

超超临界一次再热机组汽轮机调试关键技术与控制策略

王哲伦 李佳伦

黄陵矿业沮源发电有限公司 陕西 延安 727300

摘要：超超临界一次再热机组汽轮机调试关键技术与控制策略的研究，对于提高机组运行效率、保障运行安全具有重要意义。本文探讨了汽轮机启动过程中的优化技术，包括油系统调试、暖机与冲动转子控制等；分析了运行中的稳定性与安全性，涉及调节系统稳定性、振动监测与保护联锁机制；并详细阐述负荷变动与变工况下的控制策略。通过本文的研究，旨在为超超临界一次再热机组汽轮机的调试提供理论指导和实践参考。

关键词：超超临界一次再热机组；汽轮机；调试技术；控制策略

1 超超临界一次再热机组概述

1.1 超超临界发电技术的原理

超超临界发电技术是一种先进的热力发电方式，其关键在于利用超临界状态下的水作为工作介质。所谓“超临界状态”，是指当水的温度和压力超过其临界点（临界温度为 374.3°C ，临界压力为 22.12MPa ）时，水和蒸汽的界限消失，形成一种既非液态也非气态的特殊流体。在这种状态下，水的物理性质发生显著变化，密度减小，热传导性能增强，从而使得热能转换为机械能的效率大幅提高。在超超临界发电技术中，燃料（如煤、石油或天然气）在锅炉中燃烧产生高温高压的蒸汽。这些蒸汽首先进入高压缸进行初步膨胀做功，随后进入超超临界状态的蒸汽发生系统。在这里，蒸汽通过一系列精密设计的加热器和压力调节装置，被进一步加热和升压至超超临界状态。此后，高温高压的蒸汽进入中低压缸继续膨胀做功，最终推动汽轮机旋转，带动发电机发电。由于超超临界状态下蒸汽的热力学性质优越，使得整个发电过程的效率显著提高。相比传统亚临界或超临界发电技术，超超临界发电技术的效率可提升10%以上，从而有效降低了发电成本并减少了碳排放。

1.2 一次再热机组的技术特点

一次再热机组是超超临界发电技术中的一种重要类型。其主要特点是在蒸汽做功过程中增加一次再热过程。具体来说，从高压缸排出的蒸汽在进入中低压缸之前，会先经过一个再热器进行二次加热。这一过程使得蒸汽的温度和压力再次提升，从而提高蒸汽在后续膨胀做功过程中的能量转换效率^[1]。一次再热机组的技术优势主要体现在以下几个方面：一是提高发电效率，由于蒸汽在再热过程中获得更高的温度和压力，使得整个发电循环的热效率得以提升。二是增强机组的灵活性和稳定性，一次再热机组能够根据不同的负荷需求进行灵活调节，确

保电网的稳定运行。三是降低污染物排放，通过优化燃烧和蒸汽循环过程，一次再热机组能够有效减少氮氧化物、硫氧化物等有害物质的排放，符合现代环保要求。

2 超超临界一次再热机组汽轮机调试关键技术

在现代电力工业中，超超临界一次再热机组汽轮机以其高效率、低排放的特点，成为了能源转换领域的重要组成部分。为了确保这些机组的稳定运行，调试工作显得尤为重要。

2.1 汽轮机本体调试技术

汽轮机本体调试是确保机组安全、高效运行的基础。超超临界一次再热机组汽轮机由于参数高、结构复杂，其本体调试技术尤为关键。超超临界机组汽轮机缸体在启动、停机或快速变负荷时，缸体温度梯度需保持较小，以减少热应力。这要求调试人员精确控制缸体加热和冷却过程，避免材料因温度突变而产生过大的热应力。缸体的旋转对称性设计有助于温度均匀分布，进一步降低热应力水平。补汽调节阀是超超临界机组汽轮机的重要部件，它能在主调节阀全开的情况下，向机组提供额外的蒸汽，以满足高负荷需求。补汽阀布置在汽缸下部，蒸汽进入高压缸后，不仅提高机组效率，还通过节流作用降低蒸汽温度，起到冷却高压汽缸的作用。调试时，需确保补汽阀动作灵活、准确，并能根据负荷变化自动调节蒸汽流量。低压末级叶片是汽轮机中最关键的部件之一，其尺寸和材质直接影响机组的效率和可靠性。超超临界机组汽轮机通常采用大尺寸、高强度、抗腐蚀性能好的叶片材料。调试时，需对叶片进行细致的检查，确保其无裂纹、无磨损，并调整叶片间隙，以保证蒸汽流畅通无阻。

2.2 润滑油与密封油系统调试

润滑油与密封油系统是汽轮机稳定运行的重要保障。超超临界机组汽轮机由于转速高、负荷大，对润滑

油和密封油的要求更为严格。润滑油系统调试包括静态调试和动态调试两个阶段。静态调试主要检查系统管道连接、仪表状态、油泵电机试转等；动态调试则通过启动油泵、调整节流阀、观察轴承回油情况等步骤，确保润滑油系统在各种工况下都能稳定运行。调试时，需特别注意轴承箱负压的调整，以保证润滑油回油畅通无阻。密封油系统主要用于防止汽轮机轴端漏汽和漏油。调试时，需检查密封瓦间隙、密封油压力、温度等参数，确保密封效果良好。同时还需注意密封油系统的冷却和过滤，以防止杂质和高温对系统造成损害。

2.3 汽水系统调试

汽水系统是汽轮机能量转换的核心部分。超超临界机组汽轮机汽水系统的调试工作，直接关系到机组的效率和稳定性。锅炉上水时，需根据受热面容积、上水时间和上水量，精确控制给水流量，防止汽水分离器满水。还需定期校验变送器，确保水位测量的准确性。汽水分离器水位的稳定控制，对于防止受热面横向撕裂、提高机组效率具有重要意义。汽水膨胀时，分离器水位会有明显上升，此时需提前控制给水流量，防止汽温下降过多。给水由旁路调门切至主路过程中，也需密切注意给水流量的变化，及时调整给水泵转速或增加燃料，以保持汽温稳定。汽水系统的压力和温度是影响机组效率的关键因素。在机组启动过程中，需严格控制升温升压速度，防止热应力过大造成设备损坏。还需根据负荷变化及时调整给水流量和燃料量，以保持汽水系统的压力和温度稳定。汽水系统启动前，需对系统进行全面冲洗，以清除管道内的杂质和污垢。还需对仪表进行校验，确保测量数据的准确性。在机组运行过程中，也需定期对系统进行冲洗和仪表校验，以保证汽水系统的长期稳定运行^[2]。

3 超超临界一次再热机组汽轮机调试控制策略

在超超临界一次再热机组汽轮机的调试过程中，控制策略的制定与实施至关重要，它不仅关乎机组的稳定运行，还直接影响到能源转换效率和安全性。

3.1 控制系统架构与功能

超超临界一次再热机组汽轮机的控制系统通常采用分层分布式架构，包括现场控制层、监控管理层和远程操作层。现场控制层负责采集传感器数据、执行控制指令，确保机组各部件的精确控制；监控管理层则对现场数据进行实时监控、分析，提供操作指导和报警信息；远程操作层允许操作人员在远离现场的安全环境中，通过网络对机组进行远程监控和操作。控制系统的主要功能包括自动调节、顺序控制、监视与报警、数据记录与

分析等。自动调节功能可根据机组负荷、蒸汽参数等变化，自动调整燃料量、给水流量、汽门开度等，保持机组稳定运行；顺序控制功能则按照预设的程序，自动完成机组的启动、停机、并网等操作；监视与报警功能可实时监测机组状态，一旦检测到异常，立即发出报警信号；数据记录与分析功能则负责记录机组运行数据，为故障分析和性能优化提供依据。

3.2 先进控制算法应用

预测控制算法在超超临界机组汽轮机控制中得到了广泛应用。该算法通过预测未来一段时间内机组的运行状态，提前调整控制策略，以优化机组性能和减少能耗。例如，在负荷变化时，预测控制算法可提前调整燃料量和给水流量，使机组平稳过渡，避免剧烈波动。自适应控制算法能够根据机组实际运行状况，自动调整控制参数，以适应外部环境变化和内部设备老化等因素。在超超临界机组中，自适应控制算法可用于优化汽门开度、调节蒸汽温度等，提高机组效率和稳定性。随着人工智能和机器学习技术的发展，这些技术也开始被应用于超超临界机组汽轮机的控制中。通过训练机器学习模型，可以实现对机组运行状态的智能预测和故障诊断，提高故障发现和处理的效率，降低停机时间。人工智能技术还可以用于优化控制策略，提高机组运行的经济性和安全性。

3.3 安全保护与故障诊断策略

超超临界机组汽轮机配备了多重安全保护机制，包括超速保护、超温保护、振动保护等。这些保护机制能够在机组出现异常时迅速响应，采取紧急措施，防止事故扩大。例如，当机组转速超过设定值时，超速保护装置会立即动作，切断燃料供应，防止机组飞车。故障诊断策略是确保机组安全稳定运行的关键。超超临界机组汽轮机通常采用基于数据驱动的故障诊断方法，通过分析机组运行数据，识别异常模式，定位故障源。还引入了专家系统和神经网络等人工智能技术，提高故障诊断的准确性和效率。一旦诊断出故障，系统会立即发出报警信号，并给出故障处理建议，指导操作人员迅速排除故障^[3]。除了故障诊断外，预防性维护策略也是确保机组长期稳定运行的重要手段。通过对机组运行状态进行持续监测和分析，可以预测设备寿命和潜在故障，提前制定维护计划，避免突发故障导致的停机损失。预防性维护策略的实施，不仅提高了机组的可靠性和安全性，还降低了维护成本。

4 汽轮机启动与运行中的关键技术

4.1 汽轮机的启动过程与优化

汽轮机的启动是一个复杂而精细的过程，涉及多个系统和组件的协同工作。启动过程主要包括以下几个关键步骤和优化措施；（1）油系统的启动与准备：在接通各种外来能源（如电、仪表、空气、冷却水和蒸汽等）后，首先让油系统投入运行。检查并调整油温、油压至规定值，确保轴承、密封等关键部件得到充分润滑，验证辅助油泵的自启动能力和备用油泵的可靠性。（2）气体置换：当被压缩介质为易燃、易爆气体时，必须在开车前进行气体置换，以防止爆炸风险。通常采用氮气作为置换介质，首先用氮气置换出压缩机系统内的空气，然后再用压缩介质置换出氮气。（3）暖管与冲动转子：暖管是为了对金属管壁进行均匀加热，防止因温度上升过快而产生热应力，导致管道变形或裂纹。冲动转子前，需确保主蒸汽温度、真空度等参数达到冲转条件，以避免对机组造成过大的热冲击。（4）冲转与升速：在冲转过程中，应严格控制真空度，避免过低或过高导致的不良影响。升速过程应平稳，避免升速过快引起压缩机喘振或超速保护动作。优化措施：采用先进的控制算法和传感器技术，实时监测并调整启动过程中的各项参数，确保启动过程的平稳和安全。对油系统进行定期维护和检查，确保其始终处于良好状态，提高启动的可靠性和效率。

4.2 运行中的稳定性与安全性分析

汽轮机的稳定运行是确保其高效、安全发电的关键。运行中的稳定性与安全性分析主要包括几个方面；第一、调节系统的稳定性：汽轮机调节系统的稳定性直接关系到机组的转速和负荷波动情况。采用先进的控制策略（如模糊PID控制、神经网络PID控制等）来提高调节系统的稳定性和响应速度。第二、振动监测与分析：振动是汽轮机运行中的常见问题，也是评估机组状态的重要指标。通过安装振动传感器，实时监测机组振动情况，并采取相应的措施（如调整轴承间隙、平衡转子等）来降低振动水平。第三、保护与联锁系统：保护和联锁系统是确保汽轮机安全运行的重要屏障。这些系统能够实时监测机组的各种参数（如超速、润滑油压力低、振动大等），并在异常情况发生时及时采取措施

（如紧急停机）以防止事故发生^[4]。第四、安全性分析：定期对机组进行全面检查和评估，及时发现并处理潜在的安全隐患。加强运行人员的培训和技能提升，提高其应对突发事件的能力和水平。

4.3 负荷变动与变工况下的控制策略

负荷变动是汽轮机运行过程中不可避免的现象。为了应对负荷变动和变工况下的挑战，需要采取一系列有效的控制策略：根据机组运行状态和电网需求，选择合适的负荷控制方式（如基本方式、机跟炉方式、炉跟机方式等）。在负荷变动时，及时调整锅炉和汽机的输出功率，以保持机组的稳定运行和电网的平衡。当机组面临变工况（如蒸汽参数变化、环境温度变化等）时，需要及时调整机组的运行参数（如蒸汽流量、转速等）以适应新的工况。通过优化控制算法和实时监测技术，提高机组对变工况的适应能力和响应速度。在负荷变动和变工况下，通过优化机组的运行方式和调整参数，降低能耗和提高效率。

结束语

综上所述，超超临界一次再热机组汽轮机的调试关键技术与控制策略是确保机组高效、稳定运行的重要保障。通过深入研究和实践应用，不断优化调试技术和控制策略，将有助于提高机组的整体性能和运行安全性。未来，随着技术的不断进步和创新，超超临界机组汽轮机调试技术将迎来更加广阔的发展前景。

参考文献

- [1]吴志祥.超超临界1000MW一次再热机组回热方式设计及其经济性分析[J].节能技术,2024,42(5):434-438. DOI:10.3969/j.issn.1002-6339.2024.05.009.
- [2]丁超.超超临界二次再热机组汽轮机调试关键技术与控制策略[J].集成电路应用,2021,36(01):103-104.
- [3]黄德保.超超临界二次再热机组汽轮机调试关键技术分析与控制[J].广东化工,2020,45(03):154-155+164.
- [4]宁志,何金龟,王小华,陈敏.1000MW超超临界机组锅炉再热蒸汽温度优化调整试验[J].热能动力工程,2021,33(12):111-117.