

火力发电汽轮机通流部分精细化检修工艺优化研究

周迪

安徽华电宿州发电有限公司，安徽 宿州 234000

DOI:10.61369/ME.2026010037

摘 要： 本文针对火力发电汽轮机通流部分精细化检修工艺进行了优化方面的研究工作，在分析汽轮机通流部分检修现状和存在的问题之后，论述了汽轮机通流部分检修对于提高汽轮机效率、保证机组的安全稳定运行的作用。依据实际检修经验，详细介绍了汽轮机通流部分每个重要部件的精细化检修工艺过程，针对本文当中提出的具体优化措施和改进方案并借助实际案例证明了优化方案的可行性，为火力发电企业汽轮机通流部分精细化检修工艺提供了理论及实践指导。同时利于提升汽轮机的通流效率、降低发电成本、提高企业竞争力。

关 键 词： 火力发电；汽轮机；通流部分；精细化检修

Research on the Optimization of Fine Maintenance Technology for the Flow Path Section of Thermal Power Turbines

Zhou Di

Anhui Huadian Suzhou Power Generation Co., LTD., Suzhou, Anhui 234000

Abstract： This paper focuses on the optimization of fine maintenance processes for the flow passages of thermal power generation steam turbines. After analyzing the current status and existing issues in the maintenance of these passages, it discusses the role of such maintenance in improving turbine efficiency and ensuring the safe and stable operation of units. Based on practical maintenance experience, the paper provides a detailed introduction to the fine maintenance process for each critical component of the steam turbine's flow passages. It also presents specific optimization measures and improvement plans proposed in this paper, supported by real-world case studies to demonstrate the feasibility of these optimization plans. This work offers theoretical and practical guidance for the fine maintenance processes of steam turbine flow passages in thermal power generation enterprises. Additionally, it helps enhance the flow efficiency of steam turbines, reduce power generation costs, and boost corporate competitiveness.

Keywords： thermal power generation; steam turbine; flow part; fine maintenance

引言

在能源结构中，火力发电所占比例仍然很大，汽轮机是火力发电的重要设备之一，汽轮机的工作好坏会直接影响到发电企业经济效益的高低及能源的利用效率。汽轮机通流部分是蒸汽变成机械能过程的最直接体现部位，包括叶片、汽封、隔板、转子等部件，汽轮机通流部分工作状况的好坏直接决定了汽轮机的热效率、出力大小和安全性。进入新动力时代后，电厂对节能减排的要求越来越高，同时由于汽轮机的运行参数也越来越高，对于汽轮机通流部分检修的质量也有了更高的要求。传统汽轮机通流部分检修工艺技术中各个工序并没有形成统一的检修标准，且检测方式比较老旧落后，并不能很好的达到检修作业所需要的要求。这些均无法满足目前高效、安全和环保等高标准的要求。

一、汽轮机通流部分精细化检修的重要性

（一）提高汽轮机运行效率

通过精细检修控制好通流部分的各部件尺寸精度以及装配间隙，减少蒸汽的泄漏，减小流道内流动的阻力，从而提高汽轮机

的热效率；经测算，如果汽封间隙缩小了0.1mm,汽轮机的热耗率就降低了0.2%–0.3%，所以对于叶片型线的修磨与完善可以在一定程度上改善蒸汽的流场，使汽轮机有更优异的做功能力^[1]。

（二）保障机组安全稳定运行

精细化检修能够及时发现并消除通流部分的潜在缺陷，如叶

片裂纹、汽封磨损、转子不平衡等，避免因部件故障引发的机组振动、停机等事故，延长设备使用寿命，提高机组运行的可靠性与安全性。

（三）降低发电成本

提高汽轮机运行效率意味着减少燃料消耗，降低发电成本。同时，精细化检修减少了设备故障频率，降低了维修费用和停机损失，提高了发电企业的经济效益。

二、火力发电汽轮机通流部分检修现状及问题分析

（一）检修现状

现在大部分火力发电厂汽轮机通流部分检修工作仍然采用定期检修和故障检修并存的方式。定期检修按照固定的检修时间和运行小时数来进行对通流部分的各个重要零部件的检查、保养；故障检修是在发现汽轮机动转时有较大震动或者设备本身效率下降时进行的重点的检查维修工作。检修工艺中检修方式上都是采用人工来检查设备，比如使用游标卡尺去量叶片尺寸、用眼去观察叶片有无损伤等。检测设备比较落后，无法发现设备的隐蔽性缺陷，不能了解设备真实的工作情况^[2]。并且检修过程中没有制定统一的标准和规范，因为不同的企业、同一企业的机组都有不一样的检修标准，所以检修质量都不一样。

（二）存在问题

1. 检修标准不统一

不同的发电企业对于汽轮机通流部分的检修制订的检修标准没有统一的要求，有些企业按照以前的老的标准开展检修，不能满足新型汽轮机的技术要求，可能导致过度或者不足的检修。火力发电汽轮机通流部分检修中存在问题：各个发电厂，每个检修队伍都是根据自己的实际情况，或是按照参照相关的标准进行检修工作的。由于各个电厂在检修工作中所使用的标准不一致，因此检修时会存在一些缺陷^[3]。比如：各电厂叶片安装间隙检修就存在较大差别。某电厂按照较宽老的标准检修，允许有较大的误差；某电厂则按新的标准检修，要求非常准确。其结果造成了检修质量高低相差极大，有些已经经过检修过的设备还隐藏着危险因素。

2. 检测手段落后

传统的检测方法不易于发现微小裂纹、内部缺陷等，不能提前察觉到可能存在的安全隐患。如叶片内部的疲劳裂纹，常用的肉眼检查以及简单的测量无法检测到，可能会引起叶片断裂，造成严重事故；大部分电厂还在采用老式的直接依靠人肉眼去看或用简单的测量工具测量的方式来进行检测，看不见细小的缺陷，比如叶片里面，哪些是隐藏着的小裂纹？还有比如汽封齿的磨损程度等这些重要的东西是不能够通过传统的方式来进行检测的^[3]。有些比较先进的无损检测方法，比如超声相控阵、激光散斑干涉等方法已经非常成熟了，但是一些比较老的电厂也没有去投入实践应用这些先进手段。

3. 工艺精细度不足

部件修复、安装过程中，加工精度不够，装配间隙不合理等

原因会影响汽轮机运行效率，如汽封间隙过大，会造成蒸汽泄露过多，使得汽轮机热效率下降；若汽封间隙过小，则容易引起动静部件之间摩擦，危及机组运行安全。在叶片修复工作中，个别检修人员只关注形貌恢复，并未注意对表面粗糙度、型线精度等指标进行把关，叶片的气动性能无法得到充分的恢复，从而影响了汽轮机的效率。汽封间隙调修没有使用精度高的测量工装以及精细的调整工艺，导致汽封间隙大小难于精准控制，造成汽封间隙过大而发生蒸汽泄漏，或者过小而出现汽封齿与转子发生摩擦的现象^[4]。转子动平衡校正不够精密，以致于转子高速转动时产生振动，导致加速设备磨损，缩短设备的使用寿命，并且后期维护成本也会提高。

4. 信息化程度低

检修过程中缺乏有效数据记录和分析方法，无法对设备状态进行长期跟踪和评价，不利于检修经验的总结与检修工艺的改进；多数电厂检修管理仍沿用传统模式，检修过程及设备运行相关参数均以手工方式记入纸质记录文件中，数据信息零散且分散，查找麻烦，不具备快速的信息资源共享和有效利用的基础；检修人员无法及时获得设备的历史检修数据和运行状态数据，不能及时做出正确的检修决策；没有建立信息化的管理系统进行检修作业过程的监控、预警及设备运行情况的跟踪管理，因而存在因未能及时发现检修过程中存在的问题而延误检修工期的现象。

三、汽轮机通流部分精细化检修工艺优化措施

（一）叶片检修工艺优化

1. 检测技术升级

运用超声波探伤、渗透探伤、涡流探伤等先进的无损检测手段，对叶片表面和内部缺陷进行全面检测；采用激光扫描技术准确获取叶片型线，与设计模型比对分析叶片型线是否满足规定的要求。采用无损检测方法中的超声相控阵检测技术等先进技术代替传统的超声检测方法，提高超声成像的质量，可以清楚的看见叶片内部缺陷成像，可以精准地测出叶片的微小裂纹以及气孔缺陷的位置和大小，并且装配上激光扫描测量设备，用3D扫描仪获取叶片型线的数据，与原来的3D设计模型相比来确定型线偏移，误差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 之内；使用涡流热成像技术检测叶片的表面应力集中点，根据得到的热成像图像可以看出整个叶片表面的应力分布情况，可以预见叶片可能产生的疲劳损伤隐患，在一定程度上预防了事故的发生，避免了由于检修不到位造成的影响^[5]。

2. 修复工艺改进

采用激光熔覆、等离子喷涂等先进技术对叶片表面存在的磨损、腐蚀缺陷进行修复，并且要重点保证修复部位的耐磨性及耐腐蚀性得到较大程度的提升。对于修复后叶片重量偏差的要求必须严格，在确保修复叶片的质量均匀分布的情况下，尽可能避免修复叶片在安装过程中产生转子不平衡现象；对于叶片表面有轻微磨损的情况，采用激光熔覆修复技术，在磨损处熔覆与叶片基体成分相近的合金粉末，从而形成致密、高强度的修复层；修复

层的结合强度高,硬度能达到叶片原始硬度,因此能够有效恢复叶片的表面性能;对叶片边缘出现的小面积损伤可以采用3D打印技术修复。基于缺损部位三维数据信息,制作与原叶片相匹配的修复件,利用焊接、粘接工艺将修复件固定在叶片上,从而达到使修复后叶片外形精密度高、气动性能良好的目的。

3. 安装精度控制

叶片安装过程中通过高精度测量器具控制叶片的轴向、径向间隙,保证叶片与叶轮、隔板的装配精度;用专用工装定位装置,保证叶片的安装角度正确;叶片安装之前,用高精度水平仪、激光对中仪校正转子水平度、同轴度小于0.02mm。安装叶片用专用叶片安装定位工装,工装与叶片、轮槽配合间隙不超过0.01mm,保证叶片安装位置正确。安装完毕后,用振动测试仪测叶片振动特性,其振动幅值必须达到设计要求,如超过,则需要再次调整叶片安装角度或叶片安装位置,直到叶片振动合格为止。以保证叶片安装精度满足汽轮机的正常、高效、安全运行。

(二) 汽封检修工艺优化

1. 汽封结构改进

采用新型高效汽封,比如布莱登汽封、蜂窝汽封等,采用弹簧预紧结构,机组启动和停机时,由于机组转速低,汽封齿与转子间存在一定的间隙,不会产生摩擦,只有当机组进入稳定运行状态时,在蒸汽压力的作用下,才会将汽封齿紧贴到转子上,起到减少蒸汽泄漏的作用;使用新型梳齿式汽封结构,在原来的基础上增加了梳齿的数量,缩小了齿距,提高了防止蒸汽泄漏的能力;在梳齿表面上涂耐耐磨、耐高温的陶瓷材料,增加汽封齿的耐磨性和抗腐蚀性能,延长汽封寿命;设置可调式汽封结构,汽封体上面设计调节装置,按照汽轮机的不同工况调节汽封间隙,进而达到降低汽封蒸汽泄漏量的目的,提高汽轮机的工作效率,可以提高汽轮机的热效率0.5%~1%左右^[6]。

2. 间隙精确调整

采用激光测距仪、塞尺等仪器设备对汽封间隙值进行测量,并按汽轮机不同工况下热膨胀特性来留足热态间隙,保证汽封无论是在启停还是其它工况下都能达到既不漏汽也不刮伤转子的合理的汽封间隙值。用激光测量汽封间隙,精度可以达到0.005mm;测量后,用专用汽封间隙调整垫片来进行调整,调整垫片种类齐全、厚度多样的特点能够充分保证调整到的汽封间隙准确无误;同时利用有限元分析软件,仿真模拟汽封间隙的变化带来的汽轮机性能上的变化,从而确定合适的汽封间隙;调整完成后,再使用激光测量仪进行测量,以保证各处间隙满足设计要求。

3. 汽封片修复与更换

针对汽封片磨损、变形的情况,运用专用修复工具进行整形修复;不能修复的及时更换,确保汽封片的平整度及弹力;对汽封片轻微磨损的情况,可以采取喷砂处理的方式将汽封片的表面氧化层、磨损痕迹清除干净,随后在其表面进行镀铬处理,镀层厚度在0.02~0.05mm之间,并使汽封片的表面恢复硬度及光洁度;对于汽封片磨损比较严重或者已经产生裂纹的情况,则需要进行更换,选用与原汽封片材质一致、性能优良的新汽封片,采用专用安装工器具安装,保证汽封片安装到位、固定牢靠、各部

分间隙均匀,最后对汽封片装配完成后的机组进行气密性试验,检查汽封片的密封效果,满足相关标准要求的泄漏率即可。

(三) 转子检修工艺优化

1. 转子状态检测

借助先进的振动监测及轴系对中检测手段,全面检测转子振动特性和轴系同心度,并根据振动频谱判定转子是否出现不平衡、不对中及轴弯曲等故障;运用振动频谱分析方法状态检测转子,将振动传感器安装在转子的不同位置处,实时监测转子的振动状况,经过频谱分析软件对监测信号进行处理,分析振动频率的成分,判别转子是否存在不平衡、不对中或轴承故障等问题;并用红外热像仪对转子表面温度进行检测,并绘出转子表面温度分布云图,找出局部过热部位,分析是否因摩擦、磨损或内藏缺陷造成的现象;定时对转子做磁粉探伤、超声波探伤工作,看转子表面和内部有无裂纹等缺陷。

2. 动平衡校正

采取高精度动平衡设备对转子做动平衡试验,从试验结果中准确计算配重块的质量与安放位置,然后对转子进行动平衡校正;大吨位的转子还可以采取在线动平衡的方式,在机组运转的过程中做动平衡调整,大大降低停机时间。建立转子动平衡试验台,用高速动平衡法对转子进行动平衡校正。将加速度传感器、位移传感器安放在转子的不同径向或轴向上,试验台上采集并存储转子在不同的转速下的振动信号,用专门的动平衡分析软件得到不平衡量大小及相位,并据此在转子上选择相应位置加配重块或者减配重块,配重块的材质与重量需要依据转子结构与平衡要求进行选择。最后反复试重与调试之后,使转子剩余不平衡量满足要求。当转子运行于工作转速下,其振动幅值应小于等于25 μ m。

(四) 检修流程优化

1. 制定标准化检修流程

根据汽轮机通流部分各部件的技术要求以及特点,编写出详细而统一的检修过程及作业指导书,并规定各个检修环节的具体操作步骤、技术标准及质量验收要求。针对汽轮机通流部分结构特点及检修要求,制定完整的标准化检修程序,并将检修过程中各环节具体的操作步骤、技术要求、质量标准、验收方法进行细化并书面化后发至检修人员,如:对于叶片检修,具体明确叶片拆卸、清洗、探伤检查、修复、安装的每一项内容的具体操作规范及注意事项;对于汽封检修,则要对汽封间隙测量、调整、汽封片修复更换的相关工艺进行明确规定。实现检修工作标准,有序开展,提高检修质量和检修工作效率。

2. 引入信息化管理系统

建立汽轮机通流部分检修信息化管理系统,实现检修过程中相关数据的实时记录、存储和分析,系统能查到设备的历史检修数据、设备状态变化趋势等,在检修过程中给检修人员合理选择检修方案起到有效的参考。建立汽轮机通流部分检修信息化管理系统,把检修计划、检修记录、设备档案、备品备件管理等内容归集到系统中去进行统一管理;检修人员可以通过移动终端实时录入检修数据,上传检修照片及视频,检修管理人员能够通过系统实时了解检修进度、查看质量记录等,以此发现和解决问题;

利用大数据分析技术挖掘和分析检修数据来预测设备故障的发展趋势，并据此来确定合理的检修计划安排，从而提高检修管理水平的科学化和智能化程度。

四、结论

火力发电汽轮机通流部分精细化检修工艺优化对提高汽轮机运行效率、保证机组的安全稳定运行具有重要意义，在检测技术

改造、修复工艺改良及流程优化等方面合理地使用新技术能很好地改善传统检修工艺的缺点，提高检修质量以及工作效率，在现场操作过程中发电企业根据自身的设备情况以及技术水平不断完善精细化检修工艺并加强对检修的过程管理，让汽轮机通流部分始终保持良好的运转状态，在今后的时间里，检测技术和修复工艺都在不断的提升下，未来汽轮机通流部分精细化检修工艺也会得到更好的完善，为火力发电行业的高质量发展提供有利支持。

参考文献

[1] 李传海, 葛云双, 翟观文. 火力发电厂汽轮机设备安装检修技术分析 [J]. 清洗世界, 2024, 40(10): 181-183.
[2] 王磊, 赵怀玉, 王洪平. 火力发电厂汽轮机检修过程的精细化管理研究 [J]. 冶金与材料, 2023, 43(3): 32-34.
[3] 杨奥飞. 火力发电厂汽轮机常见故障分析与检修研究 [J]. 电力系统装备, 2022(8): 141-143.
[4] 王胜利. 火力发电厂汽轮机振动故障分析与检修 [J]. 新型工业化, 2021, 11(1): 132-133, 147.
[5] 王杰. 火力发电厂汽轮机检修过程的精细化管理分析 [J]. 清洗世界, 2021, 37(11): 129-130.
[6] 李阳. 火力发电厂汽轮机检修过程的精细化管理分析 [J]. 中国设备工程, 2021(12): 266-267.