

# 非分光红外瓦斯传感器压力补偿分析

王聪,魏衡华,赵宇

(中国科学技术大学 自动化系,安徽 合肥 230027)

**摘要:**近年来受到国民经济快速发展的推动,煤矿的开采量和消费量呈现快速增长的势头,同时很多煤矿企业存在着安全监测不完善等煤矿安全问题,严重影响了煤矿的开采和人员的安全,其中瓦斯监控是煤矿安全中的重要组成部分。介绍了一种基于非分光红外原理的瓦斯传感器的工作原理,同时阐述了压力补偿的必要性,然后基于最新的单光源双通道甲烷传感器进行分析,介绍了一种压力补偿方法,基本克服了压力的漂移问题,提高了测量的准确性。

**关键词:** 非分光红外;瓦斯;气体传感器;压力补偿

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2014)06-0074-03

## The pressure compensation about non-dispersive infrared methane transducer

Wang Cong, Wei Henghua, Zhao Yu

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In recent years, the rapid development of national economy improves the production and consumption of coal mine. At the same time, there are lots of security issues which seriously affected the coal mining and personnel safety. In the safety monitoring, methane measurement is the most important. This paper describes the principle of methane transducer based on non-dispersive infrared and the necessity about pressure compensation. Using methane sensor which based on dual-channel and single source, describe the method of it, basically overcome the problem of temperature pressure drift, increase the measurement accuracy.

**Key words:** non-dispersive infrared; methane; gas transducer; pressure compensation

煤炭是我国的主要能源之一,对国民经济的发展有重大的意义,目前煤矿生产中,很多企业都存在安全监测不完善、管理落后等问题,导致安全生产形势不容乐观。监测矿井现场各种气体浓度、风速和设备的状态可以有效地保障生命财产安全,降低事故的发生率。煤矿事故中由瓦斯造成的伤亡比例超过50%,可见瓦斯监控的重要性。瓦斯主要来自矿井中的煤气,主要成分是甲烷,爆炸通常发生在瓦斯占空气浓度5%~16%。因此监测到瓦斯浓度超标时应该立刻停止工作,撤出人员,查明原因,采取措施。

现有的瓦斯监测手段主要有电化学式、光干涉式、载体催化式和非分光红外型几种。

光干涉型传感器存在着体积大、调校频率高、空气成分复杂时测量不准确、容易发生误报等问题,干涉信号向电信号的转变困难也限制了它的发展。

载体催化型又称“黑白元件型”,比光干涉型整体性能有所提升,但是存在着“高浓度冲击损坏”、“催化剂中

毒”等现象,限制了它的量程和使用的环境,需要经常维护和更新设备,无形中提高了成本。

最新的基于非分光红外原理的瓦斯传感器具有灵敏度高、调校周期长、寿命长等特点,而且不存在中毒现象,可以测量100%的浓度。目前国外用于精密气体测量的传感器使用的都是非分光红外原理,国内虽然也在研究但是还没有到达实用化的阶段,在应用方面存在很多问题。总体来说红外原理的传感器性能要优于使用其他几种原理的传感器<sup>[1]</sup>。

温度补偿方法很多,而压力补偿的方法却寥寥无几,本文重点介绍一种非分光红外原理的瓦斯传感器的工作原理及其压力补偿方法。

### 1 非分光红外检测原理

非分光红外原理主要根据不同的气体对不同波长的红外光吸收率不同,一般来说多原子分子和非对称的双原子分子都对某一波长的红外光具有强吸收,如表1所示<sup>[2]</sup>。

# 技术与方法

## Technique and Method

表 1 矿井气体红外吸收带(部分)

气体	弱吸收/ $\mu\text{m}$	强吸收/ $\mu\text{m}$
一氧化碳	2.3	4.6
甲烷	3.9	3.39, 6.5
水蒸气	5.2	2.7, 6.27
二氧化碳	2.0, 4.8, 5.2, 9.4	2.7, 4.3
氧化氮	4.05	4.5, 8.6
臭氧	14	4.7, 8.9

### 1.1 非分光气体传感器原理

单光源双通道非分光气体传感器原理如图 1 所示。热电传感器的输出信号取决于自身材料温差电动热和入射的红外辐射量,若红外辐射保持不变,则红外热电输出将不变,这将不利于测量。因此红外灯采用幅值为 3.3 V、占空比为 50% 的 4 Hz 方波驱动。为减少或消除光线的背景干涉作用,并使活动探头和参考探头检测到入射辐射的变化,光源必须是脉动的,相应地从探头输出的信号与光源的脉动是同步的。因此,随着驱动光源方波的变化,探头输出波形的最大值和最小值构成了有用的检测信号。它们的差值与入射辐射的强度有关<sup>[3]</sup>。

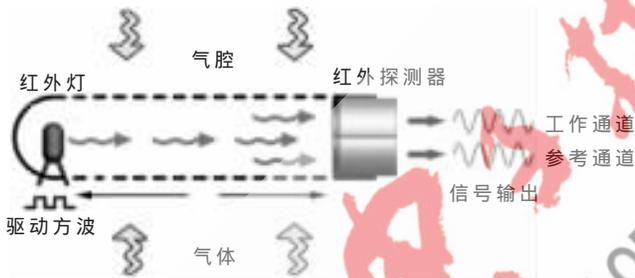


图 1 单光源双通道气体传感器原理图

发出宽波长、强度呈周期性变化的红外光,中间经过气室,右边是两个由滤光片和光学传感器组成的探测通道,工作通道滤光片允许通过的波长为 3.39  $\mu\text{m}$ ,主要是进行甲烷浓度的测量,参考通道允许通过的波长为 2.90  $\mu\text{m}$ ,起到一个自补偿的作用。由表 1 可知,3.39  $\mu\text{m}$  处甲烷有很强的吸收,2.90  $\mu\text{m}$  处很弱,2.90  $\mu\text{m}$  同时避开了空气中的水蒸气和二氧化碳的干扰。

### 1.2 朗伯—比尔定律

红外线是电磁波的一种,具有散射、反射、干涉、吸收等性质,在介质中传播时会受到散射和吸收作用而使其衰减,衰减遵循朗伯—比尔定律。朗伯—比尔吸收定律的公式为:

$$I = I_0 \times \exp(-KLC) \quad (1)$$

式中,  $I$  是通入目标气体的透射光强度,  $I_0$  为通入空气的入射光强度,  $K$  为取决于吸收截面的参数,  $L$  是从光源到探测器的长度,  $C$  是目标气体浓度。

由式(1)可以得到:

$$FA = 1 - I/I_0 = 1 - \exp(-KLC) = 1 - V/V_0 \quad (2)$$

其中,  $V_0$  是空气中工作通道输出电压,  $V$  是通入目标气体时的工作通道输出电压。

这里的 FA 是单通道测量电压得到的一个中间值,可由它计算出浓度,但是在目标气体浓度超过 10% 时会出现饱和现象,测量高浓度的气体时变化十分微弱。

### 1.3 修正的朗伯—比尔定律

以上是理想化的情况,实际应用中存在以下问题,光路长度  $L$  不是固定的值,传感器的性能会受到温度和压力的影响。

考虑到以上因素,下面引入两个参数  $a$  和  $n$ ,把式(1)修正为:

$$I = I_0 \exp(-aC^n) \quad (3)$$

式中  $a$  和  $n$  是随机参数,取决于传感器的构造和被测目标气体,后文将会介绍使用统计和拟合方法计算它们的最优解。

引入参考通道,修改式(2)得到:

$$NA = 1 - I/Z \times I_0 \quad (4)$$

式中  $Z = I/I_0 = V_{(ref)}/V_{(ref)0}$ ,是参考通道通入空气时和标气时电压比值,NA 考虑到参考通道的正常吸收率,可以简化为:

$$\begin{aligned} NA &= 1 - V/V_0 \times V_{(ref)0}/V_{(ref)} = 1 - (V/V_{(ref)}) / (V_0/V_{(ref)0}) \\ &= 1 - ACT / (REF \times ZERO) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ACT 是工作通道输出电压峰峰值,REF 是参考通道输出电压峰峰值,ZERO 是在空气中两个通道输出电压的比值。式(5)使用电压比消除了所有的绝对电压值,这消除了放大增益的差异和光学条件发生变化带来的影响,同时克服了单通道测量高浓度饱和的问题。

结合浓度标定,可以得到计算浓度的最终公式:

$$1 - ACT / (REF \times ZERO) = SPAN(1 - \exp(-aC^n)) \quad (6)$$

ZERO 和 SPAN 的计算方法将会在下文提到。

## 2 校准及浓度计算

### 2.1 零点校准

将传感器放置在不存在被测气体的环境中,例如氮气(空气中也可以),ZERO 校准的公式为:

$$ZERO = ACT / REF \quad (7)$$

式中 ACT 和 REF 分别是传感器在空气中工作通道和参考通道的峰峰值,保存着零点时的两通道电压比值。

### 2.2 浓度校准

将传感器放置在标准校准气体中,一般为满量程标气,SPAN 校准的公式为:

$$SPAN = [1 - ACT / (ZERO \times REF)] / [1 - \exp(-aC^n)] \quad (8)$$

式中 ACT、REF 是工作通道和参考通道的峰峰值,ZERO 是之前在氮气(空气也可以)中计算出来的零点,  $a$ 、 $n$  是固定的线性化参数,  $C$  是此时标准气体的浓度。可以看出它是式(6)的一个变形,用来标定整个量程。ZERO 和 SPAN 应该存储在非易失存储器中,例如 EEPROM 或者 Flash,每次上电都应读取这些参数进行浓度计算。

### 2.3 浓度计算

经过上面的分析,由式(6)可以得到目标气体的计算

## 技术与方法 Technique and Method

公式:

$$C = (-\ln[1 - (NA/SPAN)]/a)^{1/n} \quad (9)$$

可见,瓦斯浓度与热电传感器输出电压比呈非线性关系。

以上数据都要经过滤波处理,采用单次测量误差会非常大,一般采用滑动均值滤波和限幅滤波相结合的方法<sup>[4]</sup>。

### 3 压力补偿

甲烷传感器分为3类,A、B类的工作环境压强为80 kPa~116 kPa,而C类的是50 kPa~130 kPa,C类通常在管道中使用,被测气体浓度和压力的变化较大,为了进行精确测量需要进行相应的温度和压力补偿。目前温度补偿已经有比较完善的方法,例如利用查表线性差值等方法可以很好地进行温度补偿<sup>[5]</sup>,而压力补偿方面并没有通用的方法。下面介绍一种瓦斯传感器压力补偿方法,假设实验在温度不变的环境下进行。

在实验室25℃的环境下,以空气作为零点标定的背景气,用高精度的直流稳压电源给探头供电,并提供驱动信号,输出信号经过滤波放大用电压表进行测量,标定的数据也事先经过多组测量取均值得到。表2、表3分别是在不同浓度、不同压力下5个甲烷传感器进行10组测量得到NA和SPAN的均值,NA是与浓度非线性关系的参数,SPAN则是校正值。

表2 不同浓度压力下的NA

P/kPa	C/%						
	0	5	10	20	50	75	100
140	0.000	0.157	0.207	0.289	0.417	0.491	0.548
120	0.000	0.136	0.184	0.251	0.383	0.447	0.505
100	0.000	0.120	0.163	0.225	0.336	0.401	0.451
80	0.000	0.106	0.141	0.192	0.290	0.345	0.391
60	0.001	0.090	0.117	0.155	0.236	0.282	0.325

表3 不同浓度压力下的SPAN

P/kPa	C/%						
	0	5	10	20	50	75	100
140	/	3.282	3.272	3.333	3.366	3.321	3.309
120	/	2.885	2.872	2.901	2.926	2.907	2.097
100	/	2.496	2.465	2.476	2.501	2.488	2.501
80	/	2.087	2.063	2.063	2.067	2.064	2.070
60	/	1.668	1.651	1.642	1.631	1.634	1.652

由表2、表3可以看出,两个参数都随着压力的变化发生了漂移,当浓度一定时NA随着压力近似线性增长,最终反映到测量结果上会使计算出的浓度偏大,SPAN值是标定的固定值,它不随着浓度的变化而变化,与压力也呈现近似的线性关系。

图2是未进行压力补偿时的计算浓度。不同的线代表通入不同浓度的标准气体,可见低浓度测量时压力影响较小,当进行高浓度测量时浓度漂移十分严重,会超过100%,需要进行相应的压力补偿。

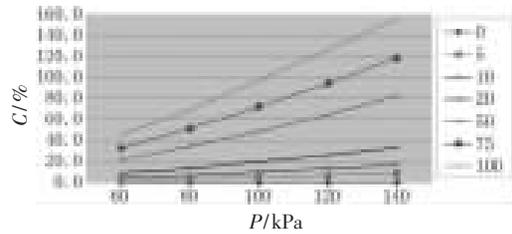


图2 未进行压力补偿时的计算浓度

### 3.1 参数a和n的确定

之前在浓度校准中使用到参数a和n,这里介绍它们的计算方法,式(9)经过变换得到:

$$NA = 1 - (ACT/[ZERO \times REF]) = SPAN \times [1 - \exp(-a \times C^n)] \quad (10)$$

由表2中100 kPa中的一组透光率NA和浓度C,通过拟合的方法可以得出一组最优解。拟合可以通过统计软件R或者Matlab中的curve fitting tool函数来实现,如图3所示。相应参数为 $a=0.0158$ , $n=0.5165$ , $SPAN=0.4999$ ,其中 $R^2=0.9993$ 。

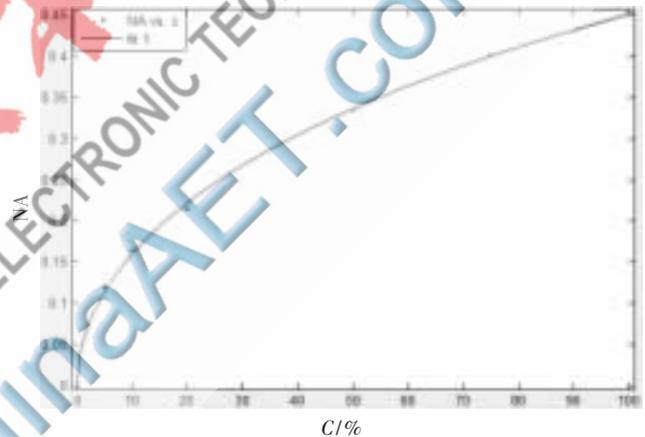


图3 拟合方法下的最优解

### 3.2 压力变化下的最优解

通过表3中100 kPa压力浓度下的SPAN值,拟合得到a和n,再分别固定a和n的值可以得到不同压力下的a、n、SPAN的最优解,如表4所示。

表4 a和n在不同压力下的最优解

P/kPa	a	n	SPAN	P/kPa	a	n	SPAN
60	0.0158	0.505	0.360	60	0.0878	0.516	0.439
80	0.0158	0.510	0.434	80	0.0177	0.516	0.520
100	0.0158	0.516	0.499	100	0.0158	0.516	0.499
120	0.0158	0.523	0.560	120	0.0522	0.516	1.16
140	0.0158	0.530	0.619	140	0.0679	0.516	1.05

利用固定参数a的数据,进行线性化可以得到:

$$n = 0.000315 \times Pa + 0.4855 \quad (11)$$

此时 $a=0.0158$ ,拟合度 $R^2=0.9963$ 。

### 3.3 压力补偿

由式(11)进行压力补偿,最后可以得到进行压力补偿和未进行压力补偿的数据。图4与图2相似,是0~

## 技术与方法 Technique and Method

100 不同标准浓度在 60 kPa~140 kPa 的压力下测得的数据,相比于图 2,曲线趋于平缓,基本上达到了压力补偿的目的。

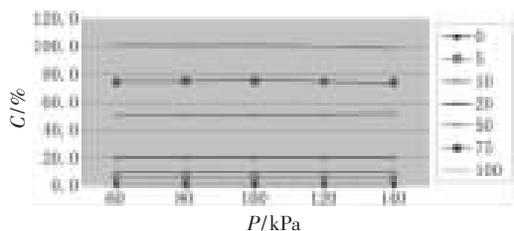


图 4 进行压力补偿的计算浓度

本文主要介绍了基于非分光红外原理的瓦斯传感器的工作原理,同时阐述了温度及压力补偿对于大范围高浓度测量的必要性,并且在数据的基础上,使用统计的方法总结出一种通用的压力补偿方法,基本克服了高浓度测量时漂移严重的问题,可以满足在压力变化较大的环境中使用的要求。目前红外原理的气体传感器并没

有统一的光学系统结构,不同的结构要求使用不同的方法来进行温度和压力补偿。本文的补偿方法针对单光源双通道的传感器进行分析,若要在其他结构的传感器上使用需要进行相应的修改。

### 参考文献

- [1] 卓邦远,吕贤帝,刘海波.红外甲烷传感器与催化甲烷传感器性能比较研究[J].科技创新导报,2010(17):10-12.
- [2] 李秀华.红外气体分析仪研究[D].武汉:武汉工程大学,2007.
- [3] 罗勇,毛晓波,黄俊杰.红外检测瓦斯传感器的设计与实现[J].仪表技术与传感器,2007(8):4-6.
- [4] 王汝琳.红外检测技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [5] 潘中桥,马世伟,孙波,等.红外甲烷气体传感器算法研究[J].电子测量技术,2008,31(12):113-115.

(收稿日期:2013-10-27)

### 作者简介:

王聪,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向:控制理论与控制工程。