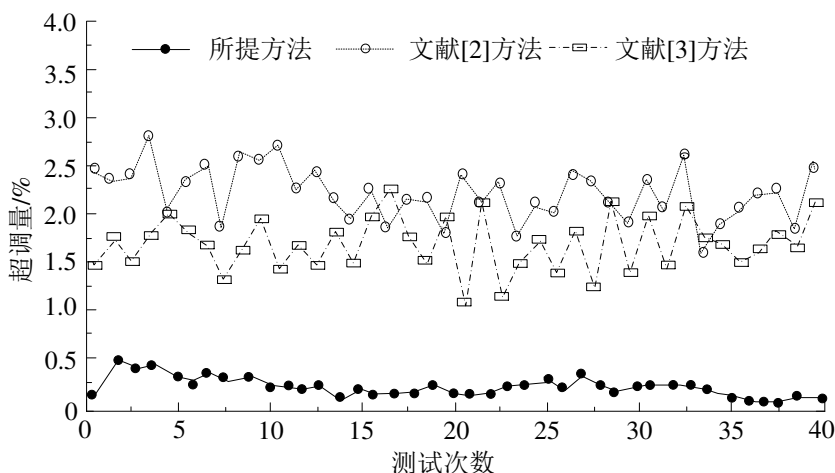


图 8 不同控制方法超调量对比

Fig. 8 Comparison of overshoot volume by different control methods

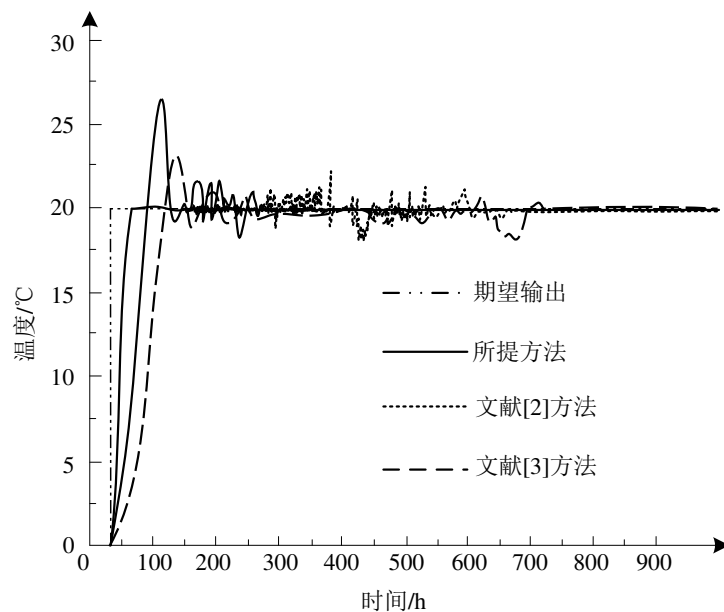


图 9 不同方法温控效果

Fig. 9 Temperature control effects of different methods

温度,且可以有效消除控制过程中的静态误差。主要是由于所提方法通过引入修正因子修正数据的方式精准获取了温度数据,并及时调整控制策略,使得控制器在面对电镀过程中复杂的非线性干扰时表现出更强的控制能力,从而达到更精确、更稳定的温度控制效果。

4 结语

为了提高镀件工艺的质量和效率,避免电镀槽液温度过高对电镀过程产生的影响,解决现有方法

受非线性波动干扰对电镀槽液温度控制精度差、稳定性差的问题,提出了基于模糊PID的电镀槽液温度的自动控制方法。该方法采用虚拟仪器实时检测电镀槽液的温度变化,引入算法完成温度数据的非线性波动修正。然后通过设计一个模糊PID控制器,引入修正因子调整相关参数,以精确控制电镀槽液的温度。实验结果表明,该方法可较好地修正温度数据的非线性波动,提高温度控制精度和稳定性,可在更短时间和更稳定状态下准确达到目标温度。优于对比方法,具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 金永清, 尹红国. 低铝型热镀锌铝镁镀层钢板生产技术探索[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 227-230.
- [2] 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.
- [3] 许家忠, 赵辉, 付天宇, 等. 感应加热 CFRP 温度控制算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2022, 43(1): 17-23.
- [4] 薛迪杰, 陈军, 陈景召. 基于 ZigBee 的电镀生产线温度集中监控系统[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(1): 31-35.
- [5] 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): 30-32.
- [6] 刘宝琛, 孙晓帮, 武智惠, 等. 超级电容串联模组自动检测台研制[J]. 机床与液压, 2023, 51(12): 112-116.
- [7] 朱晶, 卓鸿俊, 朱立群. 电化学沉积等表面技术在集成电路制造中的作用[J]. 中国表面工程, 2022, 35(4): 248-256.
- [8] 闫海鹏, 胡贝贝, 牛虎利, 等. 全陶瓷球轴承电主轴磨削工件时辐射噪声特性研究[J]. 制造技术与机床, 2021(4): 111-114.
- [9] 盛文娟, 董壮志, 杨宁, 等. 基于集成移动窗口的可调谐滤波器温度补偿研究[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 53-59.
- [10] 吕孝根, 向伟, 邓浩, 等. 基于摩擦和温度修正的 Ti-6Al-4V 钛合金热变形本构模型建立[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2023, 60(2): 137-142.
- [11] 吴敏, 王晓璐, 姜玉东, 等. 深度确定性策略梯度与模糊 PID 的协同温度控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(12): 2358-2365.
- [12] 胡宇航, 杜春燕, 杨海成, 等. 占空比对 SiCp/Al 基复合材料微弧氧化膜层组织及性能的影响[J]. 材料保护, 2023, 56(6): 115-122.
- [13] 谭平, 施惠元, 苏成利, 等. 具有丢包补偿的 GORC-PID 算法无线温度控制系统[J]. 应用科学学报, 2023, 41(6): 1078-1088.
- [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] 魏良亭, 朱焜秋. 基于改进型粒子群算法的模糊 PID 电阻炉温度控制方法[J]. 冶金自动化, 2023, 47(1): 112-116.
- [16] 张中卫, 杨彦奇, 杨海坤. 基于自适应模糊 PID 的输液温度控制系统研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 137-145.
- [17] 刘艳峰. 基于模糊 PID 算法的温度控制系统的设计[J]. 电子产品世界, 2023, 30(5): 17-19.
- [18] 孟锦涛, 国海, 王磊, 等. 基于 GA 优化的模糊 PID 塑料挤出机温度控制系统设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 84-90.
- [19] 张皓, 涂雅培, 高瑜翔, 等. 基于多重模糊神经网络的 PID 温度控制算法[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 58-65.
- [20] 周冬冬, 陈明霞, 赵金迪. 基于 FFRLS 辨识优化橡胶挤出机 Smith-模糊 PID 温度控制系统[J]. 机床与液压, 2022, 50(15): 158-165.