

基于RBF-BP的水电解制氢电解液温度预同步控制技术

孟娇娇

(陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 水电解制氢过程中具有随机非线性变化的特点, 无法稳健控制装置温度。为此, 提出基于径向基函数-反向传播神经网络(radial basis function-backpropagation, RBF-BP)的水电解制氢电解液温度预同步控制技术。采用 Gauss 型核函数作为隐藏层的转移函数, 在获取的输出变量中提取特征值, 利用阴阳极反应方程计算水电解制氢装置温度要求, 在 RBF-BP 网络结构下, 采用增量式比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)调整方式, 控制电解槽内温度, 构建基于 PID 控制输出的时间函数, 实现电解过程的闭环控制。通过增量代替微分离散化处理的方式, 设定受控温度调节参数, 计算温度预同步控制的 PID 增量, 经过碱性冷却塔和低温冷却水热交换, 使电解槽保持设定温度。经验证, 该技术将电解液温度由原来的 $(70 \pm 8)^\circ\text{C}$ 控制在 $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 范围内, 能有效控制电解液温度。

关键词: RBF-BP; 水电解制氢装置; 温度预同步; 控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0006-04

Temperature Pre-synchronization Control Technology of Water Electrolysis Hydrogen Production Electrolyte Based on RBF-BP

MENG Jiao-jiao

(Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000 China)

Abstract: The process of hydrogen production by water electrolysis has the characteristics of random nonlinear changes, and the temperature of the device cannot be controlled steadily. Therefore, a pre-synchronous temperature control technology of water electrolysis hydrogen production electrolyte based on RBF-BP (radial basis function-backpropagation) is proposed. The Gauss-type kernel function is used as the transfer function of the hidden layer, and the feature values are extracted from the obtained output variables. The temperature requirements of the water electrolysis hydrogen production unit are calculated by using the cathodic and anode reaction equations. Under the RBF-BP network structure, the incremental proportional-integral-derivative (PID) adjustment method is adopted to control the temperature in the electrolyzer, and the time function based on the PID control output is constructed to realize the closed-loop control of the electrolysis process. By incrementally replacing micro-separation and scattering treatment, the controlled temperature adjustment parameters are set, the PID increment of temperature pre-synchronous control is calculated, and the electrolyzer is maintained at the set temperature through the alkaline cooling tower and low-temperature cooling water heat exchange. It is verified that this technology can control the electrolyte temperature from the original $(70 \pm 8)^\circ\text{C}$ to $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$, which can effectively control the electrolyte temperature.

Keywords: radial basis function-backpropagation; water electrolysis hydrogen production unit; temperature pre-synchronization; control

0 引言

高纯氢气具有较强的还原性, 经常被作为工业生产的还原剂, 对制备工艺要求较高, 现今常用的制备法就是水电解法, 既可以回收高纯氢气, 又不会对周围环境造成任何影响, 是一种环保制备技术。水电解制氢装置应具有较高安全性, 尤其是温度控制更为重要。在制备过程中, 温度是决定生产效率和产品质量的关键因素, 必须采

用更加成熟的技术来进行。文献[1]提出了基于改进粒子群优化的控制方法, 该方法将串级控制和模糊控制有机地融合在一起, 并通过模糊自整定的参数来实现温度的模糊串联控制。然而, 在大多数情况下, 在水电解制氢装置过程中, 由于其具有随机非线性变化, 导致其收敛率缓慢; 文献[2]提出了基于 Smith 变论域模糊的控制方法, 该方法首先构造了一种基于差分式演化的神经网络结构, 并将其与变论域中的 PID 算法相融合, 设计 PID 温度控制器。但因受施工及场地环境等因素的制约, 其极限温度超出标准的现象依然存在, 泛化能力较差。现今, 在商业性质的碱性制氢水电解槽运行中, 电流密度主要

*基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JM-388); 陕西工院院级重点项目(2023YKZD-001)

收稿日期: 2024-02-05

在0.2 A/cm²到0.4 A/cm²范围内。相关研究资料显示,研发中的电流密度要在0.4 A/cm²以上,但在水电解过程中,槽电压会适当增长,同时会降低能量转换率。针对这种情况,无论是减小槽电压,还是调整电解槽结构,都可以实现能量转换率的提升;在阴阳极析氢与析氧时,其过电位的降低可以增加槽电压;新型隔膜材料的研发可以实现电解槽结构的优化。为此,本文根据陕西省自然科学基金基础研究计划,结合径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络和反向传播(backpropagation, BP)神经网络预同步控制技术控制水电解制氢电解液温度。该技术在RBF-BP结构下,设计增量式PID控制器,结合电解过程闭环控制方式,实现温度预同步控制。

1 水电解制氢装置对温度要求分析

RBF-BP复合神经网络是一种以输入层、RBF子网和BP子网为一体的前馈神经网络,它包括两层隐藏层和一层输入层^[3]。该网络不仅具有良好的预测能力,还能够很好地利用RBF网络的快速逼近特性,改善泛化能力,并为电解制氢装置温度预同步控制提供约束条件。

水解制氢设备,就是在电解池中,将30%左右的KOH进行电解,由此生成H₂和O₂,接着把生成两种气体的KOH溶液分别输入至H₂分离机和O₂分离机中,接着把两种气体从碱性液体中分离出来,进入到蒸汽和水的分离机中,在冷却和分离过程中,再由调节阀门将其排出,送入下一步的生产系统中^[4-5]。

在碱性液体循环泵的带动下,利用碱液循环泵的作用,将其从碱液中抽出,经过换热冷却后,再将其送入电解槽内进行电解,其具体工艺如图1所示。

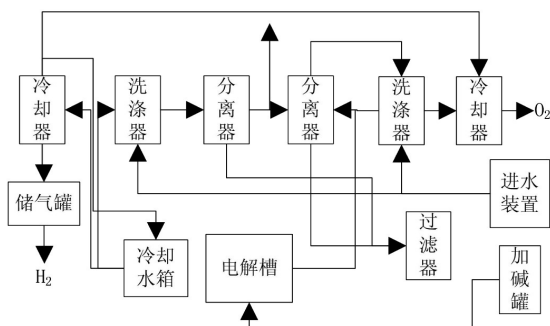


图1 水电解制氢工艺流程图

考虑到水电解制氢设备的最高温度对其影响,在不同工艺条件下,可以采用不同参数来确定最佳控制温度。将Gauss型核函数用作RBF-BP的隐藏层传递函数,从而获得从输入变量中抽取的特征值,可表示为;

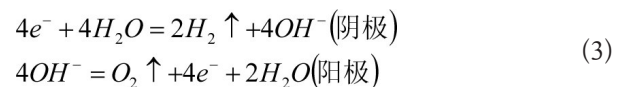
$$g = s(\|r - x\| \varepsilon) \quad (1)$$

式(1)中, r 表示抽取的特征权值; x 表示制氢输入RBF-BP网络的向量; ε 表示抽取次数; s 表示抽取时传递的函数

向量^[6]。利用RBF-BP的Sigmoid隐藏层数据安全转移功能,对于第一隐藏层向第二隐藏层数据转移的函数可表示为:

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

式(2)中, t 表示转移权值。设定Sigmoid的转移功能作为隐藏神经元的转移函数,确定转移过程中的相关参数和学习次数^[7-9]。在参数训练前,应保证整体数据是归一化的,且数值位于[0,1]区间内。基于此,电解槽中阴极、阳极反应方程式为:



由上述的反应式可以看出,在连续的电解过程中,电解池中将会有较高的热量生成,使得整个电解池的温度逐步升高,由此得到的总反应方式为:



总反应会对电解的反应和操作装置产生一定影响,当溶液的温度上升时,其导电性能将会增加,快速的导电速率使得槽内出现了超电压^[10]。超电压带动了周围气流,使得槽内温度上升,使电解的利用率得到了改善^[11]。但太高的温度会使电解的侵蚀加大,使气体的氧化加快,缩短装置的使用年限并出现安全问题。所以,必须把电解池维持在合适的水温上,可以保证电解效率和装置的长时间的安全使用。

2 基于RBF-BP的装置温度预同步控制方案设计

通过分析水电解制氢装置对温度要求,为温度预同步控制提供约束条件。在RBF-BP网络结构下,采用增量式PID调整方式,控制电解槽内温度。通过设计增量式PID温度控制器,实现电解过程的闭环控制。

2.1 基于RBF的预同步时间控制

在实际温度过程中,使用自动化控制技术不能实现对温度进行快速、准确采集,也难以对温度场进行精准控制。针对这一问题,采用了基于RBF的预同步时间控制方式^[12]。RBF是一种三级的前向结构,它将输入端与输出端之间的关系转换成非线性关系,将隐含层的位置与输出的关系转化成线性关系,使得学习的效率提高,同时也能有效地解决局部最优问题。针对受控温度的改变,采用预同步时间控制参数,可更加精确地实现对被控温度的控制^[13]。在RBF网络结构中,为了保证温度控制达到预同步效果,存在高斯基函数可表示为:

$$h_i = \exp\left(-\frac{\|x - o_i\|^2}{2l_i^2}\right) \quad (5)$$

式(5)中, x 表示温控输入向量; o_i 表示温控中心向量; h_i 表示温控基宽向量。基于此, 得到的输出结果为:

$$y_i(t) = \omega_1 h_{i1} + \omega_2 h_{i2} + \dots + \omega_i h_{ii} \quad (6)$$

式(6)中, t 为同步控制时间。基于此, 构建 RBF 的温度预同步控制指标函数, 可表示为:

$$f(t) = \frac{1}{2}(y(t) - y_i(t)) \quad (7)$$

式(7)中, $y(t)$ 表示预先设定的同步结果。根据该设计结果, 实现基于 RBF 的预同步时间控制。

2.2 基于BP的增量式PID温度控制

水电解制氢装置温度预同步控制受多种因素的制约, 如散热、环境温度等, 因此控制温度属于非稳定状态。增量式PID控制方式具有控制效果好、稳健性特点, 使得温度控制能够获取良好闭环控制性能。结合BP神经网络在不暴露映射关系情况下, 自动存储输入输出两种模式之间的映射关系。通过反向传播方式自动调整网络权值, 使网络的平均方和达到最小, 实现了对温度的准确控制。

2.2.1 PID温度控制器设计

采用增量式PID调整方式, 将测量到的碱溶液温度与上位机设定温度进行对比分析, 接着通过EM235模块产生电流信号, 约在4 mA到20 mA之间, 然后通过电子转换设备输出0.01-0.2 MPa压力信号, 以此来控制冷却水管路配置的气膜调节阀, 这种调节阀可根据压力值进行开度的调节, 以此来控制冷却水的流速, 将槽内的温度维持在设定温度, 如图2所示。

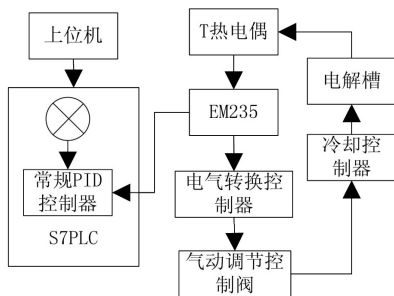


图2 PID温度控制器

根据PID闭环控制原理, 构建基于PID控制输出的时间函数:

$$R(t) = k_1 e + k_2 \int_0^t e dt + k_3 de / dt \quad (8)$$

式(8)中, k_1 、 k_2 、 k_3 分别表示比例、积分和微分参数; e 表示控制误差。PID控制是指通过使用输出参数来调节被测温度的误差, 以达到闭环控制目的^[14]。

2.2.2 基于BP的温度调节参数设置

PID的参量调整主要是根据受控过程表现出的特征来确定其比例系数整体积分与差动时刻。在此过程中, PID参数对槽温的影响如下所示: 比例系数的大小与电解

反应速率有关, 如果比例系数值太低, 反应速率就会降低; 如果比例系数太大, 则反应迅速, 导致电解过程中的产气量、压力和液体高度出现变化。积分是为了将静态误差消除, 无论是积分的时间, 还是积分的影响呈反比例, 如果积分的时间数值太低, 则会造成电解整体不稳; 如果积分的时间数值太高, 积分的影响不明显, 造成了温度调整紊乱^[15-16]。差动是为了减小温度控制的延迟, 由于控制过程中的微分时间参量太少, 提前调整效果不显著, 容易导致系统温度调整延迟。由于时差参量偏大, 导致了被调节参量出现起伏, 槽内温度剧烈变化。通过PID控制器进行适当的调整, 可以获取更高的控制品质, 从而达到恒温控制的目的。

使用BP神经网络对相关参数进行离散化处理, 设BP神经网络的预同步采样时间为 t' , 以一系列采样时间点 a 代替预同步采样时间, 以增量代替微分, 由此得到的基于BP的PID参数整定关系式为:

$$u(t) = k_1 e(t) + k_2 \sum_{j=1}^t e(t) + k_3 [e(t) - e(t-1)] \quad (9)$$

式(9)中, j 表示采样次数。

为了获取理想控制效果, 选用手动整定方式, 调整比例参数, 使比例参数从小变大, 调节成一组反应迅速的温度曲线。然后调整积分参数, 将该比例因子维持不动, 引入更大的积分效应。通过增大积分次数来去除振动, 从而获得一个合理的数值。对差分参数进行整定, 使差分时刻从0逐渐增加, 直至找到临界振荡值。

2.2.3 温度预同步增量式控制

增量式PID算法, 与BP神经网络采样时间输出有关, 计算时需要将 $e(t)$ 进行叠加处理, 由此得到温度预同步控制的增量, 可表示为:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) = \lambda_A e(t) + \lambda_B e(t-1) + \lambda_C e(t-2) \quad (10)$$

式(10)中, λ_A 、 λ_B 、 λ_C 分别表示经过3次计算的偏差, 其中 $\lambda_A = k_1 + k_2 + k_3$, $\lambda_B = -(k_1 + 2k_3)$, $\lambda_C = k_3$ 。

此方程为递进型控制, 使用固定BP取样循环, 当设定值后, 可获得控制增量。通过增量式控制仅需输出控制增量, 受到基于RBF的预同步时间控制, 温差每次变化量很小, 使得被控温度参量变化缓慢, 误差较小, 控制相对稳定。详细控制内容为:

经过碱性冷却塔和低温冷却水进行热交换, 在60~70℃左右, 将溶液流入电解池, 与溶液中的碱性溶液进行再一次的热交换, 从而将电解过程中的电能和低温冷却水展开热交换。通过碱冷却装置中的冷却水流速调整, 能够预同步控制排出的碱溶液温度, 以确保电解槽维持设定温度。

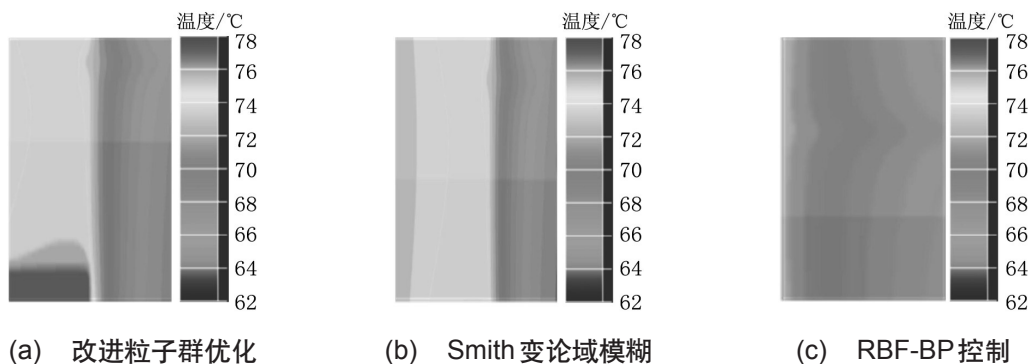


图3 方法应用效果评价

3 应用效果评价

为了验证基于RBF-BP的水电解制氢电解液温度预同步控制技术研究的可行性以及应用效果,将其引入到某水电解制氢装置进行试运行,通过实际组态画面呈现装置实时跟踪记录温控。

对于温度控制效果,分别使用基于改进粒子群优化的控制方法、基于Smith变论域模糊的控制方法和RBF-BP控制方法进行对比,结果如图3所示。

由图3可知,使用基于RBF-BP控制方法可以把电解液温度从既有的 $(70 \pm 8)^\circ\text{C}$ 保持在 $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 区间内。其余两种方法液体温度由原来的 $(70 \pm 8)^\circ\text{C}$ 分别控制在 $(70 \pm 6)^\circ\text{C}$ 、 $(70+8, 70-6)^\circ\text{C}$ 范围内,对比可知,采用RBF-BP控制技术,不仅可以极大地改善电解槽中的温度控制精度,而且可以确保电解设备的运行安全。

4 结束语

使用传统控制方法受到水电解制氢过程中随机非线性变化特点影响,导致温度控制效果达不到理想状态。为此,结合RBF-BP预同步控制水电解制氢装置温度,并得出如下结论:(1)根据RBF-BP网络,结合Gauss型核函数,分析水电解制氢装置对温度要求,为温度预同步控制提供约束条件;(2)在RBF网络下采用预同步时间控制参数,实现基于RBF的预同步时间控制;(3)采用增量式PID调整方式,设计PID温度控制器,实现电解过程的闭环控制;(4)在BP网络下以增量代替微分,实现温度预同步增量式控制。

参考文献:

- [1] 曹振乾,印江,张津华,等.基于改进粒子群优化的主蒸汽温度模糊串级控制[J].控制工程,2022,29(4):699-706.
- [2] 贺自名,牛江川,张静.基于Smith变论域模糊自适应PID蒸发源温度控制[J].控制工程,2021,28(7):1308-1314.
- [3] 刘晓天,尹永利,郑尧,等.水电解制氢在电力储能系统中的应用模式[J].电力电子技术,2020,54(12):37-40,51.
- [4] 耿震,应芝,郑晓园,等.碳氢辅助水电解制氢研究进展[J].

热动力工程,2020,35(4):1-8.

[5] 李珂,张横,郑晓宇,等.预磁极化条件下PEM水电解制氢特性与效率研究[J].太阳能学报,2022,43(6):321-326.

[6] 耿震,应芝,郑晓园,等.生物炭辅助水电解制氢的特性[J].化工进展,2021,40(9):4823-4829.

[7] 宋洁,邓占锋,徐桂芝,等.煤炭制氢替代技术——质子交换膜水电解制氢技术及其衰减机理[J].煤炭科学技术,2022,50(6):136-144.

[8] 陈远龙,林华,陈培讓,等.基于多种湍流模型的电解加工温度多场耦合仿真[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(3):88-94,126.

[9] 李盛伟,张来,梁海深.基于串级PID的相变储能电锅炉温度控制技术[J].热动力工程,2020,35(8):85-89.

[10] 尚建楠.基于PLC的水电解制氢装置温度控制研究[J].机械管理开发,2022,37(5):245-246.

[11] 谭善伟,郭福宝,黄若愚,等.电解槽阴极温度在线检测研究[J].轻金属,2022(6):34-39.

[12] 彭昌琴,康自华,曹斌.铝电解质初晶温度测定方法及应用研究[J].轻金属,2021(7):47-51.

[13] 孙伦业,裴瑞,刘永杰,等.LabVIEW环境下基于STM32的电解液温度监测系统的设计[J].仪表技术与传感器,2022(10):93-98.

[14] 张静静,照那木拉,陈天凡,王晓君,丁岚峰.温度对非电解微酸性次氯酸水有效氯浓度的影响性研究[J].中国消毒学杂志,2020,37(6):413-415.

[15] 党丽.基于变论域模糊PID的金属热处理过程温度控制方法[J].自动化技术与应用,2024,43(1):14-17,21.

[16] 叶东东,徐子芳,赵怡梵,俞欣欣,傅宇豪.电解锰渣陶粒共烧结温度影响机理研究[J].材料导报,2022,36(11):89-94.

作者简介:孟娇娇(1989-),女,硕士,副教授,研究方向:电解水制氢及电气自动化。