

电力发电机转子检修技术研究

和志勇

云南大唐国际电力有限公司，云南昆明，650000；

摘要：发电机作为电力系统的核心设备，其转子承担着电磁能量转换的重要功能，任何隐性损伤均可能演化为严重的运行故障。转子长期在高温、高速及强电磁场环境中运行，其结构稳定性与绝缘性能直接影响机组安全性与发电效率。为提升检修工作的针对性与可靠性，建立科学、高效的转子检修体系，是确保电网稳定运行与机组经济性的重要基础。本文梳理发电机转子常见缺陷，并探讨相关检修技术，为电力设备检修策略的完善与安全运行提供参考。

关键词：发电机；转子；检修技术；无损检测；故障诊断；检修技术

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.008

1 电力发电机转子主要构成及材料特性

电力发电机转子由转轴、磁极铁心、励磁绕组、阻尼绕组及联轴部件等组成，其结构设计旨在在高速旋转与强电磁场作用下保持足够的机械强度与磁性能。转轴通常采用高强度合金钢，通过调质与精密加工以获得优良的抗拉强度、抗疲劳性能和尺寸稳定性，从而确保在数千转每分钟的运行条件下仍能保持稳健的动态特性。磁极铁心多使用硅钢片叠压结构，以降低涡流损耗并提高磁导率，使其在磁励作用下能够有效形成稳定的磁通分布。励磁绕组一般采用高导电性的铜材，并辅以耐高温、耐电晕的复合绝缘材料，以承受长期电流激励和运行温升；大型机组常采用F级或H级绝缘系统以增强绕组的热稳定性。阻尼绕组多设置于磁极表面，用于削弱振荡和不对称运行带来的转矩波动，其材料多为铜或铜合金，要求具有良好的导电性和耐热性。此外，联轴器、键槽及固定结构需具备高强度、抗冲击与高精度配合特性，以确保转子整体的力学完整性与动平衡。整体来看，转子材料体系兼顾机械、热、电磁三重性能，是实现发电机高效、安全运行的关键基础。

2 发电机转子典型故障类型与形成机理

发电机转子在长期高温、高速、强电磁环境下运行，承受复杂的机械应力、热应力与电磁力，其故障具有多样性、隐蔽性和渐进性特点。典型故障主要包括机械类、电气类、绝缘类和热效应相关类，它们相互影响并可能以耦合方式发展，最终威胁机组安全稳定运行。

2.1 机械类故障及其机理

机械类故障是转子最常见的缺陷类型，主要涉及动平衡失稳、振动异常、轴系偏移、疲劳裂纹以及磁极结

构松动等问题。动平衡失稳通常源于转子质量分布不均、局部磨损或沉积物累积，导致转子旋转时离心力不均衡，从而产生振动。振动长期得不到控制，会进一步引发轴承磨损、键槽松动以及联轴器对中失准，使轴系出现偏移甚至弯曲。转轴疲劳开裂则多因长期循环应力作用，尤其在启动、停机过程中的热冲击和机械冲击叠加条件下，易在应力集中区域产生微裂纹并逐渐扩展，最终影响整体结构强度。磁极松动与紧固失效多由振动冲击、螺栓松弛或长期热胀冷缩引起，一旦磁极发生位移，会引发电磁力不平衡、局部过热甚至严重的扫膛事故。机械磨损与腐蚀通常发生在风道、联轴器或紧固件处，金属表面在高湿环境、电化学反应或介质侵蚀作用下逐渐退化，加速结构变形并降低机械可靠性。这些机械类故障往往呈链式发展，一旦出现早期迹象，应通过振动分析、外观检查等技术及时处理。

2.2 电气类故障及其机理

电气类故障主要集中在绕组系统与励磁系统相关的异常，如匝间短路、匝数不平衡、局部过流、退磁问题等。匝间短路是最危险的电气故障之一，其形成一般由绝缘老化、机械摩擦、局部放电或绕组受损导致相邻线圈间发生金属性接触，使局部形成强电流通路并产生过热，进一步加速绝缘退化，极端情况下可能导致绕组烧毁。匝数不平衡多由制造偏差、绕组变形或局部绝缘损伤引起，使得磁动势分布不均，产生不规则磁通，导致发电机输出波形畸变和电磁力不对称。绕组局部过热现象则常源于冷却不良、电阻增大或局部短路，热量在受限区域积累，使温度迅速升高，进一步诱发绝缘破坏。励磁系统异常（如励磁调节器故障、励磁电流波动）会导致励磁电流突然升高或下降，形成电流冲击，引发涡

流增强或磁性能下降，严重时造成转子局部退磁。磁拉力不均是另一类常见问题，通常由转子偏心、气隙不均或绕组磁势不对称引起，使转子承受周期性附加载荷，造成轴系振动并加速部件疲劳。

2.3 绝缘类故障及其机理

绝缘系统是转子安全运行的重要屏障，其故障多表现为绝缘老化、局部放电、绝缘剥离和含潮问题。绝缘老化是不可避免的自然过程，长期的热、电、机械作用会使绝缘材料发生链段断裂、介质性能下降，从而降低耐压能力。局部放电是绝缘缺陷的早期表现，其形成多由气隙、裂纹或表面污垢引起，当电场强度超过局部空气击穿值时，微放电持续发生，逐渐腐蚀绝缘材料，形成蚀坑或导电路径。绝缘剥离通常由热循环引起的体积变化不均、振动冲击或过热导致的胶粘剂失效，使绝缘层与铜导体分层，进而降低整体介电强度。含潮问题则常见于停机环境湿度较高或密封不良时，水分渗入绝缘层会大幅降低介电性能，使介损增大，甚至形成导电通路，引发绝缘击穿。长期温升对绝缘介质的破坏尤为显著，高温会加速树脂老化，使材料软化、脆裂，最终导致绝缘功能丧失。

2.4 热效应相关故障及其机理

热效应相关故障是转子运行中最难察觉但危害最大的隐性故障之一。热疲劳是由温度循环导致材料反复膨胀收缩引起，尤其在负荷频繁变化的大型机组中更为明显。金属内部产生交变热应力，随着循环次数增加，微裂纹不断扩展，最终造成结构破坏。热点的形成往往与局部短路、冷却道堵塞、风道不畅或导体接触不良有关，热量无法散出，使局部温度持续积累，导致绝缘烧蚀和铜材退火。热点扩大后会产生热不均，改变转子整体的热分布，诱发失衡与变形。冷却不均带来的热变形会使转子外圆局部膨胀，形成偏心，进一步破坏气隙均匀性，造成更大的电磁不平衡和机械振动，形成恶性循环，最终可能发展为严重的扫膛事故或绝缘击穿。

3 转子检修的检测技术体系与诊断方法

3.1 无损检测技术（NDT）

超声检测（UT）利用声波反射发现内部裂纹及分层，适用于转轴等厚壁区域；磁粉检测（MT）通过漏磁显像识别铁磁材料表面裂纹；涡流检测（ET）能探测导电材料表面微裂纹及金属性损伤；红外热成像可快速识别热点、冷却不均等热异常。由于各技术在敏感度与适用范围上存在差异，工程中常采用 UT+MT 或 ET+

红外等组合，以覆盖更多潜在缺陷。

3.2 电气检测技术

绝缘电阻、介损及极化指数用于评价绝缘受潮、老化与介质损耗情况；交流阻抗与匝间试验可定位绕组匝间短路、匝数不平衡与局部电流集中；电流分析法通过波形与谐波成分变化判断绕组短路程度；励磁系统测试包括励磁电流稳定性、调节器响应与磁场建立能力，可反映励磁系统整体健康状况。

3.3 机械状态检测技术

振动分析用于识别偏心、松动、质量不平衡及电磁不平衡等动态问题；轴向位移监测可发现轴系偏移、推力轴承异常；动平衡试验通过质量补偿恢复转子旋转稳定性；转速波动分析及联轴器对中检测用于评估机械耦合精度和负载匹配情况，是识别潜在机械故障的重要手段。

3.4 先进智能检测手段

在线传感系统可实时监测温度、振动、电磁参数，形成连续状态曲线；数字化振动测量系统提升频域分析精度；基于大数据的故障模式识别能从海量运行数据中提取异常模式；AI 智能诊断模型在复杂故障耦合识别中具有优势，但其效果依赖于训练样本质量与工况多样性，仍需进一步优化与验证。

4 发电机转子故障修复关键技术

4.1 机械类故障修复技术

机械损伤是最易影响转子整体稳定性的故障类型，其修复需从结构完整性、动平衡恢复和紧固可靠性三个方面展开。

4.1.1 动平衡缺陷修复技术

动平衡失稳常由质量偏心、磨损不均或松动引起。修复时首先依据试验结果确定不平衡量的大小及相位，通过加配重块、局部去重或增焊补强等方式校正质量分布。对于大容量转子，常需进行双面动平衡，以确保高速段振动峰值不超限。修复后的平衡精度应满足设计要求，并结合运行数据修正可能存在的热态偏差，确保机组升速至额定转速后仍保持稳定振动水平。

4.1.2 转轴裂纹与磨损修复技术

疲劳裂纹是转子灾难性故障的前兆，其修复需严格依据裂纹深度和扩展趋势选择工艺。浅层裂纹多采用碳弧气刨或机械打磨去除，再采用金属补焊和热处理恢复材料性能；深层裂纹需采用堆焊修补或安装补强套，以增强局部承载能力。磨损部位则多通过精密车削、镀铬

或热喷涂方式恢复尺寸精度，随后进行无损检测确认无残余缺陷。

4.1.3 磁极松动与紧固结构修复技术

磁极松动将导致磁拉力不均和严重振动，需及时修复。修复过程中应更换损坏的螺栓、螺母及定位件，重新施加规定的紧固力矩，并对磁极脚部接触面进行研磨处理以提升贴合度。若安装孔磨损严重，可采用过盈套或金属补强材料恢复原有结构承载能力。

4.2 绕组与匝间短路修复技术

绕组系统是转子电磁性能的核心区域，修复质量直接影响磁场稳定性和温升水平。

4.2.1 匝间短路修复技术

匝间短路需通过退绕、重绕或局部更换一段绕组导体进行修复。修复时必须保证匝数一致、导线截面一致及线圈形状保持稳定，以避免磁势不对称。对于老化严重的绕组，可通过整体重绕并采用H级绝缘材料升级处理，从根本上提升绕组的耐热能力。重绕后需通过匝间冲击试验和交流阻抗测试验证磁势分布是否恢复正常。

4.2.2 焊点与接触不良修复技术

接头处若因氧化或松动引起接触电阻增大，会导致局部过热。修复措施包括打磨氧化层、重新施焊、施加银基焊料提高导电性，并确保焊点致密无夹渣。焊接完成后需通过直流电阻测试、交流阻抗分析确认修复质量。

4.3 绝缘损伤修复技术

绝缘系统是保证转子电气安全的关键，其修复需兼顾介电性能、热稳定性和机械强度。

4.3.1 绝缘老化与剥离修复技术

绝缘老化或剥离可通过更换云母带、玻璃丝带以及重新实施整体包扎修补。修复后通常需进行真空压力浸漆(VPI)或滴浸处理，使绝缘漆充分渗透线圈内部，提高介电强度与机械强度。若出现大面积剥离，则应更换整个绝缘结构，以避免新旧绝缘界面出现局部电场集中。

4.3.2 含潮绝缘干燥修复技术

绝缘受潮是造成介损升高的重要原因。常用修复方法包括热风循环干燥、真空干燥及红外辐射干燥。真空干燥能够有效降低绝缘含水率并防止二次吸潮，是大型机组常用的主要技术。干燥结束后需通过介损试验与极化指数测试确认绝缘系统恢复程度。

4.3.3 局部放电(PD)缺陷修复技术

局放多源于尖角、电场畸变或绝缘空隙。修复技术包括去除尖角毛刺、重新包扎绝缘层、施加电晕防护涂料以及对分层区域重新压紧固化。修复后通过局放检测评估处理效果，确保电场分布均匀稳定。

4.4 热效应相关故障修复技术

4.4.1 热点治理技术

热点常由冷却阻塞、接触不良或绕组局部短路引起。修复需清理通风槽、改善冷却通道，并修复接触面以降低接触电阻。若导体因过热退火软化，则必须更换，否则将难以承载电磁应力。

4.4.2 热变形与偏心修复技术

热变形会改变转子几何形状，导致气隙不均与电磁力不平衡。修复采用机械校形、局部加热校正等方式恢复圆度和同轴度；严重偏心常需在动平衡过程中同步修复，通过调整质量分布使其在热态下仍保持稳定旋转。

4.5 修复后质量验证

修复完成后需进行完整的验证，包括绝缘耐压试验、介损与极化指数测量、匝间冲击试验、动平衡校验等。启动试验中需重点关注振动、温升及励磁响应是否正常，以确保修复后的转子恢复到安全、稳定的运行状态。

5 结语

发电机转子作为机组核心部件，其故障识别与修复技术直接关系电站运行的安全性与可靠性，通过系统构建检测体系、深入分析典型缺陷并优化修复工艺，可显著提升转子运行稳定性和寿命。在新兴技术迅速发展的背景下，发电厂应加强智能诊断与状态监测技术的融合应用，为发电设备实现精准检修和全生命周期管理提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 彭剑. 大型水电站发电机转子检修磁极垫块焊接防护措施探讨[J]. 科学技术创新, 2018(30): 69-70.
- [2] 邓信. 广西长洲水电厂水轮发电机转子检修处理及防控[J]. 水电与新能源, 2018(4): 50-52, 72.
- [3] 陶子健, 吴鹏, 等. 基于边缘智能的发电机定转子故障实时监测系统[J]. 高压电器, 2025, 61(7): 8-15.
- [4] 刘怡麟. 发电机抽穿转子方案优化探讨[J]. 中国设备工程, 2025(S1): 64-66.
- [5] 杨玉磊. 某1000MW机组发电机阻尼条蹿动致转子振动异常案例分析及处理[J]. 发电设备, 2024(1): 36-41.