

双金属复合管输气流量 VMD 自动化检测方法研究

任 阳¹, 汪 洋¹, 潘 弘¹, 刘思艳¹, 罗 钧¹, 龙学渊²

(1. 中国石油西南油气田公司, 四川 达州 635000; 2. 重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆 401331)

摘 要: 双金属复合管在拉拔成形过程中弹性回弹量较小, 会出现截面畸变以及壁厚减薄的情况, 导致复合管的稳态输气流量自动化检测偏差较大, 难以精准反馈实际的输气流量状态。为了降低自动化检测偏差, 对双金属复合管输气流量变分模态分解(VMD)自动化检测方法进行了研究。利用 VMD 算法, 分解双金属复合管信号模态。根据分解后的信号模态, 从力学角度绘制双金属复合管的极限状态曲线。创新性地结合双金属复合管的极限状态曲线, 确定双金属复合管的失效概率。基于失效概率更新管道的实际输气效率和摩擦系数, 完成双金属复合管输气流量的自动化检测。试验结果显示: 输出的压力-流量曲线能够精准反映设计压力下的稳态流量, 且对不同输气流量工况的检测结果偏差在 $10.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 以内。该方法能够精准反馈实际输气流量状态。

关键词: 失效概率; 双金属复合管; 变分模态分解算法; 输气流量; 极限状态曲线; 自动化检测

中图分类号: TH-17

文献标志码: A

DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2025010140

Study of Automated Detection Methods for Gas Flow Rate VMD in Bimetallic Composite Pipe

REN Yang¹, WANG Yang¹, PAN Hong¹, LIU Siyan¹, LUO Jun¹, LONG Xueyuan²

(1. Petro China Southwest Oil and Gasfield Company, Dazhou 635000, China;

2. School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: Due to the minimal elastic rebound of bimetallic composite pipes during the drawing process, cross-sectional distortion and wall thinning may occur, which results in significant deviations in the automated detection of steady-state gas flow rate of composite pipe, making it difficult to accurately reflect the actual gas flow rate conditions. To reduce automated detection errors, an automated detection method for gas flow rate variational mode decomposition (VMD) in bimetallic composite pipe is studied. Using the VMD algorithm, the modes of the bimetallic composite pipe signal are decomposed. Based on the decomposed signal modes, the limit state curve in bimetallic composite pipe is plotted from a mechanical perspective. The failure probability of the bimetallic composite pipe is innovatively determined by integrating this limit state curve in bimetallic composite pipe. The actual gas transmission efficiency and friction coefficient of the pipeline are updated based on the failure probability, thereby completing the automated detection of the gas flow rate in the bimetallic composite pipe. Experimental results show that the generated pressure-flow curve accurately reflects the steady-state flow rate at the design pressure, and the deviation in detection results for different gas flow rate conditions is within $10.0 \text{ m}^3/\text{h}$. This method can accurately reflect the actual gas flow rate status.

Keywords: Failure probability; Bimetallic composite pipe; Variational mode decomposition (VMD) algorithm; Gas flow rate; Limit state curve; Automated detection

0 引言

自动化检测技术能实时监测管道内的气体流量、提供高精度的数据, 为及时发现流量异常奠定可靠基础^[1]。但在实际执行过程中, 测量噪声和传输噪声会导致管道输气流量检测结果存在不确定性。这是输气流量自动化检测需要克服的关键问题^[2]。

目前, 气体流量的相关研究如下。袁江琦等^[3]采

用深腔结构优化了气体流量测量方法, 结合气体速度与声振荡频率及幅值之间的规律关系, 实现对气体流量的精准测量。但该方法对于非目标区间内的气体流速检测性能仍有待提升。Shavlukov A M 等^[4]研究了 Chaplygin 和 Bechert-Stanyukovich 情况下一维等熵气体动力学方程解的典型奇异性, 明确了尖点奇异性部分具有完全继承属性。但是, 该研究成果的实际应用仍面临挑战。Moisseveva Y 等^[5]研究了高甲烷同系物

收稿日期: 2025-01-30

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (CSTC2021JCYJ-MSXMX0978、CSTB2024NSCQ-MSX1103)

作者简介: 任阳 (1980—), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为油气田开发技术, E-mail: tuan516231@163.com

含量气体混合物性质建模的状态方程 (equation of state, EOS) 选择对流态计算结果的影响, 通过概率图计算和验证了凝析油混合物在一定温度和压力范围内的流型。Brusilovsky EOS 能够精准计算类似气体混合物的密度、实现精准的流态评估, 但是所选的介质成分和参数可能会导致误差增加。孙宏军等^[6]构建了传感器输出电压关于气体流量的半修正理论模型。该模型可以准确检测不同气体介质的流量信息, 但检测结果容易受到客观环境中温度因素的影响。

材料创新与算法优化的深度融合, 为输气流量检测提供了兼具理论突破性和工程适用性的解决方案。该方案适用于含杂质气体、变工况条件的工业管道监测场景。基于此, 本文提出双金属复合管输气流量变分模式分解 (variational mode decomposition, VMD) 自动化检测方法。

1 输气流量检测方法设计

1.1 基于 VMD 算法的信号模式分解

基于 VMD 算法的双金属复合管信号分解流程如图 1 所示。

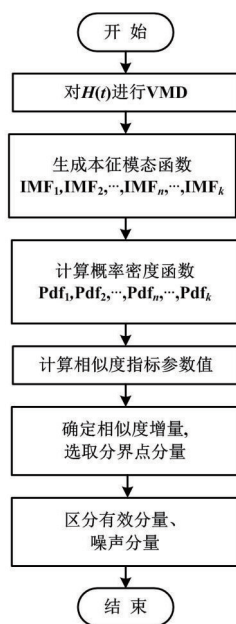


图 1 基于 VMD 算法的双金属复合管信号分解流程图

Fig. 1 Flowchart of signal decomposition for bimetallic composite pipe based on VMD algorithm

图 1 中: $H(t)$ 为原始的双金属复合管声波信号; k 为 VMD 分解得到的模式分量总数。

对于 $H(t)$ 而言, 当存在异常工况时, 信号会以噪声的形式存在。这种噪声与信号模式的混叠, 不仅会掩盖信号中的有用信息, 还会对后续的信号分析和故

障诊断造成干扰^[7]。对此, 本文利用 VMD 对 $H(t)$ 进行分解, 以有效提取信号中的特征信息并抑制噪声的影响。VMD 通过变分框架将信号自适应地分解为一系列具有特定中心频率和带宽的模式分量。与传统的经验模式分解方法相比, VMD 通过优化变分问题, 能够有效地将信号分解为多个模式分量。频域中的每个模式分量都有明确的物理意义, 可用于分解与双金属复合管信号模式混合的噪声, 以提高信号质量。

本文采用 VMD 算法将 $H(t)$ 解析为 k 个信号模式 $u_k(t)$ 。

$$H(t) = \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] u_k(t) \quad (1)$$

式中: $\delta(t)$ 为双金属复合管声波信号的中心频率, Hz; j 为指数项混叠系数。

在分析各模式分量本征模式函数 (intrinsic mode function, IMF) 与 $H(t)$ 在概率密度分布上的差异时, 本文引入了 W 指标函数来量化两者之间的分布相似度^[8]。

$$S(k) = W\{p[I_k(t)], p[H(t)]\} \quad (2)$$

式中: $S(k)$ 为 $I_k(t)$ 分量与 $H(t)$ 的相似程度; $p[I_k(t)]$ 为 $I_k(t)$ 分量的概率密度参数; $p[H(t)]$ 为 $H(t)$ 的概率密度参数。

对应相邻模式分量 IMF 与 $H(t)$ 的增量参数 ε_i 为:

$$\varepsilon_i = S(i) - S(i-1), i = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

式中: i 为模式分量序号。

$$m = \operatorname{argmax}\{\varepsilon_i\} \quad (4)$$

式中: m 为双金属复合管信号中噪声模式分量和有效模式分量分界点的 1 个指标参数。

本文结合式 (2), 设置噪声模式分量和有效模式分量的分界点分量为 $I_m(t)$ 。本文结合各个分量与 $I_m(t)$ 之间的关系, 确定 $I_m(t)$ 之前的分量为双金属复合管信号的有效模式分量、 $I_m(t)$ 之后的分量为双金属复合管信号的噪声模式分量, 从而完成对信号模式的分解处理。

1.2 信号模式分解后的失效概率评估

在 1.1 节得到的噪声模式分量中, 确定噪声源的输气性能状态是精准检测输气流量的关键^[9]。为此, 本文对存在噪声的双金属复合管失效概率进行分析评价。

本文从力学角度构建了判定失效的标准。

$$K_r = f(L_r) \quad (5)$$

式中: K_r 为作用于双金属复合管 r 的无量纲裂纹驱动力参数; L_r 为作用于 r 的无量纲荷载强度参数; f 为 K_r 和 L_r 的关系函数, 即差值函数。

双金属复合管的应力强度参数可以划分为弹性部分 J_p 和塑性部分 J_e 。 J_p 可以直接通过经典线性断裂力学分析得到^[10]。本文通过塑性校正因子,对弹性解进行非线性缩放处理,得到^[11]:

$$J_p = J_e \left(\frac{E\sigma_r}{\varphi_r} + \lambda \right) \quad (6)$$

式中: φ_r 为双金属复合管参考荷载参数,kN; E 为双金属复合管的弹性模量,MPa; λ 为双金属复合管塑性修正系数; σ_r 为在 Ramberg-Osgood 关系上,双金属复合管的应变,即二次校正因子^[12]。

$$\varphi_r = \frac{F}{F_0} \varphi_0 \quad (7)$$

式中: φ_0 为流变应力参数,MPa。

根据双金属复合管在输送气体过程中的实际工况,结合式(5)~式(7),本文将 K_r 细化为:

$$K_r = \frac{K_a}{K_c} = \sqrt{\frac{J_a}{J_c}} = \sqrt{\frac{\lambda_a}{\lambda_c}} \quad (8)$$

式中: K_a 和 K_c 分别为作用于双金属复合管的应力系数和断裂应力系数; J_a 和 J_c 分别为作用于双金属复合管的应力强度和断裂应力强度,MPa; λ_a 和 λ_c 分别为作用于双金属复合管的应力因子和断裂应力因子。

$$K_r = \frac{F}{F_c} \quad (9)$$

式中: F 和 F_c 分别为作用于双金属复合管上的荷载以及双金属复合管可承载的临界荷载,MPa。

双金属复合管的极限状态曲线如图2所示。

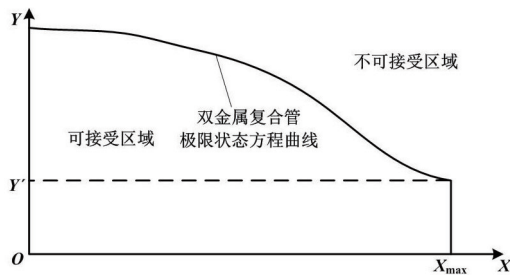


图2 双金属复合管的极限状态曲线

Fig. 2 Limit state curve of bimetallic composite pipe

由图2可知,以双金属复合管的极限状态曲线为分界线:上部分为不可接受区域;下部分为可接受区域。噪声模态分量对应的 r 的失效概率 f_r 为:

$$f_r = \left[1 + \frac{E\sigma_r}{K'_r} + \frac{1}{2 \left(1 + \frac{E\sigma_r}{K'_r} \right)} \right] \quad (10)$$

式中: K'_r 为双金属复合管的屈服应力参数。

本文按照式(10),根据对应输出结果与式(4)失效判定标准之间的关系,确定具体的失效概率。

1.3 基于失效概率的输气流量检测

在确定含噪声双金属复合管的失效概率后,本文进一步实现双金属复合管输气流量的自动化检测。该过程的核心在于以双金属复合管信号范围为单位尺度,通过分段分析和计算输出分段输气效率,从而为管道的健康状态评估和优化运行提供数据支持。本文将双金属复合管信号按单位尺度划分为若干分段,使每个信号段对应管道的特定物理区域,从而实现失效概率的局部分布量化及检测效率的精准评估。

$$E_r = E_0(1 - f_r) \quad (11)$$

式中: E_r 为输气效率, m^3 ; E_0 为理论输气效率, m^3 。

双金属复合管的摩擦系数采用 Colebrook 结合失效概率进行分段计算。

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_r}} = -2 \lg \left(\frac{\varepsilon(1 + f_r)}{D} + \frac{1}{\text{Re} \sqrt{\lambda_r}} \right) \quad (12)$$

式中: ε 为双金属复合管的理论粗糙度; D 为双金属复合管内径,mm;Re 为雷诺数。

本文利用式(11)和式(12)计算结果替换双金属复合管模型的输气效率和粗糙度理论值。结合基础运行参数输出的双金属复合管输气流量参数 Q 为:

$$Q = C \left\{ \frac{P_s^2 + P_e^2(1 + ah')D^5}{k'zTl \left[1 + \frac{a}{2l} \sum_{i=1}^n E_i \right]} \right\} \quad (13)$$

式中: P_s 和 P_e 分别为双金属复合管起始分段的压力参数和终点分段的压力参数,MPa; a 为常数,存在 $a =$

$\frac{4g}{zDT}$; C 为气体的比容常数; h' 为双金属复合管在输气距离上的高程差,m; k' 为摩擦系数; z 为气体的压缩系数; T 为气体温度, $^{\circ}\text{C}$; l 为双金属复合管的分段长度,mm。

2 试验测试与分析

2.1 试验平台搭建

输气管线全线采用外层为 X60 钢材、内衬为不锈钢的双金属复合管材。

管道的参数信息设定如下:输气管线的外径为 508 mm;总壁厚为 10 mm,其中基管壁厚为 1 mm、内衬壁厚为 2 mm;管道内壁粗糙度理论值为 30.0 μm ;最小屈服强度为 420.0 MPa;输气效率理论值为 0.96;输送介质为天然气;防腐层类型为加强级;管道长度为 332.0 km;设计压力为 6.50 MPa。

本文从输气管线的布局角度出发,统计双金属复合管的高程分布情况。双金属复合管沿线高程分布如图3所示。

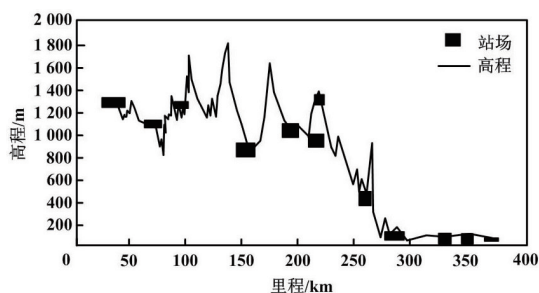


图 3 双金属复合管沿线高程分布

Fig. 3 Elevation distribution along bimetallic composite pipe route

由图 3 可知,测试双金属复合管输气线路共包含 12 个站场、11 个线路分段。各分段的高程差最大为 850 m,最小为 15 m。

2.2 方法测试与分析

在采集双金属复合管的信号数据时,本文将 ETG-200 作为采集装置。

双金属复合管测点布置如图 4 所示。

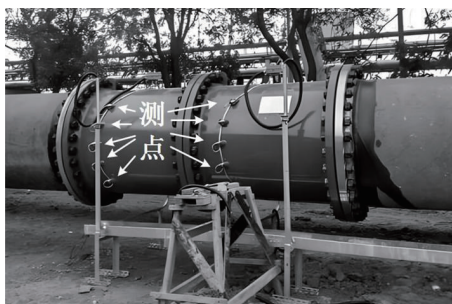


图 4 双金属复合管测点布置

Fig. 4 Layout of measuring points for bimetallic composite pipe

在具体的测量过程中,ETG-200 的参数设置如下:轴向采样间距为 3.0 mm;环向传感器间隔为 8.0 mm;最大速度为 2.0 m/s;深度精度为 ± 0.5 mm;测量精度为 ± 0.2 mm;轴向分辨率为 3.0 mm,环向分辨率为 8.0 mm;置信水平为 85.0%。

双金属复合管信号采集结果如图 5 所示。

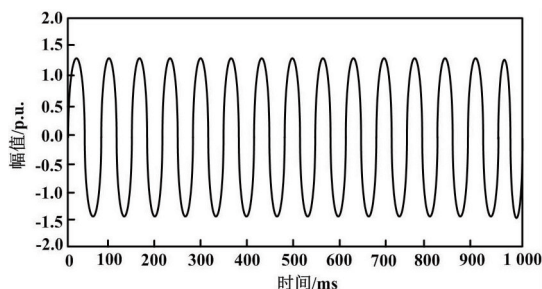


图 5 双金属复合管信号采集结果

Fig. 5 Signal acquisition results of bimetallic composite pipe

本文将 ETG-200 的采集结果导入计算机。

本文利用采集的数据信息以及双金属复合管的基础参数,开展具体的流量检测测试。

结合采集到的双金属复合管信号,利用 VMD 算法分解得到的双金属复合管信号的不同幅值如图 6 所示。

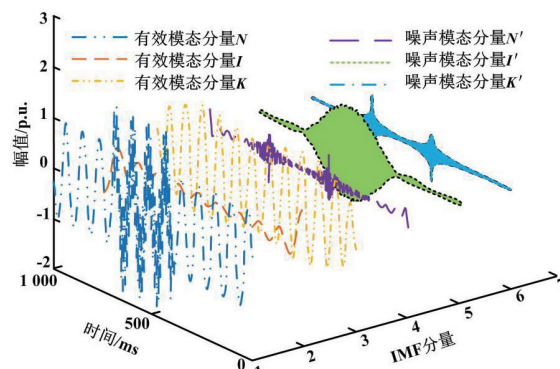


图 6 双金属复合管信号的不同幅值

Fig. 6 Different amplitudes of signals in bimetallic composite pipe

本文对图 6 中噪声模态分量对应检测点在双金属复合管极限状态曲线上的位置分布情况进行计算。

噪声模态分量检测点与双金属复合管极限状态曲线位置关系如图 7 所示。

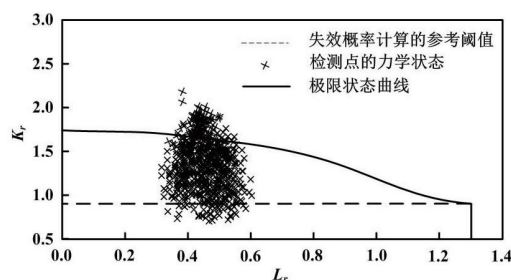


图 7 噪声模态分量检测点与双金属复合管极限状态曲线位置关系

Fig. 7 Relationship between noise modal component detection points and limit state curve of bimetallic composite pipe

图 7 中,根据各检测点与双金属复合管极限状态曲线之间的关系,本文计算输出各分段的失效概率参数分别为 7.40×10^{-3} 、 6.85×10^{-3} 、 7.24×10^{-3} 、 7.19×10^{-3} 、 6.36×10^{-3} 、 6.60×10^{-3} 、 7.01×10^{-3} 、 7.22×10^{-3} 、 6.68×10^{-3} 、 6.10×10^{-3} 、 7.06×10^{-3} 。

本文将计算得到的失效概率输入测试的双金属复合管模型,结合 2.1 节双金属复合管的参数信息,输出测试管线的输气流量信息。

为了分析检测方法的性能,本文将空腔流激振荡气体流量测量方法(文献[3]方法)和量热式传感器气体流量测量方法(文献[6]方法)作为对照组方法,以进行对比分析。

本文检测升压过程中的流量情况。对应的压力-流量曲线如图8所示。

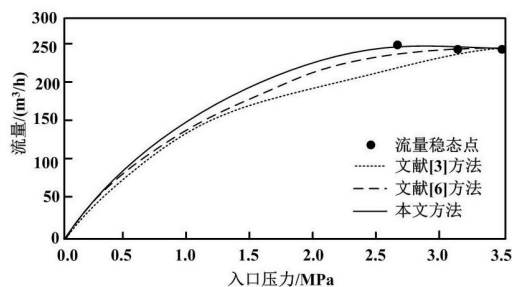


图8 压力-流量曲线

Fig. 8 Pressure-flow curves

由图8可知,管道入口压力达到管道的设计值6.50 MPa。当采用本文方法时,系统流量达到稳态,验证了该方法能准确反映管道气体流量随压力变化的动态特性。这是因为本文方法利用失效概率参数更新了流量计算过程中的原始输气性能参数,使本文方法具备了更加灵敏的检测性能。

本文设置不同的输气流量工况。双金属复合管输气流量检测结果如图9所示。

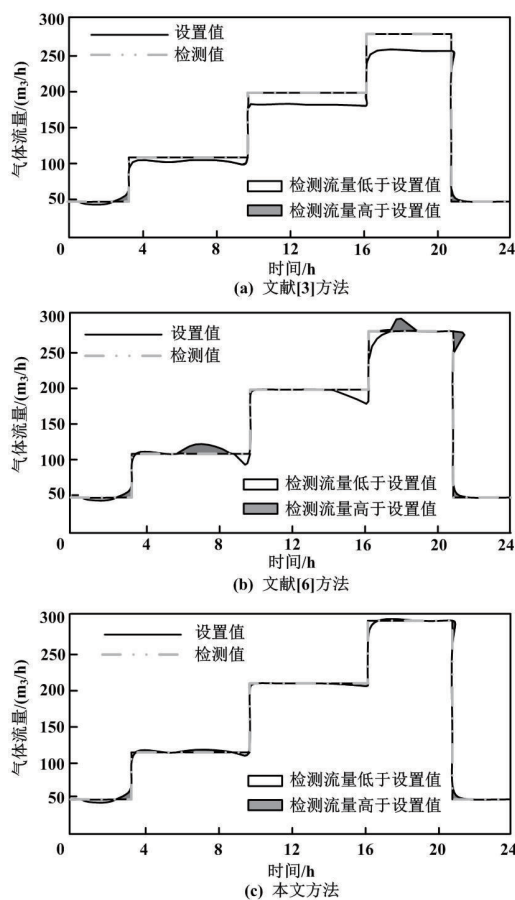


图9 双金属复合管输气流量检测结果

Fig. 9 Testing results of gas flow rate of bimetallic composite pipe

由图9可知:文献[3]方法检测的流量数据低于实际设置流量数据;文献[6]方法检测的流量数据高于实际设置流量数据;本文方法检测输出的流量数据与实际设置流量参数具有较高的拟合度。该结果表明,检测结果误差主要分布在气体流量状态转换阶段,且在 $10.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 以内,检测输出流量与设置参数基本一致。这说明本方法可以实现对输气流量的有效检测,并能够对流量动态作出及时反馈。这是因为本文方法在对双金属复合管输气性能进行分析时,引入了失效概率参数,能够对存在异常管道的输气效率进行更加精准的分析,从而避免了以固定输气效率参数进行检测带来的误差。

3 结论

本文提出基于失效概率和VMD算法的双金属复合管输气流量VMD自动化检测方法。该方法利用VMD算法确定双金属复合管信号的噪声模态分量,并根据噪声分量检测点应力在极限曲线上的分布,从而确定对应的失效概率。本文更新管道的输气效率和摩擦系数,替换输气流量模型中对应的定值参数,并结合失效概率参数大幅提高检测精度。本文方法输出的压力-流量曲线能够精准捕捉设计压力下的稳态流量,对不同输气流量工况的检测结果偏差在 $10.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 以内。

本文方法依旧存在不足,如:依赖于高质量的信号采集与处理;在复杂的工业环境中存在一定误差。后续研究可以探索更多元化的数据源整合方法,以及更精细化的材料力学模型,以进一步提高自动化检测的精准度。

参考文献:

- [1] 李小松,赵承佑,秦帅,等. 自流充填系统的管道压力与流量特征研究[J]. 矿冶工程,2024,44(3):6-10.
- [2] 谢子立,卢志民,姚顺春,等. 大口径管道烟气流量测量方法综述[J]. 热力发电,2024,53(4):112-124.
- [3] 袁江琦,徐雅,谢代梁,等. 基于空腔流激振荡的气体流量测量方法优化研究[J]. 仪表技术与传感器,2024(9):28-33.
- [4] SHAVLUKOV A M. On generic singularities of solutions to the 1D gas flow equations: chaplygin and bechert-stanyukovich cases[J]. Lobachevskii Journal of Mathematics,2024,45(6):2 779-2 791.
- [5] MOISSEYEVA Y, SAITOVA A, STROKIN S. Calculating densities and viscosities of natural gas with a high content of $C_{(2+)}$ to predict two-phase liquid-gas flow pattern[J]. Petroleum, 2023, 9(4):579-591.

(下转第25页)

3.5 记忆效应

为了考察微试剂氨氮分析仪完成某标准溶液或试样测量后,分析仪管路中的残留对下一个测量结果的影响程度,本研究按照标准要求考察了分析仪的记忆效应。标准溶液浓度由 8 mg/L 变到 2 mg/L (80% ~ 20%) 对应的记忆效应为 0.03 mg/L (标准限值为 0.3 mg/L)。标准溶液浓度由 2 mg/L 变到 8 mg/L (20% ~ 80%) 对应的记忆效应为 0.05 mg/L (标准限值为 0.2 mg/L)。该结果说明管路中的残留对仪器的影响很小。

3.6 pH 及电压影响试验

为了验证外界环境 pH 和供电电压变化对仪器测量结果的影响程度,本研究按照标准要求在 pH 影响试验中采用缓冲溶液将氨氮标准溶液分别配制成 pH 为 7、4、9 的 3 种不同 pH 标准溶液。标准溶液浓度均为 5 mg/L。试验用来验证 pH 对测量结果的影响。经计算得到 pH 影响值为-0.76%, 低于标准规定的±6% 限值,满足相关规定要求。

在电压影响试验中,标准溶液浓度为 8 mg/L,给分析仪的供电电压分别为 220 V、198 V 和 242 V。

测试 3 次后,电压影响试验结果如表 6 所示。

表 6 电压影响试验结果
Tab.6 Test results of voltage influence

电压值/V	平均值/(mg/L)	电压影响试验值/%	标准要求/%
220	7.99		±5
198	8.01	+0.25	±5
242	7.95	-0.50	±5

由表 6 可知,电压影响试验值低于标准规定的±5% 限值,满足相关规定要求。

4 结论

针对现有水质分析仪存在的试剂消耗量大、废液

产生量多等问题,本研究设计了 1 种具有突破性改进的微量试剂高精度自动计量装置。该装置通过创新结构设计,不仅可实现微升级别试剂的精准计量,还能通过多重防污染机制有效避免试剂交叉污染。经试验验证,采用所研制装置的微试剂氨氮分析仪的各项指标都满足相应标准要求。值得强调的是,该计量装置具有显著的技术通用性,通过模块化设计可适配总磷、总氮等多参数水质分析系统。该装置“微量+精准+防试剂交叉污染”的技术特性为水质监测仪器的小型化、绿色化发展提供了创新性的解决方案。

参考文献:

[1] 张亚群,周静,丁杰萍,等. 黄河流域(甘肃段)生态环境问题与对策建议[J]. 环境保护,2022,50(14):36-40.
[2] 李晓磊. 地表水环境监测进展与问题分析[J]. 清洗世界,2019,35(1):60-61.
[3] 季伟伟,杨慧中. COD 远程在线监控系统设计与实现[J]. 自动化仪表,2016,37(3):81-84.
[4] 黄辉,魏因布需纳·乔纳森. 纳氏试剂分光光度法和靛酚蓝分光光度法对比分析[J]. 自动化仪表,2018,39(5):96-98.
[5] 郭建,温志渝,魏康林,等. 多参数水质监测仪流路系统设计[J]. 自动化仪表,2012,33(2):80-83.
[6] 孙奕,张卫,杨博玥,等. 水质总磷自动消解装置工艺条件优化[J]. 化学与生物工程,2022,39(2):52-54,68.
[7] 赵凯,舒明雷,刘照阳,等. 蠕动泵控制系统的研究和设计[J]. 自动化仪表,2018,39(10):39-45.
[8] 蒋凯,王雷,李文,等. 基于间苯二酚分光光度法的总氮检测方法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(3):118-123.
[9] 张卫,杨博玥,孙奕,等. 非接触式光电液体计量装置设计[J]. 自动化仪表,2020,41(2):24-27.
[10] NAN L,ZHANG H D,WEITZ D A,et al. Development and future of droplet microfluidics[J]. Lab on a Chip,2024,24:1135-1153.
[11] 生态环境部. 水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法:HJ 536—2009[S]. 北京:中国环境科学出版社,2009.
[12] 生态环境部. 氨氮水质在线自动监测仪技术要求及检测方法:HJ 101—2019[S]. 北京:中国环境科学出版社,2019.

(上接第 19 页)

[6] 孙宏军,徐浩文,丁红兵,等. 基于 MEMS 的量热式传感器气体流量测量的模型研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(1):111-119.
[7] 朱燕萍,王树臣,程鹏飞,等. 基于 DSP 的四声道超声气体流量测量技术研究[J]. 电子测量技术,2023,46(20):81-87.
[8] 赵晨晨,刘成帅,孙悦,等. 管道流量数据缺乏地区 SWMM 参数率定方法研究及应用[J]. 水文,2023,43(5):27-32.
[9] 贾秋红,桂生,王坤,等. 交叉分段差分进化支持向量回归的气

体超声流量计测量方法[J]. 应用声学,2024,43(3):599-607.
[10] 柏思忠. 矿用超声波气体流量计参考波形自动跟踪方法[J]. 工矿自动化,2022,48(4):38-43,59.
[11] 翟江,周孝信,李亚楼,等. 综合能源系统天然气管道压力和流量的控制方案研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(11):3911-3924.
[12] 徐敬波,田永强,赵振学,等. 油库多源设备数据采集和处理系统设计研究[J]. 自动化仪表,2024,45(1):80-85.