

基于 SVM 滤波器的吸收式甲烷检测的信号去噪方法

王书涛¹ 曾秋菊^{1*} 宋浩兵² 刘铭华¹ 李梅梅¹ 王丽媛¹

(¹ 燕山大学电气工程学院河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

² 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 光谱吸收法是对甲烷浓度检测的一种有效手段,通过棱镜气室结合光子晶体光纤的应用实现光谱吸收法对甲烷浓度的高精度在线检测。但在检测过程中,由于环境中温度、压强以及系统本身设备的影响,使得接收的信号中包含大量的噪声。支持向量机(SVM)具有泛化能力强和寻求全局最优点的特点,被用于甲烷浓度检测的信号处理。Matlab 实验结果表明,使用 SVM 原理滤波能有效地滤除噪声,把有效的信号分离出来,并用信噪比评估去噪效果。使用该方法滤波能够使信噪比达到 130 dB 以上,与传统的小波降噪相比有很大的提高,能达到理想的去噪目的。

关键词 光谱学; 甲烷检测; 光子晶体光纤; 棱镜气室; 支持向量机; 信噪比

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0915001

Signal Denoising Method Based on the SVM Filter Absorption Methane Detection

Wang Shutao¹ Zeng Qiuju¹ Song Haobing² Liu Minghua¹ Li Meimei¹ Wang Liyuan¹

¹ Measurement Technology and Instrumentation Key Laboratory of Hebei Province,

School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

² School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Spectral absorption method is an effective means to detect methane concentration. Through the prism chamber combined with the application of photonic crystal fiber, the on-line detection of methane concentration with a high precision by the spectral absorption is realized. Due to the environment temperature, pressure and the influence of the system itself, the received signal contains a lot of noises. According to the characteristics of strongly ability to generalize and seek the global optimal point, support vector machine (SVM) is used to process the signal of methane detection. Through Matlab simulation based on the SVM principle, it can effectively filter out noise, separate the effective signal and assess the effect of denoising with signal to noise ratio (SNR). Using this method to filter can make the SNR reach above 130 dB, which is greatly improved compared with the traditional wavelet denoising, to achieve the ideal denoising purpose.

Key words spectroscopy; methane detection; photonic crystal fiber; prism chamber; support vector machine; signal to noise ratio

OCIS codes 300.1030; 230.2285; 230.5298; 350.2460

1 引 言

甲烷是主要的环境污染气体之一,严重威胁人类健康并且在生产中严重威胁人类的生命安全。近年来,有关煤矿瓦斯爆炸的消息时有发生,因此实现对瓦斯浓度的高精度检测显得尤为重要,而甲烷是瓦斯的主要成分^[1]。

在设计甲烷检测系统时,对数据的处理是比较

关键的地方,通常测量的甲烷气体是低浓度的,因此所得的信号也是微弱的,容易淹没在噪声中^[2],这时就要去噪,提取有效的信号,从谐波检测到小波分解,科研工作者不断探寻着更好的处理信号方法。本文采用支持向量机(SVM)神经网络实现对采集信号的处理,该去噪方法能够灵敏、迅速地含噪声的原始信号中提取有效信息,实现对甲烷浓度的实

收稿日期: 2014-03-17; 收到修改稿日期: 2014-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61201110)

作者简介: 王书涛(1978—),男,博士,教授,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: wangshutao@ysu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zeng0537@126.com

时、高精度检测,另外引用具有禁带功能的光子晶体光纤可以实现对多种环境污染气体的监测^[3]。该系统不仅可以连续监测煤炭、石化和冶炼中的危险气体,还可以向环保部门提供精确的实验数据,对我国的环境检测起到推动的作用。

2 光谱吸收技术检测甲烷的原理和系统结构

2.1 检测原理

由 Beer-Lambert 定律可知,参考气室和测量气室的吸收公式为

$$I_1 = I_0 \exp(-\alpha_\lambda L c_1), \quad (1)$$

$$I_2 = I_0 \exp(-\alpha_\lambda L c_2), \quad (2)$$

式中 α_λ 为甲烷吸收系数, L 为气室吸收光程, I_1 、 I_2 分别为光经过参考气室和测量气室的透射光强, I_0 为直流偏置光强, c_1 、 c_2 分别为参考气室和测量气室内甲烷的浓度,联合(1)式和(2)式得

$$\ln \frac{I_1}{I_2} = -\alpha_\lambda L (c_1 - c_2). \quad (3)$$

将 $\ln \frac{I_1}{I_2}$ 应用泰勒公式展开,就可以得到

$$\ln \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{I_1 - I_2}{I_2}. \quad (4)$$

联合(3)式和(4)式可得

$$c_2 = -\frac{1}{\alpha_\lambda L} \times \frac{I_2 - I_1}{I_2} + c_1. \quad (5)$$

由(5)式可以看出,要求甲烷浓度 c_2 ,只要知道 I_1 以及 I_2 即可,其中 α_λ 、 L 均是已知的量。

2.2 系统结构

甲烷在泛频带即 $1.6 \mu\text{m}$ 附近存在着较强的吸收峰^[4],而且光子晶体光纤在此波段处于低衰减区,宽带光源超辐射发光二极管(SLED)的光谱范围为 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$,具有相干度低、输出的功率高和中心波长可以选择的优点。本系统采用的光源为宽带光源 SLED,光源发出的光经过反射光栅变成单色光,使之与甲烷在波段 $1.6 \mu\text{m}$ 最大吸收波长相吻合。之后由切光器分成两束完全相同的光分别经过光子晶体光纤进入参考气室和测量气室。参考气室内通入已知浓度的甲烷气体,测量气室内通入未知浓度的甲烷气体,双光路的气室结构能够有效地抑制光源不稳定等其他因素的干扰,提高测量结果的可靠性。经过气室吸收之后的光通过凸透镜组成的会聚透镜射入光电二极管(PD)中,最后对所得信号进行去噪分析处理。吸收式甲烷浓度检测系统结构图如图 1 所示。

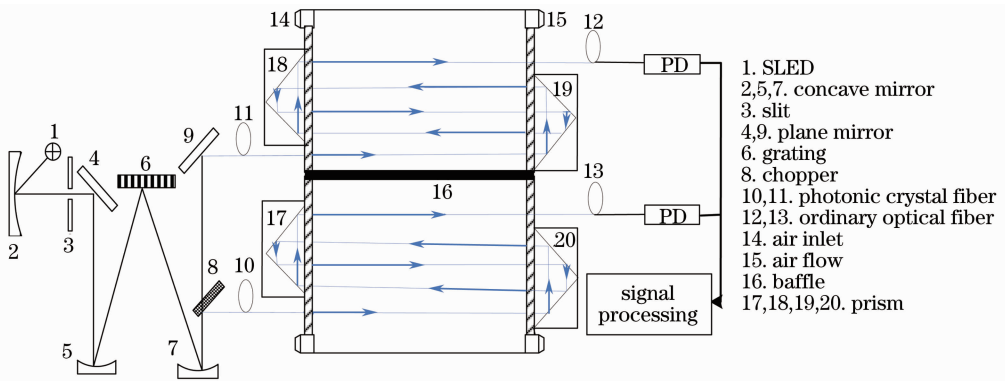


图 1 吸收式甲烷检测系统

Fig. 1 Absorption methane detection system

吸收气室是由两片完全相同的全反棱镜组成的,根据全反棱镜的特点,摄入气室内的光会在两片底部相对放置的棱镜之间往返传播,从而大幅度地增加气室内甲烷的吸收光程^[5]。

在本系统中,要想使光在气室中得到最大的传输距离,必须对光进入气室的位置精确定位,因此选用光子晶体光纤一方面是把作为作为一种准直器,另外因为其独特的禁带功能,能选择所需的光谱段,这是普通光纤所不能实现的。光在光子晶体光纤内传输率达 99% 以上,而且衰减只是普通光纤的 $1/2 \sim$

$1/4$,光子晶体光纤从 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 波长范围内损耗均小于 0.1 dB/m ,能完成低损耗、高功率的光传输^[6]。将光导入气室时本系统采用光子晶体光纤作为传输介质,为了降低成本和系统的损耗,光导出气室时用普通光纤。

3 SVM 的滤波原理

1995 年,Vapnik 等在统计学习理论的基础上提出了一种模式识别的新方法—支持向量机(SVM),这是一种根据有限的样本信息,在模型的

复杂性和学习能力之间寻求最佳折中的方法,以获得最佳的泛化能力^[7]。它具有其他滤波方法所无法比拟的优点:1) 解决了在其他滤波方法中不可避免的只能求局部极值,用此方法得到的为全局最优;2) 此算法把待解决的问题利用非线性变换完成从低维到高维特征空间的转换,之后把原来的低维空间中的属性为非线性判别函数转换为高维空间的属性为线性的判别函数,这样的突出性能确保机器具有优良的泛化能力,同时突破了维数的限制。

现在给定一组数据:

$$(m_0, n_0), (m_1, n_1), \dots, (m_{l-1}, n_{l-1}),$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} m_i \in \mathbb{R}^d \\ n_i \in \mathbb{R} \\ i = 0, 1, \dots, l-1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 s. t. 表示约束条件, \mathbb{R}^d 表示在 d 维空间上的实数, \mathbb{R} 表示一维空间上的实数, l 表示第 l 个给定的数据。

根据 SVM 原理,可以将(6)式构造成一个回归函数

$$f(\mathbf{m}) = (\mathbf{w} \cdot \mathbf{m}) + b, \quad (7)$$

式中“ \cdot ”表示内积运算, \mathbf{w} 是超平面的法向量, \mathbf{m} 为训练集中输入的向量, b 是超平面的常数项。现在目的就是寻找最优的分类超平面,即寻找最优的 \mathbf{w} 和 b ,可以转化为求 $\min \frac{\|\mathbf{w}\|^2}{2}$,为了解决这个问题,应

用拉格朗日函数

$$L = \frac{\|\mathbf{w}\|^2}{2} - \sum_{i=0}^{l-1} \beta_i n_i (\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{w} + b) + \sum_{i=0}^{l-1} \beta_i, \quad (8)$$

式中 $\beta_i > 0$ 为拉格朗日系数。

现引进核函数 $K(m_i, m_j) = \Phi(m_i) \cdot \Phi(m_j)$, Φ 表示低维向高维空间的非线性映射,能够实现某一非线性变换后的线性分类,对偶形式的目标函数变为

$$W(\beta) = \sum_{i=0}^{l-1} \beta_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=0}^{l-1} \beta_i \beta_j n_i n_j K(m_i, m_j). \quad (9)$$

如果 β_i^* 是最优解,则

$$\mathbf{w}^* = \sum_{i=0}^{l-1} \beta_i^* n_i \Phi(m_i), \quad (10)$$

相应的回归函数就变为

$$f(\mathbf{m}) = \sum_{i=0}^{l-1} n_i \beta_i^* K(m_i, m_j) + b^*. \quad (11)$$

SVM 性能的优劣主要取决于核函数^[8],因此选择一个恰当的核函数是非常关键的,因为高斯核函数的宽度随参数 r 大小的改变而改变,可以调节其宽度以适应甲烷吸收谱的宽度,保证滤波的效果,并且通过傅里叶变换,可以调节高斯核函数的幅度,所以本文选择的是高斯核函数, r 表示核宽度。高斯核函数幅度变化谱如图 2(a) 所示,高斯核函数傅里叶变换后的幅度变化谱如图 2(b) 所示。

$$K(m_i, m_j) = \exp\left(-\frac{\|m_i - m_j\|^2}{2r^2}\right). \quad (12)$$

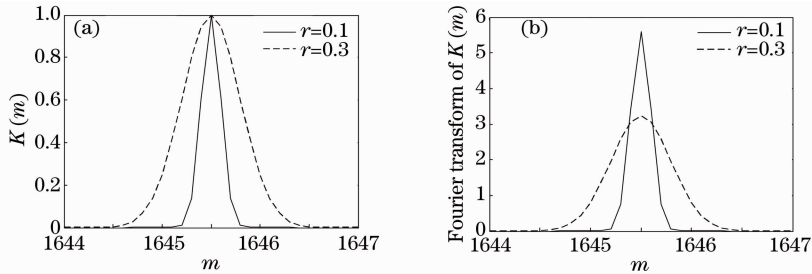


图 2 (a) 高斯核函数在 r 取不同值时的图像对比; (b) 高斯核函数的傅里叶变换在 r 取不同值的图像对比

Fig. 2 (a) Image contrast of Gauss kernel function for different r ; (b) image contrast of Gauss kernel function for different r after Fourier transform

4 实验仿真与结果分析

在常温下用吸收法测得甲烷在波段 $1.6 \mu\text{m}$ 的吸收光谱强度如图 3 所示。

由于所测甲烷浓度比较低,因此实验所得信号一般是比较微弱的,实验中所使用的光学元件也比较容易受到环境中气压、温度的影响,这样光电倍增管所采集的信号容易掺杂大部分的噪声,要想测得的甲烷浓度值比较理想,就需要对光电倍增管所采集的数据进行处理,将有效的信号分离出来,以达到

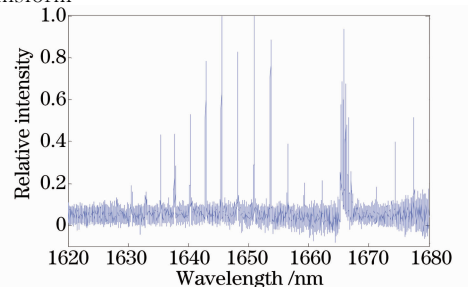


图 3 甲烷在 $1.6 \mu\text{m}$ 波段的吸收谱线

Fig. 3 Absorption lines of methane in $1.6 \mu\text{m}$ band

检测的目的。从所得的数据中选择其中的一段作为仿真数据,其中中心波长为 1645.533 nm,波动为 200 nm。图 4(a)为 PD 所接收的含噪声的甲烷信号。

对于得到的甲烷数据将其分成两部分,其中一

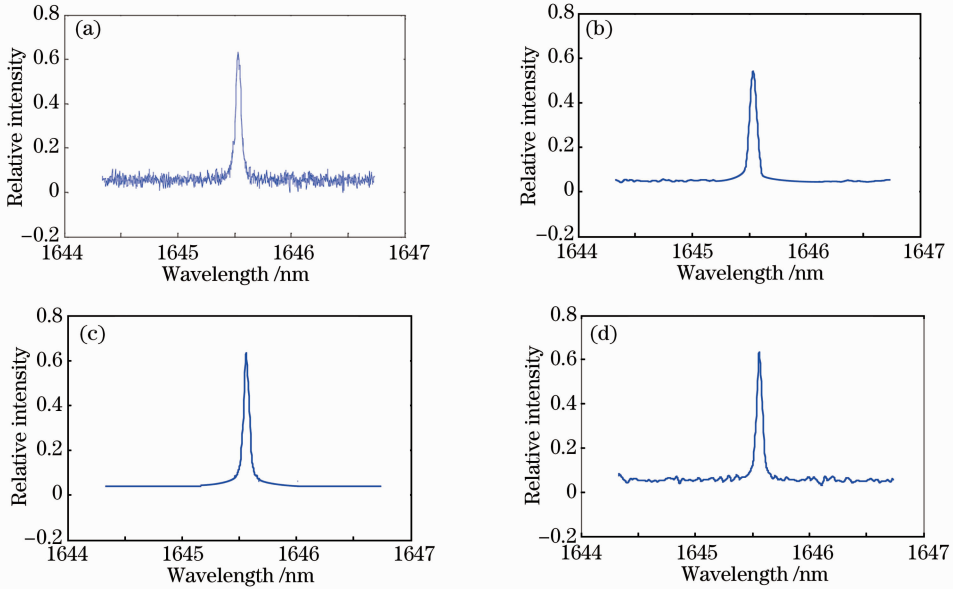


图 4 (a) 含噪声信号; (b) $r=0.1$ 时去噪结果; (c) $r=1$ 时去噪结果; (d) $r=10$ 时去噪结果
Fig. 4 (a) Signal with noise; (b) denoising result when $r=0.1$; (c) denoising result when $r=1$; (d) denoising result when $r=10$

从图 4 中不难看出,当高斯核函数中的 r 取不同值时的信号滤波情况不同,当 $r=0.1$ 时,对信号进行了过滤,把有效的信息也滤除掉了,而当 $r=10$ 时,对信号滤波效果不是很理想,当 $r=1$ 时,得到了比较理想的滤波效果。

信噪比是指信号强度与同时产生的噪声强度之间的比值^[9],用 M 表示,单位以分贝 (dB) 表示,即

$$M_{\text{dB}} = 10\lg\left(\frac{s}{n}\right) = 10\lg\sum_{i=1}^N \frac{V_s^2}{(V_i - V_s)^2}, \quad (13)$$

式中 N 为采集点数, V_s 为去噪之后的信号强度, V_i 为

表 1 不同波段 SVM 和小波去噪结果信噪比对比

Table 1 SNR comparison of SVM and wavelet denoising results in different bands

Center wavelength /nm	1635.533	1645.533	1655.533	1665.533	1675.533
SVM denoising /dB	130.9721	131.0342	130.8991	131.0143	130.5592
Wavelet denoising /dB	31.4661	30.2561	30.3054	30.9701	29.9982

5 结 论

通过构建带全反棱镜的双光路气室,能够很大程度地增加光程,使甲烷得到充分的光吸收,并且利用光子晶体光纤作为传输介质,搭建出一个低损耗、高灵敏度的甲烷检测系统。根据 SVM 原理处理系

部分为训练集,另外一部分为测试集,将 SVM 中的参数给予初值,然后开始用训练集进行训练,之后得到样本模型,用于测试集的预测,通过调节参数 r ,使预测误差达到最小,图 4(b)、(c)、(d)为将全部的甲烷数据导入模型,去噪之后的吸收谱。

时刻 i 的含有噪声的信号强度。可以看出信噪比越大,表明包含在信号里面的噪声越小,信噪比是衡量去噪效果的一个比较关键的因素。实验计算得知,经过 SVM 滤波,可以使信噪比达到 131.0342 dB。

下面选取甲烷不同波段的多组数据进行去噪分析,为了显示 SVM 去噪($r=1$ 时)的优点,将传统的小波去噪^[10]与其对比,以中心波长为划分依据,分成不同的组,通过实验计算得到不同方法下的信噪比。对比结果如表 1 所示。

统所得数据,通过计算信噪比得知,SVM 滤除噪声的效果明显优于小波去噪。此系统不仅可以用于甲烷的测量,也可以进行一些其他有害气体的测量,如 SO_2 、 C_2H_2 等,有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang Yutian, Guo Zengjun, Wang Litian, *et al.*. Study on a new kind of methane optical fiber sensor [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(4): 342-343.
王玉田, 郭增军, 王莉田, 等. 新型甲烷光纤传感器的研究[J]. *光学技术*, 2001, 27(4): 342-343.
- 2 Qi Jie, Dong Xiaopeng, Zheng Junda, *et al.*. An algorithm of filtering background noise of optical fiber gas sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, (11): 1105008.
齐洁, 董小鹏, 郑俊达, 等. 光纤气体传感系统背景噪声的滤除[J]. *中国激光*, 2011, (11): 1105008.
- 3 Cui Yanling, Hou Lantian. A new type of double cladding of dispersion characteristics of photonic crystal fiber is mixed [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, (4): 2571-2576.
崔艳玲, 侯蓝田. 一种新型混合双包层光子晶体光纤的色散特性研究[J]. *物理学报*, 2010, (4): 2571-2576.
- 4 Xu Jia, Wang Lei, Liu Jiang, *et al.*. Narrow line-width 1653 nm Raman fiber amplifiers [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, (6): 0602001.
徐佳, 汪磊, 刘江, 等. 1653 nm 窄线宽拉曼光纤放大器[J]. *中国激光*, 2013, (6): 0602001.
- 5 Wu Xijun, Wang Yutian, Liu Xuecai, *et al.*. Application research of prism gas cell in fiber optic methane sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1261-1267.
吴希军, 王玉田, 刘学才, 等. 棱镜气室在光纤甲烷检测系统中的应用研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1261-1267.
- 6 Xiao Shaorong, Chen Jimbang, Zhu Rihong, *et al.*. Photometric measurement based on rectangular prism with optical fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(12): 1513-1517.
肖韶荣, 陈进榜, 朱日宏, 等. 基于直角棱镜的光纤光度传感器[J]. *中国激光*, 2004, 31(12): 1513-1517.
- 7 Chen Chunyu, Lin Maoliu, Zhang Zhe. Study on signal filtering based on support vector machine [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(4): 427-431.
陈春雨, 林茂六, 张喆. 基于支持向量机的信号滤波研究[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(4): 427-431.
- 8 Yang Xiaowei, Hao Zhifeng. Support Vector Machine (SVM) Algorithm Design and Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2013. 173-186.
杨晓伟, 郝志峰. 支持向量机的算法设计与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 173-186.
- 9 Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 889-892.
马宗峰, 张春熹, 张朝阳. 光学外差探测信噪比研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 889-892.
- 10 Liu Lei, Yu Miao, Yang Ruijuan, *et al.*. Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0605005.
刘磊, 于淼, 杨瑞娟, 等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0605005.

栏目编辑: 史敏