

基于 Goertzel 算法的红外气体检测方法

李唐安,李世阳*,张家明,孙 轩,郭荣静

(上海交通大学 仪器科学与工程系,上海 200240)

摘 要: 基于红外热释电原理的测量方法有测量方便、寿命长、功耗低等优点,因此,红外热释电测量气体在城市管网、环境监测等场合的气体测量监控系统中得到了广泛应用。在红外热释电气体测量过程中,测量结果易受多频段信号的干扰,直接导致测量精度不高。因此,提出基于 Goertzel 算法的红外热释电气体测量方法,对 AD 获取的信号进行数字滤波处理。仿真分析并对比 Goertzel 算法和移动平均算法的滤波效果,仿真结果表明:Goertzel 算法滤波误差为 0.166 7%,测量波动为 0.058%,比移动平均算法精度和稳定度分别提高 51 倍和 18.4 倍。最后通过搭建实验系统进行测试,结果表明:Goertzel 滤波算法能有效地提高整体气体浓度测量精度和稳定度,测量精度能达到 ± 4 ppm 左右。

关键词: 红外热释电; Goertzel 算法; 滤波; 气体检测

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0304003

Infrared detection method of gas based on Goertzel algorithm

Li Tang'an, Li Shiyang*, Zhang Jiaming, Sun Xuan, Guo Rongjing

(Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The measurement method based on infrared pyroelectric principle has the advantages of convenient measurement, long life, low power consumption, etc. Therefore, gas measurement, based on infrared pyroelectric has been widely used in the gas measurement monitoring system of urban pipe network, environmental monitoring and other occasions. However, in the infrared pyroelectric gas measurement, there will be multi-frequency interference signal mixed in output signal, which directly leads to low measurement accuracy. To solve this problem, infrared pyroelectric gas measurement method based on Goertzel algorithm was proposed, and the signal acquired by the AD was processed by digital filtering. Simulation analysis and comparison of filtering effect between Goertzel algorithm and moving average algorithm was finished. The simulation results show that Goertzel algorithm has filtering error of only 0.166 7%, variation size of the measurement result is only 0.058%, and its accuracy and stability are 51 and 18.4 times better than the moving average algorithm, respectively. Finally, an experiment system was built, and the measured results show that Goertzel filter algorithm can effectively improve measurement accuracy and stability of the gas concentration, and the measurement accuracy can reach ± 4 ppm.

Key words: infrared pyroelectric; Goertzel algorithm; filter; gas detection

收稿日期:2018-10-03; 修订日期:2018-11-15

作者简介:李唐安(1994-),男,硕士生,主要从事红外热释电气体检测方面的研究。Email: litangan9143@163.com

通讯作者:李世阳(1969-),男,副教授,博士,主要从事压电材料方面的研究。Email: shiyangli@sjtu.edu.cn

0 引言

与半导体和电化学气体传感器相比,基于红外热释电技术的气体测量方法具有低功耗、体积小、寿命长和工作环境要求不高等优势,被广泛应用在工业、商业、安全监控、城市管网等领域 CO₂、CO、CH₄、H₂S、碳氢化合物、氮氧化合物等气体的检测^[1-5]。

测量探头是影响整个气体监测系统测量精度的主要原因之一。目前国外几个大型红外热释电气体测量厂家:德国 Infratec、美国 Honeywell、日本 Figaro 的探头工艺各有所长,但都具备先进的防干扰技术以及较高的测量精度。相比之下,国内生产的红外热释电探头,测量的精度不高,测量的稳定性和抗外界干扰性能也较为欠缺。

然而,仅有高性能气体探头是不够的,红外光源的稳定性、电子元器件精度和工作环境都是影响整个监测系统的重要因素。为了减小上述几个因素对测量精度的影响,探头输出信号的后续处理是确保高测量精度的重要措施。由于红外热释电探头有探测灵敏度高的特点,探头在低频段工作时极易受高频和工频信号干扰。参考文献[6]将重点放在硬件滤波电路对信号进行滤波处理,而忽视数字滤波的重要性。硬件滤波虽然能一定程度上降低干扰信号对输出信号的影响,但降低效果有限。在高精度需求情况下,单单采用硬件滤波对信号进行滤波处理无法满足使用需求。

数字滤波算法是能够在外界干扰严重和测量探头精度不高的不利情况下,对测量精度进行提高的一种有效方法^[6-7]。在相同的环境下,数字滤波能够在不改变外设电路的情况下,仅需改变设置参数就能方便快捷地对信号进行各种滤波处理,而硬件滤波则需要根据具体滤波需求重新设计外设电路的参数并更换元件,比较费时费力,甚至可能引入其他干扰信号。

文中对红外热释电气体测量方法中的数字滤波算法进行了研究,通过对基于 Goertzel 算法的数字滤波方法进行仿真分析和比较,设计制做了红外热释电气体检测装置,并通过实验验证了该算法的滤波效果。

1 红外热释电测量原理

热释电晶体在红外光的作用下,温度产生变化

从而产生电效应。红外光在透过介质时,气体的光吸收度遵循 Lambert-Beer 定律。

$$A = -\log_{10} \frac{I_t}{I_0} = \log_{10} \frac{1}{T} = Klc$$

式中:A 为吸光度;I₀ 为入射光的强度;I_t 为透射光的强度;T 为介质透光度;K 为摩尔吸收系数;l 为介质厚度;c 为介质的浓度。

图 1 为红外热释电测量气体浓度原理,光源发射出的红外光通过固定长度气室中含有被测气体组分的气体层,由于待测气体的浓度不同,吸收特定波长的红外线的能量就不同,因而被探测器端所接收的能量就不同,进而通过热释电效应输出的电压信号也就不同。通过获取探头输出的电压信号,便能得知待测气体的浓度。

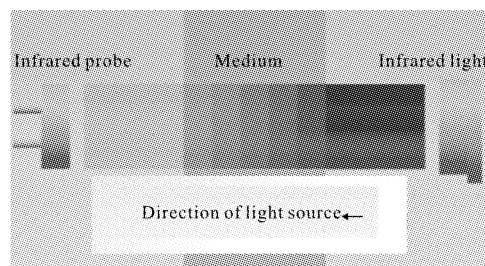


图 1 红外热释电测量原理

Fig.1 Principle of infrared pyroelectric measurement

2 数字滤波算法

数字滤波算法作为最常用的信号处理方法,其实质主要是去除由随机干扰引起的误差。目前常用的几种数字滤波算法有移动平均值滤波算法、加权平均滤波算法、低通滤波算法等^[8]。其中移动平均值滤波算法操作简单、能有效提升精度,是目前使用最频繁的一种滤波算法,该滤波算法通过移动窗口将目标值进行平均值或者拟合取值,随着窗口的平移,将获得一系列滤波后的信号值。这种算法操作简单,但滤除噪声干扰能力始终有限,并不适用于高精度测量环境。

Goertzel 算法是一种离散傅里叶变换 (DFT),和传统的快速傅里叶变换相比,Goertzel 算法省略了很多不必要的计算,无论从速度还是从实现的便捷性都有显著的提升。Goertzel 算法作为一种迭代算法,适合实时在线计算少数频点的 DFT^[9-10]。

假设单片机 AD 采样信号为 $X(m)$ ，长度为 N ， $m \in [0, N]$ ，其中 n 为整数，则 $x[n]$ 的 DFT 为：

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{-nk} \quad k=0,1,2,\dots, N-1 \quad (1)$$

由于 $W_N^{-Nk} = e^{-j(\frac{2\pi}{N})(-kN)} = 1$ ，公式(1)可化为：

$$X(k) = W_N^{-Nk} \sum_{n=0}^{N-1} x(m) W_N^{km} = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) W_N^{-k(n-m)} \quad (2)$$

然后，定义函数 $Y_k(n)$ ：

$$Y_k(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) W_N^{-k(n-m)} = x(n) \otimes h_k(n) \quad (3)$$

$$h_k(n) = W_N^{-kn} u(n) \quad (4)$$

由此可见 $Y_k(n)$ 是有两个序列卷积而成，其中 $x(n)$ 为输入的 N 点序列， $h_k(n)$ 为滤波器冲激响应序列。对公式(4)进行 Z 变换，得：

$$H_k(z) = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}} \quad (5)$$

则该一阶系统的递推方程为：

$$Y_k(n) = W_N^{-k} Y_k(n-1) + x(n), \quad y(-1) = 0 \quad (6)$$

按照公式(1)直接计算 N 点的离散傅里叶变换，需要进行 $4N^2$ 次实数乘法和 $N(4N-2)$ 次实数加法，按照 Goertzel 算法，则需要 $4N^2$ 次实数乘法和 $4N^2$ 次实数加法。由此得出 N 不大时，算法效率不高，因此需要对 Goertzel 算法进行改进。

将公式(5)的分母分子同乘 $(1 - W_N^{-k} z^{-1})$ 得公式(7)，该二阶 IIR 滤波器的传递函数 $H(z)$ 为：

$$H(z) = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}} = \frac{1 - W_N^k z^{-1}}{1 - 2\cos\left[\frac{2\pi k}{N}\right] z^{-1} + z^{-2}} \quad (7)$$

该二阶滤波器的迭代公式为：

$$U_k(n) = 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) U_k(n-1) - U_k(n-2) + x(n)$$

$$Y_k(n) = U_k(n) - W_N^{-k} U_k(n-1) \quad (8)$$

$$U_k(n-1) = U_k(n-2) = 0$$

按照改进的 Goertzel 算法，则需要进行 $2(N+2)$ 次实数乘法和 $4(N+1)$ 次实数加法，该方法计算的效率就提升了 1 倍。完整的 Goertzel 算法实现流程如图 2 所示。

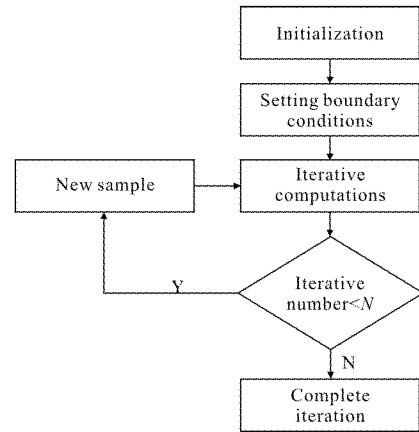


图 2 Goertzel 算法流程图

Fig.2 Flow chart of Goertzel algorithm

3 算法对比仿真

红外热释电探头输出信号通常为正弦波信号，通过 Matlab 软件分别编写 Goertzel 算法和移动平均值算法对幅值为 1.2 V 的正弦信号进行数字滤波处理仿真，由于大多数高精度测量模块一般带有硬件模拟滤波电路，硬件滤波部分已经对正弦波进行初步的带通滤波，因此，此文考虑在正弦信号上添加白噪声进行滤波效果仿真。

图 3 为分别添加了均值为 0.1 的白噪声的 5 Hz 正弦信号和 10 Hz 正弦信号。仿真使用的采样频率为 650 Hz，采集 780 个点。图 4 为未使用任何数字滤波算法时，从图 3 中采集到的信号峰值。图 5 为将图 3 中信号分别进行移动平均值滤波和 Goertzel 算法滤波处理后的输出信号幅值。

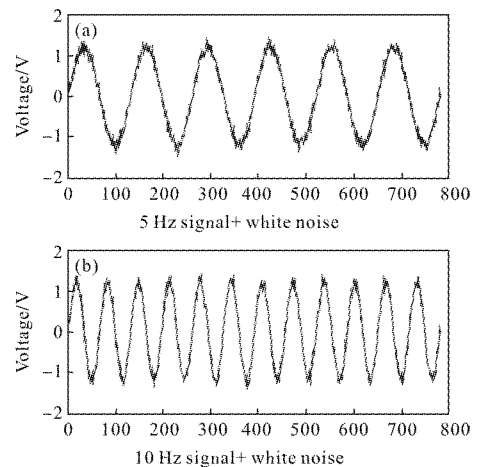


图 3 添加白噪声后的 5 Hz 和 10 Hz 信号

Fig.3 5 Hz and 10 Hz signal added with white noise

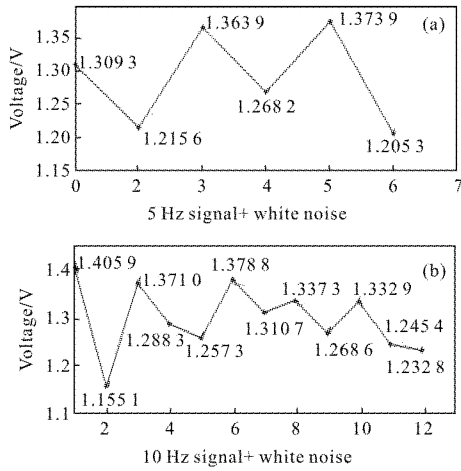


图 4 添加噪声后的直接采样值

Fig.4 Direct sample value after adding noise

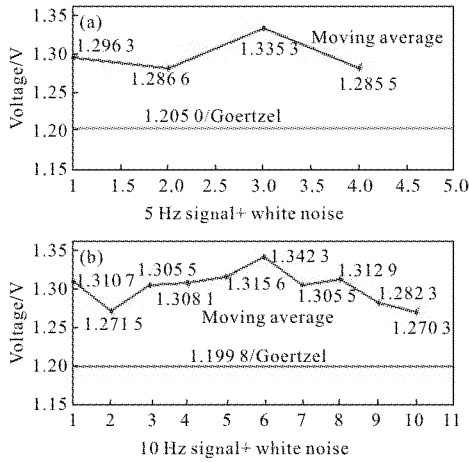


图 5 数字滤波算法处理结果

Fig.5 Processed result of digital filter algorithms

表 1 为两种算法和未经任何算法处理的信号均值、标准差和误差, Goertzel 算法处理的 5 Hz 信号和 10 Hz 信号的误差分别为 0.416 7% 和 0.166 7%, 标准差分别为 0.001 2 V 和 0.000 7 V; 移动平均处理的 5 Hz 信号和 10 Hz 信号的误差分别为 8.266 7% 和

表 1 三种情况下的处理结果

Tab.1 Processed result under three conditions

		Without algorithm	Moving average algorithm	Goertzel
Average ±std	5 Hz	1.289 4± 0.065 9 V	1.2992± 0.022 V	1.205 0± 0.001 2 V
	10 Hz	1.298 7± 0.068 6 V	1.302 5± 0.021 V	1.199 8± 0.000 7 V
Error	5 Hz	7.433 3%	8.266 7%	0.416 7%
	10 Hz	8.225 0%	8.541 7%	0.166 7%

8.541 7%, 标准差分别为 0.022 V 和 0.021 V; 未进行任何处理的 5 Hz 信号和 10 Hz 信号的误差分别为 7.433 3% 和 8.225 0%, 标准差分别为 0.065 9 V 和 0.068 6 V。

仿真结果表明:

(1) 数字滤波算法能提高测量的稳定性, Goertzel 算法、移动平均算法滤波误差分别比未进行任何处理方法的稳定性提高 54.9 和 2.99 倍;

(2) 使用 Goertzel 算法滤波误差分别比移动平均算法和未进行任何处理方法的精度提高 51 倍和 49.3 倍。无论是 5 Hz 还是 10 Hz 的 AD 采集信号, 与移动平均值滤波的信号相比, Goertzel 算法处理效果更出色。

4 实验测试与分析

4.1 实验设备

为了验证 Goertzel 算法在实际气体浓度检测中的数字滤波效果, 设计并制作了以 MSP430 为核心处理器的低浓度二氧化碳探测器模块进行试验验证, 其中红外探头采用德国 Infratec 的单通道电流型探测器 LME-335, 探测率为 $6 \times 10^8 \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$, 电压响应率为 $85\,000 \text{ V/W}$, 噪声密度为 $45 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 滤光片中心波长为 $4.26 \mu\text{m}$ 。气室采用扩散型, 长度为 6 cm。红外光源工作频率为 5 Hz, 工作电压为 4.2 V。二氧化碳检测范围为 0~2 000 ppm, 实验样机如图 6 所示。红外热释电探头输出的信号经过模拟滤波电路后分两路: 一路 AD 采样后直接在显示屏上显示; 另一路经过 Goertzel 算法数字滤波后, 再显示在显示屏上。

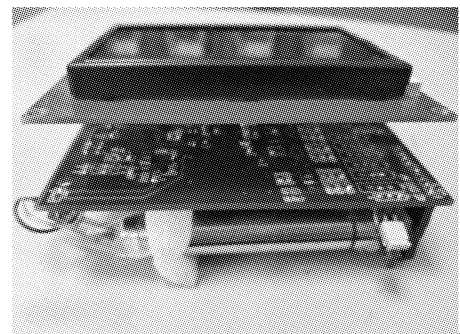


图 6 自制红外热释电气体探测样机

Fig.6 Self-made experimental prototype for infrared pyroelectric gas detection

4.2 实验结果与讨论

图 7 为实验设备示意图,实验中,将整个二氧化碳检测模块放于密封铜皮箱中,防止引入过多的外界干扰,然后使用配气泵在密封气箱内部依次充入浓度为 0、1 000、2 000 ppm 的二氧化碳气体,并在每次通完气体后静置 10 min,然后分别读取显示屏上的数字滤波前后的电压数值。

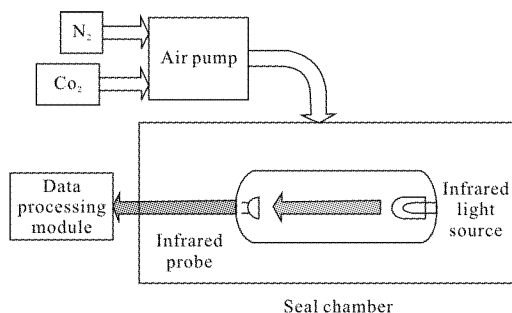


图 7 测试装置原理图

Fig.7 Schematic diagram of testing device

表 2 为测量电压值。从表 2 可知,未经滤波算法处理前,测量电压的波动值达到 ± 2.5 mV 左右,换算成浓度则精度 ± 15 ppm 左右,无法进行高精度低浓度二氧化碳浓度测量。将 Goertzel 滤波算法用于数字滤波模块中,得到的显示屏电压如表 2 所示,测量电压的波动值仅 ± 0.7 mV 左右,换算成浓度则精度仅 ± 4 ppm 左右,测量精度明显的提升 3 倍左右。

将两次实验进行比较,使用 Goertzel 滤波算法的气体测量电压波动为 ± 0.7 mV,而未使用滤波算法的气体测量电压波动最大值为 ± 2.5 mV,后者测量电压波动是前者的 3.57 倍,气体测量精度也精确到 ± 4 ppm。

表 2 测量电压值

Tab.2 Measured voltage value

	Concentration /ppm	V_{min}/V	V_{max}/V	Voltage difference/V
Without algorithm	0	1.237 4	1.242 2	0.004 8
	1 000	1.146 3	1.151 8	0.005 5
	2 000	1.068 5	1.073 1	0.004 6
With algorithm	0	1.630 6	1.632 1	0.001 5
	1 000	1.562 6	1.563 8	0.001 2
	2 000	1.510 8	1.511 9	0.001 1

5 结论

文中对红外热释电气体测量方法中的数字滤波算法进行了研究,通过基于 Goertzel 算法的数字滤波方法进行仿真分析和比较,Goertzel 算法滤波误差仅为 0.166 7%。使用 Goertzel 算法滤波误差分别比移动平均算法和未进行任何处理方法的精度提高 51 倍和 49.3 倍。数字滤波算法也能提高测量的稳定性,Goertzel 算法、移动平均算法滤波误差分别比未进行任何处理方法的稳定性提高 54.9 倍和 2.99 倍。最后设计并制做了红外热释电气体检测装置,并通过实验验证了该算法的滤波效果。未使用滤波算法测量电压波动是 Goertzel 滤波算法的 3.57 倍。文中研究表明:Goertzel 算法操作简单,能高效抑制硬件滤波无法抑制或引入的干扰信号。显著提高气体测量的精度和稳定性。这对于基于红外热释电传感器的城市管网、环境监测的高精度气体探测具有重要应用价值。

参考文献:

- [1] Sun Qiao, Yang Wei, Yu Haiyang. New target location method based on dynamic pyroelectric infrared sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 46-50. (in Chinese)
孙乔, 杨卫, 于海洋. 动态下红外热释电传感器的目标定位方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 46-50.
- [2] Yang Ruidong, Wang Guangke. Progress of researching on thermoelectrical material in infrared [J]. *Journal of Mengzi Teachers' College*, 2002(2): 74-77. (in Chinese)
杨瑞东, 王光科. 红外热释电材料的研究进展 [J]. *蒙自师范高等专科学校学报*, 2002(2): 74-77.
- [3] Liu Yunwu. Localization technology research based on dynamic PIR network [D]. Taiyuan: North University of China, 2014. (in Chinese)
刘云武. 基于红外热释电传感器网络的动态定位技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [4] Liu Jiaoyue, Yang Juqing. Sensor system of NDIR gas analyzer based on pyroelectric infrared sensors [J]. *Chemical Intermediate*, 2009(6): 72-74. (in Chinese)
刘娇月, 杨聚庆. 基于热释电器件的 NDIR 分析仪传感系统设计[J]. *化工中间体*, 2009(6): 72-74.
- [5] Liu Qian, Zeng Libo, Lei Junfeng. Investigation on

- pyroelectric infrared detectors[J]. *Infrared*, 2005(11): 3-10. (in Chinese)
刘茜, 曾立波, 雷俊锋. 热释电红外检测器研究探讨[J]. 红外, 2005(11): 3-10.
- [6] Feng Hengzhen, Shi Yunbo, Qing Li. Design of the motion detection system based on pyroelectric infrared sensor [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2017, 39(4): 610-613. (in Chinese)
冯恒振, 石云波, 秦丽. 基于热释电红外传感器的动作检测系统设计[J]. 压电与声光, 2017, 39(4): 610-613.
- [7] Jia Wei, He Ying, Zhang Yujun. Spectral analysis and line strength measurement method of near -infrared overlapped absorption lines [J]. *Infrared Millim Waves*, 2018, 37(1): 106-111. (in Chinese)
贾巍, 何莹, 张玉钧. 近红外混叠吸收线光谱解析及线强测量方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(1): 106-111.
- [8] Shen Jun, Li Zhihao. Spectral pretreatment for passive infrared remote sensing precursor chemicals vapor [J]. *Infrared*, 2016(11): 29-35. (in Chinese)
沈俊, 李志豪. 被动红外易制毒挥发气体光谱数据预处理技术[J]. 红外, 2016(11): 29-35.
- [9] Li Shangbo, Zhong Rui. The application of goertzel algorithm used in real-time eclectic parameter measurement [J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2008(5): 131-134. (in Chinese)
李尚柏, 钟睿. Goertzel 算法在实时电力参数测量中的应用[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008(5): 131-134.
- [10] Yi Jinzhao, Zhang Lulin, Qian Yumei. A new goertzel algorithm based DTMF signal detector [J]. *Communications Technology*, 2007(9): 16-18. (in Chinese)
弋今朝, 张禄林, 钱玉美. 一种新的基于 Goertzel 算法的 DTMF 信号检测方法[J]. 通信技术, 2007(9): 16-18.