

长输原油管道运行能耗优化与节能技术研究

黄 伟

国家石油天然气管网有限公司云南公司 750000

【摘要】：随着全球能源需求的持续增长与碳中和战略的深入推进，长输原油管道作为石油资源的核心输送命脉，其经济性与低碳化运行日益成为行业焦点。当前管道运营普遍面临高昂能耗压力，动力与热力系统消耗巨大，不仅直接推高运营成本，也带来显著的碳排放。与此同时，国际能源格局深刻演变、国内“双碳”目标刚性约束，以及企业降本增效的内在需求，共同构成了推动管道行业向绿色、高效转型的强劲驱动力。在此背景下，深入探究管道运行能耗的本质特征与节能潜力，已成为一项兼具紧迫性与战略性的重要课题。

【关键词】：长输原油管道；运行能耗优化；节能技术

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.034

引言

开展长输原油管道运行能耗的系统性研究，对于保障国家能源安全、促进产业绿色转型具有重要现实意义。从经济视角审视，能耗优化是管道企业降低运营成本、提升核心竞争力的直接路径。从环境维度观之，节能即减排，是油气行业应对气候变化、履行社会责任的关键举措。更为深远的是，该研究有助于推动管道运行从传统经验模式向以数据与模型驱动的精益化、智能化模式跃迁，为构建更富韧性、更可持续的现代能源输送体系提供坚实的技术与管理基础，对行业长远发展具有基石性作用。

1 长输原油管道能耗特征

长输原油管道的能耗特征呈现集中性、复杂性与动态性。其能耗高度集中于动力与热力两大系统。动力系统能耗占总能耗的绝大部分，主要源于沿途各泵站为克服原油流动的沿程摩擦阻与局部阻力所消耗的电能或燃料能，表现为输油泵机组的高功率运行。热力系统能耗则针对高凝点、高黏度原油，通过加热炉或热站提供热能，以维持原油高于析蜡点或反常点的输送温度，防止凝管事故，该部分能耗受地温与季节性气候影响显著。能耗构成不仅包括直接用于输送的有效功，还包含设备自身机械损耗、电机与泵的效率损失、管线散热以及站内辅助系统的消耗。整个系统的能耗水平并非固定，而是随输量、油品物性、运行方案及环境条件的动态变化呈非线性波动，表现出显著的时变特征。因此，管道运行本质上是一个多变量耦合的复杂能量耗散过程。

2 长输原油管道能耗的影响因素分析

2.1 输送工艺参数与运行方案的耦合影响

输送工艺参数是能耗最直接的决定因素。核心矛盾在于输

送流量与系统压降的非线性关系，在低输量工况下，为维持最低安全输量所需的节流调节或再循环将导致巨大的无效功耗。运行方案的选择，特别是泵组的启停组合、泵转速调节策略以及加热站出口温度的设定，直接决定了整个管网的压力分布与热量供给。不合理的泵组合会导致部分泵工作在低效区，甚至需要通过节流阀消耗多余压头，造成能量浪费。加热温度设定过高会大幅增加燃料消耗，而设定过低则可能因黏度急剧上升导致摩阻损失激增，同样不经济。各站场运行参数的协同性差，未能实现全管网的整体能量优化，是导致运行能耗居高不下的主要管理原因。

2.2 原油物性及流变性时变特性影响

原油的物性，尤其是黏温特性与凝点，是决定输送模式与能耗基础的根本因素。对于含蜡原油，其黏度随温度降低呈指数关系上升，导致管道水力摩阻剧烈增加。在运行过程中，原油的流变性会因剪切历史、温降历程以及蜡晶的析出、聚集而发生复杂变化，形成非牛顿流体特性，使得摩阻预测与控制更为困难。不同批次或混输油品物性的差异，会导致管道水力与热力条件频繁波动，迫使运行参数不断调整，难以维持在最优工况点。同时，原油在管道输送过程中因蜡沉积导致的管壁结蜡，会显著减小有效管径，增加沿程阻力，是运行后期能耗持续攀升的一个重要诱因。

2.3 管道本体状态与设备效率衰减问题

管道系统自身的物理状态是能耗的硬件基础。随着运行年限增长，管道内壁腐蚀、结蜡层和沉积物的不均匀附着，会改变管壁绝对粗糙度，使得实际水力摩阻系数远高于设计值。

作者简介：黄伟，1982年3月，男，汉族，国家石油天然气管网有限公司云南公司，工程师，从事天然气管道，成品油、原油管道长输运行，管道项目建设管理多年。

输油泵与驱动电机作为核心耗能设备，其运行效率会因长期磨损、汽蚀、内部间隙增大而逐步衰减，部分老旧泵组在额定工况下的运行效率可能已严重下降。加热炉的炉管积灰、局部过热或燃烧器老化，也会导致热效率降低。此外，站内阀门的内漏、保温层的破损或失效，都会产生持续的能量泄漏损失。这些设备与管道的性能退化是一个缓慢但不可逆的过程，系统性评估与监测的缺失使得能耗基准确立困难。

2.4 外部环境 with 输送任务的动态干扰

管道运行环境具有强不确定性。土壤温度的季节性及昼夜变化直接影响热油管道的轴向降温速率，冬季需大幅提升加热负荷以补偿更大的散热损失。地形的起伏不仅影响静压头，也会导致翻越点后存在剩余压头需要被节流消耗。上游油田来油量、来油性质的波动，以及下游炼厂需求的变化，迫使管道长期处于非稳定或非满负荷输送状态，偏离最优设计工况。应对这些动态干扰，传统的固定参数控制模式适应性差，频繁的人工干预或保守的高能耗运行策略成为常态，以牺牲经济性来保障安全与任务完成，进一步放大了外部干扰对能耗的负面影响。

3 长输原油管道节能关键技术研究

3.1 基于全局优化的智能运行控制技术

该技术核心在于构建涵盖全管网的精细化水力热力仿真模型，并以此为基础，集成先进优化算法，实现运行参数的在线闭环优化。其关键是从局部站点优化升级为全局优化，综合考虑全线泵站、加热站的耦合关系。利用动态规划、混合整数规划或启发式算法，以总能耗或总成本最低为目标，实时求解在给定输量、油品和边界条件下最优的泵启停方案、转速设定、加热炉负荷分配及站间压力匹配。其高级形式是建立基于模型预测控制的智能调度系统，该系统不仅能基于当前状态优化，还能预测未来数小时内的输量变化与环境扰动，提前制定最优控制序列，实现主动、平顺的节能调节，显著减少人为干预和保守操作带来的能耗浪费。

3.2 高效装备与先进工艺应用技术

该技术致力于通过关键装备的更新换代与输送工艺的根本性革新，从源头实现能效跃升。在动力系统方面，核心在于应用基于三元流理论设计的高效离心泵，其高效区宽广，能够适应管道输量的波动。同时，全面推广高压大容量变频调速技术，实现输油泵的软启停与无级调速，使泵的工作点始终贴近管路特性曲线的最优效率区，从而彻底消除由阀门节流导致的压头损失。在热力系统层面，重点采用冷凝式高效加热炉，通过降低排烟温度至水露点以下，深度回收烟水中水蒸气的汽化潜热，使热效率提升至95%以上。此外，集成式热媒炉系统与相变蓄热技术的应用，可进一步提高热能利用的稳定性和灵活性。在工艺端，针对高凝高粘原油，深入研究化学降凝与改性

输送技术，通过添加纳米复合型降凝剂，改变蜡晶形态与原油流变性，辅以适当的剪切处理，实现在凝点以下温度的安全“冷输”，这是从根本上停用加热设施、实现颠覆性节能的关键路径。

3.3 管道本体减阻与保温维护技术

此技术聚焦于直接降低流动阻力与热力损失两大能量耗散途径。减阻技术涵盖被动与主动两类：被动减阻主要通过内涂层实现，例如喷涂具有超光滑、低表面能特性的改性环氧树脂或聚氨酯涂层，可永久性降低水力粗糙度，减少湍流强度。主动减阻则依赖于建立基于实时水力摩阻监测与蜡沉积预测模型的智能化清管体系，通过优化清管器的发射周期与类型，高效清除管内蜡、垢等沉积物，维持管道流通面积。在保温方面，针对在役管道，需利用红外热成像等无损检测技术定期评估保温层完整性，重点对热损失严重的管段及管件进行修复或更换，采用预制式复合保温管壳等快速修复技术。对于新建或改造项目，则推广使用真空绝热板或纳米孔气凝胶等超级绝热材料作为保温层，其极低的导热系数能显著降低降温速率。系统性的本体状态维护，是保障管道长期处于低能耗运行区间的物质基础。

3.4 输量自适应与分布式能源协同利用技术

该技术着眼于提升管道系统对波动输量工况的适应性，并整合多种能源形式以优化整体能效。输量自适应技术通过建立弹性运行策略库与智能调控算法，使管道在输量频繁变化或低于经济输量时，仍能维持相对高效、稳定的运行状态。具体而言，需开发基于实时监测与预测的输量匹配模型，动态调整泵组合、变频频率及加热功率，最大限度减少节流或循环造成的能量损耗。在能源协同利用层面，重点研究沿线分布式可再生能源，如光伏、风能的直接接入与消纳技术。探索利用地热、工业余热等低品位热源作为加热炉的辅助或替代热源，构建多元互补的能源供给体系。为此，需解决多源异质能源的并网协调、功率预测与储能配置等关键技术，确保在优先利用清洁能源的前提下，保障管道供能的安全与稳定，从而在根本上降低对外部电网和传统燃料的依赖，实现运行能耗的结构性优化。

3.5 综合能源管理与系统能效评价技术

该技术旨在构建一个覆盖数据感知、分析诊断、决策优化与绩效评估全链条的能效管控闭环。其基础是建设一个集成SCADA、设备管理与实时计量系统的统一能源管理平台，实现电、热、燃料等多品类能耗数据的自动采集与融合。平台核心在于内置的能效分析引擎，该引擎不仅计算宏观单耗，更能通过建立设备与管段的基准能耗模型，进行实时能效对标与偏差诊断，精准定位“跑冒滴漏”等异常能耗点。在评价层面，需发展一套分层次、可追溯的能效指标体系，从系统级的管网输送效率，到站场级的泵站综合效率，再到设备级的泵机、炉效，

形成金字塔式的评价结构。同时，引入数据挖掘技术，分析历史运行大数据，建立不同工况下的能效基准库与最佳实践库，为运行优化提供目标指引。最终，通过将能效关键绩效指标纳入生产考核体系，驱动管理行为与运行操作的持续改进，使节能管理实现制度化、常态化与精细化。

4 未来研究方向

4.1 基于数字孪生与人工智能的智慧能源管控

未来研究将深度融合数字孪生与人工智能技术，构建高保真、全生命周期的管道数字孪生体。该孪生体能实时同步物理管道的运行状态，并借助机器学习算法，实现对复杂流变特性、设备性能衰减、结蜡动态的更精确模拟与预测。在此基础上，开发新一代自适应智能优化引擎，能够自主学习不同工况下的最优策略，并实现异常工况的自主诊断与决策，如预测性维护触发、风险工况自动规避等，最终形成具备自感知、自学习、自优化、自决策能力的智慧能源管控系统，实现能效的极限挖掘。

4.2 多能源耦合与低碳化输送技术

为响应碳中和目标，研究重点将转向输送过程的低碳化与零碳化。一是深入探索可再生能源如光伏、风电等与管道泵站、加热站的直接耦合技术，研究其波动性供电下的管道稳定运行控制策略。二是研究利用沿线地热、余热等低品位热源为原油预热的可行性。三是探索氢能、氨能等绿色能源作为管道驱动

燃料的应用。四是前瞻性研究纯电驱动、超导输电等颠覆性动力方案。这些研究旨在构建多能源输入、协同互补的新型管道能源架构，从根本上降低对传统化石能源的依赖，减少输送环节的碳足迹。

4.3 非常规原油与多元流体输送能效机理

随着资源开采进展，管道输送对象将更加多元化。未来需深入研究页岩油、超稠油、油砂沥青等非常规原油的流动与传热机理，及其对管输系统能耗的定量影响规律。同时，氢、二氧化碳、原油等多相流或顺序输送的流动安全保障与能耗优化，将成为重要课题。此外，针对生物燃料、合成燃料等新兴流体物性的管输适应性研究也需提前布局。这些研究将为未来复杂多元流体输送网络的规划设计、安全与经济运行提供关键的理论基础和技术储备。

5 结语

综上所述，长输原油管道的能耗优化是一项贯穿设计、运行、维护与管理全流程的系统工程。它不仅依赖于先进技术、装备与工艺的革新应用，更需构建与之相适应的智慧管控体系与能效文化。面对未来能源结构的演变与低碳发展的硬性约束，唯有持续深化对能耗机理的认识，积极探索创新性解决方案，方能在保障能源供应安全可靠的前提下，引领管道行业迈入高效、清洁、智能的新发展阶段，最终实现经济效益、社会效益与环境效益的协同统一。

参考文献：

- [1] 李世杰.原油长输管道运行效率优化与节能技术研究[J].当代化工研究,2025,(11):96-98.
- [2] 冷晶晶.原油长输管道节能降耗技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(06):157-159.
- [3] 杨江聆.长输原油管道运行及原油调和的优化[J].化学工程与装备,2022,(12):116-117+122.
- [4] 于涛.基于大数据挖掘的长输原油管道智能化研究[D].中国石油大学(华东),2020.
- [5] 李一为.影响长输原油管道安全因素及风险控制方法分析[J].化工管理,2019,(28):142-143.
- [6] 白晓航.长输原油管道节能降耗技术及经济性分析[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(05):253-254.
- [7] 丁雨.长输原油管道能耗关键影响因素研究[J].化工管理,2017,(30):128.