

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306760

燃气加臭广义预测精准控制算法研究*

葛亮¹ 廖聪冲¹ 肖启强² 卓勇² 罗明¹

(1. 西南石油大学 成都 610500; 2. 中国石油西南油气田公司 成都 610031)

摘要:燃气加臭浓度精准控制对保证燃气的安全运输和使用具有重要作用。但由于缺乏对终端用户处实际燃气加臭浓度的监控,现有以燃气流量比例开环控制为代表的线性控制算法难以取得很好的控制效果。为此,基于开环阶跃响应最小二乘法辨识,以燃气终端用户处的加臭剂浓度为控制对象,建立了燃气加臭过程的 CARIMA 模型,在传统广义预测控制基础上提出了一种改进型广义预测控制算法,并通过燃气加臭控制的仿真测试和现场实验验证了该控制算法的可行性。研究表明,相较于常规的燃气流量比例开环控制,改进型广义预测控制算法可实时在线精准控制终端用户处的加臭剂浓度,稳态误差小于 2 mg/m^3 ,工况变化时超调量小于 10%,平均绝对误差小于 1.5 mg/m^3 ,可以满足燃气加臭过程精准控制需要。研究成果在提高燃气加臭效率和质量的同时,起到了节约成本和提升燃气安全的作用,具有良好的应用价值。

关键词:燃气加臭控制;广义预测控制;系统辨识;加臭剂浓度;燃气安全

中图分类号: TN98; TP273 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8060

Study on generalized predictive accurate control algorithm for gas odorization

Ge Liang¹ Liao Congchong¹ Xiao Qiqiang² Zhuo Yong² Luo Ming¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610031, China)

Abstract: Accurate control of gas odorization concentration plays an important role in ensuring the safe transportation and use of gas. However, due to the lack of monitoring of the actual odorization effect at the end-users, the existing linear control algorithm represented by the gas flow rate proportional open-loop control is difficult to achieve a good control effect. For this reason, based on the least-squares identification of the open-loop step response and taking the odorant concentration at the gas end-users as the control object, a CARIMA model of the gas odorization process is established, and an improved generalized predictive control algorithm is proposed on the basis of the traditional generalized predictive control, and the feasibility of this control algorithm is verified by the simulation tests and field experiments of the gas odorization control. The research results show that compared with the conventional gas flow rate proportional open-loop control, the improved generalized predictive control algorithm can accurately control the odorant concentration at the end-users in real-time online, with the steady-state error of less than 2 mg/m^3 , the overshoot of less than 10% when the working condition changes, and the average absolute error of less than 1.5 mg/m^3 , which can meet the need of accurate control of gas odorization process. The research results improve the efficiency and quality of gas odorization while playing a role in saving costs and improving gas safety, which has good application value.

Keywords: gas odorization control; generalized predictive control; system identification; odorant concentration; gas safety

收稿日期: 2023-07-21 Received Date: 2023-07-21

* 基金项目: 省科技计划项目(2023ZHCG0020)、西南石油大学自然科学“启航计划”项目(2023QHZ003)、南充市-西南石油大学市校科技战略合作项目(23XNSYSX0022/23XNSYSX0026)资助

0 引言

燃气加臭是将一种有独特气味的,令人不愉快的加臭剂注入燃气中以保证燃气泄漏时能被人感知的过程^[1-2],是燃气安全运输和使用的重要环节。燃气加臭浓度控制对保证燃气的安全运输和使用具有重要作用。燃气管网沿线的加臭剂浓度受上游燃气流量、管道长度、初始加臭浓度和环境温度的影响非常大,且加臭过程中燃气流量变化较为频繁,实际燃气加臭过程常常具有非线性、时变性、不确定性和大滞后的特性。因此,当燃气流量处于动态变化时,如何实时调控加臭量以保证燃气终端用户处的加臭剂浓度在国家规定标准范围之内,且具有良好的稳定性能是燃气加臭控制系统运行优化的难点。

要开展燃气加臭过程控制算法的研究,技术关键在于建立能够准确反映燃气加臭过程的数学模型。针对燃气加臭过程的研究成果主要集中在小试和中试试验基础上的加臭剂浓度的影响因素和扩散规律等方面。Tukmakov 等^[3]在考虑可压缩气体的粘性、导热和多组分介质运动的基础上,建立了燃气加臭剂浓度扩散模型,计算了不同气速下燃气主流与加臭剂气体的侧喷流相互作用的对流和扩散的混合过程,从而得到稳态分布点的变化规律。Gross 等^[4]采用 RANS (reynolds average navier-stokes) 方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型对燃气水平管道中加臭剂的扩散情况进行建模,根据数值模拟的结果分析了不同平均流速和管网运行压力对管道中加臭剂浓度的影响,以了解沿线燃气管道中加臭剂浓度的最大值与最小值; Deymi-Dashtebayaz 等^[5]研究了燃气管道沿线的加臭剂浓度扩散行为,将管网长度和管径大小作为输入参数,分析了燃气流速、压力和加臭站初始加臭浓度对加臭剂浓度衰减的影响,并且在数值解的基础上通过曲线拟合的方式得出了燃气管道中加臭剂浓度计算公式。这些基于加臭剂与燃气混合流动的建模研究成果,为燃气加臭过程提供了理论依据和实验依据。但是这些基于数值模拟的研究过程较为理想,并且通过该方式下得到的数学模型只是反映燃气加臭过程输入输出的静态数学模型,无法适用于持续实时控制的实际燃气加臭过程的面向控制模型。

目前国内外关于燃气加臭过程的控制技术主要为燃气流量比例开环控制^[6]。燃气流量比例开环控制根据燃气流量的变化实时调整加臭量,这在加臭过程燃气流量和工况稳定以及慢时变的情况下可以取得比较满意的控制效果,但由于是开环控制,缺乏对终端用户处实际加臭效果的监控,当燃气流量和过程工况发生改变时,控制效果就会变得很差。因为实际的燃气加臭过程是一个典型

的大滞后和时变性的过程,受燃气流量变化和工况条件的影响十分明显,以燃气流量比例开环控制为代表的线性控制算法难以取得很好的控制效果,甚至导致被控对象的不稳定。

广义预测控制 (generalized predictive control, GPC) 是预测控制的一个分支^[7],相较于最小方差控制和动态控制等高度依赖模型精度的自适应控制算法,广义预测控制不会由于建模误差或模型变化而降低控制性能^[8-9]。由于不依赖于被控对象精确的数学模型,广义预测控制在复杂工业过程中的应用十分广泛,并有很多成功的典型案例,如电机速度、航天器姿态、机器臂极点配置、工业锅炉、电力废热回收、镀锌板生产过程等的广义预测控制^[10-13]。作为一种能有效解决实际工业过程中存在的非线性、时变性和大时滞的方法,广义预测控制采用带控制量的自回归积分滑动平均模型作为预测模型^[14],结合反馈校正机制对目标函数进行在线滚动优化^[15-17],具有较强的鲁棒性^[18],能很好地满足燃气精准加臭控制的要求。

本文以燃气终端用户处的加臭剂浓度为控制目标,将一种改进型 GPC 控制算法用于燃气加臭过程控制,以应对燃气流量变化和过程工况变化的影响,同时根据预测模型预测未来的系统输出值,从而解决燃气加臭过程中的大滞后、非线性的问题。

1 燃气加臭过程辨识建模

要开展燃气加臭过程控制算法的研究,首先必须建立面向燃气加臭过程控制的模型。鉴于实际燃气加臭过程的复杂性,以及多方面外界因素的影响,很难建立精确的机理模型。而系统辨识作为一种通过测量过程的输入、输出数据来建立生产过程数学模型的理论,是一种有效的面对复杂过程的建模方法^[19]。

1.1 基于开环阶跃响应的燃气加臭过程的最小二乘辨识算法

通过开环阶跃响应实验发现,在燃气流量稳定的情况下,燃气加臭过程呈现出典型的二阶惯性加滞后特性。但由于开环阶跃响应实验存在着很多干扰,本文提出了一种基于开环阶跃响应的最小二乘法辨识算法,以提高燃气加臭过程的辨识准确性。

燃气加臭过程的二阶惯性加滞后系统的传递函数可表示为式(1):

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + a_1s + a_2} e^{-Ls} \quad (1)$$

在辨识算法的具体实现中,首先对燃气加臭过程施加一个阶跃信号,其输出时域响应如式(2)所示:

$$y(t) = \begin{cases} 0 & t < L \\ K_p + \alpha_1 e^{-\lambda_1(t-L)} + \alpha_2 e^{-\lambda_2(t-L)} & t \geq L \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_p 为燃气加臭过程系统的静态增益, L 为系统的时滞, $\alpha_1 = K_p \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$, $\alpha_2 = -K_p \lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2)$ 。

求得燃气加臭过程系统的静态增益: $K_p = y(\infty)$ 。假设 $\Delta y(t) = y(t) - y(\infty)$, 对 $\Delta y(t)$ 进行一次积分和二次积分, 整理后得到式(3):

$$\int_0^t \int_0^{\tau_2} \Delta y(\tau_1) d\tau_1 d\tau_2 = -\frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \Delta y(t) - \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}\right) \int_0^t \Delta y(\tau_1) d\tau_1 - \left(\frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} - \frac{1}{2} L^2\right) K_p - \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + L\right) K_p t \quad (3)$$

式(3)可以表示为式(4)所示的矩阵形式:

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\theta} + \mathbf{e} \quad (4)$$

用最小二乘法辨识燃气加臭过程模型的参数 $\boldsymbol{\theta}$ 并计算燃气加臭过程模型各个参数的值, 如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} K \\ a_1 \\ a_2 \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_p a_2 \\ \theta_2 / \theta_1 \\ 1 / \theta_1 \\ \theta_4 - \theta_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

当最小二乘法的误差最小时, 得到燃气加臭过程模型的各参数, 保证了燃气加臭过程的辨识精度。白噪声干扰下, 最小二乘法具有无偏性、有效性和一致性, 避免了开环阶跃响应实验的外界干扰。

1.2 燃气加臭过程系统辨识

为直观体现辨识效果, 以成都某燃气公司的集中燃气加臭站进行阶跃响应实验。在确保安全的前提下, 将加臭浓度由 0 mg/m^3 提高 20 mg/m^3 , 同时利用终端用户处的 THT 在线检测仪每隔 2 min 采样 1 次 THT 气体浓度数据, 直到终端用户处的浓度达到比较稳定的状态。多次重复开环阶跃响应实验, 得到曲线较为光滑的检测数据样本点。

将阶跃响应输入输出数据导入到程序中, 利用最小二乘法对燃气加臭过程进行了参数辨识, 辨识结果如图 1 所示。

根据辨识结果得到燃气加臭过程的传递函数如式(6)所示:

$$G(s) = \frac{1.1699e^{-915s}}{(1 + 5.031 \cdot 2s)(1 + 15.765s)} \quad (6)$$

为了评价辨识模型和实际数据的拟合程度, 选取 Theil 不等系数作为辨识模型的评价指标, 如式(7)所示:

$$TIC = \frac{\sqrt{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i y_i^2} + \sqrt{\sum_i \hat{y}_i^2}} \quad (7)$$

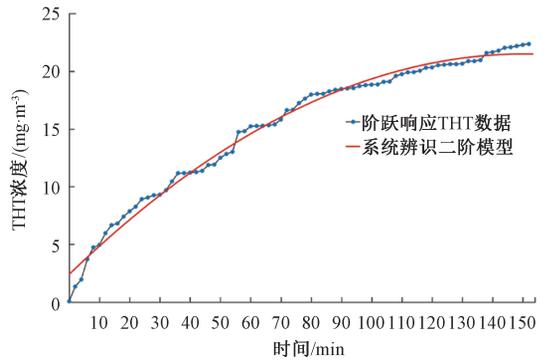


图 1 阶跃响应最小二乘辨识结果

Fig. 1 Step response least squares identification results

式中: y_i 为燃气加臭过程实际输出, \hat{y}_i 为辨识模型输出。所构建式(6)模型的 TIC 为 0.0402 , 远小于 0.3 , 说明通过开环阶跃响应的最小二乘法辨识得到的模型拟合度较好, 可以用于燃气加臭控制研究中。

利用 Z 变换将传递函数离散化, 得到燃气加臭过程的离散形式如式(8)所示:

$$G_1(z) = z^{-8} \frac{0.006992z^2 + 0.02038z + 0.0001895}{z^2 - 0.9769z + 0.0004402} \quad (8)$$

将式(8)转换为 CARIMA 模型, 如式(9)所示:

$$y(k) - 0.9769y(k-1) + 0.0004402y(k-2) = 0.006992u(k-8) + 0.02038u(k-9) + 0.0001895u(k-10) + \xi(k)/\Delta \quad (9)$$

2 燃气加臭改进型广义预测控制

燃气加臭过程广义预测控制算法原理结构如图 2 所示, 主要由预测模型、滚动优化和反馈校正 3 个环节组成。

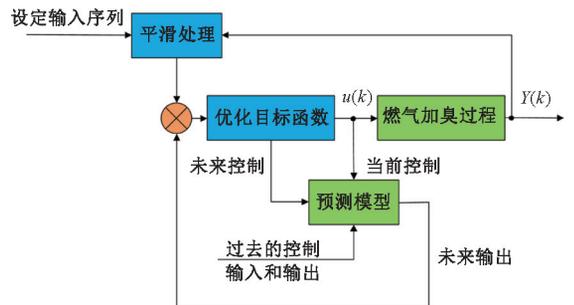


图 2 GPC 预测模型原理

Fig. 2 Schematic diagram of GPC prediction model

首先是利用预测模型对未来的输出进行预测, 然后根据未来输出值和期望输出值滚动优化目标函数^[20], 得到控制量 $u(k)$, 最后是反馈校正, 在下一个采样时刻, 检

测对象的实际输出,利用这一实时信息对基于模型的预测进行修正。

由于传统 GPC 算法在滚动优化中需要在线求解丢番图方程,计算量较大,且运算过程中不一定能保证矩阵可逆,存在出现病态矩阵的安全隐患^[21-23]。为延长加臭机的寿命,控制量不宜频繁剧烈变化。本研究对传统 GPC 算法进行了改进,提出了在广义预测控制的基础上,引入一个符合燃气加臭过程的控制约束。具体为将燃气加臭过程控制的未来时刻的控制增量进行约束,使其呈式(10)所示的比例形式:

$$\frac{\Delta u(k+1)}{\Delta u(k)} = \beta \tag{10}$$

式中: β 是阶梯因子,且 $0 \ll \beta \ll 1$ 。

改进型广义预测控制算法采用 CARIMA 模型,目标函数设为式(11)所示:

$$J = E\{(Y - Y_r)^T(Y - Y_r) + \Delta U^T \Gamma \Delta U\} \tag{11}$$

由于采用了比例约束,令控制增量 $\Delta u(k)$ 如式(12)所示:

$$\Delta u(k) = \delta \tag{12}$$

则结合式(12)可得式(13):

$$\begin{cases} \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = \delta \\ \Delta u(k+1) = u(k+1) - u(k) = \beta\delta \\ \vdots \\ \Delta u(k+N-d) = u(k+N-d) - u(k+N-d-1) = \beta^{N-d}\delta \end{cases} \tag{13}$$

由式(13)可得式(14):

$$\Delta U = (1, \beta, \dots, \beta^{N-d})^T \delta \tag{14}$$

可得到式(15)所示的预测模型:

$$Y = Y_m + G(1, \beta, \dots, \beta^{N-d})^T \delta \tag{15}$$

其中, G

$$\begin{bmatrix} b_{1,0} & 0 & \dots & 0 \\ b_{2,0} & b_{1,0} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N-d+1,0} & b_{N-d,0} & \dots & b_{1,0} \end{bmatrix}_{(N-d+1) \times (N-d+1)}, Y =$$

$$\begin{bmatrix} y(k+d|k) \\ y(k+d+1|k) \\ \dots \\ y(k+N|k) \end{bmatrix}, Y_m = \begin{bmatrix} y_m(k+d) \\ y_m(k+d+1) \\ \dots \\ y_m(k+N) \end{bmatrix}, N \text{ 为预}$$

测长度。

令矩阵 \bar{G} 如式(16)所示:

$$\bar{G} = G(1, \beta, \dots, \beta^{N-d})^T = \begin{bmatrix} b_{1,0} \\ b_{2,0} + \beta b_{1,0} \\ \vdots \\ b_{N-d+1,0} + \beta b_{N-d,0} + \dots + \beta^{N-d} b_{1,0} \end{bmatrix}_{(N-d+1) \times 1} \tag{16}$$

从而,式(11)所示的目标函数可以写为式(17):

$$J = E\{(Y_m + \bar{G}\Delta u - Y_r)^T(Y_m + \bar{G}\Delta u - Y_r) + \gamma(1 + \beta^2 + \dots + \beta^{2(N-d)})\Delta u^2\} \tag{17}$$

由 $\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0$,极小化目标函数,得到控制律如式(18)

所示:

$$\Delta u = [\bar{G}^T \bar{G} \gamma (1 + \beta^2 + \dots + \beta^{2(N-d)})]^{-1} \times \bar{G} (Y_r - Y_m) \tag{18}$$

则当前时刻燃气加臭过程的控制量如式(19)所示:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) = u(k-1) + [\bar{G}^T \bar{G} \gamma (1 + \beta^2 + \dots + \beta^{2(N-d)})]^{-1} \bar{G} (Y_r - Y_m) \tag{19}$$

通过引入阶梯式的控制约束,使得矩阵 \bar{G} 变成了 $(N-d+1) \times 1$ 列向量,使得矩阵运算变成了向量的运算,这不仅减少了控制量,也避免了数值病态问题。同时阶梯式控制约束的存在又避免了控制量的剧烈变化,符合燃气加臭过程的实际情况。

实际控制中还要考虑加臭站加臭机的浓度量程限制,具体控制量的限幅方法如式(20)所示:

$$u(k) = \begin{cases} u_{\min}, u(k) < u_{\min} \\ u(k), u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \\ u_{\max}, u(k) > u_{\max} \end{cases} \tag{20}$$

3 测试与分析

3.1 仿真测试分析

将辨识模型式(9)作为燃气加臭实际过程。为了验证所提控制方案的有效性,分别在模型匹配和模型失配情况下,进行仿真验证。为了定量分析两种控制方案的设定值跟踪性能和抗干扰性能,选取超调量、稳定时间和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)作为评价控制响应的性能指标,平均绝对误差的计算如式(21)所示:

$$MAE(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |r(k) - y(k)| \tag{21}$$

式中: $r(k)$ 为输出设定值, $y(k)$ 为实际过程输出。

1) 模型匹配

为了对比改进型 GPC 控制方案的设定值跟踪性能和抗干扰性能,将传统 GPC 控制方案也进行了仿真。在仿真验证中,将设定值取为 18 和 25 mg/m³,仿真时间取为 1 200 min,每 2 min 进行一次采样,外加方差为 0.01 的白噪声干扰。为了验证控制方案的抗干扰性,在 $k = 400$ 时,加入 3 mg/m³ 的常值扰动。图 3(a)所示为模型匹配时 GPC 控制的仿真结果,图 3(b)所示为模型匹配时改进型 GPC 控制的仿真结果,对应的性能指标如表 1 所示。

在模型匹配的情况下,设定值为 18 mg/m³ 时, GPC 控制的平均绝对误差为 1.027 mg/m³,改进型 GPC 控制

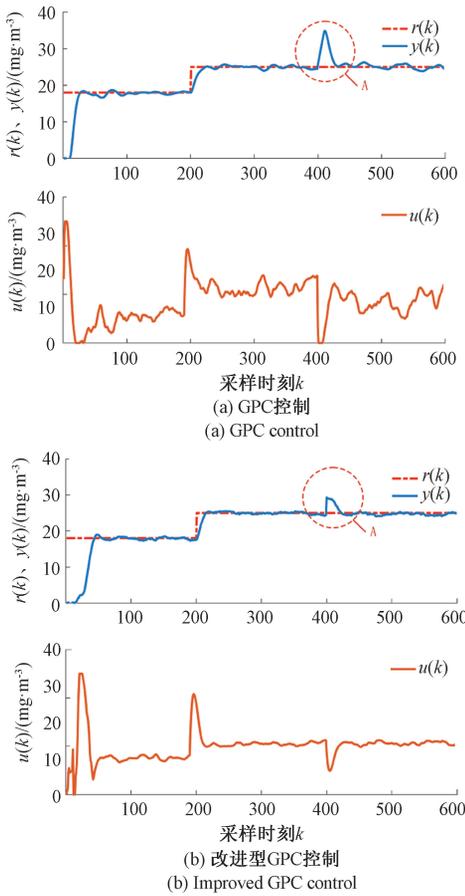


图 3 模型匹配时 GPC 和改进型 GPC 控制的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of GPC and improved GPC control with model matching

表 1 模型匹配时 GPC 和改进型 GPC 控制的性能指标
Table 1 Performance indexes of GPC and improved GPC control with model matching

性能指标	0~400 min		401~800 min	
	GPC 控制	改进型 GPC 控制	GPC 控制	改进型 GPC 控制
超调量/%	5.85	5.63	4.9	3.52
稳定时间/min	94	98	58	56
MAE/(mg·m ⁻³)	1.027	0.934	0.464	0.269

的平均绝对误差为 0.934 mg/m³；在工况变化, 设定浓度由 18 mg/m³ 调至 25 mg/m³ 时, GPC 控制的平均绝对误差为 0.464 mg/m³, 改进型 GPC 控制的平均绝对误差为 0.269 mg/m³, 两者都能够较好地跟踪变化的燃气加臭浓度设定值。对比两者的稳定时间和超调量, 设定值为 18 mg/m³ 时, GPC 控制的稳定时间为 94 min, 超调量为 5.85%, 改进型 GPC 控制的稳定时间为 98 min, 超调量为 5.63%; 在工况变化, 设定浓度由 18 mg/m³ 调至 25 mg/m³ 时, GPC 控制的稳定时间为 58 min, 超调量为 4.9%, 改进型 GPC 控制的稳定时间为 56 min, 超调量为 3.52%, GPC 控制的快速性较好, 但具有较大的超调量。

比较图 3(a) 和(b) 中的 A 区域处, 改进型 GPC 控制在有常值扰动的情况下, 能够使过程输出更快地调节到设定值附近, 表现出了更强的鲁棒性。从控制量 $u(k)$ 随采样时刻 k 变化的曲线图可以对比看出, 改进型 GPC 控制的控制量变化更加平缓, 能更好地在实际中开展运用。

2) 模型失配

为了验证由燃气流量和过程工况变化等引起模型失配时所提控制方案的鲁棒性, 将放大系数 K 增大 10%, 时滞增大 20%, 时间常数都增加 10%, 得到变化后的燃气加臭实际过程如下:

$$G(s) = \frac{1.2869e^{-1.098s}}{(1 + 5534.32s)(1 + 17.3415s)} \quad (22)$$

将燃气加臭过程的传递函数转换为适用于计算机控制的 CARIMA 模型:

$$y(k) - 0.9795y(k-1) + 0.0009668y(k-2) = 0.01954u(k-10) + 0.008032u(k-11) + 0.000003065u(k-12) + \xi(k)/\Delta \quad (23)$$

GPC 控制和改进型 GPC 控制的参数保持不变, 对两种控制方案进行仿真。图 4(a) 所示为模型失配时 GPC 控制的仿真结果, 图 4(b) 所示为模型失配时改进型 GPC 控制的仿真结果, 对应的性能指标如表 2 所示。

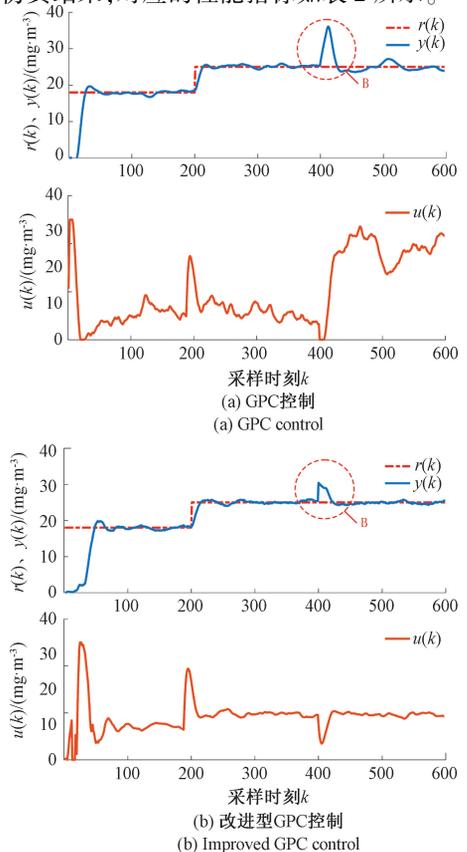


图 4 模型失配时 GPC 和改进型 GPC 控制的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of GPC and improved GPC control with model mismatch

表 2 模型失配时 GPC 和改进型 GPC 控制的性能指标

Table 2 Performance indexes of GPC and improved GPC control with model mismatch

性能指标	0~400 min		401~800 min	
	GPC 控制	改进型 GPC 控制	GPC 控制	改进型 GPC 控制
超调量/%	8.55	6.25	6.95	4.58
稳定时间/min	102	110	76	80
MAE/(mg·m ⁻³)	1.234	1.116	0.557	0.492

在模型失配的情况下,设定值为 18 mg/m³ 时, GPC 控制达到稳定的时间为 102 min, 改进型 GPC 控制达到稳定的时间为 110 min; 在工况变化, 设定浓度由 18 mg/m³ 调至 25 mg/m³ 时, GPC 控制的稳定时间为 76 min, 改进型 GPC 控制的稳定时间为 80 min, GPC 控制快速性更好, 能更快地将燃气终端用户处的加臭剂浓度稳定在设定值附近。从超调量这项指标来看, 设定值为 18 mg/m³ 时, GPC 控制的超调量为 8.55%, 改进型 GPC 控制的超调量为 6.25%; 在工况变化, 设定浓度由 18 mg/m³ 调至 25 mg/m³ 时, GPC 控制的超调量为 6.95%, 改进型 GPC 控制的超调量为 4.58%, GPC 控制具有较大的超调量, 改进型 GPC 控制的平稳性更好。从平均绝对误差这项指标来看, 设定值为 18 mg/m³ 时, GPC 控制的平均绝对误差为 1.234 mg/m³, 改进型 GPC 控制的平均绝对误差为 1.116 mg/m³; 在工况变化, 设定浓度由 18 mg/m³ 调至 25 mg/m³ 时, GPC 控制的平均绝对误差为 0.557 mg/m³, 改进型 GPC 控制的平均绝对误差为 0.492 mg/m³。因此, 改进型 GPC 控制具备了更好的稳态精度, 能够更好地跟踪加臭站 THT 设定值的变化。

模型失配时改进型 GPC 控制的超调量和平均绝对误差, 对比模型匹配时的超调量和平均绝对误差, 并未出现较大的变化, 说明系统响应过程的平稳性和最终稳态精度未受模型失配太多影响。

比较图 4 中(a)、(b)的 B 区域处, GPC 控制的输出浓度在常值干扰下, 偏差逐渐增大, 经过相当长的时间才开始衰减, 而改进型 GPC 控制能很快地抑制干扰带来的不利影响, 表明该算法具有良好的鲁棒性。

3.2 实验测试分析

为了验证所提算法的实际控制效果, 本研究设计并搭建了燃气加臭过程控制实验平台。

首先, 采用了成都市某燃气公司的燃气加臭站分布式控制系统, 如图 5 所示。该系统主要由加臭机、加臭罐、PLC 西门子 S7-200、差压式流量计、PC 服务器、天然气管网和 THT 在线检测仪组成。其中, PLC 西门子 S7-200 作为控制系统的可编程控制器, 集成了 I/O 功能和控制器功能于一身, 能实时接收燃气流量数据和对加臭剂浓度进行实时的调控, 可与 PC 服务器进行通信, 完成

THT 浓度的监控、管理、数据存储和图表显示和数据分析等功能。差压式流量计为成都航利 KLGF-16C-250-ZLP-1 型一体化孔板流量计, 测量精度为 1.0 级。THT 在线检测仪为中国石油西南油气田燃气分公司科技项目开发的加臭剂浓度检测仪器, 在中国石油西南油气田燃气分公司检定实验室, 按照《加臭机浓度监测仪》CJ/T524-2018 要求完成了不同浓度的标准气体标定实验, 以及响应时间、稳定性、重复性等检定实验, 并与同等标准气体标定后的 INFCON 微型快速气相色谱仪进行了现场对比实验, 该 THT 在线检测仪测量精度为 4.0 级, 重复性小于 2%, 满足燃气环境下 THT 浓度的测量需求。其次, 以距离该燃气加臭站 2 km 的燃气用户终端调压站的专用四氢噻吩监测点作为 THT 在线检测仪的检测点。最后, 以该燃气用户终端调压站处的加臭剂浓度为控制对象进行燃气加臭过程的控制实验。

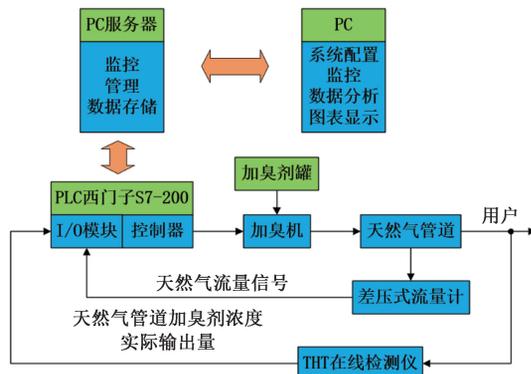


图 5 燃气加臭站分布式控制系统

Fig. 5 Distributed control system of gas odorization station

为了验证所提的改进型 GPC 控制的实际效果, 本研究将传统 GPC 控制进行了对比实验。首先将加臭剂设定浓度设置为 18 mg/m³, 利用 THT 在线检测仪每两分钟采集一次终端用户处的 THT 浓度。如图 6 所示为改进型 GPC 控制实验结果, 表 3 所示为 GPC 控制和改进型 GPC 控制性能指标。

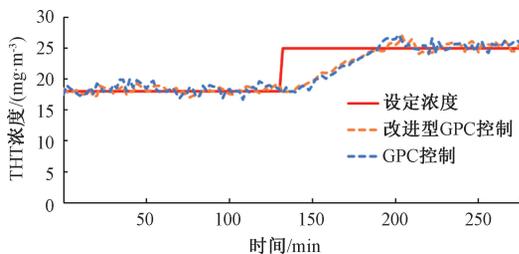


图 6 改进型 GPC 控制实验

Fig. 6 Improved GPC control experiment

从超调量这项指标来看, 工况变化时 GPC 控制的超调量为 8.64%, 改进型 GPC 控制的超调量为 5.81%, 改

表 3 GPC 控制和改进型 GPC 控制性能指标
Table 3 Performance indexes of GPC control and improved GPC control

性能指标	GPC 控制	改进型 GPC 控制
超调量/%	8.64	5.81
稳定时间/min	82	86
稳态误差/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.75	1.56
MAE/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.43	1.23

改进型 GPC 控制的平稳性更好。从平均绝对误差和稳态误差这两项指标来看,在工况变化时,GPC 控制的稳态误差为 1.75 mg/m^3 ,平均绝对误差为 1.43 mg/m^3 ,改进型 GPC 控制的稳态误差为 1.56 mg/m^3 ,平均绝对误差为 1.23 mg/m^3 ,改进型 GPC 控制具备了更好的稳态精度,能够更好地跟踪加臭站 THT 设定值的变化,与先前的理论分析和仿真测试结果相一致。与仿真数据相比,实际运行数据的超调量和稳定时间较大,其中 GPC 控制的稳定时间为 82 min,改进型 GPC 控制的稳定时间为 86 min,这是因为实验验证过程中的燃气流量突变幅度较大和外界条件相对复杂,导致燃气中加臭剂浓度波动幅度也较大,从而导致燃气终端用户处的加臭剂浓度达到稳定状态的时间较长。实际运行数据的平均绝对误差较大,其中 GPC 控制的平均绝对误差为 1.43 mg/m^3 ,改进型 GPC 控制的平均绝对误差为 1.23 mg/m^3 ,这是因为实际运行过程中的燃气流量和工况是不断变化的,处于模型失配和外部干扰下的燃气加臭过程控制要更加复杂,终端用户处的加臭剂浓度变化更大。

4 结 论

本文以距离成都市某燃气公司燃气加臭站 2 km 的燃气用户终端调压站处的加臭剂浓度为控制对象,通过对燃气加臭过程特征的分析,对燃气加臭过程辨识建模、燃气加臭控制算法和实验验证进行研究,得出如下结论:

基于开环阶跃响应的最小二乘法辨识建立起燃气加臭过程的动态响应,为了满足计算机控制的要求,对其进行了离散化,得到了较为准确的 CARIMA 模型,为 GPC 算法的实现创造了条件。

针对传统 GPC 控制在燃气加臭过程控制中的局限性,提出了一种改进型 GPC 控制算法,基于 CARIMA 模型的预测值和实际系统的输出值滚动优化控制量,实现燃气加臭过程的精准控制。相较于常规的燃气流量比例开环控制,改进型 GPC 控制能将终端用户处的加臭剂浓度稳定在设定值附近,稳态误差小于 2 mg/m^3 ,工况变化时超调量小于 10%,平均绝对误差小于 1.5 mg/m^3 ,具有更好的稳态精度和鲁棒性能,可以满足燃气加臭过程精准控制需要,能够有效提高燃气加臭应对燃气流量变化

和过程工况变化的能力。

该算法可实时在线精准控制燃气终端用户的加臭剂浓度,同时根据燃气终端用户处的检测浓度实时修正设定值,既保证燃气加臭过程的实时性和安全性,也可以节约加臭剂资源,保护环境。

参考文献

- [1] ZANCHETTIN C, ALMEIDA L M, DE MENEZES F D. An intelligent monitoring system for natural gas odorization[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1): 425-433.
- [2] 张梅,张双双,袁宏永,等.燃气管道泄漏的次声源定位算法研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(3):187-194.
ZHANG M, ZHANG SH SH, YUAN H Y, et al. Research on infrasound source location algorithm of gas pipeline leakage[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 187-194.
- [3] TUKMAKOV A L, MUBARAKSHIN B R, TONKONOG V G. Simulation of the process of odorizing a natural gas[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2016, 89(1): 135-140.
- [4] GROSS R, FONTANA E, SILVA A, et al. Dispersion of odorants in natural gas distribution networks[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54(9): 2827-2834.
- [5] DEYMI-DASHTEBAYAZ M, NAZERI BOORI ABADI R, MEHDIAN DEHKORDI M, et al. Experimental and numerical investigation of odorant dispersion in natural-gas pipelines[J]. The European Physical Journal Plus, 2019, 134(6): 294.
- [6] 李阳.防爆型智能化燃气加臭机控制器开发[D].成都:西南交通大学,2014.
LI Y. Development of an explosion-proof intelligent controller of gas odorizer [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [7] 吴蒙,于新红,汪凤翔,等. CLLLC 谐振式变换器的广义预测控制[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(11):90-96.
WU M, YU X H, WANG F X, et al. Generalized predictive control of CLLLC resonant converter [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(11): 90-96.
- [8] 刘颖明,王树旗,王晓东.基于广义预测控制的风电场调频控制策略研究[J].太阳能学报,2022,43(3):405-410.
LIU Y M, WANG SH Q, WANG X D. Secondary frequency regulation control of wind farm based on generalized predictive control[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(3): 405-410.
- [9] 陈增强,李毅,孙明玮,等.四旋翼无人飞行器

- ADRC-GPC 控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 176-180,188.
- CHEN Z Q, LI Y, SUN M W, et al. ADRC-GPC control of a quad-rotor unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 176-180,188.
- [10] 黄子昭, 张涛, 赵冰洁, 等. 基于改进广义预测控制的 PMSM 速度控制[J]. 微电机, 2021, 54(8): 74-79.
- HUANG Z ZH, ZHANG T, ZHAO B J, et al. PMSM speed control based on improved generalized predictive control[J]. Micromotors, 2021, 54(8): 74-79.
- [11] LU S, SHI J ZH. Novel generalized predictive iterative learning speed controller for ultrasonic motors[J]. IEEE Access, 2020, 8: 29344-29353.
- [12] SUN G, CHEN J, YONG Y, et al. Generalized predictive control of spacecraft attitude with adaptive predictive period[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2022, 36(3): 596-606.
- [13] BOWTHORPE M, GARCIA A A, TAVAKOLI M. GPC-based teleoperation for delay compensation and disturbance rejection in image-guided beating-heart surgery[C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: IEEE, 2014: 4875-4880.
- [14] 李轩. 基于改进型广义预测控制算法的汽温控制系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- LI X. Research on steam temperature control system based on improved generalized predictive control algorithm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [15] 王育银. 磁悬浮系统的隐式广义预测控制器设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- WANG Y Y. Design of the implicit general predictive controller for the maglev system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [16] 张壤文, 田学民, 王平. 基于局部最小二乘支持向量的潜空间广义预测控制器[J]. 石油化工自动化, 2017, 53(2): 20-26,37.
- ZHANG R W, TIAN X M, WANG P. A generalized predictive controller based on local least squares support vector machines in latent space[J]. Automation In Petro-Chemical Industry, 2017, 53(2): 20-26,37.
- [17] 徐健, 刘梦雄, 陈光佳, 等. 面向阵型保持的 UUV 集群绿色动态控位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 129-139.
- XU J, LIU M X, CHENG G J, et al. Research on green dynamic positioning of UUV for formation maintenance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 129-139.
- [18] KRID M, BENAMAR F, LENAIN R. A new explicit dynamic path tracking controller using generalized predictive control[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2017, 15(1): 303-314.
- [19] 徐征. 控制系统模型辨识方法的研究及应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- XU ZH. Control system identification methods research and application[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [20] 薛生辉, 曲俊海, 王永宏, 等. 比例-积分控制加广义预测控制算法及其应用[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1320-1330.
- XUE SH H, QU J H, WANG Y H, et al. Proportional-integral control plus generalized predictive control algorithm and its application[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(9): 1320-1330.
- [21] 王爽心, 贺飞, 刘如九, 等. 基于间接能量平衡的锅炉汽温 GPC-PID 串级控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9): 9-16.
- WANG SH X, HE F, LIU R J, et al. GPC-PID cascade control strategy based on indirect energy balance method for boiler steam temperature system[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(9): 9-16.
- [22] CHENG Y, DAI L Y, LI A, et al. Active disturbance rejection generalized predictive control of a quadrotor UAV via quantitative feedback theory[J]. IEEE Access, 2022, 10: 37912-37923.
- [23] CHEN ZH, CUI J L, LEI ZH ZH, et al. Design of an improved implicit generalized predictive controller for temperature control systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 13924-13936.

作者简介



葛亮(通信作者), 2007 年于西南石油大学获得学士学位, 2010 年于西南石油大学获得硕士学位, 2017 年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学教授, 主要研究方向为复杂环境下的检测技术研究。

E-mail: cgroad@163.com

Ge Liang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2007, received his M. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2010, and received his Ph. D. degree from Sichuan University in 2017. He is currently a professor at Southwest Petroleum University. His main research interest includes the detection technology research in complex environment.



廖聪冲, 2019 年于西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为燃气检测与安全控制。

E-mail: 18482164211@163.com

Liao Congchong received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. His main research interest includes gas detection and safety control.



肖启强, 1996 年于西安石油学院获得学士学位, 现为西南油气田燃气分公司高级工程师, 主要研究方向为智慧燃气。

E-mail: xiaoqq@petrochina.com.cn

Xiao Qiqiang received his B. Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 1996. He is currently a senior engineer at Southwest Oil & Gasfield Gas Branch. His main research interest includes smart gas.



卓勇, 现为西南油气田燃气分公司高级工程师, 主要研究方向为燃气安全技术及天然气流量计量。

E-mail: xsgszhy@petrochina.com.cn

Zhuo Yong is currently a senior engineer at Southwest Oil & Gasfield Gas Branch. His main research interests include gas safety technology and natural gas flow metering.



罗明, 2019 年于西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为燃气检测与安全控制。

E-mail: 605547272@qq.com

Luo Ming received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. His main research interest includes gas detection and safety control.