

# 智能化水力发电厂机械设备检修及维护探析

李泽江 李橙 岳天芬

四川省紫坪铺开发有限责任公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8536

**[摘要]** 随着物联网、大数据、人工智能等技术的迅猛发展,水力发电行业正经历着深刻的智能化变革。传统水力发电厂在机械设备检修维护方面普遍采用定期检修和事故后检修模式,存在检修过剩或不足、设备利用率低、维护成本高等突出问题。智能化水力发电厂通过构建集智能感知、智能诊断、智能决策于一体的检修维护体系,实现了从预防性检修向预测性维护的根本性转变。本文基于国内外智能水电厂建设经验,系统分析智能化检修维护体系的技术架构、应用效果及实施路径,以为行业技术创新提供参考。

**[关键词]** 智能化;水力发电厂;机械设备;维护检修

## Analysis of Mechanical Equipment Maintenance and Repair in Intelligent Hydroelectric Power Plants

Li Zejiang Li Cheng Yue Tianfen

Sichuan Zipingpu Development Co., Ltd.

**[Abstract]** With the rapid development of technologies such as the Internet of Things, big data, and artificial intelligence, the hydropower industry is undergoing profound intelligent transformation. Traditional hydroelectric power plants generally adopt regular maintenance and post accident maintenance modes for mechanical equipment, which have prominent problems such as excessive or insufficient maintenance, low equipment utilization, and high maintenance costs. Intelligent hydropower plants have achieved a fundamental transformation from preventive maintenance to predictive maintenance by building a maintenance system that integrates intelligent perception, diagnosis, and decision-making. This article is based on the construction experience of intelligent hydropower plants at home and abroad, systematically analyzing the technical architecture, application effects, and implementation path of intelligent maintenance and repair system, in order to provide reference for industry technological innovation.

**[Key words]** intelligence; Hydroelectric power plants; mechanical equipment; Maintenance and repair

## 1 智能化水力发电厂的定义与核心特征

### 1.1 定义

智能化水力发电厂是以自动化、数字化、信息化为基础,利用云计算、大数据、物联网、移动互联、人工智能等技术,具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应能力,能够安全、稳定、高效运行的水电厂<sup>[1]</sup>。其核心就是利用先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术、控制技术和智能分析等技术,自动完成电站运行状况信息的采集、测量、传输、分析、控制、保护、计量和监测等基本功能。

### 1.2 核心特征

智能化水力发电厂有三大特点,全厂信息数字化、决策支持智能化、运维管理精益化。全厂信息数字化,以 IEC61850 标准体系结构为基础,实现全厂生产、管理信息的数字化。决策支持智能化依靠搭建专家知识系统,提供丰富的决策支持工

具和方法,实现实时的数据分析、预警、状态评估以及智能决策等功能,运维管理精益化就是设备状态可以被感知、被分析、被预测,维护策略从时间基准转向状态基准,设备的可靠性、利用率得到大幅提升。

## 2 智能化水力发电厂机械设备检修关键支撑技术

### 2.1 自行优化全程控制

自趋优全程控制的目标是保证机组在各种负荷工况下,能够克服对象非线性和外部扰动的影响,始终保持优化运行状态<sup>[2]</sup>。在设计框架中采用了基于模型的先进控制技术作为主要手段,在此过程中建立了一个覆盖全工况范围内的非线性动态数字模型,并且定期使用实时或历史数据对模型进行校正和在线更新,以便适应实际操作条件的变化需求;根据不同目标系统的特点,开发相应的、匹配的模型预测型先进控制算法以及智能调节补偿方案,从而实现全方位闭环优化调控效果。

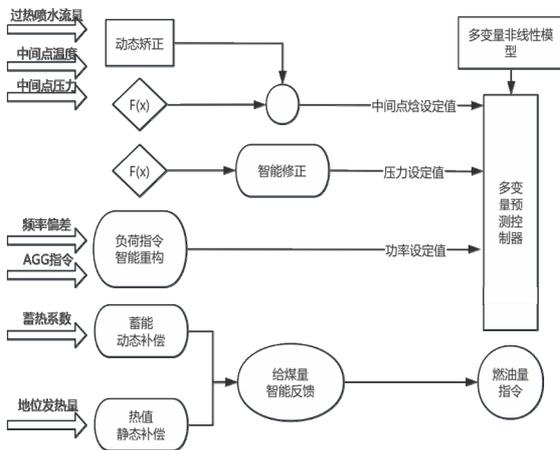


图 1 自行优化全过程控制

2.2 自学习分析诊断

基于学习分析的诊断设计目标是要全方位整合机组的历史数据资源，使用深度挖掘技术和智能算法技术提取输入/输出特征参数，并根据这些信息构建预测模型。利用该模型以及定制化的调优方案进行故障仿真的动态校验过程，进而逐步建立起各种不同案例的知识库体系，通过对实时监测到的数据与模型所产生的结果、历史上的故障数据库等进行比较对比，实现对设备潜在异常状态准确识别并发出早期预警的效果<sup>[3]</sup>。

2.3 自恢复故障处理

自适应故障恢复设计的主要目标是，当传感器、执行机构或重要部件发生异常时，依靠控制系统具备的容错能力来维持闭环系统的稳定状态，并保证其基本控制性能不受影响，使得整个系统能够持续可靠地运行<sup>[4]</sup>。如果发现某个参数偏离了设定的标准值并且超过了允许范围，则可以认为该系统正处于故障之中；一般而言，是以实际测量得到的数据与理想设置之间存在的差距作为判断是否存在问题的关键依据。在某些特定情况下，即使存在局部误差，但整体表现仍然满足要求，也被视作正常的运作模式，而现象背后所体现出来的本质特征往往与预定控制精度有着密切关联。

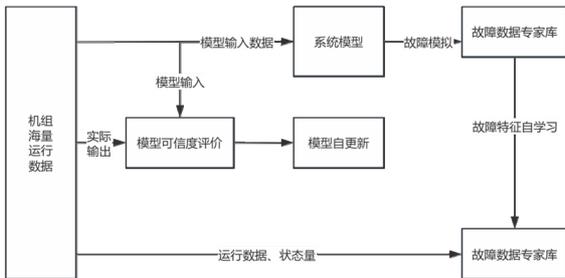


图 2 自恢复故障处理流程

2.4 自组织精细管理

智能电网作为一项系统工程，需要提高电力生产的安全性、效率和环保性能。为了实现这一目标，需要依靠跨学科协同以及多技术集成的支撑体系。同时，完善的信息基础设施和健全的制度保障也是推进工作的重要支撑。自组织精细化管理模式的核心就是加强管理系统本身的自主调节能力，利用闭环反馈机制去改善流程运转情况并减少各种可能的风险发生率；另外也强调了系统的精确度问题，“互联网+”概念促使

专业服务朝着数字化方向转变，在整合可视化三维技术支持功能的同时还加入了移动终端接入远程运维诊断等模块内容，以达到对设备状态监测、故障预警、安全防护等方面进行全面管控的目的，从而提升整体电站运营管理水平。

3 智能化水力发电厂机械设备的检修方式

3.1 预防性检修

3.1.1 定期检修

定期检修抛弃传统的固定周期统一检修模式，以自趋优全程控制的全工况非线性动态模型为基础，依靠自学习分析诊断的历史数据挖掘能力，制定出差异化的精确检修周期。对于水轮机主轴密封系统来说，在自趋优全程控制模型之下，其可以针对不同负荷工况下的密封水温、压力以及泄漏量等信息开展收集工作，并且构建起负荷参数磨损度关联模型，能够很好地展示出在各种运行状态下密封件的损耗情况。自学习分析诊断系统调用近 3 年同类主轴密封的历史维修记录和故障数据，用深度学习算法计算出密封件磨损临界值对应的运行时长。检修实施阶段，自组织精细管理的可视化三维指导系统为技术人员提供支撑，通过平板终端可以查看主轴密封的三维拆解结构和关键参数的标准值。密封水压应保持在 0.3-0.5MPa 之间，确保检修流程规范统一，避免因经验差异导致的维护疏漏。

3.1.2 主动检修

主动检修以自学习分析诊断的故障预警功能为核心，在故障发生之前采取预防性的干预<sup>[5]</sup>。发电机定子绕组维护时，自学习分析诊断系统会实时采集绕组温度、绝缘电阻、局部放电电量等运行数据，并将其与内置的故障专家库进行对比。故障专家库中有定子绕组绝缘老化、局部短路等 12 种典型故障的特征数据。当系统检测到某台发电机的定子绕组 A 相温度 24 小时内波动幅度从 ±2℃ 扩大到 ±5℃，并且局部放电电量超过正常阈值的 15% 时，系统就会立即触发预警机制。预警信息被自组织精细管理平台送到运维人员那里，另外会自动创建检修建议清单，清晰显示：先查看 A 相绕组接头处的绝缘层，再检查冷却风路是否被堵塞。运维人员根据自趋优全程控制模型回溯该绕组近期的负荷变化曲线，判断温度波动是由冷却风道积灰造成的，于是安排检修人员拆开绕组端盖清理积灰，更换老化的绝缘垫片，防止故障发展成定子绕组短路。

3.1.3 护检修

维稳检修针对设备运行过程中的临界稳定参数，采用自趋优全程控制智能补偿和自组织精细管理闭环控制的方式，确保设备始终处于最佳工作状态。调速器系统导叶开度控制精度关系到机组负荷调节的稳定性，导叶开度过大或过小都会导致电网频率不稳定。自趋优全程控制系统会实时监测导叶开度反馈值和指令值的偏差。当外部负荷出现突然下降的情况时，例如电网负荷突然减少导致偏差增大，系统将启动智能补偿策略，自动调节电液伺服阀的供油压力以及控制信号增益，快速将偏差拉回到正常范围内，以维持机组的稳定。自组织精细管理系统记录此次偏差事件，将负荷突变幅度、补偿参数调整值、偏差恢复时长等数据存入管理数据库，以后遇到同样的事件可以直接调用历史最优补偿方案，缩短维稳响应时间。

3.2 事后检修

事后检修不是传统意义上的故障后被动维修，而是将自恢复故障处理与自组织精细化管理技术相结合，在故障发生后实现高效止损和系统稳定运行，为以后的预防式检修提供数据支

撑,形成完整的运维闭环。其逻辑是故障发生时,先用自恢复故障处理系统保住设备的主要功能,再靠智能化管理平台快速修复,最后总结故障原因并改进预防措施。

当水轮发电机组转速传感器出现故障造成输出信号中断的时候,自恢复故障处理系统马上启动容错机制。该系统依靠自趋优过程控制模型调用其他相关参数,例如发电机出口电压频率和水轮机导叶开度,根据频率、开度、转速历史关联数据推算当前机组转速,误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,保证调速器正常调节导叶开度,防止因转速信号丢失造成机组甩负荷。同时自组织精细管理平台自动启动故障处置程序,一方面将故障信息发送给运维人员,另一方面通过移动应用持续更新维修进程,包括运维人员出发、传感器更换完毕等状态,便于管理人员随时了解情况。故障排除之后,将故障发生时间、故障原因、处置方案以及恢复时长等数据录入到自学习分析诊断的故障专家库,对转速传感器接线松动故障类型增加对传感器接线端子温度、振动幅度的检测,以降低同类故障发生的概率。

#### 4 智能化水力发电厂机械设备维护策略

##### 4.1 强化智能化维护理念的全员渗透

智能化水力发电厂的维护工作需要冲破传统依靠经验的思维定式,塑造以数据为核心、以预防为主导的全新维护观念,并且这种观念应遍及从管理层到一线运维人员的所有岗位。相关部门要分层培训来形成完整的理念渗透体系,对管理层开展智能化维护价值的专题培训,讲解各种智能化技术在维护工作中的作用,明确理念转变对电厂长期经营的意义,对一线运维人员采用技术实操和案例复盘相结合的培训方式,模拟智能化系统的工作流程,演示智能化管理平台的功能,使工作人员直观感受到智能化技术对维护效率的提升,促使他们从依靠经验排查的旧理念向依靠数据决策的新理念转变。

##### 4.2 构建动态化维护计划与目标体系

智能化背景下,机械设备的维护计划要从固定的周期约束中脱离出来,按照设备的实时运行状况以及历史数据来制定动态调整的计划,并且建立起可以量化的、灵活调整的维护目标。从具体操作来说,可以依靠自趋优全程控制的全工况模型、自学习分析诊断的数据分析功能,分步形成维护计划和目标体系。第一步,按照设备的设计参数和历史运行状况来设定基础的维护指标,确定维护工作要达成的主要目的;第二步,借助自学习分析诊断系统持续追踪设备的关键运行参数,如果参数偏离正常值的幅度触及预先设定的标准,就会自动启动维护周期调节程序,依照实际情况缩减或者拉长维护间隔;第三步,把年度维护目标拆解成季度和月度的任务,针对各个时期的维护重点作出明确的规定,然后利用自组织精细管理平台随时跟进目标的达成情况。如果某个阶段的目标没能达到预期,就会自动找出问题所在并调整接下来的计划。

##### 4.3 完善特殊设备专项维护机制

对于智能化水力发电厂中的特殊设备,其维护工作要建立比一般设备更高的专项机制,利用智能化技术达到高频率监测、高精度排查、高冗余备份的目的。提升特殊设备的监测频率,将自学习分析诊断系统对特殊设备的监测间隔设置为低于普通设备的标准,重点跟踪设备高压绝缘性能、机械传动精度等关键指标,确保实时掌握设备运行状态,若指标出现异常波动则立即发出预警;其次,强化特殊设备的排查精度,借助自组织精细管理的三维虚拟电厂系统,构建特殊设备的数字化模

型,清晰标注易发生故障的部件,在检修过程中通过三维指导系统精准定位部件位置,配合专业检测仪器开展高精度检测,避免因排查疏漏引发安全事故;最后,为特殊设备建立冗余备份方案,对设备核心部件部署自恢复故障处理系统的多重容错机制,当某一部件出现故障时,系统能够及时调用备用部件数据或通过自趋优模型推算设备运行状态,保障设备在维护期间仍能稳定运行。

##### 4.4 推动技术创新与方法的融合

积极引进新型维护技术,将其与电厂现有的智能化体系充分融合,这是提高机械设备维护质量及效率的重要手段。除了前文所述的故障树分析法外,主要推广使用数字孪生维护技术、智能备件管理技术两种技术。数字孪生维护技术以自趋优全程控制的设备模型为基础,创建出设备的数字孪生体,将设备实际工作状态实时反映在数字孪生体上,模拟不同故障场景下设备的反应情况,提前制定好相应的维修方案,降低实际发生故障后处置所需要的时间;智能备件管理技术则是利用自组织精细管理平台的数据分析功能,建立备件库存和设备故障率之间的关联模型,在预测某类备件未来故障率上升到设定的阈值之后,自动发出备件补充指令,避免出现备件不足而导致维修工作无法正常进行的情况。

#### 5 结束语

综上所述,智能化技术给水力发电厂的机械设备检修维护带来了根本性的变化。通过创建以自主优化全程控制、自学习分析诊断等为技术核心的技术体系,电厂突破了传统检修模式的限制,实现了从预防性检修到预测性维护的转变。同时,借助动态化维护计划、特殊设备专项机制等手段,进一步提升了设备的可靠性和运维效率。未来,由于人工智能和数字孪生技术的不断深入发展,智能化检修维护体系将更加完善。

#### 【参考文献】

- [1]李翰翀.电力系统及其自动化发展方向[J].机械与电子控制工程,2025(4).
- [2]姚坤.水力发电智能化现状及发展策略分析[J].华东科技(综合),2021(7):322-322.
- [3]陈国青,姜巍.智慧水电数字化服务平台建设和发展[J].水电站机电技术,2023,46(12):57-61.
- [4]郁光,陈刚,赖见令.大型水电站预防性检修计划管理系统设计与实现[J].人民长江,2022,53(S02):209-211.
- [5]余文锦,余玉平,兰曦晟,等.智能巡检系统在智慧电厂的应用实施[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2022(11):5.

作者简介:第一作者,李泽江,1974年9月,男,四川省广元,汉族,本科,工程师,研究方向:水力、电力水电厂设备检修维护,机电一体化;

第二作者,李橙,1997年1月,男,四川省广元,汉族,专科,助理工程师,研究方向:水力、电力水电厂设备检修,安装调试;

第三作者,岳天芬,1976年4月,女,四川省广元,汉族,本科,助理工程师,研究方向:水力、电力水电厂设备检修维护。