

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.08.008

基于神经网络PID算法的镀液温度控制系统

雷翔霄^{1,2*}, 徐立娟¹, 唐春霞¹

(1. 长沙民政职业技术学院, 湖南长沙 410004; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要: 设计了电镀槽液的温度控制系统, 采用BP神经网络改进PID算法, 实现了获得近似最优控制参数, 并将BP-PID算法应用于电镀槽液温控系统中。在MATLAB中仿真实验表明, BP-PID控制算法能快速的整定出最优PID参数, 并使系统达到较好的控制效果。实际应用表明: 当控制温度为60℃时, BP-PID算法与常规PID算法相比具有更好的控温效果, 超调率小于3%, 稳态精度小于±1.5℃。

关键词: 电镀; BP神经网络; PID算法; BP-PID算法

中图分类号: TP278

文献标识码: A

Bath Temperature Control System Based on Neural Network PID

LEI Xiangxiao^{1,2,*}, XU Lijuan¹, TANG Chunxia¹

(1. Changsha Social Work College, Changsha 410004, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A temperature control system of electroplating solution was designed. BP neural network was used to improve the PID algorithm to achieve the approximate optimal control parameters, and the BP-PID algorithm was applied to the solution temperature control system. The simulation experiment in MATLAB showed that the BP-PID algorithm could adjust the optimal PID parameters quickly, and make the system achieve a preferable control effect. The practical application showed that the BP-PID algorithm had better temperature control effect than the conventional PID algorithm when the temperature was 60℃. The overshoot rate was less than 4%, and the steady-state accuracy was less than 1.5℃.

Keywords: electroplating; BP neural network; PID algorithm; BP-PID algorithm

电镀是在待镀基材表面镀上一薄层其他金属或合金, 以提高基材的耐腐蚀性、耐磨性或硬度等性能。电镀时, 在阳极和阴极间通以直流电流, 镀液中的金属阳离子在阴极表面还原为金属原子。

镀液温度是影响镀层表面质量和电镀效率的一个重要因素^[1], 镀液温度升高, 阴极电流密度增加^[2], 会加快化学反应速度, 有助于提高阴极沉积速率, 进而提高电镀效率, 但也可能导致镀层结晶过大,

收稿日期: 2020-01-18

修回日期: 2020-05-06

作者简介: 雷翔霄, 博士, 副教授, 研究方向: 智能控制、优化算法等; Email: 305444938@qq.com

基金项目: 湖南省自然科学基金(2019JJ70005), 湖南省职业院校教育教学改革研究项目(ZJGB2019002), 国家自然科学基金(51677063)。

电镀质量难以满足工艺要求^[3]。文献^[4]中,当铁镀液温度为 65 ℃时,电沉积速率较低为 0.022 $\mu\text{m/s}$;当镀液温度为 95 ℃时,铁离子的活性增强,镀铁层的沉积速率增大为 0.051 $\mu\text{m/s}$ 。文献^[5]指出,当镀液温度为 40 ℃时,基质金属的表面扩散的能力不强,镀层沉积速度较慢,导致 Ni-SiC-MoS₂ 镀层厚度较薄约为 20 μm ;镀液温度为 50 ℃时,镀液中的热运动相比 40 ℃时更加活跃,阳离子在镀液中的运动能力增强,分布更加均匀,使得镀层与基体的结合较好, Ni-SiC-MoS₂ 镀层表面平整。而当镀液温度为 60 ℃时,镀液黏度下降,镀层与基体结合处出现裂纹, Ni-SiC-MoS₂ 镀层质量又变差。文献^[6]指出,在铬-石墨烯电镀过程中,镀液温度上升,阴极电流效率降低,复合镀层变薄,使得复合镀层的显微硬度降低。由上述可知,无论何种镀层材质,镀液温度都是影响镀层质量的一个因素。故电镀时,如何根据电镀工艺和镀层质量控制合适的镀液温度就显得十分重要。

研究者对温度控制进行了大量研究。文献^[7]从优化镀铬工艺、改善电镀作业环境的角度出发,采用常规 PID 控制算法对镀液温度进行控制,基本满足镀液温度控制的要求,但在水洗槽中,温度的变化波动较大。文献^[8]为解决电镀过程中的生产效率低,需人工调节控制温度及电镀质量不稳定等问题,利用 S7-300PLC 和常规 PID 算法基本实现了镀槽温度的恒温控制。文献^[9]采用 Smith 预估 PID 控制算法控制波峰焊的焊接温度,控温效果较好。文献^[10-12]将 BP-PID 算法分别应用于 DBF 激光器进行恒温控制、无线分布式温度控制系统及热导传感器恒温控制系统,均达到了预期目标,有效提高了温度控制精度。

电镀槽液温度具有大滞后性、非线性、时变性等特点,采用常规 PID 控制难以得到令人满意的控制性能。BP 神经网络可根据输入层数据的变化找到一组近似最优的 PID 参数,目前已得到广泛的应用^[10-12]。因此本文采用 BP-PID 控制算法对镀液温度进行控制,仿真和实物实验表明该方法完全满足电镀工艺要求。

1 BP 网络结构

Rumelhart 等人于 1986 年提出的 BP (back

propagation) 神经网络是按误差反向传播训练的多层前馈网络,在实际中应用比较广泛。文中的 BP 神经网络含 3 个输入层、5 个隐含层和 3 个输出层。3 个输入层分别对应目标温度 r_{in} 、实测温度 y_{out} 和温度偏差 e_k , 3 个输出层对应应常规 PID 控制算法中的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d , 通过过程参数动态调节找到 PID 算法中近似最优的比例、积分、微分系数,获取令人满意的控制效果。BP 神经网络结构图如图 1 所示。

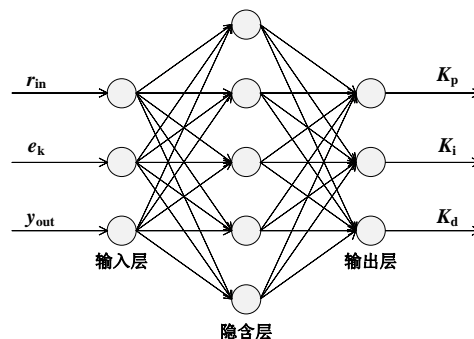


图 1 BP 网络框图

Fig.1 Schematic of BP neural network

BP-PID 算法的结构图如图 2 所示,相较于普通 PID 算法,增加了一个 PID 参数自整定环节。BP 算法根据系统的实时输入、输出和偏差,采用梯度下降算法,计算出 PID 算法中比例、积分、微分系数的实时修正值 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ,并及时修正 K_p 、 K_i 、 K_d 值。进而调节镀液温度控制系统中电阻丝的通断时间 u ,从而实现对镀液温度的闭环控制,使镀液温度在合理范围之内。

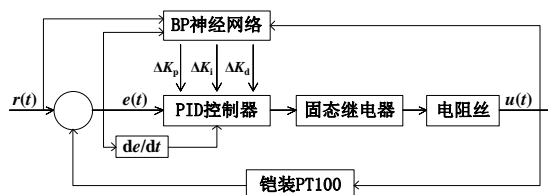


图 2 BP-PID 算法结构图

Fig.2 Schematic of BP-PID algorithm

2 BP-PID 算法

2.1 增量式 PID 算法

位置式 PID 可表示为:

$$u(k) = K_p(e(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j)T + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T}) \quad (1)$$

式中: k 为采样时刻, $k=0,1,2,\dots$; $u(k)$ 为控制量; $e(k)$ 为偏差; T_i 为积分时间; T_d 为微分时间; T 为采样周期; K_p 为比例系数。

由于增量式PID无须存储每一个采样周期所产生的偏差,所需存储空间大为减少,将位置式PID算法中的 $u(k)-u(k-1)$ 得增量式PID,其数学表达式如式(2)所示。

$$\begin{aligned}\Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + \\ &\quad K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))\end{aligned}\quad (2)$$

2.2 BP-PID控制算法

文中BP神经网络的输入层函数为:

$$I(k) = r_{in}(k) + e_k(k) + y_{out}(k) \quad (3)$$

隐含层输入和输出分别为:

$$\begin{aligned}\text{net}_j^{(1)} &= w_{ij}^{(1)} r_{in} + w_{ij}^{(1)} e_k + w_{ij}^{(1)} y_{out} \\ O_j^{(1)} &= f(\text{net}_j^{(1)}) = f(w_{ij}^{(1)} r_{in} + w_{ij}^{(1)} e_k + w_{ij}^{(1)} y_{out})\end{aligned}\quad (4)$$

w_{ij} 为隐含层加权系数,上标(1)时为隐含层,上标(2)时为输出层。 $f(\cdot)$ 为正负对称的S函数:

$$f(\cdot) = \tanh(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}) \quad (5)$$

输出层的输入输出分别为:

$$\begin{aligned}\text{net}_s^{(2)}(k) &= \sum_{j=0}^5 w_{js}^{(2)} O_j^{(1)} \\ O_s^{(2)}(k) &= g[\text{net}_s^{(2)}(k)], s=1,2,3\end{aligned}\quad (6)$$

$O_1^{(2)}(k) = K_p$ 、 $O_2^{(2)}(k) = K_i$ 、 $O_3^{(2)}(k) = K_d$ 。由于在应用中,PID算法的 K_p 、 K_i 、 K_d 均大于等于0,故取如式(7)所示的双曲正切函数为转换函数,式(8)所示的误差的平方为性能指标函数。

$$g(x) = \frac{1}{2}(1 + \tanh(x)) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (7)$$

$$J(k) = \frac{1}{2}[I(k) - O(k)]^2 \quad (8)$$

标准最速下降法的不足是收敛速度较慢,因此在算法中引入动量因子 α ($0 < \alpha < 1$),以期加快算法的收敛能力,缩短算法的寻优时间。

$$\Delta w_{js}^{(2)}(k) = -\eta \frac{\partial J(k)}{\partial w_{js}^{(2)}} + \alpha \cdot \Delta w_{js}^{(2)}(k-1) \quad (9)$$

式中:学习速率 $\eta=0.2$;动量因子 $\alpha=0.01$ 。

据相关文献^[7-8]推导的方法,输出层和隐含层算法的表达式分别如式(10)、(11)所示:

$$\begin{cases} \Delta w_{js}^{(2)}(k) = \eta \rho_s^{(2)} O_j^{(1)}(k) + \alpha \cdot \Delta w_{js}^{(2)}(k-1) \\ \rho_s^{(2)} = e(k) \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \right] \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_s^{(2)}} g'[\text{net}_s^{(2)}(k)] \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta w_{ij}^{(1)}(k) = \eta \rho_j^{(1)} (r_{in}(k) + y_{out}(k) + e(k)) \\ \quad + \alpha \Delta w_{ij}^{(1)}(k-1) \\ \rho_j^{(1)} = f'[\text{net}_j^{(1)}(k)] \sum_{s=1}^3 \rho_s^{(2)} w_{js}^{(2)}(k) \end{cases} \quad (11)$$

3 系统仿真实验

镀液温度控制系统采用电阻丝加热,通过控制固态继电器的通断时间实现电阻丝加热,从而达到控制镀液温度的要求。电阻丝的动态特性可近似用具有惯性延迟的一阶传递函数来表示:

$$G(s) = \frac{e^{-60s}}{55s + 1} \quad (12)$$

在MATLAB 2013A中取幅值为1的阶跃信号,用BP-PID算法仿真,得到图3。从图3可以看出,在阶跃信号的激励下,文中提出的BP-PID算法可以根据外部输入实时修正PID算法中的比例系数、积分系数和微分系数,从而得到当前相对最佳的PID控制参数,获得令人满意的控制效果。

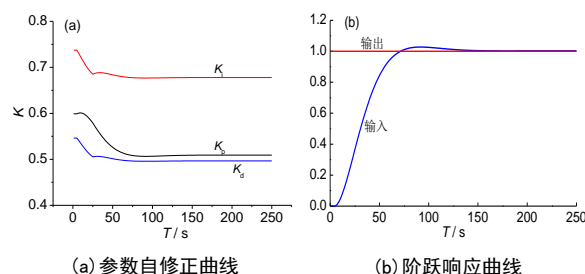


图3 BP-PID算法仿真曲线

Fig.3 BP-PID algorithm simulation curves

4 实验结果及分析

电镀槽液温度控制系统的CPU采用STM32,温度传感器选用铠装PT100,将其安装在电镀槽侧,用以测量槽液的实时温度。当外界温度为20℃、槽液目标温度为60℃时,分别采用常规PID和BP-PID算法对槽液温度进行控制,实测结果如图5所示。由图5可知,在电镀槽液温度控制系统中,BP-PID算法与常规PID算法相比,具有较小的超调量、能更快达到预期目标点位且温度曲线更加平顺,当目标温度为60℃时,BP-PID算法的稳态误差小于 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

5 结论

(1)在MATLAB仿真实验中,BP-PID控制算法

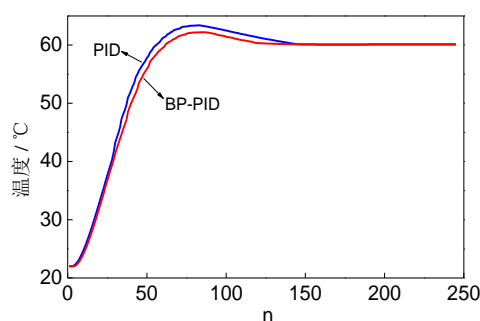


图5 PID和BP-PID算法调控槽温曲线

Fig.5 The bath temperature curves of PID and BP-PID algorithm

能快速的整定出近似最优的PID控制参数。

(2)在实物测试中,当环境温度为20℃,目标温度为60℃,系统的超调量小于3%,稳态误差小于 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,满足电镀工艺要求要求,达到了预期的目的。

参考文献

- [1] 赖柳锋.浅谈电镀工艺的发展[J].当代化工研究,2017(5):101-102.
Lai L F. Discussion of the electroplating technology development [J]. Modern Chemical Research, 2017(5): 101-102 (in Chinese).
- [2] 朱敬洪.浅谈电镀生产中的质量管理[J].化工管理,2019(34):117-118.
Zhu J H. Discussion of quality management in electroplating production [J]. Chemical Management, 2019(34):117-118 (in Chinese).
- [3] 李素敏,滕俊杰.基于改进PID算法的镀铬槽液温度控制系统设计[J].电气传动,2019,49(9):64-67.
Li S M, Teng J J. Design of temperature control system for chromium bath based on improved PID algorithm [J]. Electric Drive, 2019, 49(9):64-67 (in Chinese).
- [4] 阿伦.用基于云计算的镀液温度控制系统优化镀锌层的沉积速率[J].电镀与环保,2016,36(5):43-45.
A L. Optimization of iron coating deposition rate using plating solution temperature control system based on cloud computing [J]. Electroplating & Pollution Control, 2016,36(5):43-45 (in Chinese).
- [5] 雷钰,闫莹雪,田晓东.电流密度和施镀温度对铝合金表面Ni-SiC-MoS₂复合镀层显微组织的影响[J].表面技术,2018,47(2):231-235.
Lei Y, Yan Y X, Tian X D. Effects of current density and plating temperature on microstructure of Ni-SiC-MoS₂ composite coatings on aluminum alloy [J]. Surface Technology, 2018,47(2):231-235 (in Chinese).
- [6] 陈波,彭倚天.电镀时的温度和电流密度对铬-石墨烯复合镀层摩擦磨损行为的影响[J].电镀与涂饰,2018,37(11):473-479.
Chen B, Peng Y T. Effects of temperature and current density during electroplating on friction and wear behavior of chromium-graphene composite coating [J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37(11): 473-479 (in Chinese).
- [7] 李宁,卢子广,罗启平.镀铬槽液温度自动控制系统研究[J].电镀与精饰,2017,39(8):25-28.
Li N, Lu Z G, Luo Q P. Research for chromium electroplating bath temperature automatic control system [J]. Plating & Finishing, 2017, 39(8): 25-28 (in Chinese).
- [8] 徐竟天,张甜甜,程瑞洲,等.基于S7-300 PLC的电镀恒温控制系统设计[J].电镀与涂饰,2015,34(12):690-695.
Xu J T, Zhang T T, Cheng R Z, et al. Design of constant-temperature control system for electroplating based on S7-300 PLC [J]. Electroplating & Finishing, 2015, 34(12):690-695 (in Chinese).
- [9] 雷翔霄,徐立娟.Smith预估控制在波峰焊温度控制系统的应用[J].高技术通讯,2018,28(5):457-461.
Lei X X, Xu L J. Application of Smith predictive control in wave soldering temperature control system [J]. Chinese High Technology Letters, 2018, 28(5): 457-461 (in Chinese).
- [10] 田波,周武能,周全权,等.基于BP-PID算法的无线分布式温度控制系统[J].控制工程,2015,22(5):841-847.
Tian B, Zhou W N, Zhou Q Q, et al. Wireless distributed temperature control system based on the BP-PID algorithm [J]. Control Engineering of China, 2015, 22(5): 841-847 (in Chinese).
- [11] 刘冰艳,朱武,张佳民.基于BP神经网络自整定PID恒温控制系统研究[J].仪表技术与传感器,2018(8):52-55.
Liu B Y, Zhu W, Zhang J M. Study of constant temperature control system based on BP neural network self-tuning PID [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(8):52-55 (in Chinese).
- [12] Cui S G, Pan H L, Li J G. Application of self-tuning of PID control based on BP neural networks in the mobile robot target tracking[C]. IEEE International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Shenyang, 2013.