

一种油田原油含水率的近红外光谱检测与分析方法

刘宏明^{1,2}, 刘玉娟^{1*}, 仲志成¹, 宋莹^{1*}, 李哲¹, 徐洋¹

1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 地球信息探测仪器教育部重点实验室, 国家地球物理探测仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130012
2. 通化师范学院, 吉林 通化 134000

摘要 石油作为重要战略资源, 对其组分进行实时分析检测在石油化工领域有着重要意义。随着石油资源的不断开发, 在已长时间开采油井的生产过程中以及新油井开采前, 需要对井下原油组分进行分析检测, 以判定开采的必要性。原油组分实时检测, 在原油开采、生产、储运以及销售过程中都起着关键的作用, 针对传统检测方法存在精度低、效率低等问题, 近年来在原油组分检测技术的研究方法上引入了在测量领域得到广泛、有效应用的近红外光谱测量技术。以井下原油作为研究对象, 利用从大庆油田获得的提纯原油与水按体积比配制了原油占比分别为1%~20%共39个组分的实验样品来模拟井下原油。研究了近红外光谱透射法测量原油组分的基本原理, 并利用SW2520型近红外光谱仪与卤素光源以及配套组件集成了原油样品近红外光谱数据测量系统, 完成了系统的标准化实验并利用此标准化后的系统采集了39个组分原油样品的近红外吸收光谱数据。利用移动窗口平滑法、Savitzky-Golay卷积平滑法以及Savitzky-Golay卷积求导法对原油近红外光谱数据进行预处理以消除噪声, 利用偏最小二乘法和支持向量机回归方法SVR两种分析方法对预处理后的原油样品近红外光谱进行建模, 分别建立了原油组分分析预测模型。研究结果表明, 利用偏最小二乘法模型预测均方根误差为0.003 755 14, 决定系数 R^2 为0.999 999, 预测精度优于0.1%, 预测效果十分理想。利用近红外光谱技术对配制的不同比例的井下原油模拟测试样品进行测试建模和分析, 为井下原油组份检测提供了一种新的思路, 该方法可以有效的解决原油含水率的检测问题, 为开发油田现场实时原油检测分析装备提供技术支撑。

关键词 原油; 近红外光谱; 预处理; 偏最小二乘法

中图分类号: TD926.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0505-06

引言

原油作为一种重要的战略储备及化石燃料资源, 其储量以及生产技术都对国家经济有重要的影响^[1-2]。为了对油井的开采必要性作科学的评估, 需要在生产、测井中对油井内原油组分进行准确、高效地检测, 评价新油井产能, 从而制定科学高效的原油开采策略^[3]。原油组分的实时、精确测量对油井生产评估管理具有重要意义, 错误的原油组分数据会导致生产过程出现差错, 造成不必要的损失^[4]。研究原油组分在线实时监测新方法、新手段, 提高原油组分检测的精度和稳定性, 解决目前各种原油组分检测手段在技术及成本上

存在的问题, 可使我国原油组分检测技术达到更高水平。

目前, 对原油组分分析检测, 尤其是对水含量的检测手段有很多种, 其中大多都是实时检测手段, 主要包括电容法^[5]、射频法^[6]、高频电磁涡流法^[7]、超声波检测法^[8], 这些方法精度不一, 也各有优点, 在使用条件上也有限制。解决传统检测方法精度低、效率低等问题, 近年来在原油组分检测技术中引入了在测量领域得到广泛、有效应用的近红外光谱测量技术^[9]。近红外光谱分析因其具有操作简单、测试效率高、分析速度快、能够无损测量、无污染、测量精度高等优点在农业、化工生产等领域已取得广泛应用。近红外光谱测量技术能快速、便捷测得原油的近红外光谱, 但对于光谱数据的处理还需要结合化学计量学方法。由于光谱测量过

收稿日期: 2019-12-18, 修订日期: 2020-04-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41504135, 61705221), 国家自然科学基金面上项目(41974210), 吉林省创新能力建设项目(2019C035-1)资助

作者简介: 刘宏明, 1981年生, 吉林大学仪器科学与电气工程学院博士研究生, 通化师范学院副教授 e-mail: 679219@qq.com

* 通讯作者 e-mail: xuliuyujuan@163.com; 50367444@qq.com

程中不可避免地会受到各种噪声的干扰,故对实验测得的光谱数据进行预处理消除噪声等干扰就十分必要。而为了最终建立原油组分分析预测模型,还需要利用数学建模的方法对预处理后的光谱数据进行建模^[10],以最终达成利用此模型对原油组分进行分析检测的目的。根据现阶段我国油井资源开发的实际情况,研究基于近红外光谱测量技术原理并结合化学计量学方法的原油组分检测方法,具有重要的现实意义和经济价值。

1 近红外光谱检测原油含水率基本原理

近红外光谱透射法通过检测光源发出的光在经过样品后强度的衰减来确定样品组分。透射光强度与样品组分中吸光成分浓度遵循 Lambert-Beer 定律

$$A = \lg \frac{1}{T} = kbc \quad (1)$$

其中, A 为吸光度, T 为透射比, k 为摩尔吸收系数 ($L \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), b 为样品吸收层厚度(一般称 kb 为“消光系数”), c 为吸光样品浓度^[11]。

近红外光谱分析技术通过测得不同组分样品近红外光谱,能够建立分析预测模型,实现对原油组分的在线检测。

2 原油含水率近红外光谱检测系统设计

近红外光谱透射法基本原理为由光源发出的光经光纤传输至样品架,照射在盛放样品的试管上,光线透过试管,再由光纤传输至光谱仪。原油样品近红外光谱测量实验系统设计如图 1 所示。

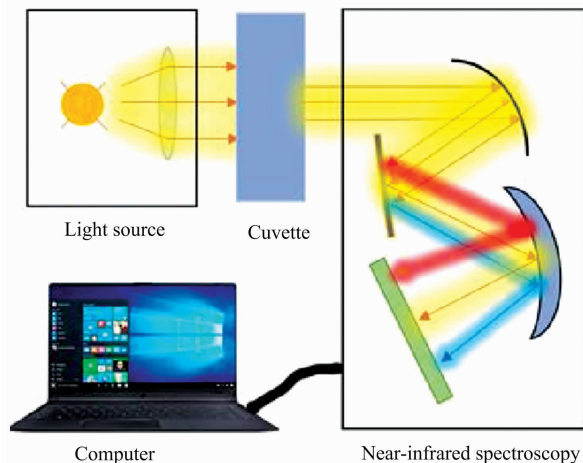


图 1 原油样品近红外光谱测量实验系统设计图

Fig. 1 Experimental system design of near infrared spectroscopy for crude oil samples

2.1 检测系统参数设计

确定原油样品中所测组分的特征化学键及其近红外特征吸收波长是近红外光谱透射法检测原油样品的关键,原油中常见组分包含的化学键为 C—H 键和 N—H 键。在近红外光谱波长范围内, C—H 键的特征峰体现在 CH_3 的第二组合

频即 1 360 和 1 400 nm 附近, CH_2 的第二组合频即 1 391 和 1 412 nm 附近, N—H 键的特征峰体现在 1 486, 1 530 和 1 625 nm 附近, 水的特征峰选择在 1 480 nm。

2.2 系统标准化光源选择及校准

实验用光源为台湾超微光生产的卤素光源。卤素光源能提供均衡且稳定的宽带光谱输出,且能与光谱仪匹配,其具体参数如表 1 所示。

表 1 卤素光源参数表

Table 1 Parameters of halogen light source

| Wavelength range/nm | fluctuation stability/% | intensity drift/%hr | bulb color temperature/K |
|---------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|
| 50~1 700 | 0.5 | <0.3 | 2 800 |

校准用光源为北京卓立汉光生产的 LHM254 型汞灯。LHM254 汞灯是冷阴极低压水银放电灯,可提供 253.65, 313.2, 365.48, 404.72, 435.84 和 546.07 nm 等多条汞的特征谱线^[13],且特征波长带宽较窄,是实验室常用的标定光源。

2.3 近红外光谱仪

系统检测所用近红外光谱仪为台湾超微光学的 SW2520 型近红外光谱仪,SW2520 采用 C-T 结构光学设计,测量性能十分稳定且准确,在光学分辨率及波长漂移上有优异的抗干扰能力,在温度、湿度变化,震动、撞击等环境干扰以及外力干扰的情况下稳定性较好。系统采用 InGaAs 线型传感器,32 位 RISC 微控制器(MCU)并针对光谱分析核心功能做出优化,架构精简,能够满足本工作测试指标要求,其具体参数如表 2 所示。

表 2 SW2520 光谱仪参数表

Table 2 Parameters of SW2520 spectrometer

| Performance | parameters |
|----------------------------|------------|
| Wavelength Range/nm | 950~1 700 |
| Dynamic Range | 7 200 : 1 |
| SNR(Signal to Noise Ratio) | 6 000 : 1 |
| Stray Light | <0.15% |
| Thermal Stability | <0.069 |
| Spectral Resolution/nm | 8 |
| Wavelength Accuracy/nm | ±1 |

2.4 原油含水率检测系统标准化实验

标准化是利用设计的原油近红外光谱测量系统检测样品近红外光谱数据的前提和关键,以确保测得的原油组分光谱数据的可靠性。利用近红外光谱仪测量标准汞灯的光谱如图 2 所示。由图可见,在 1 017.53 nm 处测得一特征谱线,判定为 253.65 nm 的四级光谱^[11],波长误差为 0.29%。造成误差的部分原因是 SW2520 采用 16 位 A/D,这就造成其只能测得 1 010.82 和 1 017.53 nm 处的光谱数据,无法准确测得 1 014.6 nm 处的数据。但这一误差值较小,不影响测得光谱的准确性。利用汞灯光源进行波长校准完毕后,利用 SW2520 测量卤素光源的光谱,在不放置比色皿和任何实验

样品的情况下测得的光谱数据与理论上的光谱数据一致，说明利用此实验系统可以准确地测量原油的近红外光谱。

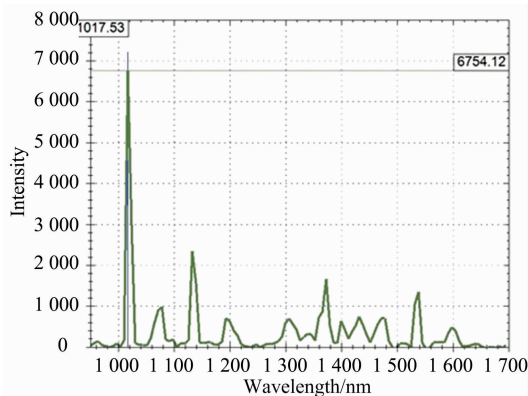


图 2 实验系统测得汞灯光谱曲线

Fig. 2 Spectrum of mercury lamp measured by experimental system

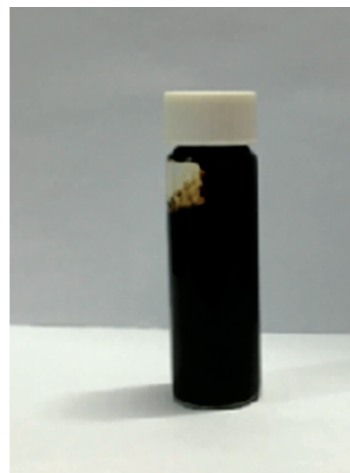


图 3 大庆油田生产的提纯原油

Fig. 3 Purified crude oil produced in Daqing Oilfield

3 试验样品的配置及光谱测量

大庆油田产出的原油常见性质为：外观呈黑色，密度为 $0.8591 \sim 0.8650 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，凝点 $25.3 \sim 32.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ，粘度 $22.27 \sim 24.54 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，硫含量 $919.8 \sim 1203.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，氮含量 $1519.8 \sim 2040.8 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，残炭 $2.74\% \sim 3.21\%$ ，按硫含量和关键馏分分类法，属低硫石蜡基原油^[12]。采用如图 3 所示大庆油田生产的提纯原油作为实验用油，提纯原油除去了水、砂砾等其他杂质，保留了原油的所有组分，能够最大限度地保证对井下原油组分及性质的模拟。

选用 3 mm 光程石英比色皿，比色皿适用波长 $200 \sim 2500 \text{ nm}$ ，透光率 $>80\%$ ，耐酸碱，耐高温 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ，耐有机溶剂。在测样品近红外光谱时，先按组分配制原油样品集与预测集，原油样品参数如表 3 所示。

为了减少测量误差，各个组分的原油样品均重复测量 10 次，在光谱数据处理前，先将各个组分的 10 组数据求平均后作为该组分原油样品的近红外光谱数据，如图 4(a)所示为 1.5% 组分测量得到的 10 组光谱数据，经过求平均处理后的

表 3 39 个组分样品配制材料含量(原油/水)

Table 3 Content of materials prepared from 39 component samples (crude oil/water)

| 1%~5.5% samples/ μL | 6%~10.5% samples/ μL | 11%~15.5% samples/ μL | 16%~20% samples/ μL |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 70/6 930 | 420/6 580 | 770/6 230 | 1 120/5 880 |
| 105/6 895 | 455/6 545 | 805/6 195 | 1 155/5 845 |
| 140/6 860 | 490/6 510 | 840/6 160 | 1 190/5 810 |
| 175/6 825 | 525/6 475 | 875/6 125 | 1 225/5 775 |
| 210/6 790 | 560/6 440 | 910/6 090 | 1 260/5 740 |
| 245/6 755 | 595/6 405 | 945/6 055 | 1 295/5 705 |
| 280/6 720 | 630/6 370 | 980/6 020 | 1 330/5 670 |
| 315/6 685 | 665/6 335 | 1 015/5 985 | 1 365/5 635 |
| 350/6 650 | 700/6 300 | 1 050/5 950 | 1 400/5 600 |
| 385/6 615 | 735/6 265 | 1 085/5 915 | |

光谱数据如图 4(b)所示；将每个组分的 10 份光谱数据都进行相同的求平均处理，以剔除粗大误差，实验测得的所有 390 份数据经求平均处理即得到 39 个组分的原油样品光谱数据，如图 4(c)所示。

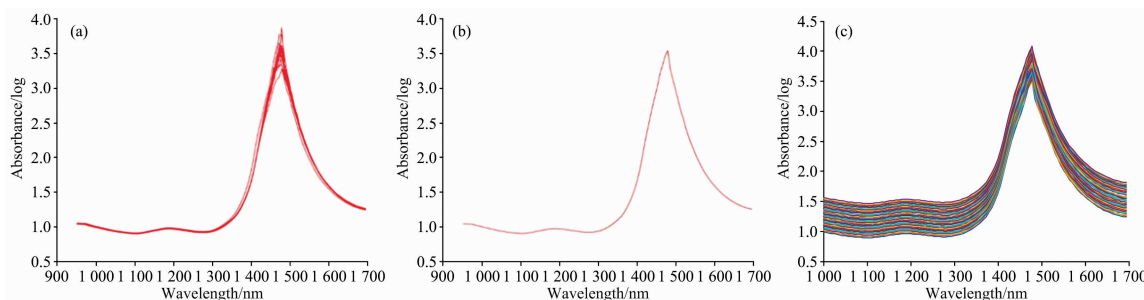


图 4 样品求平均处理曲线

(a): 10 份光谱数据; (b): 平均后光谱数据; (c): 求平均后的所有原油样品光谱

Fig. 4 Sample average processing curve

(a): 10 spectral datas; (b): Average spectral data; (c): Average spectra of all samples

由图 4 可以看出,测得的所有光谱在 1 478 nm 处均出现了明显的吸收峰,这个吸收峰即为水的特征峰,其他波长处未见明显吸收峰,造成这一现象的原因是原油中沥青、胶质包裹住原油液滴;原油中的 C—H 键、N—H 键的吸收峰未在测得的原油样品光谱有明显表现,因此利用测得的广谱数据中水的特征吸收峰来判断出水的组分含量。

4 光谱数据的建模与模型分析

4.1 数据预处理

平滑是被广泛应用的消除杂散光及小幅值噪声的预处理方法,其基本原理就是通过多次测量求平均值的方式来降低噪声,分别采用移动平均平滑和 Savitzky-Golay 卷积平滑法两种方法进行预处理^[13]。

(1) 移动平均平滑法

移动平均平滑法的基本原理是设定一个含有奇数个波长点的窗口作为平滑窗,将窗口中所有波长点的测量平均值 \bar{x}_k 替换为此窗口中中心波长点出的测量值。从第一个波长点开始,从左至右直至最后一个波长点,完成对全部波长点的平滑。

$$x_{k,smooth} = \bar{x}_k = \frac{1}{2w+1} \sum_{i=-w}^{+w} x_{k+i} \quad (1)$$

由上述原理及式(1)可以看出,窗口的选择对移动平均平滑法的处理过程是十分重要的。根据测得的原油样品光谱数据特征和多次实验结果,窗口宽度设置为 11 时既避免了因窗口过小而使平滑去噪效果不理想,又避免了窗口过大将有用信息也随着噪声平滑掉,使得光谱数据产生失真的情况。对实验测得的 39 个原油样品组分进行移动平均平滑处理后光谱曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,经移动平均平滑法后的光谱数据消除了杂散光等噪声,光谱数据曲线十分光滑,有利于之后的模型建立。

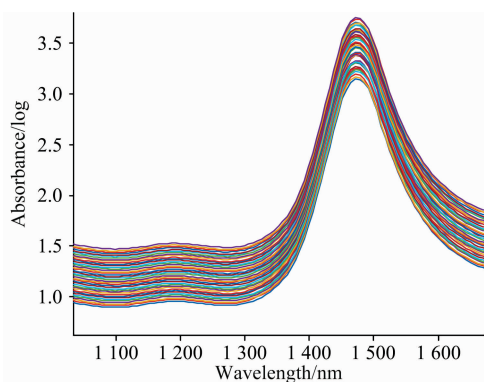


图 5 移动平均平滑法处理后光谱曲线图

Fig. 5 Spectral curves after moving average smoothing

(2) Savitzky-Golay 卷积平滑法

Savitzky-Golay 卷积平滑(S-G 平滑)也被称为多项式平滑^[14],波长点处经平滑后的平均值为

$$x_{k,smooth} = \bar{x}_k = \frac{1}{H_i} \sum_{i=-w}^{+w} x_{k+i} h_i \quad (2)$$

式(2)中, h_i 为平滑系数, H 为归一化因子, $H = \sum_{i=-w}^{+w} h_i$, 每一测量值均乘以平滑系数 h_i 是为了尽可能减小平滑对有用信息的影响。可基于最小二乘原理用多项式拟合求得。由式(1)和式(2)可以看出, S-G 平滑法与移动平均平滑法都是在平滑窗口内求平均,只是 S-G 平滑法是通过加权的方式,对窗口内的光谱数据进行加权多项式的最小二乘拟合,从而强调了中心点的中心作用。利用 S-G 平滑法对实验测得的 39 个原油样品组分进行处理得到的结果如图 6 所示。

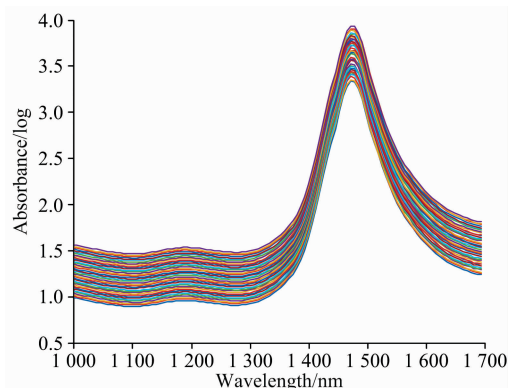


图 6 S-G 平滑法处理后光谱曲线图

Fig. 6 Spectral curves after S-G smoothing

由图 6 可以看出, S-G 平滑法对实验测得的原油样品光谱数据的处理效果也比较理想。由图 5 和图 6 对比可以看出,这两种方法均对原油样品光谱信号中的杂散光等小幅值噪声信号进行了消除。但也可以看出,经过 S-G 平滑后的光谱数据的峰值被强调了,这对接下来的原油组分分析预测模型的建立过程是有帮助的,故最终选用 S-G 平滑法处理后的结果作为原油样品预处理结果。

4.2 建模

分别利用偏最小二乘法(PLS)、支持向量机回归方法(SVR)对经过 Savitzky-Golay 卷积平滑后的原油样品光谱数据建立定量分析预测模型。将预处理后的光谱数据分为校正集和预测集两个集合,以更好地检验建立的分析预测模型的精度。随机选取 2%, 5.5%, 6.5%, 8.5%, 10%, 12.5%, 13.5%, 16.5%, 18.5% 这 9 个组分的原油样品光谱作为验证集组分,将剩余的 30 个组分样品光谱作为校正集组分,然后建立校正模型,利用所建模型进行预测效果如表 4 所示。

如表 4 所示, PLS 模型预测均方根误差为 0.003 755 14, 决定系数 R^2 为 0.999 999, 预测效果较好。SVR 模型预测均方根误差为 0.042 005 8, 决定系数 R^2 为 0.999 949, 说明预测效果比 PLS 方法稍差。曲线拟合结果如图 7 所示,由图 7(a)可知, PLS 拟合直线斜率几乎为 1, 拟合效果较好。由图 7(b)可以看出, SVR 拟合直线斜率几乎为 1, 拟合效果与 PLS 方法相比近似。由表 4 所示模型预测的结果可知, SVR 模型 2% 组分预测值的相对误差 $> 0.1\%$, 其余组分优于 0.1% 满足指标要求,但相对误差比 PLS 方法稍大,说明 SVR 方法建立的分析预测模型效果比 PLS 方法稍差,但 PLS 和 SVR 两种预测值的相对误差均优于 0.1%, 满足实际

应用中指标要求。

表 4 PLS 分析预测模型的预测数据

Table 4 Prediction data of PLS analysis prediction model

| actual value/% | PLS Model | | SVR Model | |
|----------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | predicted value/% | relative error/% | predicted value/% | relative error/% |
| 2.0 | 1.997 961 | -0.100 0 | 1.938 493 | -3.00 |
| 5.5 | 5.498 486 | -0.002 8 | 5.541 823 | 0.76 |
| 6.5 | 6.501 231 | 0.019 0 | 6.513 176 | 0.20 |
| 8.5 | 8.503 253 | 0.038 0 | 8.549 201 | 0.58 |
| 10.0 | 9.991 002 | -0.090 0 | 10.054 180 | 0.54 |
| 12.5 | 12.499 670 | -0.003 0 | 12.462 110 | -0.30 |
| 13.5 | 13.504 960 | 0.037 0 | 13.546 910 | 0.35 |
| 16.5 | 16.498 520 | -0.009 0 | 16.524 200 | 0.15 |
| 18.5 | 18.500 730 | 0.004 0 | 18.524 430 | 0.13 |

5 结 论

以大庆井下原油作为研究对象,采用近红外光谱分析技术研究了原油组分检测方法。根据测试需求设计了原油组分近红外光谱检测系统,利用波长校准光源对检测系统进行了标准化后对全部 39 个组分的原油样品进行检测,采用移动窗口平滑法和 Savitzky-Golay 卷积平滑法分别进行了光谱预处理,分别对 PLS 和 SVR 两种分析方法预处理后的原油样品近红外光谱进行建模。研究结果表明 PLS 方法建立的模型效果更好。近红外光谱技术对配制的不同比例的井下原油模拟测试样品进行测试建模和分析为井下原油现场组份检测提

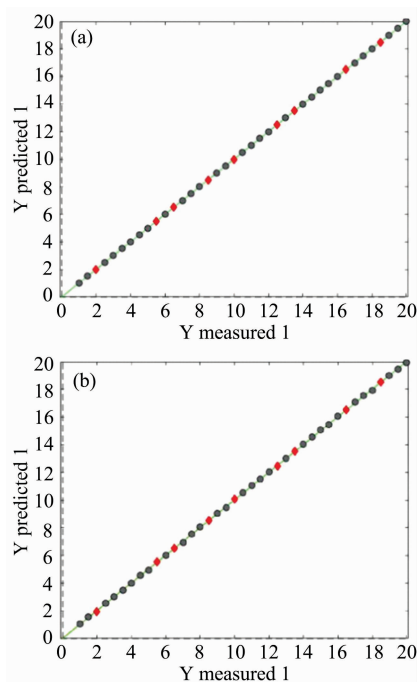


图 7 算法预测模型拟合结果

(a): PLS 分析预测模型拟合结果;
(b): SVR 分析预测模型拟合结果

Fig. 7 Algorithm prediction model fitting results

(a): PLS; (b): SVR

供了一种新的思路,为开发油田现场实时原油检测分析装备提供技术支撑。

References

- [1] CAIA(中国分析测试协会). Review of the Development of Science and Technology Award of CAIA(中国分析测试协会科学技术奖发展回顾). Beijing: Beijing Science and Technology Press(北京:北京科学技术出版社), 2015. 1.
- [2] CHU Xiao-li, TIAN Song-bo, XU Yu-peng, et al(褚小立,田松柏,许育鹏,等). Petroleum Processing and Petrochemicals(石油炼制与化工), 2012, 43(1): 72.
- [3] CHEN Pu, LI Jing-yan, CHU Xiao-li(陈 瀑,李敬岩,褚小立). Petroleum Processing and Petrochemicals(石油炼制与化工), 2016, 47(10): 98.
- [4] Lucas Marcos A, Borges Gustavo R, da Rocha Inaura C C, et al. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 118: 140.
- [5] CHEN Pu, SUN Jian, ZHANG Feng-hua, et al(陈 瀑,孙 健,张风华,等). Petroleum Processing and Petrochemicals(石油炼制与化工), 2014, 45(8): 97.
- [6] Rohit Sharma, Vikas Mahto, Hari Vuthaluru. Fuel, 2019, 235(1): 1245.
- [7] Amir Bagheri Garmarudi, Mohammadreza Khanmohammadi. Fuel, 2019, 236(2): 1093.
- [8] Sameer Mhatre, Sébastien Simon, Johan Sjöblom, et al. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 134(6): 117.
- [9] Siller de Oliveira Honse, Khalil Kashafi, Rafael Mengotti Charin, et al. Colloides and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 538(2): 565.
- [10] Rosa Elvira Correa Pabón, Carlos Roberto de Souza Filho. Fuel, 2019, 237(3): 1119.
- [11] LIN Nan(李 娜). Modern Industrial Economy and Informationization(现代工业经济和信息化), 2016, 6(19): 40.
- [12] LI Jing-yan, CHU Xiao-li, TIAN Song-bai(李敬岩,褚小立,田松柏). Acta Petrolei Sinica(石油学报), 2012, 28(3): 476.
- [13] Azam Maleki-Ghahfarokhi, Iman Dianat, Hossein Feizi. Applied Ergonomics, 2019, 79(9): 9.
- [14] Yuktshwar Baranwal, Andrés D Román-Ospino, Golshid Keyvan, et al. International Journal of Pharmaceutics, 2019, 565(6): 419.

Detection and Analysis of Water Content of Crude Oil by Near Infrared Spectroscopy

LIU Hong-ming^{1,2}, LIU Yu-juan^{1*}, ZHONG Zhi-cheng¹, SONG Ying^{1*}, LI Zhe¹, XU Yang¹

1. Key Laboratory of Geophysical Exploration Equipment, Ministry of Education, College of Instrumentation & Electrical Engineering, National Geophysical Exploration Equipment Engineering Research Center, Jilin University, Changchun 130012, China
2. Tonghua Normal University, Tonghua 134000, China

Abstract As an important strategic resource, petroleum has an important significance in real-time analysis and detection of its components in the petrochemical industry. With the continuous development of petroleum resources, in the production process of long-term oil wells and before the exploitation of new oil wells, it is necessary to analyze and test the components of underground crude oil to determine the necessity of mining. Real-time detection of crude oil components plays a key role in the process of crude oil exploitation, production, storage, transportation and sales. In view of the low accuracy and low efficiency of traditional detection methods, near-infrared spectroscopy, which has been widely and effectively applied in the field of measurement, has been introduced into the research methods of crude oil components detection technology in recent years. In this paper, the underground crude oil was used as the research object, and the experimental samples of 39 components with crude oil ratio of 1%~20% were prepared by using the purified crude oil and water obtained from Daqing Oilfield to simulate the underground crude oil. In this paper, the basic principle of the measurement of crude oil components by near-infrared spectroscopy is studied. The near-infrared spectroscopy data measurement system of crude oil samples is integrated with the halogen source and supporting components by SW2520 near-infrared spectroscopy, and 39 groups are collected by this measurement after system standardization testing. Moving window smoothing Savitzky-Golay convolution smoothing and Savitzky-Golay convolution derivation method of near infrared spectrum data of crude oil near infrared spectral data is used to remove noise, two analysis methods of near-infrared spectra of crude sample partial least squares and support vector machine (SVM) regression method are used for retreatment modeling, crude oil component analysis prediction model is established respectively. The results show that the RMS predicted by partial least square method is 0.003 755 14, and the coefficient of determination R^2 was 0.999 999. The prediction effect is very good. In this study, the near infrared spectroscopy (NIRS) technology is used to test and analyze the simulated test samples with different proportions, which provides a new idea for the detection of the components of the downhole crude oil. This method effectively solves the detection problem of the water content of the crude oil and provides technical support for the development of the real-time crude oil detection and analysis equipment in the field.

Keywords Crude oil; Near infrared spectrum; Pretreatment; Partial least squares

(Received Dec. 18, 2019; accepted Apr. 22, 2020)

* Corresponding authors