

文章编号: 1671- 251X(2010) 07- 0057- 05

恒温检测方法在检测混合气体中的应用

于 震¹, 张正勇²

(1. 渤海大学物理系, 辽宁 锦州 121000; 2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 根据催化燃烧气体传感器的敏感机理, 讨论了催化燃烧气体传感器检测电桥在恒压源供电情况下的输出与补偿元件和敏感元件电阻变化之间的关系; 应用补偿元件和敏感元件的电阻与其工作温度变化的关系及热平衡方程, 推导出了催化燃烧气体传感器输出与被测气体浓度之间的关系, 且得出催化燃烧气体传感器的输出是线性的; 提出了采用 n 个催化燃烧气体传感器分别工作在不同温度下, 根据每个传感器的输出计算出由 n 种气体组成的混合气体中的各组分浓度的方法。试验结果表明, 应用该方法检测混合气体各组分浓度时, 最大检测相对误差小于 10%, 且相对误差与浓度没有严格的依赖关系。

关键词: 催化气体传感器; 混合气体; 恒温检测; 热敏电阻; 热平衡分析

中图分类号: TD712. 3 **文献标识码:** A

收稿日期: 2010- 03- 19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534050), 国家 863 计划课题(2007AA04Z332)

作者简介: 于 震(1977 -), 男, 辽宁朝阳人, 助教, 硕士, 2008 年毕业于中国科学技术大学, 现主要从事传感器技术方面的教学与研究工作。E-mail: menghan202@ 163. com

0 引言

催化燃烧气体传感器与其它种类的气体传感器相比, 在检测可燃性气体方面具有一定的优势, 特别是由于它具有一定的抗高湿、粉尘等恶劣环境的能力以及体积小、价格低等优点, 在煤矿瓦斯检测中发

由死区等造成的脉宽调制波偏差电压看作是一种谐波扰动, 建立了基于谐波扰动的逆变电源数学模型, 根据这一模型得出逆变电源并联系统中的谐波环流产生原理, 提出了采用电流内环、电压外环的双环控制及增加耦合电感的谐波环流抑制方案。理论分析和仿真结果表明, 该方案有效地抑制了逆变电源并联系统的谐波环流。

参考文献:

- [1] GUERRERO JM, VICUNA LG, MIRET J, et al. A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation Systems [J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2004, 19(5).
- [2] CHEN Liangliang, XIAO Lan, GONG Chunying, et al. Circulating Current's Characteristics Analysis and the Control Strategy of Parallel System Based on Double Close loop Controlled VSI [C]//35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, Aachen: 4791- 4797.
- [3] 张 宇. 三相逆变器动态特性及其并联系统环流抑制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [4] 张 宇, 康 勇. 逆变器并联系统中谐波环流的抑制[C]//中国电源学会第十六届学术年会, 2005, 深圳.

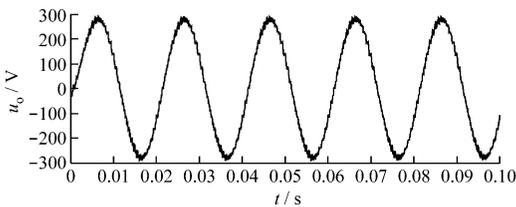


图 6 未加耦合电感时的逆变电源输出电压波形

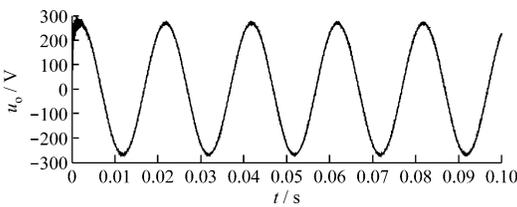


图 7 加入耦合电感时的逆变电源输出电压波形

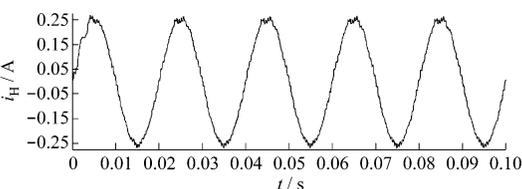


图 8 2 个逆变电源并联系统的环流波形

5 结语

详细分析了逆变电源及其并联的基本原理, 将

挥了巨大的作用,是目前国内煤矿中应用最多的一类气体传感器^[1]。

国内外对催化燃烧气体传感器,特别是催化瓦斯传感器的工作原理、检测方法以及性能改进等方面的研究已经很多^[2-7]。但是由于该传感器的敏感元件和补偿元件本身是热敏元件,其电阻会随着环境条件和工作条件的改变而变化,因此需要特别加以分析。本文从一个典型的催化燃烧气体传感器的结构、敏感机理和热平衡方程出发,讨论了传感器输出与被测气体浓度、工作温度之间的定量关系,给出了在传感器输出线性的条件下计算混合可燃性气体中各组分浓度的线性方程。

1 传感器输出与电阻变化的关系

图1为催化燃烧气体传感器的典型结构。该传感器由敏感元件A、补偿元件B及其引线和透气性良好的金属防爆保护外壳等构成。敏感元件和补偿元件均由铂丝电阻外包裹球形疏松多孔氧化铝(载体)制成,它们的结构完全一致,被分别置于2个隔离的空腔内,这2个隔离的空腔对称分布,以保证其热分布边界条件一致。不同的是敏感元件载体上添加有催化剂(如pd等),被测气体在其上无烟燃烧放热,使得其温度升高,从而使铂丝的电阻增大,补偿元件上则没有催化剂,被测气体在其上不反应。因此,根据敏感元件铂丝的电阻变化可以检测可燃性气体并判断其浓度大小。

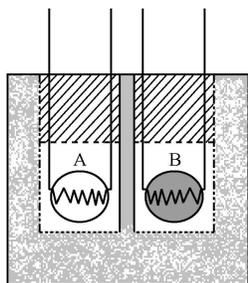


图1 催化燃烧气体传感器的典型结构

采用惠斯顿电桥检测传感器输出信号,如图2所示,其中U为电桥输出,R₁、R₂为平衡桥臂电阻,R₃、R分别为补偿元件和敏感元件电阻(铂丝)。通常有R₁ ≈ R₂, R₃ ≈ R,且(R₁ ≈ R₂) ≫ (R₃ ≈ R)。下面对采用恒压源供电的情况进行分析^[8]。

设如图2中恒压源的电压为E,则没有被测气体时电桥输出U₀为

$$U_0 = E(R_1R - R_2R_3) / [(R_3 + R)(R_1 + R_2)] \quad (1)$$

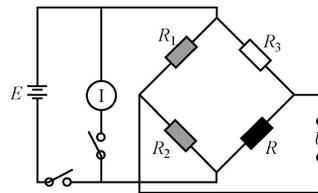


图2 传感器输出信号检测电路

电桥平衡时, U₀ = 0, 即 R₁R = R₂R₃。

由于可燃性气体在敏感元件上催化燃烧放热,使敏感元件的电阻发生变化,设达到热平衡时,敏感元件的电阻增加ΔR。由于R₃和R组成的桥臂(以下称传感器桥臂)的电阻变化引起电流变化,使得补偿元件R₃的电阻也要变化,设达到热平衡时,补偿元件的电阻增加ΔR₃,此时电桥输出为

$$U_g = E(R_1\Delta R - R_2\Delta R_3) / [(R_3 + R + \Delta R + \Delta R_3) \times (R_1 + R_2)] + E(R_1R - R_2R_3) / [(R + R_3 + \Delta R + \Delta R_3)(R_1 + R_2)] \approx E(R_1\Delta R - R_2\Delta R_3) / [(R + R_3 + \Delta R + \Delta R_3)(R_1 + R_2)] + U_0 \quad (2)$$

式(2)应用了[(ΔR + ΔR₃)/(R + R₃)] ≪ 1的关系。令 R₁/R₂ = R₃/R = n, 得

$$U_g \approx E(n\Delta R - \Delta R_3) / [R(1 + n)^2] \quad (3)$$

当 n = 1 时, 即 R₃ = R, R₁ = R₂, U_g 最大, 即

$$U_g \approx E(\Delta R - \Delta R_3) / (4R) = I_0(\Delta R - \Delta R_3) / 2 \quad (4)$$

式中: I₀ 为传感器桥臂的工作电流, 即 I₀ = E/(2R)。

由式(4)可得

$$(\Delta R - \Delta R_3) / R = 4U_g / E \quad (5)$$

设某传感器以3V供电,其输出为15mV(被测气体浓度为1%),则(ΔR - ΔR₃)/R = 0.02。在下面的推导中将其视为一个小量,并以R₃ = R作为基础。

2 传感器电阻变化表达式的推导

2.1 传感器电阻变化与温度变化的关系^[8]

式(4)中的电阻变化ΔR、ΔR₃分别是由敏感元件和补偿元件的温度变化引起的,其关系可由金属铂电阻的电阻-温度关系确定。

在0~650℃范围内,敏感元件电阻R与温度t之间的关系为

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (6)$$

式中: R(t) 为温度等于t时的电阻; R₀ 为 t = 0℃时的电阻; α = 3.968 47 × 10⁻³/K; β = -5.847 × 10⁻⁷/K²。

设传感器工作温度为T,则传感器电阻为

$$R = R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (7)$$

设被测气体中敏感元件的温度增加 Δt , 则其电阻为 $R(T + \Delta t)$, 有

$$R(T + \Delta t) = R_0[1 + \alpha(T + \Delta t) + \beta(T + \Delta t)^2] \quad (8)$$

由式(7)和式(8)得

$$\Delta R = R(T + \Delta t) - R(T) = R_0\alpha[1 + 2\beta T[1 + \Delta t/(2T)]]/\alpha \Delta t \quad (9)$$

因为 $[\Delta t/(2T)] \ll 1$, 所以有

$$\Delta R = R_0(\alpha + 2\beta T) \Delta t \quad (10)$$

同理可得

$$\Delta R_3 = R_0(\alpha + 2\beta T) \Delta t_3 \quad (11)$$

式中: Δt_3 为补偿元件的温度变化。

需要注意的是式(10)、式(11)中的温度单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 传感器电阻变化与加热功率变化的关系

令 $\Delta r = \Delta R + \Delta R_3$, 则在被测气体中传感器桥臂的电流为

$$I_g = E/(R + R_3 + \Delta r) \approx I_0[1 - \Delta r/(2R)] \quad (12)$$

此时敏感元件的加热功率为

$$W_{R_g} = [I_0(1 - \Delta r/2R)]^2(R + \Delta R) \quad (13)$$

略去高阶小量, 得

$$W_{R_g} = I_0^2 R(1 - \Delta R_3/R) \quad (14)$$

令 W_R 为没有检测气体时敏感元件的加热功率, 且 $W_R = I_0^2 R$, 则

$$\Delta W_R = W_{R_g} - W_R = -I_0^2 \Delta R_3 \quad (15)$$

即敏感元件的加热功率变化量与 ΔR_3 的绝对值成正比。

类似地, 可得到由于传感器桥臂总电阻增大而引起的补偿元件上加热功率的变化值:

$$\Delta W_{R_3} = W_{R_{3g}} - W_{R_3} = -I_0^2 \Delta R \quad (16)$$

2.3 传感器的热平衡方程与温度变化关系

催化燃烧气体传感器必须工作在一定的工作温度下才会对可燃性气体有较高的灵敏度。传感器达到热平衡时, 传感器内部各点的温度分布不再随时间变化, 传感器从电源获取的热量与传感器耗散的热量相等。传感器热量耗散主要通过热对流、热辐射和热传导这3种方式进行。从图1可看出, 催化燃烧气体传感器的热量主要通过热对流的方式向外耗散, 其次是热辐射和热传导。在没有被测气体时, 热平衡方程为

$$I_0^2 R = hS(T - T_0) + \epsilon F_{12} S(T^4 - T_2^4) + [-kA \cdot T(X)] \quad (17)$$

式中: 等式右边第一项为空气与元件表面接触进行热交换(对流)耗散的热功率(牛顿热交换定律); 第二项为热辐射耗散的热功率(斯蒂芬-波尔兹曼辐射定律); 第三项为铂丝热传导耗散的热功率(傅里叶热传导定律), 在热平衡时可以表示为 $kA \cdot (T - T_1)/L$, 其中 L 为传热铂丝的长度, T_1 为铂丝冷端的温度; $I_0^2 R$ 为敏感元件或补偿元件从电源获得的热功率; h 为热交换系数, 它与诸多物理量有关; S 为敏感元件或补偿元件的表面积(或散热面面积); T 为热平衡时敏感元件或补偿元件的绝对温度, 在此称为传感器工作温度; T_0 为敏感元件或补偿元件周围的绝对温度, 接近于环境温度; ϵ 为辐射率(黑度); $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ WP}(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; F_{12} 为与敏感元件外表面以及金属防爆保护外壳内表面有关的系数, 通常称为角系数, 也称形状因子、可视因子、交换系数等; T_2 为金属防爆保护外壳内表面的温度; k 为铂丝的导热系数; A 为铂丝的横截面积; $T(X)$ 为铂丝上的温度梯度。

在被测气体中, 设可燃性气体在敏感元件上燃烧产热的效率为 Q_F , 热平衡时敏感元件的温度为 T_g , 其周围空气的温度为 T'_0 , 则热平衡方程变为 $I_g^2(R + \Delta R) + Q_F = h_g S(T_g - T'_0) + \epsilon F_{12} S(T_g^4 - T_2^4) - kA \cdot T'(X)$ (18)

式中: h_g 为空气中存在被测气体时的热交换系数; T'_0 、 T_2 、 $T'(X)$ 对应于前述 T_0 、 T_2 、 $T(X)$ 。

由式(8)、式(17)、式(18)得

$$\Delta W_R + Q_F = S[h_g(T_g - T'_0) - h(T - T_0)] + \epsilon F_{12} S[(T_g^4 - T^4) + (T_2^4 - T_2'^4)] - kA[T'(X) - T(X)] \quad (19)$$

其中 $T_g > T$, 且热平衡时有 $T_2 \approx T_0$ 、 $T_2' \approx T_2$ 和 $T'_0 \approx T_0$ 。设铂丝冷端的温度不变(实际上可以实现), 于是式(19)可写为

$$\Delta W_R + Q_F = S[h_g(T_g - T_0) - h(T - T_0)] + \epsilon F_{12} S(T_g^4 - T^4) + kA(T_g - T)/L \quad (20)$$

应用实验定律^[9]: $h_g = h_c C + h(1 - C)$, 其中 h_c 为纯的被测气体的热交换系数, C 为被测气体的体积百分比浓度。令 $T_g = T + \Delta t$, 在热辐射损耗小于热交换损耗的前提下, 可略去热辐射部分的 $\Delta t/T$ 高阶小量项。并注意到热辐射项中的温度为绝对温度, 应用 $[C(h_c - h)/h] \ll 1$ 的条件, 得

$$\Delta W_R + Q_F = SC(h_c - h)(T - T_0) + Sh \Delta t + 4\epsilon F_{12} S(T + 273)^3 \Delta t + kA \Delta t/L \quad (21)$$

$$\Delta t = [\Delta W_R + Q_F + SC(h - h_c)(T - T_0)]/[Sh + 4\epsilon F_{12} S(T + 273)^3 + kA/L] \quad (22)$$

式中: T 为用摄氏温度表示的传感器工作温度。

再看补偿元件上的热平衡。当存在被测气体时, 设其温度变化为 ΔR_3 , 类似地可得

$$\Delta R_3 = [\Delta W R_3 + SC(h - h_G)(T - T_0)] / [Sh + 4\sigma F_{12} S(T + 273)^3 + kA/L] \quad (23)$$

2.4 热平衡时元件电阻变化的表达式

由式(10)、式(15)、式(22)得

$$\Delta R = aR_0[-I_0^2 \Delta R_3 + Q_F + SC(h - h_G)(T - T_0)] \quad (24)$$

式中: $a = (\alpha + 2\beta T) / [Sh + 4\sigma F_{12} S(T + 273)^3 + kA/L]$, 其量纲为 $[W^{-1}]$, 它和工作温度 T 、敏感元件或补偿元件表面积 S 以及空气的热交换系数 h 等有关。在 A/L 很小、 $A \ll S$ 的实际情况下, 铂丝热传导所耗散的热量的变化量可以忽略不计。因此有

$$a = (\alpha + 2\beta T) / \{S[h + 4\sigma F_{12}(T + 273)^3]\} = \gamma/S \quad (25)$$

式中: $\gamma = (\alpha + 2\beta T) / [h + 4\sigma F_{12}(T + 273)^3]$ 。

由式(11)、(16)、(23)得

$$\Delta R_3 = aR_0[-I_0^2 \Delta R + SC(h - h_G)(T - T_0)] \quad (26)$$

由式(24)、式(26)得

$$\Delta R - \Delta R_3 = \frac{aR_0 Q_F}{1 - aI_0^2 R_0} \quad (27)$$

由式(27)可见, 在催化燃烧气体传感器采用恒压源供电的情况下, 由于敏感元件和补偿元件所处环境相同, 研究其输出时可以不考虑热交换系数的变化。

3 传感器产生热量与被测气体浓度的关系

设敏感元件中敏感材料的体积为 $V(\text{dm}^3)$, 疏松多孔的敏感材料的孔隙率为 p 。根据可燃性气体氧化反应方程式 ($G + xO_2 = mCO_2 + nH_2O$) 可看出, 由于 O_2 浓度在大气环境中基本不变, 在被测气体 G 的浓度较低时, 反应速度仅由被测气体 G 的浓度决定且可以表示为 $v = k(t)[G](\text{mol}/(l \cdot s))$, 其中 $k(t)$ 为反应速度常数, 它除了与被测气体种类、催化剂种类和其量有关外, 还与反应温度 t 有关, 且遵循阿伦尼乌斯(S. Arrhenius)定律: $[G]$ 为被测气体 G 的摩尔浓度 (mol/l), 则单位时间内在敏感材料上催化燃烧所消耗的被测气体 G 的量为 $pVk(t)[G](\text{mol}/s)$ 。设 1 mol 被测气体燃烧产生的热量为 q , 则单位时间内被测气体 G 催化燃烧产生的热量为

$$Q_F = qpVk(t)[G] \quad (28)$$

设在标准状态下, 用体积百分比浓度 C 表示 $[G]$, 则 $[G] = C/2240$, 因此有

$$Q_F = q'pVk(t)C \quad (29)$$

式中: $q' = q/2240$ 。

将式(29)代入式(27), 得

$$\Delta R - \Delta R_3 = \frac{aR_0 q' p V k(t) C}{1 - aI_0^2 R_0} \quad (30)$$

将式(30)代入式(4), 得

$$U_g = \frac{EaR_0 q' p V k(t) C}{4R(1 - aI_0^2 R_0)} \quad (31)$$

由式(6)、式(31)可进一步表示为

$$U_g = \frac{Eaq' p V k(t) C}{4(1 + \alpha T + \beta T^2)(1 - aI_0^2 R_0)} \quad (32)$$

如果被测气体为 n 种可燃性气体的混合气体, 则其产热效率是所有组分催化燃烧产热效率之和, 即

$$Q_F = \sum_{i=1}^n Q_{Fi} = \sum_{i=1}^n q_{gi} k_i(T) C_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (33)$$

设有 n 个催化燃烧气体传感器, 其中第 j 个传感器的工作温度为 T_j , 被测气体催化燃烧产热效率为 Q_{Fj} , 则

$$Q_{Fj} = \sum_{i=1}^n q_{gi} k_i(T_j) C_i \quad (34)$$

由传感器输出方程得第 j 个传感器在被测混合气体中的输出为

$$U_{Vgj} = E_j(4R_j)^{-1} \{ (h_j S_j + 4\sigma \sigma_j F_j S_j T_j^3 + kA_j/L_j) / [R_j(\alpha + 2\beta T_j)] - I_0^2 \}^{-1} \times \sum_{i=1}^n q_{gi} k_i(T_j) C_i \quad (35)$$

令 $A_j = E_j(4R_j)^{-1} \{ (h_j S_j + 4\sigma \sigma_j F_j S_j T_j^3 + kA_j/L_j) / [R_j(\alpha + 2\beta T_j)] - I_0^2 \}^{-1}$, 则式(35)可简写为

$$U_{Vgj} = A_j \sum_{i=1}^n q_{gi} k_i(T_j) C_i \quad (36)$$

由这样的 n 个独立输出方程可解出 $C_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 用矩阵表示为

$$C = A^{-1} U_{vg} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (37)$$

式中: A 为 $n \times n$ 的系数矩阵, 其中 $A_{ij} = A_j q_{gi} k_i(T_j)$, 由于所有 A_j 、 q_{gi} 和 $k_i(T_j) (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 各不相同, 因此, A 为满秩矩阵, 即方程(37)有惟一解。

因此, 对由 n 种组分组成的混合可燃性气体, 用 n 个热催化燃烧气体传感器分别工作在不同的工作

电压 $E_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 下即可由方程(37)实现对各组分浓度的检测。系数矩阵 A 可通过 n 个催化燃烧气体传感器分别对 n 种组分的标定获得。

4 实验与结论

采用 3 个催化燃烧气体传感器分别工作在不同的工作温度下(实验中用不同的工作电压),对 CH_4 、 H_2 和 CO 三组分的混合气体进行测试。首先,在确定的工作电压下和特定的环境中,对每个传感器分别标定对各组分气体的灵敏度系数,获得混

合气体的浓度解耦矩阵 A , 并对其求逆,如果不能求逆,可调整传感器工作电压,直到 A 可逆。在多次标定的基础上取均值,可以最大限度地保证检测精度。

在此基础上,在传感器测试容器中分别加入已知浓度的 CH_4 、 H_2 和 CO , 根据工作电压不同的 3 个传感器的输出按式(37)计算其浓度值,并与实际浓度进行比较,可得出检测混合气体各组分浓度的相对误差,其结果如表 1 所示。

表 1 混合气体检测结果及其相对误差

实际浓度值			测试浓度值			相对误差		
$\text{CH}_4/\%$	$\text{H}_2/\%$	$\text{CO}/\%$	$\text{CH}_4/\%$	$\text{H}_2/\%$	$\text{CO}/\%$	$\text{CH}_4/\%$	$\text{H}_2/\%$	$\text{CO}/\%$
0.5	0.5	0.1	0.49	0.48	0.093	-2%	-4%	-7%
1.0	0.5	0.1	1.03	0.48	0.092	3%	-4%	-8%
2.0	0.5	0.1	1.97	0.49	0.092	-1.5%	-2%	-8%
3.0	0.5	0.1	2.95	0.50	0.091	-1.7%	0%	-9%
4.0	0.5	0.1	4.12	0.52	0.091	3.5%	4%	-9%
1.0	1.0	0.1	1.02	1.03	0.092	2%	3%	-8%
1.0	2.0	0.1	0.99	2.04	0.091	-1%	2%	-9%
1.0	3.0	0.1	0.98	2.93	0.091	-2%	-2.3%	-9%
1.0	4.0	0.1	0.98	3.85	0.091	-3.8%	-1.3%	-9%
1.0	1.0	0.2	1.01	0.98	0.185	1%	-2%	-7.5%
1.0	1.0	0.3	1.01	0.99	0.280	1%	-1%	-6.7%
1.0	1.0	0.4	0.98	1.02	0.377	-2%	2%	-5.8%
1.0	1.0	0.5	0.99	1.03	0.478	-1%	3%	-4.4%
2.0	2.0	0.2	1.96	2.05	0.183	-2%	2.5%	-8.5%
3.0	3.0	0.5	2.87	2.88	0.475	-4.3%	-4%	-5%

从表 1 可看出,其最大检测相对误差在 10% 以内,并且相对误差与浓度没有严格的依赖关系。相对来说, CH_4 和 H_2 的检测相对误差较小,而 CO 的相对误差较大。

用 n 个催化燃烧气体传感器分别工作在不同的工作温度下,根据每个传感器的输出就可以计算出由 n 种气体组成的混合气体中各组分的浓度。更进一步,参考文献[10]给出了用 1 个传感器工作于不同的工作温度下分析混合气体的方法,但它认为传感器输出是非线性的,而本文得出的结论是输出是线性的。

参考文献:

- [1] 童敏明. 催化传感器的研究与应用技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.
 [2] 王汝琳. 矿井瓦斯传感器的近代研究方法方向[J].

煤矿自动化, 1998(4): 16-18.

- [3] 童敏明, 杨胜强, 田丰. 新型瓦斯传感器关键技术的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 399-401.
 [4] 孙纲灿, 周常柱, 苏贝. 用单片机实现瓦斯探测器[J]. 微计算机信息, 2005, 8(2): 66-68.
 [5] 刘建周, 范健, 王小刚. 甲烷催化燃烧反应与甲烷传感器稳定性的研究[J]. 煤炭转化, 1998, 21(1): 87-90.
 [6] 朱正和. 提高甲烷载体催化元件灵敏度的研究[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(6): 21-22.
 [7] 谢宝卫, 李国斌. 催化燃烧型瓦斯检测仪器性能特征及影响因素浅析[J]. 煤矿安全, 2002, 33(3): 54-55.
 [8] 余瑞芬. 传感器原理[M]. 2版. 北京: 航空工业出版社, 1995.
 [9] 吴越. 催化化学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
 [10] 童敏明, 张愉, 戴新联. 催化传感器对可燃混合气体的分析[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 35-38.