

引用格式:高辉,彭雪萍,曲秀丽,等.基于模糊自整定 PID 的 VPSA 换热器温度控制[J].有色设备,2025,39(6):75-80.

GAO Hui, PENG Xueping, QU Xiuli, et al. Temperature control of VPSA heat exchanger based on fuzzy self-tuning PID[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(6): 75-80.

基于模糊自整定 PID 的 VPSA 换热器温度控制

高 辉, 彭雪萍, 曲秀丽, 田海英

(北京北大先锋科技股份有限公司, 北京 100088)

[摘 要] 本文介绍一种真空变压吸附制氧(Vacuum Pressure Swing Adsorption, VPSA)工艺中换热器进水调节阀的控制方法。首先简要介绍 VPSA 吸附塔温度控制复杂、大滞后、受环境温度影响大的特点,然后分析了常规 PID 控制在 VPSA 温度调节上的不足,提出采用模糊自整定 PID 系数的方法,最后采用西门子 1500PLC 和亚控科技组态王软件得以实现。以某 VPSA 装置为例,调整比例系数、微分作用、积分作用,得到 2 个温度控制曲线,结果表明,控制常规 PID 温度在环境温度变化剧烈时波动约 10 ℃,且超调量大,同时由于积分系数的选择不再适用,导致夜间温度偏离设定温度大;而模糊自整定 PID 控制在温度变化时响应速度更快,超调量为 5%,温度曲线贴近设定值并且调整及时;相比传统 PID 控制,模糊自整定 PID 控制在温度剧烈变化时的超调量更小,换热器后温度变化趋势更稳定。

[关键词] VPSA; 模糊自整定; PID; 温度控制; 氧气; 换热器; 吸附塔

[中图分类号] TF355 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)06-0075-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.06.010

0 引言

近几年, VPSA 制氧技术因其建造工期短、能耗低、运行稳定可靠等优势,已广泛应用于钢铁、冶金、化工等行业中^[1]。VPSA 技术将空气鼓入吸附塔中,再经过分子筛选择吸附后,生产出高纯度氧气^[2]。在鼓入空气的过程中,气体压缩会产生大量热量,同时吸附反应也是放热过程,而吸附塔内温度会影响 VPSA 的产出效率和能耗,因为当温度过高时,不利于吸附反应的进行;当温度过低时,虽然有利于吸附剂的吸附反应,但温度越低,吸附速率越低,反而增加能耗成本。目前广泛使用的方法是在鼓入空气前增加水冷换热器,通过进水调节阀开度控制冷却水流量,从而达到控制进气温度的目的。

常规 PID 调节应用广泛,通过比较设定值与实际值,调整比例系数、微分作用和积分作用,改变 PID 控制器的输出。VPSA 制氧系统中换热器温度控制是一个大滞后、非线性的复杂控制过程,而且冷

却水温度受到环境影响大。当降雨、降雪温度骤变时,已整定好的 PID 系数无法满足水温变化,会出现超调和震荡。本文提出模糊自整定 PID 控制方案用于换热器冷却水阀门控制中,在环境条件剧烈变化时,通过模糊整定规则自动调整 PID 系数,从而达到快速稳定温度的目的。

1 基于常规 PID 的温度控制

VPSA 换热器出口温度的控制通过改变换热器冷却水入口管调节阀开度实现。常规 PID 温度控制的原理是通过传感器实时采集被控对象的温度,计算出实时值与理论设定值之间的偏差及偏差变化量,通过对偏差的放大以及对变化率在时间上的累积和微分,即对输入信号的放大、提前校正、消除误差等修正,进而控制阀门开度,实时调节冷却水流量实现温度的自动控制。常规 PID 调节的优势在于适用范围广,温度、压力、流量、液位等控制均可采用 PID 调节完成,同时对被控对象的数学模型要求不高。

[收稿日期] 2025-07-22

[基金项目] 高原变压吸附制氧用碱土基吸附剂与制氧装置研发(国家重点研发计划 2023YFB3813300)。

[第一作者] 高辉(1989—),男,河北廊坊人,硕士研究生,工程师,主要从事工业气体领域仪电控设计、调试工作。

常规 PID 控制方程见式(1)。

$$T(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t) dt + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中： K_p 为比例系数； K_i 为积分系数； K_d 为微分系数； $e(t)$ 是进气温度设定值与实时值的偏差； $T(t)$ 为调节阀输出。

由式(1)可知，PID 的比例系数、积分系数、微分系数为定值，事实上，在现场调试时，需要工程师根据阀门性能、系统特性等多次调整系数整定值，从而找到一个最佳配比，使系统响应及时、稳定性好。一般情况下，PID 系数调试后，不再进行修改。工程实际中影响换热器出口温度的因素有很多，例如换热器入口温度、冷却水温度、周围环境温度等，以上因素随季节、气候变化，若 PID 系数不随之调整，则可能出现调整不及时或超调，造成换热器出口温度波动，进而影响氧气产量和能耗。

2 基于模糊自整定 PID 的温度控制

模糊自整定 PID 本质也是 PID 调节方式，主要区别在于调试完毕后 PID 的 3 个系数均为定值，模糊自整定 PID 的系数则根据系统影响因素的变化而变化，在运行中不断调整。控制器主要是由模糊化、模糊、解模糊和赋值三个部分构成。工程师根据调试经验，找到 PID 系数与偏差 (E)、偏差变化率 (EC) 之间的关系，建立相应的模糊调整规则，在系统运行时根据测量值 (PV) 与设定值 (SP) 的计算结果，查询设定好的模糊规则和推理计算出合适的 PID 系数^[3]，用于调节阀开度调整。模糊自整定 PID 控制如图 1 所示。

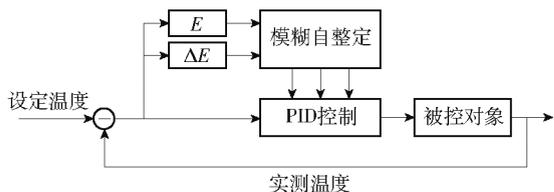


图 1 模糊自整定 PID 控制流程

Fig.1 Flow process of the fuzzy self-tuning PID control

2.1 输入系数模糊化

模糊 PID 自整定，首先由传感器测量出的实际值与设定值运算后的结果进行数据处理，在离散空间中将数据划分为若干个数量级，量化为靠近的数

值。数据处理的实质是削减数据量；然后要对相关系数进行模糊化，确定模糊子集，根据温度控制要求，设定温度为 40 ℃，允许偏差范围为 ±1 ℃，基于此将偏差 (E) 的范围选择在 (-3, +3) 区间内，再根据换热器出口温度变化快慢程度将偏差变化率 (EC) 选择在 (-1, +1) 区间，选取对换热器出口温度的偏差 (E) 及偏差变化率 (EC) 按照三角形隶属度进行模糊化，隶属度函数值是一个介于 0 和 1 之间的值，用以描述对应一个输入属于某一个模糊集合的程度。此外，高斯曲线、梯形、S 形和 Z 形均可作为输入隶属度函数，若将温度偏差 (E)/偏差变化率 (EC) 按照相应区间进行划分，见表 1。

表 1 输入系数模糊化结果

Table 1 Fuzzy results of input parameters

参数	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	-3	-2	-1	0	1	2	3
EC	-1	-0.7	-0.3	0	0.3	0.7	1

备注：N 代表 Negative，负；P 代表 Positive，正；B 代表 Big，大；M 代表 Middle，中；S 代表 Small，小。

2.2 制定模糊调整规则

对 δ_{K_p} 、 δ_{K_i} 、 δ_{K_d} 3 个系数进行模糊化并制定模糊调整规则。

1) 根据工程调试经验，在 PID 控制器中， K_p 值的选取决定于系统的响应速度。增大 K_p 能提高响应速度，减小稳态偏差；但是 K_p 值过大会产生较大的超调，甚至使系统不稳定，减小 K_p 可以减小超调，提高稳定性，但 K_p 过小会减慢响应速度，延长调节时间。

2) 在系统控制中， K_i 主要是用来消除系统的稳态偏差。受饱和和非线性等因素影响，积分过程可能在调节过程的初期产生积分饱和，从而引起调节过程的较大超调。

3) 微分环节的调整主要针对大惯性过程引入的，微分环节系数的作用在于改变系统的动态特性。系统的微分环节系数能反映信号变化的趋势，并能在偏差信号变化太大之前，在系统中引入一个有效的较早的修正信号，从而加快响应速度，减少调整时间、消除振荡，最终改变系统的动态性能。因此， K_d 值的选取对调节动态特性影响很大。 K_d 值过大，调节过程制动就会超前，致使调节时间过长； K_d 值过小，调节过程制动就会落后，从而导

致超调增加。

从以上分析可得出如下模糊规则：

1) 当设定值与实际值差值大时, 要适当增加 K_p , 减小 K_d , 同时偏差大时容易导致积分饱和, 因此积分作用应尽量小;

2) 当偏差及偏差变化率均为中等时, 为防止出现大的超调, 同时提高响应速度, 应保证 K_p 、 K_i 、 K_d 系数大小适当;

3) 当偏差小时, 要减小 K_p , 从而不发生超调, 增大积分作用, 消除余差;

4) 当差值趋近 0 时, 应尽量减少 PID 系数的改变。

由此, 得到 δ_{k_p} 的模糊规则见表 2。

表 2 δ_{k_p} 的模糊规则
Table 2 Fuzzy rule of δ_{k_p}

δ_{k_p}	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
EC	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PM	PS	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PB

δ_{k_i} 的模糊规则见表 3。

表 3 δ_{k_i} 的模糊规则
Table 3 Fuzzy rule of δ_{k_i}

δ_{k_i}	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
EC	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB

δ_{k_d} 的模糊规则见表 4。

表 4 δ_{k_d} 的模糊规则

Table 4 Fuzzy rule table of δ_{k_d}

δ_{k_d}	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
EC	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PB

根据偏差 E 和偏差变化率 EC 模糊化的结果以及规则, 推理出 δ_{k_p} 、 δ_{k_i} 、 δ_{k_d} 对应的模糊子集。由于采用隶属度函数来定义输入-输出量在模糊子集的隶属度, 因此, 推理出来的 δ_{k_p} 、 δ_{k_i} 、 δ_{k_d} 的模糊子集通常是一个由模糊变量组成的矩阵。而输入量 E 和 EC 则是一个由模糊变量组成的向量。

2.3 解模糊和赋值

根据阀门特性和 PID 调整原理, 首先确定 δ_{k_p} 的模糊子集为 $(-3, +3)$, δ_{k_i} 的模糊子集为 $(-6, +6)$, δ_{k_d} 的模糊子集为 $(-1, +1)$ 。

通过对输入的模糊处理、对照模糊规则、解模糊, 得到 PID 系数精确的调整量, 此处采用最大隶属度函数解模糊, 得到 δ_{k_p} 、 δ_{k_d} 、 δ_{k_i} 。此外, 还有面积平分法、面积中心法和加权平均法等方法。

将经过模糊理论计算得到的 δ_{k_p} 、 δ_{k_i} 、 δ_{k_d} 作为 PID 系数的修正, 将新的 PID 系数赋给控制器用于换热器冷却水阀门调节, 见式(2)~(4)。

$$K_p = K_{p0} + \delta_{k_p} \quad (2)$$

$$K_i = K_{i0} + \delta_{k_i} \quad (3)$$

$$K_d = K_{d0} + \delta_{k_d} \quad (4)$$

例如, 当换热器出口设定温度为 40°C 时, 测得实际温度为 42°C , 温度变化率为 -0.3 , 则根据输入隶属度函数, “ $E = \text{PS}$ ”的隶属度为 0.2 , “ $E = \text{PM}$ ”的隶属度为 0.6 , “ $E = \text{PB}$ ”的隶属度为 0.2 , “ $E = \text{其他值}$ ”的隶属度为 0 ; “ $EC = \text{NM}$ ”的隶属度为 0.2 , “ $EC = \text{NS}$ ”的隶属度为 0.6 , “ $EC = \text{ZO}$ ”的隶属度为 0.2 , “ $EC = \text{其他值}$ ”的隶属度为 0 ; 根据 δ_{k_p} 的模糊规则表, “ $\delta_{k_p} = \text{PM}$ ”的隶属度为 0.04 , “ $\delta_{k_p} = \text{ZO}$ ”的隶

属度为 0.28, “ $\delta_{k_p} = NS$ ” 的隶属度为 0.52, “ $\delta_{k_p} = NM$ ” 的隶属度为 0.16, 按照最大隶属度函数得 δ_{k_p} 为 NS(-1, 0), 隶属度为 0.52, 对应解模糊后调整量 δ_{k_p} 为 -0.52。其他系数的模糊推理过程以此类推, 最后根据新的 PID 系数调整阀门开度。

3 模糊自整定 PID 控制在西门子 1500 PLC 上的应用

控制系统选择西门子 S7-1500PLC, CPU 为 1515-2PN, 模拟量输入模块为 6ES7 531-7KF00-0AB0, 模拟量输出模块为 6ES7 532-5HF00-0AB0, RTD 输入模块为 6ES7531-7PF00-0AB0; 编程软件为 TIA Portal V16, 上位组态软件为 Kingview7.5, 双方通过以太网通讯。

3.1 换热器冷却水模糊自整定 PID 控制程序实现

在 OB1 中编写调节阀控制、阀位反馈、换热器出口温度采集程序, 在 OB35 循环中断程序中实现基于换热器出口温度的调节阀开度 PID 控制程序搭建, OB35 中断时间设置为 1 s, 建立模糊规则库 DB 块, 建立 FB 模糊自适应整定功能块, 实现温度偏差和温度偏差变化率的采集、模糊化、模糊规则查询、解模糊及 PID 系数修正功能^[4-5]。

当系统运行时, OB1 按照 PLC 采样周期调用换热器出口温度采集块, 采集实测温度值, 在 OB35 中调用模糊自整定 PID 控制块, 每隔 5 s 比较换热器出口温度实时值和设定值, 计算出温度偏差和温度偏差变化率, 并按照规则模糊化, 根据 E/EC 模糊化后的值查询模糊规则, 算出 PID 系数的修正量, 设置调整死区为 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, 当实测温度为 39 ~ 41 $^\circ\text{C}$ 时, PID 系数不修正, 当实测值不在这个范围时, 用修正后的 PID 系数计算出冷却水入口调节阀开度, 调节冷却水流量, 从而控制换热器后出口温度。

模糊自整定 PID 程序流程如图 2 所示。

3.2 模糊自整定 PID 与常规 PID 温度控制效果对比

在某厂 VPSA 装置中, 换热器冷却水取自户外循环水池, 在换热器后安装 1 台 WZPK-230NZ 型热电阻, 用于测量换热器出口温度; 在换热器冷却水入口管道上安装 1 台 DN40 口径的电动 V 形球阀, 用于调节冷却水进水流量。控制系统为西门子 1200PLC, 上位组态软件为组态王 7.5。

采用常规 PID 和模糊自整定 PID 控制方式, 连

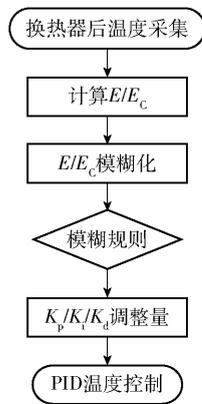


图 2 模糊自整定 PID 程序流程

Fig. 2 Flow process of Fuzzy self-tuning PID program

续运行 24 h, 对比在 2 种不同控制方式下的温度控制效果。

常规 PID 控制效果如图 3 所示, 自上午 9 时开始记录温度变化趋势, 随着气温回升, 环境温度和冷却水温度不断升高, 常规 PID 控制调节出口温度时不断增大冷却水阀门开度, 此时比例系数小, 每次调整量不能抵消冷却水温度升高的影响, 换热器出口温度在波动中逐渐升高, 升至 44 $^\circ\text{C}$ 时需要人工介入, 重新修正调节系数。傍晚以后, 光照消失, 环境温度和冷却水温度开始降低, 此时的积分作用较弱, 余差无法消除, 由于冷却水温度低, 换热器出口温度一直无法回升至 40 $^\circ\text{C}$ 。在这一天中换热器出口温度波动范围近 10 $^\circ\text{C}$ 。

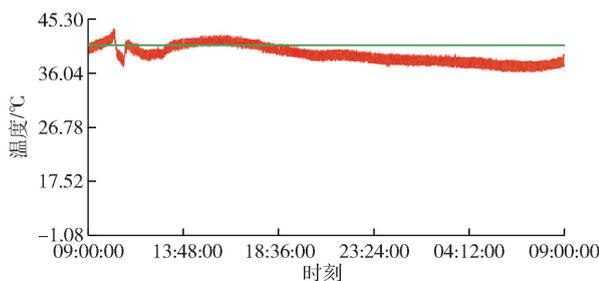


图 3 常规 PID 控制温度变化曲线

Fig. 3 Temperature change curve of conventional PID control

模糊自整定 PID 控制效果如图 4 所示。当气温升高时, 模糊自整定 PID 控制器根据换热器出口温度偏差和偏差变化率, 进一步增大比例系数, 提高微分作用; 当环境温度降低时, 增大积分作用, 换热器出口温度一直控制在 39 ~ 42 $^\circ\text{C}$ 。

通过分析和对比 2 个温度控制曲线可以看出,

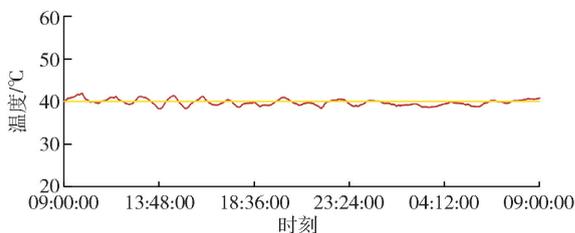


图 4 模糊自整定 PID 控制温度变化曲线

Fig. 4 Temperature change curve of Fuzzy self-tuning PID control

常规 PID 温度控制在环境温度变化剧烈时发生比较大的波动,且超调量大,同时由于积分系数的选择不再适用,导致夜间温度偏离设定温度大;而模糊自整定 PID 控制在温度变化时响应速度更快、超调量更小,温度曲线贴近设定值并且调整及时。结果证明,模糊自整定 PID 控制应用在自动控制系统中可根据变量自动调整 PID 整定系数,适应性更强,控制更加精准、稳定。

4 结论

随着人工智能的发展,工业领域也在不断提高自动化水平和控制精度,诸如一键启停、自动调节、自适应调整等功能的不断完善,大幅提高了工业产品产能,降低了能耗。将模糊自整定 PID 控制先进控制理论应用到实际工业控制中,通过 PLC 或

DCS 来实现控制功能,相较传统 PID 控制优势明显。但本文对于不同模糊化、解模糊的方法对比研究较少,同时模糊规则还需进一步细化。

以某 VPSA 装置为例,通过调整比例系数、微分系数、积分系数,得到 2 个温度控制曲线,并得出以下结果。

1) 常规 PID 温度控制在环境温度变化剧烈时波动约 10℃,且超调量大,同时由于积分系数的选择不再适用,导致夜间温度偏离设定温度大。

2) 模糊自整定 PID 控制在温度变化时响应速度更快,超调量为 5%,温度曲线贴近设定值并且调整及时。

3) 相比传统 PID 控制,模糊自整定 PID 控制在温度剧烈变化时的超调量更小,换热器后温度变化趋势更稳定。

[参考文献]

- [1] 耿云峰,耿晨霞,张文效. 变压吸附(PSA)空分制氧技术进展[J]. 煤化工,2003(1):33-36.
- [2] 姜贺,刘世合. 变压吸附制氧设备工艺设备选型及设计[C]. 变压吸附设备技术交流论文集,2004.
- [3] 孟娇娇,侯伟. 基于模糊自整定 PID 算法的退火炉温度调节技术[J]. 工业加热,2024,53(9):1-4,9.
- [4] 王振. 基于 S7-1500 PLC 的双容水箱建模分析与先进 PID 控制算法研究[D]. 银川:北方民族大学,2024.
- [5] 李健,单毅. 自动调节在 VPSA 制氧系统中的应用[J]. 自动化仪表,2021,42(1):107-110.

Temperature control of VPSA heat exchanger based on fuzzy self-tuning PID

GAO Hui, PENG Xueping, QU Xiuli, TIAN Haiying

(Beijing Peking University Pioneer Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The paper introduces a control method for the inlet water regulating valve of the heat exchanger in the vacuum swing adsorption (VPSA) oxygen production process. Firstly, it briefly describes the complex characteristics of temperature control in the VPSA adsorption tower, including large lag and sensitivity to environmental temperature. Then, it analyzes the shortcomings of conventional PID control in VPSA temperature regulation and proposes the use of a fuzzy self-tuning PID parameter method. Finally, it is implemented using Siemens 1500 PLC and the WinCC software from ABB. Taking a VPSA device as an example, by adjusting the proportional coefficient, differential action, and integral action, two temperature control curves were obtained. The results show that conventional PID temperature control

fluctuates by approximately 10 °C when the environmental temperature changes sharply, and has a large overshoot. Moreover, due to the selection of the integral parameter no longer being applicable, the temperature deviates significantly from the set temperature at night. In contrast, the fuzzy self-tuning PID control responds faster to temperature changes, has an overshoot of 5%, and the temperature curve is closer to the set value and is adjusted promptly. Compared to traditional PID control, the fuzzy self-tuning PID control has a smaller overshoot during extreme temperature changes and a more stable temperature change trend after the heat exchanger.

Keywords: VPSA; fuzzy self-tuning; PID control; temperature control; oxygen; heat exchanger; adsorption tower ▲

中国恩菲主编的国际标准 《生活垃圾渗滤液处理回用系统运维指南》正式启动

2025 年 11 月 28 日,中国恩菲工程技术有限公司组织召开国际标准《生活垃圾渗滤液处理回用系统运维指南》(ISO/WD 23623)启动会暨专题研讨会。中国恩菲副总经理万焱出席并致辞。

来自 ISO/TC282 国际秘书处的深圳市海川实业股份有限公司,ISO/TC282 国内技术对口单位中国标准化研究院、中冶长天、北京林业大学、光大环保(中国)有限公司、深圳能源等专家代表围绕标准草案的框架与核心技术内容进行了深入研讨。

该国际标准由中国恩菲主编,于 2025 年 2 月通过 ISO 立项,旨在促进垃圾渗滤液处理回用系统高效稳定运行,节省经济和能源成本,降低安全风险。标准将与中国恩菲主导的《生活垃圾焚烧发电渗滤液处理及回用技术导则》(ISO 24297)共同构建起渗滤液“处理—回用—运维”全链条标准体系,助力中国恩菲从“技术输出”向“标准引领”方向转型升级。

资料来源:中国有色网