

气体传感器校准装置设计

梁杰, 晏天

(国家海洋局南海标准计量中心, 广州 510000)

摘要: 为提高气体传感器现场校准的稳定性和准确度, 降低环境条件改变对测量值的准确性和稳定性的影响, 简化校准程序降低管理成本, 设计了一种基于网络的远程校准装置, 该装置可以为气体测量仪器执行计量确认时提供可靠的标准量值; 首先, 校准装置获取传感器现场的温度和湿度, 通过 TCP/IP 网络将传感器测得的气体浓度和温度以及湿度传送至中央控制服务器, 由特定的校准算法计算出传感器的温度和湿度修正值; 然后, 用修正后的测量值对传感器进行计量确认; 实验表明, 经设计的校准系统校准的气体传感器与传统的校准方式校准的传感器相比测量值的稳定性和准确度更优, 其误差由 5.3%LEL 提高到 0.3%LEL, 标准偏差由传统校准方法校准后的 1.1%LEL 提高到 0.6%LEL。

关键词: 气体传感器; 校准装置; 远程校准; 温度补偿; 湿度补偿

Design of Gas Sensor Calibration System

Liang Jie, Yan Tian

(South China Sea Standard Metrology Center, Guangzhou 510000, China)

Abstract: To improve the stability and accuracy of gas sensor field calibration, reduce the impact of changing environmental conditions on the accuracy and stability of measurements, simplify calibration procedures and reduce management costs, a network-based remote calibration device was designed that provides a reliable standard value for the measurement of gas measuring instruments. First, the calibration device acquires the temperature and humidity at the sensor site, transmits the sensor's measured gas concentration and temperature and humidity to the central control server over the TCP / IP network, and calculates sensor temperature and humidity corrections using a specific calibration algorithm. Then, use the corrected measurement value to measure the sensor. The experimental results show that the gas sensor calibrated by the designed calibration system is more stable and accurate than the traditional calibrated sensor, the error increased from 5.3% LEL to 0.3% LEL, standard deviation from the 1.1% LEL after the traditional calibration method to improve to 0.6% LEL.

Keywords: gas sensor; calibration device; remote calibration; temperature compensation; humidity compensation

0 引言

气体测量仪是一种将气体的体积分数转化为电信号并以数字、图像、声音等形式进行输出的仪表装置^[1]。气体测量仪的核心部件为气体传感器, 目前市场上的气体传感器可以分为半导体式、电化学式、催化燃烧式、红外探测式等多种类型^[2]。这些气体测量装置在实际使用中多基于分布式的系统架构, 不同的测量单元通过有线或无线网络进行互联, 并通过中央控制单元进行远程管理, 共同组成气体监测网。分布式架构允许监测大范围的地理区域, 特别是在互联网的支撑下其监测范围又进一步进行了拓展, 更重要的是这种架构方式可以实时测量和存储不同测量单元提供的数据^[3]。

气体测量装置像其他测量仪器一样, 都面临着自身传感器的老化, 以及环境条件改变对测量值的准确性和稳定性的影响, 所以这些气体测量装置需要频繁的校准进行计量确认, 这些设备是安装在固定地点, 安装和拆卸比较困难费用较高, 很难在实验室的标准环境下对其进行校准, 需要技术人员到现场实地校准, 这导致该类设备管理成本高昂, 并且分布式架构进一步加剧了这种管理难度, 更重要的是校准后仪器的稳定性和准确度很难达到规程要求^[4]。为了简化校准程序降低管理成本, 本文提出了一种便携可移动式的校准装置, 可以为气体测

量仪器执行计量确认时提供可靠的标准量值。

1 系统结构及原理

校准系统如图 1 所示, 主要包括控制单元、气瓶、校准容器。

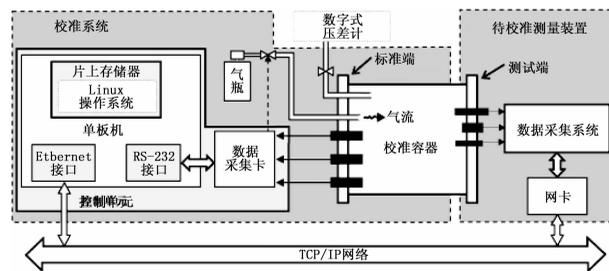


图1 校准系统

控制单元是基于 EX9529 的单板计算机并配有一个数据采集卡, 单板计算机是一个运行于 Linux 系统的通用性的小型计算机, 配有 32 MB 的片上存储器, 并嵌入一个 100/10 M 的 LAN 接口, 该小型计算机可以连接至网络, 允许对其进行远程编程, 数据采集卡主要执行气体浓度、温度、湿度数据采集和气流控制功能, 采集到的数据通过 RS-232 接口与单板计算机进行数据交互。

气瓶通过电磁阀连接到校准容器, 电磁阀由控制单元所控制。气瓶内存放已知浓度的混合气体, 气瓶内的气体可以通过管道输送到校准容器。校准容器内的气体浓度可以通过标准传感器进行测量, 在实际使用中可以使用不同的气瓶来进行扩展,

收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2017-11-08。

作者简介: 梁杰(1985-), 男, 广东广州人, 硕士研究生, 主要从事气体、密度、粘度测量方向的研究。

从而允许对不同传感器或单个传感器的交叉灵敏度进行验证。

校准容器是一个密封的空间，它是由圆柱形的中心体和可拆卸的圆形密封头组成，其中一个密封头在这里称为标准端，另一个称为测量端。标准端上安装有气体、温度、湿度标准传感器，这些传感器提供了校准过程中需要的气体、温度、湿度标准值。测试端是待校准装置的一部分，它提供了待校准装置需要的温度、湿度、气体的快速接口，从这些接口待校准装置的数据采集系统可以获得需要的数据。

校准容器的标准端安装有两个气体传感器，是由日本费加罗生产的 TGS6810 和 TGS5042，可以进行甲烷和一氧化碳的测量，测量的原理是基于气体浓度的变化导致其气敏电阻阻值的变化，阻值的变化转换为电压信号^[5]。由于气体传感器内的气敏电阻的阻值不但受到气体浓度的影响还受到温度和湿度的影响，温度影响其化学反应，湿度影响吸附在电阻上的水分，导致电阻值变化，因此在校准时需要测量气体传感器附近的温度和湿度，以对其进行温度和湿度的补偿修正。传统的校准方式是使用已经生产的标准气体对传感器进行直接的计量确认，未考虑温度和湿度的影响，导致计量确认后的测量准确度和稳定性偏低，所以在标准端需要安装温度和湿度传感器^[6]，在此温度选用 LM35 型温度传感器，湿度选用 HM1500 型湿度传感器。

标准端配备有两个快速密封转接头，其中一个用来连接气瓶管路管道，另一个连接数字压差计，数字压差计只有在进行校准时才使用，后续将会介绍。校准容器样机如图 2。

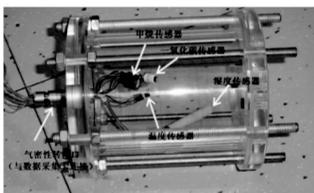


图 2 校准容器

该系统的核心部分为校准容器，标准气体是通过该容器按照克拉珀龙方程原理产生。根据克拉珀龙方程，在已知浓度的气体通入校准容器后会导致其内部压力变化和温度升高，在计算产生的新的气体的浓度时可以根据压差和温差以及已知的源气体的浓度计算出新的标准气体浓度，作为待校准传感器的标准气体。

2 校准流程

本文提出的校准装置不仅适用于校准单一气体测量装置也适用于校准大型分布式气体测量系统。

当单一的气体测量装置需要校准时，校准装置被派发到测量现场，通过远程控制获取测量装置的测量值并与参考标准值进行比较，根据比较的结果来确定是否在测量装置上执行计量确认程序。值得注意的是，该校准装置的使用不需要专业技术人员在现场，技术人员可以通过远程控制即可完成。降低了设备校准的人力成本。

大型分布式测量系统的校准分为两种情况，第一种是当系统中的每个测量单元都承担相同的测量任务，并执行相同的测量程序时，对这样的分布式测量系统的校准流程与校准单一的气体测量装置类似，中央服务器仅需要配置每个测量单元的 IP 即可；第二种是分布式系统中的测量单元承担的测量任务

不同，并且测量程序差异很大，对这样的分布式测量系统的校准，需要根据每个测量装置的实际执行情况来执行不同的校准程序，校准装置 (TS_1, \dots, TS_N) 需要根据被校准的单元进行单独的远程编程，以适应待校准装置的特点，把经过编程的校准装置派发到测量现场，通过远程中央控制服务器进行控制执行计量校准，分布式系统校准如图 3 所示。

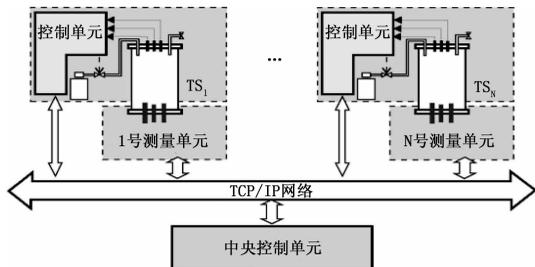


图 3 分布式系统校准

校准装置内的温度传感器和湿度传感器需要被定期进行计量校准，以确保其测量值的可信度。校准系统的量值溯源链如图 4 所示。

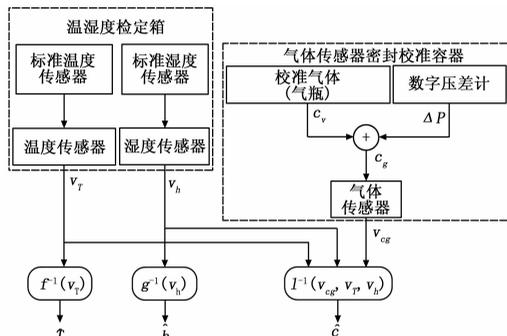


图 4 校准系统量值溯源图

对气体测量装置进行校准前，应将标准端置于温湿度检定箱对温度和湿度传感器进行计量确认。温度和湿度传感器的输出值分别为 v_T 和 v_h ，通过标准温度和湿度传感器和工作温湿度传感器的输出拟合成输出函数 f 和 g ，在实际使用中通过函数 f 和 g 的逆函数来计算测量值的标准值^[7]，接着通过快速转接头将标准气瓶和数字压差计接入校准容器，由于校准容器体积恒定，根据克拉珀龙方程校准容器内的气体浓度 c_g 可以用下式表示：

$$c_g = c_v \cdot \frac{T_g}{P_g} \cdot \left(\frac{P_g}{T_g} - \frac{P_0}{T_0} \right) \quad (1)$$

其中： c_v 是气瓶内的气体浓度， P_0 和 T_0 是校准容器内的初始压力和温度， P_g 和 T_g 是充入一定量的气体后校准容器内的压力和温度。

一般在气体充入校准容器内后温度的变化可以忽略即 $T_g \approx T_0$ ，式 (1) 可以简化为：

$$c_g = c_v \cdot \left(1 - \frac{P_0}{P_g} \right) \quad (2)$$

对式 (2) 进行变形：

$$c_g = c_v \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \Delta P / P_0} \right) \quad (3)$$

其中： ΔP 为校准容器内气体压力变化，通过数字压差计获得。

根据式 (3), 一般初始压力 P_0 的不确定度可以忽略不计, 则生成的气体浓度的不确定度由 c_v 和 ΔP 的不确定度构成。由于气瓶内的气体浓度和校准装置内的气体压力差没有相关性^[8], 即 $\rho(c_v, \Delta P) = 0$, 根据不确定度传播律可以推导出 c_g 的不确定度 $u(c_g)$ ^[9]。

$$u^2(c_g) = \left(1 - \frac{1}{1 + \Delta P/P_0}\right)^2 \cdot u^2(c_v) + \frac{(c_v \cdot P_0)^2}{(P_0 + \Delta P)^4} \cdot u^2(\Delta P) \quad (4)$$

其中: $\left(1 - \frac{1}{1 + \Delta P/P_0}\right)^2$ 和 $\frac{(c_v \cdot P_0)^2}{(P_0 + \Delta P)^4}$ 分别为 c_v 和 ΔP 不确定度的灵敏系数。

3 实验验证

3.1 气密性测试

校准容器的气密性直接影响生成气体浓度值的稳定性, 所以校准容器使用前需进行气密性测试^[10]。对样机进行 270 秒的测试实验, 用数字压差计记录校准容器内部的压力变化, 数字压差计每 1 秒钟记录一个压差数值, 记录结果如图 5。

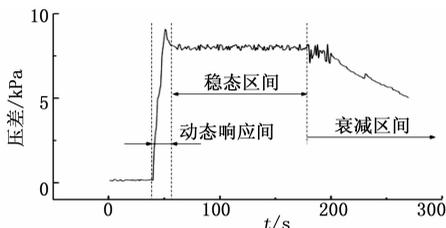


图 5 气密性测试

在测试过程中, 首先对压差计的零点进行 40 秒的稳定性测试, 并对其进行零点计量确认, 通入气体后经过近 10 秒的动态响应时间校准容器内的压力进入稳态, 持续约 130 秒后压力值进入衰减状态, 经过约 90 秒的衰减, 压差衰减到稳态的 60%, 校准容器气密性性能见表 1。

表 1 校准容器性能参数

零点波动 /kPa	反应时间 /s	稳态时间 /s	稳态均值 /kPa	稳态波动 /kPa	衰减速率 /(kPa/s)
0.1	9	128	8.1	0.2	0.035

用 700% LEL 的 CH_4 作为源气体 (实际浓度为 35%, CH_4 的爆炸下限为 5% LEL)^[11], 来验证校准容器的性能, 在标准状态下向校准容器内通入源气体, 通过压差计记录校准容器内部的压力变化, 以式 (3) 计算的气体浓度作为验证标准, 内部的高精度甲烷气体传感器测量值与验证标准进行比较来验证校准容器的性能。在测试 7 个浓度点时, 每个点的压差保持 2 分钟, 每 20 秒记录一个数据, 6 个数据的均值作为统计值, 统计结果如图 6。

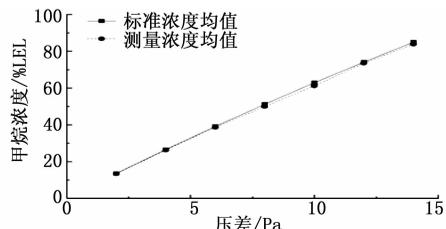


图 6 标准气体性能

表 2 校准容器验证数据统计

压差 /Kpa	标准浓度均值 /%LEL	测量浓度均值 /%LEL	浓度误差 /%LEL	相对不确定度 /%
2	13.6	13.5	-0.1	0.33
4	26.6	26.3	-0.3	0.21
6	39.1	38.7	-0.4	0.19
8	51.2	50.0	-1.2	0.20
10	62.9	61.2	-1.7	0.21
12	74.2	73.5	-1.7	0.23
14	85.0	83.9	-1.1	0.25

表中标准浓度是根据压差 ΔP 和源气体浓度 c_v 利用简化后的克拉珀龙方程计算所得, 测量浓度是通过经过计量确认后的高精度甲烷传感器实际测量所得, 通过比较二者的结果来评定简化后的克拉珀龙方程的正确性和校准容器的性能。国家计量检定规程要求甲烷气体传感器示值误差为 $\pm 5\%$ FS, 即 $\pm 5\%$ LEL^[12], 本文校准装置验证最大浓度误差为 -1.7% LEL, 为规程要求的 1/3, 且生成的标准气体的最大相对不确定度为 0.33, 满足作为标准气体的标准条件, 因此校准容器基本符合作为标准装置对气体传感器进行校准的要求。

3.2 温湿影响测试

在测试温度和湿度对传感器校准结果的影响时, 将校准容器置于温湿检定箱中, 通过调节温湿检定箱的温度和湿度, 来模拟传感器实际的工作环境。

在温度影响因素的实验中选取 $10^\circ C$ 、 $20^\circ C$ 、 $30^\circ C$ 、 $40^\circ C$ 共 4 个温度点在恒定的 45% RH 下进行实验, 为避免同一个温度点初始温度和测试时的温度的变化对压差的影响, 在对每个温度点进行测试时, 预先将校准容器置于温湿度检定箱中在相应温度点恒温 1 小时^[13], 不同温度点的测试结果如图所示。验证湿度对传感器的影响时, 在恒定的 $23^\circ C$ 条件下改变湿度检定箱的湿度值选取 40% RH、60% RH、80% RH 为测试点, 来模拟环境湿度, 测试结果如图 7 所示。

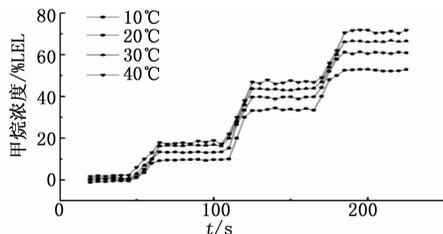


图 7 温度影响量测试

根据温度测试结果, 当传感器所处的环境温度改变时, 传感器的零点也会发生漂移, 当温度由 $10^\circ C$ 增加到 $40^\circ C$ 时零点漂移了近 2% LEL, 随着甲烷浓度的增加相同标准浓度在 $10^\circ C$ 和 $40^\circ C$ 条件下传感器测量值相差最大近 17% LEL, 这远远超出了 $\pm 5\%$ LEL 的规程要求, 所以在进行传感器实际计量确认时需要传感器的温度补偿。

由湿度测试结果可知, 甲烷传感器所处的环境湿度变化时, 传感器的零点发生了漂移。根据实验, 当湿度由 40% RH 上升到 80% RH 后, 甲烷传感器的零点漂移了 3.2% LEL, 当标准气体的浓度逐渐增加, 不同湿度环境下, 传感器的反应也不相同, 根据实验结果, 随着湿度增加, 传感器的测量灵敏度

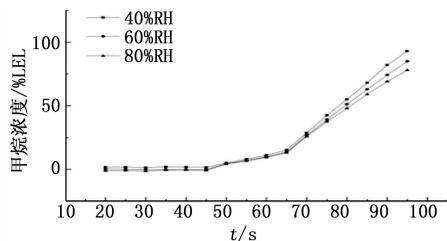


图 8 湿度影响量测试

会逐渐下降，同一点的测量误差会增大，40%RH 和 80%RH 的湿度下，测量值相差近 15%LEL，超过了检定规程 ±5%LEL 的指标要求。

由温度和湿度实验可知，在对传感器进行计量确认时有必要对传感器进行温度和湿度修正以获得更加准确的测量值。

3.3 校准结果与分析

用校准装置对工作用的甲烷传感器进行校准，之后在中央控制服务器上对采集到的气体浓度值进行温度和湿度影响量的修正，用修正后的标准量值对传感器进行计量确认，并与非标准状态下计量确认后的传感器性能进行比较。为避免非标准环境下影响因素对传感器零点的影响，在每次通入测试气体前传感器在高纯氮中清洗 1 分钟并对其零点进行计量确认。

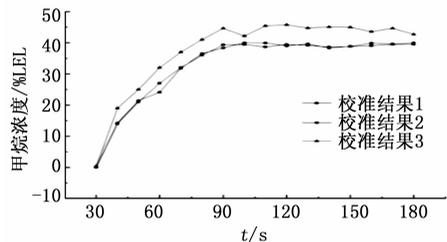


图 9 校准结果对比

其中，校准结果 1 是在实验室标准条件下，即温度 23℃，湿度 45%RH 环境中对甲烷传感器进行计量确认后对其测量性能的测试，在这里把他作为评定其他两种计量确认的参考标准；校准结果 2 是通过本文的校准装置在非标准环境下对甲烷传感器进行计量确认后进行的性能测试，测试时环境温度为 32℃，湿度为 65%RH，测试后的性能参数和校准结果 1 的性能参数基本一致；校准结果 3 是在非标准环境温度 32℃，湿度为 65%RH 下直接通过标准气体进行计量确认后的性能测试。3 种校准结果见表 3。

表 3 校准结果对比

	标准值 /%LEL	均值 /%LEL	误差 /%LEL	标准偏差 /%LEL
校准结果 1	39.1	39.2	0.1	0.3
校准结果 2	39.1	39.4	0.3	0.6
校准结果 3	39.1	44.4	5.3	1.1

通过 3 种校准方式进行计量确认后的测试结果可以看出，本文所设计的校准装置对传感器校准后，其测量结果与标准环境中计量确认后的测试结果基本一致，误差为 0.3%LEL，标准偏差为 0.6%LEL，与非标准状态下传统的校准方式相比，传感器的测量结果的稳定性和准确性有了一定的提高。

4 结论

本文根据克拉珀龙方程原理设计了气体传感器校准装置，并且该装置设计时加入了网络模块，技术人员可以通过远程编程进行计量确认，通过实验验证了该装置的计量性能，确认可以作为校准气体传感器的标准装置，该装置不但可以校准单一的气体传感器，还为校准大型分布式气体监测网提供了一种备选方案。经实际测试经过该校准装置进行计量确认后的气体传感器的稳定性与准确度和传统的计量确认后的测量性能相比有了较大的提高。

参考文献:

[1] 吴慧, 夏辉达, 刘文怡, 等. 用双路自校准法实现气敏传感器的长期稳定工作 [J]. 测试技术学报, 2004, 18 (z1): 223-225.

[2] 高铁山, 吴卿. 基于氧化锌气敏传感器的矿井气体无线监测系统 [J]. 中国测试, 2015 (11): 68-72.

[3] 张青云, 秦伟山, 祁泽刚, 等. 气体传感器的自动标定校准系统研究与设计 [J]. 计测技术, 2010, 30 (z1): 152-154.

[4] 张广军, 黄俊钦, 罗先和, 等. 气、湿敏传感器动态校准和动态性能改进研究 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23 (2): 206-208, 220.

[5] 何亮飞, 杨帮华, 张永怀, 等. 基于 CVI 的批量气体传感器数据采集系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2013 (12): 15-17, 20.

[6] 王德发, 吴海, 胡树国, 等. 气体标准物质研制过程中的核验及其不确定度贡献 [J]. 计量技术, 2012 (9): 21-24.

[7] 孙宝权. 气体计量标准装置检定能力验证测试 [J]. 油气田地面工程, 2016, 35 (8): 76-77, 81.

[8] 吴玉锋, 田彦文, 韩元山, 等. 气体传感器研究进展和发展方向 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11 (10): 731-734.

[9] 朱斌, 殷晨波, 陶春昊, 等. 基于恒流配气方式的微气体传感器测试系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (12): 2681-2687.

[10] 吕峰洁, 张永瑞, 杨刚, 等. 基于最小二乘法的气体传感器精度的研究 [J]. 电子科技, 2007 (6): 36-38.

[11] 刘子骐, 杨留芳. 基于 BP 人工神经网络的气体传感器温度补偿 [J]. 仪表技术与传感器, 2017 (4): 10-12.

[12] 刘涛, 田文, 樊强, 等. 气体分析仪测量不确定度的分析 [J]. 中国环境监测, 2009, 25 (5): 62-65.

[13] 张青云, 秦伟山, 祁泽刚, 等. 气体传感器的自动标定校准系统研究与设计 [A]. 第十三届中国湿度与水分学术交流会, 第十一届中国气湿敏传感技术学术交流会, 2010 年国防科技工业热工流量技术交流会论文集 [C]. 2010: 152-154.

(上接第 257 页)

[10] Niu B, Cheng J, Bai X, et al. Asymmetric propagation based batch mode active learning for image retrieval [J]. Signal Processing, 2013, 93 (6): 1639-1650.

[11] Sarafis I, Diou C, Delopoulos A. Building effective SVM concept detectors from clickthrough data for large-scale image retrieval [J]. International Journal of Multimedia Information Retrieval,

2015, 4 (2): 129-142.

[12] Son J E, Ko B C, Nam J Y. Medical Image Classification and Retrieval Using BoF Feature Histogram with Random Forest Classifier [J]. Translator, 2013, 2 (4): 273-280.

[13] Lowanshi V K, Shrivastava S, Richhariya V, et al. An efficient approach for content based image retrieval using SVM, KNN-GA as multilayer classifier [J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 107 (21): 43-48.