

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905019

# 原油含水率红外光谱测量的超稀疏表示方法\*

韩 建,李雨昭,曹志民,刘 强,牟海维  
(东北石油大学 电子科学学院 大庆 163318)

**摘 要:**油水混合物的光谱分析方法已经成为当前油水两相流测量的研究热点。然而,传统的油水混合物光谱分析中,一般是通过主成分分析、连续投影算法等降维技术实现其光谱特征提取,所提取光谱数大多在10条以上,这使得油水两相测量光纤传感器的制造成本很高且工程实现难度很大。为提高基于光谱分析的油水两相测量光纤传感器的实用性,需要实现油水两相红外光谱的超稀疏表示。为此提出了油水混合物光谱自-互相关联合(self-cross correlation, SCC)的光谱超稀疏表示方法。为了验证方法的有效性,搭建了油水混合物红外光谱含水率测量实验装置,从SCC算法筛选出的6个波段中,根据实际生产工艺选择了1 050 nm和1 650 nm波段进行动态实验,实验结果表明,1 050 nm和1 650 nm波段对油和水的混合流型响应良好,且两者呈现出了显著的互相关性。显然,本文研究有助于提升工业光纤传感器的使用性能。

**关键词:**近红外光谱学;原油含水率;油水二相流;稀疏表示

**中图分类号:** TH741 O433.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3025 460.4035

## Ultra-sparse representation method for measuring crude oil water content using infrared spectroscopy technique

Han Jian, Li Yuzhao, Cao Zhimin, Liu Qiang, Mu Haiwei

(College of Electronics Science, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** The spectral analysis method of oil-water mixture has become a research hotspot of current oil-water two-phase flow measurement. However, in traditional oil-water mixture spectral analysis, the spectral feature extraction is generally achieved with the dimensionality reduction techniques, such as principal component analysis, successive projection algorithm and etc. The number of extracted spectra is mostly more than 10, which makes the oil-water two phase measurement fiber optic sensor expensive to manufacture and difficult to implement. In order to improve the practicability of the oil-water two-phase measurement fiber-optic sensor based on spectral analysis, it is necessary to realize the ultra-sparse representation of the oil-water two-phase infrared spectrum. In order to achieve this goal, a spectral ultra-sparse representation method with oil-water mixture spectral self-cross correlation (SCC) is proposed. In order to verify the effectiveness of the method, an experiment device for measuring the water content of oil-water mixture using infrared spectrum technique was established. From the 6 bands selected with the SCC algorithm, the bands of 1 050 nm and 1 650 nm were selected according to actual production process, and the dynamic experiments were carried out. The experiment results show that bands of 1 050 nm and 1 650 nm respond well to the mixed flow pattern of oil and water, and the two bands exhibit significant cross-correlation. Obviously, this study will help improve the service performance of industrial fiber-optic sensors.

**Keywords:** near infrared spectroscopy; crude oil water content; oil-water two-phase flow; sparse representation

## 0 引 言

在石油生产工业中,含水率检测是一项重要的指标。

人们需要通过检测含水率来管理采油进度、调整相应作业模式,从而能降低开采成本和水平井钻井成本<sup>[1]</sup>。但是如何能够快速准确的检测,尤其是在线实时监测高含水原油含水率,还是一个尚待解决的难题。目前国内油

田多数为高含水油田,开发含水率检测传感器具有实际意义<sup>[2]</sup>。利用近红外光谱(near infrared spectroscopy, NIRS)检测原油含水率是近些年新提出的方法,相比电容法、伽马射线法、微波法等方法<sup>[3-5]</sup>,近红外光法具有高分辨率,无污染,无放射性,快速响应的优势。并且在污水油污检测、润滑油含水检测、汽轮机油含水检测等方面已经得到了应用<sup>[6-8]</sup>,是一种检测油水混合物的理想方法。在实验室条件下对油水混合物进行检测时,可以通过对光谱数据进行降维,从而提出特征波长,常规的光谱数据降维方法如:人工神经网络(ANN),主成分分析(PCA)、连续投影算法(SPA)、无关变量消除法(UVE)等<sup>[9-12]</sup>。这些方法精度较高且能有效消除无关变量,达到对全谱进行稀疏表示的目的。

然而利用传统降维方法进行稀疏表示来确定光纤式原油含水率传感器有明显的缺陷。首先,传统降维方法进行的稀疏表示仅限于静态测量,由于部分波长被油水混合物完全吸收,对传感器需要检测的多种流型的要求不适合;且光纤式原油含水率传感器应用于井下测试环境,设计时需要与测试短节的体积相匹配,稀疏表示的波段数量仍然较高,对于工业上制作传感器选取波段参考价值有限。在设计光纤式原油含水率传感器时,如果使用上述方法提取出的特征波长作为检测波段,无法达到理想的效果。因此需要一种适用于制作传感器的,能够对全谱进行超稀疏表示的方法。

由于油水混合物对近红外光的吸收符合朗伯-比尔定律<sup>[13]</sup>,因此提出了利用物质的相关系数来提取特征波长的“自-互相关联合(self-cross correlation, SCC)方法”,即通过检测和分析纯油和纯水的不同厚度近红外光谱,来选取特征波长。利用这种办法可以提取出混合样本被吸收的隐性特征波长,通过设置阈值来控制特征选取的数量,达到超稀疏表示,对用于工业上的基于近红外光的传感器的设计制作更具有参考价值。

## 1 原理与方法

### 1.1 Lambert-Beer 吸收定律

朗伯比尔定律(Lambert-Beer Law)中,当单色光通过厚度固定的溶液时,吸光度  $A$  与溶液浓度成正比,若溶液中存在  $n$  种对光有吸收的物质,在同一波长下,只要存在物质不互相影响,则不会改变各自的吸光系数,总吸光度为各物质吸光度之和。如式(1)所示。其中,  $L$  为溶液厚度,  $c$  为物质的量浓度,  $\varepsilon$  为摩尔吸光系数。

$$A = \varepsilon Lc = \sum_{i=1}^n A_i \quad (1)$$

式中:吸光度  $A$  为透光率的负对数,即式(2)所示。

$$A = \lg \frac{I_0}{I_t} \quad (2)$$

式中:  $I_0$  为入射光强度,  $I_t$  为透射光强度。

因在实际检测中,入射光  $I_0$  和透射光  $I_t$  的强度均可测量,假设有  $a$ 、 $b$  两种溶液,由于物质的量浓度和摩尔吸光系数均为可测量,以  $k_a$ 、 $k_b$  表示,可如方程(3)所示,即:

$$I_t = I_0 e^{-(k_a L_a + k_b L_b)} \quad (3)$$

由此可以看出,在有  $n$  种物质的混合溶液中,在已知各物质的物质的量浓度和摩尔吸光系数的情况下,只要测出  $n$  个波长的入射光强度  $I_0$  和透射光强度  $I_t$ ,即可求出不同溶液的厚度,从而计算出各物质之间的比例。在石油开采工业中,因为油水混合物符合朗伯比尔定律,所以可以通过此方法进行设计和制作基于近红外光的光纤式原油含水率检测传感器,必须选择合适的波段来进行检测。

### 1.2 自-互相关联合方法

在化工、医药、食物等检验上,有使用通过与标准光谱库对比,根据自相关系数来判定成分和浓度等参数的方法,也有利用希尔伯特-黄变换,生成二维相关光谱进行分析的办法<sup>[14-16]</sup>。这些办法都是通过自相关系数作为权重,在多物质混合检测时,会有单一波长被多物质共同吸收,从而无法判断是各类物质吸收的程度,这种情况用于实验室分析是影响不大,但是在制作传感器方面参考作用就十分有限。且此类分析方法需要全谱分析,计算量较大。自-互相关联合方法引入了互相关系数作为权重,通过对每一波长进行线性回归,并对回归曲线进行误差分析,再对单一物质分别进行自相关,根据实际需要设定约束条件,筛选出既能提取出特征光谱,又能发掘出因油水样本液面过厚而被吸收的隐藏特征波长。算法步骤如下:

设有单一物质 A 检测的光谱矩阵  $A^{n \times p} = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$  和单一物质 B 检测得到的光谱矩阵  $B^{n \times p} = \{b_1, b_2, \dots, b_p\}$ 。其中  $n$  为样本容量,  $p$  为光谱总波长数。利用 SCC 选择波长的算法分为五步:

1) 分别对物质 A、B 的每一组波长  $\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$  和  $\{b_1, b_2, \dots, b_p\}$  进行线性回归,各求得回归方程系数  $p$  组。

2) 对回归方程系数和原数据进行自相关计算,得到自相关矩阵 R。相关系数计算公式如式(4)、(5)所示。

$$R(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}[X] \text{Var}[Y]}} \quad (4)$$

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (5)$$

3) 进行互相关计算。对物质 A、B 的每一对波长  $\{a_1, b_1\}$ 、 $\{a_2, b_2\}$ 、 $\dots$ 、 $\{a_p, b_p\}$  进行互相关计算,得到  $p$  个互相关系数。

4) 设立约束条件。SCC 算法中有 4 个约束条件,即

各物质的回归方程的自相关系数上限阈值和回归方程的互相关系数的上下阈值。可根据需要设置不同的阈值,选择特征值个数。

5) 根据筛选出的波长,选择适合的波段作为传感器波段。

## 2 实验设计

实验装置示意和实物如图1所示。光源通过准直透镜和小孔光栅形成平行光,利用光路转折器将光透过样品池,再对透射光进行聚焦后由光谱仪采集。实验采用调配3种溶液样本,井下采样的矿化水样本测量厚度 $1.274\sim 12.74\text{ mm}$ ( $0.4\sim 4\text{ ml}$ ),井下采样的原油样本密度 $\rho=0.9\text{ kg/m}^3$ ,测量厚度 $1.274\sim 12.74\text{ mm}$ ( $0.36\sim 3.6\text{ ml}$ ),测试光谱数据采取实验重复5次,取平均值作为该样本的光谱值。根据液体膨胀体积公式可以求得在室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化范围内水和油的体积变化率分别在 $0.312\%$ 和 $0.792\%$ ,因测量环境温度恒定,所以忽略温度对样本体积造成的影响。

实验使用 $14.5\text{ V}$ 卤素灯作为外部光源,使用海洋光学NIR512近红外光谱分析仪进行光谱采集,光谱仪波长范围为 $900\sim 1720\text{ nm}$ ,光学分辨率为 $3.1\text{ nm w}/25\text{ mslit}$ (共512个波段)。使用MATLAB软件对光谱数据进行处理。

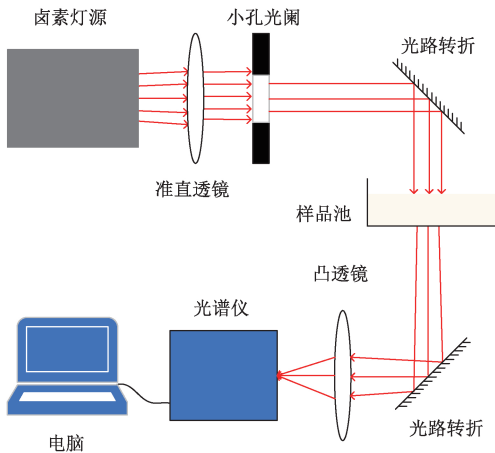


图1 实验装置

Fig.1 Experiment device

## 3 实验结果与分析

### 3.1 光谱预处理

矿化水样本和油样本的近红外光谱吸收图如图2、图3所示。由于原始光谱数据采集时会受到来自随机噪

音、自然光线、光散射等不利因素的影响,需采取一定的预处理方法来消除这些不利因素的影响,实现最优的建模效果。需要对原始数据进行平滑滤波<sup>[17]</sup>。因此选用了Savitzky-Golay滤波器(S-G滤波器)对光谱数据进行进一步处理。

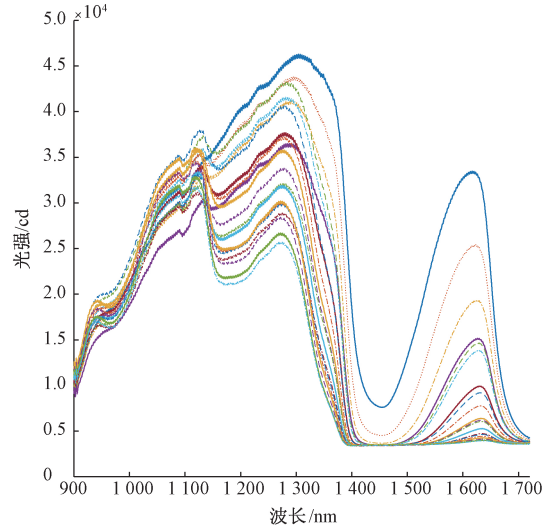


图2 矿化水近红外光谱吸收图

Fig.2 NIR absorption spectrogram of mineralized water

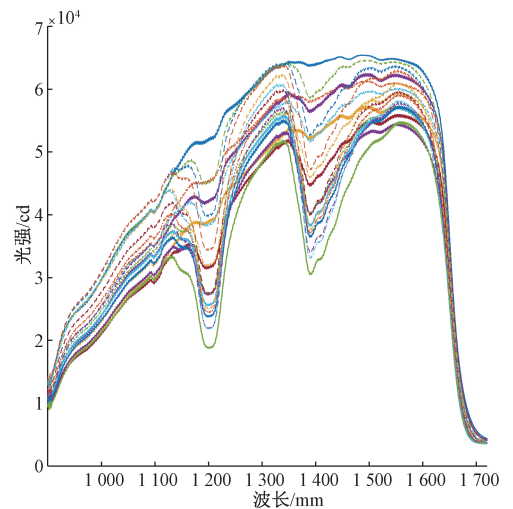


图3 原油近红外光谱吸收图

Fig.3 NIR absorption spectrogram of crude oil

图4、5分别为矿化水和原油经过S-G滤波器处理后的光谱吸收图。可以看到,光谱曲线具有了较高的平滑度,能提高矫正模型的精度。在后续的数据处理中,都是以对原始数据进行S-G滤波预处理后进行的。

### 3.2 SCC光谱特征提取

根据SCC算法步骤,先对油和水的的多光谱数据分别进行线性拟合,并求拟合系数与原数据的自相关系数。根

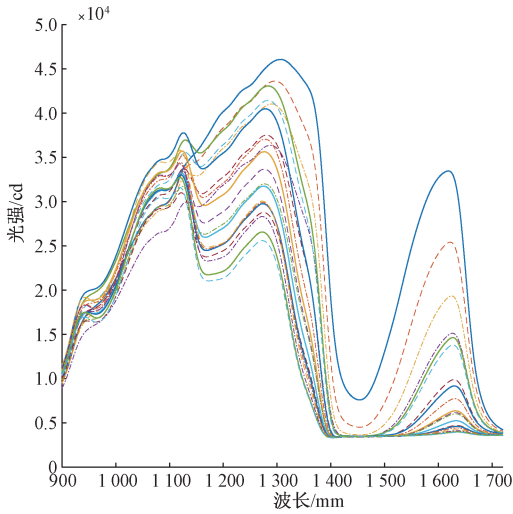


图4 S-G滤波后的矿化水近红外光谱吸收图  
Fig.4 NIR absorption spectrogram of mineralized water after S-G filtering

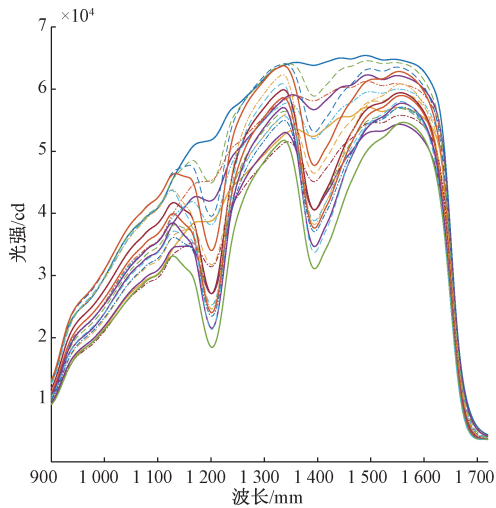


图5 S-G滤波后的原油近红外光谱吸收图  
Fig.5 NIR absorption spectrogram of crude oil after S-G filtering

据式(3)推导的结果,采用了多项式拟合方法。图6为矿化水的自相关曲线,可以明显看出,900~947.2 nm; 1 024.7~1 113.0 nm;1 178.0~1 398.6 nm;1 448.0~1 462.5 nm;1 534.1~1 661.0 nm这5个波段相关系数明显高于其他部分,说明数据与拟合曲线离散程度小,有很好的线性关系;图7为原油的自相关曲线,同理,1 166.7~1 234.7 nm;1 361.8~146.25 nm;这2个波段有很好的线性关系。以矿化水1 321.7 nm与1 008.2 nm为例,可以看出自相关系数更高的波段线性关系要远优于相关系数小的波段。如图8所示。

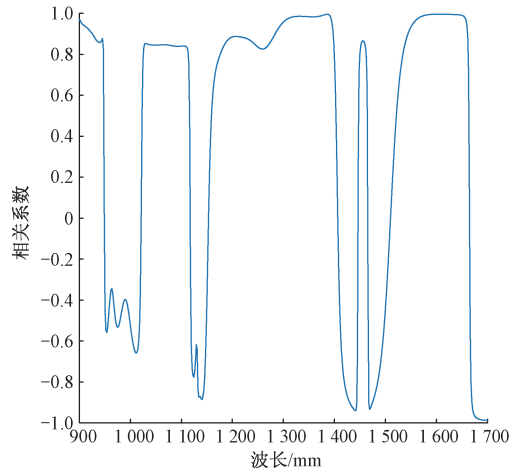


图6 不同波长下矿化水的相关系数曲线  
Fig.6 The correlation coefficient curve of mineralized water under different wavelengths

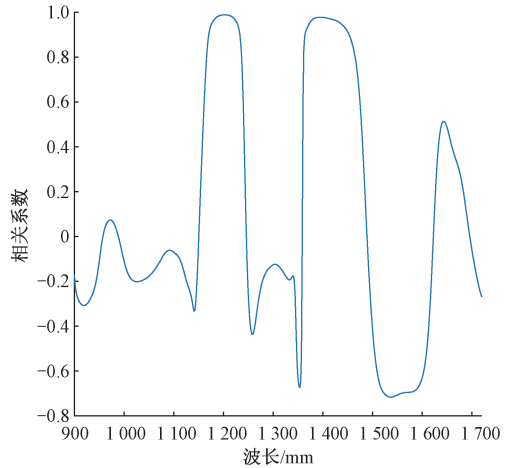
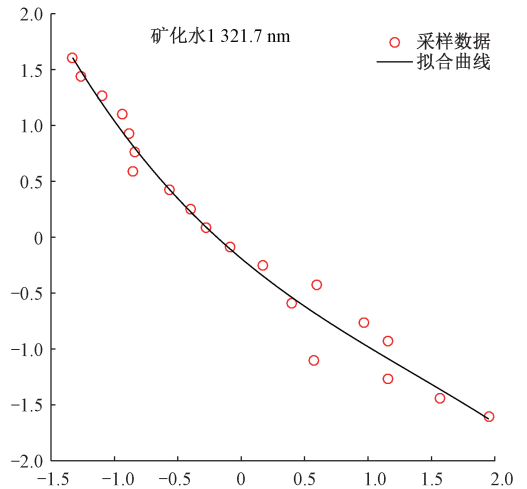


图7 不同波长下原油的相关系数曲线  
Fig.7 The correlation coefficient curve of crude oil under different wavelengths



(a) 1 321.7 nm矿化水拟合曲线  
(a) Fitting curve of mineralized water for wavelength of 1321.7nm



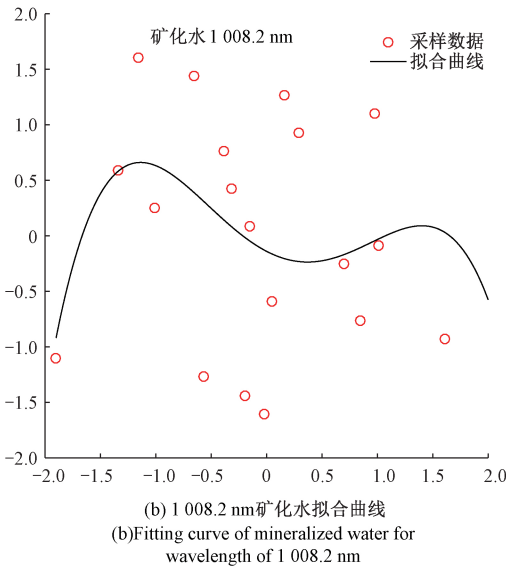


图 8 不同波长的拟合曲线

Fig.8 Fitting curves for different wavelengths

原油-矿化水互相关曲线如图 9 所示。相关系数越大,说明在该波段下原油和矿化水的变化趋势是相同的,相关系数越小,说明拟合曲线成较差线性关系或原油与矿化水在此波段的变化趋势相反。在设计光纤式原油含水率传感器时,需要的波长特征是对一种物质敏感的同时对另一种物质不敏感。因此 SCC 算法中需要设定互相关曲线的两个阈值。

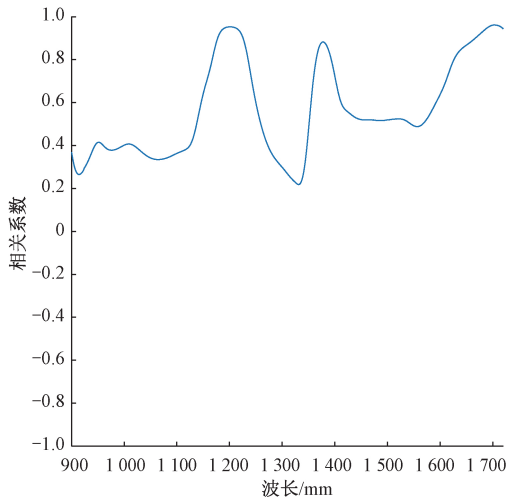


图 9 油水互相关的相关系数曲线

Fig.9 The cross correlation coefficient curve of oil-water

图 10 为设定全体 80%为阈值的选取结果,共选取了 77 个点,占全谱的 15.04%。为了能直观的看出筛选结果,图 10 中,将选取点标在互相关曲线上,其中圆点表示为互相关系数小,“\*”表示为互相关系数大。全体 80%

即选取原油、矿化水的自相关系数大于 0.8,互相关系数大于 0.8 和小于 0.4 的波长。阈值的设定可以相同,也可以根据自己实验的需要对单一值进行调整。

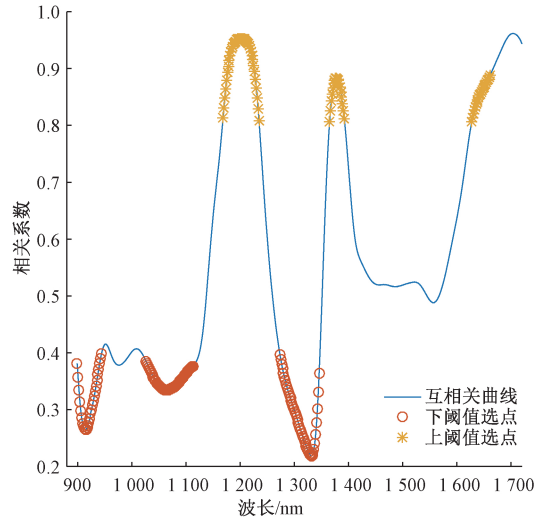


图 10 SCC 选取的特征波长(80%)

Fig.10 The characteristic wavelength selected with SCC method (80%)

由于目前在实际生产中,近红外光滤色镜片的镀膜工艺较为复杂,一般中心波长会有 $\pm 3 \sim \pm 5$  nm的误差,并会有半峰值 16~20 nm的带宽<sup>[18]</sup>,因此,如图 9 中所标记出的几个波段可以选择为 950 nm,1 050 nm,1 350 nm,1 200 nm,1 400 nm,1 650 nm 的 6 个中心波长。在传感器设计时,需要在上阈值波段和下阈值波段各选至少一个波段,即从中 950 nm,1 050 nm,1 350 nm 至少选取一个,从 1 200 nm,1 400 nm,1 650 nm 中至少选取一个。为避免相邻波段产生干扰,选择 950 nm 和 1 400 nm,1 050 nm 和 1 650 nm 两组作为传感器选择波段。

### 3.3 方法比较

为验证 SCC 方法,采用图 1 装置对油水混合物进行检测,从 99%~72%的油水混合物作为测试样本,共获取 32 组数据,并选择了两种常用于光谱降维处理的方法,PCA 和 SPA 进行比较。两种方法所选取的波长如表一所示。PCA 选取了 16 个波长,SPA 选取了 25 个波长。可以看出,PCA 选取的最大波长为 1 361.79 nm,SPA 选取的最大波长为 1 176.41 nm。由于油和水对 1 400 nm 以上的波段都有吸收,所以油水混合物将 1 400~1 700 nm 波段几乎全部吸收,在传统算法处理时会被作为无关数据被消除。

与 SCC 方法相比较,在未被吸收部分,3 种方法虽然选取的波长不同,但是都在相邻范围内。说明 SCC 在处理油水混合物时可以提取出与传统方法相近的波长。

表 1 其他降维方法选择的波长

Table 1 The wavelengths selected with other reduction methods (nm)

降维方法	选取波长
PCA	909.10;919.05;925.68;928.99;932.31;938.93;1060.72; 1063.99;1114.63;1121.14;1124.4;1260.52;1126.03; 1129.29;1130.91;1361.79;
SPA	899.13;900.79;902.46;1088.52;1090.15;1091.79; 1093.42;1095.05;1096.68;1098.32;1099.95;1129.29; 1130.91;1132.54;1134.17;1135.80;1137.42;1139.05; 1140.68;1142.30;1143.93;1145.56;1147.18;1148.81; 1176.41

### 4 波段选取的实验及结果

由于制作工艺的限制,选择了稳定性好,半波带宽较窄的 1 050 nm 和 1 650 nm 组,加工了 1 050 nm 和 1 650 nm 滤色片各一个,并设计了双路对比实验,来验证 SCC 算法选择的结果。实验调配了含水率 85% 的油水混合物,在管道内低速循环,管道直径 50 mm,光路间距 5 mm,样本平均流量 3.6 L/h。使用 14.5 V 卤素灯作为外部光源,利用 1 050 nm 和 1 650 nm 滤色片对光源进行滤色,转变为可近似为单色近红外光。使用分光光纤对样品同时测量,再用 2 个光电转换模块分别采集电信号,用电压高低表示光强的强弱。每隔 0.5 s 进行一次采样,共采集 114 s。实验装置如图 11 所示。

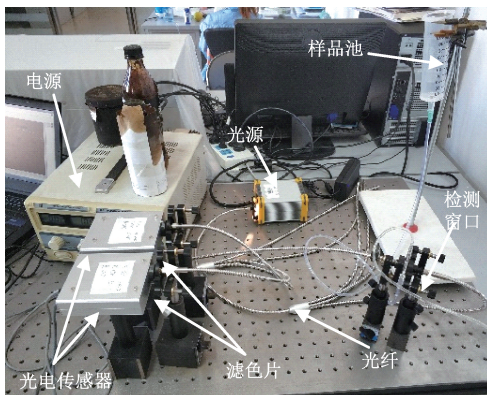


图 11 双路动态实验装置

Fig.11 Double-channel dynamic experiment device

1 650 nm 和 1 050 nm 采集信号如图 12 所示,可以明显看出,在动态实验中,由于流速导致的瞬时含水率会有波动,但是 2 个波段的吸收强度相反,对 1 650 nm 和

1 050 nm 波段的采样曲线进行相关分析,相关系数为 -0.681,呈较好的负相关性。

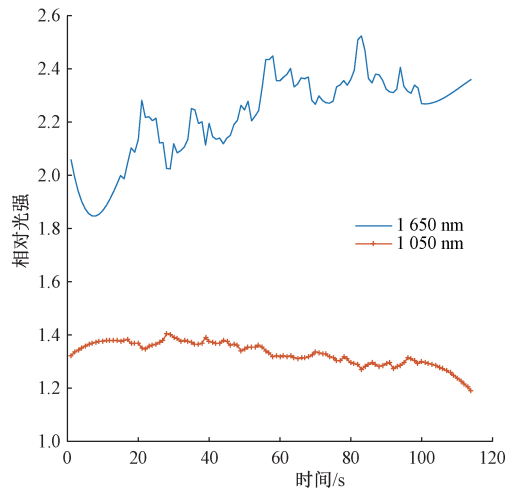


图 12 双路动态采样曲线(含水率 85%)

Fig.12 Double-channel dynamic sampling curve (water content: 85%)

### 5 结 论

设计光纤式原油含水率传感器要求利用最少的传感器对油水混合物进行检测,因此需要一种不同于传统降维方法不同的,能对近红外光谱进行超稀疏表示的方法。根据朗伯比尔定律提出了通过对原油和矿化水单一物质进行分别检测建立近红外光谱,使用相关性去提取特征波长的 SCC。通过搭建的实验装置对不同厚度的原油和矿化水分别进行近红外光谱检测,利用 S-G 滤波来提高光谱曲线的平滑性来消除不良影响。运用 SCC 对原油和矿化水分别计算,提出了 950 nm,1 050 nm,1 350 nm,1 200 nm,1 400 nm,1 650 nm 这 6 个波段,950 nm 和 1 400 nm,1 050 nm 和 1 650 nm 两组高质量波段组合。与传统方法 PCA 和 SPA 作对比,SCC 从被吸收波段中提取出了有效波长,对传感器的多流型分辨有更好的效果。

为验证 SCC 提出的波段是否有效,搭建了动态循环装置,选取并制作了 1 050 nm 和 1 650 nm 滤色片,使用双路同时检测含水率,并绘制了检测曲线。结果表明,1 050 nm 和 1 650 nm 两个波段对油水混合物吸收响应相反,曲线相关系数  $R = -0.816$ ,呈良好的负相关性,证明了该方法对于设计基于近红外光光纤式传感器的波段选取上,相比油水混合物静态测量建模的方法更具有参考价值。

### 参考文献

[ 1 ] 崔传智,徐建鹏,王端平,等. 特高含水阶段新型水驱

- 特征曲线[J]. 石油学报, 2015, 36(10):1267-1271.
- CUI C ZH, XU J P, WANG R P, et al. A new water flooding characteristic curve at ultra-high water cut stage[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 ( 10 ): 1267-1271.
- [ 2 ] HUA W, NA S, LIU Y. Index system evaluating water flooding development effect of oilfield at ultra-high water cut stage [ J ]. Journal of Petroleum Exploration & Production Technology, 2017, 7(1):111-123.
- [ 3 ] 魏勇, 余厚全, 戴家才, 等. 基于 CPW 的油水两相流持水率检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6):1506-1515.
- WEI Y, YU H Q, DAI J C, et al. Water holdup measurement of oil-water two-phase flow based on CPW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6):1506-1515.
- [ 4 ] YAKUNINA V V. A system for the measurement of the flow rate of petroleum [ J ]. Measurement Techniques, 2013, 55(11):1319-1323.
- [ 5 ] MAKEEV Y V, LIFANOV A P, SOVLUKOV A S. Microwave measurement of water content in flowing crude oil[J]. Automation & Remote Control, 2013, 74(1):157-169.
- [ 6 ] ZHANG J, KAI X, LIU S, et al. Modeling of polarized infrared contrast of water surface polluted by crude oil[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 62(2):65-69.
- [ 7 ] VILLAR A, FERNÁNDEZ S, GORRITXATEGI E, et al. Optimization of the multivariate calibration of a Vis-NIR sensor for the on-line monitoring of marine diesel engine lubricating oil by variable selection methods [ J ]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2014, 130(1):68-75.
- [ 8 ] 陈彬, 刘阁, 张贤明. 汽轮机油中含水量的近红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(11):2959-2963.
- CHEN B, LIU G, ZHANG X M. Near infrared spectroscopy study on water content in turbine oil[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33 ( 11 ): 2959-2963.
- [ 9 ] 褚小立, 陆婉珍. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10):2595-2605.
- CHU X L, LU W ZH. Research and application progress of near infrared spectroscopy analytical technology in china in the past five years[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10):2595-2605.
- [ 10 ] DINIZ P H G D, GOMES A A, PISTONESI M F, et al. Simultaneous classification of teas according to their varieties and geographical origins by using NIR spectroscopy and SPA-LDA [ J ]. Food Analytical Methods, 2014, 7(8):1712-1718.
- [ 11 ] DE OLIVEIRA R R, DE LIMA K M, TAULER R, et al. Application of correlation constrained multivariate curve resolution alternating least-squares methods for determination of compounds of interest in biodiesel blends using NIR and UV-visible spectroscopic data [ J ]. Talanta, 2014, 125(11):233-241.
- [ 12 ] 曲楠, 窦森. 近红外光谱法对土壤有机碳组成的无损分析[J]. 东北师大学报(自然科学), 2018, 50(1):99-104.
- QU N, DOU S. Near infrared spectroscopy nondestructive analysis of soil on composition of organic carbon [ J ]. Journal of Northeast Normal University ( Natural Science Edition ), 2018, 50(1):99-104.
- [ 13 ] 方立德, 吕晓晖, 田季, 等. 基于近红外差压技术的气液两相流双参数测量[J]. 中国测试, 2018, 44(1):21-26.
- FANG L D, LV X H, TIAN J, et al. Dual-parameter measurement based in near infrared ( NIR ) and differential pressure technique in gas-liquid two-phase flow[J]. China Measurement & Test, 2018, 44 ( 1 ): 21-26.
- [ 14 ] LI J R, SUN S Q, WANG X X, et al. Differentiation of five species of Danggui raw materials by FTIR combined with 2D-COS IR [ J ]. Journal of Molecular Structure, 2014, 1069:229-235.
- [ 15 ] LU E, RAN Z, FEI P, et al. Demodulation of micro fiber-optic Fabry-Perot interferometer using subcarrier and dual-wavelength method [ J ]. Optics Communications, 2012, 285(6):1087-1090.
- [ 16 ] 王建平. 同型二聚体肽模型的二维红外光谱[J]. 化学物理学报, 2016, 20(5):509-517.
- WANG J P. Two-dimensional infrared spectroscopy of a model peptide homodimer [ J ]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2016, 20(5):509-517.
- [ 17 ] 赵安新, 汤晓君, 张钟华, 等. 优化 Savitzky-Golay 滤波器的参数及其在傅里叶变换红外气体光谱数据平

滑预处理中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5):1340-1344.

ZHAO A X, TANG X J, ZHANG ZH H, et al. Optimizing Savitzky-Golay parameters and its smoothing pretreatment for flir gas spectra [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5):1340-1344.

- [18] 王玉田, 史锦珊. 新型比色式光纤温度测量仪的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 1993(4):34-39.

WANG Y T, SHI J SH. Research on a new two-colour ratio pyrometer with optical fiber lind [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 1993 (4): 34-39.

## 作者简介



**韩建**, 1999年于东北师范大学获得学士学位, 2004年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为东北石油大学教授, 主要研究方向为油井信号检测及测井仪器方法。

E-mail: han-jian@126.com

**Han Jian** received his B. Sc. degree in 1999 from Northeast Normal University and M. Sc. degree in 2004 from Harbin

Industrial University; now, he is a professor in Northeast Petroleum University. His main research interest includes oil well signal detection and logging instrument method.



**曹志民** (通信作者), 2003年于大庆石油学院获得学士学位, 2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2016年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为东北石油大学副教授, 主要研究方向为多源异构大数据信息挖掘与模式识别、遥感数据处理与分析、井震大数据储层精细描述等。

E-mail: caozhimin@nepu.edu.cn

**Cao Zhimin** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2003 from Daqing Petroleum Institute, received his M. Sc. degree in 2008 and Ph. D. degree in 2016 both from Harbin Industrial University. Now, he is an associate professor in Northeast Petroleum University. His main research interest includes multi-source heterogeneous large data information mining and pattern recognition, remote sensing data processing and analysis, and fine reservoir description of well seismic big data, etc.