

# 核电机组热效率提升的优化措施探讨

张 翼

中广核苍南核电有限公司 浙江 温州 325000

**摘要：**本文聚焦核电机组热效率提升的优化措施。先阐述热效率概念、影响因素及现有水平，指出反应堆类型与设计参数、蒸汽循环系统、汽轮机效率等是关键因素。接着从反应堆设计与技术、蒸汽循环系统改进、汽轮机效率提升、运行管理与维护优化等方面提出具体措施，还探讨了运行与维护管理的优化策略，旨在为提高核电机组热效率提供参考。

**关键词：**核电机组；热效率提升；优化措施

## 1 核电机组热效率概述

### 1.1 热效率基本概念

热效率是衡量能量转换装置性能的关键指标，对于核电机组而言，它反映了核能转化为电能过程中有效利用能量的比例。简单来说，核电机组热效率是指核电站输出的电能与核反应堆内燃料释放的热能之比。从能量转换流程看，核反应堆中核燃料发生裂变反应释放出巨大热能，这些热能通过冷却剂带出反应堆，加热二次侧的水产生高温高压蒸汽，蒸汽推动汽轮机转动，汽轮机带动发电机发电。在整个过程中，由于存在各种能量损失，如反应堆冷却剂系统的热损失、蒸汽在管道传输中的散热损失、汽轮机内部的摩擦和漏汽损失等，使得最终输出的电能远小于核燃料释放的热能，热效率就是用来量化这种能量转换有效程度的参数。准确理解和计算热效率，有助于评估核电机组的经济性和能源利用效率，为机组的设计、运行和优化提供重要依据。

### 1.2 热效率影响因素分析

核电机组热效率受多种因素综合影响。首先是反应堆方面，反应堆的类型、设计参数以及运行工况等对热效率有决定性作用。不同类型的反应堆，如压水堆、沸水堆、重水堆等，其核燃料特性、冷却剂循环方式不同，导致能量释放和传递效率存在差异。反应堆的设计参数，如功率密度、冷却剂流量和温度等，也会影响热能的产生和传输效率<sup>[1]</sup>。其次，蒸汽循环系统是连接反应堆和汽轮机的重要环节，其工作原理和运行状态对热效率影响显著。蒸汽的产生、传输和冷凝过程中的能量损失，以及循环系统的热力参数匹配等，都会改变热效率。另外，汽轮机作为将蒸汽热能转化为机械能的关键设备，其效率高低直接影响整个机组的热效率。汽轮机的内部结构、叶片设计、通流部分的气动性能以及运行维护状况等，都会造成能量转换过程中的损失，进而影

响热效率。

### 1.3 现有核电机组热效率水平

目前，全球范围内不同类型和技术的核电机组热效率存在一定差异。一般来说，第二代压水堆核电机组的热效率大约在33%-35%之间。这些机组经过多年的发展和改进，技术相对成熟，在能源供应中发挥了重要作用。随着技术的不断进步，第三代核电机组在热效率方面有了显著提升。例如，一些先进的第三代压水堆核电机组，通过优化反应堆设计、改进蒸汽循环系统和采用更高效的汽轮机技术，热效率可达到37%-39%左右。部分正在研发和建设的第四代核电机组，致力于进一步提高热效率，目标是将热效率提升至40%以上，甚至更高。提高热效率不仅可以减少核燃料的消耗，降低发电成本，还能减少核废料的产生，对核能的可持续发展具有重要意义。

## 2 核电机组影响热效率的关键因素

### 2.1 反应堆类型与设计参数的影响

反应堆类型是影响热效率的基础因素。压水堆以其结构紧凑、运行稳定等特点成为目前应用最广泛的反应堆类型之一。在压水堆中，核燃料在高压下进行裂变反应，冷却剂将热量带出反应堆后，通过蒸汽发生器产生蒸汽，这种间接循环方式在一定程度上减少了放射性物质与汽轮机等设备的接触，但也会带来一定的热损失。沸水堆则是直接在反应堆内产生蒸汽，减少了蒸汽发生器这一环节，理论上热效率可能更高，但由于蒸汽中带有放射性，对设备和运行管理要求更为严格。重水堆使用重水作为慢化剂和冷却剂，具有中子经济性好、可利用天然铀等优点，但重水的成本较高，且反应堆设计相对复杂。

反应堆的设计参数对热效率有着至关重要的影响。其中，堆芯功率密度和冷却剂流量是两个关键参数。

(1) 堆芯功率密度反映了单位体积堆芯内释放的热量。提高堆芯功率密度可以在相同体积内产生更多的热能,从而提高热效率。然而,过高的功率密度也可能导致堆芯温度上升,增加核燃料的烧损速率和放射性废物的产生,同时还会对反应堆材料和冷却系统提出更高要求。因此,需要在保证安全的前提下,合理优化堆芯功率密度,以实现热效率的最大化<sup>[2]</sup>。(2) 冷却剂流量则决定了反应堆内热量的传输速度。冷却剂在反应堆内循环流动,将核燃料释放的热量带出发电系统,并通过蒸汽发生器传递给二次侧的水以产生蒸汽。增大冷却剂流量可以加快热量的传输速度,减少热量在反应堆内的积聚,从而降低反应堆温度,提高热效率。但是,过高的冷却剂流量也会增加泵功消耗和冷却系统的复杂程度,因此需要在确保热效率提升的同时,综合考虑系统的经济性和可行性。通过精确计算和实验验证,确定最优的冷却剂流量,以实现热效率的最大化。

## 2.2 蒸汽循环系统的工作原理与效率损失分析

蒸汽循环系统是核电机组能量转换的重要中间环节。其工作原理是:反应堆产生的热量通过冷却剂传递给蒸汽发生器,使二次侧的水变成高温高压蒸汽,蒸汽进入汽轮机膨胀做功,推动汽轮机转动,做功后的蒸汽进入凝汽器被冷却成水,再通过给水泵重新送回蒸汽发生器,形成循环。在这个过程中,存在多种效率损失。蒸汽在管道传输过程中,由于管道散热,会导致部分热量损失,尤其是在长距离传输或保温效果不佳的情况下,这种损失更为明显。蒸汽在汽轮机中做功时,由于叶片表面的摩擦、漏汽以及余速损失等,使得蒸汽的内能不能完全转化为机械能,造成汽轮机内部的效率损失。凝汽器的冷却效果也会影响整个循环系统的效率,如果凝汽器内真空度不足,蒸汽的冷凝温度升高,会导致循环热效率下降。

## 2.3 汽轮机效率及其影响因素

汽轮机是将蒸汽热能转化为机械能的核心设备,其效率直接影响核电机组的热效率。汽轮机的效率主要包括内部效率和外部效率。内部效率主要取决于汽轮机的通流部分设计、叶片形状和材料等因素。合理的通流部分设计可以减少蒸汽在流动过程中的能量损失,提高蒸汽的做功能力。先进的叶片形状设计能够降低叶片表面的摩擦损失,提高叶片的气动性能。高质量的叶片材料可以承受高温高压蒸汽的冲刷和腐蚀,保证汽轮机的长期稳定运行。外部效率则与汽轮机的调节系统、进排气参数等因素有关。调节系统的性能影响汽轮机在不同负荷下的运行效率,良好的调节系统可以使汽轮机在各种

工况下都能保持较高的效率。进排气参数的合理匹配可以减少蒸汽在进排气过程中的能量损失,提高汽轮机的整体效率。汽轮机的运行维护状况,如定期检修、清洗叶片等,也对效率有重要影响。

## 3 核电机组热效率提升的优化措施

### 3.1 反应堆设计与技术优化

为了提高反应堆的热效率,可以从多个方面进行设计和技术优化。在反应堆堆芯设计方面,采用先进的燃料组件设计,提高燃料的利用率和堆芯的功率密度。例如,研发新型的燃料棒包壳材料,提高其耐高温、耐腐蚀性能,允许反应堆在更高的温度和压力下运行,从而增加热能的产生。优化堆芯的布局和中子通量分布,使核燃料的裂变反应更加均匀和充分,减少局部过热或燃料未充分燃烧的情况。在反应堆冷却剂系统方面,改进冷却剂的循环方式,提高冷却剂的传热效率。例如,采用超临界水冷反应堆技术,使冷却剂在超临界状态下运行,避免了汽液两相共存时的传热恶化问题,提高了热能的传输效率。研发新型的反应堆安全系统,在确保安全的前提下,减少安全系统对反应堆正常运行和热效率的影响。

### 3.2 蒸汽循环系统的改进

针对蒸汽循环系统的效率损失问题,可以采取一系列改进措施。在蒸汽管道设计方面,优化管道布局,减少管道的长度和弯头数量,降低蒸汽在传输过程中的阻力损失。采用高效的保温材料对管道进行保温,减少管道散热损失。对于蒸汽发生器,改进其传热管的设计和材料,提高传热效率,减少热阻<sup>[3]</sup>。例如,采用螺旋管式蒸汽发生器,增加传热面积,提高蒸汽的产生效率。在凝汽器方面,优化凝汽器的结构和冷却水系统,提高凝汽器的真空度。采用高效的冷却水泵和冷却塔,降低冷却水的温度,增强蒸汽的冷凝效果。另外,还可以考虑采用中间再热循环技术,将汽轮机高压缸做功后的蒸汽重新加热,再送入低压缸继续做功,提高蒸汽的做功能力,从而提高整个循环系统的热效率。

### 3.3 汽轮机效率提升技术

提高汽轮机效率是提升核电机组热效率的关键环节。在汽轮机设计方面,采用先进的通流部分气动设计技术,如三维气动设计方法,优化叶片的形状和排列方式,减少蒸汽在叶片通道中的能量损失。研发新型的高性能叶片材料,如单晶叶片或定向结晶叶片,提高叶片的强度和耐高温性能,允许汽轮机在更高的蒸汽参数下运行,从而提高效率。在汽轮机制造工艺方面,提高加工精度和装配质量,减少叶片与汽缸之间的间隙,降低

漏汽损失。采用先进的表面处理技术，如涂层技术，减少叶片表面的摩擦损失。在汽轮机运行维护方面，建立完善的监测和诊断系统，实时监测汽轮机的运行参数和性能指标，及时发现和处理设备故障和异常情况。定期对汽轮机进行检修和维护，清洗叶片表面的污垢，调整叶片的间隙，保证汽轮机始终处于良好的运行状态。

### 3.4 运行管理与维护优化

良好的运行管理与维护是确保核电机组热效率稳定提升的重要保障。在运行管理方面，制定科学合理的运行规程和调度策略，根据机组的实际运行情况和电网需求，优化机组的负荷分配和运行方式，使机组在高效区运行。加强运行人员的培训和管理，提高运行人员的操作技能和应急处理能力，确保机组的安全稳定运行。在设备维护方面，建立完善的设备检修计划和维护体系，采用状态检修和预防性维护相结合的方式，提前发现设备潜在的问题和故障隐患，及时进行维修和更换，避免设备故障导致的热效率下降。引入智能化的设备管理系统，利用大数据和人工智能技术对设备的运行数据进行分析和预测，为设备的维护决策提供科学依据。加强与设备制造商和科研机构的合作，及时了解和引进先进的技术和设备，不断提升机组的运行管理和维护水平。

## 4 核电机组运行与维护管理优化

### 4.1 设备检修与维护策略

合理设备检修维护策略对核电机组安全运行与热效率提升极为关键。传统定期检修虽能保证设备一定可靠性，但有过度或检修不足问题。如今，现代核电机组多采用状态检修与基于风险的检修（RBM）策略。状态检修靠设备上的传感器，实时监测振动、温度、压力等参数，用数据分析判断设备健康、预测故障趋势，提前针对性检修。基于风险的检修则综合故障概率、后果及检修成本评估风险，依风险等级定检修计划，关键和高风险设备增加检修频率与项目，一般和低风险设备适当减少检修次数，提高效率、降低成本。同时，建立完善设备备件管理系统，确保检修时及时提供合格备件，减少设备停机时间。

### 4.2 操作人员培训与管理

操作人员是核电机组运行维护的直接执行者，其技

能与管理水平关乎机组安全平稳运行及热效率稳定提升。培训上，要制定系统全面的计划。基础理论知识培训是基础，助其了解机组原理、结构与规程；模拟机培训模拟各类工况，提升应对突发情况的能力；现场实操培训让操作人员熟悉实际设备操作维护，积累经验。管理方面，建立严格资格认证与绩效考核制度，确保操作人员持证上岗，定期考核评估，依结果奖惩与调岗，激励提升业务水平<sup>[4]</sup>。此外，加强安全意识与责任心教育，通过安全活动、案例分析营造安全文化，让安全理念深入人心。

### 4.3 智能监控与故障诊断系统应用

信息技术与人工智能发展，使智能监控与故障诊断系统在核电机组运行管理中广泛应用。智能监控系统借机组各处传感器，实时采集温度、压力、流量、振动等大量运行数据，传至监控中心分析处理。利用数据挖掘与机器学习算法，对正常与故障数据建模，建立机组正常运行与故障诊断模型。数据异常时，系统及时报警，依故障诊断模型快速定位原因与位置，为运行人员提供决策支持。智能故障诊断系统还能评估与预测机组健康状况，提前发现隐患，指导运维人员采取预防措施，避免故障扩大，提高机组可靠性与可用性，保障热效率稳定。

### 结束语

核电机组热效率提升对核能可持续发展意义重大。通过反应堆设计优化、蒸汽循环系统改进、汽轮机效率提升以及运行管理与维护优化等多方面举措，可有效提高热效率，减少燃料消耗与废料产生。未来，需持续探索创新技术，加强运行管理，充分利用智能监控等手段，保障机组高效稳定运行，推动核电事业不断向前发展。

### 参考文献

- [1] 修炳林, 姜波, 郭永阔. 基于运行事件分析的核电安全管理探讨[J]. 核科学与工程, 2021, 41(03):581-587.
- [2] 孙玉彪. 再热蒸汽温度控制对核电机组运行可靠性的影响探讨[J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(16):37-38.
- [3] 邵思奇, 邵和平, 刘艳梅, 等. 核电与多源调峰电源联合调度策略研究[J]. 东北电力技术, 2024, 45(11):7-16.
- [4] 王煦嘉, 齐军, 沙正峰. 纵深防御理念下的核电机组调频能力深化研究[J]. 核安全, 2024, 23(03):25-32.