

燃气轮机热电联产系统的能效优化与运行策略研究

王 新 屈 卫 吴培源 仇士彬 刘 阳
华能（天津）煤气化发电有限公司 天津 300452

摘 要：本文深入探讨了燃气轮机热电联产系统的能效优化与运行策略。通过分析系统组成及运行原理，提出了设备优化、系统集成优化及运行参数优化等多方面的能效提升方法。同时研究智能化优化算法在系统负荷预测、运行参数调整及故障诊断中的应用，以及系统集成与协同优化策略。旨在提高系统能效，降低运行成本，为燃气轮机热电联产系统的工业化应用提供理论支持和实践指导。

关键词：燃气轮机；热电联产系统；运行策略

1 燃气轮机热电联产系统概述

1.1 系统组成与工作原理

燃气轮机热电联产系统是一种高效利用能源的系统，能够同时产生电力和热能。该系统主要由燃气轮机、余热锅炉（或废气锅炉）、蒸汽轮机（可选）、发电机以及相关的控制系统和辅助设备组成。工作原理方面，燃气轮机热电联产系统首先通过燃气轮机将燃料（如天然气）燃烧产生的高温高压气体推动涡轮机旋转，进而带动发电机发电。燃气轮机在燃烧过程中产生的高温废气，其温度通常在450℃至600℃之间，这部分废气蕴含大量的热能。为了充分利用这部分热能，系统引入了余热锅炉（或废气锅炉）。余热锅炉利用燃气轮机排出的高温废气加热锅炉内的水，使其产生蒸汽。这些蒸汽可以直接用于供热，或者进一步注入蒸汽轮机中做功发电，形成燃气-蒸汽联合循环系统。通过这种方式，燃气轮机热电联产系统实现了能量的梯级利用，大大提高了能源利用效率。

1.2 系统能效评价指标

燃气轮机热电联产系统的能效评价是衡量其性能优劣的重要指标。主要的能效评价指标包括：（1）综合热效率。指系统在统计期内所供热量和所供电量的总热效率，是评价系统能源利用效率的关键指标。综合热效率越高，说明系统对能源的利用越充分；（2）发电热效率。指燃气轮机在发电过程中的热效率，即燃料化学能转化为电能的效率。提高发电热效率是优化系统性能的重要途径^[1]；（3）热电比。指系统在统计期内所供热量与所供电量的比值，反映了系统热电联产的能力。热电比越高，说明系统在供热方面的贡献越大；（4）单位供热标准煤耗和单位供电标准煤耗。分别指系统在供热和供电过程中消耗的标准煤量，是衡量系统经济性的重要指标。降低这两个指标有助于降低系统的运行成本。另

外，还可以从系统的可靠性、可用性、排放水平以及经济性等多个方面进行综合评价。通过不断优化系统设计和运行管理，可以提高燃气轮机热电联产系统的能效水平，实现更加高效、环保、经济的能源利用。

2 燃气轮机热电联产系统能效优化方法

2.1 设备优化

在燃气轮机热电联产系统中，设备的优化是提高能效的关键环节。设备优化的核心在于提升设备本身的效率以及增强设备间的协同工作能力。首先，对于燃气轮机本身，通过采用先进的燃烧技术和高效的涡轮设计，可以显著提高燃料的燃烧效率和涡轮机的机械效率。例如，采用富氧燃烧技术可以提高燃料的燃烧温度，使燃烧更加充分，减少未燃尽损失；优化涡轮机的叶片形状和级数，可以减少流动损失，提高涡轮机的输出功率。随着材料科学的进步，采用高温合金等新材料制造的涡轮叶片和燃烧室部件，可以承受更高的温度和压力，进一步提升燃气轮机的效率和寿命。其次，余热锅炉作为回收燃气轮机废热的关键设备，其效率也直接影响系统的整体能效。优化余热锅炉的设计，如增加换热面积、改进换热结构、采用高效的换热材料等，可以提高废热的回收效率。同时对于采用蒸汽轮机的联合循环系统，优化蒸汽轮机的设计和运行参数，如提高蒸汽的参数（压力、温度）、减少蒸汽轮机的内部损失等，也可以进一步提升系统的整体能效。除了上述主要设备外，系统中的其他辅助设备，如泵、风机、管道等，也需要进行优化设计，减少能耗和流动损失。优化管道的设计，减少管道阻力和压力损失，也可以提高系统的整体能效。

2.2 系统集成优化

系统集成优化是指通过优化系统各组件之间的匹配和协调，实现系统整体性能的提升。在燃气轮机热电联产系统中，系统集成优化主要包括以下几个方面：一

是系统组件的匹配优化,根据系统的实际需求和运行条件,选择合适的燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机(如采用)等组件,确保各组件之间的性能参数相匹配,减少能量转换和传递过程中的损失。例如,对于特定的热电负荷需求,选择功率适中、效率较高的燃气轮机和余热锅炉组合,可以实现更高的系统能效^[2]。二是系统流程的优化,通过重新设计或改进系统的流程,如增加废热回收环节、优化蒸汽和水的循环流程等,可以进一步提高系统的能效。例如,在余热锅炉后增加吸收式制冷机,利用废热制冷,可以实现冷热电三联供,提高系统的能源利用效率。三是系统集成优化还包括系统控制策略的优化,通过采用先进的控制技术和算法,如预测控制、模糊控制等,实现对系统各组件的精确控制和协调,提高系统的稳定性和能效。

2.3 运行参数优化

运行参数优化是指通过调整系统的运行参数,如燃料流量、空气流量、蒸汽参数等,实现系统能效的最大化。在燃气轮机热电联产系统中,根据燃料的种类和特性,调整燃料和空气的配比,使燃烧更加充分,减少未燃尽损失和排放污染。通过优化燃烧室的结构和燃烧方式,如采用低氮氧化物燃烧器等,可以进一步降低排放污染,提高系统的环保性能。通过调整蒸汽的压力和温度,使蒸汽轮机的效率达到最优。一般来说,提高蒸汽的参数可以提高蒸汽轮机的输出功率和效率,但也会增加系统的复杂性和成本。因此,在实际应用中需要根据系统的具体需求和运行条件,选择合适的蒸汽参数。根据实际的热电负荷需求,合理调节燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机(如采用)的输出功率,避免不必要的能耗和波动。例如,在负荷较低时,可以通过降低燃气轮机的输出功率和减少蒸汽轮机的进汽量,降低系统的能耗和排放污染;在负荷较高时,则可以通过增加燃料流量和空气流量,提高系统的输出功率和效率。

3 燃气轮机热电联产系统运行策略研究

3.1 运行模式分析

燃气轮机热电联产系统作为一种高效、灵活的能源供应方式,其运行模式的选择对于系统的整体性能和能效具有重要影响。在运行模式分析方面,我们主要关注两种基本的运行模式:以电定热模式和以热定电模式。以电定热模式:在这种模式下,燃气轮机热电联产系统优先满足电力负荷的需求。燃气轮机根据电力负荷的大小调整其输出功率,并通过余热锅炉回收燃气轮机排放的废热来供热。这种模式的优点在于能够确保电力供应的稳定性和可靠性,特别是在电力需求高峰时段。然而

当电力负荷较低而热负荷较高时,可能会导致余热锅炉的废热无法完全利用,造成能源浪费。以热定电模式:与以电定热模式相反,以热定电模式优先满足热力负荷的需求。燃气轮机根据热力负荷的大小调整其输出功率,并通过余热锅炉回收废热来供电。这种模式的优点在于能够确保热力供应的稳定性和可靠性,特别是在热力需求高峰时段。当热力负荷较低而电力负荷较高时,燃气轮机可能需要以较低的效率运行以满足电力需求,同样会造成能源浪费。除了上述两种基本模式外,燃气轮机热电联产系统还可以根据实际需求和运行条件采用其他混合模式。例如,在电力和热力负荷都较高的情况下,可以采用联合运行模式,同时满足电力和热力需求;在电力或热力负荷较低的情况下,可以采用备用模式或调峰模式,以优化系统的整体性能和能效。

3.2 运行策略优化

为了进一步提高燃气轮机热电联产系统的能效和经济性,需要对运行策略进行优化。运行策略优化的核心在于根据系统的实际需求和运行条件,灵活调整系统的运行模式和参数,以实现能效的最大化。第一,负荷预测与调度优化。通过引入先进的负荷预测技术和算法,可以准确预测未来的电力和热力负荷需求。基于负荷预测结果,可以制定合理的调度计划,优化燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机(如采用)的运行模式和参数,避免不必要的能耗和波动^[3]。第二,多目标优化。燃气轮机热电联产系统的运行策略优化往往涉及多个目标,如能效最大化、成本最小化、排放最小化等。为了实现这些目标之间的平衡,可以采用多目标优化技术和算法,如遗传算法、粒子群算法等,来搜索最优的运行策略。第三,灵活性与适应性。燃气轮机热电联产系统应具备良好的灵活性和适应性,以应对各种复杂多变的运行条件。例如,在电力市场改革和分布式能源发展的背景下,系统需要具备快速响应市场变化的能力,根据电价和负荷需求灵活调整运行模式和参数。第四,智能化与自动化。随着智能化和自动化技术的不断发展,燃气轮机热电联产系统可以引入先进的控制系统和算法,实现智能化运行和自动化管理。通过实时监测和数据分析,系统可以自动调整运行模式和参数,提高能效和经济性。

3.3 蓄能技术应用

蓄能技术是解决燃气轮机热电联产系统供需不平衡问题的重要手段。通过引入蓄能设备,系统可以在负荷低谷时段储存多余的能量,在负荷高峰时段释放储存的能量,从而优化系统的整体性能和能效。蓄能技术是一种常用的蓄能技术,适用于燃气轮机热电联产系统的供

热需求。通过引入蓄热设备,如热水蓄热罐、熔融盐蓄热罐等,系统可以在负荷低谷时段储存多余的热量,在负荷高峰时段释放储存的热量来满足供热需求。这种技术不仅可以提高系统的供热稳定性和可靠性,还可以降低系统的运行成本。除了蓄热技术外,蓄冷技术也是一种有效的蓄能技术,适用于燃气轮机热电联产系统的制冷需求。通过引入蓄冷设备,如冰蓄冷系统、水蓄冷系统等,系统可以在负荷低谷时段储存多余的冷量,在负荷高峰时段释放储存的冷量来满足制冷需求。这种技术不仅可以提高系统的制冷稳定性和可靠性,还可以降低系统的运行成本。在某些情况下,燃气轮机热电联产系统可能需要同时满足供热和制冷需求。此时,可以采用混合蓄能技术,即同时引入蓄热和蓄冷设备,以实现供需之间的平衡。通过优化混合蓄能系统的运行策略和参数,可以进一步提高系统的整体性能和能效。

4 燃气轮机热电联产系统在工业化应用中的前景

4.1 智能化优化算法在燃气轮机热电联产系统工业化应用中的前景

随着信息技术的飞速发展,智能化优化算法在燃气轮机热电联产系统的工业化应用中展现出广阔的前景。这些算法,如机器学习、深度学习、遗传算法等,能够处理大量复杂的数据,并基于这些数据做出精准的预测和决策。在燃气轮机热电联产系统中,智能化优化算法可以应用于负荷预测、运行参数优化、故障诊断等多个方面。通过负荷预测,系统可以提前知晓未来的电力和热力需求,从而合理安排运行计划,避免能源浪费。在运行参数优化方面,智能化算法可以根据系统的实时运行状态,动态调整燃气轮机、余热锅炉等设备的参数,使系统始终保持在最佳运行状态,提高能效。智能化算法还能对系统进行实时监测和故障诊断,及时发现并处理潜在问题,确保系统的稳定运行。智能化优化算法的应用,不仅提高燃气轮机热电联产系统的运行效率和可靠性,还降低系统的运维成本。随着算法的不断优化和升级,未来燃气轮机热电联产系统的智能化水平将进一步提升,为工业化应用带来更多可能性。

4.2 系统集成与协同优化在燃气轮机热电联产系统工

业化应用中的前景

系统集成与协同优化是燃气轮机热电联产系统工业化应用的另一个重要方向。随着能源系统的日益复杂化和多样化,单一能源系统的运行已经难以满足现代工业的需求。因此将燃气轮机热电联产系统与其他能源系统(如太阳能、风能等可再生能源系统)进行集成和协同优化,成为提高能源利用效率和降低能耗的有效途径^[4]。系统集成可以实现多种能源之间的互补和互济,提高能源系统的灵活性和可靠性。例如,在燃气轮机热电联产系统中引入太阳能集热系统,可以在阳光充足时利用太阳能进行供热,减少燃气轮机的运行时间,从而节约能源。同时,通过协同优化技术,可以对集成后的能源系统进行整体优化,使各系统之间达到最佳的配合状态,进一步提高能源利用效率。未来,随着系统集成和协同优化技术的不断发展,燃气轮机热电联产系统将在工业化应用中发挥更加重要的作用。通过与其他能源系统的深度融合和协同优化,将为实现能源的高效、清洁、可持续利用提供有力支持。

结束语

本文通过对燃气轮机热电联产系统的能效优化与运行策略进行深入研究,取得了一系列有价值的成果。未来,将继续探索更高效的优化算法和更智能的运行策略,以进一步提升系统能效,促进燃气轮机热电联产技术的广泛应用和发展,为构建清洁、高效、可持续的能源体系贡献力量。

参考文献

- [1]冷传斌.燃气轮机联合循环热电联产机组供热特性研究[J].科学与信息化,2021,(07):126.
- [2]许红,张俊,安丰路.联合循环热电联产机组参数优化及变工况性能分析[J].电力科学与工程,2020,36,(02):222-223.
- [3]黄海涛.林建.查俊吉.基于可分离热电燃气轮机模型的电-气-热联合系统调度运行研究[J].电测与仪表,2022,59(1):141-147.
- [4]崔杨.闫石.仲悟之.等.含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J].电网技术,2020,44(11):4254-4264.