

## 针对湍流噪声的傅里叶光谱数据处理方法

高乾坤<sup>1,2,3\*</sup>, 刘文清<sup>2,3</sup>, 张玉钧<sup>2,3</sup><sup>1</sup>中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088;<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;<sup>3</sup>安徽省环境光学监测技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 应用傅里叶变换红外光谱法进行在线工业窑炉高温气体监测时,湍流形成的噪声会影响光谱信噪比和浓度反演的精度。研究新的红外干涉信号-光谱转换的数据处理方法,该方法与传统傅里叶变换的光谱数据处理方法不同,它以零光程差为基准对齐干涉信号,实现多次扫描干涉信号的平均,同时采用复数窗函数与光谱数据卷积的方法来降低光谱旁瓣引起的光谱混叠程度。这种数据处理算法可以减小湍流噪声对气体浓度反演的影响,提高反演精度,减少计算量,提高光谱数据率。以叠加湍流的一氧化碳被动测量实验为例,分析了采用不同数据处理方法得到的光谱信噪比、光谱相关性和浓度反演结果。分析结果表明研究的信号数据处理方法在湍流噪声存在的在线检测中优于传统数据处理方法,采用新的数据处理方法得到的光谱更加精确(光谱相关性更好),气体反演的浓度也更准确,同时可减少系统计算量并缩短系统在线测量的响应时间,这对于在线监测气体浓度的准确性是至关重要的。

**关键词** 光谱学;傅里叶变换红外光谱法;湍流噪声;干涉信号;数据处理方法

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1730001

## Fourier Spectrum Data Processing Method for Turbulent Noise

Gao Qiankun<sup>1,2,3\*</sup>, Liu Wenqing<sup>2,3</sup>, Zhang Yujun<sup>2,3</sup><sup>1</sup>The 38th Research Institute of China Electronic Technology Corporation, Hefei, Anhui 230088, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Monitoring Technology for Environment, Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** When Fourier-transform infrared spectroscopy is used to on-line detection of high-temperature gas in an industrial furnace, the noise formed by turbulence will affect the spectral signal-to-noise ratio and the accuracy of concentration inversion. This paper introduces a new data processing method for infrared interference signal-spectrum conversion. Different from the traditional data processing method for Fourier transform spectra, this method takes the zero optical path difference as the reference to align the interference signals and averages multiple scanning interference signals. It adopts the complex window function and spectral data convolution to reduce the spectral aliasing caused by spectral sidelobes. This data processing algorithm can mitigate the effect of turbulent noise on the gas concentration inversion, improve the inversion accuracy, reduce the amount of system calculation, and increase the spectral data rate. Taking the passive measurement experiment of carbon monoxide with superimposed turbulence as an example, this paper analyzes the spectral signal-to-noise ratio, spectral correlation, and concentration inversion results using different data processing methods. The results show that the proposed signal data processing method is better than traditional data processing methods in the online detection of turbulent noise. The spectrum obtained by the new data processing method is more precise (with better spectral correlation),

收稿日期: 2020-05-24; 修回日期: 2020-07-03; 录用日期: 2021-03-19

通信作者: \*93262018@qq.com

and the concentration of gas inversion is also more accurate. In addition, it can decrease the amount of system computation and shorten the time of the system's online measurement. This is essential for the accuracy of online gas concentration monitoring.

**Key words** spectroscopy; Fourier-transform infrared spectroscopy; turbulent noise; interference signal; data processing method

**OCIS codes** 300.1030; 280.1120; 290.1310; 140.3050

## 1 引言

随着傅里叶变换红外光谱(FTIR)技术的发展,红外仪器研制相对成熟。但是在工业环境在线监测过程中(比如工业窑炉高温气体检测等),红外信号易受光源抖动、湍流等的干扰。光谱仪接收的干涉信号中不可避免地叠加了许多噪声信号,尤其是湍流噪声。这就需要对于干涉信号进行数据处理,在不更换光谱仪的情况下提高光谱的信噪比<sup>[1]</sup>。

目前多种在线气体检测的传统数据处理方法运算复杂、计算量大,尤其是对于湍流噪声,当需要对其多条光谱进行加窗、平均降噪时,在线测量仪器的响应时间慢,降噪效果并不理想,因此需对传统数据处理方法进行改进。

## 2 基本原理

### 2.1 传统傅里叶变换数据处理方法

傅里叶变换红外光谱技术的基本原理是:红外辐射通过光学组件进入干涉仪,经干涉仪的调制后产生干涉信号,然后通过软件对干涉信号进行傅里叶变换,得到频谱(复数谱),再通过求模得到光谱图(功率谱),具体可表示为

$$B(\nu) = \int_0^{\infty} I(x) \cos(2\pi\nu\delta) d\delta, \quad (1)$$

$$I(\delta) = \int_0^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu\delta) d\nu, \quad (2)$$

式中: $I(x)$ 为干涉信号; $B(\nu)$ 为频谱数据; $\delta$ 为光程差。图 1 为傅里叶变换系统。

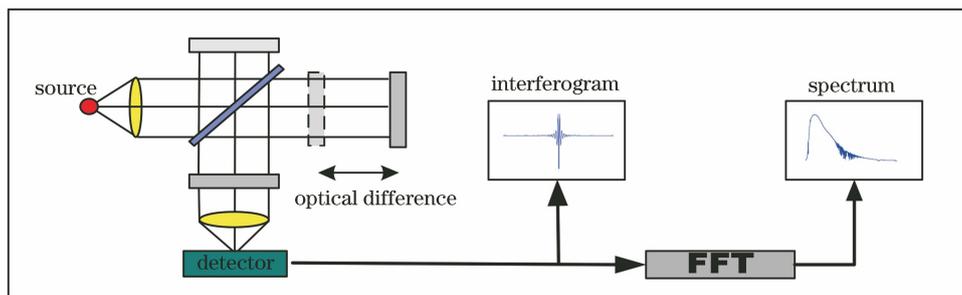


图 1 傅里叶变换系统  
Fig. 1 FTIR system

通常在线 FTIR 监测的数据处理方法是通过对光谱仪采集的干涉图(图 2)进行加窗滤波(乘以非矩形窗函数)和傅里叶变换、求模,得到光谱图(图

3),再通过对多组光谱数据求均值来提高光谱信噪比<sup>[2]</sup>。

传统干涉信号的数据处理方法如图 4 所示。

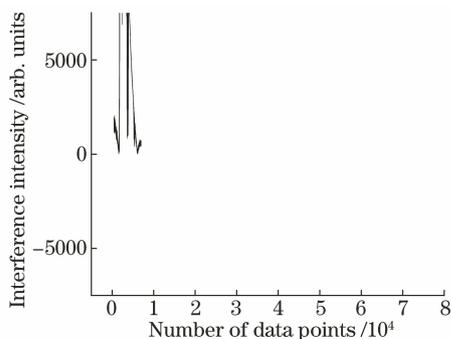


图 2 一氧化碳的干涉信号  
Fig. 2 Interferogram of CO

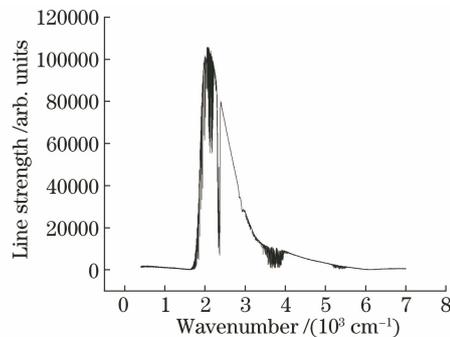


图 3 一氧化碳的光谱数据  
Fig. 3 Spectrum of CO

$N$  interferograms  $\rightarrow$   $N$ th apodization in full band (multiplication operation)  $\rightarrow$   $N$ th FT  $\rightarrow$   
 $N$ th modulo  $\rightarrow$  average  $\rightarrow$  spectrogram

图 4 传统数据处理方法示意图

Fig. 4 Diagram of traditional data processing method

传统数据处理方法通过光谱数据平均[即先对干涉信号进行傅里叶变换(FT)再求平均]的方法减小噪声的影响。但是光谱数据只代表功率(复数谱的绝对值),没有包含信号的相位信息,平均光谱数据可以减小功率估计的偏差,提高在噪声存在的情况下的信号功率测量精度,但并没有从本质上减小噪声方差。

在线测量时获得的真实干涉信号的相位是相同的,将干涉信号平均后可以得到真正的信号振幅<sup>[3]</sup>。而湍流噪声信号在各个数据集中的相位是不同的,经平均后其幅度将趋于零。所以对包含湍流噪声的干涉信号进行平均能够降低噪声的方差,并能保存真正相干信号的振幅。借助干涉数据的平均,可以实际地提高带有噪声信号的信噪比。

在实际在线测量时,下列原因导致不能直接对干涉信号进行累加平均:1)零光程差(ZPD)在整个干涉数据中的位置不固定,可能在干涉数据中心位置的左侧或右侧,并不一定和 ZPD 的位置重合;2)仪器以及工业环境等因素导致干涉图强度产生非线性的相位误差。

## 2.2 改进的数据处理方法

### 2.2.1 干涉信号平均方法

本文根据干涉信号的特征提出以下可以对干涉图进行平均的方法:

1) 将干涉图数据组按照采集顺序的奇偶性进行分类(单边采集不予考虑);

2) 将每条干涉数据以各自 ZPD 为中心分成左、右两部分,ZPD 位置  $n_{\max}$  所对应的数据为

$$X(n_{\max}) = \text{Max } X(n), \quad (3)$$

式中: $X(\cdot)$ 为每个采样点对应的干涉数据; $n$ 为干涉图数据点的个数。

以数值大的数据部分为模板对另一部分数据进行补零(相位校正),图 5 为  $n_{\max} \leq \frac{n}{2}$  时 ZPD 位置在干涉信号中心左侧的图谱。

ZPD 左侧数据按照右侧补零,补零个数为

$$n_{\text{left}} = n - 2n_{\max} + 1. \quad (4)$$

图 6 为  $n_{\max} > \frac{n}{2}$  时 ZPD 位置在干涉信号中心右侧的图谱。

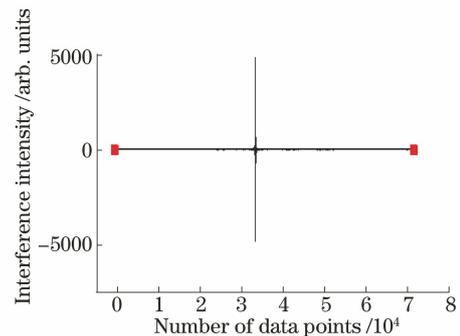


图 5 ZPD 位置在干涉信号中心左侧的图谱

Fig. 5 Interferogram of ZPD position on left side of center of interference signal

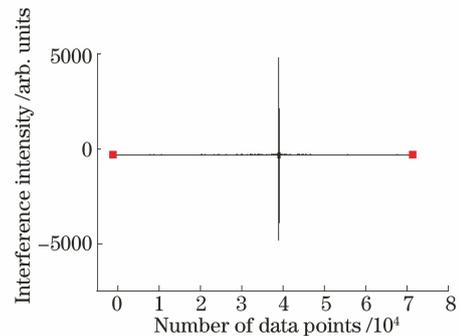


图 6 ZPD 位置在干涉信号中心右侧的图谱

Fig. 6 Interferogram of ZPD position on right side of center of interference signal

ZPD 右测数据按照左侧补零:

$$n_{\text{right}} = 2n_{\max} - n - 1. \quad (5)$$

3) 选取干涉数据组中最大采样数的数据  $N_{\max} = \text{Max } n$  为模板,对所有干涉数据以各自 ZPD 位置为中心进行左右对称补零(干涉图对齐):

$$n_{\text{right}} = n_{\text{left}} = \frac{N_{\max} - n}{2}. \quad (6)$$

通过上述的数据处理方法,对干涉数据进行累加平均,并进行傅里叶变换:

$$X_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) = \frac{X(1) + X(2) + \dots + X(k)}{N}, \quad (7)$$

式中: $X_{\text{ave}}$ 是平均干涉图中采样点数据的平均值; $N$ 是需要平均的干涉图数量。

图 7 为同组含有湍流噪声的干涉信号经两种不同数据处理方法后的结果。图 8 为两种不同梳理方法所得到的 2100~2200  $\text{cm}^{-1}$  波段的光谱对比。

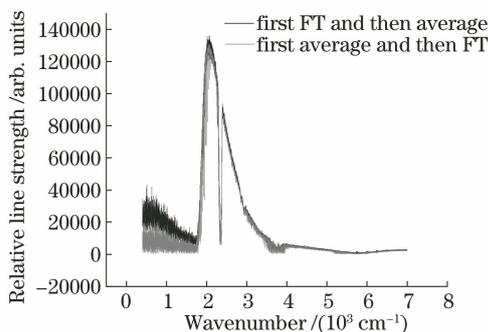


图 7 同组含有湍流噪声的干涉信号经两种不同数据处理方法后的结果

Fig. 7 Results of different data processing methods for the same group of interference signals with turbulent noise

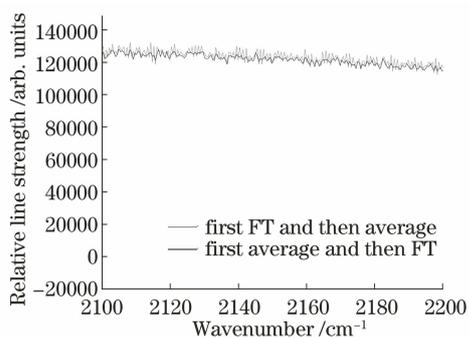


图 8 在 2100~2200 cm<sup>-1</sup> 波段的光谱对比

Fig. 8 Comparison of spectra in 2100–2200 cm<sup>-1</sup> band

表 1 是两种数据处理方法对同组含有湍流噪声的干涉信号进行处理后的信噪比对比。无论是通过噪声的峰-峰值还是噪声均方根来计算光谱信噪比,对于干涉图先求平均再进行 FT 的方法都好于对光谱图的平均(二者的信噪比之比是 3 左右)。

表 1 两种不同数据处理方法结果的信噪比(SNR)

Table 1 SNR of results obtained by two methods

SNR	SNR 1 (100/noise peak-to-peak)	SNR 2 (100/root mean square of noise)
Method 1 (first average and then FT)	3.78	72.98
Method 2 (first FT and then average)	1.25	25.88

对于  $N$  条光谱的平均,传统方法需要对干涉数据进行  $N$  次傅里叶变换、求模,而新方法只需要进行 1 次傅里叶变换、求模,仪器的计算量大幅降低、可以缩短仪器的响应时间,这在工业窑炉高温多种气体监测环境下是非常需要的。

### 2.2.2 光谱主径旁瓣数据处理方法

由于干涉图的最大光程差有限,所以在进行

FT 时截止干涉信号(乘以矩形函数),得到截断的干涉图,但这样截取会使 FT 的主径两侧出现径向旁瓣振荡(干涉图数值突然降为零,导致干涉图出现严重的不连续性)。而加窗(乘以非矩形窗口函数或直接用非矩形窗口函数来截止干涉信号)的目的是最小化由干涉图的 FT 的径向旁瓣引起的频谱泄漏(缓和其不连续性)。基于窗口函数,利用其减弱干涉信号的不连续性来降低整个 FT 输出(光谱图)的相关高频分量的级别,从而降低了 FT 的径向旁瓣的级别(以及噪声),达到提高光谱信噪比的目的<sup>[4]</sup>。

但是干涉图加窗是针对全光谱波段,如果需要只对部分波段加窗,这种加窗方法就无法实现。所以本文提出基于傅里叶变换的特性并运用卷积定理来实现只对部分波段加窗。

根据卷积定理及其对称性,干涉图与窗函数在时域上点积的 FT 等价于它们在频域里各自 FT 的卷积:

$$x(n) \cdot h(n) \stackrel{\text{FT}}{\underset{\text{IFT}}{\rightleftharpoons}} X(k) * H(k), \quad (8)$$

式中:  $X(k)$ 、 $H(k)$  分别是  $x(n)$  和  $h(n)$  的傅里叶变换的结果。

给复数光谱加窗的关键在于对窗函数进行傅里叶变换,并进行卷积。以汉宁窗为例,其表达式为通用的余弦函数表达式<sup>[5]</sup>:

$$h(n) = \alpha - \beta \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad (9)$$

式中:  $\alpha = \beta = 0.5$ 。

图 9 为汉宁窗频率响应的振幅。结合傅里叶变换定义来看,汉宁窗余弦函数的频率响应(FT 变换)为

$$H(m) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \alpha - \beta \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right] \exp\left(-j \frac{2\pi nm}{N}\right), \quad (10)$$

$$\text{式中: } \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) = \frac{\exp\left(j \frac{2\pi n}{N}\right) + \exp\left(-j \frac{2\pi n}{N}\right)}{2}.$$

(10)式可以表示为

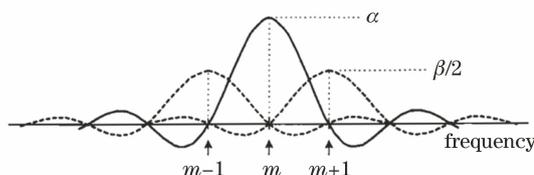


图 9 汉宁窗频率响应的振幅

Fig. 9 Amplitude of frequency response of Hanning windows

$$H(m) = \alpha \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-j \frac{2\pi nm}{N}\right) - 0.5\beta \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[-j \frac{2\pi n(m-1)}{N}\right] + \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[-j \frac{2\pi n(m+1)}{N}\right] \right\}. \quad (11)$$

通过观察(6)式,等式右边可以看成是第  $m$  点数据和前后  $m-1, m+1$  点数据点频域的振幅叠加。将(6)式与未加窗的复数谱进行卷积,即将第  $m$  个波数的复数谱数值的  $a$  倍减去第  $m-1$  个波数数值的  $\beta/2$  倍,再减去第  $m+1$  个波数数值的  $\beta/2$  倍,等于对第  $m$  个波数的复数谱加窗。对未加窗的复数光谱图  $X(m)$  中第  $m$  个波数加窗得到  $X_1(m)$ :

$$X_1(m) = aX(m) - \frac{\beta X(m-1)}{2} - \frac{\beta X(m+1)}{2}. \quad (12)$$

而布莱克曼窗需要 5 项卷积,即

$N$  interferograms  $\rightarrow$  average  $\rightarrow$  1st FT  $\rightarrow$  1st apodization in full band (subtraction operation)  $\rightarrow$   
1st modulo  $\rightarrow$  spectrogram

图 10 新数据处理方法流程图

Fig. 10 Flowchart of new data processing method

### 2.3 不同数据处理方法采样时间对比

与传统的数据处理方法相比,对于干涉图先求平均再进行 FT 得到的光谱信噪比要高于对光谱图进行平均(3 倍左右),其次该方法将计算步骤由原来的  $N$  次 FT、 $N$  次求模化简成只需 1 次 FT、1 次求模,将原来需要对全波段加窗的乘法运算化简为对部分需要波段加窗的减法运算,仪器的计算量大幅降低,响应时间也得到缩短。传统方法的实际测试时间为 3 min,而所提方法的实际测试时间为 1 min。

## 3 叠加湍流噪声的 CO 浓度测量实验及 CO 光谱相关性

本文通过叠加湍流噪声的光谱的相关性研究和对体积分数(下文称浓度)为 1% 的 CO 气体的计算来比较不同干涉信号数据处理方法对气体浓度反演结果精度的影响。

### 3.1 光谱相关系数选择与气体浓度反演基本原理

#### 3.1.1 光谱相关性

本系统通过 Mathematica 数学软件结合 Spearman 相关系数建立了光谱相关性模型。相对于其他相关系数,Spearman 相关系数是与光谱强度所对应的等级有关的,它表现的是光强之间关系的

$$X_1(m) = aX(m) - \frac{\beta X(m-1)}{2} - \frac{\beta X(m+1)}{2} + \frac{cX(m-2)}{2} + \frac{cX(m+2)}{2}. \quad (13)$$

表 2 为常用的光谱图窗口系数。

表 2 常用的光谱图窗口系数

Table 2 Commonly used spectral window coefficient

Window function coefficient	$a$	$\beta$	$c$
Rectangular window	1.00		
Hanning window	0.50	0.5	
Blackman window	0.42	0.5	0.08

复数光谱加窗方法可以只针对待测气体的吸收波段给光谱图加窗,而不用对全波段加窗。其次,复数光谱加窗将干涉图加窗的乘法运算转换为加减法运算,而且选择波段越小,计算量越小。

结合上述内容,针对传统的数据处理过程进行改进,新数据处理方法流程图如图 10 所示。

稳定性而不是光强具体的取值。所以 Spearman 相关系数更适合用来分辨光谱、比较光谱质量。

首先选取一条不叠加湍流噪声的测量光谱作为参考光谱,再将叠加噪声的实测平均光谱与其对应得到光谱数据  $(x_i, y_i)$  ( $x_i$  和  $y_i$  分别表示参考光谱和实测光谱第  $i$  点的强度值),按照每个变量的  $n$  个数据的大小依次排列:

$$r_s = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n (R_i - Q_i)^2, \quad (14)$$

式中: $R_i$  和  $Q_i$  分别表示  $x_i$  和  $y_i$  的秩。 $-1 \leq r_s < 0$ ,表明  $x_i$  和  $y_i$  存在负相关关系; $0 < r_s \leq 1$ ,表明  $x_i$  和  $y_i$  存在正相关关系; $r_s = 0$ ,表明  $x_i$  和  $y_i$  存在非线性关系。

叠加噪声的实测光谱经降噪处理后与参考光谱的相关性越高,说明光谱降噪的效果就越好,光谱精度就越高。

#### 3.1.2 气体浓度计算原理

对浓度为 1% 的 CO 气体进行红外遥测,通过两种不同的数据处理方法对光谱仪获得的干涉信号进行数据处理,并根据 HITRAN 数据库<sup>[6]</sup>,利用非线性最小二乘法对通过参考谱模型合成的校准光谱进行反演,得到标准气体 CO 的浓度。

1) 校准光谱的合成。根据 HITRAN 标准光谱数据库, 建立一个包括测量条件下的温度、光程、压力、气体种类等环境参数, 以及分辨率、视场角和切趾函数等仪器参数的数学模型, 通过该模型用数值积分的方法进行逐线积分, 计算  $\Delta\gamma$  波段范围内所有经过光程  $L$  后的气体平均透射率  $T^{[5]}$ :

$$T(\gamma) = \frac{1}{\Delta\gamma} \int_{\Delta\gamma} \left\{ \exp \left[ - \sum_i^N \int_0^L \sigma_i(x, \gamma) p(x) dx \right] \right\} d\gamma, \quad (15)$$

式中:  $\sigma_i$  为第  $i$  条谱线在波数  $\gamma$  处的分子吸收系数;  $P(x)$  为空间位置  $x$  处的吸收分子浓度;  $N$  为某一确定波数邻近的所有谱线数。

2) 非线性最小二乘拟合。对合成的校准光谱

与测量光谱进行拟合, 通过改变初始浓度值来重复计算并判断两者的残差是否为最小<sup>[7]</sup>:

$$x^2(a) = \sum_{j=1}^N [\tau_j - \tau_{\text{cal}}(v_j, a)]^2, \quad (16)$$

式中:  $\tau_j$  是测量的透过率光谱;  $\tau_{\text{cal}}(v_j, a)$  是计算的透过率光谱;  $j$  对应于数字光谱  $\tau$  中的  $N$  个数据点。

### 3.2 叠加湍流的 CO 实验光谱的相关性及浓度计算

实验中对 1% 标准浓度的一氧化碳进行红外遥测并在光路上叠加湍流噪声, 针对光谱仪获得的干涉数据组采用不同的数据处理方法进行气体浓度反演和光谱相关性研究<sup>[8-9]</sup>。

如图 11 所示, 实验仪器主要由浓度为 1% 的 CO 标气、红外光谱仪、数据分析仪、吹风机系统组成, 光谱仪距离标气池 5 m。

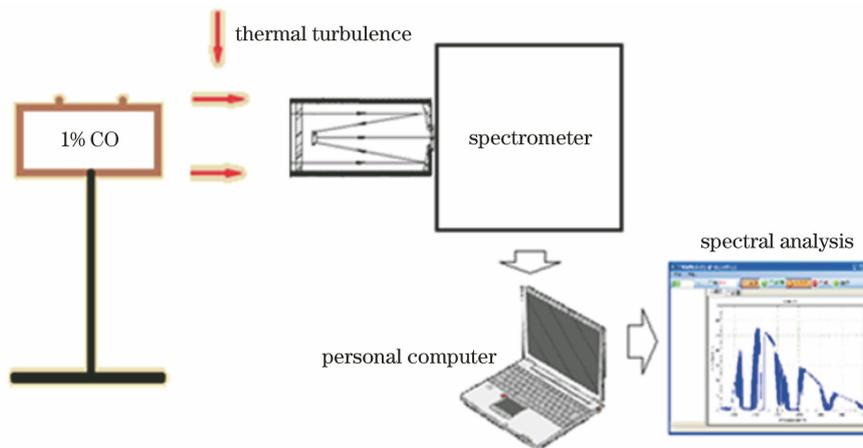


图 11 实验系统

Fig. 11 Experimental system

图 12 是没有叠加噪声的 CO 测量光谱, 图 13 是在  $2240 \sim 2050 \text{ cm}^{-1}$  CO 吸收波段的光谱, 将其作为参考光谱。

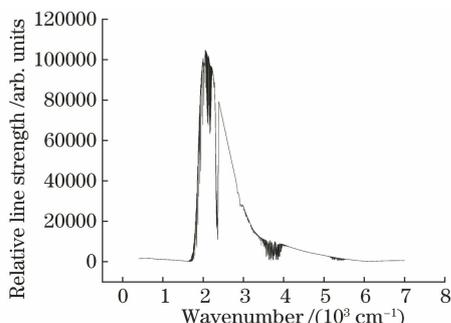


图 12 1% 浓度 CO 的光谱

Fig. 12 Spectrum of CO with concentration of 1%

在光路上叠加湍流噪声(吹风机在光路上吹热风), 并计算含噪声光谱的相关性。图 14 为 1% 浓度的 CO 光谱(叠加湍流噪声)。图 15 为 CO 在

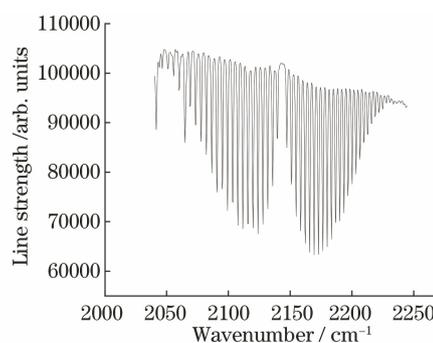


图 13 1% 浓度 CO 在  $2240 \sim 2050 \text{ cm}^{-1}$  吸收波段的光谱

Fig. 13 Spectrum of CO with concentration of 1% in  $2240 \sim 2050 \text{ cm}^{-1}$  absorption band

$2240 \sim 2050 \text{ cm}^{-1}$  吸收波段的光谱(叠加湍流噪声)。

对含湍流噪声的光谱采用新数据处理方法进行数据处理(8 次平均)。图 16 为新方法对干涉信号处理后的光谱。图 17 为新方法得到的 CO 在

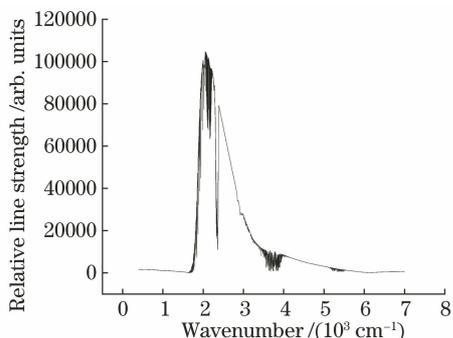


图 14 1%浓度的 CO 光谱(叠加湍流噪声)  
Fig. 14 Spectrum of CO with concentration of 1% (with turbulent noise)

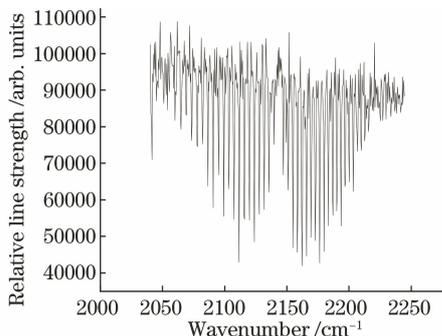


图 15 CO 在 2240~2050 cm<sup>-1</sup> 吸收波段的光谱 (叠加湍流噪声)  
Fig. 15 Spectrum of CO in 2240-2050 cm<sup>-1</sup> absorption band

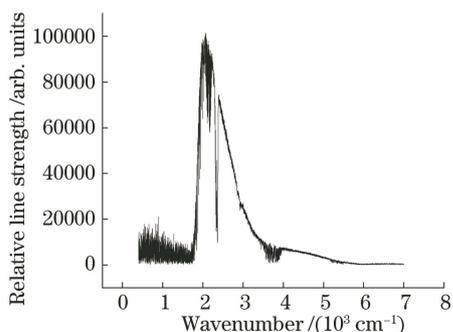


图 16 新方法对干涉信号处理后的光谱  
Fig. 16 Spectrum of interference signal obtained by new data processing method

2240~2050 cm<sup>-1</sup> 吸收波段的光谱。

通过计算光谱相关性,发现经过数据处理后的光谱质量得到显著提高。采用传统数据处理方法对含噪声的光谱进行数据处理(8次平均)。图 18 为干涉信号经过传统方法处理后的光谱。图 19 为传统方法得到的 CO 在 2240~2050 cm<sup>-1</sup> 吸收波段的光谱。

将不同数据处理方法获得的 CO 光谱(图 15、

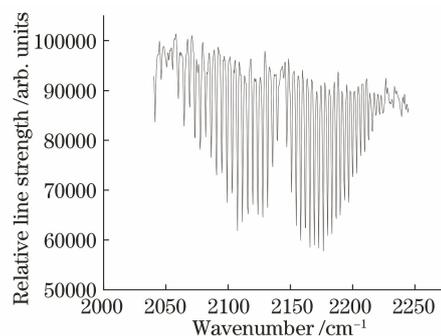


图 17 新方法得到的 CO 在 2240~2050 cm<sup>-1</sup> 吸收波段的光谱

Fig. 17 Spectrum of CO in 2240-2050 cm<sup>-1</sup> absorption band obtained by new method

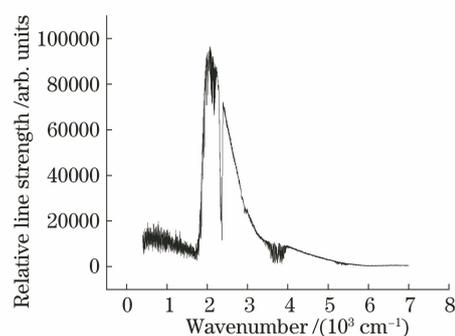


图 18 干涉信号经过传统方法处理后的光谱  
Fig. 18 Spectrum of interference signal obtained by traditional data processing method

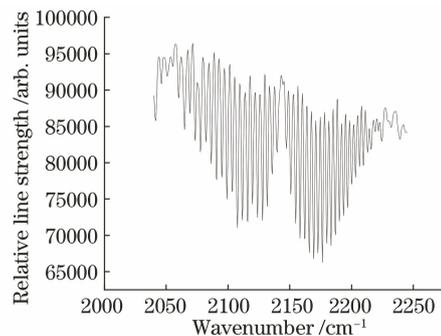


图 19 传统方法得到的 CO 在 2240~2050 cm<sup>-1</sup> 吸收波段的光谱

Fig. 19 Spectrum of CO in 2240-2050 cm<sup>-1</sup> absorption band obtained by traditional method

17,19)与校准谱在 2046~2240 cm<sup>-1</sup> 区间内进行非线性最小二乘拟合,得到如图 20 所示的 1% CO 吸收谱线拟合。

不同方法平均结果的浓度与相关性计算结果如表 3 所示。

通过改进的数据处理方法将另外 64 条谱线分成 8 组,计算气体浓度和光谱相关性。表 4 为不同

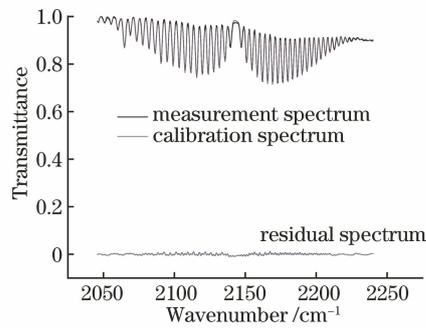


图 20 1%CO 吸收谱线非线性拟合

Fig. 20 Nonlinear fitting of 1% CO absorption line

组的光谱数据浓度计算结果,结果不同是由于湍流噪声对光谱的影响是不断变化。数据结果说明 CO 浓度的反演与光谱相关性有关,相关性越好,CO 浓度反演就越准确。

实验结果表明,相比于传统数据方法<sup>[10]</sup>,采用新的数据处理方法得到的光谱更加精确(光谱相关性好),气体反演的浓度也更准确。这对于在线监测气体浓度的准确性是至关重要的。

表 3 不同方法平均结果的浓度与相关性计算

Table 3 Results of concentration and correlation of two methods

Result	Calculated concentration / %	Spectral correlation	
		Full band	CO band
Original CO spectrum	1.000	—	—
Direct calculation	0.374	0.726	0.767
Calculation by improved method	0.924	0.888	0.971
Calculated by traditional method	0.862	0.798	0.939

表 4 新方法得到的浓度与相关性

Table 4 Concentration and correlation obtained by new method

Data set	Concentration / %	Spectral correlation
1	0.917	0.965
2	0.896	0.948
3	0.913	0.962
4	0.931	0.981
5	0.932	0.985
6	0.920	0.972
7	0.915	0.963
8	0.919	0.966

## 4 结 论

针对工业环境在线监测过程中湍流噪声的问题<sup>[11]</sup>,与目前常用的 FTIR 红外光谱数据处理方法相比,改进的数据处理方法不但使叠加湍流噪声的

光谱数据反演浓度的精度更高(由 93.9% 提升到 97.1%),而且缩短了计算机的工作时间(采样时间从 3 min/次缩减到 1 min/次)。虽然目前计算机和数字信号处理技术取得了很大的进步,但是在某些快速扫描应用中,尤其是多种气体的在线测量,能够减少数据量、提高工作效率的处理方法是值得研究的。

## 参 考 文 献

- [1] Gao Q K, Liu W Q, Zhang Y J, et al. Remote detection of carbon monoxide by FTIR for simulating field detection in industrial process [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10156: 101561G.
- [2] Gao Q K, Liu W Q, Zhang Y J, et al. Infrared radiation passive remote detection of gas in high temperature kiln [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0801002.  
高乾坤, 刘文清, 张玉钧, 等. 高温窑炉气体红外辐射被动遥测 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0801002.
- [3] Peter R G. Fourier transform infrared spectrometry [M]. Singapore: John Wiley & Sons Inc, 1986: 16-51.
- [4] Richard G. Understanding digital signal processing [M]. London: Prentice Hall, 2015: 424-426.
- [5] Zhang H, Shi G Y. A fast and efficient line-by-line calculation method for atmospheric absorption [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(1): 111-121.  
张华, 石广玉. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法 [J]. 大气科学, 2000, 24(1): 111-121.
- [6] Rothman L S, Jacquemart D, Barbe A, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 96(2): 139-204.
- [7] Fang J, Liu W Q, Zhang T S, et al. Line-by-line trace gas absorption model and its application for NDIR gas detection technology [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6723: 67232S.
- [8] Harig R, Matz G, Rusch P. Scanning infrared remote sensing system for identification, visualization, and quantification of airborne pollutants [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4574: 83-94.
- [9] Harig R, Rusch P, Dyer C, et al. Remote measurement of highly toxic vapors by scanning imaging Fourier-transform spectrometry [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5995: 599510.
- [10] Liu Z M, Gao M G, Liu W Q, et al. The study of instrument response function of FTIR detectors [J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2008, 28(8): 1786-1789.  
刘志明, 高闽光, 刘文清, 等. 傅里叶变换红外光谱仪探测器仪器响应函数研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1786-1789.
- [11] Gao Q K. Passive detection of carbon dioxide in the high temperature cement-kiln by FTIR [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 569: 012049.