

激光与光电子学进展

基于倾斜光纤布拉格光栅的乙醇汽油中乙醇含量检测

黄妍^{1,2*}, 李培岩¹, 吕国辉^{1,2}, 李宏伟^{1,2}, 王成祥¹, 姚哲理¹

¹黑龙江大学电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

²黑龙江大学光纤传感技术国家地方联合工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 为替代现有加油站人工测量乙醇含量方式和提高站端油品质量检测效率,基于倾斜光纤布拉格光栅(TFBG)对外界折射率的敏感特性,使其能够反映出乙醇含量不同导致的乙醇汽油折射率变化,提出一种对乙醇汽油中乙醇含量进行现场实时检测的新方法。利用耦合模理论对TFBG的光谱特点进行了分析,并探究了TFBG在乙醇汽油中乙醇含量检测过程中的传感特性。实验结果表明,所提方法在乙醇含量为8.3%~14.3%的乙醇汽油检测中的灵敏度为6.5 nm/RIU(RIU为折射率单位),线性拟合度为0.949。通过波长解调方法对E10乙醇汽油样品进行传感器的检测精度验证,乙醇体积分数的检测值为10.2%,相对误差为2%,验证了TFBG用于乙醇汽油中乙醇含量检测的可行性。

关键词 光纤光学; 倾斜光纤布拉格光栅; 乙醇汽油; 乙醇含量; 波长解调; 折射率

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0106001

Detection of Ethanol Content in Ethanol Gasoline Based on Tilted Fiber Bragg Gratings

Huang Yan^{1,2*}, Li Peiyan¹, Lü Guohui^{1,2}, Li Hongwei^{1,2}, Wang Chengxiang¹, Yao Zheli¹

¹College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

²National and Local Engineering Research Center of Optical Fiber Sensing Technology, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract To replace the existing manual method for measuring the ethanol content in petrol stations and improve the detection efficiency of oil quality at the station end, a new method for the on-site real-time detection of the ethanol content in ethanol gasoline is proposed. The proposed method is based on the refractive index sensitivity of the tilted fiber Bragg grating (TFBG) and can reflect changes in the refractive index of ethanol gasoline attributed to different ethanol contents. The spectral characteristics of the TFBG are analyzed using the couple model theory, and the sensing characteristics of the TFBG for ethanol content detection in ethanol gasoline are investigated. Experimental results show that in the detection of ethanol gasoline with ethanol contents of 8.3%–14.3%, the proposed method achieves a sensitivity of 6.5 nm/RIU (RIU refers to the refractive index unit) and a linear fitting degree of 0.949. The detection accuracy of the E10 ethanol gasoline sample is verified using the wavelength demodulation method, yielding a detection value of the ethanol volume fraction of 10.2% and a relative error of 2%. These findings verify the feasibility of TFBG for ethanol content detection in ethanol gasoline.

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-07; 录用日期: 2021-04-12

基金项目: 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(KJCX201908)

通信作者: *huangyan@hlju.edu.cn

Key words fiber optics; tilted fiber Bragg grating; ethanol gasoline; ethanol content; wavelength demodulation; refractive index

1 引言

乙醇汽油是燃料乙醇与车用乙醇汽油调组分油按照一定的体积比,充分混合后形成节能环保的新型替代能源。乙醇汽油的推广使用,不仅可以改善我国能源结构,缓解国内石油资源匮乏的压力;还可以提高乙醇汽油的辛烷值和抗爆性^[1],降低汽车尾气中二氧化碳排放量,减少污染^[2-3]。若乙醇汽油中乙醇含量过高,将破坏机油总碱值的平衡,损坏汽车发动机部件^[4]。2017年的下半年,普及推广乙醇汽油在国内发展的实施方案由国家发改委等 15 个部门联合下达。该法案预期将在 2020 年实现乙醇汽油的全国推广使用,从我国 2017 年制定的 GB18351-2017 标准来看,我国的乙醇汽油由变性燃料乙醇按照一定的体积比(10%±2.0%)加入至车用乙醇汽油调组分油中调合而成^[5]。

因此在乙醇汽油普及发展的大趋势下,一种实时、快速、高效、精确检测乙醇汽油中乙醇含量的方法变得尤为重要。目前,为保证站端油品质量,乙醇汽油中乙醇含量的传统检测方法通常采用“现场检测法”^[6],此方法操作复杂、耗时长,且实验结果存在较大误差。Opekar 等^[7]利用阻抗探针实现了乙醇汽油中乙醇含量的快速检测。欧阳爱国等^[8]通过近红外光谱技术,实现了对乙醇汽油中乙醇含量较高精度的检测。毕卫红等^[9]利用长周期光纤光栅对乙醇汽油折射率的敏感特性,实现了乙醇含量的检测。Corsetti 等^[10]通过傅里叶变换红外光谱分析了加入乙醇后汽油分子间的作用力,测定了乙醇汽油

中的化学成分。

倾斜光纤布拉格光栅(TFBG)是一种在纤芯轴垂直方向引入倾角的短周期光纤光栅,基于纤芯-包层模式耦合,在纤芯内传输的入射光被耦合至包层中,激发出如梳状的一系列窄线宽包层模^[11]。这些包层模对周围环境的变化有不同的响应特性,因此可以利用该特性进行折射率的测量,而包层模极窄的波长带宽为实现高灵敏度和分辨率的 TFBG 传感器带来了可能^[12]。本文提出一种基于 TFBG 的乙醇汽油中乙醇含量检测新方法,分别开展了理论仿真和实验研究。首先利用耦合模理论分析了 TFBG 的折射率传感特性,然后将其应用于乙醇汽油中乙醇含量的检测(本文乙醇含量指乙醇体积分数),最后通过波长解调的方法对 E10 乙醇汽油样品进行传感器的检测精度验证与分析。

2 基本原理

2.1 倾斜光纤布拉格光栅结构

光栅倾角的引入,使得 TFBG 的光栅平面与光纤光轴呈一定的角度,TFBG 结构如图 1 所示。倾角的引入使得 TFBG 不仅在满足布拉格条件时会产生和普通光纤布拉格光栅一样的纤芯模(后向传导),而且还会使在单模光纤纤芯中传输的光耦合到包层或外界环境介质中,转化成包层模或泄露模。其中光栅倾角和折射率调制深度决定了耦合效率和泄露光带宽。所以可以通过 TFBG 的透射谱来分析 TFBG 对外界折射率、温度、应变等的响应特性^[13-15]。

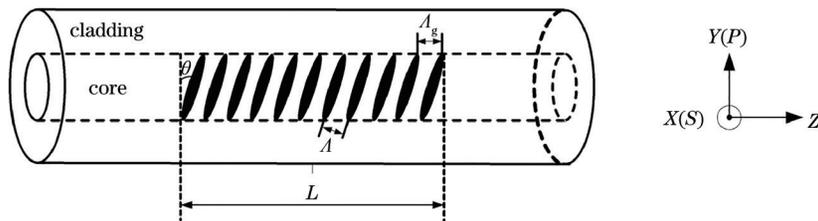


图1 TFBG 结构

Fig. 1 TFBG structure

2.2 倾斜光纤布拉格光栅耦合模理论

通过耦合模理论对图 1 所示的 TFBG 传感器模型进行理论分析,单模光纤纤芯的周期性折射率调制函数 $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 可以表示为

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \delta \overline{n_{\text{eff}}}(z) \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda / \cos \theta} z + \Phi(z) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: $\delta \overline{n_{\text{eff}}}(z)$ 为有效折射率调制的平均值(即折射率调制的直流项); v 为折射率调制深度; θ 为引入的

光栅倾角; $\Phi(z)$ 为相位调制, 即光栅的频率啁啾; Λ 为光栅周期, 与 Λ_g 满足 $\Lambda = \Lambda_g / \cos \theta$ 的关系, Λ_g 为光栅轴向周期。

TFBG 模式间的耦合为后向传输模式, 即纤芯模 (前向传输) 被耦合到包层模 (后向传输), 其耦合模方程^[16-18]为

$$\frac{dA}{dz} = -i\kappa B \exp(i\Delta\beta z), \quad (2)$$

$$\frac{dB}{dz} = -i\kappa^* A \exp(i\Delta\beta z), \quad (3)$$

式中: A 为纤芯模式中的复振幅; B 为包层模式中的复振幅; κ 为纤芯模和包层模之间的耦合系数; $\Delta\beta$ 为 TFBG 纤芯模和包层模的相位匹配条件。

TFBG 纤芯模和包层模的相位匹配条件为

$$\Delta\beta_{\text{core}} = \frac{2n_{\text{eff,core}}\omega}{c} - \frac{2\pi}{\Lambda/\cos\theta}, \quad (4)$$

$$\Delta\beta_{\text{clad},i} = \frac{(n_{\text{eff,core}} + n_{\text{eff,clad},i})\omega}{c} - \frac{2\pi}{\Lambda/\cos\theta}. \quad (5)$$

由 (4)、(5) 式可得纤芯模和第 i 阶包层模的谐

振波长分别为

$$\lambda_{\text{core}} = \frac{2n_{\text{eff,core}}\Lambda_g}{\cos\theta}, \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{clad},i} = (n_{\text{eff,clad},i} + n_{\text{eff,core}}) \frac{\Lambda_g}{\cos\theta}, \quad (7)$$

式中: $n_{\text{eff,core}}$ 为纤芯的有效折射率; $n_{\text{eff,clad},i}$ 为第 i 阶包层模的有效折射率。

对耦合模方程进行求解, 可以解出纤芯模和包层模之间的耦合效率, 即为

$$\eta = \tan^2|\kappa|L, \quad (8)$$

式中: L 为 TFBG 的光栅长度。

2.3 倾斜光纤布拉格光栅的折射率传感特性

因为倾角的引入, TFBG 透射谱中新出现的包层模谐振波长能够反映出乙醇汽油折射率的变化, 这起因于包层的有效折射率会随着乙醇汽油折射率的变化而变化。所以纤芯模和各阶包层模谐振波长漂移量分别为

$$\Delta\lambda_{\text{core}} = 2 \left(\frac{\Lambda}{\cos\theta} \frac{dn_{\text{eff,core}}}{dn_s} + \frac{n_{\text{eff,core}}}{\cos\theta} \frac{d\Lambda}{dn_s} \right) \Delta n_s, \quad (9)$$

$$\Delta\lambda_{\text{clad},i} = \left[\frac{\Lambda}{\cos\theta} \frac{d(n_{\text{eff,core}} + n_{\text{eff,clad},i})}{dn_s} + \frac{n_{\text{eff,core}} + n_{\text{eff,clad},i}}{\cos\theta} \frac{d\Lambda}{dn_s} \right] \Delta n_s, \quad (10)$$

式中: n_s 为被测样品折射率。由于 $\frac{dn_{\text{eff,core}}}{dn_s}$ 和 $\frac{d\Lambda}{dn_s}$ 均为零, 所以将 (9)、(10) 式化简为

$$\Delta\lambda_{\text{core}} = 0, \quad (11)$$

$$\Delta\lambda_{\text{clad},i} = \frac{\Lambda}{\cos\theta} \frac{d(n_{\text{eff,core}} + n_{\text{eff,clad},i})}{dn_s} \Delta n_s. \quad (12)$$

3 乙醇汽油样品制备及仿真分析

3.1 乙醇汽油样品制备及折射率检测

在实验室环境下, 按照不同的体积比将变性燃料乙醇和 92 号成品汽油 (车用乙醇汽油调合组分油) 配置了乙醇体积分数为 8.3%~14.3% 的 18 个乙醇汽油样本 (相同乙醇体积分数分别配置 3 个样本)。并利用阿贝折射仪测得不同乙醇含量的乙醇汽油折射率, 对乙醇汽油折射率和乙醇汽油中的乙醇体积分数进行线性拟合, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 乙醇汽油的折射率会随着乙醇汽油中乙醇体积分数的增加而减小, 能够通过折射率反映出乙醇汽油中的乙醇体积分数。当乙醇体积分数为 8.3%~14.3% 时, 对乙醇体积分数与乙醇

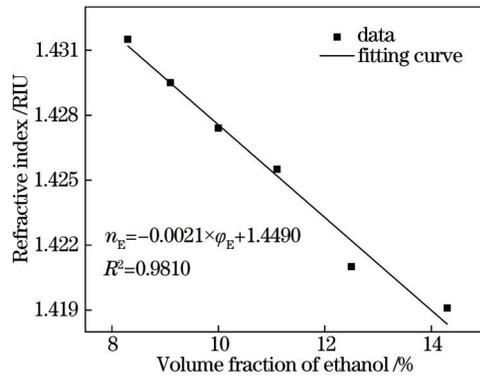


图 2 乙醇汽油折射率随乙醇体积分数的变化关系

Fig. 2 Relationship between refractive index of ethanol gasoline and ethanol volume fraction

汽油折射率进行线性拟合, 拟合公式为

$$n_E = -0.0021 \times \varphi_E + 1.4490, \quad (13)$$

式中: φ_E 为乙醇汽油中的乙醇体积分数。通过 (13) 式得到了较好的拟合效果, 线性拟合度为 0.9810, 这说明乙醇汽油中乙醇体积分数与折射率之间有着良好的反比关系。由于 TFBG 具有折射率传感特性,

因此可以用于乙醇汽油中乙醇体积分数的检测。

3.2 仿真分析

通过OptiGrating光学仿真软件对乙醇汽油折射率进行仿真分析。TFBG某阶包层模的透射谱随体积分数的变化趋势如图3所示,TFBG某阶包层模的谐振波长随折射率的变化趋势如图4所示。

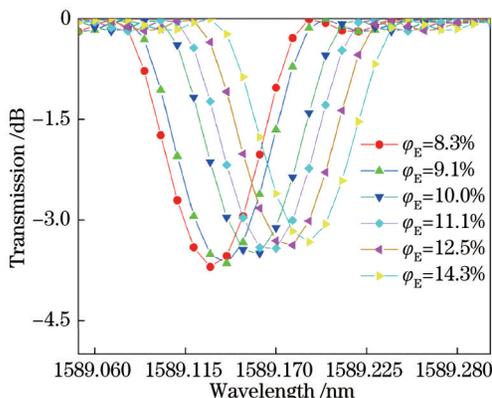


图 3 不同体积分时某阶包层模的 TFBG 透射谱
Fig. 3 TFBG transmission spectra of an order cladding mode at different volume fraction

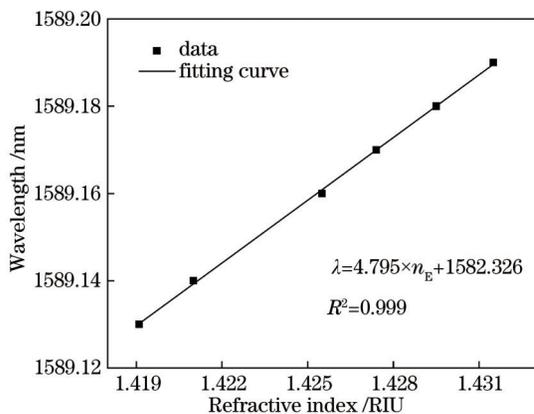


图 4 谐振波长随折射率的变化关系
Fig. 4 Relationship between resonant wavelength and refractive index

由图4可以看出,随着折射率的增加,包层模的谐振波长发生红移,因此通过包层模的谐振波长漂移,可以得出波长灵敏度约为4.8 nm/RIU。

4 实验与结果分析

4.1 实验系统设计

在 TFBG 的乙醇汽油检测实验中,所用仪器设备基本信息如表1所示。

乙醇汽油中乙醇含量检测的 TFBG 实验装置中用到的光纤光栅解调仪中配置有可提供工作波长范

表 1 实验所用仪器设备

Table 1 Instruments used in the experiment

Instrument	Model	Manufacturer
Fiber-optic grating demodulator	HD808	Heilongjiang University
Polarization controller	MCSPC-1550-00-10-L-FA	Shenzhen Mchlight Co., Ltd.
Abbe refractometer	WYA	Shanghai Precision & Scientific Instrument Co., Ltd.

围为 1510~1590 nm 的可调谐激光光源。因为 TFBG 对偏振态具有较强的依赖性,激光从光纤光栅解调仪的 CH2 通道输出,入射光经过偏振控制器和 TFBG 传感区域后,通过 CH1 通道再次输入至光纤光栅解调仪中用于后续解调。为防止乙醇汽油挥发速度快而带来较大实验误差的问题,采用随用随配的方法分别进行不同乙醇含量的乙醇汽油的 TFBG 检测实验。故对同一乙醇体积分数的乙醇汽油样品进行了 2 次测量,选择了受挥发性影响较小的光谱,尽量减小乙醇汽油的挥发性所带来的较大实验误差。而对于测量误差较大的光谱,重复进行多次的配置和测量。另外,为避免外界振动所带来的实验误差,将 TFBG 的两端固定在自制的流通池上,并将整个流通池固定在防震光学平台上,尽量减小振动对 TFBG 透射谱的扰动。为减小温度带来的实验误差,在室内调节空调以保持 25 °C 的环境温度,乙醇汽油中乙醇含量检测的 TFBG 实验装置如图 5 所示。

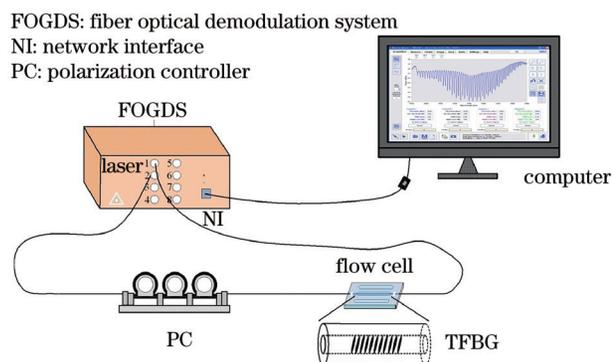


图 5 乙醇汽油中乙醇含量检测的 TFBG 实验装置
Fig. 5 TFBG experimental setup for detecting ethanol content in ethanol gasoline

4.2 不同乙醇含量乙醇汽油的 TFBG 透射谱

国内市面上销售的车用乙醇汽油标准是 E10 乙醇汽油(乙醇体积分数为 10%),为实现对 E10 乙醇汽油中乙醇含量的检测,分别对乙醇体积分数为

8.3%, 9.1%, 10.0%, 11.1%, 12.5%, 14.3% 的乙醇汽油进行了TFBG实验。随着乙醇汽油中乙醇体积分数的增加,乙醇汽油折射率减小,包层模整

体波形向左发生漂移,TFBG透射谱的上下包络跨度变大。图6为8.3%~14.3%乙醇体积分数的乙醇汽油的实验光谱。

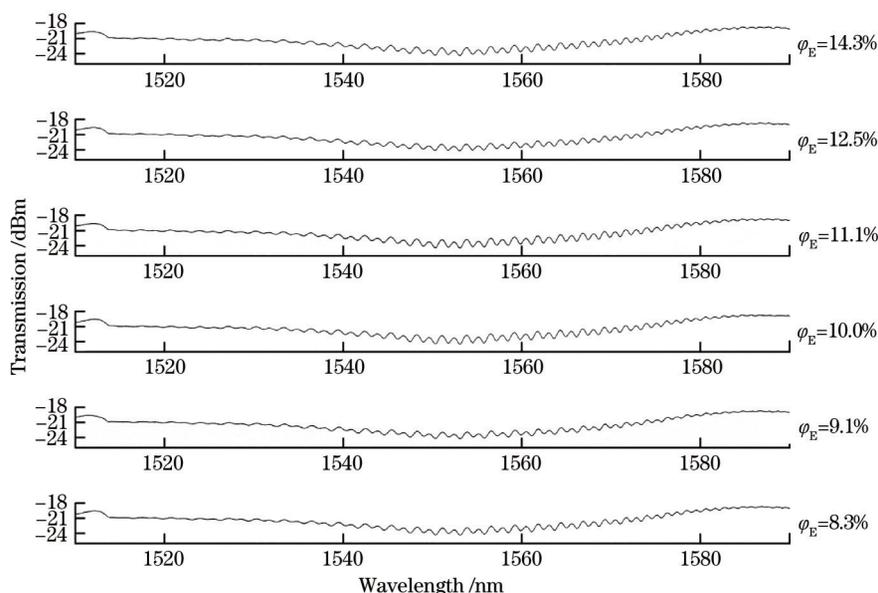


图6 乙醇体积分数为8.3%~14.3%时对应的TFBG透射谱
Fig. 6 TFBG transmission spectra at 8.3%~14.3% volume fraction

4.3 谐振波长变化量与乙醇含量的关系

因为乙醇汽油挥发速度较快,TFBG的透射谱波动较大,很不稳定。所以每个光谱测试2组,尽量减小乙醇汽油的挥发性所带来的较大实验误差。由于8.3%~14.3%体积分数范围内的乙醇汽油折射率均比较高,短波长处的包层模会有消失的现象,所以选取了1553 nm附近的包层模进行了分析,如图7所示。

从图7可以看出,当乙醇汽油中乙醇体积分数从8.3%增大到14.3%时,1553 nm附近的包层模

谐振波长分别为1553.105, 1553.090, 1553.070, 1553.055, 1553.025, 1553.020 nm;包层模的谐振波长随着乙醇汽油中乙醇体积分数的增加而发生蓝移,并呈现出较好的线性关系,线性拟合度为0.949,波长灵敏度约为6.5 nm/RIU。其拟合方程为

$$\lambda = -1.494\varphi_E + 1553.223. \quad (14)$$

4.4 E10乙醇汽油样品的TFBG实验光谱

相同实验环境下,仅通过波长解调的方法对配置的E10乙醇汽油样品进行传感器的检测精度验证,图8为所配置的E10乙醇汽油样品的TFBG实验光谱图。

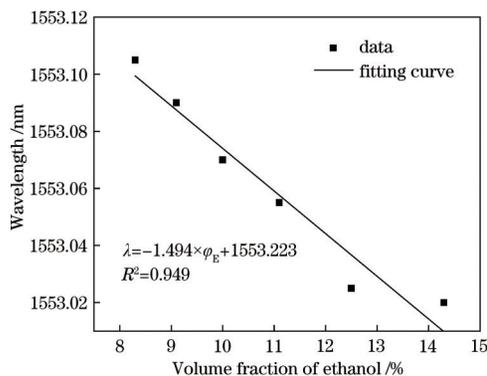


图7 TFBG中1553 nm附近的包层模谐振波长随乙醇体积分数的变化关系

Fig. 7 Relationship between cladding mode resonance wavelength near 1553 nm and ethanol volume fraction in TFBG

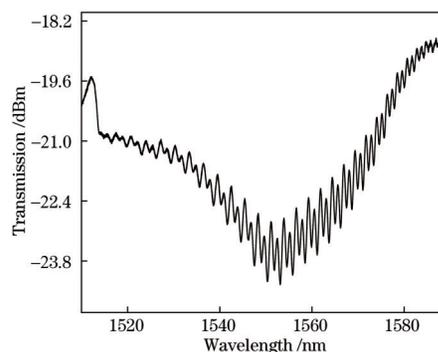


图8 E10乙醇汽油样品的TFBG实验光谱
Fig. 8 TFBG experimental spectrum of E10 ethanol gasoline sample

由图 8 所示,对 TFBG 实验光谱的波长数据进行分析,通过(14)式计算可得,传感器对 E10 乙醇汽油中乙醇体积分数的检测值为 10.2%,相对误差为 2%。

5 结 论

利用耦合模理论对 TFBG 的折射率传感特性进行了研究,得到了 TFBG 谐振波长与被测样品折射率的关系;利用 TFBG 的折射率传感特性,将其用于乙醇汽油中的乙醇含量检测,得出乙醇汽油折射率随乙醇含量的变化关系,进而得出乙醇含量与 TFBG 谐振波长谱漂移量的关系。实验结果表明,在乙醇含量为 8.3%~14.3% 的乙醇汽油检测中,基于 TFBG 传感器的乙醇汽油中乙醇含量检测方法的灵敏度为 6.5 nm/RIU。传感器对 E10 乙醇汽油中乙醇体积分数的检测值为 10.2%,相对误差为 2%。所提基于 TFBG 传感器的检测方法具有无电测量、操作安全、结构简单、测量精度高等优点,能够实现乙醇汽油中乙醇含量的高精度检测,为替代现有加油站的人工测量乙醇含量方式和提高站端油品质量检测效率提供了依据。

参 考 文 献

- [1] Zheng X, Wu X, He L Q, et al. Black carbon emissions from light-duty passenger vehicles using ethanol blended gasoline fuels[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, 19(7): 1645-1654.
- [2] Qu G F, Yao C D, Wu T Y, et al. Comparative experiment research on unregulated exhaust emission characteristics of alcohol-gasoline and gasoline[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(01): 111-118.
- [3] Du W X, Ma Z H, Yin Z L, et al. Auto-ignition and deflagration characteristics of ethanol-gasoline/air at high temperature[J]. *Fuel*, 2019, 255: 115768.
- [4] Matějovský L, Macák J, Pleyer O, et al. Efficiency of steel corrosion inhibitors in an environment of ethanol-gasoline blends[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(5): 8650-8660.
- [5] Ouyang A G, Zhang Y, Cheng M J, et al. Determination of the content of ethanol in ethanol gasoline using mid-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 752-759.
欧阳爱国, 张宇, 程梦杰, 等. 中红外光谱技术对乙醇汽油乙醇含量的检测[J]. *中国光学*, 2017, 10(6): 752-759.
- [6] Li C H. Influence and significance on determination of ethanol content in ethanol gasoline[J]. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 34(5): 324-325.
- [7] 李彩虹. 乙醇汽油中乙醇含量的影响及测定意义[J]. *辽宁工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(5): 324-325.
- [7] Opekar F, Čabala R, Kadlecová T. A simple contactless impedance probe for determination of ethanol in gasoline[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, 694(1/2): 57-60.
- [8] Ouyang A G, Liu J, Wang Y P. Detection of ethanol content in ethanol gasoline by near infrared spectroscopy[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(8): 901-904.
欧阳爱国, 刘军, 王亚平. 乙醇汽油含量的近红外光谱检测研究[J]. *激光与红外*, 2012, 42(8): 901-904.
- [9] Bi W H, Chen L S, Zhang H, et al. Ethanol content detection in oil by long period fiber grating[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(10): 1963-1967.
毕卫红, 陈连生, 张浩, 等. 基于长周期光纤光栅的成品油中乙醇含量检测[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(10): 1963-1967.
- [10] Corsetti S, Zehentbauer F M, McGloin D, et al. Characterization of gasoline/ethanol blends by infrared and excess infrared spectroscopy[J]. *Fuel*, 2015, 141: 136-142.
- [11] Nikitov S A. Cladding modes of optical fibers: properties and applications[J]. *Physics-Usppekhi*, 2006, 49(2): 167-191.
- [12] Guo T. Review on plasmonic optical fiber grating biosensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328006.
郭团. 等离子体共振光纤光栅生物传感器综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328006.
- [13] Guo T, Liu F, Guan B O, et al. Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 19-33.
- [14] Zhong J H, Feng Y, Zhang H, et al. Influence of refractive index on spectral characteristics of tilted fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1305001.
钟建辉, 冯艳, 张华, 等. 折射率对倾斜光纤光栅光谱特性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1305001.
- [15] Deng O, Luo B B, Wu D C, et al. Vibration sensing characteristics of reflection-type excessively tilted fiber grating cantilever[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2006001.
邓欧, 罗彬彬, 吴德操, 等. 反射型极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感特性[J]. *光学学报*, 2020, 40(20):

- 2006001.
- [16] Song Q G, Huang C J, Yan Z J, et al. All-fiber polarization-dependent device based on 45° radiated tilted fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (23): 2306003.
宋青果, 黄成俊, 闫志君, 等. 基于 45° 辐射倾斜光纤光栅的全光纤偏振相关器件[J]. *光学学报*, 2020, 40 (23): 2306003.
- [17] Lee K S, Erdogan T. Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted fiber gratings[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1394-1404.
- [18] Lee K S, Erdogan T. Fiber mode conversion with tilted gratings in an optical fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(5): 1176-1185.