

灯泡贯流式水轮发电机组运行监测与智能化管理研究

韦森杰

国家电投集团广西长洲水电开发有限公司 广西梧州 543000

摘要：基于灯泡贯流式水轮发电机组有着特殊的结构和传统的运维模式存在一定的局限性，本研究针对机组运行监测以及智能化管理的实现途径展开了系统的剖析，研究说明了立体化状态感知网络以及故障传播知识图谱的构建方式，并且结合具体的应用场景介绍了一系列智能化管理策略。研究结果表明，该系列策略的应用可推动运维范式由被动处置向主动预见与精益调控转变，对优化水电站资产管理具有重要的实践价值。

关键词：灯泡贯流式水轮发电机组；运行监测；状态评估；智能化管理

引言

在国家推行“碳达峰、碳中和”战略背景下，水电作为一种可再生清洁能源，其技术成熟度高且系统稳定性强，故而其关键性变得日益明显，我国江河平原区域蕴含着数量丰富的低水头、大流量水力资源，而灯泡贯流式水轮发电机组恰恰是高效开发这类资源的关键设备^[1]。它有着独特的结构设计，水流可沿着轴向平顺地凭借，水力效率较高，特别适用于低水头的工况，借助物联网、大数据、人工智能等现代化信息技术，把传统的运行管理模式朝着智能化、精益化方向升级，已然成为行业发展的必然趋势。

1 灯泡贯流式机组的结构与工作原理

灯泡贯流式水轮发电机组是专门针对低水头、大流量水力资源开发所设计的关键动力设备，它的结构特点是把发电机精心密封在处于水流通道内的流线型“灯泡体”之中，水流可沿着轴向较为顺畅地贯穿整个机组，水力损失得以降低，该机组一般采用由活动导叶和可调角度的转轮叶片组成的双重调节方式。运行时，上游水流经导水机构整流，形成最佳环量，驱动转轮高效旋转，将蕴藏的水能转化为强劲的机械能^[2]。这部分机械能通过刚性连接的主轴系统，直接传递给灯泡体内的发电机转子。转子感应出高品质的电能，并输送至电网，至此完成整个能量转换过程。这种高度集成化的轴向贯流式布局，保证了机组在不同工况下的高效稳定运行，极大地优化了水电站的土建结构与工程造价。

2 灯泡贯流式水轮发电机组智能化管理价值

2.1 实现故障精准预判，变被动抢修为主动防御

智能化管理的首要价值，在于实现了从“外部观测”

到“内部洞察”的根本性转变，将安全管理的模式由被动转为主动。灯泡贯流式机组核心部件深藏水下，其内部的早期病兆（如主轴密封的轻微泄漏、发电机定子绕组的局部放电等）极难通过常规巡检发现。智能化管理通过多维度的精密传感器与算法模型，能够穿透设备物理屏障，精准捕捉设备从健康态向故障态演变的完整劣化轨迹，从而实现对潜在风险的“精准预判”^[3]。这种能力将安全管理的关口前移至故障形成之前，用科学的主动防御替代了高成本的被动抢修，是从源头上保障机组长周期、高可靠运行的基石。

2.2 优化机组运行控制，挖掘设备深层能效潜力

常规的运行优化，通常基于静态的“最优工况点”，难以应对复杂多变的实际工况，大量潜在的能效无法被利用。智能化管理的深层价值，在于构建了一个动态的数字孪生模型，解锁机组的深层能效潜力。该模型能够实时分析来水、水位、电网需求等多重变量，在每一个瞬时进行全局寻优计算，动态输出能效最高、损耗最小的“导叶—桨叶”协同控制策略。这实质上是让机组的每一次转动都无限接近其在该工况下的理论最优值，实现了从“点”到“面”的全工况精益运行，其带来的发电增量效益远超传统模式。

2.3 沉淀专家运维经验，赋能团队科学决策能力

传统运维严重依赖资深专家的“隐性知识”，此类知识难以量化和传承，致使运维水平参差不齐，还存在人才断层风险。智能化管理的根本价值在于，它构建了一套将“经验”转化为“资产”的机制。系统会深度学习历史上的每次故障及其成功处置案例，把专家的诊断逻辑和决策思路固化为可迭代的算法模型，形成一个永不流失的“数字专家库”^[4]。

新问题出现时,系统能为一线人员提供清晰的决策支持,大幅降低对个人能力的依赖。这不仅实现了专家经验的有效沉淀与传承,更借助人机协同,系统性提升了整个运维团队的科学决策水平。

2.4 支撑检修方案精准决策,缩短机组停运修复周期

智能化管理的另外一项关键价值体现在,它把数据洞察力拓展到运维的后端也就是检修环节,达成了从运行到检修的无间断信息赋能,传统检修一般依靠固定周期以及粗略的故障现象,大多时候会出现不必要的设备解体以及较长的停机时间,智能化系统可在机组停运之前,给出一份详细的、基于数据的“体检报告”和“手术导航图”。它可精确地确定潜在缺陷所处的具体位置,并且对其损伤程度给予量化,使得检修团队可据此制定出如同“外科手术式”一般精准的维护方案,大幅度减少了盲目进行拆解以及排查所产生的工作量。这样的方式对备品备件的储备以及管理起到了优化作用,更为关键的是它极大地缩短了机组的停运修复周期,每一小时的停机时间都蕴含着切实的经济效益,这种价值是传统模式难以相比的。

3 灯泡贯流式水轮发电机组运行监测与智能化管理策略

3.1 构建立体化的状态感知网络,实现数据全景穿透

智能化策略的先决条件,是形成一个可全景式反映机组内部状态的立体化感知网络。常规的机组监测多局限于SCADA系统的宏观参数,难以触及设备早期劣化的深层根源。一个有效的感知网络应深度融合机械振动、声学特征、油液品质、电气量测等多源异构信息^[5]。该网络的核心目标在于为机组建立一个高保真的数字镜像。这个数字镜像准确复现了物理实体的瞬时状态与长期演变趋势。此举为后续的状态评估与故障诊断算法提供了完整、无偏的数据输入,是所有上层智能应用得以实现的根本。

要形成这样有效的感知网络,具体部署应具备高度的针对性。在主轴系统的径向与轴向关键位置,应配置MEMS加速度计与电涡流传感器,前者用以捕捉轴承滚道点蚀等故障引发的高频冲击信号,后者精确测量轴心轨迹与振动位移,共同描绘转子系统的完整动态行为。同时,需集成一套在线油液监测系统,实时分析油中水分、金属磨粒与黏度变化,从润滑介质的劣化洞察设备磨损状态。针对贯流式机组易发的气蚀问题,可在转轮室外壁配置宽频带声发射传感器,专门监听气泡溃灭产生的高频应力波,为气蚀状态的早

期识别提供直接判据。对于灯泡体内的发电机,则应配置局部放电在线监测装置,捕捉绝缘缺陷引发的微弱脉冲电流。所有传感器数据均需加装高精度时钟同步模块,并汇入一个统一的时序数据库平台,为后续的多物理场耦合分析奠定坚实基础。

3.2 建立故障传播链的知识图谱,实现根源性诊断

传统的机组报警系统多停留在对单一测点阈值的孤立判断,其缺陷在于无法揭示故障现象背后的内在逻辑关联。智能化诊断的核心策略应转向对故障内在因果关系的深度挖掘。所谓故障传播链知识图谱,即是以图形化网络的形式,将设备部件、监测参数、故障模式,以及专家经验中蕴含的因果关系、时序关系和影响权重等知识要素进行结构化表达。此方法使诊断过程从现象匹配跃迁至逻辑推理,不再满足于回答“发生了什么”,而是致力于探明“为何发生”,为实现精准的根源性诊断提供了清晰的路径。

建立故障传播链的知识图谱首先应系统性梳理机组的设计手册、运行规程及历史检修报告,并邀请经验丰富的运行与检修专家,采用故障模式与影响分析(FMEA)方法,共同识别出关键部件(如主轴密封、推力轴承)的潜在失效模式及其对应的初始征兆。随后,需明确各故障模式间的传播路径与时序逻辑。例如,定义“主轴密封磨损超标”这一根源事件,其直接后果是“密封水流量异常增加”;该事件将进一步引发“集水井排水泵启动频繁”;若未及时处置,则可能导致“灯泡体内湿度超标”,最终威胁到发电机绝缘。在图谱中,每一条传播路径均可赋予条件概率或影响权重^[6]。当监测系统捕捉到下游的“排水泵启动频繁”信号时,诊断算法便能沿图谱网络逆向追溯,并结合其他旁证信息,高置信度地锁定“主轴密封”为重点排查对象,从而向运行人员输出具体的、有明确指向性的诊断结论。

3.3 主动干预设备健康轨迹,实现资产寿命周期价值最大化

传统的预测性维护多聚焦于对设备剩余寿命(RUL)的单向预测,其本质仍是一种“等待式”的响应。更高阶的智能化策略,应是从被动的终点预测,转向主动的过程管理。此策略的核心是为关键设备建立健康状态随时间演变的退化模型,即描绘其“健康轨迹”。系统不仅预判轨迹的终点,更重要的是动态评估不同运行策略或维护措施对该轨迹的潜在影响。这种方法将运维决策从“何时修理”的问题,转

变为“如何调控才能让全生命周期价值最大化”的优化问题，它追求的是一种动态的、有目的的健康状态调控。

以机组推力轴承的健康管理为例，系统首先需要建立一个融合了温度、振动、油液磨粒数据与运行负荷的综合健康指数（HI）模型。在当前运行模式下，系统利用时间序列算法外推出HI指数的未来衰减曲线，预测其将在约六个月后触及需要检修的阈值。此时，主动干预模块便会启动，向运行人员提供量化的决策选项：选项A，维持现有运行策略，预计6个月后安排A级检修，停机时间5天；选项B，在每日的顶峰负荷时段，将机组最大出力限制下调5%，系统仿真显示此举可延缓HI衰减速率，将检修窗口延长至9个月后，且仅需B级检修，停机3天。这一过程将原本模糊的、经验性的操作判断，转变为清晰的、有数据支撑的经济与风险权衡。运行人员可依据电站的发电计划与检修安排，选择一个使整体资产效益最优的健康管理路径。

3.4 构建人机协同的增强决策平台，重塑一线运维响应新范式

前述的感知、诊断与预测模型，最终需要一个高效的人机交互中枢来承载其价值。传统的监控界面（HMI）倾向于信息的简单罗列，容易造成运行人员的“数据溺水”与“报警疲劳”^[7]。智能化策略的终点，应是形成一个“人机协同、决策增强”的全新工作范式。该平台的核心职能并非展示原始数据，而是对多源信息进行深度融合与提炼，并结合知识图谱，将机器的计算优势与人的经验智慧有机结合。它致力于为一线人员提供清晰的态势感知、量化的风险评估与科学的处置预案，使其成为最终的、更高阶的决策者。

例如，一个有效地增强决策平台，其界面设计应摒弃扁平化的数据平铺。设想机组在响应电网快速调频指令时，振动监测系统捕捉到一个瞬时冲击信号。平台不会仅仅弹出一个振动超限报警，它会立刻自动聚合该时刻的所有相关信息：包括当时的导叶开度变化率、桨叶角度、有功功率响应曲线以及来自声发射传感器的气蚀信号强度。这些信息将被合成为一个面向任务的“情景卡片”，以自然语言和可视化图表呈现给运行人员：“机组在执行快速增负荷指令时，因

水力动态失稳在转轮区诱发了短暂的强气蚀，导致了本次振动冲击。”紧接着，平台会依据知识图谱和预案库，给出分级处置建议：“建议1（低风险）：继续监视，短期内避免同样速率的负荷调整。建议2（中风险）：申请将该机组的调频响应速率暂时下调10%，待水情平稳后恢复。”

4 结束语

灯泡贯流式机组的智能化管理其深远意义不止于技术层面的革新，它标志着水电运维正从依赖个体经验的传统手工业模式，向一种基于数据洞察和模型推理的现代工业智能范式深刻转型。展望未来，机组将不再是仅被动接受指令的钢铁集合体，而将演变为一个具备一定“自我感知”与“自主诊断”能力的数字生命体。在此进程中，一线运行人员的角色价值非但不会削弱，反而将得到重塑与升华。他们将从繁琐的监盘与应急处置中逐步解放，转变为驾驭数据、协同模型、并对复杂系统进行最终仲裁的智能资产管理者。

参考文献：

- [1] 李炎, 何葵东. 灯泡贯流式水轮发电机组状态检修管理模式的探索与实施 [J]. 企业管理, 2024(S2).
- [2] 周军长, 李若松. 大型灯泡贯流式水轮发电机组全面监测系统的设计与研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(5):234-238.
- [3] 王丹. 南津渡1#水轮发电机组导叶调节系统故障分析 [J]. 电气工程应用, 2024(3):31-33.
- [4] 陈韶光, 何玲艳, 黄淑芳, 等. 灯泡贯流式水轮发电机组优化运行研究 [J]. 广西水利水电, 2025(3).
- [5] 董德辉. 灯泡贯流式水轮发电机组调速系统的稳定性分析 [J]. 电力系统装备, 2025(1):10-12.
- [6] 张士昂, 李昊, 张蓓, 等. 基于声固耦合算法的贯流式水轮机轴系振动特性研究 [J]. 机械设计, 2023, 40(01):105-109.
- [7] 惠建伟. 灯泡贯流式水轮发电机组安装新方法——以邕宁水利枢纽工程为例 [J]. 房地产导刊, 2024(10).

作者简介：韦森杰（1996—），男，汉族，广西藤县人，大学本科，研究方向为灯泡贯流式水轮发电机组发电运行。