

模糊内模控制在电解水制氢温度控制中的应用

曹威[✉], 石祥建, 蔡丹, 娄清辉, 李兵, 赵阳
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 210000)

摘要: [目的] 为了改善传统比例-积分-微分 (Proportion Integration Differentiation, PID) 控制器对电解水制氢温度控制中过度依赖被控对象数学模型的问题, 对模糊内模控制在电解水制氢温度控制中的应用进行了研究, 并给出了模糊内模控制器的设计过程。[方法] 首先分析了温度在电解水制氢过程中的重要性, 列举了部分电解水制氢中常用的温度控制策略及优缺点; 随后介绍了内模控制理论和模糊理论, 并结合两种理论给出了模糊内模温度控制器的设计方法, 用于实现电解水制氢温度的精确控制; 最后进行了仿真验证实验。[结果] 结果表明: 采用的模糊内模控制方法相较于PID控制方法, 在响应速度、抗干扰性和鲁棒性都有更好的控制品质, 解决了传统PID控制器算法过度依赖被控对象数学模型的问题。[结论] 文章所采用的控制算法正确并有效, 可实际应用到电解水制氢的温度控制中。

关键词: 电解水制氢; 温度控制; 模糊内模控制; 控制品质; 鲁棒性

中图分类号: TK91; TP273

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0120-08

开放科学(资源服务)二维码:



Application of Fuzzy Internal Model Control in Temperature Control in Hydrogen Production by Water Electrolysis

CAO Wei[✉], SHI Xiangjian, CAI Dan, LOU Qinghui, LI Bing, ZHAO Yang
(Nanjing Nanrui Jibao Electric Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: [Introduction] In order to improve the problem of traditional proportion integration differentiation (PID) controllers overly relying on the mathematical model of the controlled object in the temperature control in hydrogen production by water electrolysis, this paper studies the application of fuzzy internal model control in the temperature control in hydrogen production by water electrolysis, and provides the design process of the fuzzy internal model controller. [Method] Firstly, the importance of temperature in the process of hydrogen production by water electrolysis was analyzed, and some temperature control strategies commonly used in hydrogen production by water electrolysis and their advantages and disadvantages were listed. Then, internal model control theory and fuzzy theory were introduced, and a design method for a fuzzy internal model temperature controller, which was used to achieve precise temperature control in hydrogen production by water electrolysis, was proposed based on these two theories. Finally, simulation verification experiments were conducted. [Result] The results show that the fuzzy internal model control method used in this paper has better control quality in response speed, anti-interference, and robustness compared to the PID control method, solving the problem of traditional PID controller algorithms overly relying on the mathematical model of the controlled object. [Conclusion] The control algorithms used in this paper are correct and effective, and can be applied to the temperature control in hydrogen production by water electrolysis.

Key words: hydrogen production by electrolysis of water; temperature control; fuzzy internal model control; control quality; robustness

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-04-08 修回日期: 2023-04-19

基金项目: 江苏省“333工程”青年人才专项“高可再生能源占比下绿色交通场站多能互补耦合供能系统运行优化控制技术研究”(2023-02)

0 引言

制氢是一项重要的能源技术,因为氢气是一种清洁、高效的燃料,可以用于发电、交通等领域^[1]。传统的制氢方法需要使用化石燃料,并会产生大量的二氧化碳和其他有害物质,这对环境造成了严重的污染和危害^[2]。因此,寻找一种更加环保和可持续的制氢方法是非常必要的。电解水制氢技术正是在这种背景下应运而生的,它通过使用电能将水分解成氢气和氧气,不需要使用化石燃料,也不会产生有害物质,因此被认为是一种非常环保和可持续的制氢方法^[3-5]。

在电解水的过程中,温度的控制对于实现高效、稳定的制氢至关重要^[6]。恰当合适的制氢温度可以显著提高氢气的产量和纯度,因此众多学者也对制氢的温度控制方法开展了深入的研究^[7]。最初采用的电解水温度控制算法是PID控制算法,该算法根据实时的温度值和目标温度值之间的误差来进行控制^[8-9]。虽然这种控制算法简单易行,但该方法依靠模型程度较高且控制参数固定,而在实际运行中由于多种原因导致被控对象模型发生变化,很难满足高精度的温度控制需求^[10-11]。

为了克服PID控制算法过度依赖模型的缺陷,内模控制开始应用到电解水温度控制中。内模控制算法基于系统内部模型,通过对系统进行建模和分析,对系统进行优化控制^[12]。相较于传统的PID控制算法,内模控制算法不依赖被控对象数学模型,因此具有更好的鲁棒性、更高的精度和更快的响应速度。然而内模控制算法难以消除干扰带来的影响,对于大多工业过程控制场景使用受限^[13-14]。

为了消除干扰和不确定性对内模控制的不良影响,研究人员尝试将模糊语言应用到内模控制算法中,即模糊内模控制算法^[15]。模糊内模控制算法可以通过模糊化的方式来处理控制过程中的不确定性,并且可以适应不同的工作负载和环境变化^[16]。因此,它被广泛应用于工业生产、机器人控制、电力系统等领域中^[17-18]。

文章采用模糊内模控制算法完成对电解水制氢过程中温度的控制,从而提升电解水制氢的效率。文章将模糊内模控制与PID控制进行对比,体现了模糊内模控制在鲁棒性及抗干扰性等方面的优势,

更加适合应用在电解水制氢的温度控制中。

1 电解水制氢及温度的影响

1.1 电解水制氢工艺

电解水制氢是利用电能将水分子分解成氢气和氧气的一种化学反应,该反应在电解槽中的电极上发生,电解槽中充以提高电导率的电解质(通常是NaOH或KOH),用以促进水的电解^[19]。文章中所用的电解水工艺流程图如图1所示。

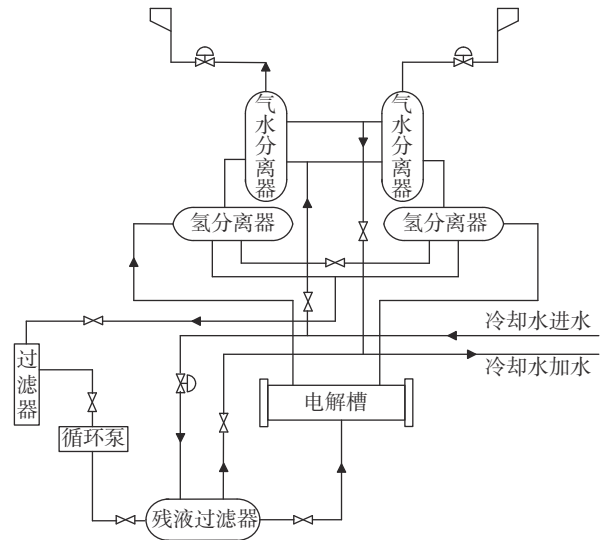


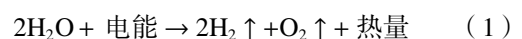
图1 电解水工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of electrolytic water

电解槽接通电源后,水就会被电解成氢气和氧气。在电解槽的阳极处,产生的氢气会聚集在电解槽上方,可以通过管道收集氢气。在电解槽的阴极处,产生的氧气会聚集在电解槽下方,也可以通过管道收集氧气。收集到的氢气通常还含有一些杂质,需要通过物理或化学方法进行纯化。纯化后的氢气可以储存在适当的容器中,用于以后的使用^[20-21]。

1.2 温度对电解水的影响

电解水制氢反应式如公式(1)所示:



该反应在反应过程中会放出热量,温度的变化对反应速率和设备寿命有较大的影响。实验结果显示,由于温度的升高,离子运动速度变快,电解水制氢反应速率随着温度的升高而增加,但当温度超过一定范围时则会缩短设备寿命,例如密封垫等^[22]。因此需根据具体情况来确定最佳的温度范围。

温度的变化对于电解水制氢的过程有着重要的影响^[23]。过低的温度不仅会降低氢气的产量,还会导致电解槽内部结冰,引起设备损坏。而过高的温度则会导致水的蒸发和氢气泄漏,从而影响产品质量和安全性^[24-25]。因此,适当的温度控制可以提高电解反应的效率和稳定性,保障生产的安全和质量。

2 内模控制和模糊内模控制

2.1 内模控制

内模控制 (Internal Model Control, IMC) 是一种现代控制理论方法,可以用于设计高性能的控制器^[18]。与传统的 PID 控制器相比,IMC 具有更好的性能和稳定性。IMC 的基本思想是将过程的动态特性建模为一个简单的一阶惯性延时系统,将该系统作为控制器的内部模型。这样可以提高控制器的响应速度和鲁棒性,同时减少控制器的参数调整量^[22]。

内模控制在单回路反馈系统中的应用如图 2 所示,其中 $G_{\text{IMC}}(s)$ 为内模控制器的传递函数; $G_P(s)$ 为被控对象传递函数; $\tilde{G}_P(s)$ 为被控对象的参考模型,即利用多种方法对被控对象数学模型的估计; $G_d(s)$ 为扰动通道传递函数。根据图 2 的控制系统图,可用梅森公式计算出输出响应 y 的闭环传递函数,如公式 (2) 所示:

$$y(s) = \frac{G_{\text{IMC}}(s)G_P(s)}{1 + G_{\text{IMC}}(s)[G_P(s) - \tilde{G}_P(s)]} r(s) + \frac{[1 - G_{\text{IMC}}(s)G_P(s)]G_d(s)}{1 + G_{\text{IMC}}(s)[G_P(s) - \tilde{G}_P(s)]} d(s) \quad (2)$$

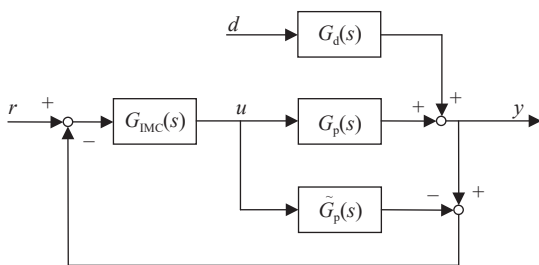


图 2 内模控制系统图

Fig. 2 Internal model control system diagram

在公式 (2) 中,假设模型估计准确,即有 $\tilde{G}_P(s) = G_P(s)$,则有公式 (3):

$$y(s) = \frac{G_{\text{IMC}}(s)G_P(s)r(s) + [1 - G_{\text{IMC}}(s)G_P(s)]G_d(s)d(s)}{1 + G_{\text{IMC}}(s)[G_P(s) - \tilde{G}_P(s)]} \quad (3)$$

若公式 (3) 中,存在 $G_{\text{IMC}}(s) = G_P^{-1}(s)$,则有 $y(s) =$

$r(s)$,即无论扰动如何,都将实现无差跟踪且扰动零干扰的理想控制效果。

然而 $G_{\text{IMC}}(s) = G_P^{-1}(s)$ 这种内模控制器传递函数实际上是不存在的,因此实际实施中通常将低通滤波器引入到理想的内模控制器中,在增强内模控制器可实现性的同时,也可以通过调整滤波器的结构和参数来提升动态品质和鲁棒性^[26]。

模糊内模控制器的设计步骤如下:

1) 分解参考模型 $\tilde{G}_P(s)$

将参考模型 $\tilde{G}_P(s)$ 分解为 $\tilde{G}_{P+}(s)$ 和 $\tilde{G}_{P-}(s)$,其中 $\tilde{G}_{P+}(s)$ 为参考模型 $\tilde{G}_P(s)$ 中包含所有时滞和右半平面的零点的部分; $\tilde{G}_{P-}(s)$ 为参考模型 $\tilde{G}_P(s)$ 中具有最小相位特征的部分。

2) IMC 控制器的设计

在设计 IMC 控制器时,既要考虑控制器传递函数的可实现性,又要尽可能提高控制的动态品质和鲁棒性。故将 IMC 控制器设计为公式 (4) 所示:

$$G_{\text{IMC}}(s) = G_{P-}^{-1}(s) \times f(s) \quad (4)$$

式中:

$f(s)$ ——低通滤波器,设计为:

$$f(s) = \frac{1}{(1 + \lambda s)^n} \quad (5)$$

式中:

n ——低通滤波器的阶数,一般等于 $\tilde{G}_P(s)$ 的阶数;

λ ——滤波器参数,为内模控制器唯一需要调节的参数^[27]。

增加 $f(s)$ 环节可以使得 $G_{\text{IMC}}(s)$ 变得可实现,还可以提升系统的稳定性和鲁棒性。

2.2 模糊内模控制

模糊内模控制 (Fuzzy Internal Model Control, FIMC) 是 IMC 的一个改进版本,在内模控制的基础上,引入了模糊逻辑控制的思想,确定适合的模糊规则,调节内模控制器中低通滤波环节的滤波参数,使控制器更加灵活和适应不确定性^[28]。

2.2.1 控制结构

在 FIMC 中,内部模型可以通过模糊推理来进行建模,控制器也可以使用模糊逻辑控制器来实现。FIMC 不需要准确的数学模型,在处理非线性和不确定系统时具有较好的适应性^[29]。FIMC 的原理图如图 3 所示。

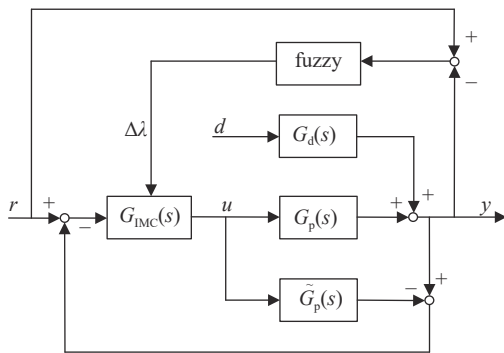


图3 FIMC控制系统图

Fig. 3 FIMC control system diagram

滤波参数 λ 是根据设定值 r 与输出响应 y 之间的误差 e 及误差变化率 de 进行整定^[30]。图2中滤波参数 $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$, 其中初始值 λ_0 根据被控对象特性的不同取不同的初始值, 当被控对象为大延时大惯性环节时, λ_0 较大以保证初始运行的稳定; 当被控对象的惯性较小时, λ_0 可以取得较小^[31]。 $\Delta\lambda$ 为模糊规则的输出, 输入为误差 e 及误差变化率 de 。

2.2.2 模糊规则及隶属度函数

定义 e 和 de 的模糊集为 5 个状态 {NB, NS, Z, PS, PB}, 分别代表 {较小, 小, 中, 大, 较大}; λ 的模糊集为 9 个状态 {NVB, NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB, PVB}, 分别代表 {负极大, 负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大, 正极大}。模糊规则如表1所示。

表1 模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy rule table

λ	de					
	—	NB	NS	Z	PS	PB
e	NB	NVB	NB	NM	NS	Z
	NS	NB	NM	NS	Z	PS
	Z	NM	NS	Z	PS	PM
	PS	NS	Z	PS	PM	PB
	PB	Z	PS	PM	PB	PVB

模糊规则的建立原则为: 滤波参数 λ 越大, 系统鲁棒性越强, 但系统响应越慢; 反之响应快, 但鲁棒性降低。

模糊规则根据如下原因来制定:

- 1) e 较大时, 保证误差减小的速度, λ 应较小。
- 2) e 在逐渐减小时, 为保证系统的鲁棒性, λ 应逐渐变大。

3) e 较小时, 为了避免系统产生超调甚至震荡, λ 应取较大值。

4) 系统输出缓慢趋于设定值时, 为了缩短趋近时间且防止超调, λ 应适中大小。

输入 e 、 de 与输出 λ 的隶属度函数分别如图4、图5所示, 论域均在 $[-1, 1]$ 。

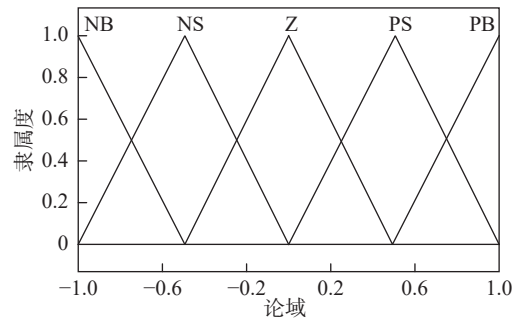


图4 输入隶属度函数

Fig. 4 Input membership function

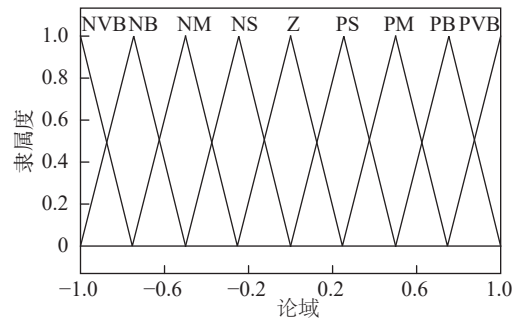


图5 输出隶属度函数

Fig. 5 Output membership function

3 FIMC 在电解水制氢温度控制中的应用

3.1 应用情况简介

在某氢能示范项目中, 应用碱性电解水制氢方式, 单槽额定产气量: $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 atm), 采用闭式冷却水为电解槽的冷却介质, 冷却水温 $\leq 28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

电解槽在运行过程中由于水电解而产生的热量由循环碱液的循环带出, 较热的气液混合物在氢、氧气液分离器中进行气水分离、冷却, 被冷却后的碱液又返回电解槽参与水的电解。因此, 只要控制冷却水的流量即可控制循环碱液的温度, 从而实现对电解槽温度的控制。

在电解槽碱液出口处安装的 Pt100 热电阻采样循环碱液的温度, 将随温度变化的电阻信号传送至制氢控制柜, 经隔离栅变送器转换成 $4 \sim 20 \text{ mA}$ 的标

准电信号,送入控制单元输入模块。在控制单元计算后将调节量通过模拟量输出模块输出一个标准的 4~20 mA 信号,经电气转换器后转换成 0.02~0.10 MPa 的标准气动信号,通过调节气动薄膜调节阀开度,控制冷却水的流量,从而实现对电解槽温度的控制。电解槽温度控制流程图如图 6 所示。

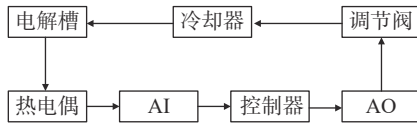


图 6 电解槽温度控制流程图

Fig. 6 Electrolytic cell temperature control flow chart

3.2 电解槽温度传递函数辨识

根据现场调试过程中,在稳定状态下,通过调整温度设定值的大小,实现制氢温度的阶跃扰动,从而得到响应数据,再通过模型辨识可以得到电解水制氢过程中电解槽温度的传递函数模型,即有:

$$\tilde{G}_P(s) = \frac{0.7}{300s+1} e^{-30s} \quad (6)$$

由公式(4)和公式(5)可以设计出内模控制器 $G_{IMC}(s)$;为了同时满足响应的快速性和鲁棒性,取 $\lambda_0 = 15$,即被控对象传递函数延时时间的一半。

对电解水制氢的电解槽温度分别采用 PID 控制和模糊内模控制,分别从定值阶跃扰动性能、抗外部干扰性能以及系统鲁棒性 3 个方面进行评价。

3.3 定值阶跃扰动

通过温度设定值的突变制造阶跃扰动,从仿真结果图 7 可以看出,滤波参数 λ 是根据误差 e 及误差变化率 de 实时在调整,因此在响应速度上比参数固定的 PID 控制算法控制效果更佳。

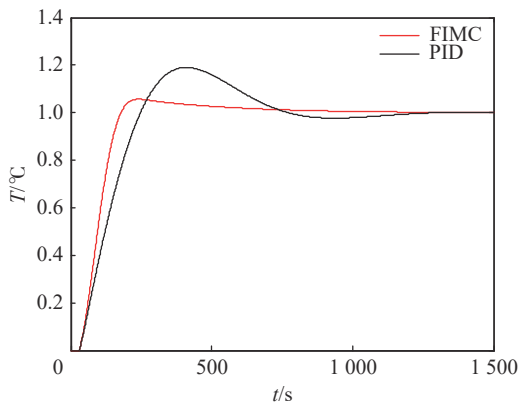


图 7 阶跃响应曲线

Fig. 7 Step response curve

3.4 抗外部干扰

在系统平稳运行的过程中,在被控对象和控制器之间增加一个阶跃扰动,通过仿真结果图 8 可以看出,模糊内模控制的抗干扰性能强于 PID 控制。这是因为低通滤波环节的增加,不仅仅可以提升系统的控制品质,也由于其自身具备的滤波特性,可以将部分干扰消除,提升控制系统的抗干扰性。

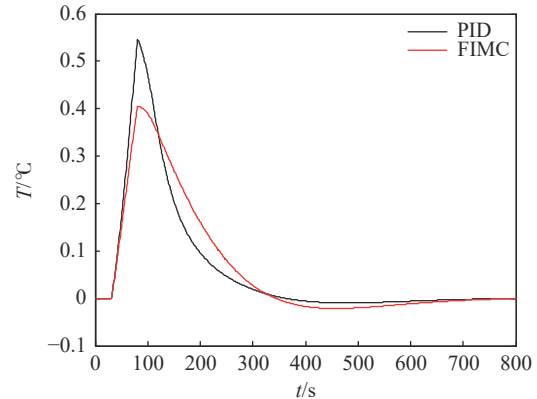


图 8 外部干扰响应曲线

Fig. 8 External interference response curve

3.5 系统鲁棒性

由于环境等多种原因,会导致被控对象的数学特性发生变化,正因如此仅靠控制参数固定的 PID 控制难以获得满意的控制品质。仿真中将控制对象的传递函数变为公式(7),PID 和模糊内模控制的控制器参数不发生变化,仿真结果如图 9 所示。

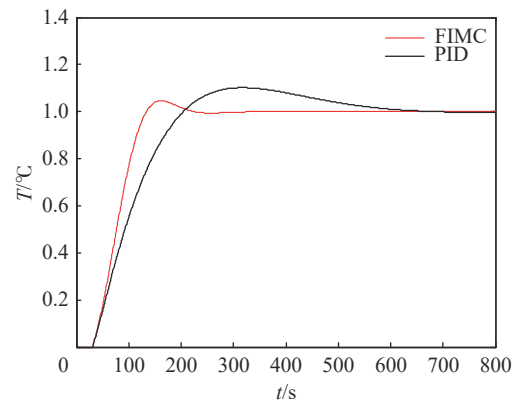


图 9 鲁棒性性能

Fig. 9 Robustness performance

$$\tilde{G}_P(s) = \frac{1}{190s+1} e^{-30s} \quad (7)$$

由于模糊规则的存在,FIMC 允许被控对象的特性发生部分变化,但仍可以有较好的控制效果。

4 结论

文章研究了模糊内模控制在电解水制氢温度控制中的应用, 模糊内模控制将模糊理论和内模控制理论相结合, 能够更好地适应电解水制氢过程中的温度变化, 并确保控制系统的稳定性和鲁棒性。通过仿真实验验证, 相较于PID控制算法, 模糊内模控制方法在电解水制氢的温度控制中, 拥有更快的调节速度、更强的抗干扰性、更宽的模型适应性, 具有较好的控制性能和实用价值, 可以为相关领域的研究和应用提供参考。

参考文献:

- [1] 封帆. 氢能源的研究现状及展望 [J]. *化学工程与装备*, 2022(9): 255-256. DOI: [10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2022.09.080](https://doi.org/10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2022.09.080).
FENG F. Research status and prospects of hydrogen energy [J]. *Chemical engineering & equipment*, 2022(9): 255-256. DOI: [10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2022.09.080](https://doi.org/10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2022.09.080).
- [2] 钟鸣. 中国绿色制氢关键技术发展现状及展望 [J]. *现代化工*, 2023, 43(4): 13-17. DOI: [10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.04.003](https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.04.003).
ZHONG M. Development status and prospect of key technologies of green hydrogen production in China [J]. *Modern chemical industry*, 2023, 43(4): 13-17. DOI: [10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.04.003](https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.04.003).
- [3] 仲蕊. 电解水制氢阔步向前 [N]. *中国能源报*, 2023-02-20 (019). DOI: [10.28693/n.cnki.nshca.2023.000310](https://doi.org/10.28693/n.cnki.nshca.2023.000310).
ZHONG R. Hydrogen production from electrolysis of water is advancing rapidly [N]. *China Energy News*, 2023-02-20 (019). DOI: [10.28693/n.cnki.nshca.2023.000310](https://doi.org/10.28693/n.cnki.nshca.2023.000310).
- [4] 张殿朝, 许德洪, 张志强, 等. 水电解制氢设备控制系统升级实例分析 [J]. *天津科技*, 2016, 43(8): 59-61. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8945.2016.08.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8945.2016.08.019).
ZHANG D C, XU D H, ZHANG Z Q, et al. A case study of control system upgrade for water electrolysis hydrogen production equipment [J]. *Tianjin science & technology*, 2016, 43(8): 59-61. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8945.2016.08.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8945.2016.08.019).
- [5] 赵运林, 曹田田, 张成晓, 等. 集中式制氢技术进展及成本分析 [J]. *石油炼制与化工*, 2022, 53(10): 122-126.
ZHAO Y L, CAO T T, ZHANG C X, et al. Progress and cost analysis of centralized hydrogen production technology [J]. *Petroleum refining and chemical industry*, 2022, 53(10): 122-126.
- [6] 张唯怡, 张议洁, 王进伟, 等. 电解水制氢技术及大电流析氧反应研究与展望 [J]. *工程科学学报*, 2023, 45(7): 1057-1070. DOI: [10.13374/j.issn2095-9389.2022.09.20.005](https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.09.20.005).
ZHANG W Y, ZHANG Y J, WANG J W, et al. Research and perspectives on electrocatalytic water splitting and large current density oxygen evolution reaction [J]. *Chinese journal of engineering*, 2023, 45(7): 1057-1070. DOI: [10.13374/j.issn2095-9389.2022.09.20.005](https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.09.20.005).
- [7] 孟娇娇, 胡平, 崔杰. 基于PLC的PEM电解水制氢系统设计 [J]. *河南科技*, 2023, 42(1): 7-11. DOI: [10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2023.01.001](https://doi.org/10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2023.01.001).
MENG J J, HU P, CUI J. Design of PEM water-electrolytic hydrogen production system based on PLC [J]. *Henan science and technology*, 2023, 42(1): 7-11. DOI: [10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2023.01.001](https://doi.org/10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2023.01.001).
- [8] 吉旭, 周步祥, 贺革, 等. 大规模可再生能源电解水制氢合成氨关键技术与应用研究进展 [J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(5): 1-11. DOI: [10.15961/j.jsuese.202200660](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202200660).
JI X, ZHOU B X, HE G, et al. Research review of the key technology and application of large-scale water electrolysis powered by renewable energy to hydrogen and ammonia production [J]. *Advanced engineering sciences*, 2022, 54(5): 1-11. DOI: [10.15961/j.jsuese.202200660](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202200660).
- [9] 程丽娟, 何强龙, 孙天龙, 等. 基于电解槽电流控制的风电制氢系统控制策略 [J]. *轻工科技*, 2021, 37(5): 48-49.
CHENG L J, HE Q L, SUN T L, et al. Control strategy for wind power hydrogen production system based on electrolytic cell current control [J]. *Light industry science and technology*, 2021, 37(5): 48-49.
- [10] 程丽娟, 徐立军, 胡兵, 等. 并网型风电盐水制氢系统的控制 [J]. *工业仪表与自动化装置*, 2020(3): 29-33, 78.
CHENG L J, XU L J, HU B, et al. Control of grid-connected wind power brine hydrogen production system [J]. *Industrial instrumentation and automation equipment*, 2020(3): 29-33, 78.
- [11] 周文利, 巨秉中, 张伟, 等. 水电解制氢设备自动冷却水循环装置开发 [J]. *青海科技*, 2019, 26(2): 85-88.
ZHOU W L, JU B Z, ZHANG W, et al. Development of automatic cooling water circulation device for water electrolysis hydrogen production equipment [J]. *Qinghai science and technology*, 2019, 26(2): 85-88.
- [12] 曹坤, 艾永乐, 李港星. 基于内模控制的逆变器并网无缝切换策略研究 [J]. *电子测量技术*, 2022, 45(23): 19-24. DOI: [10.19651/j.cnki.emt.2209923](https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.2209923).
CAO K, AI Y L, LI G X. Research on seamless switching strategy of inverter between grid-connected and off-grid based on internal model control [J]. *Electronic measurement technology*,

- 2022, 45(23): 19-24. DOI: [10.19651/j.cnki.emt.2209923](https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.2209923).
- [13] 陈昊闻, 陈俐, 刘峰宇. 双离合自动变速器换挡过程的内模控制 [J]. *汽车工程*, 2020, 42(4): 477-483. DOI: [10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.04.009](https://doi.org/10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.04.009).
CHEN H W, CHEN L, LIU F Y. Internal model control during shifting of dual clutch automatic transmission [J]. *Automotive engineering*, 2020, 42(4): 477-483. DOI: [10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.04.009](https://doi.org/10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.04.009).
- [14] 张磊, 李健. 内模控制在外挂式SCR脱硝平台中的应用 [J]. *中国科技信息*, 2021(23): 105-109.
ZHANG L, LI J. Application of internal model control in external SCR denitrification platform [J]. *China science and technology information*, 2021(23): 105-109.
- [15] 刘琪, 黄贞贞. 模糊内模控制在磨矿系统中的应用 [J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(29): 7674-7676.
LIU Q, HUANG Z Z. Application of fuzzy internal model control in grinding systems [J]. *Science technology and engineering*, 2012, 12(29): 7674-7676.
- [16] 张新法, 赵志诚. 一种基于遗传算法的模糊内模控制方法 [J]. *工业控制计算机*, 2011, 24(6): 82-84.
ZHANG X F, ZHAO Z C. A fuzzy internal model control algorithm based on genetic algorithm [J]. *Industrial control computer*, 2011, 24(6): 82-84.
- [17] 余哲, 王志国, 刘飞. 基于遗传算法的模糊内模PID控制器优化 [J]. *化工自动化及仪表*, 2020, 47(4): 294-298, 321.
YU Z, WANG Z G, LIU F. Optimization of fuzzy internal model PID controller based on genetic algorithm [J]. *Chemical automation and instrumentation*, 2020, 47(4): 294-298, 321.
- [18] 李明辉, 杨星奎, 云卫涛, 等. 基于模糊内模控制的汽轮机调速系统研究 [J]. *汽轮机技术*, 2018, 60(3): 172-174, 232.
LI M H, YANG X K, YUN W T, et al. Research on steam turbine governing system based on fuzzy internal model control [J]. *Turbine technology*, 2018, 60(3): 172-174, 232.
- [19] 童金钟, 石成江, 褚义彬, 等. 基于PLC的水电解制氢装置温度控制 [J]. *机械制造与自动化*, 2015, 44(6): 176-178. DOI: [10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2015.06.051](https://doi.org/10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2015.06.051).
TONG J Z, SHI C J, CHU Y B, et al. Temperature control of hydrogen equipment based on PLC [J]. *Machine building & automation*, 2015, 44(6): 176-178. DOI: [10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2015.06.051](https://doi.org/10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2015.06.051).
- [20] 雷秋晓, 史义存, 苏子义, 等. 制氢技术的现状及发展前景 [J]. *山东化工*, 2020, 49(8): 72-75. DOI: [10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2020.08.024](https://doi.org/10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2020.08.024).
LEI Q X, SHI Y C, SU Z Y, et al. Status and development prospect of hydrogen production technology [J]. *Shandong chemical industry*, 2020, 49(8): 72-75. DOI: [10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2020.08.024](https://doi.org/10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2020.08.024).
- [21] 孟凡, 张惠铃, 姬姗姗, 等. 高效电解水制氢发展现状与技术优化策略 [J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2021, 38(6): 702-713. DOI: [10.13482/j.issn1001-7011.2021.10.180](https://doi.org/10.13482/j.issn1001-7011.2021.10.180).
MENG F, ZHANG H L, JI S S, et al. Progress and technology strategies of hydrogen evolution reaction by high efficiency water electrolysis [J]. *Journal of natural science of Heilongjiang university*, 2021, 38(6): 702-713. DOI: [10.13482/j.issn1001-7011.2021.10.180](https://doi.org/10.13482/j.issn1001-7011.2021.10.180).
- [22] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(2): 146-152.
YU H M, SHAO Z G, HOU M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: progress and suggestions [J]. *Strategic study of CAE*, 2021, 23(2): 146-152.
- [23] 郑之杰, 黄静思, 黄元生. 基于模型预测控制的水电制氢系统优化调度研究 [J]. *电力科学与工程*, 2022, 38(7): 25-33.
ZHENG Z J, HUANG J S, HUANG Y S. Optimal scheduling of hydro-electricity hydrogen production system based on model predictive control [J]. *Electric power science and engineering*, 2022, 38(7): 25-33.
- [24] 李雨欣, 张桐. 基于西门子S7-400H系统架构变压吸附制氢控制系统设计 [J]. *电子测试*, 2022(16): 32-34. DOI: [10.16520/j.cnki.1000-8519.2022.16.039](https://doi.org/10.16520/j.cnki.1000-8519.2022.16.039).
LI Y X, ZHANG T. Pressure swing adsorption hydrogen production control system design based on Siemens S7-400H system architecture [J]. *Electronic test*, 2022(16): 32-34. DOI: [10.16520/j.cnki.1000-8519.2022.16.039](https://doi.org/10.16520/j.cnki.1000-8519.2022.16.039).
- [25] 李静. 电解水制氢的影响因素研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020. DOI: [10.26943/d.cnki.gbjzc.2020.000462](https://doi.org/10.26943/d.cnki.gbjzc.2020.000462).
LI J. Study on influencing factors of hydrogen production by electrolyzing water [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. DOI: [10.26943/d.cnki.gbjzc.2020.000462](https://doi.org/10.26943/d.cnki.gbjzc.2020.000462).
- [26] 陶玉昆, 杨飞飞, 和萍, 等. 基于内模理论的电压源变换器直接功率控制 [J]. *计算机仿真*, 2021, 38(5): 80-84.
TAO Y K, YANG F F, HE P, et al. Internal model theory based direct power control for voltage source converters [J]. *Computer simulation*, 2021, 38(5): 80-84.
- [27] 邢胜林, 瞿佳琪. 基于模糊内模控制的锅炉汽包水位控制仿真研究 [J]. *电工技术*, 2022(18): 1-3. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2022.18.001](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2022.18.001).
XING S L, QU J Q. Simulation research on boiler water level control based on fuzzy internal model control [J]. *Electric engineering*, 2022(18): 1-3. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2022.18.001](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2022.18.001).

001.

- [28] 侯美琳. 机电超环面驱动系统内模控制研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2021. DOI: [10.27357/d.cnki.gtgyu.2021.000207](https://doi.org/10.27357/d.cnki.gtgyu.2021.000207).

HOU M L. Research on internal model control of electromechanical toroidal drive system [D]. Tianjin: Tiangong University, 2021. DOI: [10.27357/d.cnki.gtgyu.2021.000207](https://doi.org/10.27357/d.cnki.gtgyu.2021.000207).

- [29] 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. DOI: [10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2022.05.105](https://doi.org/10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2022.05.105).

SHANG J N. PLC-based temperature control research of water electrolysis hydrogen production plant [J]. *Mechanical management and development*, 2022, 37(5): 245-246. DOI: [10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2022.05.105](https://doi.org/10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2022.05.105).

- [30] 刘锁清, 彭伟娟, 李军红, 等. 模糊自适应内模控制在超临界给水控制中的应用 [J]. *自动化技术与应用*, 2017, 36(10): 38-40, 52.

LIU S Q, PENG W J, LI J H, et al. Application of fuzzy adaptive internal model control on feed water control for supercritical unit [J]. *Techniques of automation and applications*, 2017, 36(10): 38-40, 52.

- [31] 李洪亮, 何同祥, 刘会赏. 模糊内模控制在再热汽温中的应用研究 [J]. *仪器仪表用户*, 2010, 17(4): 33-35. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1041.2010.04.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1041.2010.04.018).

LI H L, HE T X, LIU H S. Research on the application of fuzzy internal model control in reheat steam temperature [J]. *Instrument user*, 2010, 17(4): 33-35. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1041.2010.04.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1041.2010.04.018).

1041.2010.04.018.

作者简介:



曹威

曹威 (第一作者, 通信作者)

1995-, 男, 江苏南京人, 工程师, 控制理论与控制工程硕士, 主要从事工业过程控制方向工作 (e-mail) caowei@nrec.com。

石祥建

1981-, 男, 江苏南京人, 高级工程师, 热能工程硕士, 主要从事过程控制及其自动化工作 (e-mail) shixj@nrec.com。

蔡丹

1981-, 男, 江苏南京人, 高级工程师, 热能工程硕士, 主要从事过程控制及其自动化的工作 (e-mail) caidan@nrec.com。

娄清辉

1989-, 男, 贵州遵义人, 高级工程师, 动力工程机工程热物理硕士, 主要从事能源优化控制技术相关研究工作 (e-mail) qinghui26@126.com。

李兵

1986-, 男, 江苏南通人, 高级工程师, 硕士, 主要从事综合能源优化控制技术研究工作 (e-mail) lib@need.com。

赵阳

1993-, 男, 山东临沂人, 工程师, 热能与动力工程硕士, 主要从事火电厂优化控制研究工作 (e-mail) zhaoyang1@nrec.com。

(编辑 叶筠英)

广 告

- “氢能技术专刊”封面图片: “油气氢电服”综合能源站----- 封一
 中国能源建设集团广东省电力设计研究院氢能技术中心----- 封二
 “氢能技术专刊”特约主编寄语----- A1
 “氢能技术专刊”封面故事: “氢”近生活, 已“燃”来临----- A2
 “南方能源建设”微信订阅号----- 封三
 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司----- 封四