

# GIS 设备内 SF<sub>6</sub>分解产物检测系统的设计

黄春, 吴艳敏, 姚莉娜

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**提出了基于气体传感器法的 GIS 设备内 SF<sub>6</sub> 分解产物检测系统设计方案:采用新型过滤装置,以排除气体传感器的固有缺陷交叉干扰;基于气体传感器特点设计了恒定电位电路,以确保传感器信号输出的准确度;实施联合自适应卡尔曼滤波算法,以克服温度、流量对气体传感器精度的影响,解决零点自漂的问题.实验结果表明,本系统结构简单、操作方便、测量精确、响应速度快、抗干扰能力强,可用于现场在线和便携检测.

**关键词:**气体绝缘组合电器;SF<sub>6</sub> 分解产物;交叉干扰;卡尔曼滤波

**中图分类号:**TM855 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.01.022

## Design of detecting system for SF<sub>6</sub> gas decomposition in GIS

HUANG Chun, WU Yan-min, YAO Li-na

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A design method of measuring SF<sub>6</sub> gas decompositions in GIS based on gas sensor was put forward. A new type of filter was applied for the system to get rid of the inherent defect about cross interference between gas sensors; One special constant potential circuit was designed according to the traits of sensors to insure the exact signal; The adaptive federated Kalman filtering was proved, which could make up the infection about temperature and flux to the sensors, as well as, null shift can be resolved. The practice results showed that the system has the following advantages: simple structure, convenient operation, the measuring accuracy, the quick survey speed, the strong antijamming ability and so on. It can be used to test SF<sub>6</sub> gas decompositions on line and portably.

**Key words:** gas insulated switchgear (GIS); SF<sub>6</sub> gas decomposition; cross interference; Kalman filtering

## 0 引言

气体绝缘组合电器 GIS (gas insulated switchgear) 是高压电气的重要设备,虽然运行状态比较稳定,但是长期在线工作难免会出现故障.六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 气体具有优良的绝缘和灭弧性能,被广泛应用于高压电气设备中,常温常压下, SF<sub>6</sub> 化学性能十分稳定,不易分解.但当 GIS 设备内部出现绝缘缺陷引起的局部放电 PD (part discharge) 时,会促使 SF<sub>6</sub>

气体发生不同程度的分解,主要分解产物有 SOF<sub>2</sub>, CO, CF<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HF 等,其含量大小、变化规律等特征与 GIS 内部绝缘缺陷所产生的 PD 程度和类型有着密切的关联<sup>[1-4]</sup>,通过这些关联比对能够很好地诊断设备内部的故障原因及故障程度.

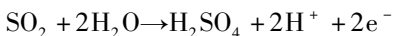
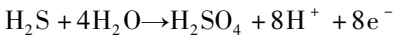
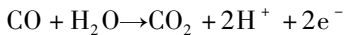
目前,国内外关于 SF<sub>6</sub> 气体分解产物的检测方法主要有检测管法、气相色谱法、红外吸收光谱法和气体传感器法等,每种方法都有各自的优缺点.检测管法主要针对 HF, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> 等气体进行检测,

不能检测 SF<sub>6</sub> 气体其他分解组分,而且测量精度不高,受温湿度影响较大,是一种化学分析方法,不能在线检测,适合于气体的定性分析;气相色谱法具有灵敏度高、分析效率高、定量准确等优点,但其设备复杂,价格昂贵,检测时间长,对环境要求高,不适合现场在线监测应用;红外吸收光谱法是通过对比入射光谱与吸收后光谱的变化来测量气体含量的,由于 SF<sub>6</sub> 局部放电分解气体含量较低、吸收较弱,入射光谱与吸收后光谱对比变化较小,致使该方法检测灵敏度较低<sup>[5-7]</sup>;气体传感器法是利用电化学气敏传感器的选择性俘获功能,将俘获的化学量转换为电信号的一种方法,具有灵敏度高(体积分数达到 10<sup>-6</sup>级)、检测速度快、检测组分多、抗干扰能力强、结构简便、价格经济等优点,适合于现场在线和便携检测,但是气体传感器法具有交叉干扰的缺点. 本文拟采用气体传感器法对 SF<sub>6</sub> 分解产物的主要成分 H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, SOF<sub>2</sub>, CO 和 HF 进行检测,通过一种新型过滤装置和计算机软件补偿气体之间的灵敏度交叉干扰,以便取得良好的实验效果.

## 1 检测原理

### 1.1 SF<sub>6</sub> 分解产物气体传感器工作原理

电化学气体传感器利用气敏电极或者气体扩散电极等构成一系列电池测量各种气体含量,通常由浸没在电解液中的 3 个电极构成,即工作电极、参比电极和对电极. 图 1 是 SO<sub>2</sub> 气体传感器的俯视图,它是一种恒电位电解式传感器,其工作过程为:被测量的气体扩散透过工作电极的多孔膜,并在其上发生电化学氧化还原反应,通过外部电路将反应中产生的自由电子转化为传感器的输出信号. SF<sub>6</sub> 分解物在敏感电极上的反应可用以下标准的化学方程式表示:



在对电极上发生的反应则正好与敏感电极上的反应平衡. 参比电极为工作电极提供一个稳定的电化学电位,所以,通常被保护不与被测气体接触,以确保其热力学电位的恒定. 此外,参考电极不允许有电流通过,否则将改变电位值. 综上所述,设计一个合理的恒定电位电路是实现 SF<sub>6</sub> 分解物准确测量的关键.

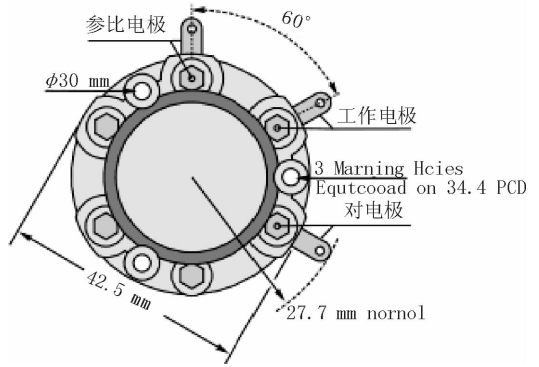


图 1 SO<sub>2</sub> 气体传感器俯视图

### 1.2 SF<sub>6</sub> 分解产物信号调理电路设计

图 2 是 SF<sub>6</sub> 气体分解物传感器的恒电位电路. 该电路是三电极工作电路, U<sub>1</sub>, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, C<sub>1</sub> 构成负反馈放大电路,即恒电位电路. 因为电解池的电流稳定很快,而对电极的极化却很慢. 因此尽管传感器的信号已经稳定,但对电极的电位可能仍在继续漂移,这在实际应用中意味着电路的电位要比之高很多. 所以让 U<sub>1</sub> 输出为负,稳定参考电极的电位, U<sub>1</sub> 这一放大器的失调电压必须很低,或者将其调为零,否则会导致传感器的工作电位严重偏置,致使其由短路状态达到稳定需要相当长的时间. 本系统选取 PMI—OP772 作为 U<sub>1</sub>; U<sub>2</sub>, R<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>, R<sub>4</sub> 的作用是将传感器输出的 μA 级电流信号转换为 mV 级电压信号, U<sub>3</sub>, R<sub>7</sub>, R<sub>8</sub>, R<sub>9</sub> 是信号放大部分,具体放大多少由 R<sub>8</sub>, R<sub>9</sub> 电阻值来控制. U<sub>4</sub> 构成电压跟随器,起到匹配电路电阻的作用. 此外, R<sub>5</sub> 两端的压降应该控制在 10 mV 以内,不然传感器的性能会受到损害,保持 R<sub>5</sub> 低值还能保证电路响应速度更快.

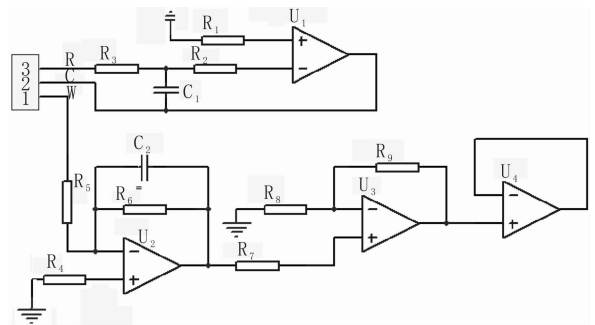


图 2 SF<sub>6</sub> 气体分解物恒电位电路

## 2 SF<sub>6</sub> 产物检测系统方案设计

本系统主要用于检测分析运行中 SF<sub>6</sub> 电气设备的气体质量,主要包括传感器组的信号采集与数据

的处理、分析和显示这两大部分,检测系统总体结构图如图3所示。 $\text{SO}_2$ 、HF、 $\text{H}_2\text{S}$ 和CO气体传感器通过串联气路相连,被测气体通过进气口扩散进入不同的传感器通道,并将处理过的电流信号通过恒电位电路转换成放大的电压信号,经A/D转换成数字信号后送给微处理器。气路管道设计时,采用四氟管道或者不锈钢管路,其他材质的管道对 $\text{SF}_6$ 分解产物具有吸附性,会严重影响测量数据的准确性。另外,系统测量前,需要将所有的气路管道吹扫1 min,避免残留气体对被测气体的影响。

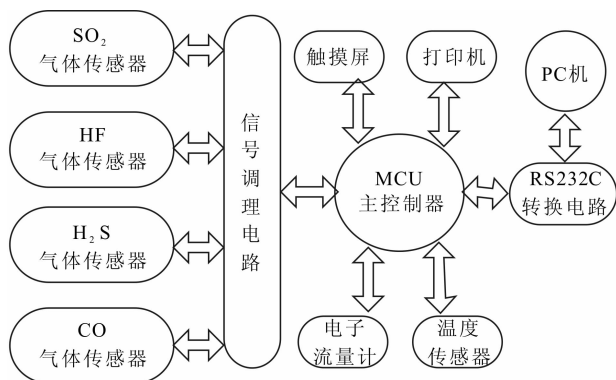


图3  $\text{SF}_6$ 分解产物检测系统结构图

## 2.1 系统功能

因为大多数电化学传感器在温度变化时基线信号呈指数上升,可能会严重影响气体测量的准确性。对此,引入温度传感器实时检测环境温度,并采用计算机软件方法实时补偿。另外,气体流量的大小也会严重影响气体测量的准确性,所以,还引入电子流量计,实时检测显示系统流量。为了方便快捷地操作仪表,采用真彩触摸屏作为人机接口。为了有效管理测量数据,设计了存储、查询、打印测量数据的功能,并且可以根据需要进行打印参数的设定。此外,系统还可以通过串口将测量数据上传到上位机软件,对电气设备的工作状态和故障类型进行分析和预估。

## 2.2 微控制器

MCU主控制器采用AVR系列高档8位单片机ATmega128,它拥有RISC(reduced instruction set computer)精简指令集体系,运行速度是80C51的10倍;内嵌高质量的Flash程序存储器,擦写方便,便于产品调试、开发、生产、更新;内嵌4 K E<sup>2</sup>PROM,并可外扩64 K外部存储器以长期保存重要数据,避免断电丢失;具有PWM功能的定时器/计数器(T/C);具有片内振荡器的可编程看门狗定时器;SPI串行端口,有2个USART;具有与IEEE

1149.1规范兼容的JTAG测试接口(此接口同时还可以用于片上调试);低电压供电,宽工作电压范围(2.7~5.5 V);抗干扰能力强,可降低一般8位单片机中软件抗干扰设计的工作量和硬件的使用量;工作温度范围达到-40~+85℃,符合工业级要求。

## 2.3 模数转换器

A/D转换采用经典的多通道(10个)、高精度(24 b分辨率)模数转换器AD7718来完成,它具有低噪声、高可靠性和线性度好等特点,其灵活的串行接口可以很方便地与微处理器或寄存器相连接,利用SPI总线完成与微处理器的通信,为本系统的多参数采集提供精确的数据。

## 3 系统抗干扰措施

系统抗干扰措施主要包括硬件抗干扰设计和气体传感器抗干扰设计2部分。

### 3.1 硬件抗干扰设计

系统硬件抗干扰设计主要采取以下措施:AD转换使用差分输入;PCB布板采用合理的接地技术,比如数字地与模拟地分开、强电弱电分离等;对所有输入输出信号均进行光电隔离,同时对传感器的采样信号进行算术平均数字滤波;若采用在线监测,则在变压器前端使用滤波器,从而有效滤除电网电压波动。

### 3.2 气体传感器抗干扰设计

由结构和原理所决定,气敏传感器存在交叉干扰。通过实验发现, $\text{SO}_2$ 、HF、 $\text{H}_2\text{S}$ 、CO气体之间存在一定的干扰,为了降低干扰程度,可以使被测气体在进入传感器之前先通过一定的过滤装置。

目前,市面上的气体传感器普遍受温度影响比较大,大约是温度每上升10℃,信号翻1倍。多数情况下可以忽略,但如果该应用涉及到浓度极低的气体,比如 $\text{SF}_6$ 分解产物中的 $\text{SO}_2$ 或者 $\text{H}_2\text{S}$ ,只有十万分之几浓度时,可能还未检测到,GIS设备就已经出现了故障。任何一个因温度引起的基线变化都可能严重影响气体测量的准确性,所以系统必须进行温度补偿。在实验过程中发现,气体流量的大小也会影响到气体的精确度。另外,每个传感器在使用一段后,都会有相应的零点漂移。针对以上问题,为了确保测量数据的精确性,系统采用传感器信息融合技术,以达到温度、流量实时补偿,实现零点自动跟踪功能。

在多传感器的 SF<sub>6</sub> 分解物检测系统中,如果采用单滤波器来融合所有传感器信息,那么任何一个传感器的故障都可能影响整个组合系统. 所以,本系统采用基于信息总分配原则的联合卡尔曼滤波算法,即将传感器组构成 SO<sub>2</sub>, HF, H<sub>2</sub>S, CO, 温度, 流量 6 个子系统,由子滤波器进行独立的并行处理,再利用主滤波器对各个子系统的信息进行融合. 子系统估计和全局估计按以下融合算法确定.

$$\begin{cases} P_j^{-1}(j) = \sum_{i=1}^{n \cdot m} P_i^{-1}(j) \\ \hat{X}_g(j) = P_g(j) \sum_{i=1}^{n \cdot m} P_i^{-1}(j) \hat{X}_i(j) \end{cases}$$

式中,  $P_g$  和  $\hat{X}_g$  为系统组合的协方差阵和全局估计,  $\hat{X}_i$  和  $P_i$  ( $i$  为正整数) 是子滤波器  $i$  的状态估计和协方差阵. 主滤波器的信息通过信息分贝因子  $\beta_i$  分配到各子滤波器和主滤波器,即

$$\begin{cases} P_i^{-1}(j) = \beta_i P_g^{-1}(j) \\ \hat{X}_i(j) = \hat{X}_g(j) \\ Q_i^{-1}(j) = \beta_i Q_g^{-1}(j) \end{cases}$$

式中,  $G_g$  和  $Q_i$  分别为系统组合和子滤波器  $i$  的噪声方差阵.

根据信息守恒原理,即  $\sum_{i=1}^{n \cdot m} \beta_i = 1$  可知,通过自适应调整  $\beta_i$ ,就可以形成自适应的联合卡尔曼滤波系统,使系统具有更好的适应性.

### 4 实验结果与分析

系统在环境温度 7.8 °C, 流量 100 mL/min, SO<sub>2</sub> 标气 1.5 × 10<sup>-5</sup>, H<sub>2</sub>S 标气 1.5 × 10<sup>-5</sup>, CO 标气 4.0 × 10<sup>-4</sup>, HF 标气 1.5 × 10<sup>-5</sup> 条件下进行校准,然后在不同温度和不同流量的情况下,对不同气体含量的标气分别进行测量,得到实验数据见表 1.

表 1 气体实验数据

温度 /°C	流量 / (mL · min <sup>-1</sup> )	标气 10 <sup>-6</sup>				测量值 10 <sup>-6</sup>				相对误差 / %			
		SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO	HF	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO	HF	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO	HF
7.8	10	10.0	10.0	100.0	5.0	10.2	10.0	102.0	4.8	2.0	0	2.0	4.0
-5.8	20	15.0	15.0	150.0	10.0	14.9	14.9	152.0	9.5	0.6	0.6	1.3	3.0
-0.8	40	20.0	20.0	200.0	15.0	20.1	20.5	201.0	14.6	0.5	2.5	0.5	2.6
4.5	80	30.0	30.0	300.0	20.0	28.9	29.4	295.0	19.2	3.6	2.0	1.7	4.0
9.2	100	40.0	40.0	400.0	25.0	40.0	40.0	401.0	25.4	0	0	0.3	1.6
19.4	120	50.0	50.0	500.0	30.0	50.0	51.0	502.0	30.2	0	2.0	0.4	0.6
29.6	150	60.0	60.0	600.0	35.0	60.6	60.2	601.0	34.8	1.0	0.3	0.1	0.5

由表 1 可知,在不同温度和流量的条件下,SO<sub>2</sub> 气体的相对误差 < 3.6%, H<sub>2</sub>S 气体的相对误差 < 2.5%, CO 气体的相对误差 < 2.0%, HF 气体的相对误差 < 4.0%. SF<sub>6</sub> 分解产物的数据误差很小,说明该系统有效地抑制了气体传感器交叉干扰,自适应联合卡尔曼滤波算法对温度、流量补偿效果明显.

### 5 结论

本文设计了基于气体传感器法的 SF<sub>6</sub> 分解产物检测系统,采用新型过滤装置,设计了基于气体传感器特点的恒定电位电路. 实验结果表明,该系统有效地排除了传感器之间的交叉干扰,采用自适应联合卡尔曼滤波算法有效弥补了温度、流量对系统的干扰,实现了零点自动跟踪. 系统稳定可靠、测量精确、操作方便、响应速度快,可对 GIS 设备的工作状态进行科学评估,防患于未然.

#### 参考文献:

[1] Sauers I, Ellis H W, Christophorou L G. Neutral decom-

position products in spark breakdown of SF<sub>6</sub> [J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1986, 21 (2): 111.

[2] IEC 60480—2004, Guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) taken from electrical equipment and specification for its reuse [S].

[3] Chu F Y. SF<sub>6</sub> decomposition in gas-insulated equipment [J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1986, 21 (5): 693.

[4] 张晓星, 谢延斌, 姚尧. 曲线拟合法用于 SF<sub>6</sub> 分解气体组分的重叠色谱峰分离研究 [J]. 高电压技术, 2008, 34(12): 2708.

[5] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等. SF<sub>6</sub> 放电分解气体组分分析的现状和发展 [J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 664.

[6] 杨海平, 陈汉平, 王静, 等. 热解温度对神府煤热解与气化特性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (8): 42.

[7] 李红雷, 周方洁, 谈克雄, 等. 用于变压器在线监测的傅里叶红外定量分析 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (18): 62.