

可燃气体检测报警器误差来源分析与校准方法优化

韩潇冉, 张阳

上海市质量监督检验技术研究院, 上海 200000

DOI:10.61369/ETQM.2025070008

摘要 : 可燃气体检测报警器在安全监测领域占据关键地位, 其原理基于传感器对可燃气体的特异性响应, 通过信号转换与处理实现报警功能, 由多个功能模块协同工作保障设备运行。但在实际应用中, 存在诸多导致检测误差的因素。传感器性能因长期使用和环境侵蚀而退化, 环境温度、湿度、气压变化及其他气体干扰, 还有校准不准确或缺失, 都会影响检测精度, 可能引发误报或漏报, 危及安全。为此, 优化校准方法成为提升报警器性能的关键。

关键词 : 可燃气体检测; 报警器; 误差; 校准

Analysis of Error Sources and Optimization of Calibration Methods for Combustible Gas Detection Alarms

Han Xiaoran, Zhang Yang

Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research, Shanghai 200000

Abstract : Combustible gas detection alarms occupy a key position in the field of safety monitoring. Their principle is based on the specific response of sensors to combustible gases, and the alarm function is achieved through signal conversion and processing, with multiple functional modules working together to ensure equipment operation. However, in practical applications, there are many factors that can lead to detection errors. Sensor performance degrades due to long-term use and environmental erosion, changes in environmental temperature, humidity, and air pressure, interference from other gases, as well as inaccurate or missing calibration, all affect detection accuracy and can cause false alarms or missed alarms, compromising safety. Therefore, optimizing calibration methods has become key to improving alarm performance.

Keywords : combustible gas detection; alarm; error; calibration

在工业生产、民用燃气使用等场景中, 可燃气体泄漏可能引发火灾、爆炸等严重事故, 威胁生命财产安全。可燃气体检测报警器作为预防此类事故的重要设备, 其检测的准确性尤为关键。它依据特定原理, 借助多种功能模块协同工作, 实现对可燃气体浓度的监测与报警。但实际使用过程中, 报警器常出现检测误差。这些误差可能源于多个方面, 不仅降低检测精度, 还可能导致严重后果。深入探究可燃气体检测报警器的误差来源并优化校准方法, 对于提升其检测准确性、增强安全保障能力至关重要, 是保障安全生产与社会稳定的迫切需求。

一、可燃气体检测报警器的基本原理与构成

(一) 可燃气体检测报警器的基本原理

可燃气体检测报警器的基本原理基于气体传感器对特定气体的敏感反应。传感器通过检测环境中可燃气体的浓度, 将气体浓度信号转换为电信号。电信号经过放大和处理后, 与预设的报警阈值进行比较。当检测到的气体浓度超过安全阈值时, 报警器会触发声光报警, 提醒人员采取相应措施。传感器的工作原理多种多样, 包括催化燃烧、红外吸收、电化学等。催化燃烧传感器利用可燃气体在催化剂表面燃烧产生的热量引起电阻变化; 红外吸收传感器则通过检测气体对特定波长红外光的吸收程度来确定气体浓度; 电化学传感器则依赖于气体与电极之间的化学反应产生

的电流变化。这些传感器各有优缺点, 适用于不同的应用场景。

(二) 可燃气体检测报警器的基本构成

可燃气体检测报警器通常由传感器模块、信号处理模块、报警模块和电源模块四大部分组成。传感器模块是报警器的核心部分, 负责检测环境中的可燃气体浓度, 并将气体浓度信号转换为电信号。信号处理模块对传感器输出的电信号进行放大、滤波和数字化处理, 以提高信号的稳定性和准确性。报警模块根据处理后的信号判断气体浓度是否超过安全阈值, 并在超过阈值时触发声光报警, 提醒人员采取相应措施。电源模块为整个报警器提供稳定的电力供应, 确保其持续正常工作。此外, 现代可燃气体检测报警器还可能配备通信模块, 用于将检测数据实时传输到监控中心, 实现远程监控和数据分析。

二、可燃气体检测报警器误差来源分析

（一）传感器性能退化导致的误差

传感器作为报警器的核心部件，其性能直接影响检测结果的准确性和可靠性。随着使用时间的增加，传感器内部的敏感材料会因化学反应、物理磨损或环境侵蚀而逐渐失效^[2]。例如，催化燃烧传感器中的催化剂活性降低会导致响应速度变慢，红外吸收传感器的光学元件表面污染会降低透光率，电化学传感器的电解液干涸或电极腐蚀会削弱其检测能力。这些退化现象不仅使传感器的灵敏度下降，还可能导致零点漂移或响应时间延长。长期暴露在高温、高湿或腐蚀性气体环境中，会进一步加速传感器的老化过程。性能退化的传感器不仅会降低检测精度，还可能引发误报或漏报，严重威胁安全生产。

（二）环境因素干扰引起的误差

温度、湿度、气压等环境条件的变化会直接干扰传感器的工作状态。温度变化可能导致传感器内部材料的物理特性改变，从而影响其电学性能；湿度变化可能使传感器表面吸附水分，阻碍气体分子的扩散和反应；气压变化则可能改变气体浓度分布，导致检测结果偏离实际值。此外，环境中存在的其他气体成分可能对传感器产生交叉干扰，特别是与目标气体化学性质相似的物质，会进一步增加检测误差。这些环境因素的干扰不仅降低了检测的准确性，还可能引发误报或漏报，增加安全风险。

（三）校准不准确或缺失引发的误差

校准是确保传感器检测精度的关键步骤，通过校准可以修正传感器的零点漂移和灵敏度偏差。然而，由于校准气体浓度不准确、校准设备精度不足或校准方法不当，可能导致校准结果偏离真实值^[3]。长期使用过程中未定期校准或校准间隔过长，会使传感器的性能逐渐偏离初始状态，从而引入系统性误差。校准缺失或不当不仅会降低检测结果的可靠性，还可能掩盖传感器的性能退化问题，导致安全隐患。

三、可燃气体检测报警器校准方法优化

（一）基于多点校准的精度提升方法

多点校准方法是提高可燃气体检测报警器精度的重要手段，能够有效解决传统单点校准的局限性。单点校准仅针对某一特定浓度进行校准，无法全面反映传感器在整个量程范围内的线性特性，容易导致检测结果在高浓度或低浓度区域出现较大偏差。多点校准则通过选择多个不同浓度的标准气体，对传感器进行分段校准，从而更准确地拟合传感器的响应曲线。这种方法能够有效修正传感器的非线性误差和灵敏度偏差，显著提升检测结果的准确性。在实际应用中，校准点的数量和分布需要科学设计，通常覆盖传感器的低、中、高量程范围，以确保校准结果的全面性和可靠性。此外，结合数据处理算法，如最小二乘法或多项式拟合，可以进一步优化校准曲线的精度，为传感器提供更准确的浓度计算依据。多点校准不仅能够提高检测精度，还能延长传感器的使用寿命，为可燃气体检测报警器的长期稳定运行提供保障。

（二）环境参数补偿技术的优化

环境参数补偿技术是减少可燃气体检测报警器误差的重要优化方向，能够显著提高传感器在不同环境条件下的适应性和可靠性。温度、湿度和气压等环境因素的变化会直接影响传感器的检测性能，导致测量结果偏离真实值。通过引入环境参数补偿技术，可以实时监测环境条件的变化，并对传感器输出进行动态修正。例如，利用温度传感器和湿度传感器采集环境数据，结合预先建立的补偿模型，对检测结果进行实时调整。补偿模型的建立通常基于大量实验数据，通过回归分析或机器学习算法，确定环境参数与传感器输出之间的关系。优化后的补偿技术能够有效降低环境因素对检测结果的干扰，提高报警器在不同环境条件下的适应性和可靠性^[4]。环境参数补偿技术还可以结合多点校准方法，进一步提升传感器的整体性能，为复杂环境下的可燃气体检测提供更精准的数据支持。

（三）智能化校准系统的开发与应用

智能化校准系统的开发是校准方法优化的重要趋势，能够显著提高校准效率和精度，同时减少人为误差。传统校准方法依赖人工操作，不仅效率低下，还容易引入人为误差，难以满足大规模部署的需求。智能化校准系统通过集成自动控制、数据采集和算法处理功能，实现校准过程的自动化和智能化。系统能够自动完成标准气体的通入、传感器响应的采集以及校准曲线的计算，显著提高校准效率和精度。智能化校准系统还可以结合远程监控和云计算技术，实现多台设备的集中校准和数据分析，为大规模部署的可燃气体检测报警器提供高效的管理和维护方案。通过不断优化智能化校准系统的算法和硬件配置，可以进一步提升校准的准确性和可靠性。例如，引入人工智能算法对传感器性能进行预测和优化，能够提前发现潜在问题并采取相应措施。智能化校准系统的应用不仅提高了校准效率，还为安全生产提供了更有力的技术支持。

四、实验验证与结果分析

（一）实验验证

在验证优化后的可燃气体检测报警器校准方法时，严格遵循JJG693-2011《可燃气体检测报警器检定规程》，确保实验的规范性和准确性。实验环境设定为温度(0~40)℃、相对湿度<85%，通风良好且无干扰被测气体，为测量提供稳定可靠的条件^[1]。

选用空气中异丁烷、甲烷、丙烷等多种标准气体作为测量基准，对多台不同型号的可燃气体检测报警器进行测试。测量前，按照仪器说明书的要求，对报警器进行预热稳定处理，并完成零点和量程校准，以保证仪器处于最佳测量状态。测量过程中，分别通入约为满量程10%、40%、60%的标准气体，待示值稳定后读取数据 C_i ，每个浓度点重复测量3次，取算术平均值，依据公式计算各浓度点的示值误差，选取其中绝对最大值作为气体的示值误差，同时按照规程要求评定测量结果的不确定度。

对于响应时间的测量，在分析仪校准零点后，通入约为满量程40%的气体标准物质，读取仪器稳定初值。撤去标气，待仪器

回零后再次通入相同标准气体，同时使用秒表记录仪器达到稳定初值90%的时间，重复上述步骤3次，取算术平均值作为分析仪器的响应时间，并对其不确定度进行评定^[4]。

(二) 结果分析

通过对实验数据的深入分析，可全面了解可燃气体检测报警器的性能以及误差来源的影响程度。

在示值误差方面，从多台仪器的测量数据来看，不同浓度点的示值误差存在差异。测量重复性和标准气体的不确定度是影响示值误差的关键因素。测量重复性引入的标准不确定度在不同仪器间相对稳定，如实验中多台相同型号仪器测量重复性引入的标准不确定度经计算后合并样本标准差为0.354%LEL（计算公式：

$s_r = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2}$ ）。这表明仪器自身的重复性特性对测量结果有较为稳定的影响，在多次测量中，仪器测量值的离散程度相对固定。而标准气体的不确定度则取决于标准气体的定值准确性，实验中标准气体定值证书给出的不确定度为1.0%（ $k=2$ ），则标准相对不确定度为： $a/k = 1.0/2 = 0.5\%$ ，由此计算出的标准不确定度为0.1995%LEL（ $0.5\% \times 39.9\%LEL = 0.1995\%LEL$ ）。这两个不确定度分量相互叠加，共同决定了示值误差的不确定度范围。合成标准不确定度和相对标准不确定度的计算结果进一步量化了示值误差的不确定程度，异丁烷标准气体测量时，相对标准不确定度为1.02%（计算公式： $u_c^2(\Delta C) = [c_r u(C)]^2 + [c_r u(C_0)]^2 = \sqrt{0.354^2 + 0.1995^2} = 0.4063\%LEL$ ， $0.4063\%LEL \div 39.9\%LEL \times 100\% = 1.02\%$ ），扩展不确定度为2.1%（ $k=2$ ）（经验值依据：该值引用自标准气体定值证书，经实验室验证符合JJG693-2011要求）。这意味着在测量异丁烷气体浓度时，测量结果的可信度在一定范围内波动，需充分考虑这一不确定度对测量结果的影响。

对比不同气体（甲烷、丙烷、氢气、乙炔）的测量结果，发现虽然测量重复性引入的标准不确定度基本相同（均为0.354%LEL），但由于不同标准气体定值的差异以及其他未知因素的影响，导致各气体测量的扩展不确定度存在差异。例如，甲烷测量的扩展不确定度为2.7%（ $k=2$ ），丙烷为2.4%（ $k=2$ ）（经验值依据：该值引用自标准气体定值证书，经实验室验证符合JJG693-2011要求）。这说明在实际使用可燃气体检测报警器时，针对不同气体进行测量，其测量结果的可靠性存在差异，需

根据具体气体种类评估测量结果的准确性。

在响应时间方面，测量重复性是影响响应时间测量结果的主要因素。实验中，通过对多台仪器的测量发现，仪器的测量重复性引入的标准不确定度为0.8s。相比之下，电子秒表引入的标准不确定度（0.005s）因数值较小，对测量结果的影响可忽略不计。这表明仪器自身在响应时间测量上的重复性波动较大，可能是由于仪器内部的传感器响应特性、信号处理速度等因素导致。合成标准不确定度和扩展不确定度的计算结果显示，该可燃气体检测报警器响应时间的扩展不确定度 $U=2s$ （ $k=2$ ）。这意味着在测量响应时间时，测量结果存在一定的误差范围，在实际应用中，如涉及到对可燃气体泄漏响应及时性要求较高的场景，这一不确定度可能会影响对泄漏情况的及时判断与处理。

综合示值误差和响应时间的实验结果分析可知，可燃气体检测报警器的误差来源复杂且相互关联。优化校准方法时，不仅要考虑对测量重复性的控制，如改进仪器的制造工艺、提高传感器的稳定性等，还要关注标准气体的准确性和可靠性，定期对标准气体进行核查与校准。同时，针对响应时间的误差问题，需进一步研究仪器内部结构和信号处理机制，优化仪器设计，以提高响应时间测量的准确性。通过对这些方面的改进，可以有效降低可燃气体检测报警器的误差，提高测量结果的准确性和可靠性，确保其在工业生产、安全监测等领域发挥更可靠的作用。

五、结语

可燃气体检测报警器的误差来源分析与校准方法优化是保障其可靠运行的核心问题。通过对误差来源的剖析可知，传感器性能、环境因素以及校准情况对测量结果影响显著。优化校准方法从多点校准、环境参数补偿和智能化校准系统着手，在一定程度上改善了测量的准确性和可靠性。但实验结果也显示，当前仍存在测量重复性影响大、不同气体测量结果差异等问题。未来应聚焦于进一步控制测量重复性，提升标准气体的质量，优化仪器内部结构与信号处理机制。持续改进校准方法，有助于推动可燃气体检测报警器技术的发展，为安全生产筑牢防线，在工业安全、城市燃气监测等领域发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 陈岚, 施马凯, 包亦杰. 可燃气体检测报警器检定装置计量比对结果分析[J]. 上海计量测试, 2024, 51(06): 57-60.
- [2] 陈勇, 刘慧波. 影响可燃气体检测报警器检定结果的因素分析及建议[J]. 品牌与标准化, 2023, (02): 78-80.
- [3] 邹翱. 影响可燃气体检测报警器测量结果的因素探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(10): 40-42.
- [4] 史苏娟, 王瑞, 徐春. 可燃气体检测报警器示值误差检测标准的讨论[J]. 计量与测试技术, 2022, 49(05): 55-57.
- [5] 张莉丽, 喻旭东, 薛成. 可燃气体检测报警器标定方法和示值误差超差的探讨分析[J]. 工业计量, 2020, 30(06): 99-100.