

引文: 葛亮, 李朋, 王飞, 等. 天然气加臭剂加注技术现状及展望[J]. 天然气工业, 2025, 45(5): 162-173.

GE Liang, LI Peng, WANG Fei, et al. Status and prospect of natural gas odorant injection technologies[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(5): 162-173.

天然气加臭剂加注技术现状及展望

葛亮¹ 李朋¹ 王飞² 钱浩² 卓勇² 廖聪冲¹

1. 西南石油大学 2. 中国石油西南油气田公司

摘要: 天然气具有无色无味、可燃易爆的特性, 一般情况下泄漏时难以被及时察觉, 严重威胁了燃气管道系统的安全运行, 加臭剂加注技术通过赋予天然气警示性气味成为保障输配安全的核心环节。为此, 系统梳理了城市天然气加臭剂加注技术发展现状, 聚焦分析了新兴天然气加臭剂加注技术的原理、特征和应用情况, 最后展望了未来天然气加臭技术的发展方向。研究结果表明: ①现有天然气加臭剂加注技术由于加注方式落后的缘故, 燃气加臭易发生末端浓度不达标的情况; ②在现有天然气加臭剂加注方式基础上, 新型天然气加臭剂加注技术通过优化加臭剂加注方式确保了加臭剂与燃气容易混合; ③伴随着物联网、大数据和人工智能等技术的发展, 新型天然气加臭剂加注技术可确保天然气加臭效果达标。结论认为: ①未来天然气加臭剂加注技术将朝着精准、自动化以及环保的方向发展, 并与自动控制、物联网、大数据、人工智能等新兴技术深度融合, 为天然气行业高质量发展提供有力支撑。②相关企业应综合权衡技术特点, 选择适宜方案; 科研机构应加强研发和前瞻布局, 推动天然气加臭剂加注技术的创新突破和产业化应用, 确保城市燃气系统的安全高效运行。

关键词: 天然气; 加臭剂加注技术; 常规加臭技术; 新型加臭技术; 现状及展望; 发展建议

中图分类号: TU990.3

文献标识码: A

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.05.014

Status and prospect of natural gas odorant injection technologies

GE Liang¹, LI Peng¹, WANG Fei², QIAN Hao², ZHUO Yong², LIAO Congchong¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Natural Gas Industry, Vol.45, No.5, p.162-173, 5/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Natural gas, with colorless, odorless, flammable and explosive properties, can be hardly detected in time in the case of leakage, which seriously threatens the safe operation of gas pipeline systems. The odorant injection technology serves as the core link to ensure safe transportation and distribution by imparting a warning odor to natural gas. In this paper, the development status of city gas odorant injection technologies is systematically reviewed, the principles, characteristics and applications of emerging natural gas odorant injection technologies are mainly analyzed, and the development direction of natural gas odorization technologies are predicted. The following results are obtained. First, due to outdated injection methods, the existing natural gas odorant injection technology is prone to result in substandard end concentration of gas odorant. Second, the new natural gas odorant injection technology ensures easy mixing of odorant with gas by optimizing the odorant injection method of the existing natural gas odorant injection method. Third, with the development of technologies such as Internet of Things, big data and artificial intelligence, the new natural gas odorant injection technology can ensure that the effect of natural gas odorization meets the standard. In conclusion, the future natural gas odorant injection technology will develop towards precision, automation and environmental protection, and will be deeply integrated with emerging technologies such as automatic control, Internet of Things, big data and artificial intelligence, to provide a strong support for the high-quality development of the natural gas industry. Moreover, relevant enterprises should comprehensively weigh the technical characteristics and select appropriate solutions, and research institutions should strengthen research & development and forward-looking layout, and promote innovative breakthroughs and industrial applications of natural gas odorant injection technologies, so as to ensure the safe and efficient operation of urban gas systems.

Keywords: Natural gas; Odorant injection technology; Conventional odorization technology; New odorization technology; Status and prospect; Development suggestion

基金项目: 四川省科技计划项目“高端工程无损检测智能装备研发及产业化应用”(编号: 2023ZHCG0020)、四川省国际港澳台科技创新合作项目“埋地 PE 管道声学反射智能定位装置开发”(编号: 2025YFHZ0218/25GJHZ0475)、西南石油大学自然科学“启航计划”项目“基于探地雷达的埋地 PE 管道探测机理研究”(编号: 2023QHZ003)。

作者简介: 葛亮, 1985 年生, 教授, 博士研究生导师; 主要从事燃气安全检测与控制等领域的教学与科研工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道 8 号。ORCID: 0000-0003-4549-6946。E-mail: cgroad@163.com

0 引言

随着中国经济社会的快速发展和城镇化进程的不断推进,天然气已成为优化能源结构、控制大气污染、推动绿色低碳发展的战略性选择^[1-2]。为保障天然气的安全供应和使用,加臭是一项不可或缺的关键环节^[3-4]。天然气无色无味,具有易燃易爆的特性,通过向天然气中添加具有特殊气味的加臭剂,可以在天然气泄漏初期发出警示,为及时处置争取宝贵的时间^[4-6]。

天然气加臭剂加注技术经过几十年的发展,已经形成了包括鼓泡自吸收式加臭、差压式加臭、静压自滴式加臭、仪表传动泵式加臭、电子式开环加臭等多种工艺路线,在不同应用场合发挥着重要作用^[6-8]。但随着天然气管网规模扩大、复杂度提升,用户对供气安全性、可靠性、智能化的要求不断提高,传统加臭方式在精度控制、均匀性、系统鲁棒性及安全环保等方面逐渐暴露出不足,亟需创新突破^[9-11]。

本文旨在系统梳理天然气加臭剂加注技术的发展脉络与最新进展,通过文献分析与市场调研相结合的方法,重点解析补充加臭、闭环控制加臭、大数据加臭、串入式加臭及多点加臭等新兴技术的基本原理、关键特征及实际应用。从能源安全、节能减排、数字化转型等维度出发,对比分析不同技术的优劣势,探讨其在提升天然气泄漏预警能力、优化管网运营效率、支撑行业智慧化转型中的潜在价值。同时,结合行业发展需求,总结当前技术研究现状与未来创新方向,提出技术升级与产业应用的实践路径,以期为天然气企业技术优化与科研机构前瞻布局提供参考依据。

1 常规加臭剂加注技术

现行《城镇燃气加臭技术规程: CJJ/T 148—2010》^[12]联合《城镇燃气设计规范: GB 50028—2006 (2020 版)》^[13]及《城镇燃气技术规范: GB 50494—2009》^[14]构建了完整的城镇燃气加臭技术体系。3套规范分别从加臭系统设计、安全监测和运行维护3个维度提出要求,其中核心内容包括:①加臭装置应设置在调压设施下游,多气源或复杂管网需增设加臭点保障覆盖率;系统需配置精度不低于 $\pm 1\%$ 的流量计实现动态调节,维持加臭剂浓度在 $8 \sim 20 \text{ mg/m}^3$;关键设备需满足1.5倍系统最大工作压力的承压标准,并配置超

压保护装置,在异常工况下自动切断加臭功能。②建立实时监控机制,对加臭剂储量、泵压状态和流量数据等关键运行参数实施连续监测,同时制定定期维保规程,确保系统长期可靠运行。通过严格的技术管控,实现燃气泄漏时气味警示浓度(爆炸下限20%)的有效识别,全面提升供气系统的本质安全水平。

1.1 鼓泡自吸收式加臭剂加注技术

鼓泡自吸收式加臭剂加注技术是利用天然气流动产生的负压将天然气通入到加臭剂储液罐中,使天然气与加臭剂充分混合后再返回天然气管道实现对天然气的加臭^[18-19]。鼓泡自吸收法加臭剂加注原理如图1所示。该技术适用于天然气流量相对稳定且没有外部动力供应的情况^[19]。其显著缺点有:①管道内天然气的流量、温度和压力对加臭量的影响较大,难以精准控制加臭浓度;②需要确保系统完全封闭,防止加臭剂泄漏,这可能增加系统的复杂性和成本。但该加臭剂加注设备结构简单且不用外接电源,极大地简化了操作和维护^[20-21]。鼓泡自吸收式加臭剂加注技术可作为其他加臭剂加注的备用方案,在主加臭系统出现故障时提供应急加臭,保障天然气的安全供应^[22];另一方面,在复杂环境加臭应用场景中,该技术可与其他加臭方法(如泵式加臭)配套使用形成多重保障,提高加臭的可靠性^[23-24]。

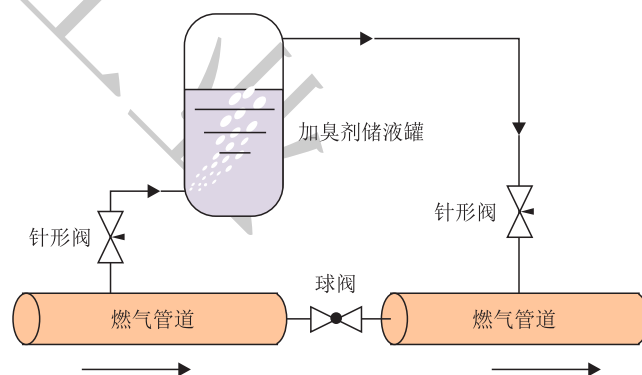


图1 鼓泡自吸收式加臭剂加注原理图

1.2 静压自滴式加臭剂加注技术

静压自滴式加臭剂加注技术是最原始的加臭剂加注技术,通过针形阀控制加臭量,利用加臭剂储液罐中的静压将加臭剂注入天然气管道中,实现天然气加臭^[25]。这种天然气加臭设备无外接电源、结构简单、系统依赖性小,这使得机械故障发生的可能性较小^[26]。其缺点是不适合大规模或高精度要求的应用场景,加臭量容易受到管道中天然气流量、温

度和压力等变化的影响^[27]。静压自滴式加臭剂加注原理与实物图如图 2 所示。与其他更高级的加臭剂加注技术相比,静压自滴式加臭剂加注技术在精度控制和灵活性调节方面有一定的局限性,但其低成本和操作简便性使其在特定领域仍有一席之地。由于结构简单和操作方便,该技术可应用于对技术要求不高的小规模天然气加臭系统,如城镇天然气供应或小型工业用气系统^[28-29]。

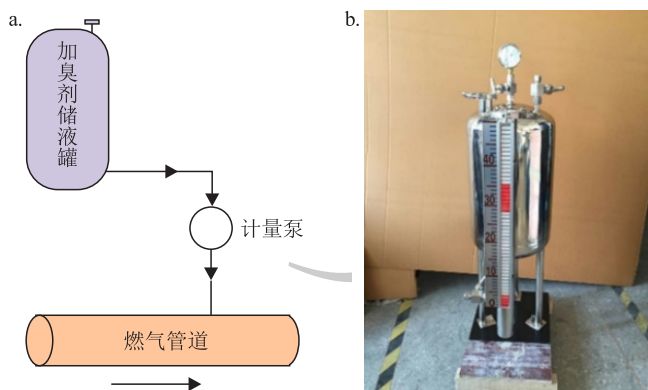


图 2 静压自滴式加臭剂加注原理与装置实物图

1.3 差压式加臭剂加注技术

差压式加臭剂加注技术是依靠装置前后的压力差,通过控制差压阀调整进入到天然气管道中的加臭量实现加臭^[30-34]。该技术系统响应应快、加臭效率高、无需外接电源且安全可靠,但较为显著的缺点是天然气管道内的天然气流量、压力和温度的变化对加臭量的影响较大,无法精准控制加臭量,需要定期维护和校准,以保持其准确性和可靠性^[35]。差压式加臭剂加注原理与实物图如图 3 所示。该技术具有结构简单、维护方便、节能环保等优点。与传统的泵式加臭技术相比,差压式加臭技术无需外部动力,能耗和维护成本低^[36-37]。在压差和流量相对稳定的情况下,该技术能够提供可靠的加臭效果,同时降低运营成本。对于电力供应和技术支持受限的地区宜采用差压式加臭剂加注技术^[38]。

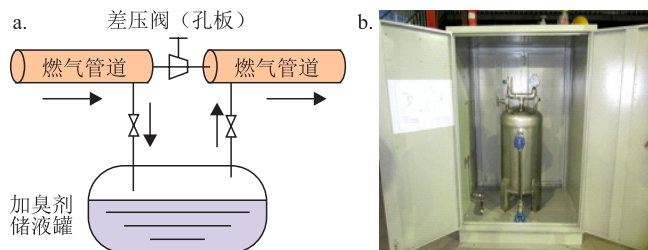


图 3 差压式加臭剂加注原理与装置实物图

1.4 仪表传动泵式加臭剂加注技术

仪表传动泵加臭剂加注技术(又称为气动隔膜泵加臭系统)是利用安装在天然气管道上的仪表传动泵进行加臭^[39-43]。该技术主要利用压缩空气(仪表空气)来驱动隔膜泵,从而实现加臭剂的精确注入^[44-45],是一种高度自动化的天然气加臭技术。隔膜泵通过压缩空气的动力,吸取储存于专用储罐中的加臭剂,并通过流量控制器精确控制注入量以匹配不同的天然气流量。这种技术的优点是精确度和可控性高,特别适用于大流量和高复杂性的天然气输送系统,但需要定期维护泵和相关的控制系统,以保证稳定运行^[46-48]。仪表传动泵式加臭剂加注原理与实物图如图 4 所示。随着天然气行业的不断发展,对加臭精度、可靠性、智能化的要求也在不断提高。仪表传动泵式加臭剂加注技术有望与物联网、大数据等新技术深度融合,进一步提升加臭过程的智能化水平和管理效率^[49-52]。

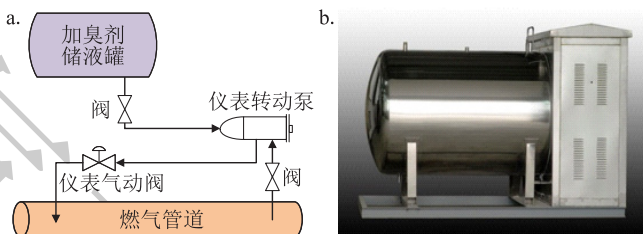


图 4 仪表传动泵式加臭剂加注原理与装置实物图

1.5 电子式开环加臭剂加注技术

电子式开环加臭剂加注技术是一种利用电子控制系统精确注入加臭剂到天然气中的方法。与传统加臭剂加注技术相比,电子式开环加臭剂加注更加精确和可控,适用于对加臭剂注入量有严格要求的现代天然气输送和分配系统^[53-55]。电子式开环加臭剂加注原理与实物图如图 5 所示,通过对控制器写入自动控制程序,由控制器对燃气加臭计量泵进行控制,根据设定燃气流量值或根据管道燃气流量信号控制计量泵,输出一定量的加臭剂。控制系统是电子式开环加臭技术的核心,通过接收流量计测得的天然气流量,根据预设的加臭浓度,精确计算所需的加臭剂注入量并控制计量泵^[56-58]。高精度的计量泵(如电子计量泵或微流量计量泵)在控制系统的指令下,将加臭剂精确注入天然气管道,实现高精度加臭控制。与其他常规加臭剂加注相比,尽管该技术存在设备成本高、维护要求高等问题。但随着智能化水平的提升、无线通信技术的应用、模块化设计的推

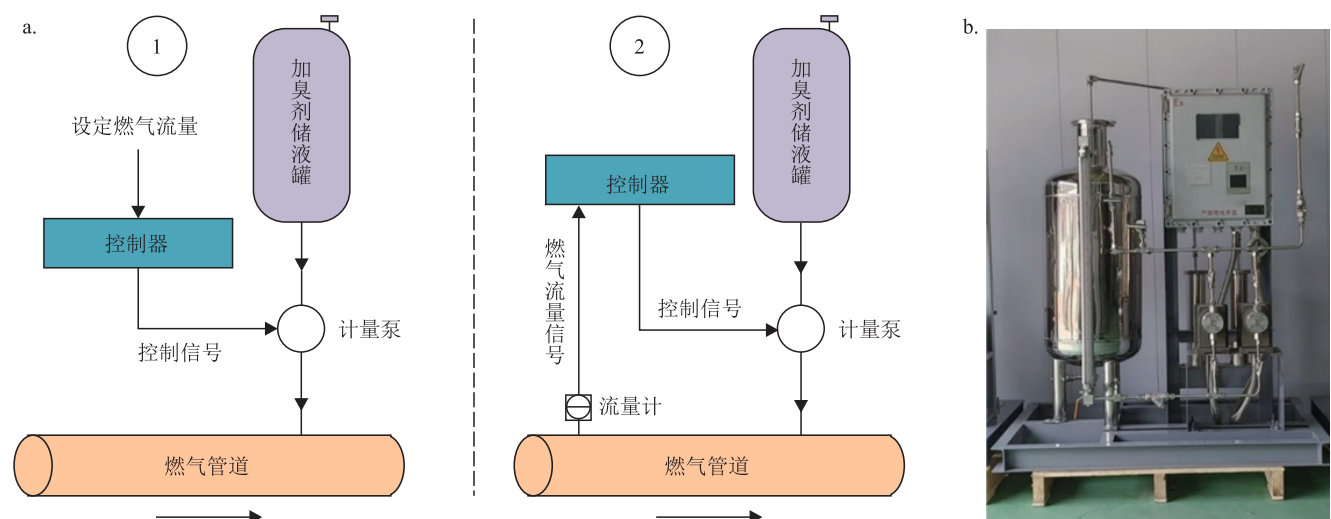


图 5 电子式开环加臭剂加注原理与装置实物图

进以及新型传感器的研发，加之与物联网、人工智能等新技术的深度融合，电子式开环加臭剂加注技术有望在未来得到更广泛的应用。

天然气加臭剂加注是确保天然气安全使用的关键环节，不同类型常规天然气加臭设备的性能对比如表 1 所示。目前，仪表传动泵式和电子式开环加臭技术因其高精度和自动化特性，在现代工业和城市输配系统中得到越来越广泛的应用。这些技术能够更准确地控制加臭剂量，确保在不同工况下维持稳定的加臭浓度，从而提高系统的安全性和可靠性。相反，鼓泡自吸式、静压自滴式和差压式加臭技术由于控制精度不足以及受流量、压力变化影响较大，

逐渐在常规应用中被淘汰，仅在偏远地区的小型管网、应急加臭以及对精度要求不高的小型工业用户等特定场合中使用。这一趋势表明，天然气加臭技术正朝着高精度和智能化的方向发展。因此，在选择加臭剂加注技术时，需要综合考虑加臭精度、自动化程度、适用范围、设备成本、维护需求等因素，权衡各种技术的特点，以确定最合适的方案。

综上所述，天然气加臭系统的优化设计与科学管理对于提升天然气供应的安全水平具有重要意义。随着技术的进步和行业标准的不断完善，未来天然气加臭技术将进一步向智能化、高精度方向发展，为天然气的安全输送提供更加可靠的技术保障。

表 1 不同类型常规天然气加臭剂加注设备性能对比表

性能指标	鼓泡自吸式	差压式	静压自滴式	仪表传动泵式	电子式
加臭精度	低	中	中	高	很高
适用气量范围	小	中	小	中一大	小一大
适用压力范围	低	中	低	中一高	低一高
响应速度	慢	中	慢	快	很快
自动化程度	低	中	低	高	很高
维护需求	高	中	高	中	低
能耗	低	中	低	中	低
设备成本	低	中	低	中一高	高
加臭稳定性	低	中	中	高	很高
安装要求	简单	中等	简单	复杂	中等
远程监控能力	无	有	无	有	有
数据管理功能	无	一般	无	良好	优秀

2 新型加臭剂加注技术

2.1 串入式加臭剂加注技术

串入式加臭剂加注技术,其核心原理是将加臭装置串联在天然气管道中,利用天然气的流动带动加臭剂的持续、均匀注入。与传统的旁路加臭方式不同,串入式加臭不需要专门的旁路管道和喷射装置,而是通过内置于天然气管道的加臭单元实现加臭剂添加。串入式加臭剂加注是利用天然气流经加臭机主体结构时,带动加臭机主体结构内部的涡轮腔体旋转^[59],在传感器中测得涡轮转速后经控制器计算出天然气流量,根据天然气流量计算出加臭量,然后加臭剂量泵将加臭剂注进加臭机主体结构内部涡轮腔体中,

最后加臭剂经涡轮腔体叶片上的加臭孔注入到天然气管道中与天然气均匀混合。

廖聪冲^[60]设计了一种串入式均匀加臭装置(图6),在自贡市某配气站通过现场实验,验证了该装置的可行性。串入式加臭剂加注装置具有如下优点^[61]:①加臭量自适应。可根据天然气实时流量,自动调节加臭剂注入量,确保在不同用气工况下臭味浓度恒定在合适水平,从而避免欠臭或过臭问题。②设备简单紧凑。加臭单元体积小巧,可灵活置于管道内,不需要复杂的外置设施,大大简化了加臭站的建设和运维。③密闭性好。加臭剂储罐与天然气管道密闭连通,显著降低了加臭剂泄漏的风险,提高了加臭作业的安全水平。

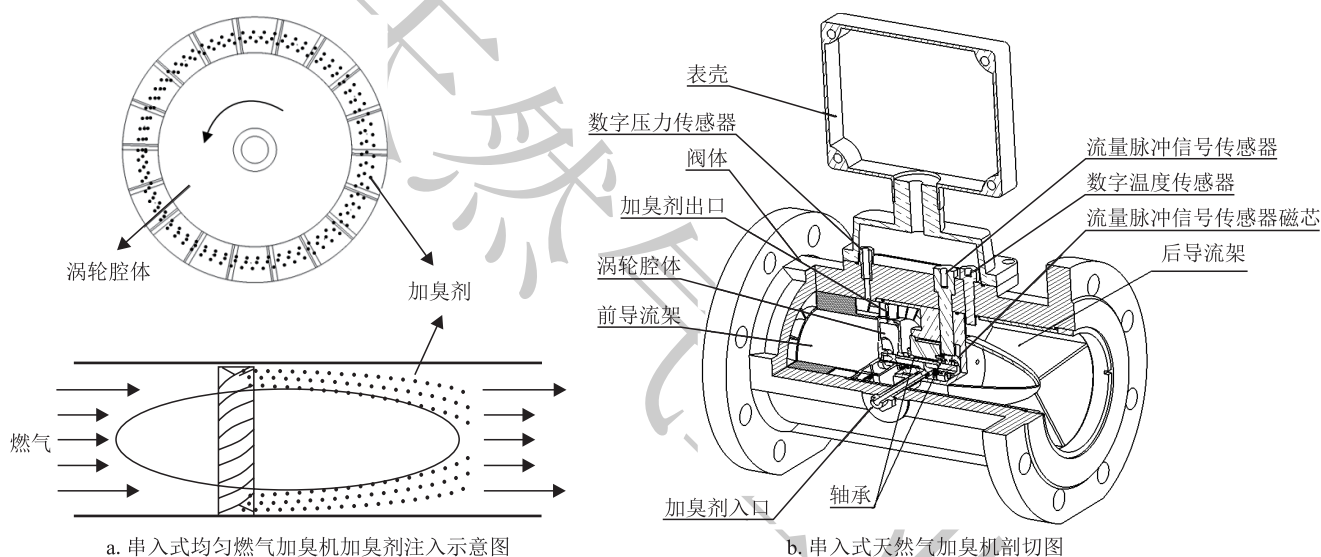


图6 串入式均匀加臭机原理结构图

总的来看,串入式加臭技术的应用已成为天然气加臭领域的发展方向之一,凭借流量自适应、设备紧凑、加臭均匀等优势,有望在中小型天然气管网领域得到更广泛应用,成为提升天然气安全管理水平的新手段。但该技术的推广仍面临适用性论证、加臭剂选型、配套标准缺失等挑战,还需在加注机理、工艺优化、材料改进、标准规范等方面开展深入研究,促进该技术成熟和规模化应用。

2.2 加臭剂补充加注技术

末端加臭剂补充加注技术是一种在城市天然气管网系统末端进行加臭剂补充的安全保障技术。其基本原理是在天然气管网的末端用户区域,当加臭剂浓度降至规定值(通常为 8 mg/m^3)以下时,通过在末端管道上安装补充加臭装置,向管道内注入一定

量的加臭剂,以维持末端用户处天然气的加臭浓度,确保在发生泄漏能及时被用户察觉,避免安全事故发生^[62-63]。末端补充加臭剂加注具有如下优点:①可避免因一味提高首端加臭浓度而提高经济成本。②可克服因管道长度、材质等因素导致的加臭剂衰减问题,确保末端用户处的加臭浓度符合规范要求。

葛亮等^[64-66]设计了一种天然气补充加臭方法及其微型加臭装置,通过加臭装置对天然气管网末端进行补充加臭,精确控制天然气管网末端加臭剂浓度,实现进户天然气加臭剂浓度达标。加臭剂补充加注原理如图7所示,加臭剂补充加注装置接收到加臭站加臭机返回数据后,通过单位时间内天然气管网末端天然气流量确定需要补充的加臭量,对天然气管网末端进行补充加臭。补充加臭量计算如下:

$$u_{0,t} = (c - c_0) \times q_0 \quad (1)$$

式中 $u_{0,t}$ 表示补充的加臭量, mg ; c 表示加臭剂浓度设定值, mg/m^3 ; c_0 表示加臭剂浓度检测装置检测的浓度值, mg/m^3 ; q_0 表示流量计检测流量值, m^3/s 。

微型加臭装置单位时间内向天然气管网末端补充加臭剂频次计算如下:

$$R_t = \frac{u_{0,t}}{K_t} \quad (2)$$

式中 R_t 表示加臭装置中加注泵的工作频次, 次/min; K_t 表示加臭装置中加注泵的单次注入量, mg 。

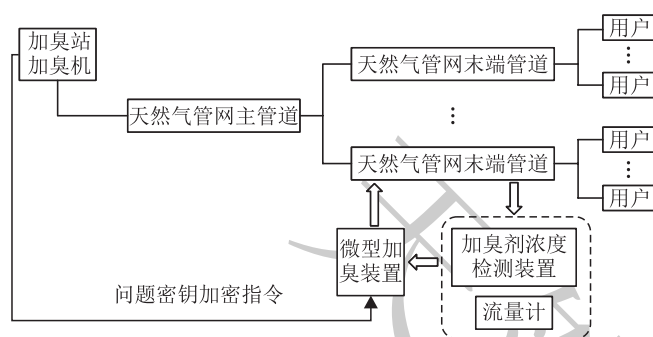


图7 天然气补充加臭方法原理示意图

末端补充加臭剂加注技术通过在天然气输送系统的末端或分支节点实施额外的加臭处理, 即使在长距离输送后加臭剂浓度下降, 仍能确保用户端天然气臭味足够以便于及时发现天然气泄漏^[65-66]。此技术的主要优点有系统安全、适应性强和操作自动化, 但也面临着成本高、技术维护需求高和系统复杂的挑战。尽管如此, 随着技术的持续发展和成本效益的改善, 预计未来其应用将更加普及。

2.3 加臭剂多点加注技术

加臭剂多点加注技术的核心原理是在管网中的多个位置同时进行加臭, 通过协同控制各加臭点的加臭量, 实现整个管网加臭剂浓度的优化调节。与传统的单一加臭方式相比, 多点加注可以更好地满足大型复杂管网的需求, 提高加臭效率和可靠性。补充加臭剂加注技术原理如图8所示, 其特点如下: ①加臭点布局优化。根据管网规模、结构、用户分布等特征, 选择在干支线交汇处、压力控制点、用户聚集区等多个关键节点布设加臭装置, 形成多点加臭网络。布点时综合考虑各控制区的用气平衡、峰谷特性差异以及互备切换、应急调配需求。②分区域浓度控制。每个加臭点配备在线浓度检测和控制装置, 根据所在区域的用气特点, 制定差异化的加臭浓度目标值。当检测到浓度偏离目标值时, 控制系统自动调节该区域加臭装置的加臭量, 实现区域内的恒浓度控制。

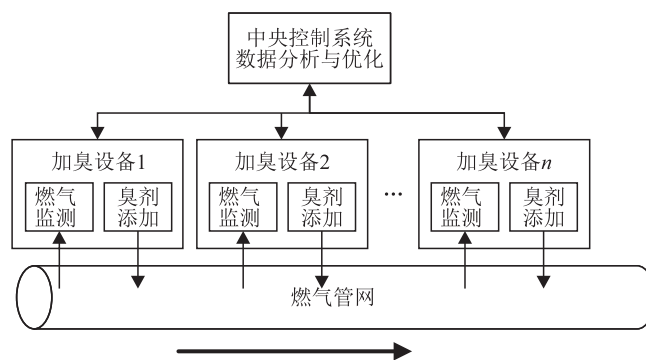


图8 多点加臭剂加注技术原理流程图

③多点协同优化。优化各加臭点的实时运行数据, 评估网络整体的加臭水平, 并结合管网模型、需求预测模型等, 计算得到多个控制区的协同优化方案, 在确保终端用户感知浓度的同时, 最小化加臭总量, 实现臭味均匀性与经济性的平衡。

郎满囤等^[67]通过仿真数据结合克里金插值法计算得到管网等压力点是最佳多点加臭点。通过找到燃气管网过渡区域中的等压点所在管网坐标, 再根据等压点处的臭剂浓度调节天然气管网内的加臭比例, 解决管网终端用户加臭量超标或不足的问题。Deymi等^[68]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, 以获得局部加臭剂注入的最佳点, 并以实验验证了多点加臭的可行性。该实验在输气管道起始和1500 m处分别喷注总浓度的25%和50%的加臭剂, 如图9和表2所示。由表2可知, 单点加臭剂注入方式末端加臭剂浓度为 $24.0 \text{ mg}/\text{m}^3$, 加臭剂总量为 $89.7 \text{ mg}/\text{m}^3$; 而两点加臭注入方式末端加臭剂浓度为 $16.0 \text{ mg}/\text{m}^3$, 加臭剂总量为 $67.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。两种加臭剂注入方式均能确保末端加臭剂浓度合格, 但两点加臭剂注入方式的加臭量更少。由图9结合表2数据可知, 两点加臭剂注入方式能够有效克服长距离带来的加臭剂浓度衰减问题, 用更少量的加臭剂确保末端浓度合格。多点加臭注入在节省加臭剂的同时, 可以使管道末端的加臭剂浓度达标。确定管道上的最佳加臭点对于多点加臭剂加注至关重要, 通过数值模拟, 笔者提出了天然气流速、气味剂初始浓度和管道长度与气味剂最终浓度的数学关系, 如下式所示:

$$c_f = c_m - c_{in} \times Y \quad (3)$$

$$Y = \frac{a + b \times X_1 + c \times X_2}{1 + d \times X_1 + e \times X_2} \quad (4)$$

式中 c_f 表示管道末端气味剂的最终浓度, mg/m^3 ; c_{in} 表示管道末端气味剂的初始浓度, mg/m^3 ; Y 表示气味浓度的变化函数; X_1 表示管道长度, m ; X_2 表示气体速度, m/s ; $a=0.904$ 、 $b=0.023$ 、 $c=0.518$ 、 $d=0.026$ 、 $e=2.812$ 。使用上述方程估算的加臭剂浓度平均误差约为 3%。

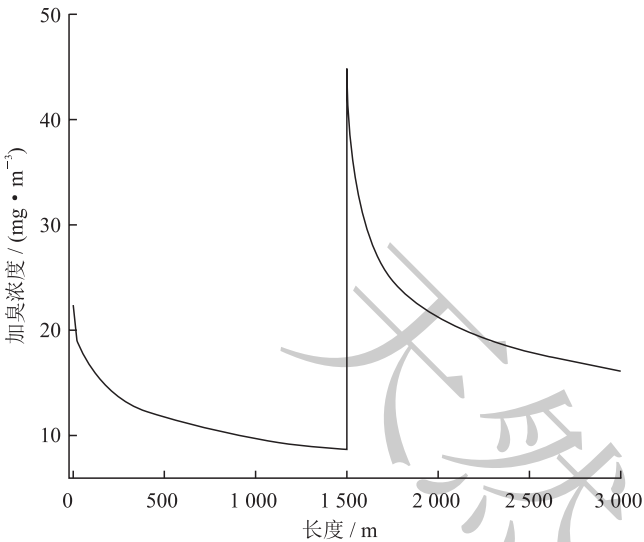


图 9 浓度 25% 和 50% 的加臭剂局部多点加臭结果图

表 2 单点加注与两点加注的对比表

加臭剂注入方式	各部位加臭剂浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	加臭剂总量 / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	末端加臭剂浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
单点	89.7	89.7	24.0
两点	22.4 44.8	67.2	16.0

多点加臭技术突破了传统加臭模式的“集中式投加,被动式运行”的瓶颈,实现了“分布式投加、主动式优化”的新范式,具有投加精准、臭味均衡、智能协同、抗风险能力强等优势。但在工程实践中该技术存在建设成本高、统筹协调难度大、管网模型有待完善等问题。随着物联网、大数据、人工智能等技术向天然气行业加速渗透,多点加臭剂加注的性能还将持续提升,有望成为智慧天然气时代主流加臭策略。

2.4 基于闭环控制的加臭剂加注技术

基于闭环控制的加臭剂加注技术是在传统开环加臭控制的基础上,引入检测机制和反馈校正机制,实时监测和自动调整加臭剂的注入量,确保其与天然气的流量、加臭剂浓度相匹配,实现加臭过程的自动优化闭环控制,确保天然气在输送过程中具有

合适的加臭剂浓度^[69-72]。闭环控制加臭剂加注原理如图 10 所示。主要包括 3 个部分:传感器、控制器和执行器。首先,传感器负责收集天然气流量、加臭剂浓度等关键参数的实时数据。这些数据随后被送往中央控制器,控制器内部的算法(如广义预测控制、模糊神经网络等)根据预设的安全标准和当前操作条件计算出理想的加臭剂注入量。然后,执行器按照控制器的指令自动调节加臭剂的注入泵或阀门,确保加臭剂的实际注入量与计算值相匹配。整个过程在一个闭环系统中进行,对系统进行持续监测和调整以应对输入数据或环境条件的变化,保证加臭效果始终符合安全标准。这种闭环控制策略提高了天然气系统的安全性和操作效率。

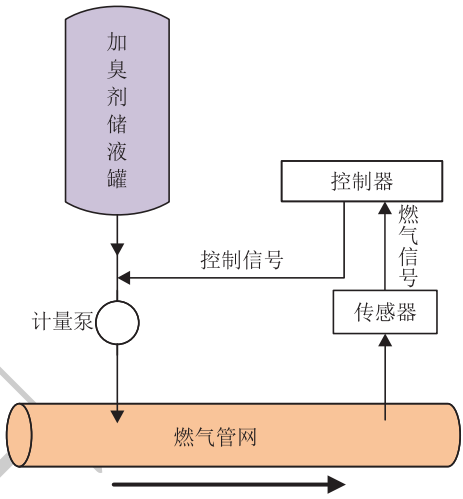


图 10 基于闭环控制的加臭剂加注技术原理简图

葛亮等^[69]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试验验证了该闭环控制算法的可行性。闭环加臭原理如图 11 所示,

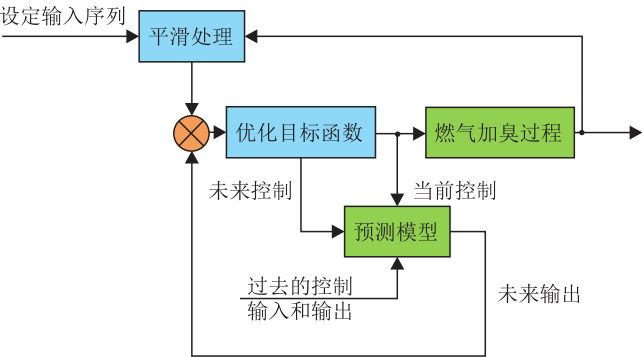


图 11 基于改进型广义预测控制的闭环加臭原理图

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，得到控制量；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准模型的预测进行修正。银红春等^[71]设计了一种可实现精准控制加臭量、实时修正加注浓度、快捷有效给燃气管道加注加臭剂的装置。陈福昀等^[73-74]设计了一种小气量燃气智能闭环加臭系统，提升了小气量燃气加臭自动化水平，同时有效保障安全并提高控制精度，实现小气量供气下的精确加臭。葛亮等^[75]设计了一种基于模型预测优化控制的闭环加臭控制系统以提高加臭的均匀程度和抗干扰性。罗明^[76]设计了一种基于预测自抗扰控制的闭环加臭装置，克服了管道内加臭浓度的衰减及系统内部的不确定性和外部的温度干扰，实现了精确控制天然气管网末端实际加臭剂浓度。

闭环控制加臭剂加注装置的优点是：①能够根据实时天然气流量，自动调整加臭剂注入量，保证加臭浓度恒定在合规范围内，有效解决传统加臭方式的“欠臭”“过臭”问题，提高天然气输配的安全性和可靠性。②通过动态优化加臭剂用量，闭环控制可节省加臭成本，降低运营费用，具有明显的经济效益。③该技术采用自动化、智能化的控制方式，减少了人工操作，提高了加臭过程的效率和可控性。④闭环加臭系统配备了数据记录、故障报警、远程监控等辅助功能，可以实现加臭过程的可追溯、可诊断，进一步提升了系统的可用性和安全性。但是闭环控制加臭剂加注也存在一些局限性。一方面，该技术对加臭设备和仪表的要求较高，如高精度流量计、可调执行机构等，增加了系统的复杂度和成本。另一方面，闭环控制的效果依赖于控制算法的优劣，需要对控制参数进行整定和持续优化^[77-78]。此外，在实际应用中，还需要考虑天然气成分变化、管道工况波动等因素对加臭控制的影响，确保系统的鲁棒性和适应性。

2.5 基于大数据的加臭剂加注技术

基于大数据的加臭剂加注技术是近年来伴随信息技术发展而新兴的加臭剂加注技术，其核心是充分利用天然气系统海量运行数据，通过数据采集、传输、存储、挖掘分析等一系列过程，对加臭全流程实施精细化管控和优化决策。大数据加臭剂加注是在传统加臭控制基础上，引入大数据分析和机器学习等先进技术手段，实现加臭过程的智能优化和精细管理^[79]。基于大数据的加臭剂加注技术原理如图12所

示。其核心原理是通过海量天然气数据的采集、存储、处理和挖掘，深度洞察加臭系统的内在规律和动态特性，并据此优化控制策略和决策方案，提升加臭控制的精准性、稳定性和经济性。此外，大数据加臭系统还能对专家经验和领域知识进行提炼和总结，形成加臭优化知识库。通过关键技术的综合应用，大数据加臭剂加注能够全面感知加臭过程的状态和变化，深度挖掘数据背后的规律和知识，持续优化加臭控制策略和执行方案，从而实现加臭过程的精准控制和智能优化。

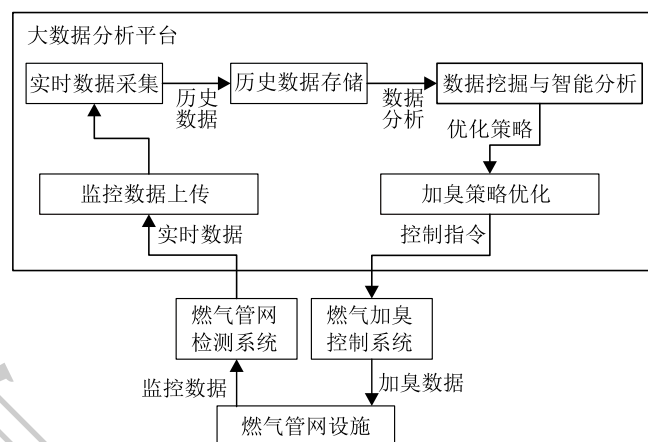


图12 基于大数据的加臭剂加注技术原理简图

大数据加臭剂加注装置利用物联网、大数据和机器学习等现代信息技术，实现了天然气加臭过程的全自动闭环控制，具有精度高、效率高、成本低等优点。通过在管网不同位置部署传感设备实时采集数据，并通过机器学习算法动态优化加臭参数，可以确保天然气中加臭剂浓度始终稳定在安全标准范围内，减少能源浪费，提高天然气输配的安全性和经济性。同时，该系统还可实现对管网设备运行工况的实时监测和预警，大大提升天然气管网的智能化水平。但该技术的应用也面临一些挑战，如系统复杂度高、前期投入大、数据安全和通信网络质量要求高等。此外，机器学习算法的效果也可能受到训练数据质量和工况变化的影响。因此，在实际落地时需要综合考虑技术成熟度、投资回报率和管网现状等因素，选择最优实施方案并注重数据安全防护和系统稳定性保障，以确保智慧天然气系统的可靠运行和长期效益。

不同类型新型天然气加臭剂加注技术的优劣对比见表3。串入式加臭剂加注技术操作简单、成本低，但技术还有待完善；补充加臭剂加注技术能确保长距离输送中加臭剂浓度的一致性，但设备成本与维护成本高；闭环控制加臭剂加注技术加臭效果稳定、

表 3 各新型天然气加臭剂技术加注性能对比表

技术名称	原理	优势	劣势	应用场景
串入式加臭剂加注	通过串入在天然气管道的加臭单元实现加臭剂添加	操作简单、成本低廉	受天然气流量影响大	中小型天然气管网
补充加臭剂加注	在气体流动过程中,通过多次注入加臭剂保持气体的臭味	保证长距离输送过程中的气体臭味一致性	设备复杂、维护成本高	长距离输送管道
闭环控制加臭剂加注	根据气体流量和臭剂浓度自动调节加臭剂注入量	加臭剂利用率高,加臭效果稳定	系统复杂、初期投入高	高精度加臭需求
多点加臭剂加注	在燃气管道的多个点进行加臭	分布均匀、适应复杂管网	安装和维护费用高	大型管网系统
大数据加臭剂加注	基于大数据分析,优化加臭剂注入量和位置	精确控制、节约加臭剂	依赖数据质量和分析能力	智能管网系统

利用率高,但系统复杂、依赖控制算法;多点加臭剂加注技术适用于大型管网,分布均匀但费用高;大数据加臭剂加注技术控制精确但依赖数据质量。选择合适的技术需根据应用场景、系统复杂度、成本和加臭效果综合考虑。

3 结论与展望

1) 城市天然气加臭剂加注技术经过几十年的发展,已经形成了相对完善的技术体系和管理制度,在保障天然气安全、提升用户体验等方面发挥了不可或缺的作用。但随着国家“双碳”战略的实施、城镇化进程的加快、天然气用户需求的升级,传统的集中式加臭模式也逐渐暴露出精度不足、均匀性差、适应性低、智能化水平有限等问题,难以满足新时期高质量发展的要求。

2) 探讨了近年来兴起的闭环控制加臭、多点布臭、大数据优化控制等先进加臭剂加注技术路线和创新模式。理论分析和工程实践表明,融合物联网、云计算、机器学习等现代信息技术,建立了覆盖全管网的在线监测网络,通过实时数据采集、智能分析优化、精确反馈控制,能够显著提升加臭精度和稳定性,实现因地制宜、动态响应的精细化臭味管理,并在降本增效、安全防护、智慧运维等方面彰显独特优势。这些新技术新模式引领了行业技术变革方向,是构建智慧天然气体系的重要组成。

3) 城市天然气加臭剂加注技术创新发展呈现以下趋势:①多技术融合驱动。新一代信息技术与材料科学、化学工程、人工智能、新能源等多领域技术高度交叉融合,催生出新型传感器、微型化装备、绿色环保加臭剂等一系列颠覆性技术成果,为加臭系统的智慧化、精细化、绿色化升级提供有力支撑。②全场景智慧赋能。加臭系统将通过全方位数字化改造,实

现全流程的感知、互联、分析、优化、控制,并与调度、监控、管网、安防、营销、服务等各业务系统深度协同,支撑天然气运营的全场景智慧化管理。③多元协同创新。在“产学研用”深度合作的新型创新范式下,政府、企业、科研院所、行业组织等各创新主体联合,在基础理论研究、关键核心技术攻关、科技成果转化、标准规范制定、商业模式创新等方面形成合力,构建开放、协同、高效的技术创新生态系统。

参 考 文 献

[1] 宋克农,刘庆堂,杜彦,等.“双碳目标”下的我国燃气行业发展现状及前景分析[J]. 山东化工, 2022, 51(24): 97-99.
SONG Kenong, LIU Qingtang, DU Yan, et al. Development status and prospect analysis of my country's gas industry[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(24): 97-99.

[2] 周平. 城市燃气安全隐患及防范策略探究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(24): 129-131.
ZHOU Ping. City gas safety hidden dangers and prevention strategies[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(24): 129-131.

[3] 刘友天. 城镇燃气加臭技术[J]. 云南化工, 2012, 39(1): 29-31.
LIU Youtian. Town gas odorization technique[J]. Yunnan Chemical Technology, 2012, 39(1): 29-31.

[4] BARCZYŃSKI A, BARCZYŃSKI P. Nawanianie gazu-aspekty prawne oraz techniczno-eksploatacyjne[J]. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2021, 7/8: 6-11.

[5] TENKRAT D, PROKES O, HLINCIK T. Natural gas odorization[M]. [S.l.]: INTECH Open Access Publisher, 2010.

[6] 曹红波. 燃气加臭机除臭装置研究[J]. 城市燃气, 2023(2): 20-23.
CAO Hongbo. Research on deodorizing device of gas deodorizer[J]. Urban Gas, 2023(2): 20-23.

[7] 王超,刘宏,陈琳,等. 基于电化学传感器的四氢噻吩浓度在线检测技术研究[J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(4): 37-40.
WANG Chao, LIU Hong, CHEN Lin, et al. On-line detection technology of tetrahydrothiophene concentration based on electrochemical sensor[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2022, 38(4): 37-40.

- [8] 刘晨, 余杰, 李鹏. 城镇燃气加臭技术及其发展应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(11): 78-79.
- LIU Chen, YU Jie, LI Peng. Urban gas odorizing technology and its development and application[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(11): 78-79.
- [9] 徐庆, 战中华. 天然气加臭剂在居民生活用气中的用途及重要性[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(11): 73.
- XU Qing, ZHAN Zhonghua. Application and importance of natural gas deodorant in residential gas[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011, 31(11): 73.
- [10] 吴多勤, 梁海滨. 燃气加臭问题的探讨[J]. 应用能源技术, 2006(6): 8-9.
- WU Duoqin, LIANG Haibin. Discussion of fuel gas odorizing[J]. Applied Energy Technology, 2006(6): 8-9.
- [11] 刘伦, 赵杨文, 韩毅. 天然气加臭剂及其检测技术研究进展[J]. 山东化工, 2023, 52(24): 113-115.
- LIU Lun, ZHAO Yangwen, HAN Yi. Research progress of natural gas odorant and its detection technology[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(24): 113-115.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇燃气加臭技术规程: CJJ/T 148—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for city gas odorization: CJJ/T 148-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [13] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城镇燃气设计规范: GB 50028—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China & General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of city gas engineering: GB 50028-2006[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇燃气技术规范: GB 50494—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for city gas: GB 50494-2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [15] Chevron Phillips Chemical Company LLC. Chevron Phillips Chemical increases organosulfur capacity at Tesserderlo facility[EB/OL]. (2017-05-23). <https://www.cpchem.com/media-events/news/news-release/chevron-phillips-chemical-increases-organosulfur-capacity>.
- [16] KPOTEBICH B B. Nonfilter natural gas odorization[J]. Journal of Mechanical Engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute», 2016, 2(77): 28-34.
- [17] 城市燃气编辑部. 燃气行业相关在编国家标准动态[J]. 城市燃气, 2019(11): 47-49.
- Editorial Department of Urban Gas. Dynamic of national standards related to gas industry[J]. Urban Gas, 2019(11): 47-49.
- [18] 陈贤仁. 城镇燃气加臭综述[J]. 城市燃气, 1996(9): 11-13.
- CHEN Xianren. Review on odorization of urban gas[J]. Urban Gas, 1996(9): 11-13.
- [19] 陈贤仁. 加臭是安全使用城市燃气的必要措施[J]. 煤气与热力, 1987, 7(6): 14-20.
- CHEN Xianren. Odorization is a necessary measure for safe use of city gas[J]. Gas & Heat, 1987, 7(6): 14-20.
- [20] ZANCHETTIN C, ALMEIDA L M, MENEZES F D, et al. Odor recognition systems for natural gas odorization monitoring[C]// The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Brisbane: IEEE, 2012: 1-8.
- [21] CAIN W S, TURK A. Smell of danger: an analysis of LP-gas odorization[J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1985, 46(3): 115-126.
- [22] 陈琳, 刘宏, 伍淑辉, 等. 依托 THT 终端在线检测与智能加注控制确保用户燃气安全与合格[J]. 城市燃气, 2021(增刊 1): 149-152.
- CHEN Lin, LIU Hong, WU Shuhui, et al. Relying on THT terminal online detection and intelligent filling control to ensure user gas safety and qualification[J]. Urban Gas, 2021(S1): 149-152.
- [23] 徐松强. 用于城市燃气抢修的移动式 LNG 应急装置[J]. 煤气与热力, 2011, 31(3): B6-B8.
- XU Songqiang. Mobile LNG emergency unit for recovery service of urban gas network[J]. Gas & Heat, 2011, 31(3): B6-B8.
- [24] 朱军. 从顺德北镇南源花园“1·18”燃气爆燃事故看燃气加臭管理[J]. 城市燃气, 2017(7): 29-31.
- ZHU Jun. Management of gas odorization from “1·18” gas demineralization accident in Nanyuan Garden, North Town of Shunde[J]. Urban Gas, 2017(7): 29-31.
- [25] 宋小兵, 周华银. 燃气加臭, 被忽视的安全保障措施[J]. 城市燃气, 2017(8): 28-31.
- SONG Xiaobing, ZHOU Huayin. Gas odorization, neglected safety safeguards[J]. Urban Gas, 2017(8): 28-31.
- [26] 高博禹. 城镇燃气关键风险识别及控制对策[J]. 石油石化节能, 2017, 7(8): 55-57.
- GAO Boyu. Identification and control countermeasures of key risks of urban gas[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2017, 7(8): 55-57.
- [27] 刘芳芳, 李岩, 柯琳, 等. 某城市燃气门站工艺及仪表控制方案设计[J]. 中国市场, 2016(28): 88-92.
- LIU Fangfang, LI Yan, KE Lin, et al. Design of process and instrument control scheme of gas gate station in a city[J]. China Market Marketing, 2016(28): 88-92.
- [28] 朱志强. 天然气加臭剂在居民生活用气中的用途及重要性[J]. 科技创新与应用, 2013, 3(36): 49.
- ZHU Zhiqiang. Application and importance of natural gas deodorant in domestic gas[J]. Technology Innovation and Application, 2013, 3(36): 49.
- [29] 黄铨淞. 燃气企业加臭剂使用风险分析[J]. 城市燃气, 2021(4): 31-34.
- HUANG Bisong. Risk analysis of deodorant use in gas enterprises[J]. Urban Gas, 2021(4): 31-34.
- [30] Sensor Research. Researchers from Federal University provide details of new studies and findings in the area of sensor research (an intelligent monitoring system for natural gas odorization)[J]. Computer Weekly News, 2015, 15(1): 425-433.
- [31] AMIRBEKYAN D, STYLIANOS N. Natural gas odorization monitoring for safety and consistency[J]. Pipeline & Gas Journal, 2013, 240(12): 66-68.
- [32] Enersol Inc., N.A.L.P. Patent issued for natural gas odorization[J].

- Journal of Engineering, 2013(10): 19-21.
- [33] CUI Global, Inc. CUI Global's subsidiary, Orbital Gas Systems Ltd., announces new relationship with Yokogawa United Kingdom Ltd. and first export of its natural gas odorization solutions[EB/OL]. (2013)[2025-5-14]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/cui-globals-subsidiary-orbital-gas-systems-ltd-announces-new-relationship-with-yokogawa-united-kingdom-ltd-and-first-export-of-its-natural-gas-odorization-solutions-230794321.html>.
- [34] 黄波, 余涛, 王宝锋. 等. 一种无耗能的随动型燃气加臭装置及其加臭方法: CN201810764173.9[P]. 2018-11-20.
HUANG Bo, YU Tao, WANG Baofeng, et al. An energy-consuming follower-type gas odourising device and its odourising method without energy consumption: CN201810764173.9[P]. 2018-11-20.
- [35] 王荣华, 蔡素洁, 王林. 浅谈燃气臭剂的选择 [J]. 煤气与热力, 1997, 17(5): 24-26.
WANG Ronghua, CAI Sujie, WANG Lin. Discussion on the selection of gas odorant[J]. Gas & Heat, 1997, 17(5): 24-26.
- [36] 陈贤仁. “城镇燃气加臭技术”通过部级鉴定 [J]. 煤气与热力, 1988, 8(6): 25.
CHEN Xianren. "Odorizing technology of urban gas" passed ministry-level identification[J]. Gas & Heat, 1988, 8(6): 25.
- [37] 李晓先, 张云林, 孟光. 燃气加臭设备与臭剂的选择 [J]. 煤气与热力, 2002, 22(1): 66-69.
LI Xiaoxian, ZHANG Yunlin, MENG Guang. Odorant and odorizing equipment for fuel gas[J]. Gas & Heat, 2002, 22(1): 66-69.
- [38] 姜慧丽. 小区气化燃气加臭技术初探 [J]. 上海煤气, 2002(1): 6-8.
JIANG Huili. Research of the odorisation technology in centralised gasification area[J]. Shanghai Gas, 2002(1): 6-8.
- [39] 杨同宏, 杨同秀. 燃气加臭工艺及应用 [J]. 煤气与热力, 2001, 21(3): 247-249.
YANG Tonghong, YANG Tongxiu. Odorization and its application of fuel gas[J]. Gas & Heat, 2001, 21(3): 247-249.
- [40] 胡俊生, 张宝刚, 李刚, 等. 燃气加臭技术介绍 [J]. 辽宁化工, 2001, 30(4): 151-153.
HU Junsheng, ZHANG Baogang, LI Gang, et al. Technology of gas odorization[J]. Liaoning Chemical Industry, 2001, 30(4): 151-153.
- [41] 王正文. 关于瓦斯燃用的安全性及加臭设施的研究与实践 [J]. 城市煤气, 1995(4): 19-22.
WANG Zhengwen. Research and practice on the safety of gas burning and deodorizing facilities[J]. Urban Gas, 1995(4): 19-22.
- [42] GHAZI MIRSAAED S M. Feasibility assessment and development of knowledge, technology, and tools for monitoring natural gas odorants[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2021.
- [43] 彭峻峰, 谢瑜. 加臭工艺在城市燃气中的应用与改进 [J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(1): 52-54.
PENG Junfeng, XIE Yu. Application and improvement of deodorization process in the city gas[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48(1): 52-54.
- [44] 马汉平, 陈小飞, 吕华, 等. 燃气在线加臭装置在靖边基地配气站的应用 [J]. 石油化工应用, 2014, 33(7): 103-106.
MA Hanping, CHEN Xiaofei, LYU Hua, et al. Application of gas online-odorizing device in gas distribution station of Jingbian base[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(7): 103-106.
- [45] 蔡素洁, 王荣华, 李天凡, 等. 燃气加臭装置的选择 [J]. 煤气与热力, 1998, 18(2): 36-37.
CAI Sujie, WANG Ronghua, LI Tianfan, et al. Selection of gas odourisation units[J]. Gas & Heat, 1998, 18(2): 36-37.
- [46] 白志莉, 王智勇. 燃气加臭实践浅析 [J]. 城市煤气, 1998(8): 17-20.
BAI Zhili, WANG Zhiyong. An analysis of gas odourisation practices[J]. Urban Gas, 1998(8): 17-20.
- [47] 朱丽平, 杨海鹏. 天然气加臭泵工作原理及运行故障处理 [J]. 煤气与热力, 2015, 35(10): B5-B6.
ZHU Liping, YANG Haipeng. Operational principle and operation troubleshooting of natural gas odorization pump[J]. Gas & Heat, 2015, 35(10): B5-B6.
- [48] 许泳. 钢厂煤气加臭问题的探讨 [J]. 上海煤气, 2014(1): 1-3.
XU Yong. Discussion on problems of steel plant's fuel gas odorizing[J]. Shanghai Gas, 2014(1): 1-3.
- [49] 蒋煜, 蒋华全, 雷彬. 民用燃气加臭工艺技术适应性探讨 [J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 111-113.
JIANG Yu, JIANG Huaquan, LEI Bin. The adaptability of odorizing technology in fuel gas for civil use[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 111-113.
- [50] 王友军, 马旭卿. 加臭装置在天然气输配中的应用 [J]. 城市燃气, 2005(8): 11-15.
WANG Youjun, MA Xuqing. Application of odor equipments in gas transmission and distribution system[J]. Urban Gas, 2005(8): 11-15.
- [51] KOSTOWSKI W J, JARCZYK D, GÓRNY K. Technical and economic evaluation of the natural gas odorizing process-the case of Poland[EB/OL]. (2019-12)[2025-5-14]. https://www.researchgate.net/profile/Wojciech-Kostowski/publication/292308234_Natural_gas_odorizing_process_technical_and_economic_aspects/links/5ec55aeca6fdcc90d68905fd/Natural-gas-odorizing-process-technical-and-economic-aspects.pdf.
- [52] 徐箭, 胡团明. 加臭装置的工作原理与选型 [J]. 煤气与热力, 2015, 35(9): B24-B26.
XU Jian, HU Tuanming. Working principle and type selection of gas odorization unit[J]. Gas & Heat, 2015, 35(9): B24-B26.
- [53] 李阳, 周伦. 基于单片机的燃气加臭机打印系统实现 [J]. 制造业自动化, 2013, 35(19): 109-111.
LI Yang, ZHOU Lun. Design of SCM-based print system on gas odorizer[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(19): 109-111.
- [54] 黎耀初. 城镇燃气加臭技术与应用 (上)[J]. 煤气与热力, 2011, 31(5): B1-B6.
LI Yaochu. City gas odorization technology and application (1)[J]. Gas & Heat, 2011, 31(5): B1-B6.
- [55] 黎耀初. 城镇燃气加臭技术与应用 (下)[J]. 煤气与热力, 2011, 31(6): A26-A31.
LI Yaochu. City gas odorization technology and application (2)[J]. Gas & Heat, 2011, 31(6): A26-A31.
- [56] 常保平, 周粉兰. 一种燃气加臭装置: CN202111301489.2[P]. 2022-01-11.
CHANG Baoping, ZHOU Fenlan. A gas odourising device: CN202111301489.2[P]. 2022-01-11.

- [57] 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.
- [58] ZANELLA E, LONGHI M, MARCOLIN P, et al. Investigation of a possible process for hydrogen odorization in pure hydrogen and in natural gas-hydrogen mixture systems[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2022, 96: 139-144.
- [59] 葛亮, 李朋, 肖小汀, 等. 一种串入式天然气涡轮旋转加臭装置及方法: CN202310444968.2[P]. 2023-08-22.
GE Liang, LI Peng, XIAO Xiaoting, et al. A string-in natural gas turbine rotary odourising device and method: CN202310444968.2[P]. 2023-08-22.
- [60] 廖聪冲. 串入式均匀燃气加臭机设计与开发[D]. 成都: 西南石油大学, 2024.
LIAO Congchong. Design and development of string-in uniform gas odouriser[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2024.
- [61] 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.
- [62] 赵燕鹏. 城网天然气首端加臭与末端加臭的分析[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2023, 43(17): 115-117.
ZHAO Yanpeng. Analysis of first-end versus last-end odourisation of natural gas in a city network[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2023, 43(17): 115-117.
- [63] 李晓先, 何志强, 孟光, 等. 天然气点供加臭补偿监控装置: CN201710630703.6[P]. 2017-11-03.
LI Xiaoxian, HE Zhiqiang, MENG Guang, et al. Natural gas point supply plus odour compensation monitoring device: CN201710630703.6[P]. 2017-11-03.
- [64] 葛亮, 罗明, 母小琳, 等. 一种天然气智能加臭控制装置及控制方法: CN202010398847.5[P]. 2020-08-14.
GE Liang, LUO Ming, MU Xiaolin, et al. A natural gas intelligent odourising control device and control method: CN202010398847.5[P]. 2020-08-14.
- [65] FUNG S, CONTRERAS R P, FUNG A G, et al. Portable chemical detection platform for on-site monitoring of odorant levels in natural gas[J]. *Journal of Chromatography A*, 2023, 1705: 464151.
- [66] 葛亮, 廖聪冲, 肖小汀, 等. 一种天然气补充加臭方法及其微型加臭装置: CN202210258483.X[P]. 2022-05-27.
GE Liang, LIAO Congchong, XIAO Xiaoting, et al. A method of supplemental odourisation of natural gas and a miniature odourisation device thereof: CN202210258483.X[P]. 2022-05-27.
- [67] 郎满国, 李卫涛, 黄培健. 结合仿真的梯度分布式城镇燃气智能加臭方法及系统: CN202311752508.2[P]. 2024-01-23.
LANG Mantun, LI Weitao, HUANG Peijian. Intelligent odourisation method and system for gradient-distributed town gas combined with simulation: CN202311752508.2[P]. 2024-01-23.
- [68] 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.
- [69] 葛亮, 廖聪冲, 肖启强, 等. 燃气加臭广义预测精准控制算法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(12): 117-125.
- GE Liang, LIAO Congchong, XIAO Qiqiang, et al. Study on generalized predictive accurate control algorithm for gas odorization[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2023, 37(12): 117-125.
- [70] 煤气与热力编辑部. “高压加臭装置”及“Z-2015 型防爆浓度在线显示仪”产品推广会成功召开[J]. *煤气与热力*, 2014, 34(8): 30.
Editorial Department of *Gas & Heat*. Product promotion meeting of 'high pressure ozonation device' and 'Z-2015 type explosion-proof concentration online display instrument' successfully held[J]. *Gas & Heat*, 2014, 34(8): 30.
- [71] 银红春, 王我. 燃气加臭控制装置及燃气加臭系统: CN201611042994.9[P]. 2017-01-25.
YIN Hongchun, WANG Wo. Gas odourising control device and gas odourising system: CN201611042994.9[P]. 2017-01-25.
- [72] PARROTT K S. Principals of odorization[EB/OL]. <https://asgmt.com/wp-content/uploads/2016/02/096.pdf>.
- [73] 陈福昀, 王波, 张弛, 等. 一种小气量燃气智能加臭系统及控制方法: CN201710953628.7[P]. 2018-01-12.
CHEN Fuyun, WANG Bo, ZHANG Chi, et al. A small gas volume gas intelligent odourising system and control method: CN201710953628.7[P]. 2018-01-12.
- [74] 李晓先, 何志强, 孟光, 等. LNG 点供脉冲时段控制加臭电路: CN201710630655.0[P]. 2017-10-13.
LI Xiaoxian, HE Zhiqiang, MENG Guang, et al. LNG point-of-supply pulse hourly control odourisation circuit: CN201710630655.0[P]. 2017-10-13.
- [75] 葛亮, 张乐, 肖小汀, 等. 一种天然气加臭控制系统及其控制方法: CN202111136077.8[P]. 2021-12-07.
GE Liang, ZHANG Le, XIAO Xiaoting, et al. A natural gas odourisation control system and its control method: CN202111136077.8[P]. 2021-12-07.
- [76] 罗明. 基于系统辨识的燃气加臭剂浓度控制方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2022.
LUO Ming. Research on gas odouriser concentration control method based on system identification[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2022.
- [77] 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.
- [78] REIS M, PERDIGOTO F, PIRES A, et al. Distributed processing system for gas odorization[C]//2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT). Amman: IEEE, 2015: 1-6.
- [79] 于洪, 何德牛, 王国胤, 等. 大数据智能决策[J]. *自动化学报*, 2020, 46(5): 878-896.
YU Hong, HE Deniu, WANG Guoyin, et al. Big data for intelligent decision making[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(5): 878-896.

