

# 气体浓度检测仪在推进剂检测中的应用

左明聪, 张少博, 王伟  
(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 论述了气体浓度检测传感器类型和检测仪原理, 介绍了检测仪设计方法。结合发动机试验, 说明检测仪在推进剂运输、储存、试车等各环节的用途。

**关键词:** 气体浓度检测; 气体浓度传感器; 防爆设计; 推进剂检测

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 01-0092-05

## Application of gas concentration detector in propellant detection

ZUO Ming-cong, ZHANG Shao-bo, WANG Wei  
(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The types of the gas concentration sensors and principle of the gas concentration detector are described in this paper. The design of each module in the detector is introduced. The application methods of the detector in transportation, storage and hot test of the propellant are elaborated in combination with the characteristics of rocket engine test.

**Keywords:** gas concentration detection; gas concentration sensor; anti-explosion design; propellant detection

## 0 引言

液体火箭发动机试验中使用的推进剂是一类易燃、易爆、剧毒物质。在运输、存储、加注以及试车过程中, 如果推进剂发生泄漏, 将直接危害操作者及相关人员的健康及人身安全, 造成设备损毁、环境危害。因此, 对推进剂泄漏的监视和泄漏浓度的测量极为重要。

## 1 气体浓度检测原理

气体检测从本质上是对生物嗅觉系统的模拟, 各种气体检测仪的设计源自生物嗅觉系统的神经生理结构和生物化学机理。气体检测仪一般由气体探头和检测主机两部分组成。

气体探头核心是气体浓度检测传感器或变送器, 从早期的检测管逐步发展到固态传感器、光

收稿日期: 2013-06-12; 修回日期: 2013-09-20

作者简介: 左明聪 (1986—), 男, 助理工程师, 研究领域为测控技术与仪器

粒子传感器、红外传感器等, 见表 1。

对于肼类燃料和硝基氧化剂, 一般采用化学分析法或检测管法。前者需要专用试剂和分析仪

器, 还需采样、样品富集等预处理过程, 存在操作繁琐、耗时长等问题; 后者准确度低, 只能作为定性半定量分析。

表 1 气体浓度检测传感器类型及工作原理

Tab.1 Principles and types of gas concentration sensors

传感器类型	检测原理	优点	缺点
固态传感器	由内置的两个金属氧化物电极构成, 气体会影响金属的电阻, 通过电阻变化的大小反映气体浓度的变化	使用寿命长。无交叉反应, 不存在其他气体对它的干扰。适用温度范围宽, 零点漂移小且稳定	现场断电时若对探头不进行保护, 容易受环境湿度的影响。而造成探头寿命缩短。价格昂贵
光离子传感器	使用一只紫外灯泡电离被检气体, 电离产生电流流向收集尖端再将电流转化并以浓度显示出来	响应速度快, 可检测稀薄气体, 可检测多种有毒气体	价格昂贵, 维护要求高, 需经常校准, 无特定性, 对湿度敏感
催化燃烧传感器	通过可燃气体或蒸气-空气混合物在灯丝处进行催化无焰燃烧, 反应放热引起热丝阻值增加, 造成电桥失去平衡, 电桥的输出信号和可燃气体的体积分数成正比, 由此测得气体浓度	使用寿命长, 温度、湿度、气体冷凝及压力变化对仪器敏感度影响小, 精确度高, 响应迅速, 可检测多种可燃性气体或蒸气	传感器易中毒, 检测时需要空气或氧气。频繁使用或连续暴露于高体积分数 TCT 下时, 使用寿命将缩短
电化学分析法	利用电解池原理, 将空气中某种化学气体通过氧化或还原反应将浓度转换为电信号, 通过检测电信号的大小得到相应气体的浓度	工艺成熟, 价格适中, 受环境湿度影响小	使用寿命短、零点不稳定, 需不断消耗电极, 选择性差, 对其他气体有交叉反应, 易受干扰

经调研, 奥德姆、IST 等公司生产的模块化气体传感器具有灵敏度高、误差小、可连续检测等优点, 已在推进剂检测中使用。

## 2 气体浓度检测仪设计

气体浓度检测仪设计要求包括结构及性能要求。

### 1) 结构要求

- 应使用耐腐蚀材料制造, 须进行防腐蚀处理;
- 应具有有效的防爆结构;
- 应具有防风雨、防沙、防虫结构, 安装、携带方便;
- 使用中应易于识别、安装、操作和监视;
- 传感器工作电压  $\leq$  DC28 V, 连续工作时间大于 8 h。

### 2) 性能要求

- 检测响应时间与报警响应时间为 10 s, 其恢复时间不大于 10 min;
- 重复性应满足误差在  $\pm 5\%$  以内;
- 检测率不小于 98%, 虚报率不大于 5%, 校准周期不大于 1 年, 平均故障时间不小于 1 年;
- 检测传感器的检测范围为: 0~1.0 ppm, 精度为 0.01 ppm, 检测下限为零, 上限应大于 3 倍最高容许浓度;
- 储存寿命不小于 10 年。

根据以上原则, 所设计的气体检测仪一般以微处理器为核心, 由探头、信号转换模块、键盘模块、微处理器模块、显示模块、电源模块和时钟电路等模块组成。

气体浓度检测仪的原理方框图见图 1。

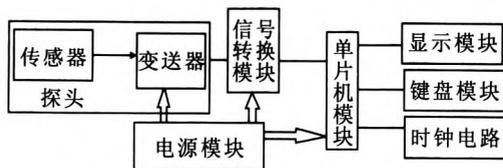


图1 气体浓度检测仪原理框图

Fig. 1 Functional block diagram of gas concentration detector

气体浓度检测仪软件一般包括初始化、键处理、数据采集、计算、显示、数据存储、参数置入和报警模块等。

### 2.1 传感器选型

现有的气体传感器多数为电化学气体传感器，利用电解池原理，将空气中待测气体通过氧化或还原反应将浓度转换为电解电流信号，测量电解电流幅度得到相应气体的浓度。电解电流与气体体积分数的关系符合式：

$$I = nFADC\delta \quad (1)$$

式中： $I$ 为电解电流； $n$ 为摩尔气体所发生的电子数； $F$ 为法拉第常数，96 500 C/mol； $A$ 为气体扩散面积， $\text{cm}^2$ ； $D$ 为扩散系数， $\text{cm}^2/\text{s}$ ； $C$ 为在电解质溶液中电解的气体体积分数， $\text{mol}/\text{cm}^3$ ； $\delta$ 为扩散层厚度， $\text{cm}$ 。

在一定工作条件下， $n$ ， $F$ ， $A$ ， $D$ 及 $\delta$ 均为常数，则可令

$$K = nFAD/\delta \quad (2)$$

于是有：

$$I = KC \quad (3)$$

即极限扩散电流与被测气体浓度成正比。测量流经工作电极的电流，即可获得气体浓度。

电化学传感器在常规气体检测中得到了普遍使用，目前也是检测肼类燃料和硝基氧化剂气体浓度的主要途径。因此，推进剂检测仪设计建议采用电化学传感器探头。

### 2.2 硬件设计

#### 2.2.1 处理器选型

检测仪的核心是微处理器。微处理器一般具有定时、I/O、显示和键盘、串行通讯等接口，某些还具有A/D转换接口，可根据需要选择。处理器计算能力及功耗可根据实际要求权衡。

常用处理器性能对比见图2。

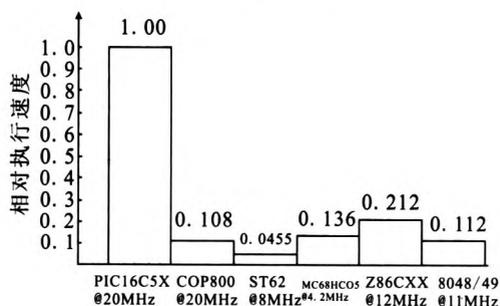


图2 常用处理器性能对比

Fig. 2 Performance contrast of common microprocessors

#### 2.2.2 信号转换模块

参见图1，根据气体探头输出信号特征设计信号转换电路。

气体探头中若采用变速器，其输出信号一般为4~20 mA 电流信号。此时需要设计I/V变换电路，即通过I/V转换电阻，将电流信号转换为电压信号，经过限幅、阻抗匹配、幅度变换及低频滤波，转换为符合处理器或A/D芯片要求的标准电压信号。

气体探头中若直接采用传感器，其输出信号一般为毫伏级信号，需要设计前置放大电路，一般要求高输入阻抗、高共模抑制比和低噪声性能等，故常选用精密低能耗、高共模抑制比的运算放大器组成信号放大电路。图3给出了一种典型的信号放大电路。

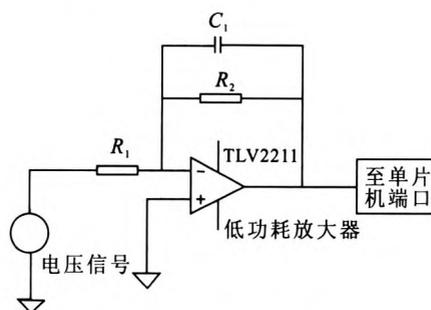


图3 信号放大原理框图

Fig. 3 Principle diagram of signal amplification

为增强小信号抗干扰能力，一般应设计低通滤波电路。对于图3给出的典型电路，其滤波截止频率为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (4)$$

通带内放大倍数为:

$$K = -\frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

通过选择适当的电阻值, 使得其输出电压满足后端电路要求。

图 1 中所示的电源、显示和键盘模块等一般采用成熟的技术方案。

### 2.3 检测仪软件设计

#### 2.3.1 初始化模块

微处理器上电时执行初始化程序, 完成全局变量、I/O 端口、A/D 电路初始化, 设置定时器、计数器, 设置并检查显示模块。初始化结束时, 一般自动读出存储的累计气体浓度值并显示。

#### 2.3.2 键处理模块

一般为按键中断服务程序, 采用定时中断扫描的方式进行按键检测。

#### 2.3.3 数据采集模块

通过控制 A/D 电路, 将模拟输入信号转化为相应的数字量, 进而计算得到对应电压值。

#### 2.3.4 计算模块

完成软件滤波、气体浓度计算。软件滤波算法需要根据信号特点及 A/D 转换特性酌情选取。

#### 2.3.5 显示模块

检测仪一般选配液晶显示模块, 因此需要完成液晶模块驱动、数据转换等。

### 2.4 防爆设计

气体浓度检测仪必须满足防爆要求。根据 GB3836.11-2008/IEC 60079-1-1:2002 等标准的规定设计仪器外壳, 使其能承受内部爆炸性气体混合物的爆炸压力, 并能阻止内部的爆炸向外壳周围爆炸性混合物传播。隔爆外壳的防爆机理基于“间隙防爆”原理。为避免电子线路或电气零部件产生的电火花或高温, 常将相关的部分放在一个或几个满足“间隙防爆”原理要求的外壳中, 从而避免引燃及产生爆炸。

一般将外壳设计成两腔体结构。电缆连接部分是隔爆外壳结构中最为薄弱的部分, 易产生隔爆结构的人为损坏或安装缺陷, 从而导致可能的

局部隔爆性能下降。因此, 根据 GB3836.10-91 等标准, 将具有火花或危险高温的部分单独设计成一个独立于接线腔的隔爆主腔体, 即使主腔体内产生爆炸也不致于穿透到隔爆性能较为薄弱的接线盒腔。

隔爆外壳的设计必须满足两个基本条件:

a. 外壳具有足够强度, 能承受内部的爆炸压力而不损坏, 且不产生影响防爆性能的永久性变形。

b. 外壳接合面具有足够小的间隙和足够长的啮合长度, 内部的爆炸产物 (炽热火焰或颗粒) 不会窜出外壳并点燃周围环境中的爆炸性混合物。

## 3 气体浓度检测仪的应用

常规液体火箭发动机试验中使用的肼类燃料和硝基氧化剂均为有毒有害物质。氧化剂易挥发为有毒气体, 对现场操作人员身体健康构成严重危害; 肼类燃料是易燃、易爆、有毒气体, 对现场人员、设备带来安全隐患。使用气体检测仪可以确保推进剂运输、储存、转注和使用等过程中的人员财产安全。

### 3.1 在推进剂运输中的应用

推进剂转运一般采用公路和铁路槽车运输。一般在槽车内安装密闭容器, 容器转注口一般位于槽车头部或尾部, 在此安装推进剂浓度检测仪, 确保在途运输的介质安全。

为保障运输人员的安全和健康, 要求容器密闭性好。按照 GB309-1996 氮氧化物三级标准, 一小时平均浓度不能超过 0.15 ppm, 故气体浓度检测仪量程应达到 0~1.0 ppm, 检测精度不低于 0.01 ppm。传感器一般采用可更换模块, 且使用寿命不低于 1 年。

### 3.2 在推进剂转注、储存和试验中的应用

通过公路或者铁路槽车运输的推进剂, 到场后需与储存库房的工艺管道对接转注到储存容器, 在试验前再加注至试验用容器。上述过程中存在许多工艺管道和接口, 是泄漏的薄弱环节。针对这些薄弱环节, 需要就近部署推进剂泄露检测探头, 进行实时监控。

试验过程中, 试验用容器加压, 使得整个管路处于高压状态, 推进剂在管路中高速流动。由于肼类燃料和硝基氧化剂管路近距离并向铺设, 一旦同时泄漏将造成毁灭性后果。因此, 须在易于泄漏的管路附近安装浓度检测仪, 当出现泄漏或故障时及时预警, 防止事故发生。鉴于试验现场一般无人员, 检测仪量程 0~20 ppm、检测精度 1 ppm 即可。

### 3.3 气体检测仪使用效果

在试验区介质储存库房、加注管路和试验系统等处安装使用肼类燃料和硝基氧化剂气体浓度检测仪, 为过程中的风险管控、安全警示提供了准确的评定标准。此外, 通过连接消防喷淋系统, 可以在泄漏发生时对容器进行水消防, 防止事故扩大。

合理地使用不同类型的气体浓度检测仪, 设置相应报警上限, 安装在不同的工位, 可达到保护人员、设备安全, 防止事故发生的目的。

## 4 结论

传统气体浓度检测仪一般采用单一的传感器, 且内置在仪器内部, 失效后更换不便; 新型检测仪可以同时检测多种气体, 其检测模块实现了模块化, 仪器便于使用、维护。

气体浓度检测仪采用微处理器实现智能检测, 提高了检测精度, 功能更加丰富, 使用更为灵活。利用检测仪的数据记录功能, 可以实现对相关区域的长期监控; 利用其通讯功能, 可以组成监控网络, 与其它相关数据采集、安防等系统

集成。可以预见, 气体浓度检测仪将为推进剂的安全使用提供更为全面、及时、有效的保障。

### 参考文献:

- [1] 胡文祥. 火箭推进剂防护医学研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 1999, 12(6): 451-455.
- [2] 曹晔. 液体推进剂系列毒气监测仪器的研究[J]. 医疗卫生装备, 2012 (10): 7-9.
- [3] 王荣宗. 便携式推进剂泄漏检测仪[J]. 导弹与航天运载技术, 1999 (3): 55-62.
- [4] 李新其, 刘祥萱, 李红霞. 液体推进剂贮存可靠性模糊故障树方法研究[J]. 火箭推进, 2004, (5):31-35.
- [5] 张晓丽. 隔爆型电气设备外壳强度及刚度设计与计算[J]. 电气防爆, 2000 (2): 17-19.
- [6] 王建波, 于达仁, 王广雄. 基于 K-L 信息测度的液体火箭发动机的泄漏故障检测 [J]. 航空动力学报, 1999 (4): 430-432.
- [7] 朱向乐. 基于 DSP 的便携式气体检测仪系统[J]. 仪表技术与传感器, 2011 (2): 31-37.
- [8] 周鹏, 王军. 基于 MSP430 的便携式四合一气体检测仪 [J]. 仪表技术与传感器, 2012, (11): 77-79.
- [9] 郭桂凤. 安全气体检测仪在石油化工行业中的应用和维护[J]. 河北化工, 2004 (5): 55-56.
- [10] 张乐. 气体检测报警器在化工生产中的作用与安装技术[J]. 河南化工, 2012, 29(Z4): 5-7.
- [11] 熊志凯. NO<sub>x</sub> 分析仪转换效率检查方法研究 [J]. 机电工程, 2012 (11): 1276-1279.
- [12] 徐东晟. 无需断电即可迅速确定 SF<sub>6</sub> 泄漏部位的新仪器[J]. 高压电器, 2001 (5): 49-50.

(编辑: 王建喜)