

DOI: 10.7667/PSPC160721

基于矩形窗时域滤波算法的热导检测系统设计与应用

赵宝, 黄绍辉, 雷俊, 庄益诗, 颜语

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 变压器油中溶解气体在线监测的关键是气体检测的传感器技术, 如何准确测量、分析油中二氧化碳气体的含量是这一技术的难点。为解决这一难题, 设计了一种基于矩形窗时域滤波算法的热导检测系统。该系统采用新型热导传感器 TCS208F, 针对其输出信号小, 采集分析难度大的问题, 采用模拟滤波和数字滤波相结合的方法, 完成热导检测系统的软硬件优化设计, 实现二氧化碳气体微弱信号的采集与分析。该方法有效地抑制了各种类型的噪声干扰, 提高了系统测量的精度与灵敏度, 实现了微量气体浓度的准确测量, 克服了传统气体热导检测的缺点。
关键词: 传感器技术; 矩形窗时域滤波; 热导检测; 抑制噪声; 气体检测

Design and application of the thermal conductivity detection system based on the rectangular window time-domain filtering

ZHAO Bao, HUANG Shaohui, LEI Jun, ZHUANG Yishi, YAN Yu
(XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: The key of on-line monitoring of dissolved gas in transformer oil is the sensor technology of gas detection, in which how to accurately measure and analyze the content of carbon dioxide in oil is the technical difficulties. To solve this problem, this paper designs a thermal conductivity detection system based on rectangular window time-domain filtering algorithm. The system uses a new thermal conductivity sensor TCS208F, utilizes the combined method of analog and digital filtering for its small output signal and difficult issues in signal acquisition and analysis. Finally, this paper completes the optimum design of hardware and software of thermal conductivity detector system, realizes the collection and analysis of weak signal of carbon dioxide gas. This method effectively suppresses the noise of various types, improves the accuracy and sensitivity of system measurement, achieves the accurate measurement of trace gas concentrations, and overcomes the shortcomings of traditional gas thermal conductivity detection.

Key words: sensor technology; rectangular window time-domain filtering; thermal conductivity detection; noise suppression; gas detection

0 引言

油中溶解气体在线监测的关键是气体检测的传感器技术, 金属氧化半导体气敏传感器已广泛应用于对油中溶解的 H_2 , CO , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 等 6 种气体的在线监测, 但是金属氧化半导体传感器表面吸附的氧化物不能有效地与二氧化碳气体产生还原反应, 因而不能用来检测二氧化碳气体^[1-2]。而热导传感器(TCD)是一种非选择性传感器, 对任何气体都有相应特性, 结构简单, 稳定性能好, 且不破坏

试样, 检测范围大, 价格低。但是对于传统的热导传感器(TCD)在气体检测应用中依然存在检测精度差、灵敏度低, 温度漂移大等缺陷^[1]。

气体热导传感器 TCS208F 是采用先进的 MEMS 工艺加工技术制备的新一代传感器件, 具有小型化、集成化的特点, 可以极大地提高传感器性能^[3-5]。可以测量天然气、 CO_2 、 CH_4 、He、Xe 等成分或含量, 可测量非常小的气体容积变化, 成本低、功耗低、温度低, 时间常数小, TO8 封装, 抗冲击能力强。结合 MEMS 传感器的高性能, 设计了一种高性能的气体浓度检测系统, 使 TCD 检测方法与其他气体检测方法相比有了新的优势。

基金项目: 国家电网公司科技项目“智能高压设备传感器即插即用技术研究和产品研制”(2016GW45)

1 TCS208F 的结构特点

1.1 结构特点

TCS208F 是德国 HLP 公司推出的一种微流量热导传感器, 在每个 TCS208F 的硅片里集成有金属薄膜热敏元件, 热敏元件里又集成了 4 只电阻器 R_{m1} , R_{m2} , R_{t1} 和 R_{t2} , 这 4 只电阻器分别连接在 TO8 底座上的 8 个引脚上, 4 只电阻器串联而成^[6-10]。 R_{m1} 和 R_{m2} 用于加热金属薄膜和测量金属薄膜的温度, R_{t1} 和 R_{t2} 用于检测环境温度并进行温度补偿。

TCS208F 通过气体的扩散作用采集样气进行检测, 气体先进入图 1 传感器剖面图中气室 2 的微型气腔(体积大约为 100 μL), 然后通过扩散作用进入气室 1(体积大约为 0.2 μL), 即热导率测量区域进行气体体积分数检测^[11]。如图 1 所示。

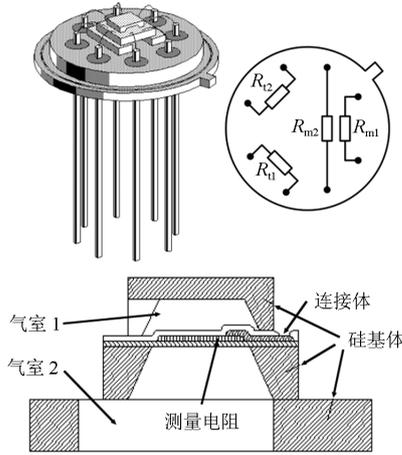


图 1 TCS208F 传感器结构

Fig. 1 Structure of TCS208F sensor

1.2 恒温电路典型应用

TCS208F 提供了三种典型的电路设计, 分别为恒温设计、恒流设计及电桥设计。热导传感器检测的关键是:

1) 如何在检测过程中保证传感器加热回路的温度不变;

2) 在检测气体浓度变化时, 如何保证传感器加热回路的温度不变;

3) 在传感器温度不变的情况下, 如何检测变化浓度的气体。

传感器典型应用中的恒流方式及电桥方式给传感器的热丝供电方式, 无法保证传感器温度恒定。而要保持温度恒定就必须在传感器的温度随气体热导系数变化时, 采用可变电流源给传感器的热丝供电, 利用电流的热效应确保传感器的温度不变^[12]。要解决以上问题可借助于传感器的恒温方式, 利用

传感器的超额温度特性, 采用恒温方式设计传感器的温度补偿回路, 实现传感器的温度动态补偿, 达到传感器的温度稳定不变要求^[13]。

本文考虑到传感器的膜片热时间常数短, 过度加热短时间内会导致传感器损坏及传感器加热电流不能超过其额定电流的特点, 选择恒温设计电路, 传感器的加热方式可自调节。

图 2 介绍传感器的温度补偿回路设计方法, 其中, 膜加热测量电阻 R_{m1} 和 R_{m2} 串联连接在两个放大器之间。环境温度测量阻抗 R_{t1} 作为第一个放大器的负反馈。这两个放大器形成一个正反馈回路。这个回路将会处在稳定状态且有一个总的增益。这个增益由 $R_m (= R_{m1} + R_{m2})$ 和 $R_t (= R_{t1})$ 的电流和电压的非线性作用决定。超膜温度 ΔT 由 R_1 / R_2 的值决定(见式(3)), 二极管决定了回路输出电压 U_1 极性。如图 2 所示。

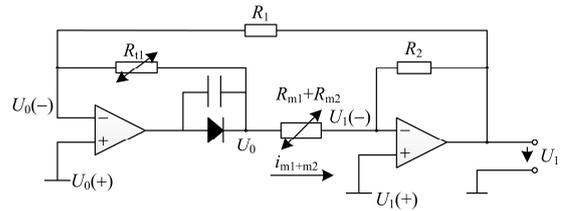


图 2 温度补偿回路

Fig. 2 Circuit of temperature-compensation

由图 2 及运放的工作原理分析可得

$$\frac{u_1 - u_1(-)}{R_2} = \frac{u_0 - u_1(-)}{R_{m1} + R_{m2}} \quad (1)$$

$$\frac{u_0 - u_0(-)}{R_{t1}} = \frac{u_1 - u_0(-)}{R_1} \quad (2)$$

由运放原理可得: $U_0(-) = U_0(+)$, $U_1(-) = U_1(+)$, 而 $U_0(+)$ 和 $U_1(+)$ 均接地, 因此

$$\frac{u_1}{u_0} = -\frac{R_2}{R_{m1} + R_{m2}} \quad (3)$$

$$\frac{u_1}{u_0} = -\frac{R_1}{R_{t1}} \quad (4)$$

而由半导体传感器特性可知, 电阻膜的阻值是 R_{m1} , R_{m2} ; 电阻 R_{t1} , R_{t2} 用来测量周围环境的温度; α 是温度系数; G 是几何系数, 是由传感器内部的几何机构决定的; 因此膜电阻与电阻膜的超温 ΔT 成正比关系, 即 $R_m = R_m(1 + \alpha \cdot \Delta T) = R_{m1} + R_{m2}$ 。

$$\text{半导体超模温度的表达式 } \Delta T = \frac{1 + \alpha \cdot \theta}{\frac{G \cdot \lambda}{i_m^2 \cdot R_m} - \alpha}$$

中 θ 为环境温度。则由式(3)和(4)可得:

$$\frac{R_1}{R_{t1}} = \frac{R_{t1}}{(R_{m1} + R_{m2}) \cdot (1 + \Delta T)} \quad (5)$$

再将 ΔT 代入式(5)中, 可得:

$$\frac{R_1}{R_{t1}} = \frac{R_{t1}}{R_m \cdot \left(1 + \frac{1 + \alpha \cdot \theta}{G \cdot \lambda}\right)} \quad (6)$$

$$\frac{1}{i_m^2 \cdot R_m} - \alpha$$

而膜电阻受温度影响的变化可忽略不计。因此式(6)可简化为

$$\frac{R_1}{R_{t1}} = \frac{R_{t1}}{R_m \cdot \left(1 + \frac{1}{G \cdot \lambda}\right)} \quad (7)$$

$$\frac{1}{i_m^2 \cdot R_m} - \alpha$$

而 $i_m = \frac{U_m}{R_m}$, $U_m = U_0$, 再将式(3)代入式(7), 整理可得:

$$U_1^2 = \frac{G \cdot \lambda}{\alpha} \cdot \frac{R_{t1} \cdot R_2^2 - (R_{m1} + R_{m2}) \cdot R_1 \cdot R_2}{(R_{m1} + R_{m2}) \cdot R_{t1}} \quad (8)$$

综上所述: 除了导热系数 λ 和温度补偿电阻 R_{t1} 外, 其他参数均为常量, 可视为恒定不变, 因此 U_1 的变化是随着导热系数 λ 和温度补偿电阻 R_{t1} 的变化而变化。当 λ 变小时, ΔT 升高, 由式(5)可得 R_m 变大, i_m 变小, 则 ΔT 降低, 从而保证温度恒定; 反之当 λ 变大时, ΔT 降低, R_m 变小, i_m 变大, 则 ΔT 升高。

2 硬件电路设计

2.1 恒温补偿电路设计

图3(a)中: R_{t1} 温度补偿电阻, R_{21}, R_{22} 为增益电阻, R_{m-1} 与 R_{m-2} 之间串接传感器膜电阻 R_{m1} 和 R_{m2} 。

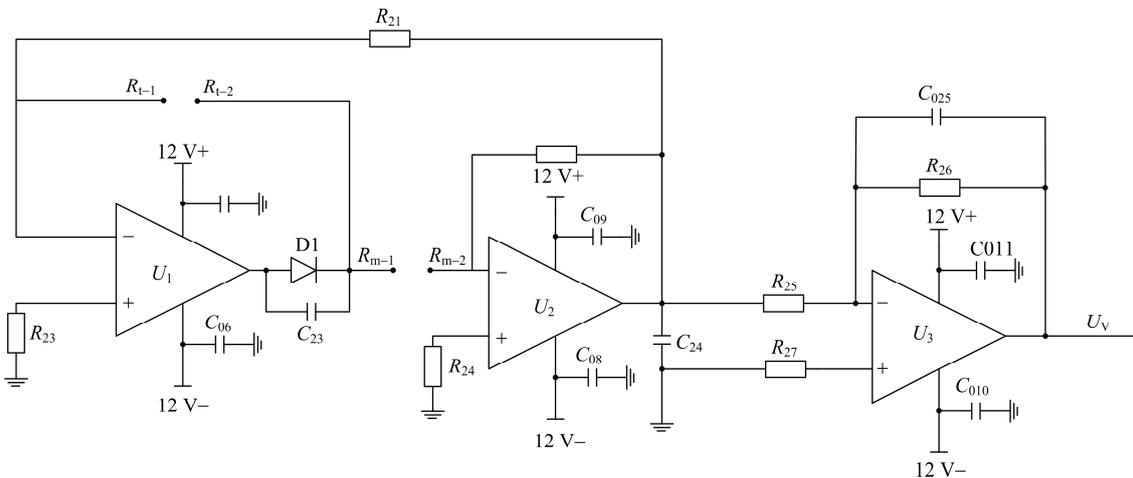


图3 温度补偿电路

Fig. 3 Circuit of temperature-compensation

由于传感器的输出信号较弱, 几乎相当于微伏级的信号, 经过两级运放后, 送入AD采集。根据图3(a)设计, R_{21}, R_{22} 的选取比例关系为 $R_{21}/R_{22} = 1$, 在无载气流入传感器的条件下, U_0 的基准电压为 -5.6 V左右, 而在载气流入的条件下, U_0 的基准电压会上浮 140 mV左右。AD586AR为电压基准, 基准电压为 5.0 V, 通过调节 R_{52} 的大小调整运放减法器输入基准, 在没有检测气体通过传感器时, U_0 的电压为 -5.74 V。因为选取 5 V电压基准, 因此需要反向缩放, 调整后电压输出应小于 5 V, 以便后续减法运算。根据图3(b)运放减法原理可得:

$$U_+ = \frac{R_{13}}{R_{12} + R_{13}} \cdot U_{T2}$$

$$U_- = \frac{1}{R_{31} + R_{32}} \cdot (U_{uv} \cdot R_{32} + U_{T3} \cdot R_{31})$$

而 $U_+ = U_-$, 因此可得:

$$U_{T3} = \left(1 + \frac{R_{32}}{R_{31}}\right) \cdot \frac{R_{13}}{R_{12} + R_{13}} \cdot U_{T2} - \frac{R_{32}}{R_{31}} \cdot U_{uv}$$

经过第二级运放可得:

$$U_{AD} = \left(1 + \frac{R_{37}}{R_{34}}\right) U_{T3} - \frac{R_{32}}{R_{31}} U_{uv}$$

最终将采样电压信号调理为 $0 \sim 5$ V的标准信号, 以便AD采集。如图3、图4所示。

2.2 AD采样电路设计

采样信号首先经过运放INA128的增益调节, 再经过第二级隔离运放ISO124P进行信号有效隔离, 将隔离后的信号送至AD7606。图5中通过JP1切换电压电流的采集, R_{31} 与 R_{32} 为分压电阻, R_{43} 为正增益取样电阻, R_{44} 为负增益取样电阻, R_7 为调节取样电压的总增益电阻。如图5所示。

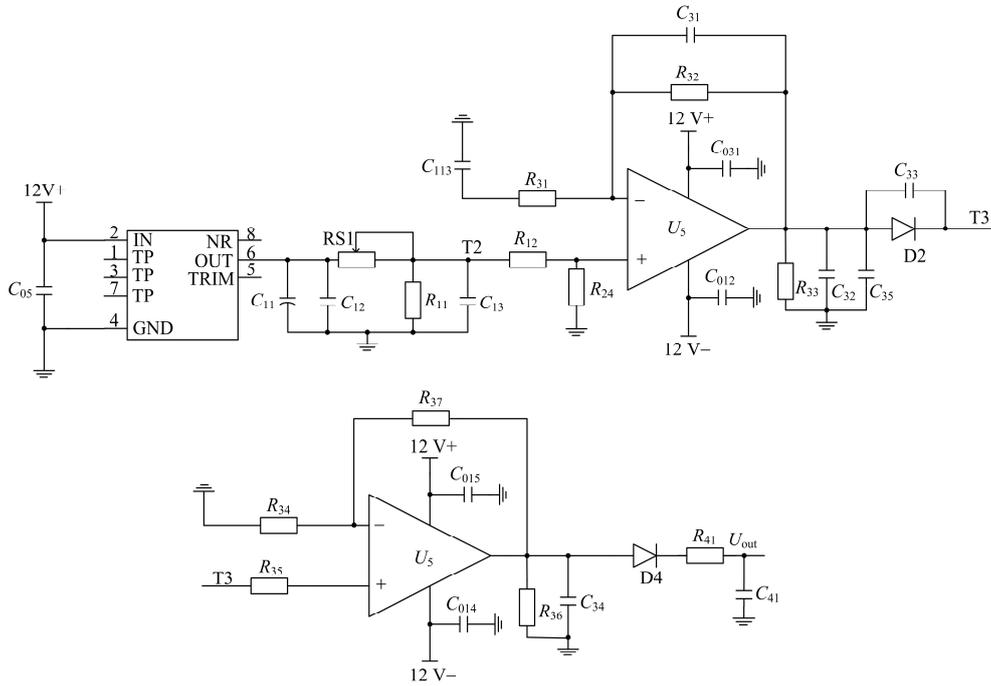


图4 温度补偿电路

Fig. 4 Circuit of temperature-compensation

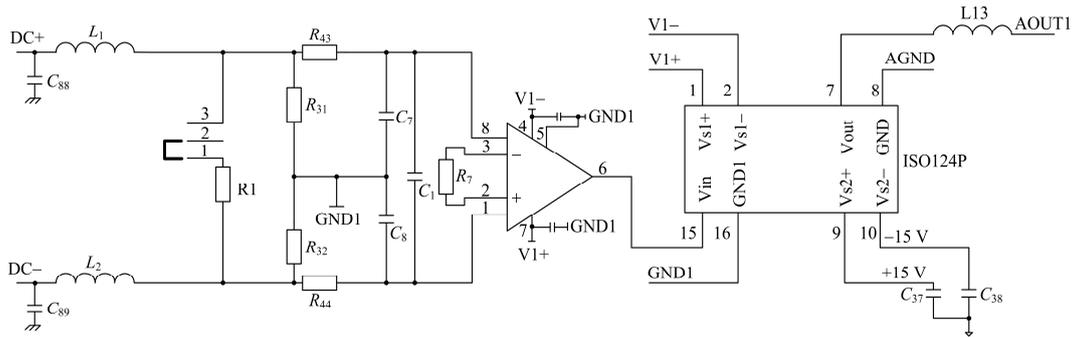


图5 AD采集电路

Fig. 5 Acquisition circuit

3 滤波算法

3.1 滤波窗选取

首先构造算法公式，而气体曲线原型比较接近于正弦函数的上半轴，因此构造滤波窗时域原型公式为： $y = \frac{\sin(2\pi fx)}{\pi x}$ 。因此构造滤波窗程序算法公式为

$$X(k) \Rightarrow x(n) \frac{\sin(2\pi f(i - \frac{L-1}{2}))}{\pi(i - \frac{L-1}{2})} \quad (9)$$

其中： $i(i=0, 1, 2, \dots, L-1)$ ； n (采样值序列号， $n=0, 1, 2, 3, \dots$ ，采样点数-1)； L (窗函数宽度，奇数)； f (滤波截止频率)； $X(k)$ (滤波序列)； K (滤波序列的序列

号， $k=0, 1, 2, 3, \dots$ ，采样点数-1)； $x(n)$ (当前采样点)。

算法公式中，当除数 $(\pi(n - \frac{L-1}{2}))=0$ 时

$$\frac{\sin(2\pi f(n - \frac{L-1}{2}))}{2} \text{ 可视为 } 2f。$$

3.2 算法原理与实现

将各个采样点进行滤波窗过虑，生成一个和滤波窗宽度相同的数组，并标记出该数组序列在采样点中的位置。将生成的各个序列在对应位置上进行总和计算，生成与原采样点相同长度的数组。当序列位置加序列长度超过采样数据长度后，数据丢弃。算法如下所述。

采样序列：

$M(N)=\{x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)\}$ 对每个采样点 $x(n)$ 进行过窗操作生成一个长度为窗宽的数组序列: $W(n)=\{P(0), P(1), P(2), \dots, P(L-1)\}$, 其中数组每一项 $P(x) = x(n)$

$$P(x) = x(n) \frac{\sin(2\pi f(n - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot (n - \frac{L-1}{2})}$$

即:

$$W(0) = \{x(0) \frac{\sin(2\pi f(0 - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot (0 - \frac{L-1}{2})},$$

$$x(0) \frac{\sin(2\pi f(1 - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot (1 - \frac{L-1}{2})}, \dots,$$

$$x(0) \frac{\sin(2\pi f((L-1) - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot ((L-1) - \frac{L-1}{2})}\}$$

$$W(1) = \{x(1) \frac{\sin(2\pi f(0 - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot (0 - \frac{L-1}{2})},$$

$$x(1) \frac{\sin(2\pi f(1 - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot (1 - \frac{L-1}{2})}, \dots,$$

$$x(1) \frac{\sin(2\pi f((L-1) - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot ((L-1) - \frac{L-1}{2})}\}$$

$$W(n-1) = \{x(n-1) \frac{\sin(2\pi f(0 - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot (0 - \frac{L-1}{2})},$$

$$x(n-1) \frac{\sin(2\pi f(1 - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot (1 - \frac{L-1}{2})}, \dots,$$

$$x(n-1) \frac{\sin(2\pi f((L-1) - \frac{L-1}{2}))}{\pi \cdot ((L-1) - \frac{L-1}{2})}\}$$

每个采样点生成以上序列后, 将对应位置数值相加时, 可采用扩充每组采样点数据, 对其前、后补 0 的方法对齐数据。序列前补 0 的个数为(本采样点所在位置-1), 序列后补 0 的个数为(采样数量前补 0 个数-窗宽度)。算法原理如图 6 所示。

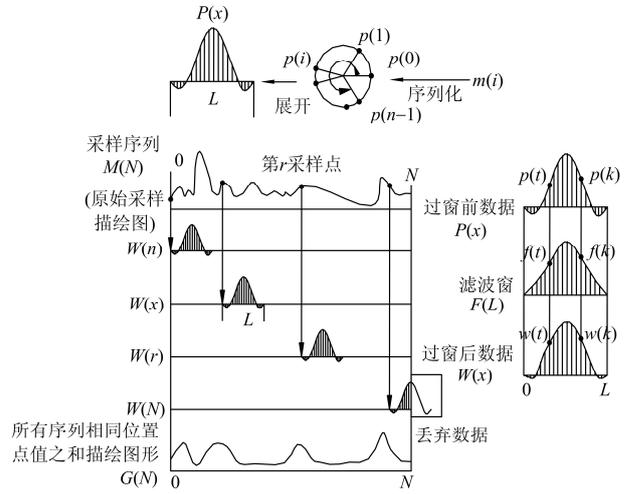


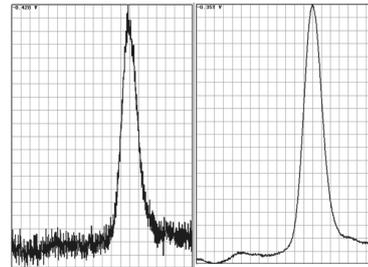
图 6 矩形窗时域滤波算法原理图

Fig. 6 Principle diagram of the rectangular window of time domain filtering algorithm

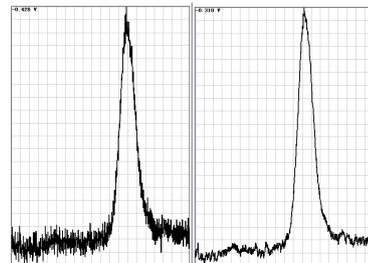
3.3 试验结果

按照硬件电路设计部分, 设计热导检测电路进行试验, 试验环境: 在变压器油中溶解气体监测装置^[14-20]上实现对 CO_2 气体的检测。工作温度为 50°C 的条件下, 载气使用 99.999% 空气, 标气使用 CO_2 浓度为 400 ppm, 试验过程中通过选择不同滤波窗体宽度及截止频率, 试验结果如图 7 所示。

试验表明: 选择不同的窗体宽度及截止频率, 可以有效滤除杂波, 提取并还原有效信号, 保证采样信号完整性。以上 4 种试验结果表明, 适当加宽窗体, 同时适当降低截止频率的选取, 有利于提升系统滤波效果。



(a) 窗宽度为 81, 截止频率为 0.01 Hz



(b) 窗宽度为 81, 截止频率为 0.1 Hz

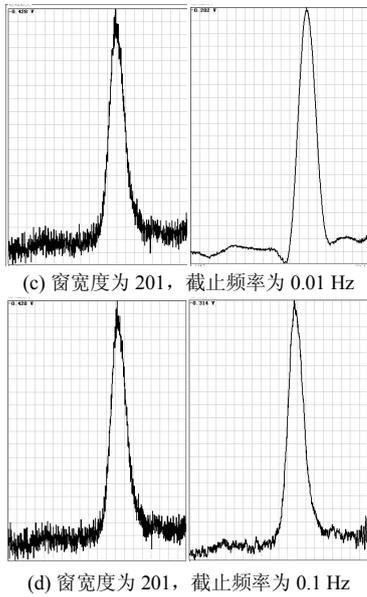


图 7 滤波前后对比图

Fig. 7 Filter before and after contrast figure

4 结论

本设计应用于变压器油中溶解气体的分析, 系统采样频率低, 能够很好地过滤杂波。对于不同频率的采样信号建议进行多次试验, 选取合适的截止频率, 将有用信号控制在失真范围之外。选择合适的窗长度 L 及截止频率 f 对信号进行处理, 可有效还原失真信号。但是在选用窗函数的长度与截止频率时, 会对数据的起始端与结束端有影响, 因此针对频率不高的采样信号可得到较好的试验效果, 对高频信号会造成信号的失真。

参考文献

- [1] 赵峰, 李硕. 基于 DGA 和改进型灰关联度模型的牵引变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 41-45.
ZHAO Feng, LI Shuo. Fault diagnosis for traction transformer based on dga and improved grey correlation analysis model[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 41-45.
- [2] 胡然, 罗维, 王瑞珍, 等. 一台新投运 500 kV 变压器油色谱异常的缺陷诊断和处理[J]. 高压电器, 2015, 51(05): 139-143.
HU Ran, LUO Wei, WANG Ruizhen, et al. Defect diagnosis and treatment of a new 500 kV transformer with abnormal dga data[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 139-143.
- [3] 曾庆喜, 王庆, 王浩为. 基于热导传感器的氢气浓度检测仪的设计[J]. 测控技术, 2008, 27(4): 10-12.
ZENG Qingxi, WANG Qing, WANG Haowei. Design of hydrogen concentration detector based on thermal conductivity sensor[J]. Measurement & Control Technology, 2008, 27(4): 10-12.
- [4] 黄为勇, 童敏明, 任子晖. 采用热导传感器检测气体浓度的新方法研究[J]. 传感技术学报, 2006(4): 973-975.
HUANG Weiyong, TONG Minming, REN Zihui. New method of gas concentration detection using thermal conductivity sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006(4): 973-975.
- [5] 马炳和, 周保清, 邓进军, 等. MEMS 微型热敏传感器的隔热结构及其性能分析[J]. 传感技术学报, 2008, 21(6): 933-937.
MA Binghe, ZHOU Baoqing, DENG Jinjun, et al. On heat insulation of micro thermal sensor using FEA[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(6): 933-937.
- [6] 李学东, 余志伟, 杨明忠. 基于 MEMS 技术的微型传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2005(9): 4-5, 12.
LI Xuedong, YU Zhiwei, YANG Mingzhong. Microsensors based on MEMS technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2005(9): 4-5, 12.
- [7] 冯洋, 吴言荪, 周平. 热导传感器 TCS208F 及其信号调理电路研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 70-72.
FENG Yang, WU Yansun, ZHOU Ping. Study on thermal conductivity sensor TCS208 F and its signal conditioning circuit[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 70-72.
- [8] 刘殿素, 吴言荪, 欧勇. 新型气体热导传感器及其应用设计[J]. 仪表技术与传感器, 2007(7): 5-6.
LIU Diansu, WU Yansun, OU Yong. Applicable design of new type thermal conductivity sensor for gases[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(7): 5-6.
- [9] 孙冬梅, 刘林, 徐海滨. 基于微流量热导传感器的氢气浓度检测系统研究[J]. 控制工程, 2011, 18(4): 505-508.
SUN Dongmei, LIU Lin, XU Haibin. Hydrogen concentration test systems based on thermal conductivity sensor[J]. Control Engineering of China, 2011, 18(4): 505-508.
- [10] WAGNER G R. TCS208F thermal conductivity sensor for gases[J]. Sensors, Systems & Services, 2004, 5(3): 1-7.
- [11] 钱江波, 严晓哲, 韩中合. 用于液膜厚度测量的开式同轴腔传感器结构设计[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 99-103.
QIAN Jiangbo, YAN Xiaozhe, HAN Zhonghe. Structural design of microwave coaxial resonant cavity sensor for liquid film thickness measurement[J]. Thermal Power

- Generation, 2015, 44(3): 99-103.
- [12] 梁长垠, 张守权. 热流量传感器温度补偿方法研究[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(4): 18-20.
LIANG Changyin, ZHANG Shouquan. Research on temperature compensation method for thermal flow sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(4): 18-20.
- [13] 杨志勇, 管伊春, 严利民. 一种热导式在线分析仪的温度控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 248-249.
YANG Zhiyong, GUAN Yichun, YAN Limin. A temperature control method on thermal conductivity online analyzer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 248-249.
- [14] 梅德冬, 樊瑞, 周斌. IEC61850 模型信息的规则表达与校验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 131-136.
MEI Dedong, FAN Rui, ZHOU Bin. Research on regular expressions and check of IEC 61850 model information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 131-136.
- [15] 张卫华, 苑津莎, 王杉, 等. 基于改良三比值法的变压器故障基本信度分配计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 115-121.
ZHANG Weihua, YUAN Jinsha, WANG Shan, et al. A calculation method for transformer fault basic probability assignment based on improved three-ratio method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 115-121.
- [16] 魏云冰, 王东晖, 韩立峰, 等. 一种基于 MIA 的油浸式变压器放电性故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 41-47.
WEI Yunbing, WANG Donghui, HAN Lifeng, et al. A novel method for discharging fault diagnosis and location of oil-immersed power transformers based on MIA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 41-47.
- [17] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 79-85.
- [18] 翟瑞聪, 谢善益, 范颖, 等. 基于 IEC 61850 的在线监测装置通信仿真系统开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 137-141.
ZHAI Ruicong, XIE Shanyi, FAN Ying, et al. Development and application of the communication simulation system for the online monitoring device based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 137-141.
- [19] 赵靓, 柴庆龙. 基于分层模糊符号有向图法的故障诊断方法[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 26-31.
ZHAO Liang, CHAI Qinglong. A fault diagnosis approach based on hierarchical fuzzy signed directed graph model[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 26-31.
- [20] 任梦玮, 焦嵩鸣. 改进型非线性状态估计的制粉系统故障诊断[J]. 热力发电, 2015, 44(12): 87-92.
REN Mengwei, JIAO Songming. Coal milling system fault diagnosis based on improved NSET[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(12): 87-92.

收稿日期: 2016-05-18; 修回日期: 2016-11-03

作者简介:

赵宝(1985-), 男, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为高压设备在线监测; E-mail: zhaobao@xjgc.sgcc.com.cn

黄绍辉(1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为智能变电站保护与综合自动化; E-mail: huangshaohui@xjgc.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)