

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J1905322

油水界面测量与计算*

任喜伟¹,何立凤¹,宋安玲²,赵晓¹,姚斌¹

(1. 陕西科技大学 电子信息与人工智能学院 西安 710021; 2. 西安交通大学城市学院 西安 710018)

摘要:精确测量原油储罐油水界面是石油开采加工工艺过程的基本要求,油水界面测量技术在石油化工过程系统工程研究中占有十分重要的位置。首先介绍了油水界面测量技术的研究现状,分析了每一种测量技术的测量原理和技术应用,并从技术原理、测量方式和计算方法3个方面对15种油水界面测量技术进行了对比总结;其次重点探讨了油水界面计算方法,提出按照直接读数、关键参数、矩阵数据和图像分析4个方面总结油水界面计算方法,并对其所用算法研究进展进行分析和对比;最后对油水界面测量技术下一步发展做了展望,预测了油水界面测量技术在混合模式技术原理、非接触式测量方式、高精度测量过程、多维数据计算方法和智能化信息系统建设平台等5个方面的发展方向和技术难点。

关键词:油水界面;测量;数据分类;图像处理;算法

中图分类号: TH816 TP312 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Measurement and calculation on oil-water interface

Ren Xiwei¹, He Lifeng¹, Song Anling², Zhao Xiao¹, Yao Bin¹

(1. School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;
2. Xi'an Jiao Tong University City College, Xi'an 710018, China)

Abstract: Accurate measurement of oil-water interface in the crude oil tank is a basic requirement of petroleum exploitation process. The development of this technology is very important in the research of petrochemical process system engineering. Firstly, 15 kinds of oil-water interface measurement technologies are analyzed. The measurement principle and application of each measurement technology are introduced. These oil-water interface measurement technologies are compared in three terms, including technical mode, measurement mode and calculation mode. Then, this paper focuses on the oil-water interface calculation mode and compares the research progress of algorithms adopted in this direction. The calculation methods are summarized in four aspects, including direct reading method, key-parameter based method, matrix-data based method and image-analysis based method. Finally, this paper prospects the future development of oil-water interface measurement technology. The future development and the related difficulties are analyzed in five aspects, including hybrid-mode technology, high precision measurement processing, non-contact measurement, multi-dimensional data calculation method and intelligent information system construction platform.

Keywords: oil-water interface; measurement; data classification; image processing; algorithm

0 引言

我国是发现石油和使用石油最早的国家,在距今3 000多年前的史书《易经》中记载:“泽中有火”,描述的就是石油蒸气在湖泊池沼水面上的起火现象。在社会发展进程中,石油被人类称为“工业的血液”,是工业社会

最重要的动力燃料。油气田勘探开发流程繁杂,经历地质勘查、物探、钻井、录井、测井、固井、完井、射孔、采油、修井、增采、运输、加工等多个环节,每个环节都相互依存,密不可分^[1-2]。石油经过采油环节从地层中取出,再经过破乳、脱水、脱气、沉降、去杂、油水分离、油气分离等多个工序,得到符合提炼标准的石油,这一工艺过程在油田生产中十分重要。

收稿日期:2019-06-29 Received Date:2019-06-29

* 基金项目:国家自然科学基金(61603234,61601271,61471227)项目资助

在油田联合站,石油存放在原油储罐中沉降,油罐中含气、油、水和少量泥沙等杂质,按照密度大小分布在不同区域。为了油水分离,要对原油储罐内油水界面进行测量。准确测量原油储罐内油水界面,及时反映原油储罐内油水界面状态,对降低能耗、减少成本、提高联合站自动化管理水平起重要作用,对实现净油外输含水率控制和联合站盘库系统计量精度起重要保障,在石油化工过程系统工程研究中占重要位置^[3-4]。

油水界面测量技术起源于20世纪初,我国20世纪60年代才开始油罐自动测量技术的研究与开发。油水界面测量方式众多,技术各异,目前主要有人工检尺式、玻璃管式、吹气式、静压式、浮子式、伺服式、电容式、射频导纳式、磁致伸缩式、导波雷达式、超声波式、光纤式、电磁微波式、红外成像式、电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)式等15种油水界面测量技术^[5-7]。

本文以近年来国内外期刊相关文献为主,从分析油水界面测量技术的测量原理和技术应用入手,对油水界面测量技术进行分类总结,重点讨论油水界面计算方法最新研究进展,并对未来的发展趋势和需要解决的问题予以展望。

1 油水界面测量技术

1.1 油水界面测量技术现状

1) 人工检尺式测量技术

人工检尺式测量依靠测量人员爬到原油储罐顶部,将浸入式钢皮尺放入原油储罐内部,当尺砣接触原油储罐底部时提起钢皮尺,根据留在钢皮尺上的油水痕迹,计算油水液位高度,获得油水界面位置^[8]。人工检尺测量如图1所示。

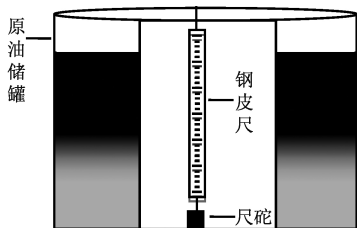


图1 人工检尺测量

Fig.1 Manual ruler measurement

人工检尺式测量技术因原理简单、直观可靠、成本低等原因,目前仍在国际上有使用(采用国际标准API2545^[9])。该方法采用人工检尺式测量技术测量油水界面,一般测量2次,2次测量结果的差值不能超过1 mm。因此测量结果相对准确,测量结果也可作为现场检验其他油水界面测量仪表结果的标准。但是测量时,

需要测试人员爬到十几米甚至几十米的罐顶进行操作,劳动强度较大,给测试人员的人身安全带来很大隐患,并且测量时效性较差,不能及时将测量结果反馈至管理部门。因此,人工检尺式测量技术过程复杂、人为因素干预过多、实时性差,已经不能满足油水界面测量发展的需要。

2) 玻璃管式测量技术

玻璃管式测量利用连通器原理,将玻璃管与原油储罐上下联通,通过控制上下阀,使玻璃管内充满油水介质,待油水液位稳定后,通过观察刻度尺,读取液位对应刻度,计算油水液位高度,确定油水界面^[10]。刻度尺可固定在玻璃管上,也可将刻度刻在玻璃管上。玻璃管式测量如图2所示。

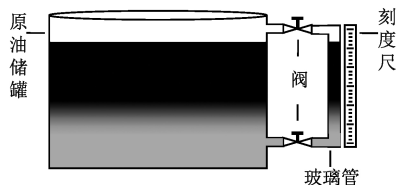


图2 玻璃管测量

Fig.2 Glass tube measurement

相对于人工检尺式测量,玻璃管式测量更加方便。原理简单、成本较低、直观易读,属于油水界面人工测量技术的一种。但是由于油、水介质密度、温度等差别,玻璃管中油水界面位置可能与原油储罐内油水界面位置存在偏差。因此,玻璃管式测量方法适合测量单一介质液位高度,测量多液位界面时误差较大。

3) 吹气式测量技术

吹气式测量通过不断向原油储罐中吹入压缩空气,利用油水介质密度差异,在不同深度形成的压差,计算油水界面及液位高度。通过吹气装置分别向油、水介质中吹气,检测吹气口处压强,根据压强与液位的关系,按照式(1)计算油水界面高度。

$$H = \frac{P_2 - P_1 - \rho_1 g D}{(\rho_2 - \rho_1) g} + H_0 \quad (1)$$

式中: H 为油水界面距离罐底高度; P_1 为油介质处压强; P_2 为水介质处压强; ρ_1 为油介质密度; ρ_2 为水介质密度; g 为重力加速度; D 为两检测点间距; H_0 为最低检测点距离罐底高度。

吹气式测量方法结构相对简单,测量人员无需到达现场,即可获得测量结果。早期在国外开始使用,如英国Thorp厂和法国La Hague厂等使用的吹气仪表。我国20世纪60年代也开始使用吹气仪表进行液位检测,如上海光华仪表厂成功研制的吹气装置^[11-12]。由于当时条件有限,吹气仪表采用的大部分都是分立元件,仪表安装、管理、维

护都存在一定困难,造成油水界面测量结果精度不高。

4) 静压式测量技术

静压式测量原理同吹气式测量原理基本类似,都是利用不同液位高度和液体密度和压强的关系计算油水界面及液位高度^[13-14]。静压式油罐计量系统(hydrostatic tank gauge system, HTG)结构如图3所示,在原油储罐上、中、下3个位置分别安装压力变送器,检测原油储罐内不同位置压强,测量获得上检测点(气) P_3 、中检测点(油) P_1 、下检测点(水) P_2 处压强,根据压差、油水密度和检测距离等信息,计算油水界面液位高度。如果原油储罐内气体压强为正常大气压,说明 P_3 对 P_1 和 P_2 没有影响,则 P_3 检测点可以省略。

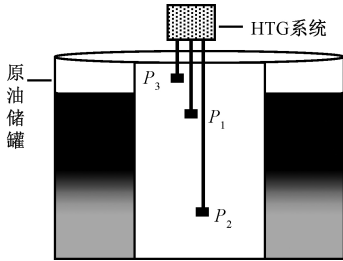


图3 静压式测量
Fig.3 Hydrostatic measurement

早期静压式测量系统只有1个变送器,受环境影响较大,只能简易测量液位高度,不能检测油水界面高度。后期随着测量点增多,变送器性能提升和计算机技术的发展,因其安装简单,工作可靠,维护量小等优点,美国FisherRosemount公司研制的系统^[15],日本横河公司推出的EJA差压变送器,西安仪表厂生产的1151差压变送器都得到广泛应用^[16]。但由于容易受油水密度、温度不断变化等环境影响,静压式油水界面测量精度不高。

5) 浮子式测量技术

浮子式测量利用浮子在不同密度液体中不同浮力测量油水界面。如图4所示,浮子被导向钢索固定在原油储罐内部,通过导向滑轮与指示仪表相连,浮子在不同位置的浮力被间接的显示在指示仪表中,反映了油水界面的位置。浮子作为测量元件其外形和自身密度与测量精度直接相关,在整个测量过程中至关重要。因此,要根据所测原油储罐内油水密度、温度、分布等情况,选择合适材料的浮子,浮子设计要有一定的截面积和外形高度。

浮子式测量方法简单、易于安装,在大型油罐油水界面测量中得到了广泛应用。20世纪60年代末~80年代,国内外相继研发了多种浮子式油水界面测量装置。其中,美国VAREC公司推出了2500型钢带浮子液位计^[17],中国大连第五仪表厂成功研发了我国第一台浮子钢带液位计,北京自动化仪表厂对引进的测量装置进行改进研究^[11]。这些浮子式油水界面仪表的出现,很好满

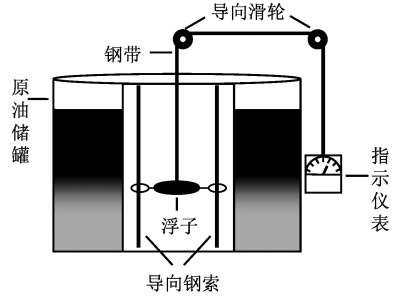


图4 浮子式测量
Fig.4 Float measurement

足了石油工业对于油罐界面测量的需求。但是在测量粘稠度大的液体时,浮子容易卡塞在导向钢索上,影响了浮子式测量仪表的进一步应用。

6) 伺服式测量技术

伺服式测量原理同浮子式测量原理基本相同,采用浮力平衡原理,由伺服电动机驱动体积较小的浮子,可以精确测量油水液位。浮子通过钢丝悬挂在仪表本体上,漂浮在液面或界面,钢丝上的张力与介质密度成正比,根据式(2),通过测量张力获得油水界面。与浮子式测量技术不同,伺服式测量技术引入伺服马达消除了机械摩擦引起的计量误差,实现了测量过程微型化、智能化,提高了测量灵敏度和精度。

$$T = W - (V - V_i)\rho_1 + V_i\rho_2 \quad (2)$$

式中: T 为钢丝张力; W 为浮子重力; V 为浮子体积; V_i 为浮子平衡时浸入的下部体积; ρ_1 为上密度; ρ_2 为中密度。

伺服式测量方法可以应用在高度大于40m的原油储罐上,精度可以达到1mm左右,因其优越的测量准确度和可靠性,在很多国家得到推广。国外典型产品是美国VAREC公司生产的6500伺服式液位计,荷兰NRAF公司的811型伺服动力液位计^[18],荷兰ENRAF公司的ATG854和XTG854伺服液位测量仪表^[19]。随着我国石油产业的迅速发展,我国对原油储罐的伺服式测量仪表也进行研制和应用,比如,北京自动化仪表厂通过技术引进美国VAREC公司的伺服液位计,并对其进行了改进研究;大连第五仪表厂通过自主开发,推出了伺服马达式液位计^[11]等。虽然伺服式油水界面测量仪表精度较高,但该类仪表由于浮子卡塞的原因,不适用于测量粘度较大的原油储罐油水界面,并且存在浮子及仪表维修困难等问题。

7) 电容式测量技术

电容式测量根据油水介质介电常数差异,将原油储罐内液体及空气作为电容器两极极板间的电介质,通过检测原油储罐内不同位置电容大小变化,计算油水界面及液位高度^[20-21]。在原油储罐中插入测量电极,总电容可由式(3)计算获得,可知总电容是油水界面以下电容和油水界面以上电容之和,总电容 C 与油水界面高度 H

之间存在线性关系^[10]。

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_1}{\ln(D/d)}L + \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\ln(D/d)}H \quad (3)$$

式中: C 为总电容; C_1 为油水界面以下电容; C_2 为油水界面以上电容; ϵ_0 为整个液位以上气体的介电常数; ϵ_1 为油水界面以上油的介电常数; ϵ_2 为油水界面以下水的介电常数为; L 为原油储罐高度; D 为原油储罐直径; d 为插入电极直径; H 为油水界面高度。

早期,美国 Electromatic 控制公司和 Drebrook 工程公司先后推出电容式液位测量装置,其中 Drebrook 工程公司的 Ztrom 系列液位控制装置得到推广应用^[22]。20 世纪 90 年代,英国曼彻斯特理工大学成功研制了分段电容阵列法^[23],英国的 Greenwood 公司研制的 LTC1230 电容传感器都被用于测量油水界面。目前,国内也有一些研发机构深入该领域,并取得了技术领先,如上海集成仪表研究所研制的电容式油水液位检测装置^[11]获得了广泛的应用。虽然电容式液位测量方法具有灵敏度好、成本相对低廉、输出稳定等优点,但也存在电极容易挂料的问题,使其应用受到一定程度的限制。

8) 射频导纳式测量技术

射频导纳式测量基于射频阻抗理论,依据原油储罐内介质呈现的阻抗特性,采用补偿电路的形式,利用高频电流测量探头测量传感电极的复数阻抗变化来确定油水界面,是电容式油水界面测量技术的改进方式,解决了电容式油水界面测量仪表无法消除的挂料问题,实现了测量抗粘附、抗冷凝的功能。射频导纳式测量如图 5 所示,传感器被均匀的分布在测量杆上,测量获得一组油水界面数据,分析数据即可获的油水界面。

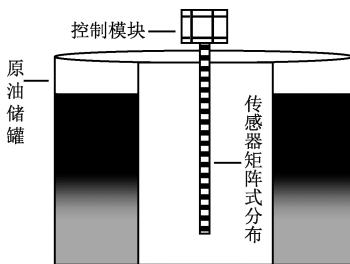


图 5 射频导纳式测量

Fig.5 Radio frequency admittance measurement

射频导纳式测量技术的出现,有效解决了电容式测量技术无法克服的挂料弊端,在国内外获得了较为广泛的应用。美国 Drexelbrook 公司、Honeywell 公司和 DE 公司相继研发了比较先进的射频导纳式油水液位计^[24],并得到应用;我国中原油田石化总厂采用 DJ-2 和 DE-508 型射频导纳油水界面仪进行液位测量^[25],取得了很好的效果。但因为油水乳化液的状态很难完全用导电率来反

映,所以目前射频导纳式测量方法还不能非常精确测量原油储罐油水乳化液介质高度。

9) 磁致伸缩式测量技术

磁致伸缩式测量利用磁致伸缩效应、浮力原理、电磁感应等多种技术,结构包括磁致伸缩导波探测杆、浮子以及传感电路等单元。如图 6 所示,测量时变送器发射电流脉冲信号,沿磁致伸缩导波丝传输产生 1 个磁场,浮子内的磁铁产生 1 个磁场,当浮球内和脉冲信号的磁场相遇时,将产生 1 个扭应力脉冲,根据发出询问和接收扭应力之间的时间差测算浮子的位置,计算油水界面及液位高度。

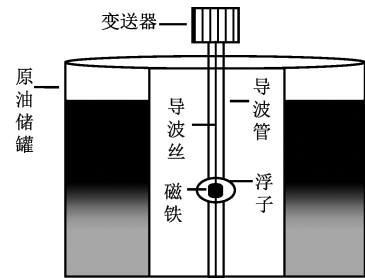


图 6 磁致伸缩式测量

Fig.6 Magneto-strictive measurement

磁致伸缩式液位测量仪安装简单、测量精度较高、工作寿命较长、应用较为广泛,是较为理想的接触型油水界面仪^[26-27]。其测量范围最大可达 18 m,测量精度可达 0.5 mm。20 世纪 80 年代美国 MTS 公司首先研制磁致伸缩油水界面仪^[28],随后 Honeywell 公司也开始研究。到 21 世纪以后,磁致伸缩液位界面仪的性能不断提高,美国 MTS 公司的产品占据了绝大多数份额。20 世纪 90 年代我国开始研究磁致伸缩油水界面仪,其中北京长恒仪表公司通过引进 WCM 型磁致伸缩液位变送器主要部件,并进行技术改造^[15];广东康宇测控仪器仪表有限公司和北京京仪福尔自动化仪表有限公司都在生产磁致伸缩油水界面仪^[11],在国内得到一定应用,性能略差于国外同类产品。但由于磁致伸缩油水界面仪直接与被测液体接触,容易受到腐蚀,容易出现浮子卡塞,产生测量误差;同时价格相对较高,应用受到一定限制。

10) 导波雷达式测量技术

导波雷达式测量基于时间行程,通过计算 2 次反射电磁波接收时间差,确定油水界面位置。导波雷达界面仪在测量时,通过探头发出雷达波,电磁波沿导波杆或缆绳传播,信号首先通过油液面位置时反射 1 次,当电磁波信号传播到油水界面位置时再次反射,这时计算在接收端通过 2 次反射波的接收的时间差,按照式(4)即可得到油水界面位置。导波雷达界面仪被反射电磁波强弱与被测介质的介电常数大小有很大关系。一般来说,介电常

数越大,反射信号越强,测量越准确。

$$S = \frac{Tv}{2} \quad (4)$$

式中: S 为传感器与油水界面之间的距离; T 为信号发射和接收时间差; v 为雷达传播速度。

界面仪测量时不受介质密度、导电率及温度等物理参数的影响,适合测量介质介电常数相差较大的油水界面。20世纪80年代开始,瑞典的SAAB公司、德国的Vega公司先后生产雷达液位仪,还有荷兰ENRAF公司生产的872系列雷达液位计^[17],其测量精度可以达到2 mm。1995年由北京航天智控工程公司研制生产的BL-30雷达液位仪,是我国自主研发生产的第一代雷达液位仪,主要指标已经达到国际先进水平,价格却只有国外同类产品的一半。2003年北京瑞普阿司克自动化仪表有限公司研制了导波雷达界面仪^[11],产品已经向多品种、系列化方向发展。

11) 超声波式测量技术

超声波式测量根据超声波在不同介质中声吸收系数差异辨别油水界面。当超声波在原油储罐油水介质中传播时,由于受到内摩擦阻力和粘滞系数影响,无论是声强还是振幅,都随声源距离的增加而衰减。通过检测超声波在油水中某点或某一部位的声振幅和声强,以及声系数的差值,可知计算油水界面的及液位高度。油水界面超声波式测量如图7所示。

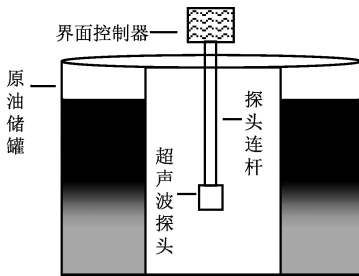


图7 超声波式测量

Fig.7 Ultrasound measurement

20世纪80年代,欧美等地已经开始采用超声波液位测量系统。其中,英国Greenwood公司引入微处理机,通过回声波判定油罐中油水界面;美国Milltronics公司的多量程超声波液位监视系统可监视30 cm~14 m范围的液位变化;Kistler-Morse公司、Magnetrol国际公司、Hybe Park电子公司的超声波液位测量产品也得到了应用^[22]。经过多年研究,20世纪80年代末我国大庆油田设计院研制出一种油水界面测量仪——HK系列超声波油水界面测控仪^[29]。目前,我国塔里木油田仍然采用超声波液位测量系统进行储油罐的液位动态监测^[30]。

12) 光纤式测量技术

光纤式测量根据光在油水介质中的传播差异辨别原油储罐油水界面。选用接近于油介质折射率的光纤芯制成检测探针,如果探针浸入油介质,由于油的折射率大于光纤芯径折射率,此时在界面处发生光的全反射;在探针浸入水介质时,由于光纤芯径的折射率大于水的折射率,此时光在界面处发生光的反射。根据光在油水介质中透射和折射现象,分析光的强度等参数变化,就能检测油水界面及液位高度^[31-32]。光从折射率为 n_1 的介质1向折射率为 n_2 的介质2(设 $n_1 > n_2$)以角度 θ_1 入射时,折射角为 θ_2 ,反射系数和发射率如式(5)所示。

$$\begin{cases} r_1 = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \\ r_2 = \frac{\cos \theta_1 / n_1 - \cos \theta_2 / n_2}{\cos \theta_1 / n_1 + \cos \theta_2 / n_2} \\ R = \frac{1}{2(r_1^2 + r_2^2)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: r_1 为介质1反射系数; r_2 为介质2反射系数; n_1 为介质1折射率; n_2 为介质2折射率; θ_1 为光从介质1向介质2入射角度; θ_2 为光从介质1向介质2折射角度; R 为光的反射率。

由于光纤式测量方法有强大的抗电磁干扰能力和高灵敏度、强适应性等原因,在石油化工行业有广阔的应用前景。在国外,20世纪90年代中期,Betta、Whitesel、Ghosh、Toth等^[33-38]推进了光纤式测量方法在液位检测中的研究和应用。早在20世纪70年代末,我国清华大学、中国工程物理研究院等单位就已经开始研究光纤式测量方法,并取得了很高的实用价值和科研成果^[11]。2000年以后,武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室提出了基于光纤垂直端面反射的检测方法,我国抚顺石油二厂、抚顺石化分公司等单位已经采用光纤式测量方法检测油罐油水界面及液位高度^[39-40]。

13) 电磁微波式测量技术

电磁微波式测量根据电磁波吸收原理。电磁波通过任何一种介质时,原来的电磁场能量都会被该介质产生的反向电磁场削弱,介质不同产生的反向电磁场强度不同,削弱原加电磁场的强度也就不同^[41-42]。电磁波能量减少服从朗伯-贝尔定律,如式(6)所示,当电磁波通过不同吸收系数的介质时,电磁波入射波强与吸收介质分子数成指数变化规律^[43]。通过安装在油罐内的电磁脉冲传感器若干检测点,检测电磁波通过介质时电磁场量衰减来计算油水界面及液位高度。

$$I_{in} = I_{out} e^{\mu N} \quad (6)$$

式中: μ 为介质的吸收系数; N 为介质的分子数; I_{in} 为电磁波入射波强; I_{out} 为电磁波出射波强。

20世纪80年代初,美国Agar公司利用电磁波短波吸收法研制了油水界面检测仪并推广至其他国家,得到

广泛应用^[44]。我国对电磁微波式测量技术的研究始于20世纪80年代末,进入21世纪后在我国应用较为广泛,各大油田开采公司都相继开发了电磁微波式油水界面测量仪和应用系统。中国石油长庆油田分公司第三采油厂采用CDBY型油水双液位测量仪测量原油储罐油水界面^[45];华北石油公司采油二厂联合西南石油大学使用短波油水界面监测仪测量油水界面^[46];中国延长油田寨子洼采油厂、英旺采油厂等都采用陕西科技大学开发的ZGL型电磁微波式油水界面监测系统测量油水界面^[47]。

14) 红外成像式测量技术

红外成像测量根据红外线成像分析图像确定油水界面。任何物体不论其温度高低都发射或吸收电磁辐射,除了与物体材料种类、形貌特征、化学与物理结构(如表面氧化度、粗糙度等)特征有关外,其大小还与波长、温度有关。红外热像仪就是利用物体的这种辐射性能测量物体表面温度场的。根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,如式(7)所示,不同物体具有不同的温度和发射系数,热像仪接收来自物体的辐射,便可测定物体表面的温度场分布。

$$W = \varepsilon \delta T^4 \quad (7)$$

式中: δ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; ε 为待测物体表面发射率系数; T 为待测物体表面温度; W 为待测物体表面总辐射强度。

20世纪70年代之前,红外成像技术虽取得了突飞猛进的发展,但仅限于军事应用领域,高昂的成本让它无法被应用于商业领域^[48]。直到1978年,美国FLIR公司才真正将红外热像技术带到人们的日常生活中。进入新世纪后,我国对红外成像在油水界面测量应用方面做了大量研究。2008年,西安石油大学采用Fluke公司的Ti40型红外热像仪检测油水界面,取得良好实验效果^[49];2010年,哈尔滨工业大学同样采用Fluke公司的Ti20型红外热像仪检测油水界面,也取得良好效果^[50]。2013年,海军工程大学对红外热像仪测量储罐多相界面进行深入研究,建立传热模型,利用红外测温反演估计储罐多相界面,达到了很高的识别精度^[51]。

15) ECT 测量技术

ECT测量利用油水介质具有不同的介电常数,通过分布在被测介质四周的电容传感器测量介质电容值,再经过计算机图像重建得到介质分布的图像,进而分析图像获得油水界面^[52-53]。如图8所示,ECT系统主要包括电容传感器单元、测量及数据采集单元和图像重建单元。

1991年,英国Leeds大学和Schlumberger Cambridge 研究公司合作研制了工程化实时ECT系统,该系统被首次应用于石油工业多相流监测,此后得到迅猛发展^[54-57]。20世纪90年代中期,我国开启了ECT技术的研究,并应用于基础研究和工程研究,取得了较好效果。其中清华大学研制了以微控制器控制多个微电容测量通道的ECT

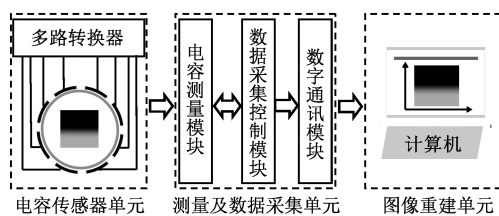


图8 ECT系统

Fig.8 System of ECT

系统^[58],天津大学设计了基于FPGA和DSP的16电极ECT系统^[59],浙江大学成功研发了应用于大庆油田实验基地的基于ECT技术的两项流可视化系统^[60],中科院工程热物理研究所与英国曼彻斯特大学合作开发了基于交流充放电的ECT测量系统^[61-62],这些系统都是我国ECT技术发展的代表。ECT测量精度高,实时性强,不易腐蚀,不怕辐射,应用前景非常乐观。但是由于ECT系统结构复杂,测量范围有限,目前只能应用于较小口径的石油管道介质成像测量。

1.2 油水界面测量技术特点及对比

可从所用的技术原理、测量方式、计算方法3个方面对上述15种油水界面测量方法的技术特点及应用情况进行总结,如表1所示。

1) 油水界面技术原理对比

油水界面测量技术按照被测物理量所属技术原理不同,可划分为人工测量、压力测量、浮力测量、电容测量、磁致伸缩测量、电磁波测量、声波测量等7种技术原理。除此之外,还有重力、电阻、电感、核子辐射等其他测量方式,本文不再进一步展开分析论述,只对上述15种主要油水界面测量技术进行测量原理与技术应用分析^[63-66]。

相比而言,人工测量、压力测量、浮力测量和声波测量技术原理易于实现,但测量精度不高;电容测量、电磁波测量技术原理相对复杂,但测量精度相对较高,且应用前景良好。

2) 油水界面测量方式对比

油水界面测量技术按照测量装置是否与原油储罐内介质发生接触,可划分为接触和非接触2种测量方式。接触式油水界面测量方式是指测量元器件或传感器直接接触原油储罐内介质;相反,测量元器件或传感器不直接与被测介质接触即为非接触式测量方式。

相比而言,接触式测量方式外界干扰较多,测量仪表不利于长期使用,但测量精度相对较高;非接触式测量方式应用前景良好,但测量精度和应用范围有待提高。

3) 油水界面计算方法对比

油水界面测量技术按照计算方法的差异,可划分为直接读数、关键参数、矩阵数据和图像分析4种计算方法。直接读数计算方法是通过人工读数直接获取油水界

表1 油水界面测量技术特点对比总结

Table 1 Summary and comparison of oil-water interface measurement techniques

序号	测量技术	技术原理	测量方式	计算方法	优缺点	应用情况
1	人工检尺式	人工测量	接触	直接读数	测量精度一般,成本低,测量原理简单;操作不便,耗时长。	应用范围较广,多用于验证其他测量方式。
2	玻璃管式	人工测量	非接触	直接读数	直观易读,原理简单,维护成本较低;测量精度低,实时性差。	应用范围较小,多应用于特定油罐检测。
3	吹气式	压力测量	非接触	关键参数	结构简单,测量原理简单,价格较低;测量精度不高。	早期应用范围较广,目前应用范围较小。
4	静压式	压力测量	接触	关键参数	安装简单,维护成本较低,适用性较强;测量精度不高。	应用范围较小,较少应用于多液位测量。
5	浮子式	浮力测量	接触	关键参数	测量简单,易于安装,价格较低;浮子容易卡塞,测量精度一般。	早期应用范围较为广泛,尤其大型储油罐。
6	伺服式	浮力测量	接触	关键参数	可靠性高,测量精度较高;维护成本较高,浮子容易卡塞。	应用范围较为广泛,尤其大型储油罐。
7	电容式	电容测量	接触	矩阵数据	灵敏度较好,价格相对低廉,输出稳定;因挂料,测量精度不高。	早期应用范围较广,技术发展较为成熟。
8	射频导纳式	电容测量	接触	矩阵数据	灵敏度较好,成本相对低廉,输出稳定;测量精度一般。	应用范围较广,技术发展较为成熟。
9	磁致伸缩式	磁致伸缩测量	接触	关键参数	安装相对简单,测量精度较高;容易腐蚀,浮子容易卡塞。	应用范围广泛,技术发展较为成熟。
10	导波雷达式	电磁波测量	接触	关键参数	稳定性较好,测量精度较高;安装困难,维护成本较高。	应用范围较为广泛,技术发展较为成熟。
11	超声波式	声波测量	非接触	关键参数	安装容易,价格相对较低,稳定性好;维护成本较高。	应用范围宽广,技术发展较为成熟。
12	光纤式	电磁波测量	非接触	关键参数	抗干扰能力强,测量精度较高;价格较高,维护成本较高。	应用范围较小,技术还在不断发展。
13	电磁微波式	电磁波测量	接触	矩阵数据	稳定性较高,安装容易;测量精度一般,价格成本较高。	应用范围较广,技术发展较为成熟。
14	红外成像式	电磁波测量	非接触	图像分析	维护简单,直观方便;价格成本较高,测量精度一般。	应用范围较小,技术还在不断发展。
15	ECT	电容测量	非接触	图像分析	测量精度高,直观稳定;价格高,维护成本高。	应用范围较小,技术还在不断发展。

面的一种最简单的计算方法;关键参数油水界面计算方法是一种借助检测仪表或传感器测量原油储罐内若干物理量,通过分析关键参数,运用原理公式,计算获得油水界面及液位高度的计算方法^[67];矩阵数据计算方法是一种通过若干矩阵式垂直分布传感器采集原油储罐内不同位置介质特性信息获得一组矩阵数据列表,并分析、处理该矩阵数据获取油水界面的计算方法^[68-69];图像分析计算方法是一种通过传感器获得原油储罐液位图像,并对该液位图像进行分析、处理和计算获取油水界面的计算

方法^[53, 70]。

相比而言,直接读数和关键参数计算方法计算结果精度不高,容错和自我修正能力不强,但计算过程简单;矩阵数据和图像分析计算方法可实现数据预处理、智能识别、容错修正等功能,应用前景良好,但计算过程相对复杂。

4) 油水界面技术特点总体对比

从表1可以看出,成本(包括维修成本)高的测量方法精度也比较高,比如伺服式、导波雷达式、光纤式和电

容层析成像式等测量技术。反之,成本低的测量方法精度也比较低,比如人工检尺式、玻璃管式、吹气式、静压式、浮子式、电容式等测量技术。也有一些例外,比如电磁微波式测量技术成本高,但精度一般;而磁致伸缩式测量技术成本较低,精度却高。

另外,光纤式、红外成像式和电容层析成像式测量技术为近来出现的新技术,还在发展之中,应用范围较小。而其他技术已经发展成熟,除玻璃管式和静压式测量技术外,大多有较广泛的应用。

还有,ECT测量技术由于技术特点的原因,主要应用在输油管道的油水界面测量,还未在大型油罐上得到应用。

2 油水界面计算方法

2.1 基于直接读数的计算方法

基于直接读数的油水界面计算方法通过观察钢尺刻度,不需要借助其他测量仪表或传感器,直接读出油水界面及液位高度。人工检尺式测量方式和玻璃管式测量方式都是测量员使用钢尺检测原油储罐后,直接读取钢尺刻度,确定油水界面及液位高度。虽然直接度数的计算方法获取结果简单、直观,但因为人为因素影响,该计算方法测量精度一般,且不利于实时在线观测数据。

2.2 基于关键参数的计算方法

基于关键参数的计算方法是将通过传感器获取的测量压力、浮力、时间差等关键参数,代入相应公式计算油水界面数据。

1) 基于压力关键参数的计算方法

吹气式测量方式和静压式测量方式是基于压力关键参数的计算方法,借助吹气仪表或压力传感器分别测量原油储罐内油和水介质处压强,作为关键参数。计算方法如式(1)所示,分别测量油、水介质处压强 P_1 、 P_2 ,并已知油、水介质处密度 ρ_1 、 ρ_2 ,2检测点间距 D ,以及最低检测点距离罐底高度 H_0 ,即可获得油水界面距离罐底高度。

2) 基于浮力关键参数的计算方法

浮子式测量方式和伺服式测量方式是基于浮力关键参数的计算方法,借助检测仪表检测浮子在油水界面处的钢丝张力,作为关键参数,通过分析浮子种类和张力的关系,间接计算油水界面位置。计算方法如式(2)所示。浮子的重力 W 、浮子体积 V 和浮子平衡时浸入的下部体积均 V_b 为常数,分别获取油罐内介质上密度和中密度 ρ_1 、和 ρ_2 ,根据浮子类型确定油水界面高度与张力的关系,即可计算油水界面高度。

3) 基于时间差关键参数的计算方法

磁致伸缩式测量方式、导波雷达测量方式和超声波测量方式是基于时间差关键参数的计算方法。磁致伸缩式测量方式借助检测仪表检测变送器发射电流脉冲信号和接收扭应力脉冲信号之间的时间差关键参数,乘以脉冲信号传播的速度,计算浮子的位置,即可获得油水界面高度;导波雷达测量方式借助导波雷达检测传感器发射雷达信号和接收雷达反射油水界面信号之间的时间差关键参数,乘以雷达在介质中传播的速度,计算油水界面高度;超声波测量方式借助超声波检测传感器发射超声波信号和接收超声波油水界面反射信号之间的时间差关键参数,乘以雷达在介质中传播的速度,计算油水界面高度。计算方法如式(4)所示,已知信号发射和接收时间差 T 和脉冲信号/超声波/雷达传播速度 v ,即可计算油水界面。

2.3 基于矩阵数据的计算方法

1) 矩阵数据表现形式

基于矩阵数据的油水界面计算方法是一种采用某种数据分类算法分析和处理矩阵数据的计算方法。矩阵数据是通过矩阵式垂直分布的传感器采集原油储罐内不同位置介质特性信息获得的矩阵数据列表^[71-72]。

油水界面矩阵数据的表现形式可以是一维的线状数据、二维的面状数据、三维的立体数据,也可以是 N 维的多向数据。油水界面矩阵数据的产生跟传感器在原油储罐内布设的位置和数量,以及测量方法直接相关。目前对油水界面一维线状数据的研究较多^[73-79],表2所示为通过电磁微波式油水界面测量技术采集到的100个油水界面矩阵数据样式,其他测量技术采集获得的矩阵数据与之类似。

获得矩阵数据后,首先对矩阵数据进行数据预处理,消除矩阵数据中的伪数据(伪数据是由原油储罐内部结构差异和传感器性能不稳定产生的);其次采用矩阵数据分类算法计算油水界面及液位高度。为了便于说明和分析,用 $\mathbf{X}=\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ 表示一组一维油水界面矩阵数据。

2) 矩阵数据预处理算法

文献[73-74]提出了4种矩阵预处理算法,分别是最值过滤算法、定点修正算法、区域去噪算法和中值屏蔽算法。

(1) 最值过滤算法

最值过滤算法是一种通过求最大值或最小值遍历矩阵数据的算法。算法简单描述如下。

① 对于一组油水界面数据 \mathbf{X} ,设定遍历模板及步长 $S(S \leq N)$,即设定求最值的数据对象个数 $\mathbf{D}=\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_S\}$;

② 求出 \mathbf{D} 中最大值 x_{\max} 或最小值 x_{\min} ,并将结果赋值给 \mathbf{D} 中所有数据;

表2 油水界面一维矩阵数据表
Table 2 One-dimensional matrix data table of oil-water interface

采集序号	一维矩阵数据									
(1~10)	64	54	76	45	66	77	45	55	67	74
(11~20)	72	64	87	78	56	54	46	66	89	94
(21~30)	90	109	89	103	107	90	109	99	99	99
(31~40)	96	115	136	127	158	235	436	466	476	480
(41~50)	546	589	554	478	500	504	490	486	438	504
(51~60)	508	553	499	455	530	570	608	604	528	553
(61~70)	559	555	577	564	573	589	599	576	622	674
(71~80)	611	613	978	1 030	1 079	1 028	1 300	1 205	2 832	2 708
(81~90)	3 953	3 896	3 904	3 296	3 996	3 996	3 996	3 996	3 996	3 996
(91~100)	3 996	3 996	3 996	3 996	3 996	3 996	3 996	3 996	3 996	3 996

③ 递进步长 S , 求出下一组 $D = \{x_{S+1}, x_{S+2}, x_{S+3}, \dots, x_{S+S}\}$ 中最大值 x_{\max} 或最小值 x_{\min} , 以此类推, 直至 X 遍历完毕, 算法结束。

当油水界面伪数据只以偏大或偏小一种形式出现在油罐的某一层中, 利用最值过滤算法就可以很好的屏蔽伪数据, 起到优化的效果。但是如果伪数据分别出现在油罐内不同介质层的话, 最值过滤算法很难区分过滤最大值还是最小值, 存在应用的局限性。

(2) 定点修正算法

定点修正算法是针对某一特定位置的伪数据进行设定修正值的算法。算法简单描述如下。

① 对于一组矩阵数据 X , 首先经过多次测量找出伪数据出现的位置 M , 即找出伪数据 x_M ;

② 通过设定标准修正 x_M 为该区域临近数据值 x_{M-1} 或 x_{M+1} ;

③ 按照上述方法修正其他特定位置的伪数据。

定点修正算法也存在很大的局限性, 只适合屏蔽固定位置的伪数据, 一旦伪数据的位置发生变化, 该算法就不能很好的解决。

(3) 区域去噪算法

区域去噪算法是一种通过确定油水区域来修正油水界面伪数据的算法。算法简单描述如下。

① 对于一组矩阵数据 X , 按照气层、油层、乳化层、水层阈值将油水界面划分 4 个区域;

② 通过各层阈值查找 X 中的伪数据, 即各区域内数据偏差较大的数据;

③ 采用求最值的方法将伪数据修正在该层正常数据范围之内。

区域去噪算法较之上述 2 种算法有很大的改进, 具备解决伪数据普遍现象存在的能力, 但是当获取的数据较以前发生很大变化时, 阈值也要有做相应的修改, 算法

稳定性较差。

(4) 中值屏蔽算法

中值屏蔽算法是一种通过求中间值屏蔽油水界面伪数据的算法。算法简单描述如下。

① 对于一组线性数据 X , 设定模板长度及模板内包含 S 个数据, 即设定求中值的数据对象个数 $D = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_S\}$, 并对模板进行排序, 获取中间值 x_{mid} ;

② 使用模板开始遍历 X 中的第 1 组模板数据 D , 并将 x_{mid} 赋值给 x_1 ;

③ 遍历第 2 组模板数据 $D = \{x_2, x_3, x_4, \dots, x_{S+1}\}$, 并将第 2 组模板中获取的 x_{mid} 赋值给 x_2 ; 依次类推, 直至 X 赋值完毕。

中值屏蔽算法在解决油水液位伪数据方面, 尤其是随机出现的普遍性伪数据方面表现突出, 算法执行准确率高、简洁并且高效。

综上 4 种油水界面数据预处理算法, 每一种算法在准确性、复杂度和执行效率方面都有各自的特点和适用范围, 表 3 所示为对 4 种预处理算法进行的对比分析。

3) 矩阵数据分类算法

文献[75-79]对油水界面矩阵数据分类算法进行了研究。概括来讲, 主要有 5 种算法, 分别是传统分类统计算法、经典 K-means 聚类算法、自适应阈值聚类算法、累积和算法和 BP 神经网络算法。

(1) 传统分类统计算法

文献[75]对传统分类统计算法进行了详细分析, 油水界面测量传统分类统计算法是一种基于人工选取阈值的一次分类统计算法。该算法的基本思想如下。

① 在油水界面数据各层中人工选取 4 个典型值 D_j ($j=1, 2, 3, 4$), 按照式(8)计算油水界面各层分类阈值 Y_j ($j=1, 2, 3$)。

表3 油水界面预处理算法对比分析

Table 3 Comparison and analysis of oil-water interface pretreatment algorithms

预处理算法	算法特点	算法准确性	算法复杂度	算法效率	适用范围
最值过滤算法	算法简单,性能较差,有一定的局限性	较低	较低	低	适用于过滤原油储罐某一层介质内伪数据
定点修正算法	算法简单,有针对性,适用修正特定错误数据	较低	低	低	适用于修正已知测量传感器损坏产生的伪数据
区域去噪算法	算法复杂,稳定性差,执行效率不高	较高	较高	较低	在适当调节阈值的前提下,适用于去除油水界面伪数据
中值屏蔽算法	算法简单,性能较高,适合于屏蔽所有错误数据	高	较低	较高	适用于屏蔽所有存在伪数据的油水界面数据

$$Y_j = \frac{D_j + D_{j+1}}{2} \quad (8)$$

② 用式(9)统计满足各层分类阈值大小范围的数据集合 $S_j(j=1, 2, 3, 4)$ 。

$$S_j = \begin{cases} \{x \in x_i \mid x \leq Y_j\} & j=1 \\ \{x \in x_i \mid Y_{j-1} < x \leq Y_j\} & j=2,3 \\ \{x \in x_i \mid Y_{j-1} < x\} & j=4 \end{cases} \quad (9)$$

③ 按照式(10)分别计算 S_j 集合中的数据个数 $N_j(j=1, 2, 3, 4)$ 。

$$N_j = \sum_{i=1}^N 1\{S_j = j\} \quad (10)$$

④ 用式(11)计算各层介质高度 $H_j(j=1, 2, 3, 4)$ 。

$$H_j = \begin{cases} hN_j & j=1,2,3 \\ hN_j + L & j=4 \end{cases} \quad (11)$$

式中: h 表示测量装置各传感器之间间距, L 为测量装置底部距离油罐底部的高度。

传统分类统计算法是最简单的油水界面聚类数据分类算法,但是在划分油水界面矩阵数据时准确性较低,且人为因素较大,适合于统计分层较为清晰的油水界面矩阵数据。

(2) 经典 K-means 聚类算法

文献[76]首次将经典 K-means 聚类算法引入油水界面数据分类计算,是一种基于人工选择阈值的多次聚类统计的算法。该算法的基本思想如下。

① 在矩阵数据 \mathbf{X} 中人工随机选择 4 个数据作为初始聚类质心 $u_j(j=1, 2, 3, 4)$ 。

② 计算每个质心到其他矩阵数据的欧式距离,按照式(12)将最接近质心的数据重新归类 $S_j(j=1, 2, 3, 4)$ 。

$$S_j = \operatorname{argmin} \|x_i - u_j\|^2 \quad (12)$$

③ 对于新划分的每一类数据求均值,按照式(13)计算新质心。

$$u_j = \frac{\sum_{i=1}^N 1\{S_j = j\} x_i}{\sum_{i=1}^N 1\{S_j = j\}} \quad (13)$$

④ 迭代步骤②、③,使得式(14)误差平方和准则函

数值 E 最小。

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{x_i \in S_j} \|x_i - u_j\|^2 \quad (14)$$

⑤ 质心确定后,根据式(15),统计油水界面各层介质高度 H_j ,确定油水界面。

$$H_j = \begin{cases} h \sum_{i=1}^N 1\{S_j = j\} & j=1,2,3 \\ h \sum_{i=1}^N 1\{S_j = j\} + L & j=4 \end{cases} \quad (15)$$

因为经典 K-means 聚类算法简单、快速,处理大数据集时,能保持可伸缩性和高效性,且对于处理接近高斯分布的数据效果最佳。所以,经典 K-means 聚类算法可以有效应用于计算油水界面及液位高度。但需要人工选择阈值,选取不当测量结果误差较大。

(3) 自适应阈值聚类算法

文献[77]对经典 K-means 聚类算法进行了改进研究,提出一种自适应阈值查找算法,该算法自动计算油水界面数据拐点位置,并获取最优典型值位置。算法的基本思想如下。

① 对矩阵数据 \mathbf{X} 按照由小到大排序,之后按照式(16)进行相邻数据减法计算。

$$x_i = x_i - x_{i-1} \quad (16)$$

② 建立长度为 $2m+1$ 的模板,规定模板内数据满足 x_{i-1} 到 x_{i-m} 不大于 x_i ,且 x_{i+1} 到 x_{i+m} 均小于 x_i ,使得 x_i 为模板中最大值。用步骤①所得数据。遍历过程中,如果遇到与模板规定匹配的数据,则记录下 x_i 的位置及大小,并将模板中其他数据清零;反之,将模板内数据全部清零。

③ 查找步骤②所得数据序列中峰值所在位置,并按式(17)计算各峰值大小与其所在位置前后油水界面数据均值的比例 R_i ,最终获取比例最大的 3 个峰值所在位置,即油水界面数据的 3 个拐点位置。

$$R_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{\frac{x_i + x_{i-1}}{2}} \quad (17)$$

④ 用数据序列第 1 个位置、最后一个位置和步骤③

所得的3个位置划分成4段区域,分别获取4段区域中间位置所对应的油水界面数据,即查找出4个最优典型值 D_j ,进而通过式(8)计算3个自适应阈值 Y_j 。

⑤ 参照式(9),计算油水界面各层数据集合 S_j 。

⑥ 根据划分好的油水界面数据集合 S_j ,按照式(18)计算最新阈值 Y_j 。

$$Y_j = \frac{\sum_{i=1}^N 1\{S_j = j\} x_i}{\sum_{i=1}^N 1\{S_j = j\}} + \frac{\sum_{i=1}^N 1\{S_{j+1} = j+1\} x_i}{\sum_{i=1}^N 1\{S_{j+1} = j+1\}} \quad (18)$$

⑦ 计算完最新阈值后,重复步骤⑤和⑥,重新划分聚类集合数据 S_j ,并更新最新阈值 Y_j ,递归直至算法收敛。根据最终阈值 Y_j 统计最终确定的聚类集合数据 S_j ,并按照式(15)计算各层液位高度 H_j ,确定油水界面位置。

自适应阈值聚类算法结合了传统分类统计算法和经典K-means聚类算法的设计思想,并且不受人为主观因素干预,能够准确划分油水界面矩阵数据,获得油水界面准确结果。

(4) 累积和分类算法

文献[78]将累积和算法引入油水界面矩阵数据分类计算,该算法是一种基于拐点的序列数据分析方法。算法的基本思想如下。

① 获取油水界面矩阵数据 X ,并计算序列均值 x_{ave} 。

② 确定累积和序列 $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_N\}$,并设定 $c_0 = 0$,根据式(19)计算 X 中的每一个数据 x_i 的累积和。

$$c_i = c_0 + (x_i - x_{ave}) \quad (19)$$

③ 定位序列 C 中最小值的位置,确定第1个分界点 p_1 。此时, X 被分为2段 $XX = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{p_1}\}$, $XY = \{x_{p_1+1}, x_{p_1+2}, x_{p_1+3}, \dots, x_N\}$,该分界点就是油层和乳化层界面的位置。

④ 按照步骤③找出子序列 XX 的分界点 p_2 ,对其进行进一步分割,得到该序列的2个子序列 $XXX = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{p_2}\}$, $XXY = \{x_{p_2+1}, x_{p_2+2}, x_{p_2+3}, \dots, x_{p_1}\}$,该分界点就是气层和油层界面的位置。

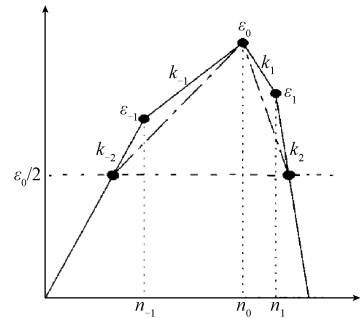
⑤ 按照步骤③找出子序列 XY 的分界点 p_3 , $XYX = \{x_{p_1+1}, x_{p_1+2}, x_{p_1+3}, \dots, x_{p_3}\}$, $YYY = \{x_{p_3+1}, x_{p_3+2}, x_{p_3+3}, \dots, x_N\}$,该分界点就是乳化层和水层界面的位置。

累积和分类算法简单,适合于拐点较为明显的油水界面聚类数据划分,对于拐点不明晰的油水界面矩阵数据,该算法存在一定的局限性。

(5) BP神经网络算法

文献[79]将BP神经网络算法用于精确划分油水界面数据,是通过时域介电谱曲线的特征判断油水乳化层确定油水界面的一种算法。油水界面矩阵数据不是一维数据,而是多维的时域介电谱损耗曲线。时域介电谱损

耗曲线如图9所示,可以通过基于时域介电谱技术的油水界面测量获得,测量属于接触式、电容式技术原理测量方式。算法的基本思想如下。



ϵ_0 —极值点; $\epsilon_{-1}, \epsilon_1$ —左右两侧的斜率转折点; n_{-1}, n_0, n_1 — $\epsilon_{-1}, \epsilon_0, \epsilon_1$ 的横坐标; k_{-2}, k_2 — $\epsilon_{-1}, \epsilon_1$ 与左右两个边界点的斜率;
 k_{-1}, k_1 — ϵ_0 与 $\epsilon_{-1}, \epsilon_1$ 的斜率

图9 损耗曲线特征提取

Fig.9 The character extraction of the loss curve

① 提取每条损耗曲线10个特征值,分别为 $\epsilon_{-1}, \epsilon_0, \epsilon_1, n_{-1}, n_0, n_1, k_{-2}, k_{-1}, k_1, k_2$ 。

② 将10个特征值作为神经网络的输入,以含水率和油水混合物的状态作为神经网络的输出。用二进制编码表示油水混合物的状态,分别为水(0 0 0)、高含水水包油(0 0 1)、水包油(0 1 0)、混合状态(1 0 0)、油包水(1 0 1)、底含水油包水(1 1 0)。

③ 油水混合物的不同特征值反映了不同性质,用BP神经网络实现模式分类,如图10所示。

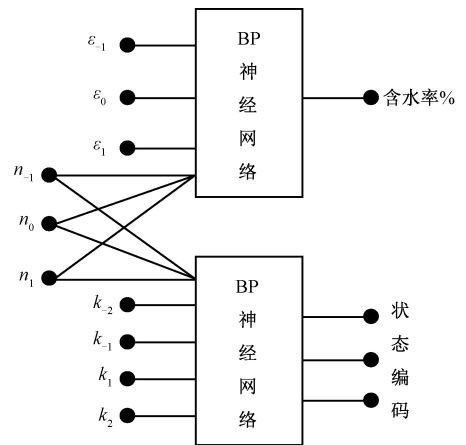


图10 BP神经网络模型

Fig.10 BP neural network model

④ 根据步骤③的BP神经网络模型,对所有损耗曲线进行特征值输入,即可获得状态编码输出,这样就很容易通过油包水和水包油状态在原油储罐中的高度,从而确定油层、水层和乳化层的高度。

BP神经网络算法通过提取介电谱曲线的特征值,采用2层BP神经网络实现油水混合物的模式分类,为测量原油储罐油水界面精确测量提供了一种有效方法。

根据文献[75-79],上述5种油水界面矩阵数据分类算法在计算准确率、算法的迭代次数和算法的运行时间等方面的性能对比分析结果如表4所示。

表4 油水界面分类算法对比分析

Table 4 Comparison and analysis of oil-water interface classification algorithms

分类算法	算法特点	算法准确性	算法复杂度	算法效率	适用范围
传统分类统计算法	算法简单,但依赖人工选取典型值,准确率低	较低	低	较低	适用于原油储罐内不含乳化层的油水界面矩阵数据分类统计
经典 K-means 聚类算法	算法效率较高,但算法依赖人工选取阈值	较高	较高	较高	适用于原油储罐内多层介质的油水界面矩阵数据分类统计
自适应阈值聚类算法	算法精确,不依赖于人工选值,迭代次数较高	高	较高	高	适用于原油储罐内多层介质的油水界面矩阵数据分类统计
累积和分类算法	算法简单、实用,但精度较低,有一定局限性	较低	较低	较高	适用于原油储罐内不含乳化层的油水界面矩阵数据分类统计
BP神经网络算法	算法精度较高,算法较为复杂	高	较高	较高	适用于原油储罐内多层介质的油水界面矩阵数据分类统计

2.4 基于图像分析的计算方法

基于图像分析的计算方法是在确定原油储罐油水界面图像的前提下,对油水界面图像进行分析处理获得油水界面的计算方法。目前原油储罐油水界面成像的方式有红外成像分析计算方法和 ECT 分析计算方法。

1) 红外成像分析计算方法

利用红外热像仪测量原油储罐油水液位是一种比较理想的油水界面测量计算方法,计算过程主要归纳如下。

(1) 通过红外热像仪获得现场油水界面图像。油水界面红外成像就是把原油储罐内介质因温度和发射率不同产生的红外辐射空间分布转换成图像,原油储罐介质分布就会呈现在图像上,通过对图像的进一步分析,可获得油水界面。

(2) 获得原油储罐红外图像后,首先要进行平滑降噪处理。根据不同噪声,如高斯噪声、瑞利噪声、椒盐噪声、平均分布噪声、伽马噪声、指数分布噪声等,采取不同的降噪算法。主要有均值滤波、中值滤波、高斯滤波、双边滤波等。文献[19]对 中值滤波进行了改进,提出自适应中值滤波,消除了脉冲噪声,平滑了其他非脉冲噪声,并减少了边界失真现象。

(3) 通过图像边缘检测分析获取油水界面。图像边缘检测的算法主要有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、LoG 算子和 Canny 算子图像边缘检测算法。文献[80]提出基于 Canny 算子的自适应双阈值油罐油位红外成像检测方法。该方法降低了传统 Canny 检测算子手工选择阈值丢失油位信息的风险,依据不同红外图像灰度梯度直方图特征自动设置高低阈值,自动分析横向条纹数目,并获得每一条横向条纹具体位置,是一种应用在原油储罐油水界面检测比较

实用的边缘检测算法^[80]。检测处理过程如图 11 所示。

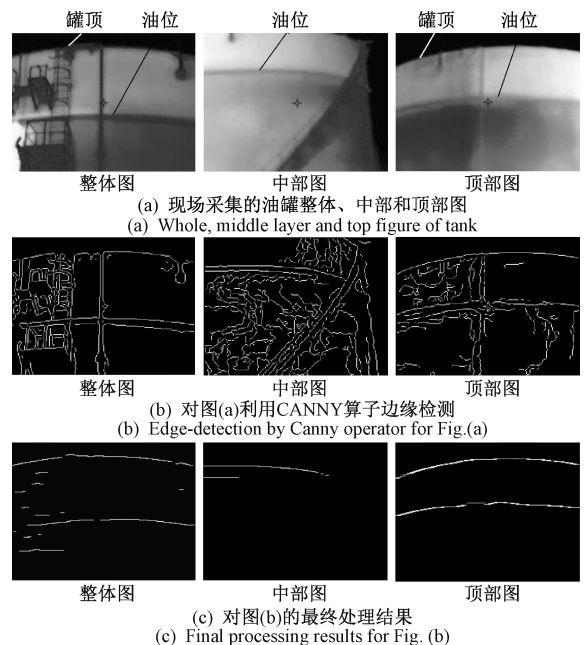


图 11 基于 Canny 算子的油罐油位红外成像检测

Fig.11 IR imaging detection of oil tank level based on Canny

上述算法在处理原油储罐单液位图像分析中发挥了作用。虽然目前获得多液位红外图像还是个难点,但是上述算法也能应用于原油储罐油水界面多液位成像分析^[81-83]。不仅如此,文献[51]通过建立原油储罐传热模型,利用有限体积法对筒体外表面温度分布进行数值模拟,提出了基于 L-M (levenberg-marquardt) 法的油水界面反问题识别方法。该方法根据红外热像仪测量获得原油

储罐内油位、水位及油水界面表面区域温度,如图12所示。沿 z 向选取检测表面上离散的温度,并加入 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量误差,模拟红外实际测量中获得的温度分布,再通过L-M算法反问题求解,识别原油储罐内多个界面。此外,该文献还分析了初始假设、测量误差、表面最大温差等3个方面对测量界面精度的影响,证明了误差在在工程允许范围以内,说明利用红外测温反演测量原油储罐多液位的方法具有很高的精度。

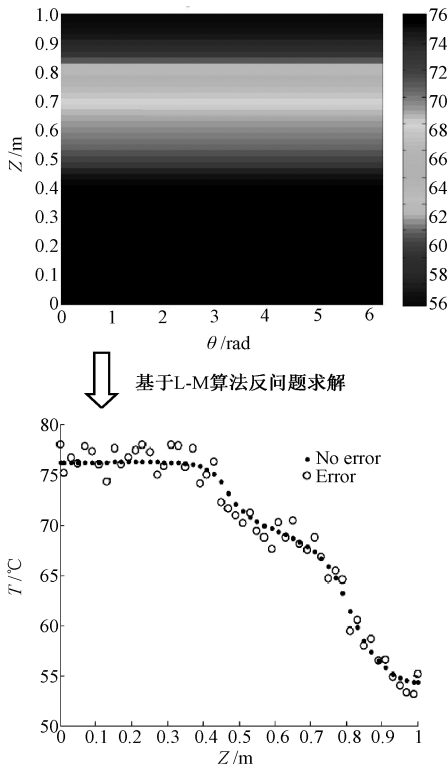


图12 原油储罐外表温度分布

Fig.12 Temperature distribution of oil tank surface

2) ECT 分析计算方式

目前,ECT已取得长足进展,通过ECT方法获取油水界面图像,进而分析图像获取油水界面位置是一种相对精确的非接触式测量方法。油水界面ECT检测和计算过程归纳如下。

(1) 由检测电极、绝缘管道、屏蔽电极和接地屏蔽罩4个部分组成电容传感器系统,利用电容的边缘效应,传感器对原油储罐内油水等介质产生对应电容值,检测电极之间组合提供多个电容测量值,这些数据成为油水界面图像重建的投影数据。对于电容传感器的研究,目前许多学者在新型传感器结构设计、参数优化设计和特殊结构传感器等方面做了大量探索^[84-89]。

(2) 依靠电容测量模块、数据采集控制模块和通信模块将不同阵列电极对间的微小电容量及其变化数据传

送到计算机。电容测量模块实现CV(capacitance to voltage)转换,可采用电容充电法和基于交流的CV转化电路测量电容值。数据采集控制模块以DSP为控制核心,以CPLD或FPGA为辅助控制,以ADC进行数据采集。数据通信模块主要采用USB技术。

(3) 利用计算机图像重建系统获得油水界面图像。ECT油水界面重建算法有正问题的建模和逆问题的求解2方面内容,求解逆问题是ECT图像重建的关键步骤。目前图像重建的算法主要有直接算法、迭代算法、遗传算法、支持向量机算法等^[53, 90]。

(4) 获取油水界面图像后,为了进一步改善图像质量,利用阈值滤波、最大熵滤波等滤波算法,或小波分析算法降低图像噪声和平滑图像粗糙边界。另外,可利用图像重建耗时、相对图像误差、电容残差和相对系数等重要指标对图像质量进行评价。

在文献[7, 55, 91-92]中,为了获取油水界面图像,当从ECT传感器获取1组电容值时,一是将气作为1个组件与油和水作为另1个组件,利用油气校准数据生成1个图像;二是将气和油作为1种组件与水作为另1个组件,利用气水校准数据生成第2幅图像。最后融合图像,将2幅图像组合在一起,重建生成油水界面图像^[91-92],如图13所示。

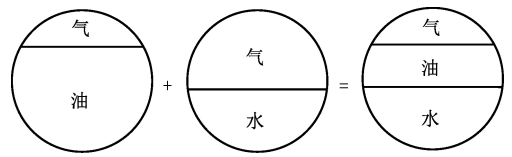


图13 油水界面产生原理

Fig.13 Principle of oil-water interface generation

文献[91]提供了一种基于电容层析成像的混合控制策略的油水界面测量方法,采用主成分分析(principal component analysis, PCA)算法和聚类分析算法综合分析油水界面图像。如图14所示,读取ECT图像,测量图像中代表水、油和气的的像素数量,分别计算相应占比,并计算欧式距离,与已构建的知识库进行对比,找出最小距离,学习获取最符合解释ECT图像介质分布的油水界面。

在文献[93-95]中,测量油水2项均采用ECT技术,并结合ERT(电阻层析成像)技术在油水2项可视化方面应用进行深入研究和分析,获得不错的实验数据和可供参考的ECT技术拓展研究^[93-95]。基于对ECT相关文献的整理,虽然目前ECT测量可视化程度高、测量精度高,但是系统价格昂贵,并且只能应用测量油水输送管道或小型油罐的油水界面测量,对于尺寸较大的原油储罐还无法实现油水界面测量。

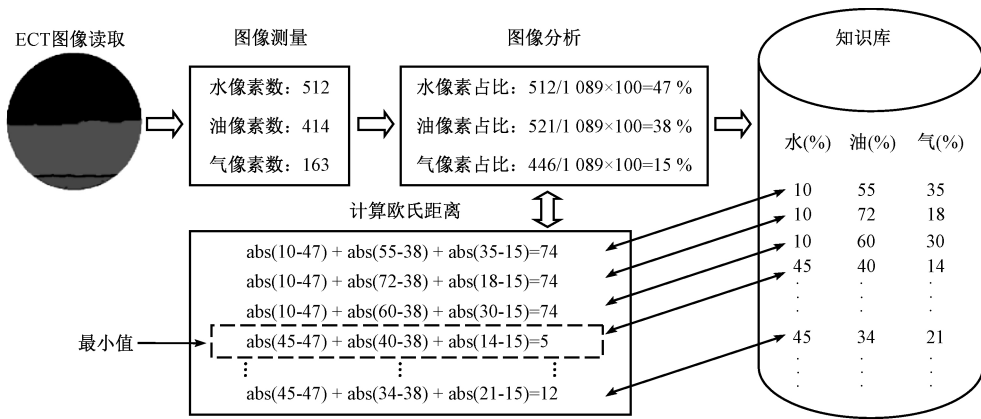


图14 混合控制策略油水界面测量分析过程

Fig.14 Measurement and analysis process of oil-water interface based on hybrid control strategy

3 油水界面测量技术展望

油水界面测量技术已经经历了很长的发展历程,众多学者对其进行了深入研究,有些技术已经基本成熟,而有些技术才刚刚起步。随着科学技术的不断发展,新技术不断涌现,将会有越来越多的油水界面测量技术被开发和应用。展望油水界面测量技术,其发展方向和技术难点主要有以下几个方面。

1) 油水界面测量技术向混合模式方向发展

每一种油水界面测量方式都有优势和不足,利用不同测量方式的优势解决实际问题,使得油水界面测量方式呈现多样化发展。根据科研人员对压力、浮力、声波、电磁波等物理量在测量油水界面认识的不断提高,油水界面测量技术取长补短,相互借鉴,混合模式的测量方式将是未来油水界面测量技术的发展方向。文献[96-97]在混合模式油水界面测量技术上进行了尝试,将导波雷达与液位图像测量相结合,将压力测量与液位测量相结合,提高了测量精度,并使测量更具有针对性。混合模式测量的技术难点在于会加大测量过程的复杂性,需要进一步研究如何提高效率及实现精确测量。

2) 油水界面测量方式向非接触式方向发展。

由于原油储罐内介质本身存在具有很强的腐蚀和易爆特性,使得接触式油水界面测量装置很难长时间工作。使用一段时间后,往往出现测量准确度不高,维护成本较高等问题。比较而言,非接触式油水界面测量传感器不和原油储罐内部介质直接接触,避免了很多技术应用难点。其中,非接触式光纤测量技术发展的越来越好,可根据光在不同介质中的发射、折射和透射变化来判断油水界面。另外,基于图像分析的油水界面非接触式测量方式也是油水界面测量技术的发展方向,其技术难点在于如何获取红外油水界面图像及更大口径的原油储罐的电

容层析成像油水界面图像。

3) 油水界面测量过程向更高精度方向发展。

油水界面在测量过程中难免出现测量偏差,有些是由于测量误差或计算误差引起的,有些则是是因为原油储罐内部结构或传感器自身损坏等原因产生的错误数据(即伪数据)导致的。文献[73-74]对如何去除油水界面伪数据问题进行了初步研究,文献[79]提出了利用BP神经网络算法去除伪数据的影响,提高了油水界面测量精度。另外还有一部分偏差是对原油储罐内介质,特别是乳化层的特性认识不足引起的。精确辨别乳化层问题对分析油水界面测量结果有很大影响,未来通过获取乳化层显微图像,借助连通域标记算法分析乳化层油包水、水包油、油包水包油、水包油包水等形态将会进一步提高油水界面的测量精度^[98-99]。这方面的技术难点在于如何精确识别和分析2种介质临界位置油水界面伪数据,并快速获取乳化层图像中各类别成分。

4) 油水界面计算方法向多维数据计算方向发展。

人工测量直接读数的方式已经成为过去,油水界面计算方法正在从一维向多维数据计算的方向发展。依靠多传感器矩阵式分布技术,可以获得油水界面二维、三维,甚至更多维数的数据,通过数据分类算法、神经网络算法等人工智能算法,自动计算油水界面。通过采集、分析和处理油水界面多维数据,运用数据分析智能算法可以计算储油罐不同位置的油水界面,可进一步提高测量精度。文献[75]提出的中值预处理聚类算法、文献[76]提出的K-means算法、文献[77]提出的自适应阈值聚类算法、文献[78]提出的累积和算法,都只适用于一维油水界面数据的分析,如何对对二维、三维等油水界面数据进行分析还在研究之中。由于在过程工业中运用大数据技术解决实际问题已经成为常态^[100],如何设计更有效的油水界面多传感器,采集更多有效的油水界面的多维数据,根据多维数据计算油水分布状况是今后研究的技术

重点和难点。

5) 油水界面测量系统建设向智能化方向发展。

现有的油水界面测量系统仍然比较简陋,一般只包含传感器测量模块和数据显示模块,没有实现大规模远程数据通信,没有强大的数据统计分析功能,没有美观的数据展示平台,没有可靠的油水界面监控中心。未来的油水界面测量系统将是一个集智能采集,智能通信,智能计算,智能展示,智能控制为一体的全方位大数据平台,为企业提供高效管理和精准预测^[101-105]。文献[47,64,102-105]对搭建油水界面智能化监测平台进行了部分研究,提出基于GPRS、Web Service等技术,利用.NET框架、WinCC组态软件和LabView图形化界面设计软件开发油水界面信息化监测平台。油水界面监测平台引入人工智能信息管理模式将大大提高智能化管理水平,如何实现无人值守和控制是油水界面智能化方向发展的技术难点。

4 结 论

油水界面测量技术的发展在石油化工行业发挥了巨大作用,为原油冶炼提供了技术支持和质量保障。本文对国内外使用的15种油水界面测量技术进行了测量原理和技术应用分析,并从3个方面进行分类总结;对油水界面测量4种计算方法进行了深入探讨;对油水界面测量技术的发展方向提出5个方面的展望。国外在油水界面测量技术的研究上起步早,具有一定优势,测量精度普遍较高,并在全世界范围内得到了推广应用,但他们研发的油水界面检测装置价格昂贵。相比而言,我国在油水界面测量技术上起步较晚,以技术引进为主,自主研发为辅,因此技术发展相对缓慢,不过我国研发的产品费用较低,也能基本满足我国原油储罐油水界面测量的需求。我们坚信随着国家综合国力与日俱增,国内需求日趋旺盛,我国自主研发的油水界面新技术、新装置、新系统一定会有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 雷群,翁定为,罗健辉,等. 中国石油油气开采工程技术进展与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 139-145.
LEI Q, WENG D W, LUO J H, et al. Achievements and future work of oil and gas production engineering of CNPC[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 139-145.

[2] 崔永丰. 大型油页岩矿井井工开采工艺设计[J]. 煤炭工程, 2014, 46(6): 16-18.
CUI Y F. Design on underground mining technology of large oil shale mine[J]. Coal Engineering, 2014, 46(6):

16-18.

[3] 吴应湘,许晶禹. 油水分离技术[J]. 力学进展, 2015, 45(6): 179-216.
WU Y X, XU J Y. Oil and water separation technology[J]. Advances in Mechanics, 2015, 45(6): 179-216.

[4] 曲艺,陈祥光. 原油储罐油量动态计量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(10): 998-1001, 1010.
QU Y, CHEN X G. A Research on the measurement of dynamic quantity of crude oil in storage tank[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(10): 998-1001, 1010.

[5] WANG SH D. Review on the trend for development of world's petroleum refinings industry[J]. China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, 2007(2): 11-15.

[6] JAWORSKI A J, MENG G T. On-line measurement of separation dynamics in primary gas/oil/water separators: Challenges and technical solutions-A review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 68(1-2): 47-59.

[7] BUKHARI S F A, YANG W Q. Multi-interface level sensors and new development in monitoring and control of oil separators[J]. Sensors, 2006, 6(4): 380-389.

[8] 王萍,刘尧,万凯. 密闭容器内两相液体的液位测量[J]. 天津工业大学学报, 2015, 34(5): 76-80.
WANG P, LIU Y, WAN K. Level detection of two-phase liquid in sealed container [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2015, 34(5): 76-80.

[9] 陈祥光,薛锦诚,傅若农. 储罐原油含水率在线测量及动态油量计量技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(6): 569-573.
CHEN X G, XUE J CH, FU R N. Study on computation technique in real time to dynamic oil quantity and measurement in online to water content ratio of crude oil tanks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(6): 569-573.

[10] 任开春,涂亚庆. 20余种液位测量方法分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2003(5): 12-16.
REN K CH, TU Y Q. Analyzing more than 20 methods relating to liquid level measurement [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2003(5): 12-16.

[11] 马世海,吴珂,李晓薇. 油-水两相界面测量技术综述[J]. 化工自动化及仪表, 2016, 43(12): 1233-1238.
MA SH H, WU K, LI X W. Reviews of technologies for oil-water interface measurement [J]. Control and

- Instruments in Chemical Industry, 2016, 43 (12): 1233-1238.
- [12] 陈靖, 徐世平, 吴秋林, 等. 吹气法在线测量脉冲萃取柱参数研究[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(z): 34-40.
CHEN J, XU SH P, WU Q L, et al. On-line measurement of pulsed column parameters by air purge[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2001, 35(z): 34-40.
- [13] 付艳玲. 沉降罐自动收油工艺改造试验[J]. 石油石化节能, 2018, 8(1): 11-13,7.
FU Y L. Automatic receiving process transformation test of sedimentation tank [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2018, 8(1): 11-13,7.
- [14] ARVOH B K, SKEIE N O, HAISTENSEN M. Estimation of gas/liquid and oil/water interface levels in an oil/water/gas separator based on pressure measurements and regression modelling [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 107: 204-210.
- [15] 白莹. 基于图像传感器的储罐液位测量系统的研制[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
BAI Y. Level measurement for a liquid tank based on image method [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012.
- [16] 齐永生, 宋生奎, 涂亚庆. 储油罐液位测量技术现状与发展趋势[J]. 石油工程建设, 2006, 32(4): 1-3,81.
QI Y SH, SONG SH K, TU Y Q. Developing situation and tendency of oil tank liquid level measurement[J]. Petroleum Engineering Construction, 2006, 32(4): 1-3,81.
- [17] 高春生. 油罐测量仪表的现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2000, 19(2): 44-45.
GAO CH SH. The tank measuring instrument—Status quo and development trend in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2000, 19(2): 44-45.
- [18] 吴科学, 姬晓露. FT-1000 系列浮子式储罐液位计的应用与维修[J]. 仪表技术, 2002(5): 49-50.
WU K X, JI X L. The application and maintain of FT-1000 series tank level gauge [J]. Instrumentation Technology, 2002(5): 49-50.
- [19] 袁艳艳. 基于热像仪的原油储罐多相界面检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
YUAN Y Y. The research on multi-phase interface detection of oil-tanks based on thermal imager [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [20] DEMORI M, FERRARI V, STRAZZA D, et al. A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water [J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2010, 163(1): 172-179.
- [21] LU G R, HU H, CHEN SH Y. A simple method for detecting oil-water interface level and oil level[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2010, 5(4): 498-500.
- [22] 叶世雄. 液位传感技术新进展[J]. 传感器技术, 1989(2): 9-10,24.
YE SH X. New development of liquid level sensing technology [J]. Journal of Transducer Technology, 1989(2): 9-10,24.
- [23] WANG H X, YIN W L, YANG W Q, et al. Optimum design of segmented capacitance sensing array for multi-phase interface measurement[J]. Measurement Science Technology, 1996, 7(1): 79-86.
- [24] 鲍云波. 榆树林油田原油集输工艺关键技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
BO Y B. Research on key technology in crude oil gathering & transportation process of Yushulin oilfield[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [25] 王永利. 电脱盐界位测量改造[J]. 石油化工自动化, 2009, 45(4): 81-82.
WANG Y L. Improvement of electric desalting boundary survey [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2009, 45(4): 81-82.
- [26] 孙英, 靳辉, 郑奕, 等. 磁致伸缩液位传感器检测信号影响因素分析及实验研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(11): 1607-1613.
SUN Y, JIN H, ZHENG Y, et al. Detective signal influence factor analysis and experimental research of magnetostrictive liquid level sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(11): 1607-1613.
- [27] 赵芳, 姜波, 余向明, 等. 磁致伸缩效应在高精度液位测量中的应用研究[J]. 仪表技术与传感器, 2003(8): 44-45.
ZHAO F, JIANG B, YU X M, et al. Applicability study on magnetostriction effect in high accuracy level measurement [J]. Instrument Technique and Sensor, 2003(8): 44-45.
- [28] 安宗权, 冷护基, 林宗良. 储罐液位检测技术的现状与展望[J]. 芜湖职业技术学院学报, 2005, 7(4): 9-10.
AN Z Q, LENG H J, LIN Z L. Review and prospect on the measurement technology of liquid level[J]. Journal of Wuhu Institute of Technology, 2005, 7(4): 9-10.

- [29] 李广余. HK 系列超声波油水界面测控仪[J]. 油田地面工程, 1989(1): 59-61,5.
LI G Y. HK series ultrasonic oil-water interface test-control device [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 1989(1): 59-61,5.
- [30] 郭海清, 石希天, 雷万能, 等. 声纳储油罐液位动态监测系统在塔里木油田试采现场的应用[J]. 钻采工艺, 2012, 35(6): 106-107.
GUO H Q, SHI X T, LEI W N, et al. Application of sonar oil tank level dynamic monitoring system in tarim oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(6): 106-107.
- [31] 彭勇, 张映辉. 光纤油水界面监控仪研制与应用[J]. 仪器仪表学报, 2005,26(8): 857-859.
PENG Y, ZHANG Y H. Applying and designing the controller of optical fiber oil interface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005,26(8): 857-859.
- [32] LEAL-JUNIOR A G, MARQUES C, FRIZERA A, et al. Multi-interface level in oil tanks and applications of optical fiber sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 40: 82-92.
- [33] BETTA G, IPPOLITO L, PIETROSANTO A, et al. An optical fiber based technique for continuous level sensing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(3): 686-689.
- [34] BETTA G, PIETROSANTO A, SEAGLIONE A. A digital liquid level transducer based on optical fiber[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 551-555.
- [35] BETTA G, PIETROSANTO A, SEAGLIONE A. A gray-code-based fiber optic liquid level transducer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1): 174-178.
- [36] WHITESEL H K, OVERBY J K, NEMARICH C P, et al. Fiber optic liquid level sensors for shipboard applications [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical, 1995,25(10): 146-157.
- [37] GHOSH A K, BEDI N S, PAUL P K. Low-cost optical liquid level sensors [J]. Advanced Photonic Sensors and Applications, 1999, 3897: 522-533.
- [38] TOTH F N, MEIJER G C M, VANDERLEE M. A planar capacitive precision gauge for liquid-level and leakage detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(2): 644-646.
- [39] 朱向东, 姜文东, 赵明, 等. 高精度油罐液位光纤测量技术应用[J]. 控制工程, 2004,11(3): 277-279.
ZHU X D, JIANG W D, ZHAO M, et al. Application of fiber accurate measuring technology for the level of oil tank [J]. Control Engineering of China, 2004, 11(3): 277-279.
- [40] 骆城, 余海湖, 郭会勇. 油水界面液位的光纤测量技术研究[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(3): 41-43.
LUO CH, YU H H, GUO H Y. Fiber optic sensing technique for monitoring oil-water interface [J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2015, 13(3): 41-43.
- [41] 任喜伟, 任工昌, 杨帆. 原油储罐油水界面监测与分析系统的开发及应用[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(10): 2640-2641,2672.
REN X W, REN G CH, YANG F. Development and application of monitoring and analysis system of oil-water interfaces in oil tank [J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20(10): 2640-2641,2672.
- [42] 任喜伟, 杨帆, 宋安玲. 基于 ZGL 双液位测量仪的原油罐油水界面监测系统 [J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(12): 126-128.
REN X W, YANG F, SONG AN L. Oil-water interface monitoring system of oil tank based on ZGL double level measuring instrument [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37(12): 126-128.
- [43] 吴文强, 张兆聪, 林鹰. 采用短波吸收法检测油水界面[J]. 油田地面工程, 1988,7(2): 28-33,5.
WU W Q, ZHANG ZH C, LIN Y. Use of short wave absorption method of determine oil-water surface [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 1988,7(2): 28-33,5.
- [44] 贺登辉, 陈森林, 白博峰. 基于 V 锥流量计压损比的湿气流相流量在线检测 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 235-244.
HE D H, CHEN S L, BAI B F. Online measurement of liquid flow rate in wet gas based on pressure loss ratio of V-cone flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 235-244.
- [45] 焦英芹, 龙永福, 王涛, 等. 沉降罐油水界面在线监测技术在油田的应用 [J]. 石油化工应用, 2010, 29(11): 54-58.
JIAO Y Q, LONG Y F, WANG T, et al. The application of sedimentation tank water-oil interfacial online monitoring technology in the oilfield [J]. Petrochemical Industry Application, 2010, 29(11): 54-58.
- [46] 陈勇智, 杜晓冬, 曾庆刚. 几种常用油水界面仪 [J]. 石油化工自动化, 2007(1): 65-66.
CHEN Y ZH, DU X D, ZENG Q G. Several common oil-water interface instruments [J]. Automation in Petrochemical Industry, 2007(1): 65-66.
- [47] 任喜伟, 何立风, 宋安玲. 电磁波油水液位监测系统

- 研究[J]. 仪表技术与传感器, 2017(11): 64-67,71.
- REN X W, HE L F, SONG AN L. Development of application of oil-water level monitoring system based on electromagnetic wave [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(11): 64-67,71.
- [48] 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展形势分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3145-3153.
- FAN J X, YANG J Y. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3145-3153.
- [49] 陈婧, 姚培芬, 梁法春, 等. 红外成像技术在储罐液位检测中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2008(6): 1-2.
- CHEN J, YAO P F, LIANG F CH, et al. Liquid level measurement using infrared thermography technology[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008(6): 1-2.
- [50] 孙正翔, 张国亮, 徐德强, 等. 基于红外热像仪的油罐液位测量系统设计[J]. 微计算机信息, 2010, 26(17): 1-2, 19.
- SUN ZH N, ZHANG G L, XU D Q, et al. Measurement system design of tank liquid level based on thermal imager[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(17): 1-2, 19.
- [51] 石宏臣, 张晓怀, 孙丰瑞, 等. 基于红外测温的油罐多相界面传热反问题识别方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 24-29.
- SHI H CH, ZHANG X H, SUN F R, et al. Inverse heat transfer algorithm for multi-phase interface detection of oil tank based on infrared imaging temperature measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S1): 24-29.
- [52] YANG W Q. Design of electrical capacitance tomography sensors [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4): 201-213.
- [53] 赵玉磊, 郭宝龙, 闫允一. 电容层析成像技术的研究进展与分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1909-1920.
- ZHAO Y L, GUO B L, YAN Y Y. Latest development and analysis of electrical capacitance tomography technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1909-1920.
- [54] ISMAIL I, GAMIO J C, BUKHARI S F A, et al. Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(2-3): 145-155.
- [55] YANG W Q. Sensors and instrumentation for monitoring and control of multi-phase separation [J]. Measurement and Control, 2006, 39(6): 178-184.
- [56] LIU SH, WANG H G, LI Y. Level measurement of separator by using electrical tomography sensor [C]. IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, 2018: 380-385.
- [57] CUI Z Q, WANG Q, XUE Q, et al. A review on image reconstruction algorithms for electrical capacitance/resistance tomography [J]. Sensor Review, 2016, 36(4): 429-445.
- [58] 彭黎辉, 陆耿, 张宝芬, 等. 电容成像技术及其应用[J]. 影像技术, 2005(2): 12-17.
- PENG L H, LU G, ZHANG B F, et al. Electrical capacitance tomography: state of the art [J]. Image Technology, 2005(2): 12-17.
- [59] WANG H X, XIN S, ZHANG X H. New progress of the digital electrical capacitance tomography system for gas/liquid two phase flow [C]. IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, 2009: 37-40.
- [60] 黄志尧, 赵昀, 王保良, 等. 电容层析成像两相流流型可视化系统[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(5): 458-461,482.
- HUANG ZH Y, ZHAO Y, WANG B L, et al. Two-phase flow pattern visualization system based on electrical capacitance tomography technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(5): 458-461,482.
- [61] 王海刚, 刘石, 杨五强, 等. 交流 ECT 测量系统在实际中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(1): 7-9,18.
- WANG H G, LIU SH, YANG W Q, et al. The usage of new AC-based capacitance tomography system in experiment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(1): 7-9,18.
- [62] LIU S, CHEN Q, WANG H G, et al. Electrical capacitance tomography for gas-solids flow measurement for circulating fluidized beds [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(2-3): 135-144.
- [63] 蔺权权, 张小平, 阳思远. 原油沉降罐在线改造中油水界面测量仪表的选型探讨 [J]. 石油化工自动化, 2018, 54(3): 71-73.
- LIN Q Q, ZHANG X P, YANG S Y. Discussion on type selection of oil-water boundary measuring instrument in on-line reform of crude oil settling tank [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2018, 54(3): 71-73.
- [64] 任喜伟, 何立风, 宋安玲. Web Service 在油水液位检测系统中的应用研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2018(11): 59-62,67.
- REN X W, HE L F, SONG AN L. Application of oil-

- water measuring system based on web service [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(11): 59-62, 67.
- [65] 任喜伟, 何立风, 宋安玲. 基于电磁波油水液位测量技术的仿真系统设计[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(1): 251-255.
- REN X W, HE L F, SONG AN L. Design of simulation system based on oil-water level measuring technique of electromagnetic wave [J]. *Computer Simulation*, 2018, 35(1): 251-255.
- [66] AL-NAAMANY A M, MERIBOUT M, AL BUSAIDI K. Design and implementation of a new nonradioactive-based machine for detecting oil-water interfaces in oil tanks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(5): 1532-1536.
- [67] 李一博, 靳世久, 孙墨杰, 等. 基于磁致伸缩效应的液体密度在线测量方法[J]. *天津大学学报*, 2004(4): 368-372.
- LI Y B, JIN SH J, SUN M J, et al. Liquid density on-line measuring based on magnetostriction effect [J]. *Journal of Tianjin University*, 2004(4): 368-372.
- [68] KHAN F A, YOUSAF A, REINDL L M. Design and FEM analysis of multi segment capacitive level sensor based on local and global E-fields [C]. *International Multi-conference on Systems Signals and Devices*, 2016: 136-140.
- [69] 李云. 基于多段式电容油水界面液位测量技术在储罐中的应用[J]. *石油化工自动化*, 2019, 55(2): 14-16, 67.
- LI Y. Application of oil-water interfacial liquid level measurement technology based on multistage capacitance in storage tanks [J]. *Automation in Petro-Chemical Industry*, 2019, 55(2): 14-16, 67.
- [70] DINCA A, NEBUNU D L, POPESCU M. Online monitoring and diagnosis of the liquid level in a tank through thermographic image processing [C]. *12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference of Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection (SGEM 2012)*, 2012, 3: 185-191.
- [71] HERZOG G, BENI V. Stripping voltammetry at micro-interface arrays: A review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, 769: 10-21.
- [72] 刘荣志. 远程分段式油罐自动计量系统的设计与实现[J]. *计算机科学*, 2011, 38(S1): 473-476.
- LIU R ZH. Design and implementation of automatic tank gauging system based on remote sectional technologies [J]. *Computer Science*, 2011, 38(S1): 473-476.
- [73] 任喜伟, 任工昌, 杨帆. 电磁场式油水界面测量分析及数据优化方法[J]. *化工自动化及仪表*, 2012, 39(7): 858-861.
- REN X W, REN G CH, YANG F. Oil-water interface analysis and data optimization methods of electromagnetic field-typed measuring device [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2012, 39(7): 858-861.
- [74] 任喜伟, 何立风, 宋安玲. 油水液位测量中数据优化算法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(10): 90-94.
- REN X W, HE L F, SONG AN L. Research on data optimization algorithm in oil-water level measurement [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(10): 90-94.
- [75] 任喜伟, 何立风, 姚斌, 等. 用于油水界面测量的中值预处理聚类算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(10): 161-168.
- REN X W, HE L F, YAO B, et al. Clustering algorithm with median pretreatment for oil-water interface detection [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(10): 161-168.
- [76] 刘远红, 习玉阳, 吴华远, 等. K-means 聚类算法在油水界面检测中的应用[J]. *化工自动化及仪表*, 2016, 41(1): 19-21.
- LIU Y H, XI Y Y, WU H Y, et al. Application of K-means clustering algorithm in oil-water interface detection [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2016, 41(1): 19-21.
- [77] 任喜伟, 何立风, 姚斌, 等. 油水界面测量过程中自适应阈值聚类优化算法[J]. *化工进展*, 2019, 38(2): 779-789.
- REN X W, HE L F, YAO B, et al. Clustering optimization algorithm with adaptive threshold for oil-water interface detection process [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(2): 779-789.
- [78] 杨帆, 张伟志, 张彩丽. 一种原油储罐界面参数的快速检测方法及其实现[J]. *化工自动化及仪表*, 2017, 44(8): 750-753.
- YANG F, ZHANG W ZH, ZHANG C L. A rapid detection method and its application in measuring crude oil tank interface parameters [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2017, 44(8): 750-753.
- [79] 任磊, 陈祥光, 刘春涛. 原油储罐油水界面测量方法的研究及应用[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(10): 2186-2191.
- REN L, CHEN X G, LIU CH T. Research and application of measurement method for oil-water interface in crude oil tank [J]. *Chinese Journal of Scientific*

- Instrument, 2008, 29(10): 2186-2191.
- [80] 李滚, 严发宝, 苏艳蕊, 等. 基于 CANNY 算子的自适应双阈值油罐液位红外成像检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(9): 44-50.
LI G, YAN F B, SU Y R, et al. Detection of IR imaging of auto-adaptive double-threshold tanks' level based on Canny operator[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(9): 44-50.
- [81] AOYAFI M, HIRAGURI T, UENO T. Detection of the boundary between oil and water in a container by dynamic heat conduction[J]. Insight, 2014, 56(1): 15-20.
- [82] 王海亮, 范春利, 孙丰瑞, 等. 二维内部缺陷的红外瞬态定量识别算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1714-1720.
WANG H L, FAN CH L, SUN F R, et al. Transient quantitative infrared thermographic identification of two dimensional inner defect [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1714-1720.
- [83] ZHAO L, ZHANG G W, ZHANG Q, et al. Multi-point temperature monitoring system for the LNG storage tank[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 511-512: 282-285.
- [84] 陈德运, 于晓洋, 赵霞, 等. 油水两相流电容层析成像系统电容测量电路的设计[J]. 电路与系统学报, 2004(4): 107-109.
CHEN D Y, YU X Y, ZHAO X, et al. A novel circuit for measuring oil-water two-phase flows using electrical capacitance tomography system[J]. Journal of Circuits and Systems, 2004(4): 107-109.
- [85] 王丕涛, 王化祥, 孙犇渊. 基于内阵列电极的 ECT/ERT 双模态成像[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(4): 311-317.
WANG P T, WANG H X, SUN B Y. ECT/ERT dual-modality tomography based on inner electrode array[J]. Journal of Tianjin University, 2015, 48(4): 311-317.
- [86] WARSITO W, MARASHDEH Q, FAN L S. Electrical capacitance volume tomography [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(4): 525-535.
- [87] SOLEIMANI M, WANG H G, LI Y, et al. A comparative study of 3D electrical capacitance tomography[J]. International Journal of Information and Systems Sciences, 2007, 3(2): 292-306.
- [88] DENG X, CHEN D X, YANG W Q. Study on electrodynamic sensor of multi-modality system for multiphase flow measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(12): 124701.
- [89] LI Y, YANG W Q. Measurement of multi-phase distribution using an integrated dual-modality sensor[C]. IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, 2009: 330-334.
- [90] 陈德运, 李谋遵, 师国臣, 等. 油水两相流 ECT 系统电场特性数值分析及参数优化[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1434-1438, 1488.
CHEN D Y, LI M Z, SHI G C, et al. Numerical analysis of electrical field characteristics and parameter optimization for electrical capacitance tomography system of oil/water two-phase flows [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7): 1434-1438, 1488.
- [91] BUKHARI S F A, YANG W Q, MCCANN H. A hybrid control strategy for oil separators based on electrical capacitance tomography images [J]. Measurement and Control, 2007, 40(7): 211-217.
- [92] LI Y, YANG W Q, XIE CH G, et al. Gas/oil/water flow measurement by electrical capacitance tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7): 074001.
- [93] WANG Q, WANG M, WEI K, et al. Visualization of gas-oil-water flow in horizontal pipeline using dual-modality electrical tomographic systems [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8146-8156.
- [94] PERERA K, PRADEEP C, MYLVAGANAM S, et al. Imaging of oil-water flow patterns by electrical capacitance tomography [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 56: 23-34.
- [95] WANG Q, POLANSKY J, WANG M, et al. Capability of dual-modality electrical tomography for gas-oil-water three-phase pipeline flow visualization [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 62: 152-166.
- [96] 邸智, 李纬, 张鹏, 等. 使用导波雷达液位计测量两相混合液位的研究[C]. 第十四届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室 2015 年度学术年会论文集, 2015: 1-7.
DI ZH, LI W, ZHANG P, et al. Measurement of two-phase mixture level by using guided wave radar[C]. The 14th National Academic Conference on Reactor Thermal Fluids and the Academic Annual Meeting of the Key Laboratory of Thermal and Hydraulic Technology for Central Nuclear Reactors in 2015, 2015: 1-7.
- [97] 宿鑫. 混合式油罐计量系统在油库中的应用[J]. 石油库与加油站, 2010, 19(5): 20-21, 47.
SU X. The application of hybrid inventory measurement system in oil depot[J]. Oil Depot and Gasstation, 2010, 19(5): 20-21, 47.
- [98] HE L F, REN X W, GAO Q H, et al. The connected-

component labeling problem: A review of state-of-the-art algorithms[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 70: 25-43.

- [99] HE L F, REN X W, ZHAO X, et al. An efficient two-scan algorithm for computing basic shape features of objects in a binary image[J/OL]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2016, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11554-016-0626-7>.
- [100] 苏鑫, 吴迎亚, 裴华健, 等. 大数据技术在过程工业中的应用研究进展[J]. *化工进展*, 2016, 35(6): 1652-1659.
- SU X, WU Y Y, PEI H J. Recent development of the application of big data technology in process industries[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(6): 1652-1659.
- [101] WU AI P, PEI Y L, HE X Y, et al. Remote detection system for oil-water interface in small hole with automatic calibration [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2017, 12(7): 666-673.
- [102] 刘尊民, 林海波, 仪垂杰. 基于 I^2C 的油罐界位监测系统[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 9(5): 53-57.
- LIU Z M, LIN H B, YI CH J. Design of a tank oil-water interface measuring system based on I^2C [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2014, 9(5): 53-57.
- [103] 程南, 程远, 汤国强. 基于单片机的油水界面监测[J]. *化工自动化及仪表*, 2013, 40(2): 174-175, 195.
- CHENG N, CHENG Y, TANG G Q. MCU-based detection of oil-water interface [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2013, 40(2): 174-175, 195.
- [104] 柯愈龙, 张生昌, 邓鸿英, 等. 基于GPRS的原油计量站远程监控系统[J]. *轻工机械*, 2013, 31(2): 56-59.
- KE Y L, ZHANG SH CH, DENG H Y, et al. Remote monitoring and control system for oil quantity station based on GPRS [J]. *Light Industry Machinery*, 2013, 31(2): 56-59.
- [105] 吴爱平, 阳俊, 张星. 基于LabVIEW的油水界面监测系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2011(12): 46-48.

WU AI P, YANG J, ZHANG X. Design of detecting system for oil-water interface based on LabVIEW [J].

Instrument Technique and Sensor, 2011 (12): 46-48.

作者简介



任喜伟, 2004年和2007年分别于陕西科技大学获得学士和硕士学位, 现为陕西科技大学博士在读研究生、高级工程师, 主要研究方向为智能检测技术、数据挖掘、模式识别与图像处理。

E-mail: renxiwei@126.com

Ren Xiwei received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Shanxi University of Science and Technology in 2004 and 2007, respectively. He is currently a Ph. D. candidate and a senior engineer at Shanxi University of Science and Technology. His main research interests include intelligent detection technology, data mining, image processing, and pattern recognition.



何立风(通信作者), 1982年于西北轻工业学院获得学士学位, 1986年于西安交通大学获得第二学士学位, 1994年和1997年分别于日本名古屋工业大学获得硕士和博士学位。现为陕西科技大学和爱知县立大学教授、博士生导师、IEEE高级会员, 主要研究方向为智能图像处理、计算机视觉、自动推理、模式识别、字符串搜索和人工智能。

E-mail: helifeng@ist.aichi-pu.ac.jp

He Lifeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northwest Institute of Light Industry in 1982, received his second B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1986, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree in AI and computer science from Nagoya Institute of Technology in 1994 and 1997, respectively. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Shanxi University of Science and Technology and Aichi Prefectural University. He is an IEEE senior member. His main research interests include intelligent image processing, computer vision, automated reasoning, pattern recognition, string searching, and artificial intelligence.