

大型空分设备蒸汽透平驱动系统节能改造研究

赵国平 蒋培丰 张婷婷
伊泰伊犁能源有限公司 新疆 伊犁 835300

摘要：本文聚焦于大型空分设备中广泛应用的蒸汽透平驱动系统，系统地阐述了其工作原理、能耗构成及节能潜力，并深入剖析了当前主流的节能改造技术路径。文章重点探讨了通过热力学优化、先进控制策略、智能化技术应用以及系统集成化设计等手段，对蒸汽透平驱动系统进行综合能效提升的理论基础与实践方法。同时，构建了涵盖能效指标、经济性指标与环境效益指标的多维评价体系，并对改造过程中可能面临的蒸汽品质波动、系统耦合复杂、初始投资高昂等挑战提出了针对性对策。研究表明，对蒸汽透平驱动系统实施科学、系统的节能改造，不仅能显著降低空分装置的整体能耗，还能有效提升其运行的稳定性与灵活性，为企业带来可观的经济回报和环境效益，对推动我国高端装备制造业的绿色低碳转型具有重要的理论与现实意义。

关键词：大型空分设备；蒸汽透平；驱动系统；节能改造；能效评估

引言

空气分离设备（ASU）是现代工业的关键基础装备，通过深冷精馏法高效分离氮、氧、氩等气体，广泛应用于钢铁、化工、电子、医疗等领域。作为高能耗装置，其能源成本占总成本70%以上，在“双碳”背景下，节能降耗迫在眉睫。驱动系统是能耗核心，其中蒸汽透平驱动因可直接利用副产或工艺蒸汽，省去多重能量转换，具备较高能效潜力。尤其在化工、煤化工等联合企业中优势显著。然而，早期蒸汽透平系统受限于设计与控制技术，普遍存在能效低、调节差、适应性弱等问题，且难以匹配负荷动态变化，造成能源浪费。因此，对现有大型空分蒸汽透平驱动系统开展系统性节能改造，挖掘深层次能效提升空间，已成为实现降本增效与绿色转型的重要课题。

1 大型空分设备能耗构成与蒸汽透平驱动系统概述

1.1 大型空分设备的能耗构成分析

大型空分设备的能耗主要由几个部分构成，其中压缩功耗占据了绝对主导地位，通常超过总能耗的85%。这部分能量主要用于驱动原料空气压缩机和增压空气压缩机，以克服气体压缩过程中的阻力，并为后续的低温精馏提供必要的压力势能。除了压缩功耗外，冷量损失也是一个不可忽视的部分，在低温环境下，装置会通过保冷材料向外界散失冷量，为了维持系统内部的冷量平衡，膨胀机或制冷系统必须额外做功来补偿这部分损失。此外，辅助系统如分子筛纯化系统的再生加热器、循环水泵、润滑油泵以及仪表空气系统等也会消耗一定的电力。最后，阀门节流、管道流动阻力等环节也会造成少量但累积起来不容小觑的能量损失。综上所述，压

缩功耗无疑是整个空分装置节能降耗的主攻方向，而驱动压缩机的原动机效率及其与压缩机的匹配程度，直接决定了这部分能耗的高低。

1.2 蒸汽透平驱动系统的工作原理与分类

蒸汽透平，又称汽轮机，是一种将蒸汽的热能连续、高效地转化为旋转机械能的原动机，其基本工作原理遵循热力学中的朗肯循环。具体而言，具有一定温度和压力的过热蒸汽首先进入透平的喷嘴，在此发生绝热膨胀，压力降低而速度急剧增加，热能转化为高速气流的动能。随后，这股高速气流冲击并流经安装在转子上的动叶片，将其动能传递给叶片，从而推动转子高速旋转，输出轴功率，最终实现了从热能到机械能的转换^[1]。根据蒸汽在动叶片中膨胀做功的方式不同，蒸汽透平主要分为冲动式和反动式两类。在冲动式透平中，蒸汽仅在喷嘴中膨胀，流经动叶片时压力基本不变，主要依靠气流的冲动力做功；而在反动式透平中，蒸汽在流经动叶片时也继续膨胀，动叶片同时受到气流的冲动力和因蒸汽膨胀产生的反作用力。在大型空分设备的应用中，为了兼顾效率与工况适应性，常采用冲动式与反动式相结合的复合式设计。此外，依据排汽方式的不同，还可分为凝汽式、背压式和抽汽式，其中背压式和抽汽式因其能将做完功的乏汽引出用于工艺加热，实现热能的梯级利用，在化工联合体中尤为普遍，节能效果显著。

2 蒸汽透平驱动系统节能改造的关键技术路径

2.1 基于热力学分析的系统级优化

节能改造的首要前提是精准诊断，通过对现有系统进行全面的热力学分析和能量审计，可以精确量化各个环节的能量损失，找准节能的“病灶”。热平衡测试

是基础手段,通过对蒸汽透平的进汽、排汽(或抽汽)参数进行精确测量,并结合透平的输出功率,可以计算出实际的等熵效率,并与设计值或行业标杆值进行对比,从而评估透平本体的性能衰减情况。在此基础上,焓分析(Exergy Analysis)提供了更深层次的洞察,它超越了传统的能量守恒定律,运用热力学第二定律来分析系统中可用能(焓)的损失分布,有助于识别出那些虽然能量损失不大,但焓损失巨大的“高质低用”或不可逆过程,为优化指明更具价值的方向。此外,对从蒸汽源到透平入口的整个输送管网进行审视也至关重要,排查保温不良、疏水不畅、阀门内漏等问题,可以有效减少输送过程中的热能和压力损失,确保进入透平的蒸汽品质和能量最大化。

2.2 透平本体与关键部件的升级改造

在精准诊断的基础上,对透平本体进行针对性的硬件升级是提升效率的根本所在。通流部分的优化是其中最核心的内容,通过采用先进的三维流场设计软件,对喷嘴(静叶)和动叶的型线进行重新设计和优化,可以显著减少流动损失,提高蒸汽的做功能力,同时更换为新型高效叶型也能大幅提升效率。透平内部的级间漏汽是另一个重要的效率损失源,因此密封系统的改进同样关键,采用先进的刷式密封、蜂窝密封或可调间隙密封等技术替代老旧的梳齿密封,能够有效减少漏汽损失,提高容积效率^[2]。此外,针对高温、高压、湿蒸汽等恶劣工况,选用耐腐蚀、抗冲蚀的特种合金材料,并对关键叶片进行激光熔覆、热喷涂等表面强化处理,不仅能够延长设备寿命,更能保障其在长期运行中维持高效性能。

2.3 先进控制策略与智能化技术的深度融合

如果说硬件改造是为系统“强身健体”,那么先进的控制策略就是为其赋予“智慧大脑”,二者的深度融合方能发挥最大效能。传统的透平控制系统往往只关注转速或功率的单一目标,而现代节能改造则强调建立透平-压缩机-工艺管网一体化的多变量协调控制模型。该模型能够综合考虑蒸汽压力、电网频率、下游气体需求、空分塔工况等多种约束条件,实时优化透平的进汽阀位、抽汽阀位等执行机构,使整个驱动系统始终运行在全局最优工况点。在此基础上,基于模型的预测控制(MPC)技术能够利用精确的数学模型预测系统未来的行为,提前调整控制量以应对负荷变化,有效避免因滞后控制造成的能源浪费和工况波动。展望未来,构建蒸汽透平驱动系统的数字孪生体将成为趋势,通过实时数据驱动虚拟模型,不仅可以进行在线性能监测和能效评

估,还能利用机器学习算法对设备健康状态进行预测性维护,防患于未然,从而保障系统长期、稳定、高效运行。

2.4 系统集成与余热深度利用

节能改造的视野不应局限于透平本身,而应扩展到整个工厂的能量系统,实现更大范围内的资源优化配置。对于背压式透平而言,确保其排出的乏汽被下游工艺充分、高效地吸收利用是发挥其节能优势的关键,这可以通过优化工艺换热网络,或者将乏汽引入吸收式制冷机等设备,实现冷、热、功的联产^[3]。而对于凝汽式透平,其乏汽在凝汽器中冷凝会释放大量潜热,这部分低品位热能同样具有回收价值。通过增设热泵或有机朗肯循环(ORC)发电系统,可以回收这部分热量,用于预热锅炉给水或产生额外电力,从而进一步提升整个系统的能源利用效率,将节能潜力挖掘到极致。

3 节能改造效果的综合评价体系

3.1 能效指标

任何一项节能改造项目都需要一套科学、全面的评价体系来衡量其成效。在能效层面,透平等熵效率是最直接的核心指标,它反映了透平将蒸汽热能转化为机械能的有效程度。然而,更为终极的指标是系统单位产品能耗,例如生产每标准立方米氧气所消耗的电量或标煤量,这能直观反映改造对整个空分装置能效水平的全局性影响。此外,蒸汽单耗,即驱动单位功率所消耗的蒸汽量,也是衡量透平驱动系统热经济性的关键参数,三者结合,可以从不同角度全面刻画系统的能效表现。

3.2 经济性指标

经济可行性是决定节能改造项目能否落地的核心因素。投资回收期是最基本的财务指标,它直观地展示了项目回本所需的时间。然而,为了更全面地评估项目的长期价值,净现值(NPV)和内部收益率(IRR)是更为科学的工具。净现值将项目未来各年的净现金流量按预定的折现率折算成现值后的总和,若NPV大于零,则表明项目在经济上是可行的。内部收益率则是使项目净现值等于零的折现率,若IRR高于企业的基准收益率,则该项目具有投资吸引力。通过这些指标的综合分析,可以为企业决策提供坚实的财务依据。

3.3 环境效益指标

在“双碳”背景下,环境效益已成为衡量项目价值不可或缺的一部分。节能改造带来的直接环境效益可以通过年节约标准煤量来量化,这是根据节约的能量量折算得出的通用指标。在此基础上,乘以相应的二氧化碳排放因子,即可计算出年减排二氧化碳量。这一指标不仅体现了企业的社会责任担当,也为未来参与碳交易市

场、获取绿色金融支持等提供了重要的数据支撑,使得节能改造项目的价值维度更加丰满。

4 节能改造面临的挑战与对策

4.1 蒸汽品质与供应的稳定性挑战

透平对蒸汽的洁净度、干度要求极高,任何杂质或水分都可能导致叶片侵蚀、结垢,严重影响效率甚至危及安全。同时,来自工艺系统的蒸汽其压力和流量可能存在固有波动,这对透平的稳定、高效运行构成了持续的威胁。为应对这一挑战,必须加强蒸汽源头的品质管理,确保有效的汽水分离和过滤措施到位。在透平入口前设置缓冲罐或蓄能器,可以有效平抑蒸汽参数的瞬时波动^[4]。此外,在控制系统中引入蒸汽参数的前馈补偿机制,能够增强系统对外部扰动的鲁棒性,确保在各种工况下都能维持最优运行状态。

4.2 系统高度耦合带来的复杂性挑战

透平驱动系统并非孤立存在,而是与空分工艺、全厂蒸汽管网乃至电力系统紧密耦合,形成了一个牵一发而动全身的复杂巨系统。这种高度的耦合性意味着任何局部的改造都可能引发全局性的连锁反应,若缺乏系统性思维,极易出现局部优化却导致系统整体性能下降的窘境。因此,在项目前期必须进行详尽的系统仿真模拟,利用数字模型充分评估各种边界条件和极端工况下的系统响应。同时,组建一个涵盖工艺、设备、仪控、电气等多个专业的跨学科项目团队至关重要,只有通过充分的协同与沟通,才能确保设计方案的系统性和全局最优性。

4.3 高昂的初始投资与较长的投资回收期挑战

透平本体的升级改造,尤其是涉及核心通流部件的更换,往往需要巨额的资本投入,这对于许多企业的短期预算构成了巨大压力,可能成为阻碍项目启动的主要障碍。面对这一现实挑战,企业可以积极寻求外部支持,例如争取国家和地方的节能专项补贴、申请绿色信贷等政策性金融工具。此外,创新商业模式也是破局的关键,合同能源管理(EMC)模式便是一个行之有效的

选择。通过引入专业的节能服务公司(ESCO)进行投资和运营,企业无需承担初始投资风险,而是以分享节能效益的方式支付费用,从而实现零投入或低投入的节能改造,有效化解资金瓶颈。

5 结语

大型空分设备蒸汽透平驱动系统的节能改造是一项复杂的系统工程,其核心在于通过技术创新与系统集成,最大限度地提升能源利用效率。本文系统地论述了该领域的研究现状与关键技术路径,指出未来的节能改造将不再局限于单一设备的性能提升,而是朝着“硬件升级+智能控制+系统优化”三位一体的综合解决方案方向发展。通过基于热力学原理的精准诊断,对透平通流部分、密封系统等关键部件进行现代化升级,并深度融合先进的多变量协调控制、预测控制乃至数字孪生等智能化技术,可以显著提升驱动系统的运行效率和灵活性。同时,构建涵盖能效、经济、环境的多维评价体系,有助于科学决策和客观评估改造成效。尽管在实践中会遇到蒸汽品质、系统耦合和投资成本等挑战,但通过加强源头管理、强化系统仿真、创新商业模式等对策,这些问题均可得到有效化解。可以预见,随着新材料、新工艺、人工智能等前沿技术的不断融入,大型空分设备蒸汽透平驱动系统的能效水平将迈上新的台阶,为我国工业领域的绿色低碳转型和高质量发展贡献重要力量。

参考文献

- [1]李琪.大型空分设备节能减排技术分析和实践[J].机电信息,2020,(36):69-70.
- [2]沈丹桐.空分装置节能增效优化分析[J].当代化工研究,2025,(11):150-153.
- [3]窦强利.空分装置节能降耗的实践与思考[J].大氮肥,2022,45(4):281-284.
- [4]陈海笑,董传利.煤化工空分装置的节能降耗措施及运行总结[J].氮肥与合成气,2023,51(1):20-23.