

低温余热驱动的有机朗肯循环（ORC）系统工质筛选及膨胀机效率提升策略

邢腾飞

郑州丰元电力工程设备有限公司，河南省郑州市，450199；

摘要：随着能源危机的加剧和环保意识的提升，低温余热资源的有效利用成为当前研究的热点。有机朗肯循环（ORC）系统作为一种高效利用低温余热的技术，其性能优化和效率提升尤为关键。本文旨在探讨低温余热驱动的 ORC 系统工质筛选原则、常用工质性能分析及膨胀机效率提升策略。通过对工质筛选的热力学方法和多目标优化方法的综述，为选择合适的工质提供依据。同时，深入分析膨胀机效率的影响因素，并提出结构优化、运行参数优化、流场仿真优化以及故障诊断与维护优化等多方面策略，以期为提高 ORC 系统的整体效率和稳定性提供理论指导和实践参考。

关键词：低温余热驱动；有机朗肯循环（ORC）系统；工质筛选及膨胀机；效率提升策略

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.016

引言

在能源领域，低温余热资源广泛存在于工业生产和日常生活中，其有效回收利用对于节能减排具有重要意义。ORC 系统以其独特的优势，在低温余热发电领域展现出巨大的应用潜力。然而，系统性能的优化和效率的提升仍面临诸多挑战，其中工质的筛选和膨胀机的效率是关键因素。因此，深入研究 ORC 系统的工质筛选原则及常用工质的性能特点，以及探索膨胀机效率提升的有效策略，对于推动 ORC 技术的进一步发展具有至关重要的作用。本文将从这两个方面展开详细探讨，以期能为 ORC 系统的实际应用提供科学依据和技术支持。

1 ORC 系统概述

有机朗肯循环（ORC）系统是针对低温余热资源化利用开发的高效能量转换装置，其核心原理是借鉴传统朗肯循环，通过采用低沸点有机工质，适配中低温余热（通常温度范围为 80–300℃）的能量品位，实现热能向电能的转化。该系统主要由蒸发器、膨胀机、冷凝器和工质泵四大核心部件构成：在蒸发器中，低温余热载体（如工业废水、烟气、地热流体）与有机工质进行换热，使工质吸收热量后蒸发为高压蒸汽；高压工质蒸汽进入膨胀机膨胀做功，驱动发电机发电；做功后的低压乏汽进入冷凝器，被冷却介质（如水、空气）冷凝为液态；最后由工质泵将液态工质加压送回蒸发器，完成循环。与传统以水为工质的朗肯循环相比，ORC 系统无需高压设备，运行安全性更高，且能有效回收低品位余热，填补了低温余热利用的技术空白。目前，ORC 系统已广泛

应用于工业余热回收、地热发电、生物质能利用等领域，在节能减排与新能源开发中发挥着重要作用。

2 ORC 系统工质筛选

2.1 工质筛选的原则和标准

ORC 系统工质筛选需综合考虑热力学性能、安全性、经济性及环境友好性，形成多维度筛选原则与标准。热力学性能是核心原则：工质的沸点与临界温度需匹配余热温度，沸点应低于余热载体温度 10–20℃，确保工质充分蒸发，临界温度则需高于蒸发器出口工质温度，避免循环进入超临界状态导致膨胀机效率下降； $\text{latent heat of vaporization}$ 过大虽利于热量吸收，但会增加蒸发器面积与成本，过小则易导致蒸发不完全，需权衡选择；绝热指数适中为宜，过大易导致膨胀机出口工质过热度高，增加冷凝负荷，过小则会降低膨胀功输出。安全性标准不容忽视：工质需具备低毒性、不易燃、不爆炸特性，避免运行过程中发生安全事故；化学稳定性良好，不与系统金属部件、密封材料发生腐蚀或化学反应。此外，经济性要求工质来源广泛、价格低廉，且具有较低的饱和压力，降低系统设备耐压要求；环境友好性则要求工质的臭氧消耗潜能值（ODP）为 0、全球变暖潜能值（GWP）低，符合环保法规要求。

2.2 常用 ORC 系统工质的种类及性能分析

常用 ORC 系统工质按化学组成与热力学特性可分为烃类、氟利昂类、醇类及混合工质四大类，各类工质性能差异显著，适配不同应用场景。烃类工质（如丙烷、

异丁烷)具有优良的热力学性能,潜热大、绝热指数适中,且ODP为0、GWP低,环境友好,但易燃易爆特性限制了其在室内及高危场所的应用。氟利昂类工质(如R134a、R245fa)安全性高、化学稳定性好,不易燃、无毒,且饱和压力适中,是目前工业应用最广泛的工质类型,但部分氟利昂(如R134a)GWP较高,面临环保政策限制。醇类工质(如乙醇、甲醇)来源广泛、价格低廉,且具有较高的latentheat,但黏性较大,会增加工质泵功耗与系统流动损失,同时醇类易吸水,可能导致系统腐蚀。混合工质由两种或多种纯工质按比例混合而成,可通过调整组分比例调控相变温度与热力学性能,拓宽温度适应范围,且能实现非等温相变,减少蒸发器与冷凝器的换热温差,提升系统效率,但混合工质可能存在组分分离问题,影响循环稳定性。

2.3 基于热力学的工质筛选方法

基于热力学的工质筛选方法通过构建热力学模型,量化评估工质对ORC系统性能的影响,为工质选择提供科学依据。循环性能参数计算法是基础方法,通过建立ORC系统热力学模型,计算不同工质在给定余热条件下的循环效率、净输出功、膨胀比等关键参数,筛选出热力学性能最优的工质。例如,在低温余热(100–150℃)条件下,通过计算可发现R245fa的循环效率高于R134a,更适合作为该温度区间的工质。熵产分析方法从不可逆损失角度筛选工质,通过计算蒸发器、膨胀机、冷凝器、工质泵各部件的熵产率,评估工质导致的系统不可逆损失大小,熵产率越低的工质,系统能量利用效率越高。焓分析方法则基于焓平衡原理,计算工质在循环过程中的焓损失与焓效率,优先选择焓效率高、焓损失集中在可优化部件(如冷凝器)的工质。此外,相图分析方法通过绘制工质的温-熵图、压-焓图,分析其在ORC循环中的相变过程与状态变化,判断工质是否能在给定工况下实现稳定循环,避免出现干度过低导致膨胀机液击或过热度太高增加冷凝负荷的问题。

2.4 基于多目标优化的工质筛选方法

基于多目标优化的工质筛选方法综合考虑热力学性能、安全性、经济性、环境友好性等多维度目标,通过优化算法筛选出综合性能最优的工质。该方法首先需建立多目标优化函数,将循环效率、净输出功作为热力学目标,ODP、GWP作为环境目标,工质价格、系统设备成本作为经济目标,毒性、燃爆性作为安全目标,并为各目标设定权重系数,反映不同应用场景的需求侧重。其次,确定约束条件,包括工质沸点、临界温度、饱和

压力等热力学参数约束,以及环保法规、安全标准等外部约束。然后,采用多目标优化算法(如非支配排序遗传算法NSGA-II、粒子群优化算法PSO)对优化函数进行求解,得到帕累托最优解集,解集内的工质均为不同目标权衡下的最优选择。最后,通过决策分析方法(如层次分析法、模糊综合评价法)从帕累托最优解集中筛选出最符合实际需求的工质,例如在环保要求严格的场景,优先选择帕累托解集中GWP最低的工质;在成本敏感场景,则优先选择经济性最优的工质。

3 膨胀机效率提升策略

3.1 膨胀机效率的影响因素分析

膨胀机作为ORC系统的核心做功部件,其效率直接决定系统净输出功,影响效率的因素可分为结构参数、运行参数与工质特性三类,各因素相互作用,共同决定膨胀机性能。结构参数方面:叶轮/转子几何参数是关键,叶片型线不合理(如弯度过大、厚度不均)会导致工质在流道内发生分离,增加流动损失;叶轮直径与转速不匹配则会影响工质的膨胀比与做功能力。流道设计影响工质流动状态,流道表面粗糙度大、存在突变截面或涡流区,会加剧流动损失;喷嘴与叶轮的间隙过大则会导致工质泄漏,降低容积效率。运行参数方面:工质进口参数影响膨胀过程,进口压力过低会降低膨胀比,减少做功量;进口过热度不足易导致工质在膨胀过程中出现液滴,引发液击损失,过热度太高则会增加膨胀机出口温度,加大冷凝负荷。转速稳定性至关重要,转速波动会导致膨胀机偏离设计工况,降低气动效率;负荷变化过快则会使膨胀机响应滞后,影响运行稳定性。工质特性方面:工质的黏性与密度直接影响流动损失,黏性大的工质(如醇类)在流道内流动阻力大,会降低流动效率;密度过小则需更大的流道面积,可能导致叶轮尺寸不合理。

3.2 膨胀机结构优化策略

膨胀机结构优化通过改进核心部件的几何设计与结构布局,减少流动损失与泄漏损失,提升效率。叶轮结构优化是核心方向:采用三维气动优化设计方法,基于计算流体力学(CFD)仿真,优化叶片型线(如采用前弯或后弯叶片)、叶片数及叶片安装角,使工质在流道内沿最优轨迹流动,减少气流分离与涡流损失;采用变截面流道设计,根据工质膨胀过程中的参数变化,设计流道面积渐变的叶轮,确保工质流速与压力变化匹配,提升能量转换效率;在叶轮表面采用仿生减阻结构(如模仿鲨鱼皮的微沟槽结构),降低表面粗糙度,减

少摩擦损失。密封结构优化针对泄漏损失：在喷嘴与叶轮之间采用迷宫密封或干气密封，通过增加泄漏路径的阻力或形成气膜屏障，减少工质泄漏；优化轴承结构，采用高精度滚动轴承或磁悬浮轴承，减小叶轮与壳体的间隙，同时降低机械摩擦损失。此外，整体结构集成化设计将膨胀机与发电机一体化，减少传动部件的能量损失；采用轻量化材料（如钛合金、高强度复合材料）制作叶轮，降低转子惯性，提升转速稳定性。

3.3 膨胀机运行参数优化策略

膨胀机运行参数优化通过动态调整运行状态，使膨胀机始终处于设计工况附近，提升运行效率。进口参数优化需根据余热条件实时调整：通过调控蒸发器的换热面积或余热流量，将工质进口压力与过热度控制在最优区间，通常进口过热度控制在 $5\sim 15^{\circ}\text{C}$ ，既避免液击风险，又不增加过多冷凝负荷；在余热温度波动时，通过工质泵调节工质流量，匹配进口压力与膨胀比，确保膨胀机做功效率稳定。转速与负荷匹配优化采用闭环控制策略：通过转速传感器实时监测膨胀机转速，结合发电机负荷信号，通过变频器调整发电机负荷或通过调节工质进口流量，使转速维持在设计值附近，避免转速波动导致的效率下降；在负荷突变时，采用分段调节策略，先快速调整工质流量稳定转速，再逐步优化进口参数，实现平滑过渡。此外，冷却系统协同优化通过调整冷凝器的冷却介质流量，控制工质出口压力，使膨胀机的膨胀比处于最优范围，同时减少冷凝过程的焓损失，提升整体系统效率。

3.4 基于流场仿真的膨胀机性能优化策略

基于流场仿真的膨胀机性能优化策略通过CFD技术模拟工质在膨胀机内的流动过程，精准识别损失源，针对性提出优化方案。全三维流场仿真可重现工质从喷嘴进口到叶轮出口的完整流动过程，通过分析速度场、压力场、温度场分布，识别流道内的气流分离区、涡流区及激波位置，明确流动损失的主要来源。例如，通过仿真发现叶轮出口处存在明显的涡流区，可通过优化叶轮出口角或增加导流结构消除涡流。非定常流场仿真针对动态运行工况，模拟转速波动、负荷变化时的流场瞬态变化，分析非定常流动导致的附加损失，为运行参数优化提供依据。多物理场耦合仿真结合流场与结构场，模拟叶轮在高速气流作用下的振动特性，分析气动载荷与结构振动的耦合作用，优化叶轮的刚度与强度设计，避免共振导致的效率下降与结构损伤。通过流场仿真可实

现膨胀机结构与运行参数的虚拟迭代优化，减少物理试验成本，显著提升优化效率与精度。

3.5 膨胀机故障诊断与维护优化策略

膨胀机故障诊断与维护优化通过提前识别潜在故障、优化维护方案，保障膨胀机长期高效运行。故障诊断系统构建基于多传感器融合技术，通过安装振动传感器、温度传感器、压力传感器，实时采集膨胀机的振动信号、进出口温度压力信号、转速信号等，利用信号处理技术（如小波分析、频谱分析）提取故障特征，结合智能诊断算法（如神经网络、专家系统）识别常见故障（如叶轮磨损、轴承损坏、密封泄漏），并发出预警信号。例如，通过分析振动信号的频谱特征，可提前判断轴承的磨损程度。维护策略优化采用预测性维护代替传统的定期维护，基于故障诊断系统的监测数据与膨胀机的寿命预测模型，计算关键部件（如叶轮、轴承、密封件）的剩余使用寿命，制定个性化维护计划，避免过度维护导致的停机损失与维护成本增加，同时防止维护不足引发的故障。此外，建立运行维护数据库，记录膨胀机的故障类型、维护措施及运行参数变化，通过数据挖掘分析故障发生规律，为膨胀机设计改进与维护策略优化提供数据支撑。

4 结语

综上所述，本文系统阐述了低温余热驱动的有机朗肯循环（ORC）系统工质筛选及膨胀机效率提升策略。在工质筛选方面，我们探讨了筛选的原则和标准，分析了常用工质的种类及性能，并介绍了基于热力学和多目标优化的筛选方法。针对膨胀机效率提升，我们从影响因素分析入手，提出了结构优化、运行参数优化、基于流场仿真的性能优化以及故障诊断与维护优化策略。这些策略相互关联，共同构成了提升ORC系统整体性能的关键路径。未来，随着技术的不断进步和创新，我们期待ORC系统在能源高效利用和环境保护方面发挥更加重要的作用。同时，也呼吁更多学者和工程师投入到这一领域的研究与实践中，共同推动ORC技术的持续发展。

参考文献

- [1] 路会同, 江龙, 王丽伟, 王如竹. 低温余热驱动的无泵有机朗肯循环瞬态稳态发电性能[J]. 化工学报, 2022, 68(12): 4709-4716.
- [2] 王辉涛, 王华, 龙恩深, 葛众. 低温废气余热驱动有机朗肯循环的优化[J]. 太阳能学报, 2023, 34(07): 1183-1189.