

# 基于声波衰减的六氟化硫浓度无线传感器

颜盛银<sup>1,2,3</sup>, 单鸣雷<sup>1,2,3</sup>, 朱昌平<sup>1,2,3</sup>, 韩庆邦<sup>1,2,3</sup>

(1. 河海大学 物联网工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 江苏省常州市传感网与环境感知重点实验室, 江苏 常州 213022;

3. 江苏省输配电装备技术重点实验室, 江苏 常州 213022)

**摘要:**基于声波在气体中传播时的声波衰减原理,提出了无需参比通道的单通道六氟化硫(SF<sub>6</sub>)浓度声学检测方法。该方法把理论计算出的声波经空气中的检测通道衰减后的声压值作为参考值,并实测声波经检测通道衰减后的声压值,用两者的比值作为 SF<sub>6</sub> 浓度的表征参数,计算相应的 SF<sub>6</sub> 浓度。对该方法进行了理论推导和数值仿真,并应用 CC2430 的 Zigbee 无线片上系统(SOC)设计了 SF<sub>6</sub> 浓度无线传感器节点。数值仿真和实验结果显示,在 SF<sub>6</sub> 浓度比较低时,声压参考值与实测值的比值跟 SF<sub>6</sub> 气体浓度之间保持较好的线性关系,验证了基于声波衰减原理的单通道 SF<sub>6</sub> 浓度无线传感器节点的有效性。

**关键词:**声波衰减;无线传感器;六氟化硫(SF<sub>6</sub>);Zigbee;气体浓度

**中图分类号:** TB559 **文献标识码:** A

## Sulfur Hexafluoride Wireless Sensor Based on Acoustic Attenuation Method

YAN Shengyin<sup>1,2,3</sup>, SHAN Minglei<sup>1,2,3</sup>, ZHU Changping<sup>1,2,3</sup>, HAN Qinbang<sup>1,2,3</sup>

(1. Dept. of Network Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Changzhou Key Lab. of Sensor Networks and Environmental Sensing, Changzhou 213022, China;

3. Jiangsu Key Lab. of Power Transmission and Distribution Equipment Technology, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** A single channel detection method of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) concentration without reference channel presented based on acoustic attenuation in air in this paper. This method uses the theoretical sound pressure value of sound waves through the detection channel in air as a reference, and measures actually the attenuated sound pressure value through the detection channel. The ratio of the two sound pressure values as a function of SF<sub>6</sub> concentrations derived to calculate the SF<sub>6</sub> concentration. A wireless sensor node is designed using Zigbee wireless SOC of CC2430 based on acoustic attenuation method. Experiments and simulation demonstrates that when SF<sub>6</sub> is rare, the linear relationship between SF<sub>6</sub> concentration and the ratio of the two sound pressures does exist. The effectiveness of the single channel SF<sub>6</sub> concentration wireless sensor and the wireless sensor node has verified.

**Key words:** acoustic attenuation; wireless sensor; SF<sub>6</sub>; Zigbee; gas concentration

### 0 引言

六氟化硫(SF<sub>6</sub>)气体作为性能优越的绝缘气体,已在输配电设备中得到了广泛的应用,但 SF<sub>6</sub> 气体的泄露难于避免,为确保输配电设备和人员的安全,我国《电力安全工作规程》中特别规定:在相关场所必须安装氧气和 SF<sub>6</sub> 检测报警装置,并安装必要的通风换气装置。

鉴于 SF<sub>6</sub> 在输配电设备中的重要性,众多学者对 SF<sub>6</sub> 气体浓度的检测进行了研究,目前已被采用的一些检测 SF<sub>6</sub> 气体浓度的方法有光学法<sup>[1-2]</sup>、电学

法<sup>[3]</sup>和声学法<sup>[4]</sup>等。光学法检测精度高,但由于成本高,难以实现在线检测等问题,使推广普及较难。电学法中主要应用的是电晕放电法,该方法易于实现在线检测,但存在传感器稳定性差,且寿命短,有二次污染等不足。声学法利用不同气体介质的不同物理性质(如摩尔质量、比热、粘滞系数、导热系数等)对声波传播的影响而进行检测,提供了一种低成本,较高精度,无二次污染及可在线检测的检测方法。目前应用较多的是声速检测法<sup>[5]</sup>。但声速法所体现的气体介质的物理属性较少,而声波衰减可体

收稿日期:2012-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11274092,11274091);常州市科技支项目基金资助项目(CE20110031);河海大学中央高校基本科研业务经费项目基金资助项目(2011B11014)

作者简介:颜盛银(1990-),女,江苏淮安人,硕士生,主要从事声学传感器的研究。通信作者:单鸣雷(1977-),男,山东东明人,讲师,博士生,主要从事声学传感器及环境监控系统的相关研究。E-mail:shanming2003@126.com.

现出气体的更全面的热力学参数特征<sup>[6]</sup>。因此,本文基于声波衰减的方法,结合无线传感器低功耗及小型化的需求,提出了无需参比通道的单通道声波衰减检测方案,并应用 CC2430 的 Zigbee 无线片上系统(SOC)设计了检测 SF<sub>6</sub> 浓度的无线传感器节点,搭建了实验平台,通过数值仿真和实验验证了无线传感器节点的有效性。

### 1 单通道声波衰减检测原理

声波随距离的衰减规律<sup>[6]</sup>为

$$p = p_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

式中:  $p_0$  为声波发射端的声压强度;  $p$  为距离声波发射端  $x$  处的声压强度;  $\alpha$  为介质的衰减系数。

根据经典声波衰减理论,当声波的频率一定,  $\alpha$  直接跟介质本身的性质相关,即

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c^3} \left[ \frac{4}{3}\eta + k \left( \frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_p} \right) \right] \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为声波角频率;  $\rho_0$  为介质气体的密度;  $\eta$  为媒质的切变粘滞系数;  $k$  为导热系数;  $c = (\gamma RT/M)^{1/2}$  为介质中的声速,其中  $\gamma$  为气体质量定压比热  $c_p$  与质量定容比热  $c_V$  的比值,即  $\gamma = c_p/c_V$ ;  $R$  为摩尔气体常数(8.314 J/(mol·K));  $T$  为温度;  $M$  为气体的摩尔质量。

由于 SF<sub>6</sub> 的  $\eta$  和  $M$  跟空气相比均有显著差别,因此,空气中 SF<sub>6</sub> 含量的变化必将引起  $\alpha$  的明显变化,从而导致  $p$  的明显变化。根据这一特性,针对无线传感器对低功耗、小型化的需求,本文提出了无需参比通道的单通道声波衰减检测方案,实现无线传感器的设计。该方法把理论计算出的声波经空气中的检测通道衰减后的声压值作为参考值,并实测声波经检测通道衰减后的声压值,用两者的比值作为 SF<sub>6</sub> 浓度的表征参数,计算相应的 SF<sub>6</sub> 浓度。理论计算值可采用式(1)、(2)计算得到。设  $p_R$  为理论计算出的声波经空气中的检测通道衰减后的声压值,  $p_D$  为实测的声波经检测通道衰减后的声压值,则有

$$\frac{p_R}{p_D} = \frac{e^{-\alpha_R x}}{e^{-\alpha_D x}} = e^{(\alpha_D - \alpha_R)x} \quad (3)$$

式中:  $\alpha_R$  为理论计算的声波衰减系数;  $\alpha_D$  为实测的声波衰减系数;  $x$  为检测通道长度。

在实际检测中,我们测量的是接收换能器端的电压值,由于接收换能器端的电压值是声压和接收换能器灵敏度的线性表示,因此式(3)可表示为

$$\frac{p_R}{p_D} = \frac{\mu V_R}{\mu V_D} = \frac{V_R}{V_D} = e^{(\alpha_D - \alpha_R)x} \quad (4)$$

式中  $\mu$  为接收换能器的灵敏度。结合式(2)、(4)可看出,当检测通道长度固定时,声压参考值与实测值的比值跟 2 个衰减系数差呈自然指数关系;而衰减系数直接和气体的特性相关,因此,声压参考值与实测值的比值可用来表征气体参数的改变程度。

### 2 数值仿真

本文根据式(2)、(3),利用 Matlab 进行数值仿真。当  $T=12\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\omega=40\text{ kHz}$ ,  $x=0.07\text{ m}$  时,各参数的取值如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 数值仿真参数取值表

参数	空气	SF <sub>6</sub>
$\eta$ /(Pa·S)	$1.810 \times 10^{-5}$	15.730
$M$ /(g/mol)	28.963 4	146.060 0
$\rho_0$ /(g/L)	1.290	6.164
$k$ /[W/(cm·K)]	0.023 00	0.012 06
$c_V$ /[kJ/(kg·K)]	0.718	0.536
$c_p$ /[kJ/(kg·K)]	1.005	0.665

数值仿真中, SF<sub>6</sub> 浓度范围为 0~0.030。仿真结果如图 1 所示。由图可看出, SF<sub>6</sub> 浓度的变化引起了声压参考值与实测值的比值的显著变化,且在所取浓度范围内两者电压比值随着 SF<sub>6</sub> 浓度的增大而近似线性增长,这证明采用本方法检测空气中 SF<sub>6</sub> 的浓度可行。

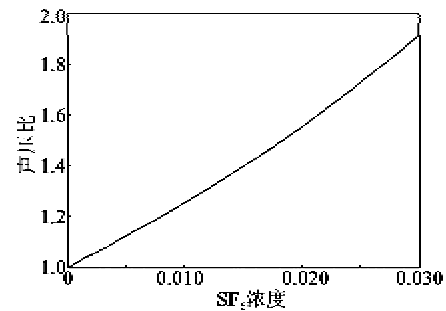


图 1 SF<sub>6</sub> 浓度与声压比值仿真关系图

### 3 无线传感器节点设计

由于该检测方式是使用单通道法对 SF<sub>6</sub> 浓度进行检测,因此,具有低功耗,易于小型化的特点,适用于对传感器功耗和体积要求较严格的无线传感器网络等场合。本文将基于单通道声波衰减的检测方法与 CC2430 的 Zigbee 无线 SOC 相结合,开发了基于声波衰减的 SF<sub>6</sub> 浓度无线传感器节点。

图 2 为 SF<sub>6</sub> 浓度无线传感器节点硬件结构框图。除了检测通道外,该无线传感器节点还包括声波驱动单元、信号调理电路、CC2430 控制核心、温湿度模块、RS485 串口收发器和 Zigbee 模块。此节

点采用 CC2430 作为控制核心,由其产生方波信号驱动检测通道一端的超声波换能器产生超声波,检测通道另一端的超声波接收换能器接收到电压信号后,信号调理电路对信号进行滤波、放大和峰值检测处理,而后接入 CC2430 模拟数字转换单元 ADC,CC2430 对电压信号进行处理后,可以得到 SF<sub>6</sub> 浓度的表征值。

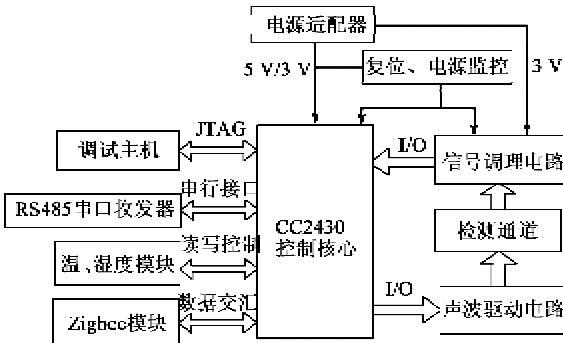


图 2 SF<sub>6</sub> 浓度无线传感器节点硬件结构框图

### 3.1 超声波驱动单元

图 3 为驱动单元的原理图。它主要由反向器 74LVC04 和超声波换能器构成,由 CC2430 产生的 40 kHz 方波信号被送至电路入口,其中一路经反向器送到超声波换能器的一个电极,另一路经两级反向器后送到超声波换能器的另一个电极,用这种方式可以提高超声波的发射强度。

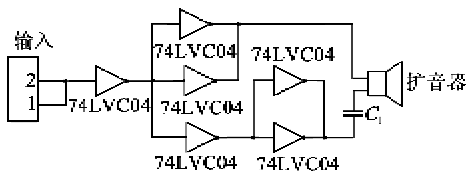


图 3 驱动单元原理图

### 3.2 信号调理电路

两次通道接收端的声波接收换能器把接收到的声压信号转换为电信号。信号调理电路原理图如图 4 所示。声波接收换能器输出的电压信号经滤波处理后,通过放大电路进行电压放大,然后进行峰值检测。本设计中将接收信号调理后的直流电压信号接入 CC2430 的 A/D 单元进行数值量化。

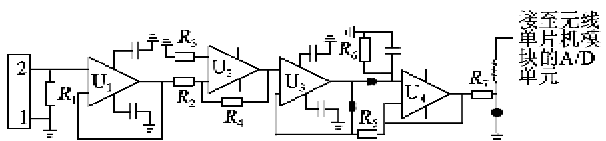


图 4 信号调理电路原理图

### 3.3 软件流程

图 5 为本设计的测量流程。首先通过无线传感器节点获取检测气体的检测环境信息(温度和湿

度),设在一定检测条件下,使用一定初始幅度的超声波穿过空气,理论计算出声波经空气中的检测通道衰减后的超声波接收换能器电端电压作为参考值。其次采用同一驱动单元驱动相同幅度的超声波穿过检测气体,读取实测的声波经检测通道衰减后接收换能器电端电压,无线传感器节点通过对接收换能器电端电压参考值和实测值的比值计算,作为 SF<sub>6</sub> 浓度的表征参数,计算相应的 SF<sub>6</sub> 浓度。

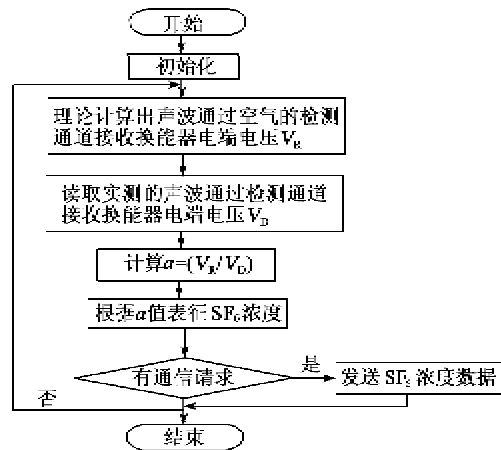


图 5 软件流程图

## 4 实验与结果

为了验证基于声波衰减原理的 SF<sub>6</sub> 浓度无线传感器节点的有效性,搭建了实验平台,如图 6 所示。图中的气瓶 A 中装有 99.99% 的 SF<sub>6</sub> 纯气(来自江苏省计量研究院),气瓶和一个容积为 40 L 的配气室通过一个气体流量阀相连。SF<sub>6</sub> 气体经流量阀到配气室中与其中的空气进行混合,形成空气与 SF<sub>6</sub> 的混合气体。通过控制流入配气室中 SF<sub>6</sub> 的体积就可控制混合气体中 SF<sub>6</sub> 的浓度。该实验可反复进行,得到多组实验数据。将无线传感器节点放置在配气室中,由它通过无线的方式,将其检测到的结果发送到容器外的另一个无线接收节点上,再由 RS232 送至计算机查看并进行显示。图 7 为在温度 12℃、湿度 60% 的环境下测量得到的数据曲线。由图 7 可看出,当 SF<sub>6</sub> 浓度变化时,引起了检测通道的声压参考值和实测值的比值的显著变化, SF<sub>6</sub> 浓度与声压比值间保持较好的线性关系。如图 7 所示,虽然变化趋势相似,但测试数据明显的高于数值仿真的数据。经分析认为,这是由于气体声波衰减由经典衰减和弛豫衰减组成,而数值仿真部分只考虑了经典衰减部分的原因。由实验结果可知,声波在气体中的弛豫衰减是不可忽略的部分。

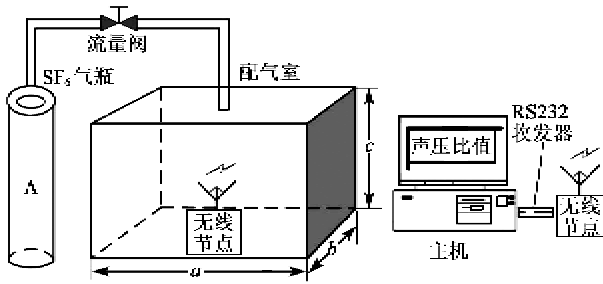


图 6 实验装置图

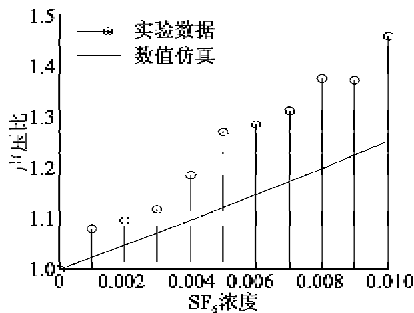


图 7 SF<sub>6</sub> 浓度与声压比值的关系图

5 结束语

声学检测方法具有快速的传感器响应,无损检测(非侵入式),长期稳定性等特点<sup>[8]</sup>;且声波在气体中的传播特性,全面地体现了气体介质的性质,为气体浓度检测提供了一个较好的选择。本研究利用声波衰减的原理,针对电力行业中的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏检测设计了无线传感器,经数值仿真和实验测试验证了其有效性。该检测原理可推广到其他气体的检测,无线传感的形式也方便了工程应用。

(上接第 697 页)

[3] MAYERGOYZID, FRIEDMAN G. Generalized Preisach model of hysteresis [J]. Precision Engineering, 1997, 20(2): 69-79.

[4] 魏燕定, 吕永桂, 陈子辰. 基于压电驱动器的微动平台开环精密定位控制研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12): 81-85.

[5] 魏燕定, 陶惠峰. 压电驱动器迟滞特性的 Preisach 模型研究[J]. 压电与声光, 2004, 26(5): 364-367. WEI Yanding, TAO Huifeng. The study on Preisach model of hysteresis of the piezoelectric actuator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2004, 26(5): 364-367.

[6] 郑晓虎, 朱获. 模糊神经网络在 UV-LIGA 工艺优化中的应用[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 139-144. ZHENG Xiaohu, ZHU Di. The application of fuzzy neural network in the optimization of UV-LIGA[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(1): 139-

参考文献:

[1] 徐元哲, 刘县, 胡智慧, 等. 光学式 SF<sub>6</sub> 断路器的泄漏检测技术[J]. 高压技术, 2009, 35(2): 250-254. XU Yuanzhe, LIU Xian, HU Zhihui, et al. Leak detection technology for optical SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 250-254.

[2] NARAYANAN V, PAGE R H, SEYED-YAGOOBI J. Visualization of air flow using infrared thermography[J]. Experiments in Fluids, 2003, 34(2): 275-284.

[3] SUEHIRO Junya, ZHOU Guangbin, HARA Masanori. Detection of partial discharge in SF<sub>6</sub> gas using a carbon nanotube-based gas sensor[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2005, 105(2): 164-169.

[4] 单鸣雷, 王月庆, 朱昌平, 等. 微量浓度二元混合气体的超声检测研究[J]. 压电与声光, 2009, 31(1): 129-131. SHAN Minglei, WANG Yueqing, ZHU Changping, et al. Study of detecting micro-concentration of binary gas mixtures by ultrasonic technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(1): 129-131.

[5] SHAN Minglei, LI Xiang, ZHU Changping, et al. Gas concentration detection using ultrasonic based on wireless sensor networks [C]// Hangzhou: Proceedings of The 2nd International Conference on Information Science and Engineering (ICISE 2010), 2010(3): 2101-2106.

[6] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.

[7] 北京市劳动保护科学研究所. 六氟化硫电器设备气体质量监督与安全管理(SF<sub>6</sub> 专集)[M]. 北京: 北京市劳动保护科学研究所, 1988.

[8] HENNING B, RAUTENBERG J. Process monitoring using ultrasonic sensor systems [J]. Ultrasonics, 2006, 44: 1395-1399.

[9] 魏强, 张玉林. 压电陶瓷微位移工作台的建模方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1596-1601. WEI Qiang, ZHANG Yulin. The modeling method of piezoelectric micro displacement worktable[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1596-1601.

[10] 黄金永, 屠立, 张炜. 基于 ILC 的压电微动平台正弦扫描运动控制[J]. 机电工程, 2005, 22(11): 46-49.

[11] 徐涛. 数值计算方法[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社, 2002: 43-71.

[12] NEWCOMB C V. Improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators[J]. Elec Let, 1982, 18(11): 442-444.

[13] JUNG S B, KIM S W. Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feed-forward model-reference control [J]. Precision Engineering, 1994, 16(1): 49-55.