

◇ 研究报告 ◇

一种声速识别空气成分波动的自监督学习方法

滕旭东^{1†} 滕博欣²

(1 上海工程技术大学电子电气工程学院 上海 201620)

(2 上海市松江二中 上海 201620)

摘要: 实际空气成分比较复杂, 其声速的大小与标准空气的计算值有较大差异。文中根据维里展开式推导的声速方程, 分析实际空气成分的浓度微量波动与声速变化定量关系。基于理论计算值, 对比声速实测值, 提出一种基于声速差值的自监督学习方法分析空气成分波动。该方法首先计算各个时刻声速差值的分布距离, 接着确定分布最聚集区域, 进行统计声速差发生比例, 最后利用概率分布变化来发现空气成分, 尤其微量成分的波动。实测结果表明: 声速差发生概率曲线较好地反映空气成分浓度变化的起始、扩散和累积等阶段, 通过发生概率 P 值分布能够对空气成分波动状态进行识别和实时监控。

关键词: 声速; 维里展开式; 成分波动; 概率分布

中图法分类号: O422.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2024)06-1360-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.019

Self-supervised learning for identifying variations of air composition base on speed of sound

TENG Xudong¹ TENG Boxin²

(1 School of Electronic and Electric Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

(2 Shanghai Songjiang No. 2 High School, Shanghai 201620, China)

Abstract: As the actual composition of air is quite complex, the value of its speed of sound differs significantly from the calculated value for standard air. This article discusses the calculation of the speed of sound for standard air, furthermore analyze quantitative relationship between actual air composition and changes in the speed of sound. Theoretical results show that air composition, especially trace components, have a very small contribution to variation of the speed, thus making it difficult to discern slight fluctuations in the composition. To address this, a supervised algorithm for monitoring speed of sound error distribution is proposed to analyze air composition fluctuations. Firstly, the distance matrix of the difference between the measured and calculated values of the speed of sound is calculated, then the proportion of error values is determined, and finally, the distribution probability is analyzed to determine changes in air composition. This algorithm effectively tracks the beginning, diffusion, and accumulation of concentration changes and enables prediction and monitoring of air composition fluctuations quite precisely.

Keywords: Speed of sound; Virial expansions; Composition fluctuations; Probability distributions

2023-08-07 收稿; 2023-09-13 定稿

作者简介: 滕旭东 (1971-), 男, 上海人, 博士, 研究方向: 声传播与检测。

† 通信作者 E-mail: txd19@163.com

0 引言

空气中声速的影响因素包括空气成分、环境温度和大气压等,标况下(STP: 101325 Pa 和 0 °C),标准大气的声速为 $(331.46 \pm 0.05) \text{ m/s}^{[1-2]}$ 。但实际空气中成分并不稳定,测量大气声速值总会不同。理论上根据声速值可确定空气气体成分和各成分浓度,20世纪50年代,南京大学魏荣爵院士^[1]研究了水蒸气混合比对空气分子量的影响,给出理想气体状态下声速偏移量 Δc 和水蒸气混合比 w 的近似关系式,同时也指出“在从事声速的测量实验的时候,每一种空气的成分,都要能够精密的知道——密度或分子量须要准确到万分之一。”1965年,美国政府科技报告也证实大气成分的正常波动可能会在声速计算中引入不大于 0.02 m/s 的误差^[3]。显然,利用声速很难准确测定空气中各个气体成分浓度^[4]。因此,声速测量空气浓度的方法多用于空气中只有一种成分相对变化的情况^[5]。阎玉舜等^[6]假设气体均为理想气体,根据空气-氯气二元混合气体的平均声速和平均比热比的计算公式,使用一元二次方程建模声速值、温度和氯气浓度的解析关系。Wong利用Giacomo导出湿空气密度方程^[7],计算CO₂和水蒸气对空气摩尔质量、比热比的贡献率^[8],建立声速与温度、湿度和CO₂浓度的近似拟合方程。Cramer^[2]引入维里展开式,在Wong提出的近似方程中增加大气压参数,在0 °C~30 °C范围内得到更精确的空气声速计算值。由于空气不是完全的弹性介质,空气中声吸收会产生传播衰减问题,且不同气体声速的频散也存在差异^[9],Petculescu等^[4]将这些差异与不同气体分子种类的弛豫时间相联系,结合声速,构造一个有效复值波数计算有效比热,频率从 $\omega \rightarrow 0$ 向 $\omega \rightarrow \infty$ 顺时针移动形成的轨迹进行定量检测气体。考虑不同混合气体成分的声速频散曲线形状不同,文献^[10]提出一种大数据分析方法,利用小波多分辨率方法提取空气谱线的波峰幅度、位置等特征参数,使用支持向量机算法对空气和CO₂或甲烷等混合气体进行分类训练,实现了空气中探测一种或多种未知气体。

上述研究一般将空气假定为理想气体,且考虑成分浓度变化较大,这与真实室(内)外空气变化不相符,造成理论计算声速值存在较大误差或不具有参考意义。实际空气声速是温度和大气压的非线

性强函数,而空气各成分特别是空气污染物SO₂、NO₂、CO和O₃等浓度通常变化很小,所引起声速值变化往往被温度波动等因素所掩盖,无法单独分离测量,极大限制声学方法分析空气成分的应用场合。从这个意义上说,基于声速测量空气成分分析关键问题是如何检测和放大气体变化导致的声速的微小变化^[11]。本文在文献^[1-2,10]等研究基础上,利用实际空气维里展开式得到的声速方程,对比了温度变化与空气成分波动,特别是CO₂、NO₂等轻微波动时声速大小比例关系和定量计算问题。因此,提出一种无需训练集的自监督(声速计算值与实测值)数据分析算法,消除温度、湿度和大气压等影响,来识别空气成分浓度变化状态,确定空气稳定(成分)环境下的声速值。

1 声速理论基础

假设声波在空气中传播是小振幅微扰,振动过程为绝热的,且没有能量耗损,根据理想气体方程,则标准空气的声速为^[1,8]

$$c_0^2 = \gamma_0 \frac{RT}{M_a}, \quad (1)$$

其中, γ_0 为标准空气比热比; M_a 为标准空气摩尔质量,单位为 kg/mol; $R = 8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$ 为气体常数; T 为热力学温度,单位为 K。理想气体的声速平方与热力学温度 T 成正比。

不同地区空气成分与标准空气成分存在差异,由式(1)得到的声速并不准确。实际空气的比热比也不是常数,与气体种类、浓度、温度和压力都有关^[2,12]。因此,实际空气采用维里展开式修正理想气体方程,即:

$$\frac{pV_m}{RT} = 1 + B(T)/V + C(T)/V^2 + \dots, \quad (2)$$

其中, B 、 C 为第二、第三维里系数,得到更精确的空气声速方程^[2,13]:

$$c_1^2 = \frac{dp}{d\rho_m} = \frac{\gamma RT}{M} \left(1 + \frac{\alpha}{RT} p + \frac{\beta}{RT} p^2 + \dots \right), \quad (3)$$

其中, $\alpha = 2B(T) + 2(\gamma_0 - 1)T \frac{dB}{dT} + \frac{(\gamma_0 - 1)^2}{2\gamma_0} T^2 \frac{d^2B}{dT^2}$, 影响最大,其他系数对计算产生的误差很小,故式(3)进一步简化为

$$c_1^2 \approx \gamma \frac{RT}{M} \left(1 + 2 \frac{pB(T)}{RT} \right), \quad (4)$$

其中, $M = \sum_i x_i M_i$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 为混合空气摩尔质量; γ 混合空气比热比; B 为实际空气的第二维里系数, 即 $B(T) = \sum_i \sum_j x_i x_j B_{ij}(T)$, $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ 且 $B_{ij}(T) = B_{ji}(T)$; x_1, x_2, \dots, x_n 分别代表空气中第一种成分摩尔浓度, \dots , 第 n 种成分摩尔浓度。

图1为20℃、标准大气压103.25 kPa下, 根据公式(4)计算得到的湿度RH、CO₂浓度和温度变化对声速的影响。由图1(a)可见, CO₂的气体浓度越大声速越低, 当湿度RH为90%、CO₂浓度从1000×10⁻⁶到4000×10⁻⁶时, 声速从344.4 m/s降低到344.1 m/s; 而相对湿度RH越大声速越高, CO₂浓度为4000×10⁻⁶时, RH从0%变化到90%, 声速从343.1 m/s上升到344.1 m/s, 说明湿度RH对声速改变大于CO₂的影响。图1(b)为标准大气压103.25 kPa下, 温度和CO₂浓度变化对声速的影响。图中温度为30℃时, 空气中CO₂浓度在500×10⁻⁶的声速最大, 接近350 m/s, 随着CO₂浓度增加到4000×10⁻⁶以上, 声速下降, 仅为0.5 m/s, 下降率约0.05 ms⁻¹/400×10⁻⁶。若CO₂浓度保持不变, 25℃时空气声速下降到346 m/s附近, 下降率约

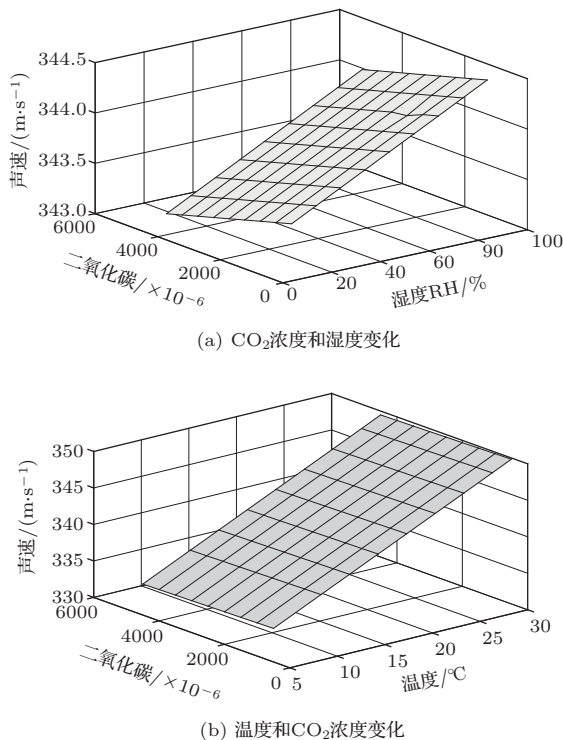


图1 空气中CO₂、湿度和温度对声速的影响

Fig. 1 Influence of CO₂, temperature and relative humidity on the speed of sound in air

为0.05 ms⁻¹/0.1℃。可见温度下降0.1℃, 声速变化量相当于标准空气CO₂浓度增长一倍的效果。显然, 声速计算成分浓度时, 必须排除温度因素的影响。

图2为在20℃、标准大气压下, 标准空气分别与CO₂、NO₂混合形成的二元气体的声速曲线。图2(a)中CO₂浓度为500×10⁻⁶时声速为343 m/s, 随着浓度增长到4500×10⁻⁶达到重污染程度, 声速仅下降0.3 m/s, 变化较小; 图2(b)中NO₂浓度从0.1 mg/m³增加到0.8 mg/m³时声速变化也很小, 仅下降0.04 m/s; 而实际上空气中NO₂浓度通常小于0.1 mg/m³, 其声速变化量级达到10⁻³以下。可见即便是温度或大气压的微扰对声速的影响都显著大于气体成分波动引起的声速的变化。

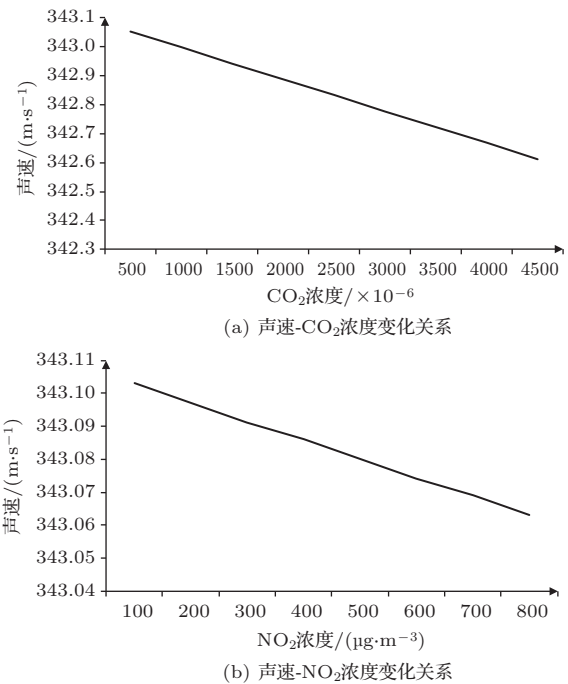


图2 空气中成分浓度变化对声速影响

Fig. 2 The effect of CO₂ concentration or NO₂ concentration on the speed of sound in the air

上述理论计算表明温度、大气压和湿度对空气声速影响很大, 这些参数的轻微变化对声速的改变都会干扰空气成分浓度精确测量和计算。

2 空气成分波动的自监督学习方法

同一区域空气成分通常比较稳定, 除温度外, 一般声速变化主要考虑CO₂浓度和湿度的影响^[1]。由于室内空气扩散流动较慢, 空气中成分浓度变化

总是渐进积累,其声速变化也呈现渐变过程,故声速测量的跳变一般不是成分变化引起。

算法思想:以采用式(4)计算得到的声速作为基准,将实际测量值与基准值比较得到声速差。通常,空气中成分相对稳定,随机误差引起的声速差分布聚集,位于一个中心区域,但如果是空气成分波动引起的声速差会偏离中心区域,通过分析声速差的分布统计特征^[14-15],可以发现空气成分波动情况。

算法过程:首先计算声速的测量值与计算值的声速差 δ ,按采样时间先后构造一个误差距离矩阵:

$$D_M = \begin{pmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,n} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{n,1} & d_{n,2} & \cdots & d_{n,n} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中, d_{ij} 为两个时刻的声速差 δ_i 和 δ_j 的Hellinger距离,即

$$d_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sqrt{\delta_i} - \sqrt{\delta_j})^2}. \quad (6)$$

矩阵 D_M 为对称矩阵, n 代表样本点数。将矩阵行中元素累加最小的行,记作为 $d_{k,j}$ ($j = 1, 2, \dots, n$),该行代表最典型声速差分布值,依次统计 d_k 行内比元素 $d_{k,j}$ ($j = 1, 2, \dots, n$)大的元素个数,计算所占总样本数 n 的比例:即

$$z_j = \left| \frac{1}{n} \sum_j d_k < d_{k,j} \right|, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

z 值较大,声速误差 δ 分布越集中,反之越分散,表明空气成分差异越大。 $z = 1$ 表示样点 i 和样点 j 的声速误差 δ_i 和 δ_j 一致; $z = 0$ 则表示 δ_i 和 δ_j 相差最大,空气成分发生较大变化。依据文献[15], z 值分布满足均值为0.5、方差为 $1/\sqrt{12n}$ 的正态分布,即

$$z \sim N\left(\frac{1}{2}, \sqrt{\frac{1}{12n}}\right). \quad (8)$$

划分样本点数 n 为若干段,每个段根据 z 值大小,计算发生概率 P ,即

$$P = \frac{\sqrt{12n}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(z-1/2)^2}{2(1/\sqrt{12n})^2}\right] dz. \quad (9)$$

若计算概率 P 较大,代表该区域空气成分趋于稳定,此时存在的声速差 δ 可归结测量仪器精度引起的随机误差;若发生概率 P 小于0.1,则说明该区域的声速值为小概率事件,但确实发生了,表明声速发生较大不同,即空气成分发生显著改变。

3 实验测试

实验硬件系统由超声波流量计(内置温度和气压传感器)、湿度计、CO₂检测仪、USB串口通信模块和电脑等组成,如图3所示。超声波流量计测量声速(m/s),湿度计和检测仪分别测量空气相对湿度(RH%)和CO₂浓度($\times 10^{-6}$)。



图3 实验硬件测试平台

Fig. 3 Experimental testing platform

实验过程:超声波流量计(罗美特自动化仪表公司提供)使用时差法测量声速,测量精度不低于0.1 m/s。湿度计测量范围为RH 10%~90%。所测量参数包括温度、湿度、CO₂浓度和大气压等数据通过串口通讯传输到电脑处理。

实验1 在某单位餐厅工作间采集声速、相对湿度、大气压和CO₂浓度($\times 10^{-6}$)等参数。图4为50 min内空气声速随时间变化的曲线。

由式(4)计算的声速如图4(a)虚线所示。相对时间从0开始计时,到50 min结束。由图4(a)可以看出,随着计时开始,工作间温度在上升,声速也开始提高,比较实际测量声速,见图4(a)实线,二者变化趋势一致,且差值总体上稳定,仅在个别位置发生波动。从声速变化曲线很难区别测量噪声还是空气成分发生波动造成声速轻微抖动,其次不容易确定空气成分稳定时环境声速值大小。

图4(a)理论计算值考虑了温度、CO₂含量和相对湿度对声速波动的影响,因此,实测声速值与理论值差值,除去测量噪声引起的恒定差,余下声速差值应该认为是其他气体浓度波动所造成。图4(b)中 z 值在第5、第25和第35 min附近较小,说明这些时刻声速比较异常,表明空气成分在这些时段可能发生变化;根据 z 值所计算发生概率 P 如图4(b)所示。图中 P 曲线在开始阶段迅速下降,表明空气成分开始变化,5 min后 P 值达到最小,接近0.01,表明的

确发生变化,空气成分的浓度变化达到最大;但随着工作间排气扇持续工作,变化气体浓度开始下降;由于烹饪过程的间或进行,在第20 min和第35 min也出现小极值点,但工作间气体浓度变化总趋势趋于稳定,发生概率 P 趋于1。此时声速为空气成分稳定后的环境声速,对比图4(a),可知工作间空气成分稳定后的声速为347.4 m/s。需要注意的是,此时,环境声速变化不大,仅表示空气成分相对稳定,但不能表明空气中成分达到标准或无污染状态。

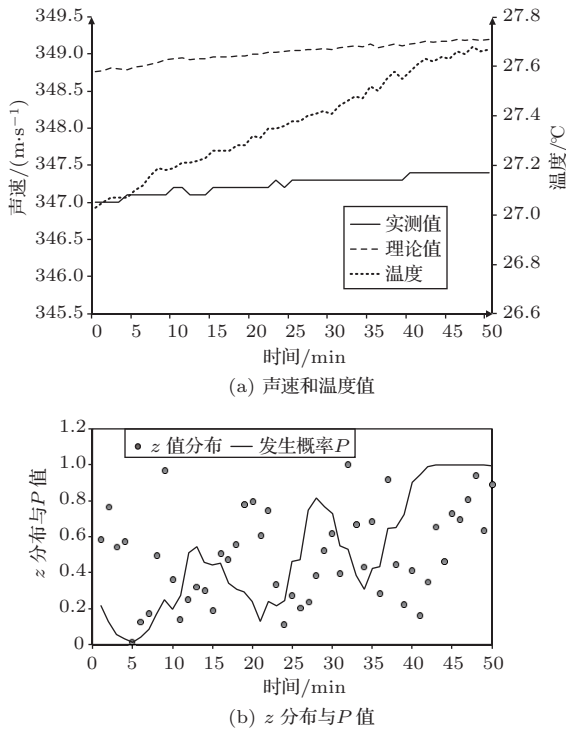


图4 声速变化和发生概率 P 曲线

Fig. 4 Curve of speed of sound and z -value distribution and probability P curve

实验2 某实验室20 min内释放天然气到空气的声速数据自监督分析。图5为所采集空气声速、环境温度以及发生概率 P 变化曲线。13:31开始测量空气声速;13:35打开天然气阀门(无燃烧),以2000 Pa压力向室内释放天然气;13:47关闭天然气阀门;13:51结束声速测量。声速采集仪距离天然气出气口10 cm。

图5(a)横坐标为对应时间,实测声速变化曲线如图5(a)实线所示,虚线为环境温度。图中可见,在20 min内环境温度不断上升,声速也在变大。13:35打开天然气阀门后,声速并没有发生异常变化,仍维持在348.6 m/s附近,直到13:39,温度上升加快,声

速才发生较大变化;13:47关闭阀门,声速也没有明显变化,基本保持在349 m/s,尽管在13:39和13:47附近处出现跳变,但从时间点和变化趋势看应该为环境扰动。因此,传统方法上仅从声速变化,难以区分天然气成分泄露还是温度变化对声速的影响。

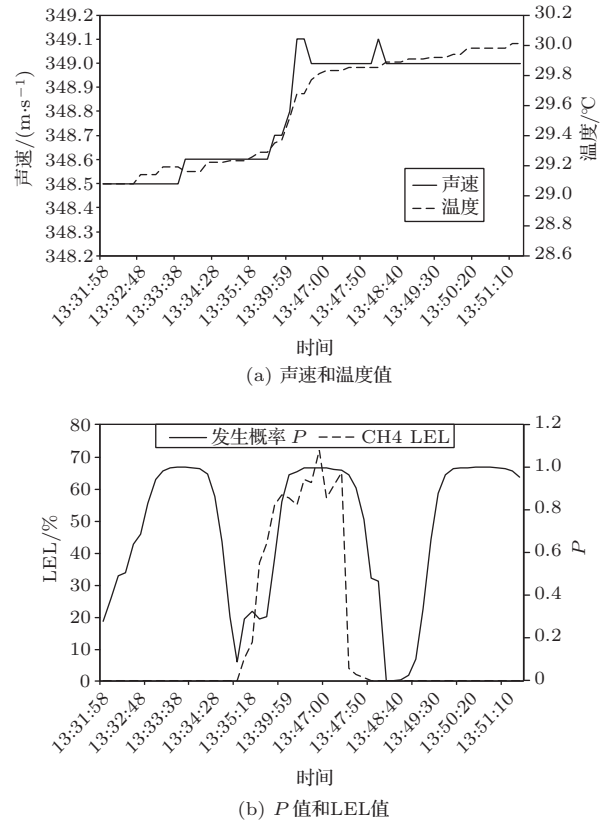


图5 声速、发生概率 P 和甲烷浓度变化曲线

Fig. 5 Curve of speed of sound probability P and methane concentration curve

图5(b)为自监督分析方法处理声速后的变化曲线。虚线为甲烷传感器测量的甲烷爆炸下限百分比(LEL)曲线,实线为出现概率 P 曲线。13:35天然气阀门刚打开,天然气开始扩散到空气中, P 曲线在该时刻附近出现极点小于0.1,识别到空气成分发生变化,此时甲烷LEL仅为5%,浓度很低;随着天然气不断释放,空气中甲烷浓度迅速增加到50%,在13:39以后基本稳定,扩散累积达到平衡,此时出现概率 P 接近于1,表明空气成分变化处于稳定,此时环境声速变化应该很小,与图5(a)测量的声速变化情况一致;13:47后关闭天然气阀门,甲烷浓度开始下降,在1 min内LEL从60%下降到5%,对应的出现概率 P 下降,在13:48时 P 值低于0.1,表明空气成分再次变化,此时空气成分中甲烷浓度很低。由

于在正常室内环境下,甲烷扩散速度较慢,故阀门关闭后会延迟1 min,空气成分恢复基本正常。对比甲烷传感器LEL结果,发生概率 P 准确地反映空气成分波动情况,从开始出现甲烷到甲烷扩散以及积累平衡,整个浓度变化过程都得到较好反映。

4 结论

空气成分变化影响声速大小,由于维里系数、比热比等热力学参数测定困难,仅应用声速来分析空气成分,特别是浓度很低的成分时会产生较大误差。文中引入自监督数据分析思想,通过计算声速误差距离矩阵进行分类,确定异常声速时刻,计算发生概率,从而获得空气波动的开始、扩散到稳定整个变化过程。结合已知环境实际情况,能确定空气成分类型。理论和实测结果表明:

(1) 针对二元混合空气,理论上可以较精确地计算气体浓度,但针对三元以上混合空气比较困难。(2) 声速变化是多个因素共同作用的结果,不一定是空气成分发生变化。(3) 声速理论值和实测值误差与空气浓度变化没有严格的线性关联,误差大不代表成分波动也大。(4) 误差分布范围和其发生概率能准确反映空气成分波动,不受湿度、温度和大气压等因素的影响。当 P 小于0.1时,空气成分发生显著变化;当 P 大于0.3时,空气成分变化不明显,基本保持稳定。

实际环境中,空气成分一般相对稳定,空气成分波动的渐进过程才能真实反映出气体泄露、污染扩散和异常气体产生等情况,不受偶然因素的影响,包括测试点距离范围和传感器种类。根据式(4)计算声速值仅在一定温度和大气压范围内比较准确,超过其适用范围则会带来较大误差,造成对空气成分波动的误判;同时自监督数据方法存在样本量选择问题,故每次实时处理的声速、温度、湿度和大气压等采样点数也需要实验来确定。另外根据 P 值确定空气成分发生波动,但不能确定具体成分或准确的浓度值,需要结合环境声速及声散谱吸收系数等测量值来分析和计算,这些问题将在后续的研究中进一步讨论。

参 考 文 献

[1] 魏荣爵. 空气中声速的准确计算[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1955(1): 55-63.

- [2] Cramer O. The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 93(5): 2510-2516.
- [3] Low R D H. Variations in the speed of sound due to atmospheric composition[R]. NTIS (National Technical Reports Library): Acoustics, 1965, 196613: 1-13.
- [4] Petculescu A, Lueptow R M. Future trends in acoustic gas sensing[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(3): 1959.
- [5] Doubek M, Vacek V, Hallewell G, et al. Speed-of-sound based sensors for environmental monitoring[C]. 2016 IEEE Sensors, 2016.
- [6] 阎玉舜, 陈亦娟, 汤建明. 超声分析二元混合气体浓度的理论及应用[J]. 声学技术, 1995, 14(3): 105-108.
Yan Yushun, Chen Yijuan, Tang Jianming. The theory and its application to analysis of binary gas concentration use ultrasonic[J]. Technical Acoustics, 1995, 14(3): 105-108.
- [7] Davis R S. Equation for the determination of the density of moist air (1981/91)[J]. Metrologia, 1992, 29(1): 67-70.
- [8] Wong G S K. Approximate equations for some acoustical and thermodynamic properties of standard air[J]. Journal of the Acoustical Society of Japan, 1990, 11(3): 145-155.
- [9] 张克声, 张向群, 邵芳. 声弛豫过程影响下的气体平衡态热容合成方法及其在气体检测中的应用[J]. 声学学报, 2020, 45(3): 394-403.
Zhang Kesheng, Zhang Xiangqun, Shao Fang. Acoustic method of synthesizing equilibrium heat capacities of excitable gases under influence of acoustic relaxation process and its application in gas detection[J]. Acta Acustica, 2020, 45(3): 394-403.
- [10] 贾雅琼. 气体超声波谱的构建及其在气体探测中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [11] Toda H. The precise mechanisms of a high-speed ultrasound gas sensor and detecting human-specific lung gas exchange[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(6): 249-249.
- [12] 谭羽非, 吴家正, 朱彤. 工程热力学[M]. 第六版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [13] 吴江涛, 刘志刚. 用音速确定 HFC125 的第二维里系数和分子间势能参数[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(11): 5-8, 26.
Wu Jiangtao, Liu Zhigang. Determination of the second virial coefficient and intermolecular potential parameters of HFC125 from sound speed[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(11): 5-8, 26.
- [14] 肖旭, 王同, 王文博, 等. 基于多域特征提取和深度学习的声源被动测距[J]. 应用声学, 2021, 40(1): 121-130.
Xiao Xu, Wang Tong, Wang Wenbo, et al. Source ranging based on deep learning and multi-domain feature extraction: synthetic results[J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40(1): 121-130.
- [15] Teng X D, Zhang X, Fan Y T, et al. Evaluation of cracks in metallic material using a self-organized data-driven model of acoustic echo-signal[J]. Applied Sciences, 2018, 9(1): 95.