

基于生产管理系统的水电机组状态评估研究与应用

黄安妮 梅千宇 陈安然

贵州乌江水电开发有限责任公司构皮滩发电厂 贵州遵义 564408

摘要：大容量水电机组的工况变得越发复杂，传统的运行运维模式已无法支撑全生命周期运作，本文把电站生产运作系统当作载体，创建起针对水电机组的状态考量体系及其应用框架，经由在生产运作系统当中运用数字孪生技术，把机组机理模型，历史运作数据以及即时检测信息紧密结合起来，形成起包含数据采集，孪生建模，状态考量直至运作决策的闭合业务流程，而且着重剖析该流程在故障判断，健康守护，振荡压制以及调度改良等典型情况下的达成途径，工程实际应用成果显示，依靠生产运作系统整合水电机组数字孪生模型，可以大幅加强机组状态信息的利用效率并改进可视化效果，做到对关键部件健康状况的精准考量和风险提示，从而给水电机组的安全，经济运行以及全生命周期运作给予强有力的支持。

关键词：水电机组；生产管理；运行维护；经济运行

一、水电机组生产管理系统概述

大容量，高水头，大落差的水电工程不断投入运行，我国水电机组的单机容量和机组规模一直在增长，其运行工况变得多种多样且复杂^[1]。在设计与制造时，传统方法依靠少量的试验数据和经验公式，无法快速而系统地考量复杂流固耦合，电磁-机械多物理场耦合给机组性能和寿命带来的影响，而且，新材料，新结构的采用还对建模和仿真验证的精准度有了更高要求，在运行期间，机组长时间处于水位反复变化，频繁启停，深度调峰等复杂工况之下，传统的依靠离线分析和人工经验的运行管理模式，常常不能及时察觉潜在风险和异常工况，也无法全方位描绘关键部件的健康状况和衰退规律^[2]。

在运维管理上，当前的监测系统可采集诸多状态量，不过数据间的关联性差，信息利用率低，还没有创建起面向全生命周期的统一数据与模型平台，于是故障判断依靠人工经验，检修策略比较保守，这不但影响设备的安全可靠运行，而且限制了运维成本的进一步改善^[3]。

信息化创建持续推进，在此大背景之下，电站生产经营系统渐渐发展成融合运行观测，设备守护，检修方案以及生产统计等多种功能的综合性业务核心，给运行数据，运维记录和资产信息的集中化运作及共享给予了

基本前提，假使可以把生产经营系统当作统一的数据与业务承载体，在线监测，设备台账和运维流程有效地关联起来，那么就可以为采用数字孪生技术来做机组状态评价和智能运维形成稳固根基^[4]。

数字孪生依靠多源异构数据，机理模型以及数据激发模型的结合，在虚拟空间创建起与现实对象在结构，性能及行为特征方面高度契合的数字镜像体，经由持续的数据交互达成虚实同步变化，这属于一种新型的技术体系^[5]，从全生命时段角度来讲，图1总结了水电机组处于制造阶段，运行阶段以及寿命评价阶段时的常见应用需求：制造阶段重点在于工艺设计改良，智能制造以及生产资源的合理安排；运行阶段关注点是状态监测，智能运维和风险预警；而寿命评价阶段必要执行寿命预测，升级改造以及模块化的报废决策^[6]。数字孪生会针对前面提到的关键环节实施统一建模并做到贯通，从而把分布在各个阶段的设计数据，运行数据以及运维知识有效地融合起来，创建起循环反馈的全生命时段经营模式，这样就能更好地支持水电机组安全，经济又高效地运行^[7]。

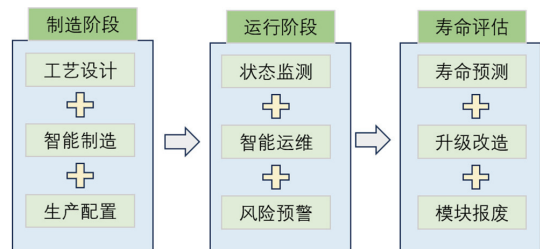


图1 水电机组生产管理系统功能介绍

基金项目：华电科技项目（SDKJ-241672）

作者简介：黄安妮（2000-），女，助理工程师，研究方向为水电站数字化、继电保护及自动控制技术管理工作。

二、数字孪生支撑的水电机组全生命周期管理

1. 生命周期管理总体框架

如图2显示，水电机组数字孪生全生命时段管理的总体框架在时间轴上覆盖了设计制造，运行守护，报废回收以及升级改造这四个阶段，以机组数字孪生体作为核心载体，把工艺设计，生产设置，状态监测，风险提示，智能守护，寿命评定等主要活动紧密联系在一起，经由在虚拟空间创建随物理机组一同发展的孪生体，并

在上面叠加工况数据，守护知识和决策准则，就能塑造出“设计-制造-运行”的循环运作模式：其一，设计和制造环节产生的结构参数，工艺数据以及仿真模型不断汇集并向下传递，给机组运行状态阐释和故障分析赋予依照；其二，运行守护环节积攒下来的监测信息和守护经验又能反过来反馈到设计制造和升级改造环节，用以修正模型，改良工艺和改善结构，这样就达成了水电机组在整个生命时段里的性能提升和价值最大。

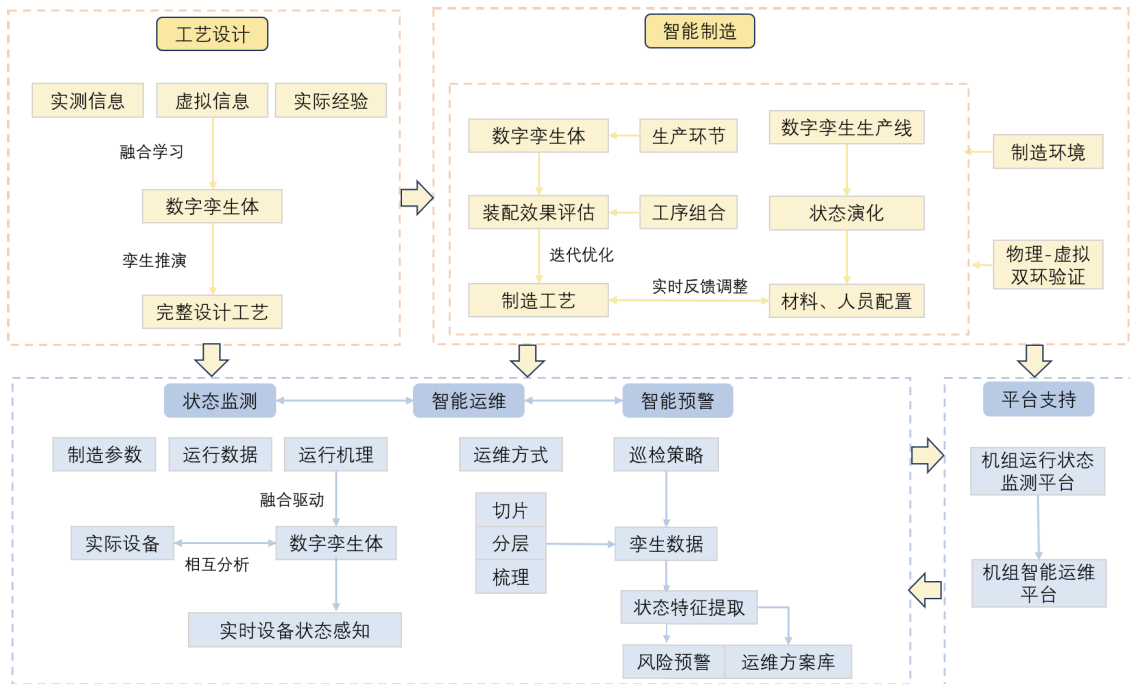


图2 数字孪生水电机组全生命周期管理应用流程

2. 设计与制造阶段的应用

在设计与制造阶段采用数字孪生理念，未完全形成机组实体时便可在虚拟空间创建高精度虚拟样机，并针对关键部件及工况展开多物理场耦合仿真验证。把历史工程经验，试验数据以及机理分析成果加入到虚拟样机当中，可以系统地考量不同结构方案，材料选用以及工艺路线给机组水力性能，机械强度，振动特点和运行稳定性带来的影响，进而于虚拟环境里执行方案比照与改良，缩减实体样机试制和现场试验的次数，而且，以数字孪生体为关键点，可以进一步体现生产线，装配工序以及制造环境，塑造起“工艺-设备-工位-人员”的虚拟生产线模型，对装配间隙，工装夹具设置，材料损耗和节拍调配实施仿真预演并执行参数改良。

在水轮机转轮与主轴结合，上冠与导叶机构装配时，可以凭借孪生体预先分析不同配合间隙和螺栓预紧力给

振动及应力分布带来的影响，从而引导现场调整策略；到了发电机定子铁心叠片与线棒嵌线，转子总装与气隙调整阶段，经由虚拟吊装和工位布置仿真，能够改良吊具选型并改善工序顺序，缩减变形和刮痕的风险；在轴承，密封和冷却系统的装配过程中，也可依靠数字孪生来考量装配偏差对于润滑，散热以及泄漏性能产生的影响，进而预先给出校正举措，如此一来，便可以在装配之前找出加工和装配阶段可能存在的瓶颈以及质量问题，给工艺标准化和智能制造赋予更具指向性的支持。

3. 运行维护阶段的应用

运行守护阶段，数字孪生体要同机组物理实体随时同步，把水轮机，发电机，轴承，调速器，励磁系统以及厂用辅助设备的诸多源头监测数据映射到虚拟空间，再深入融合机理模型，经验模型，以此做到对机组运行状态的动态重构和特征识别，凭借数字孪生模型能够针

对振动，温度，压力，电流，电压等关键量展开多量纲关联分析，比如在运行的时候，经由虚实对比及时察觉水轮机导轴承和推力轴承温升异常及振动幅值变化，判断是否出现润滑变差，对中偏差或者支撑刚度下降；在发电机定子线棒和转子绕组监测时，可以依靠孪生体对局部放电特征，电磁场分布和温度场发展状况实施综合分析，帮助判断绝缘老化程度和热点所在，进而达成对关键部件健康状况的精准评定和早期提示。

数字孪生体可当作运行方式改良及检修决策的仿真平台，把调度指令，水库来水，负荷需求这些外部条件，还有机组内部状态一起放进虚拟环境里去推演。对于频繁启停，深度调峰之类的工况，可以在孪生体上面考量不同的启停曲线，负荷变化速度以及无功出力水平给机组造成的疲劳损害，振动反应和效率影响，然后选择好的运行策略再去现场执行；在检修经营上，经由挖掘故障样本和历史运行数据，可以凭借孪生体创建起寿命损耗与故障概率模型，给出各个部件的状态检修时间表和检修内容，进而妥善安排导叶机构，轴承，冷却系统等停机检修时机，并按照这个来改善备品备件的库存架构和采购方案。

结语

基于生产管理系统的数字孪生为水电机组全生命周期管理提供了一条从“数字映射”走向“智能决策”的新路径。通过在设计制造、运行维护以及寿命评估等关键环节引入虚实融合的技术体系，有望提升机组设计的精细化程度和装配制造质量，能够强化运行状态感知与

健康管理能力，支撑源网协同优化。下一步有必要结合工程实际，推进数字孪生平台与现有监控、调度和资产管理系统的深度融合，加强关键核心算法与标准体系建设，逐步形成可推广、可复制的应用模式，进一步释放数字孪生在水电机组安全、经济和绿色运行中的潜在价值。

参考文献

- [1] 叶发涛，刘嘉斌. 声纹监测技术在水电机组状态诊断中的应用[J]. 水电与新能源, 2025, 39(10): 31-34.
- [2] 杨荣杰，陈开超，刘显著. 水电站机组振动监测及故障诊断系统设计与应用[J]. 电站辅机, 2025, 46(03): 78-81.
- [3] 刘钰琦，王瑞清，肖权，王许晴，胡静究. 水电站调速器数字孪生系统建设探索与研究[J]. 水电站机电技术, 2025, 48(03): 30-36+135.
- [4] 余鹏，陈果，吴美琪，罗合，陈鸿祥. 大型水电站设备数字孪生体应用路线研究[J]. 科技创新与生产力, 2024, 45(12): 119-123+126.
- [5] 徐晓莉，胡星，钮月磊. 数字孪生水电站故障诊断技术的研究应用[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(11): 66-70.
- [6] 李檬，黄海军，张彬桥，杨洋. 面向数字孪生的水轮机调速系统状态评估[J]. 中国农村水利水电, 2025, (02): 154-159+172.
- [7] 李佰霖，陈思远，唐淞，付文龙. 数字孪生驱动的水电机组轴系智能维护[J]. 振动与冲击, 2024, 43(15): 189-199.