

引文:宋进舟,沈亮,郭祎,等.成品油管道顺序输送甲醇混油界面在线检测系统及应用[J].油气储运,2025,44(9):1012-1020.

SONG Jinzhou, SHEN Liang, GUO Yi, et al. Online detection system and its application for mixed-oil interfaces in batch transportation of methanol via refined oil pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(9): 1012-1020.

成品油管道顺序输送甲醇混油界面在线检测系统及应用

宋进舟¹ 沈亮¹ 郭祎¹ 丁小勇¹ 孙辉² 蔡求是³ 邱姝娟² 宋春风³

1. 国家管网集团油气调控中心; 2. 国家管网集团联合管道有限责任公司西部分公司·新疆多介质管道安全输送重点实验室; 3. 北京化工大学材料科学与工程学院

摘要:【目的】准确检测成品油管道顺序输送多种介质(汽油、柴油、甲醇等)混油界面的质量指标与混油浓度对分辨混油界面、确定混油切割点、实现管道高精度与智能化运行异常重要,但是目前行业内还未出现能同时检测管输混油质量指标与混油浓度的在线检测系统。【方法】基于国产傅里叶变换近红外光谱仪器,设计了可直接采集高压管输成品油、甲醇等介质近红外光谱的在线检测系统。在乌兰成品油管道兰州末站进站端收集了不同炼厂不同批次的 0[#] 柴油、92[#] 汽油样品,配制了柴油-汽油混油样品、甲醇-柴油混油样品、甲醇-汽油混油样品,并采集了样品的近红外光谱,测量了 0[#] 柴油及柴汽混油、92[#] 汽油及汽柴混油的关键质量指标(柴油闪点、汽油终馏点)作为参考值,再利用化学计量学多元校正方法建立了 0[#] 柴油、92[#] 汽油及其混油的关键质量指标近红外光谱定标数据库,汽柴混油浓度定标数据库、甲醇成品油混油浓度定标数据库。在线检测系统在乌兰成品油管道兰州末站进站端完成了汽柴及其混油的在线验证。【结果】该在线检测系统对 0[#] 柴油闪点、92[#] 汽油终馏点、柴汽混油闪点的近红外预测值与参考值的均方根误差分别为 2.3 °C、2.4 °C、2.8 °C,满足标准方法再现性误差要求。汽柴混油样品中汽油体积分数近红外预测值与参考值的绝对误差不大于 0.6%。甲醇分别与柴油、汽油的混油中甲醇体积分数近红外预测值与参考值的绝对误差均不大于 0.6%。【结论】利用所设计的近红外光谱在线检测系统成功地攻克了无法同时检测混油关键质量指标与混油浓度的技术难题,对管道顺序输送成品油、甲醇,精准监测其混油界面,实现生产过程智能化具有重要意义。(图 4,表 4,参 28)

关键词: 甲醇; 顺序输送; 闪点; 终馏点; 混油浓度; 近红外光谱; 在线检测

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)09-1012-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.09.006

Online detection system and its application for mixed-oil interfaces in batch transportation of methanol via refined oil pipelines

SONG Jinzhou¹, SHEN Liang¹, GUO Yi¹, DING Xiaoyong¹, SUN Hui², CAI Qiushi³, QIU Shujuan², SONG Chunfeng³

1. PipeChina Oil & Gas Control Center; 2. PipeChina United Pipeline Western Branch Co., Ltd./Xinjiang Key Laboratory for Transportation Safety of Multi-Medium Pipelines; 3. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology

Abstract: [Objective] Accurate detection of quality indicators and mixed oil concentration at the mixed oil interface during the batch transportation of various media (gasoline, diesel, methanol, etc.) in refined oil pipelines is essential for identifying the mixed oil interface, determining the mixed oil cutting point, and facilitating high-precision, intelligent pipeline operations. Currently, no online detection system in the industry can simultaneously detect both quality indicators and mixed oil concentration for pipeline transportation. [Methods] Using a domestic Fourier transform near-infrared spectrometer, an online detection system was designed to directly collect near-infrared spectra of media transported in high-pressure pipelines, such as refined oil and methanol. At the inlet of the Lanzhou Terminal of the Urumqi-Lanzhou Refined Oil Pipeline, samples of 0[#] diesel and 92[#] gasoline from different refineries and batches were collected. Mixed-oil samples of diesel-gasoline, methanol-diesel, and methanol-gasoline were then prepared, and their near-infrared spectra were acquired. Key quality indicators (flash point of diesel and final boiling point of gasoline) were measured for 0[#] diesel, diesel-gasoline mixed oil, 92[#] gasoline, and gasoline-diesel mixed oil as reference values. Chemometric multivariate calibration methods were then employed to establish near-infrared spectral

calibration databases for the key quality indicators of 0[#] diesel, 92[#] gasoline, and their mixed oils, as well as for the concentration of gasoline-diesel and methanol-refined oil mixed oils. The online detection system was verified online for gasoline, diesel, and their mixed oils at the inlet of the Lanzhou Terminal of Urumqi-Lanzhou Refined Oil Pipeline. **[Results]** The root-mean-square errors between the near-infrared predicted values and the reference values for the flash point of 0[#] diesel, the final boiling point of 92[#] gasoline, and the flash point of diesel-gasoline mixed oil were 2.3 °C, 2.4 °C, and 2.8 °C, respectively, meeting the error requirements for the reproducibility of standard methods. The absolute error between the near-infrared predicted value and the reference value for the gasoline volume fraction in gasoline-diesel mixed oil samples did not exceed 0.6%, while the absolute errors for the methanol volume fraction in methanol-diesel and methanol-gasoline mixed oils were also within 0.6%. **[Conclusion]** The online near-infrared spectral detection system effectively addresses the technical challenge of simultaneously detecting key quality indicators and the concentration of mixed oil. This capability is crucial for accurately monitoring the batch transportation of refined oil and methanol, as well as interfaces of their mixed oils, thereby enhancing production process intelligence. (4 Figures, 4 Tables, 28 References)

Key words: methanol, batch transportation, flash point, final boiling point, mixed oil concentration, near-infrared spectrum, online detection

成品油管道顺序输送不同油品过程中, 不同油品相邻界面处形成的混油段会造成油品质量指标(柴油闪点、汽油终馏点等)的改变, 影响油品质量^[1-8]。目前顺序输送柴油与汽油时, 在接收成品油的末站, 一般对顺序输送汽油-柴油或柴油-汽油界面处的混油段进行切割后再加工或掺混处理, 以降低输送过程产生的质量损失, 因此, 混油段的切割操作关乎油品质量损失程度。同时, 混油段混油量也与输送的距离密切相关, 输送距离不同造成的质量损失也不同。在线检测管道油品界面、实现混油段精准切割对于确保油品质量安全、实现输送油品质量指标数字化、促进成品油管网建设智能化具有重要意义^[9-13]。

管输柴油与汽油交接的质量指标有多项, 其中最受关注且易产生质量衰减的质量指标是柴油闪点与汽油终馏点^[14-15]。目前成品油管道油品在线检测主要依赖在线密度计、在线光学界面检测仪、超声波界面检测仪、记号型界面检测系统等仪器, 通过在线检测油品的密度值、光波在不同油品中的反射或折射率、超声波在不同密度油品中的传播速度等原理反映混油界面随时间的变化趋势^[16-20]。目前, 中国长输管道的柴油-汽油混油界面在线检测手段主要采用直管振动式密度计, 但其在检测密度差异小的油品时误差较大。上述仪表可以检测混油界面的变化, 但是并不能提供油品各种关键质量指标数据, 因此, 管道成品油质量指标检测目前仍然依靠站上取样送化验室人工检测的离线检测方式。受时间、成本等因素限制, 人工离线检测方式通常每天间隔一段时间进行, 且只对最受关注、容易产生质量衰减的少数质量指标进行检测, 取样、

检测时间均较长, 因此不能满足生产运行对油品质量监测、智能化管网对管道输送成品油质量指标数字化的需求。

近红外吸收光谱可从分子水平上反映物质的组成与结构信息, 包含 C—H、N—H、O—H 等含氢基团合频与倍频的分子振动信息, 非常适合烃类物质性质检测。近红外光谱结合化学计量学多元校正方法, 可同时测定油品多种性质, 具有无损、快速等优点, 已广泛应用于炼厂原油蒸馏、催化裂化、催化重整、油品调和、蒸汽裂解等大型石化工业装置的在线检测, 可检测汽油中烯烃、芳烃、苯及氧化物的含量, 同时检测油品辛烷值、馏程、蒸气压等质量参数, 取得了显著经济效益与社会效益^[21-26]。将近红外光谱应用于输油管道, 可在线检测输送油品的各项关键质量指标与混油浓度, 为监测管道油品质量、混油切割提供质量指标与混油浓度数据参考, 但却面临比炼厂更为复杂的工况条件, 如管道输送压力高、流速快、不同厂家输送油品组成变动较大等, 这些对近红外光谱采集与建模技术均提出了较高要求。

针对管道工况特点, 应用管道高压光谱采集技术, 设计开发了一种可直接采集高压管道输送成品油、甲醇等多种介质近红外光谱的在线检测系统, 结合化学计量学多元校正方法, 建立了汽油与柴油关键质量指标定标数据库、混油浓度定标数据库, 在乌兰成品油管道兰州末站对所研发在线检测系统性能进行了验证, 并进行了甲醇成品油混油甲醇浓度定量可行性研究, 以为管道顺序输送甲醇、成品油的混油界面在线检测提供技术支撑。

1 近红外光谱在线检测系统

1.1 系统组成

近红外光谱在线检测系统(图 1)主要由近红外光谱仪、在线分析软件、定标数据库、高压检测池、光纤、取样与回样管道、主机等部分组成。其中,近红外光谱仪采用国产傅里叶变换光谱仪,波数范围 $4\,000\sim 10\,000\text{ cm}^{-1}$,分辨率优于 2 cm^{-1} 。近红外光谱在线检测系统安装在输油管道附近,取样与回样管道均与成品油主管道链接。成品油管道输送的油品通过取样与回样管道流经高压检测池,近红外光谱仪通过光纤照射检测池内油品,在线采集其近红外光谱,并将光谱数据传输至在线主机。在线分析软件依据已建立的定标数据库,使用采集的光谱数据计算成品油关键质量指标(柴油闪点、汽油终馏点)与混油浓度,并通过在线分析软件显示计算结果,且同步上传至站控系统。该系统约每 30 s 输出一次计算结果,另外,在线分析软件还具有建库样品离线光谱采集、异常样品报警等功能。在线分析软件中的定标数据库利用自行研制的定标软件建立。

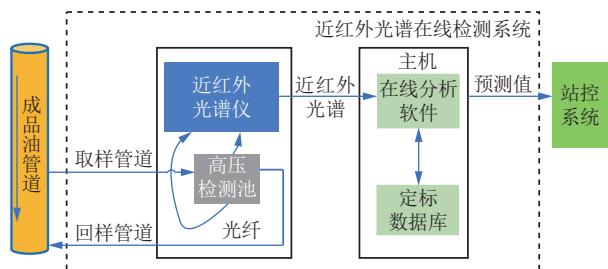


图 1 近红外光谱在线检测系统组成图
Fig. 1 Composition diagram of the online near-infrared spectral detection system

1.2 检测原理

近红外光谱在线检测系统所采用的近红外光谱定量分析遵从朗伯比尔定律,其表达式为:

$$A = \varepsilon lc \quad (1)$$

式中: A 为样品中某组分的吸光度; ε 为样品中某组分的摩尔吸收系数, $\text{L}/(\text{mol}\cdot\text{cm})$; l 为光程长度, cm ; c 为样品中某组分浓度, mol/L 。

近红外光谱分析多组分复杂体系通常采用化学计量学中的多元校正方法,即利用一组样品的一个以上波长或频率的吸光度建立样品光谱与样品中某组分浓度之间的定量关系(校正模型或定标数据库)。样品性质与组成有关,样品组成发生变化,其性质也会发生

变化,样品性质与其光谱之间也存在着定量关系。利用多元校正方法建立性质与其光谱之间的定量关系即可获取未知样品性质值。

近红外光谱在线检测系统采用拟合方法建立油品性质定标数据库^[27]。首先,收集一组样品作为定标样品,利用近红外在线检测系统采集样品光谱,利用国家标准方法(或其他标准方法)测量样品的性质值作为参考值,建立一个包含样品光谱及其性质数据的数据库,样品特性需覆盖待测样品性质的正常变化范围。利用数据库中样品光谱拟合未知样品的光谱((式 2)),然后将数据库中各个样品的性质值与对其所对应的拟合系数相乘后进行加和,即可得到未知样品的性质值。该方法避免了利用传统偏最小二乘法(Partial Least Squares, PLS)建模时遇到超出建模样品集范围的样品需要重复建模,以及某些区域内样品较少或分布不合理造成预测偏差较大的问题。未知样品的近红外光谱拟合表达式为:

$$x = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i + \dots + a_nx_n + \beta \quad (2)$$

式中: x 为未知样品的光谱; x_i 为数据库中第 i 个样品的光谱; a_i 为第 i 个样品光谱的拟合系数; β 为残差项。

近红外光谱在线检测系统利用投影方法建立混油浓度定标数据库^[28]。首先建立管输纯介质(纯汽油、纯柴油、纯甲醇)的光谱数据库,再利用投影算法提取混油中纯油或甲醇光谱分量,然后采用光谱分量计算纯油或甲醇浓度。该方法避免了使用 PLS、人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)等方法建立校正模型需要配制大量混油样品以覆盖不同厂家、不同批次样品的问题,减少了定标工作量。

1.3 系统特点

炼厂使用的近红外在线分析技术通常在样品常压、恒温条件下采集光谱,且采用 PLS 方法建立模型。若将此在线分析技术应用于高压管输油品定量分析会出现以下问题:①需对油品进行减压恒温处理,减压产生的气泡会影响光谱的测量精度,而且减压阀易存在堵塞问题;②管道输送成品油流速高,恒温过程会延长样品在取样管道中的停留时间(温度交换需要时间),造成一定程度的检测时间滞后;③检测池光程小于 3 cm ,传统检测池密封设计使检测池光程易在高压下发生变动,且高雷诺数流体流经时易产生振动从而影响光谱采集精度;④油品来源广,同时管道顺序输送产生混油使得油品组成、性质变化较炼厂大,难以建立稳健

的混油浓度校正模型。为此, 研制了可耐压 20 MPa 的高压检测池(图 1), 结合取样与回样管道工艺设计、温度差异校正算法, 油品可不经减压与恒温, 由取样回样管路直接流经检测池进行测量, 测量完可直接回主管道。

该系统设计具有诸多优点: ①避免了高压管道应用减压操作产生气泡影响光谱精度以及高压管道设置减压阀有可能导致的堵塞问题; ②样品前处理过程简单, 运行过程不需气、水等现场条件, 可直接回流到主管道, 不需设置储废罐, 安全隐患少, 维护方便; ③样品不需恒温处理, 减少了样品处理时间, 系统约每 30 s 可输出一次计算结果, 实现了管道输送油品的即时快速测定; ④通过建立成品油、甲醇质量指标和混油浓度定标数据库, 一套近红外在线检测系统即可实现管道顺序输送的多种介质质量指标与混油浓度同时检测。

2 定标数据库建立

2.1 样品收集

在乌兰成品油管道兰州末站进站端收集了纯 0[#] 柴油、纯 92[#] 汽油作为定标样品, 并用其配制混油样品作为定标混油样品, 其中 92[#] 汽油含 0[#] 柴油混油(简称汽柴混油)样品中柴油体积分数范围为 0.1%~2.0%, 0[#] 柴油含 92[#] 汽油混油(简称柴汽混油)样品中汽油体积分数范围为 0.1%~3.0%。采用 GB/T 261—2008《闪点的测定 宾斯基-马丁闭口杯法》、GB/T 6536—2010《石油产品常压蒸馏特性测定法》分别测定样品的闪点、终馏点, 从而得到柴油闪点、汽油终馏点定标样品性质分布情况(表 1)。

表 1 柴油闪点、汽油终馏点定标样品性质分布表
Table 1 Distribution of calibration sample properties for flash point of diesel and final boiling point of gasoline

样品 种类	样品 数量	闪点/℃				终馏点/℃			
		最小 值	最大 值	平均 值	标准 偏差	最小 值	最大 值	平均 值	标准 偏差
0 [#] 柴油	221	56.0	77.0	68.7	4.0	—	—	—	—
柴汽 混油	66	39.5	72.5	55.7	9.3	—	—	—	—
92 [#] 汽油	94	—	—	—	—	185	204	195	4
汽柴 混油	186	—	—	—	—	190	252	221	18

配制体积分数在 0.1%~99.9% 范围的混油样品验证混油浓度定标数据库。以配制样品的某一组分体

积分数作为混油浓度参考值, 配制所用的成品油为 0[#] 柴油与 92[#] 汽油, 甲醇为分析纯试剂。其中, 所配制的汽柴混油中的汽油体积分数范围为 0.1%~5.0%、90.0%~99.9%, 甲醇-柴油混油中的甲醇体积分数范围为 0.1%~0.5%、95.0~99.2%, 甲醇-汽油混油中的甲醇体积分数范围为 1.0%~8.0%、40.0%~60.5% 及 98.0%~99.5%。

2.2 定标样品光谱采集

使用所设计的近红外光谱在线检测系统, 通过离线方式采集定标样品、不同混油浓度验证样品的光谱。首先将样品利用注样装置手动注入高压检测池, 然后采集光谱。对每个样品重复注入并采集光谱 3 次, 将获得的 3 张光谱的平均值作为定标光谱。

通过在线方式采集管道输送过程中油品的光谱。油品在管道输送过程中通过取样管道流经高压检测池时, 实时采集高压检测池内的样品光谱, 每 15 s 获得一张在线光谱用于预测油品性质与混油浓度。

2.3 定标数据库建立与评价

采用自行研制的定标软件, 建立柴油闪点、汽油终馏点及混油比例定标数据库。利用在线分析软件获得在线光谱的质量指标近和混油浓度红外预测值, 利用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)评价定标模型预测能力^[27]。

3 定标结果

3.1 成品油质量指标

利用 0[#] 柴油定标样品、柴汽混油定标混油样品分别建立 0[#] 柴油闪点定标数据库、柴汽混油闪点定标数据库, 其 RMSE 分别为 1.7 °C、3.4 °C。分别将纯油与混油闪点定标数据库中定标样品采用 GB/T 261—2008 方法测量的参考值与近红外预测值进行线性拟合, 即可获得 0[#] 柴油定标样品、柴汽混油定标混油样品闪点参考值与近红外预测值关系(图 2a、图 2b)。利用 92[#] 汽油定标样品、汽柴混油定标混油样品分别建立 92[#] 汽油终馏点定标数据库、汽柴混油终馏点定标数据库, 其 RMSE 分别为 2.0 °C、2.5 °C。分别将纯油与混油终馏点定标数据库中定标样品采用 GB/T 6536—2010 方法测量的参考值与近红外预测值进行线性拟合, 即可获得 92[#] 汽油定标样品、汽柴混油定标混油样品终馏点参考值与近红外预测值关系(图 2c、图 2d)。

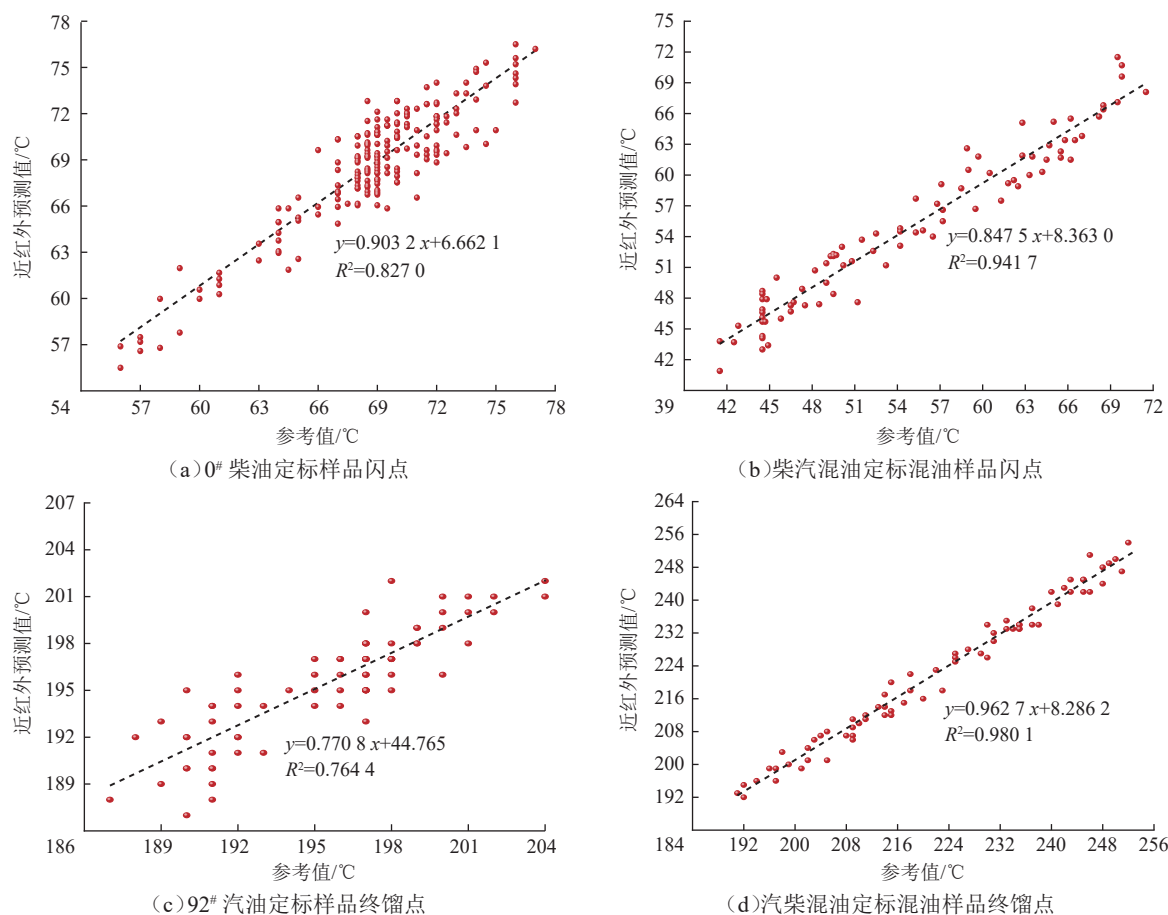


图 2 0# 柴油、92# 汽油定标样品、柴汽混油、汽柴混油定标混油样品性质参考值与近红外预测值关系图
Fig. 2 Reference values vs. near-infrared predicted values for properties of calibration samples of 0# diesel, 92# gasoline, diesel-gasoline mixed oil, and gasoline-diesel mixed oil

可见, 闪点、终馏点的 RSME 值分别小于 GB/T 261—2008 方法、GB/T 6536—2010 方法的再现性误差限值。其中, GB/T 261—2008 方法闪点再现性误差限值为 $0.071X$ (X 为同一样品两个独立试验结果的平均值), $39.5\sim 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内为 $2.8\sim 5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; GB/T 6536—2010 方法终馏点再现性误差限值为 $7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为了对闪点、终馏点定标数据库进行在线验证, 2023 年 11 月至 2025 年 3 月在乌兰成品油管道兰州末站输送柴油、汽油的过程中, 将取样测量的真实值作为参考值, 并与近红外预测值进行比对(图 3)。可见, 0# 柴油闪点近红外预测值与参考值的绝对误差不大于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其 RMSE 为 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 92# 汽油终馏点近红外预测值与参考值的绝对误差不大于 $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其 RMSE 为 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; 柴汽混油段样品中柴油闪点近红外预测值与参考值的绝对误差不大于 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其 RMSE 为 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外, 还对近红外预测值与参考值进行了 t 检验, 结果表明, 在 95% 置信度水平下, 上述性质的近红外预测值与参考值均具有一致性。

3.2 混油浓度

将所配制的 9 组汽柴混油样品(汽油体积分数分别为 0.1% 、 0.5% 、 1.0% 、 5.0% 、 90.0% 、 95.0% 、 99.0% 、 99.5% 、 99.9%)、10 组甲醇-柴油混油样品(甲醇体积分数分别为 0.1% 、 0.3% 、 0.4% 、 0.5% 、 97.0% 、 97.5% 、 98.0% 、 98.5% 、 99.0% 、 99.2%)、9 组甲醇-汽油混油样品(甲醇体积分数分别为 0.1% 、 5.0% 、 8.0% 、 40.3% 、 50.0% 、 60.5% 、 98.0% 、 99.0% 、 99.5%)采用所设计的在线检测系统分别进行汽油体积分数、甲醇体积分数、甲醇体积分数近红外检测(表 2~表 4)。可见, 汽柴混油样品的汽油体积分数近红外预测值与参考值的绝对误差不大于 0.6% , RMSE 为 0.3% ; 甲醇-柴油混油样品、甲醇-汽油混油样品的甲醇体积分数近红外预测值与参考值的绝对误差均不大于 0.6% , RMSE 分别为 0.3% 、 0.4% 。

此外, 采用所设计的在线检测系统对某日汽柴混油段的汽油体积分数变化趋势进行在线检测, 即可得到 92# 汽油推 0# 柴油混油段汽油体积分数变化趋势近

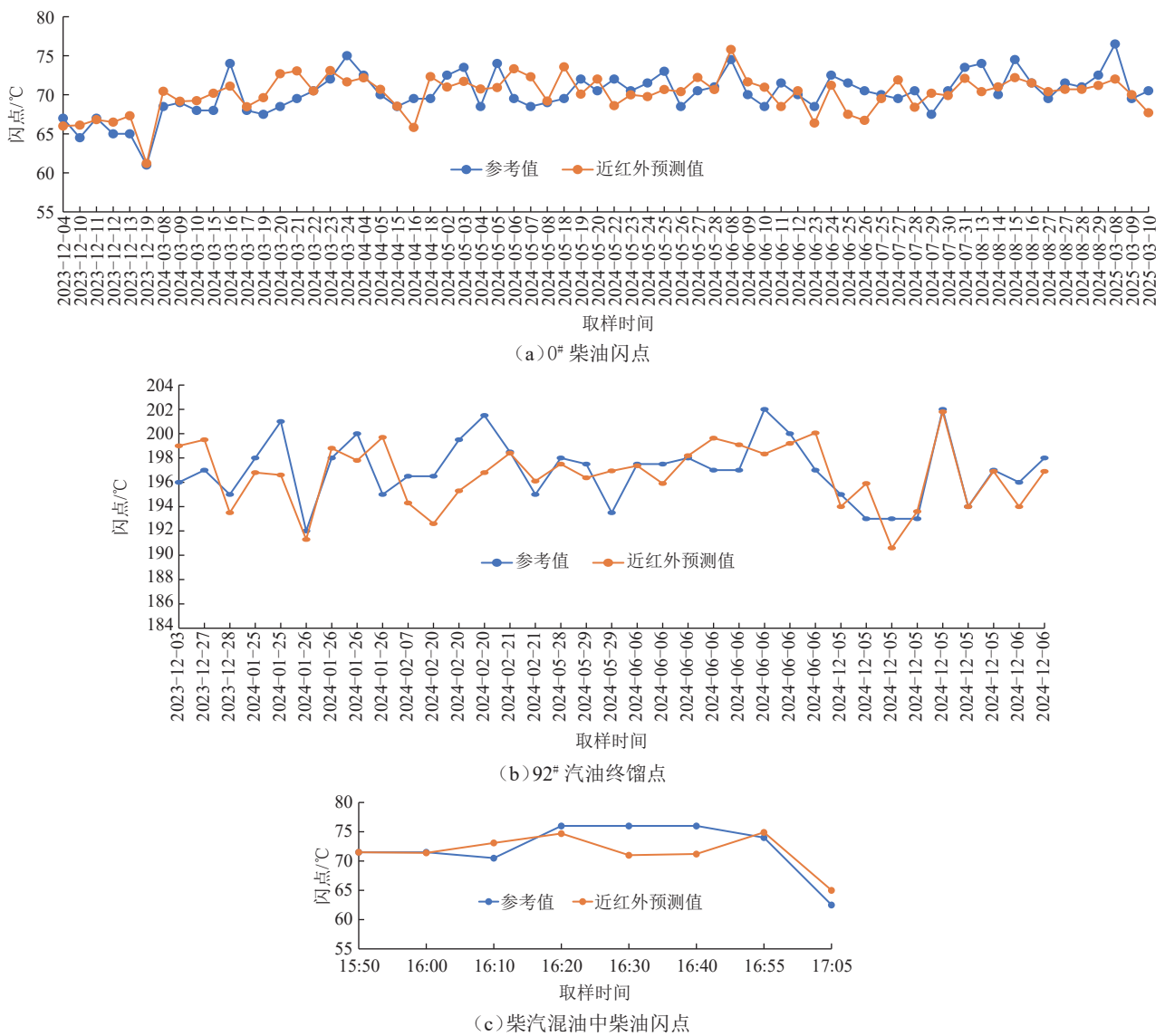


图 3 乌兰成品油管道兰州末站顺序输送柴油-汽油油品质量指标近红外预测值与参考值对比图
Fig. 3 Comparison of near-infrared predicted values and reference values of oil quality indicators for diesel-gasoline batch transportation at the Lanzhou Terminal of the Urumqi-Lanzhou Refined Oil Pipeline

表 2 9 组汽柴混油样品的汽油体积分数近红外检测结果表

Table 2 Near-infrared detection results of gasoline volume fraction for 9 groups of gasoline-diesel mixed oil samples

样品序号	参考值	近红外预测值	绝对误差
1	0.1%	0.7%	0.6%
2	0.5%	0.1%	0.4%
3	1.0%	0.8%	0.2%
4	5.0%	5.2%	0.2%
5	90.0%	90.5%	0.5%
6	95.0%	94.9%	0.1%
7	99.0%	98.8%	0.2%
8	99.5%	99.3%	0.2%
9	99.9%	99.9%	0

表 3 10 组甲醇-柴油混油样品的甲醇体积分数近红外检测结果表

Table 3 Near-infrared detection results of methanol volume fraction for 10 groups of methanol-diesel mixed oil samples

样品序号	参考值	近红外预测值	绝对误差
1	0.1%	0.1%	0
2	0.3%	0.4%	0.1%
3	0.4%	0.3%	0.1%
4	0.5%	0.4%	0.1%
5	97.0%	97.2%	0.2%
6	97.5%	98.1%	0.6%
7	98.0%	97.7%	0.3%
8	98.5%	98.3%	0.2%
9	99.0%	99.2%	0.2%
10	99.2%	98.9%	0.3%

表 4 9 组甲醇-汽油混油样品的甲醇体积分数近红外检测结果表

Table 4 Near-infrared detection results of methanol volume fraction for 9 groups of methanol-gasoline mixed oil samples

样品序号	参考值	近红外预测值	绝对误差
1	1.0%	0.8%	0.2%
2	5.0%	5.1%	0.1%
3	8.0%	7.9%	0.1%
4	40.3%	40.0%	0.3%
5	50.0%	50.5%	0.5%
6	60.5%	60.0%	0.5%
7	98.0%	98.4%	0.4%
8	99.0%	98.4%	0.6%
9	99.5%	99.4%	0.1%

红外光谱在线检测图(图 4)。可见,随着后行油品汽油的加入,混油中的汽油体积分数逐渐增大,浓度变化趋势呈现 S 曲线形状,根据汽油体积分数的变化趋势即可进行纯油与混油界面的判断。

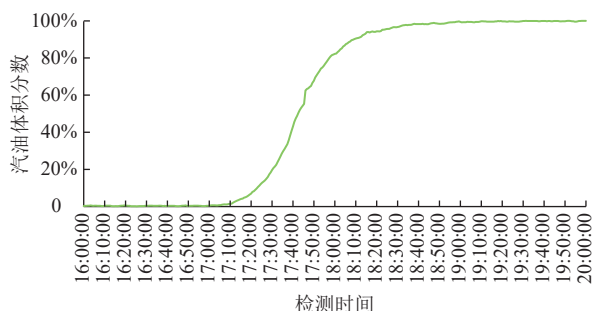


图 4 92# 汽油推 0# 柴油混油段汽油体积分数变化趋势近红外光谱在线检测图

Fig. 4 Online near-infrared spectral detection diagram of gasoline volume fraction change trend in the mixed oil section when sending 0# diesel followed by 92# gasoline

4 结论

设计了一种可同时检测成品油管道顺序输送多种介质质量指标和混油浓度的近红外光谱在线检测系统,建立了管道输送油品质量指标定标数据库与混油浓度定标数据库,验证了系统的在线检测能力,得到如下结论:

1)柴油闪点的近红外预测 RMSE 值小于 GB/T 261—2008 方法再现性标准误差限值,汽油终馏点的近红外预测 RMSE 值小于 GB/T 6536—2010 方法再现性标准误差限值,说明近红外光谱在线检测系统能够较好地在线检测成品油及其混油的闪点、终馏点等质量指标。

2)建立的混油浓度定标数据库可较准确预测汽油-柴油混油中的汽油浓度及甲醇-柴油混油、甲醇-汽油混油中的甲醇浓度,应用在线检测混油浓度可判断纯介质、混合介质的界面。

3)该在线检测系统具有检测速度快、适应高压管道、维护简单方便、检测数据实时上传等特点,能够满足压力管道油品性质的在线检测需求,且该系统的相关技术已实现国产化,对管道生产调控、促进智能化成品油管网建设具有重要战略意义。

4)该在线检测系统基于近红外光谱定标技术对管道输送介质性质进行检测,具有强大的应用拓展能力,可根据质量控制需求进行应用拓展。未来将建立甲醇、甲醇-汽油混油、甲醇-柴油混油关键质量指标定标数据库,在线检测管道输送甲醇、甲醇-成品油混油的关键质量指标及甲醇-成品油混油中的甲醇浓度,以期利用质量指标指导混油切割,提升成品油管道顺序输送增输甲醇的混油质量管理水平。

参考文献:

- [1] 左志恒, 蔡其星, 汪涛, 冯雷涛, 姚杰. 成品油批次输送跟踪系统的设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(5): 104–108. DOI: [10.19557/j.cnki.1001-9944.2021.05.022](https://doi.org/10.19557/j.cnki.1001-9944.2021.05.022).
- [2] ZUO Z H, CAI Q X, WANG T, FENG L T, YAO J. Design and implementation of product oil batch transportation tracking system[J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(5): 104–108.
- [3] WANG S S, ZUO L Y, LI M, WANG Q, XUE X Z, LIU Q C, et al. The data-driven modeling of pressure loss in multi-batch refined oil pipelines with drag reducer using long short-term memory (LSTM) network[J]. Energies, 2021, 14(18): 5871. DOI: [10.3390/en14185871](https://doi.org/10.3390/en14185871).
- [4] 刘倩, 雷斌, 辛世豪, 杨鹤. 含减阻剂的管输成品油质量控制综合监测方法[J]. 油气储运, 2024, 43(4): 464–472. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.012](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.012).
- [5] LIU Q, LEI B, XIN S H, YANG H. A comprehensive monitoring approach for quality control of product oil containing drag reducing agent during pipeline transmission[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(4): 464–472.
- [6] YUAN Z Y, CHEN L, LIU G, SHAO W M, ZHANG Y H, YANG W. Physics-based Bayesian linear regression model for predicting length of mixed oil[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 223: 211466. DOI: [10.1016/j.geoen.2023.211466](https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211466).

- [5] CHEN L, YUAN Z Y, XU J X, GAO J Y, ZHANG Y H, LIU G. A novel predictive model of mixed oil length of products pipeline driven by traditional model and data[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 205: 108787. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.108787](#).
- [6] YUAN Z Y, CHEN L, LIU G, SHAO W M, ZHANG Y H, MA Y X. Physics-informed Student's t mixture regression model applied to predict mixed oil length[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2023, 3(1): 100105. DOI: [10.1016/j.jpse.2022.100105](#).
- [7] 武士坤. 管道输送全过程油品质量风险管理研究: 以 DL 管道项目为例[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- WU S K. Research on quality risk management of the whole process of pipeline oil products: Taking DL pipeline project as an example[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [8] YUAN Z Y, CHEN L, SHAO W M, ZUO Z H, ZHANG W, LIU G. A robust hybrid predictive model of mixed oil length with deep integration of mechanism and data[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2021, 1(4): 459–467. DOI: [10.1016/j.jpse.2021.12.002](#).
- [9] 张来斌, 王金江. 油气生产智能安全运维: 内涵及关键技术[J]. *天然气工业*, 2023, 43(2): 15–23. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2023.02.002](#).
- ZHANG L B, WANG J J. Intelligent safe operation and maintenance of oil and gas production systems: connotation and key technologies[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(2): 15–23.
- [10] 湛立宁, 卢俊文, 张玉军, 陈以龙, 周璐璐, 陈敏. 埋地油气管道外防腐层智能化检测技术研究[J]. *石油机械*, 2023, 51(2): 144–150. DOI: [10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2023.02.020](#).
- ZHAN L N, LU J W, ZHANG Y J, CHEN Y L, ZHOU L L, CHEN M. Research on intelligent inspection technology of external anticorrosive coating of buried oil and gas pipelines[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(2): 144–150.
- [11] 贺会群, 张行, 巴莎, 于楠, 张慧筠, 王逸达, 等. 我国油气工程技术装备智能化和智能制造的探索与实践[J]. *石油机械*, 2024, 52(6): 1–11. DOI: [10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.06.001](#).
- HE H Q, ZHANG H, BA S, YU N, ZHANG H Y, WANG Y D, et al. Exploration and practice of intelligence and intelligent manufacturing of oil and gas engineering equipment in China[J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(6): 1–11.
- [12] 崔广伟. 基于大数据分析的计量仪表智能报警系统设计研究[J]. *石油工业技术监督*, 2024, 40(6): 32–37. DOI: [10.20029/j.issn.1004-1346.2024.06.007](#).
- CUI G W. Research on the design of intelligent alarm system for measuring instruments based on big data analysis[J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2024, 40(6): 32–37.
- [13] LI Z B, LIANG Y T, LIAO Q, ZHANG B, ZHANG H R. A review of multiproduct pipeline scheduling: from bibliometric analysis to research framework and future research directions[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2021, 1(4): 395–406. DOI: [10.1016/j.jpse.2021.08.001](#).
- [14] HAMIDI V, HAJIDAVALLOO E, BEHBEHANI-NEJAD M. Numerical simulation of mixing between sequential fluids in a pipeline considering real conditions[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2023, 46(4): 644–653. DOI: [10.1002/ceat.202200100](#).
- [15] 何国玺, 覃敏, 廖柯熹. 顺序输送成品油质量指标值衰减规律研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(30): 1–8. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2019.30.001](#).
- HE G X, QIN M, LIAO K X. Research advances in the attenuation mechanism of the oil-quality-indicators' value regarding the mixed segment during batch transport process[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(30): 1–8.
- [16] 张启亮, 尚义, 郭锴, 邓忠华, 张帆. 西部成品油管道柴油输送质量的影响因素[J]. *油气储运*, 2021, 40(3): 346–351. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.03.016](#).
- ZHANG Q L, SHANG Y, GUO K, DENG Z H, ZHANG F. Factors affecting the diesel transport quality of Western Products Pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(3): 346–351.
- [17] FU L H, DAI J F. Mixed oil detection method based on tapered fiber SPR sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 78: 103322. DOI: [10.1016/j.yofte.2023.103322](#).
- [18] 黄维和, 刘刚, 陈雷, 杨文, 袁子云. 中国成品油管道顺序输送混油研究现状与展望[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(5): 122–129. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5005.2023.05.012](#).
- HUANG W H, LIU G, CHEN L, YANG W, YUAN Z Y. Current status and prospect of studies on mixed oils in batch transportation of multi-product pipelines in China[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(5): 122–129.

- [19] 杜渐, 郑坚钦, 赵伟, 廖绮, 李苗, 梁永图. 成品油管网批次在线跟踪技术[J]. 油气与新能源, 2024, 36(4): 67–75. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2024.04.008](#).
- DU J, ZHENG J Q, ZHAO W, LIAO Q, LI M, LIANG Y T. Online batch tracking technology for multi-product pipeline network[J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(4): 67–75.
- [20] 吕战永, 艾合买提江·力提甫. 在线馏程闪点分析仪在成品油长输管道上的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(20): 109–111. DOI: [10.3969/j.issn.1673-4076.2022.20.037](#).
- LYU Z Y, LITIFU A H M T J. Application of online distillation range flash point analyzer in long-distance pipelines for refined oil products[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(20): 109–111.
- [21] LIU S Y, WANG S T, HU C H, ZHAN S J, KONG D M, WANG J Z. Rapid and accurate determination of diesel multiple properties through NIR data analysis assisted by machine learning[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 277: 121261. DOI: [10.1016/j.saa.2022.121261](#).
- [22] 许育鹏, 刘天波, 王硕, 张蕊, 刘玉亮, 林坤, 等. 在线近红外光谱分析技术在 S Zorb 装置上的应用[J]. 石油炼制与化工, 2022, 53(10): 93–99. DOI: [10.3969/j.issn.1005-2399.2022.10.028](#).
- XU Y P, LIU T B, WANG S, ZHANG R, LIU Y L, LIN K, et al. Application of on-line near infrared spectroscopy in S Zorb adsorptive desulfurization unit[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2022, 53(10): 93–99.
- [23] YU H J, LI Y Q, DU W L, YANG M L, PENG X, WANG X J, et al. A novel interpretable ensemble learning method for NIR-Based rapid characterization of petroleum products[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1–11. DOI: [10.1109/TIM.2023.3302910](#).
- [24] WANG H P, CHU X L, CHEN P, LI J Y, LIU D, XU Y P. Moving window correlation coefficient differences partial least squares (MWCC-DPLS) quantitative calibration method based on spectral differences between calibration samples: Application to the fast determination of gasoline octane number with near-infrared spectroscopy[J]. Fuel Processing Technology, 2023, 240: 107583. DOI: [10.1016/j.fuproc.2022.107583](#).
- [25] BUENDIA GARCIA J, LACQUE-NEGRE M, GORNAY J, MAS GARCIA S, BENDOULA R, ROGER J M. Diesel cetane number estimation from NIR spectra of hydrocracking total effluent[J]. Fuel, 2022, 324(Part B): 124647. DOI: [10.1016/j.fuel.2022.124647](#).
- [26] WU Y S, LIU Y S, LI X L, HUANG Z, HAN D. Gasoline octane number prediction from near-infrared spectroscopy with an ANN-based model[J]. Fuel, 2022, 318: 123543. DOI: [10.1016/j.fuel.2022.123543](#).
- [27] SUN X T, YUAN H F, SONG C F, DENG X X, LV G L, LI X Y, et al. Rapid and simultaneous determination of physical and chemical properties of asphalt by ATR-FTIR spectroscopy combined with a novel calibration-free method[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116950. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.116950](#).
- [28] 朱志强, 袁洪福, 胡爱琴, 宋春风, 李效玉, 吴明清. 液化石油气中二甲醚含量快速测定方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 978–980. DOI: [10.3964/j.issn.1000-0593\(2016\)04-0978-03](#).
- ZHU Z Q, YUAN H F, HU A Q, SONG C F, LI X Y, WU M Q. Study on the fast quantitative analysis of the content of DME Adulterated in LPG[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 978–980.

(编辑: 张雪琴)

基金项目: 国家管网集团揭榜挂帅项目“成品油管道油品质量监测与控制关键技术研究”, SSCC202106。

作者简介: 宋进舟, 女, 1973 年生, 高级工程师, 2005 年硕士毕业于大连理工大学工商管理专业, 现主要从事长距离输油管道调控运行管理与优化方面的研究工作, 地址: 北京市朝阳区东土城路 5 号, 100013。电话: 13911882901。Email: songjz@pipechina.com.cn

通信作者: 邱姝娟, 女, 1976 年生, 高级工程师, 2000 年毕业于西南石油大学油气储运工程专业, 现主要从事新能源输送技术方面的研究工作。地址: 新疆乌鲁木齐新市区文创路创新广场, 830011。电话: 15981790006。Email: qiusj@pipechina.com.cn

• Received: 2025-05-10

• Revised: 2025-06-24

• Online: 2025-06-25

