

CO₂ 输送管道智能化技术现状及展望浅析

马 赞 马俊章 卜馨宇

(中国石油新疆油田公司工程技术研究院)

摘 要 在全球积极应对气候变化和国内“双碳”战略目标的导向下, CCUS 被广泛认为是实现全球温控目标和我国碳中和远景不可或缺的关键性技术之一, 而 CO₂ 从起源地输送到利用地, 是实现 CCUS 产业技术目标的关键环节。CO₂ 的输送方式主要分为管道输送、汽车输送和船舶输送几种方式, 本文主要以管道输送方式为主, 概述了 CO₂ 输送管道相态分类及存在的相关问题, 结合国内外管道智能化技术发展现状梳理了人工神经网络技术、分布式光纤技术、特征波谱技术等 CO₂ 管道腐蚀速率预测及泄漏监测中应用; 在此基础上, 探索了 CO₂ 输送管道在智能化建设的发展方向, 为智能管道的持续发展提供参考。

关键词 CO₂ 输送管道; 智能化; 腐蚀速率预测; 泄漏监测

在众多温室气体减排技术中, 碳捕集、封存与利用(CCUS)技术是指将工业生产或其他排放源中的 CO₂ 分离出来, 直接储存或者经过加工后注入新的生产过程中来达到减少 CO₂ 排放的技术, 是未来极具潜力、有效的温室效应解决方案, 对于减缓全球气候变化、推进低碳发展也具有重要的意义。其中, 管道在输送 CO₂ 时具有较高的经济性。国外已建成 CO₂ 管道约 6000km, 主要分布在美国、加拿大、挪威、土耳其等。国内 CO₂ 管道发展相对缓慢。2023 年, 齐鲁石化~胜利油田 CCUS 示范项目 CO₂ 输送管道全线贯通, 未来 CO₂ 运输管道将在我国逐步实现规模化应用。随着物联网、云计算、大数据等新一轮信息技术的快速发展和深入应用, 工业制造逐步向智能化发展。CO₂ 输送管道作为 CCUS 的重要组成部分, 正积极探索发展智能管道, 全力打造智慧 CCUS。

1 CO₂ 管道输送相态及面临的问题

1.1 CO₂ 管道输送相态分类

CO₂ 在常温常压下为气态, 密度为 1.977g/L (标况)。根据温度、压力的不同, CO₂ 管道输送可分为五种相态区(图 1、表 1)。

当 CO₂ 以气相输送时, 需在管道入口及沿线设置增压设备以减少输送过程中的压降, 控制压力应小于临界点压力(7.38MPa); 还需通过热力学计算公式确定沿线温降, 必要时还需敷设管道保温层防止 CO₂ 液化。气相输送对管材和耐压等级

要求不高, 但由于气相 CO₂ 密度较低, 同一输量条件下所需管道尺寸较大, 该方法适用于短距离、小输量 CO₂ 输送。

当 CO₂ 以液相输送时, 需要在管道入口及沿线设置增压设备克服沿程摩阻损失和地形高差; 需在增压后对 CO₂ 进行冷却防止输送过程中发生气化; 还需通过热力学计算公式确定沿线温降变化, 确定管道是否需要敷设保温层防止 CO₂ 气化(出现气液两相流)或者固化(出现干冰)。该方法适用于小输量、短距离 CO₂ 输送。

当 CO₂ 以密相输送时, 管道压力应高于临界压力(7.38 MPa), 温度应低于临界温度(31.4℃), 密度高于同温度下的液态 CO₂, 输送过程中当管道温度升至环境温度后, 不会发生相态变化, 对管道入口温度要求不高。因此, 密相输送时管道压降比超临界输送和液相输送低, 建设成本远低于气相输送和液相输送。

当 CO₂ 以超临界态输送时, 管道压力及温度应始终高于临界压力(7.38MPa)和临界温度(31.4℃)。CO₂ 经增压及加热, 将温度提升至临界温度以上, 为防止在输送过程中因温降而发生相变, 对于长距离输送管道需在沿线部署相应加热装置。由于 CO₂ 在超临界状态下具有低黏度、高密度的特点, 且杂质对温降和压降的影响较小, 在实际应用中长距离 CO₂ 输送管道多采用该方法, 但建设成本高于密相输送(图 1、表 1)。

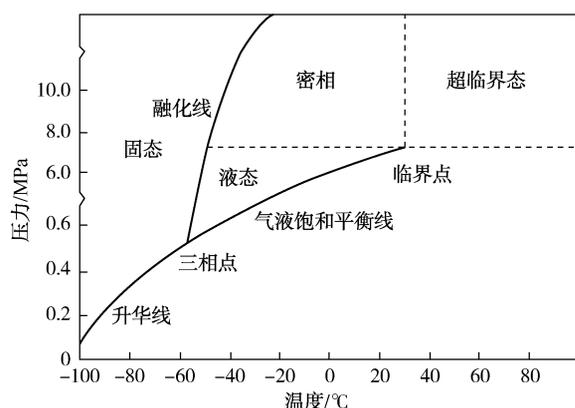


图 1 CO₂管道输送相态图

表 1 CO₂管道相态分类表

分类	压力, P/MPa	温度, T/°C
超临界区	$P \geq 7.38$	$T \geq 31.4$
密相区	$P \geq 7.38$	$-56 \leq T \leq 31.4$
液相区	$P \leq 7.38$	$-56 \leq T \leq 31.4$
气相区	$P \leq 7.38$	$T \geq -56$
固相区	—	$T \leq -56$

注: 临界点压力为 7.38MPa, 温度为 31.4°C。

1.2 CO₂管道输送面临的问题

由于 CO₂的相态特性复杂, 较易出现物性参数变化, 影响管道安全运行。例如: CO₂管输中存在的游离水会对管道和设备造成严重腐蚀, 而且介质中含有多类杂质, 也会对管输最低含水量产生影响。大量资料中发现已有的腐蚀速率预测模型未考虑复杂组分腐蚀产物沉积影响, 缺乏含杂质 CO₂腐蚀速率预测模型和腐蚀产物膜内部孔隙结构的定量化验证。

CO₂管道泄漏也会影响管道安全运行。泄漏分为近场射流和远场扩散两个过程, 目前缺乏关于超临界 CO₂泄漏近场水力热力特性的研究。对于 CO₂管道泄漏远程扩散特性, 国外对 CO₂泄漏扩散的实验研究较多, 国内 CO₂泄漏扩散特性实验的报道较少。

此外, 若 CO₂输送过程中进行放空作业或发生泄漏, 还会因 CO₂强节流效应, 使管道局部低温而产生干冰, 也会诱发管道脆性断裂; 泄压时在管道内产生减压波可能引发管道裂纹扩展, 增大管道破坏程度。

2 智能化技术在 CO₂管道中的应用

针对 CO₂管道输送面临的主要问题(腐蚀、泄漏、断裂等), 查阅相关资料未找到断裂方面

的相关智能化应用技术, 以下主要介绍解决腐蚀、泄漏等问题的相关智能化技术。

2.1 人工神经网络技术

由于 CO₂腐蚀速率受温度、压力、流速等多因素的相互影响, 属于复杂的非线性问题, 可通过人工神经网络(ANN)预测 CO₂腐蚀速率, 并根据腐蚀程度采取相应的防腐措施。以下几种常用的人工神经网络技术。

2.1.1 BP 神经网络(BPNN)

BPNN 是通过自学习及自适应, 将计算误差反向传播来不断调整权值和阈值的数值大小, 使总体预测结果的误差达到理想情况, 从而实现对任意非线性函数的无穷逼近, 是最常用的人工神经网络技术之一。通常是与智能算法相结合进行 CO₂腐蚀速率预测来解决预测精度较低、收敛速度慢、易出现局部极值点等问题。例如: 万里平等利用遗传算法(GA)+BPNN 使平均相对误差由 10.00%降到 8.60%; 刘钊等利用小生境遗传算法(Niche GA)+BPNN 使相对误差小于 2.00%。

2.1.2 小波神经网络(WNN)

WNN 是在 BPNN 的结构基础上结合 Morlet 小波基函数, 将 ANN 的强鲁棒性和小波变换相结合, 通过时频局部性和多分辨率功能, 降低模型出现局部极值的概率, 实现较好的逼近和容错能力。WNN 也与智能算法相结合对模型中的未知参数进行优化来进一步降低陷入极值的概率和提高预测的精度。陈柚州等建立了人工蜂群算法(ABC)+WNN、郑俊褒等建立蛙跳算法(SFLA)+WNN 模型, 其预测结果都更加接近真实值。

2.1.3 径向神经网络(RBFNN)

RBFNN 相对于 BPNN 计算过程简单、时间较短、无反向计算。陈翀等采用主成分分析法(PCA)+RBFNN 进行非线性数据处理, 得出平均相对误差由 14.33%减少到 9.27%; 此外, 在 RBFNN 网络结构上改造提出了广义回归神经网络(GRNN)。骆正山等先后提出了粗糙集算法(RS)+粒子群算法(PSO)+GRNN 及天牛须搜索算法(KPCA-BAS)+GRNN 来处理非线性问题, 均体现出较高的预测精度。

2.1.4 人工神经网络技术对比

综上所述, 4 种 ANN 在解决非线性问题中在网络结构、隐含层函数等方面存在差异, 导致所需的预测条件和预测结果等方面各不相同。将其特点及缺点进行对比分析见表 2。

表 2 人神经网络对比表

名称	分类	缺点
BPNN	隐含层采用 logsig、tansig 函数函数；可通过反复学习降低预测误差，解决任意多自变量与多因变量的非线性关系	收敛速度慢、预测精度较低、易陷入局部极值点，需结合智能算法实现优化
WNN	隐含层采用小波函数；更快的收敛速度和更强的泛化能力；可通过反复学习降低预测误差	预测结果的精确性依赖于输入样本的有效性；当关联度较低时，训练时间长、易陷入局部极值和震荡性强
RBFNN	隐含层采用高斯函数；没有反向传播过程；计算过程简单、训练时间短，小样本预测精度较高	函数中心值及宽度值较难确定
GRNN	计算过程简单、学习速度快、调整参数少、全局收敛性好；易于与智能算法结合；在小样本预测精度较高	由于将学习样本当作函数中心，并且取消了权值，只保留了未知变量函数宽度，因此，较难确定函数宽度值

2.2 分布式光纤定位技术

光纤传感技术是以光波为载体，光纤为媒介，利用光纤光栅响应周围环境以获得光散射信号的变化，进而准确定位信号突变部位的一种监测技术。在光纤传感系统中，光源为光纤传感器提供载波，光源发出的光在光纤中进行传输，由于光纤本身存在的非线性效应，在光传输的光纤

路径上产生背向散射光(图 2)，在光纤的某位置处，光纤受到外界物理量(温度、应变、振动等)的影响，内部的背向散射光波参数(光强、波长、相位等)被调制，成为被调制的光信号，通过光探测器检测出被调制的光波参数，从而获得被测的外界物理量。该技术在长输油气管道等工程中已有应用。

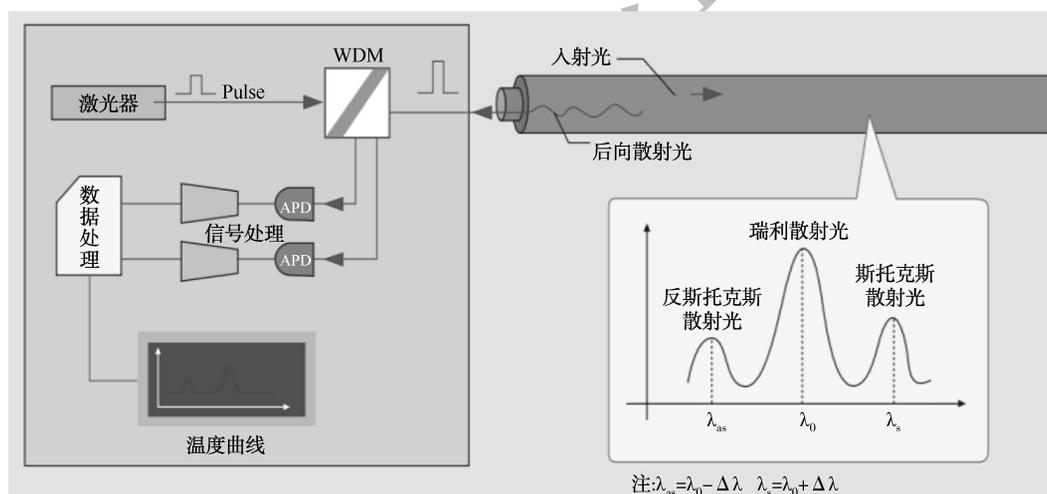


图 2 分布式光纤定位技术

当 CO₂管道输送过程发生局部泄漏时，释放的高压 CO₂对局部环境产生温降、振动等多重作用，会在光纤传感信号中得以体现。与油气长输管道相比，CO₂泄漏导致的温度场分布变化更为明显，沿管道外壁铺设的分布式光纤温度传感器可以连续监测温度的变化，当温度变化超过阈值范围时，可判断管道发生了泄漏，有利于泄漏点的精准定位。此外，利用分布式光纤传感技术，通过设置相应的阈值信号，可判断出管道内水游离水、段塞流、水合物等的发生部位，进而获得管道外壁的热流、微振动等信号，为现场管理及

安全预警提供可靠依据。

2.3 特征波谱定位技术

当 CO₂管道发生泄漏时，泄漏点处的 CO₂流体在管道内外压差作用下形成湍流并产生喷流声。泄漏声信号是由流体激发的连续信号，包含泄漏孔径大小、破损形状以及位置等泄漏特征信息。根据声波的性质不同，泄漏声波监测方法主要分为超声波法与次声波法。

超声波法是指通过寻找泄漏声波中的超声波强度最大点进行泄漏定位，灵敏度较高，但传播过程信号衰减较快，需在管线中放置多个超声波

传感器进行泄漏监测，主要应用于短距离的泄漏监测；

次声波法是指通过测量泄漏时产生的次生信号到达管道两端传感器的时间差，并配合波速来

估算泄漏点的位置；由于次声波频率较低，在传播过程中不易衰减，但易受到环境噪声影响，主要应用于长距离的管道泄漏监测(图3)。

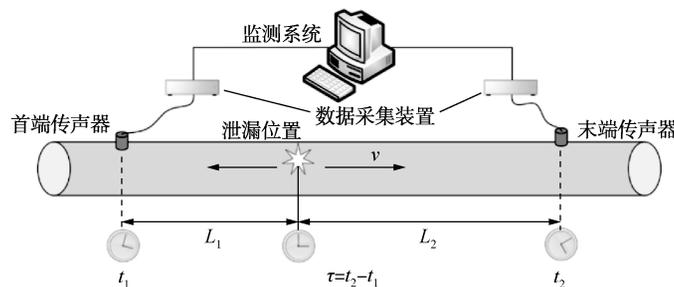


图3 次声波管道泄漏监测示意图

除声波法之外，负压波法也是管道泄漏监测与定位的常用方法。当管道发生泄漏时，由于管内压力大于管外压力，管内介质由于压差作用快速向外喷涌，泄漏点附近的局部压力会瞬间降低，产生瞬时压降，这种压力波动即为负压波。负压波会从泄漏点向管道两端传播，利用安装在管道两端的高频动态压力传感器监测到的时间差，结合负压波的波速估算定位泄漏点位置。由于管输过程中的停泵、关阀等操作会形成压力波动，负压波法会产生误报现象；此外，对管道微小泄漏反应不灵敏，较易产生漏报现象(表3)。

表3 特征波谱泄漏监测定位技术对比表

	次声波法	超声波法	负压波法
灵敏度	较高	较高	中等
定位精度	较高	较高	中等
误报率/漏报率	较低	较低	较高
成本费用	低	高	低

2.4 机器人巡检技术

目前，机器人巡检技术主要应用在海底CO₂管道泄漏监测定位。通过光谱/波谱法采集管道泄漏事件的定性数据，需要机器人对可疑区段进行沿线巡检；利用机器人配置的传感器(声学、光学、温度等)，获得管道泄漏的定量数据。机器人在海底工作时，还需要潜航器或维修船等配合，联合完成海底管道的巡检和维修工作。相关资料显示，机器人可与人工智能技术结合，适时自主开展常规巡检任务，获取信息并同步传输至终端控制平台。

3 关于CO₂管道智能化发展的探索

3.1 加强单项关键技术攻关，夯实CO₂管道智能化建设根基

智能管道建设不但需要有信息技术、数字技术的助力加持，而且还需要管道专业领域单项关键技术的创新突破。例如：管道泄漏包括小孔泄漏和全尺寸断裂，由于CO₂属于高压高浓度输送介质，且包含CO、SO_x、NO_x和H₂S等杂质，会影响CO₂输送的临界压力和临界温度；此外，若存在自由水相会对管道产生强腐蚀性。学者 Yan Y et al 提出根据CO₂泄漏后在管道中的不同流量值，研究出用于泄漏检测的低频声发射智能化传感器，该传感器可基于不同声波频率智能定位泄漏点位置，判断泄漏点的大小和距离。

此外，由于目前国内对由相态变化所造成的管道输送风险还未有足够的认识。因此，围绕CO₂管道输送过程材料的选择和裂纹扩展的安全控制、风险预警、应急管理以及投运和故障停输再启动等相关智能化技术，还需有待进一步研究完善。

3.2 深度融合数据与模型，协同构建CO₂管道数字孪生体

CO₂管道数字孪生体分为构建、应用两个阶段，与实体CO₂管道资产的设计、施工、运行维护、退役封存的全过程保持同步。在系统平台实现孪生体构建，通过物联网采集运行参数实现数字孪生体的数据实时更新，并支持分析、仿真、优化、预测等功能。

CO₂管道数字孪生体构建主要包含新建管道的数字化移交和在役管道的数据逆向建模，通过

对实体管道在可研、设计、采购、施工各阶段进行全面连续地数字化三维建模,实现数字孪生体的数据模型初始构建。利用数字化交付资产静态数据及管道动态数据等,并综合应用多种机理模型和人工智能算法,精确预测多因素共同作用下的CO₂管道输送过程、管体及设备风险的变化趋势,快速诊断引发事故事件主要原因,为CO₂管网运行优化和可靠度动态平衡提供“数据+算法”基础。

在标准统一和数字化的基础上,构建CO₂管道数字化云设计平台,通过“端+云”的体系架构,满足不同设计单位、业主单位的异地协同设计、审查及设计管理需求,大幅提高项目设计质量、效率,便于业主高效的进行设计管。

3.3 缔造智慧管网中枢,推动CO₂管道智能化向更高层次发展

通过传感测量、遥感技术、无人机、物联网等先进方法积累CO₂管道海量多维数据,结合人工神经网络、支持向量机、深度学习等智能算法,重点分析与挖掘数据价值,制定科学判断及最优决策,与管道专业理论、技术有机结合,实现CO₂智慧管网具备自主判断、自适应学习与智能决策能力。

在CO₂管道安全方面,基于先进算法,通过视频画面智能识别捕获现场的不安全行为;通过对光纤振动信号的智能分析及时预警外部干扰;通过对管道内外检测信号的大数据分析准确定位与评估焊缝缺陷的位置及风险等级;在CO₂管道关键设备管理方面,根据不同故障类型建立失效数据库,通过对现场多源监测数据进行挖掘分析,给出设备健康评估结果及潜在故障诊断说明,降低运行风险。

4 结论

(1) 神经网络是目前对CO₂长输管道腐蚀速率进行预测最理想的方法,并且与多种智能算法相互结合可以有效解决长输管道CO₂腐蚀带来的安全问题。

(2) 光纤传感、特征波谱等技术属于事故感知型监测手段,用于实时或在短时间内判断泄漏发生位置,在实施过程中,还需结合多种技术手段或者智能算法联合运用才能准确定位事故。

(3) 加快CO₂管道业务与数字孪生体、大数据、人工智能等新技术的融合发展,实现管道智

能化运营和全生命周期管理,提升CO₂长输管道的安全运行。

(4) CO₂长输智能管道建设工作应循序渐进,做好需求分析,稳步推进,逐步实现智能应用;此外,应加强人员队伍建设,打破固有思维定式,完善现有管理模式,适应未来CO₂智能管道、智慧管网发展需求。

参 考 文 献

- [1] 陆诗建,等.CO₂管道输送技术进展与未来发展浅析[J]. 南京大学学报(自然科学) 2022, 58(6): 944-952.
- [2] 胡其会,等.“双碳”战略下中国CCUS技术现状及发展建议[J]. 油气储运 2022, 41(4): 361-371.
- [3] 丛轶颖.CO₂管道输送技术研究[J]. 当代石油化工 2023, 31(10): 35-39.
- [4] 胡永乐,等.CCUS产业发展特点及成本界限研究[J]. 油气藏评价与开发 2020, 10(3): 15-22.
- [5] 米剑锋,等.中国CCUS技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报 2019, 39(9): 2537-2543.
- [6] 郭晓璐,等.超临界CO₂管道泄漏特性研究进展[J]. 化工学报 2020, 71(12): 5340-5442.
- [7] 殷布泽,等.CO₂管道泄漏减压特性与裂纹扩展研究现状及发展趋势[J]. 油气储运 2023, 42(9): 1042-1054.
- [8] 万里平,等.基于遗传算法优化BP神经网络预测CO₂/H₂S环境中套管钢的腐蚀速率[J]. 腐蚀与防护 2017, 38(9): 727-736.
- [9] 刘钊,等.基于Niche GA的BP神经网络评价天然气集输管道腐蚀[J]. 化学工程与装备 2011, (9): 28-30.
- [10] 陈哲,冯天瑾.小波分析与神经网络结合的研究进展[J]. 电子与信息学报, 2000, 22(3): 496-504.
- [11] 陈柚州,等.基于人工蜂群优化小波神经网络的隧道沉降预测[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 56-61.
- [12] 郑俊褒,饶珊珊.改进蛙跳算法的小波神经网络短时交通流预测[J]. 软件导刊, 2019, 19(4): 16-21.
- [13] 陈翀.智能建模方法在埋地油气管道腐蚀速率预测中的应用[D]. 福州:福州大学, 2016.
- [14] 骆正山,等.基于RS-PSO-GRNN的埋地管道土壤腐蚀预测[J]. 材料保护, 2018, 51(8): 47-53.
- [15] 韩立锋,等.混合干涉型分布式光纤天然气管道泄漏检测及定位对策分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(24): 44-46.
- [16] HO M, El-BORGI S, Patil D, SONG G. Inspection

- and monitoring systems subsea pipelines: A review paper [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(2): 606-645.
- [17] LANG X, et al. A small leak localization method for oil pipelines based on information fusion[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(15): 6115-6122.
- [18] 王阳. 基于次声波的供热管道泄漏监测方法研究及应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
- [19] HEN Q, et al. Effect of rubber washers on leak location for assembled pressurized liquid pipeline based on negative pressure wave method[J]. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018, 119: 181-190.
- [20] 王子明, 李清平, 李姜辉, 等. 海洋 CO₂ 管道输送技术现状与展望[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(6): 1-18.
- [21] 熊明, 等. 在役油气管道数字孪生体的构建及应用[J]. *油气储运*, 2019, 38(5): 503-509.
- [22] 沈沉, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. *全球能源互联网* 2020, 3(1): 1-13.
- [23] 蔡永军, 等. 智慧管道总体架构设计及关键技术[J]. *油气储运* 2019, 38(2): 121-129.
- [24] 钱建华, 等. 管道智能化管理的发展趋势及展望[J]. *油气储运* 2021, 40(2): 121-130.
- [25] 王振声, 等. 中俄东线天然气管道智能化关键技术创新与思考[J]. *油气储运* 2020, 39(7): 730-739.
- [26] 熊小琴, 杨君, 程猛猛, 等. 原油输配系统优化及应用[J]. *新疆石油天然气* 2021, 17(3): 74-78.
- [27] 李骆灵, 李义常, 魏立尧. 元宇宙技术群与量子计算赋能 CCUS 研究现状及趋势[J]. *新疆石油天然气*, 2023, 19(3): 86-93.
- [28] 樊玉新, 李泓洲, 段胜男, 等. 太阳能高温光热技术赋能浅层超稠油低碳开发[J]. *新疆石油天然气*, 2023, 19(4): 82-87.
- [29] 祝守丽, 祁明业, 黄波, 等. 克一独反输管线运行优化研究[J]. *新疆石油天然气*, 2021, 17(2): 82-87.
- [30] 李宏波, 罗平亚, 白杨, 等. 机器学习算法概述及其在钻井工程中的应用[J]. *新疆石油天然气*, 2022, 18(1): 1-13.