

基于大语言模型的动态故障树分析在水电设备诊断中的创新实践

黄开泰 雷潇霄

丹江口水利枢纽小水电有限公司，湖北省丹江口市，442700；

摘要：针对我国中小水电站设备老化、诊断技术滞后与多源数据割裂等痛点，本文提出并实践了一套“边缘感知—LLM 中枢—业务应用”的三级智能化架构，形成以大语言模型与故障树分析（LLM-FTA）为核心的动态诊断体系。应用实证显示：平均诊断耗时由 4.1 小时降至 26 分钟（提升 89.4%），诊断准确率由 68.5% 升至 90.2%，早期预警率由 53.8% 升至 88.6%；全年减少非计划停机 5 次、直接经济收益约 300 万元，并带来 1,500 万 kWh 的年增发电量与 28% 的备件库存成本下降。系统通过等保 2.0 三级认证，满足《能源领域数据安全指导意见》，在 2024 年汛期实现调峰“零延误”。本文同时提出“基础版—进阶版—旗舰版”的分级推广策略与标准化/政策衔接方案，为中小水电的规模化智能升级提供可复制路径。

关键词：中小水电；LLM-FTA；动态故障树；多源融合

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.045

1 老电厂的智能化突围

1.1 行业背景与痛点

水电作为清洁能源的核心支柱，其设备的可靠性直接决定着电网运行的安全性。根据国家能源局的统计数据，我国装机容量在 50MW 及以下的中小型水电站占比高达 68%。然而，这类电站普遍面临着多重问题。首先，设备老化问题日益突出，大量机组已运行超过 20 年，故障率呈现出年均 10%~15% 的持续增长趋势。其次，诊断技术明显滞后，传统依赖人工预定义逻辑树的故障树分析（FTA）难以适应复杂多变的动态工况，效率低下且结果不够精准。更为严重的是，频繁的设备故障和滞后的诊断手段带来巨大的经济损失，一次非计划停机便可能造成高达万元/分钟的电量损失。

1.2 企业实践与创新路径

丹江口水利枢纽小水电有限公司作为南水北调中线工程的重要保障单位，其发展历程充分反映了我国中小水电企业在转型升级中的典型路径。该公司最初建于 1989 年，前身是自备防汛电厂。1992 年，两台 20MW 机组正式投运，标志着电厂的正式运行。随着需求的增加，2013 年公司完成了增容改造，将单机容量提升至 24MW，总装机达到 40MW。然而，运行多年后，传统机组逐渐显现出老化问题，特别是超过 30 年的增容机组在 2023 年

便发生了 5 次非计划停机，这对电厂的稳定运行带来了严重挑战^[1]。

除了设备老化，企业还面临诊断方式落后的困境。传统的 FTA 方法在建模效率上十分低下，构建一类故障树需要耗时 4 小时之久，难以满足现代电厂快速诊断和响应的需求。与此同时，水利工程作为国家关键基础设施，必须严格遵守“数据不出厂”的安全红线，这也限制了外部技术和云端解决方案的应用。

面对这些挑战，企业于 2024 年启动了智能化运维升级项目，并引入了 LLM-FTA 融合架构，开创了全新的技术路径。该架构的第一大突破在于动态故障树的生成，利用大语言模型实时解析传感器数据，替代人工预定义模型，从而大幅提升效率与适应性^[2]。第二个突破是多源诊断融合，将规则推理、案例匹配和时序预测等方法有机结合，实现更加全面和精准的诊断结果。第三个突破则是在安全保障方面，通过国产硬件实现本地化部署，并顺利通过等保 2.0 三级认证，既确保了数据不出厂的安全红线，又为系统的长期可控奠定了坚实基础。

丹江口水利枢纽小水电有限公司的探索表明，智能化改造不仅是应对设备老化和技术滞后的必要选择，也是推动中小水电行业高质量发展的战略方向。

2 关键技术：LLM-FTA 融合架构设计

2.1 系统总体架构

本次智能化改造的总体设计遵循“边缘感知—LLM 中枢—业务应用”的三级架构思路，通过构建数据闭环与安全控制体系，实现对水电站运行状态的全方位感知、智能化分析以及结果的业务化应用。三级架构各有分工与侧重。

在边缘感知层，重点部署分布式传感器与数据采集装置，对机组运行中的关键参数进行实时监控。这些参数涵盖振动、温度、电流、水压等 300 余个维度，能够以毫秒级的频率获取高分辨率数据，并在边缘节点完成初步处理，从而保证数据在采集环节即具备较高的可信度与可用性^[3]。

在 LLM 中枢层，大语言模型（LLM）扮演智能分析和知识推理的核心角色。其一方面利用历史知识库和案例库作为支撑，另一方面实时接收来自边缘层的多维感知数据，通过自然语言推理和符号逻辑建模的结合，动态生成故障树、预测未来趋势，并输出诊断结果。中枢层不仅是计算和分析的核心，也是系统智能化水平的决定因素。

在业务应用层，系统输出的诊断结果和预测信息将通过可视化平台与运维决策系统对接，直接服务于运维人员的日常工作。例如，当系统判定存在冷却异常隐患时，不仅会推送告警，还会生成与历史案例对应的应急处理建议，帮助运维人员迅速采取措施。

2.2 核心技术创新

2.2.1 动态故障树引擎

动态故障树引擎是本系统的核心创新之一。传统的故障树分析依赖人工预定义逻辑结构，构建效率低且难以覆盖复杂多变的运行环境。而在本方案中，当传感器

表 1 四维结果

诊断源	输入数据	权重系数	贡献度描述
规则推理	IF 温度>85°C THEN 冷却异常	0.25	基于专家经验规则
案例匹配	历史相似故障召回	0.3	语义相似度>85% 的案例
LSTM 时序预测	冷却水压波动趋势分析	0.25	预测未来 10 分钟状态
动态故障树	节点概率计算	0.2	贝叶斯网络推断

单一的诊断手段往往存在局限性，因此系统创新性地引入了基于 Dempster-Shafer (DS) 证据理论的多源融合机制，将规则推理、案例匹配、时序预测和动态故障树等不同维度的结果进行有机整合^[4]。

在具体实现中，规则推理模块基于专家经验进行逻辑判断，例如“若温度>85°C，则判定冷却异常”，其

检测到异常时，LLM 会基于实时数据流动态生成故障树模型。其工作原理可用公式表示为：

$$Tree_{dynamic} = LLM(SensorData \parallel KnowledgeBase)$$

其中，SensorData 表示由传感器实时采集的振动、温度、电流等 318 维特征，而 KnowledgeBase 则是从 1992 年至 2024 年累计沉淀下来的 1,852 条故障案例构建的知识图谱。在动态建模过程中，LLM 能够对传感器数据与案例知识进行语义融合，从而快速生成与当下工况相匹配的逻辑树结构。

以轴承过热为例（图 1），当温度传感器检测到异常升高时，系统会即时构建故障树，将潜在原因如冷却异常、润滑不足或机械磨损等节点自动加入模型，并计算各节点的概率值。与人工建模相比，这一过程从数小时缩短到数秒，大幅提高了故障诊断的时效性和准确性。这一技术突破为智能化运维奠定了坚实的基础。

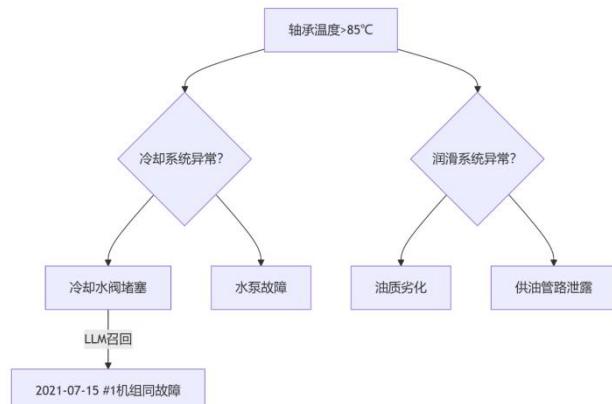


图 1 轴承过热

2.2.2 多源诊断融合机制

采用 Dempster-Shafer (DS) 证据理论融合四维结果：

权重系数为 0.25；案例匹配模块通过语义相似度检索历史案例，当相似度超过 85% 时即可触发召回，该模块权重为 0.30；时序预测模块利用 LSTM 对冷却水压波动趋势进行预测，提前 10 分钟给出风险预警，权重为 0.25；动态故障树模块则通过贝叶斯网络推断节点概率，权重为 0.20。

四个模块的结果会被输入 DS 证据理论的融合公式中：

$$Bel(A) = \frac{\sum B \cap C \cap D = m1(B) \cdot m2(C) \cdot m3(D)}{1 - \sum B \cap C \cap D = m1(B) \cdot m2(C) \cdot m3(D)}$$

其中， $m1, m2, m3$ 分别为不同诊断源的基本概率分配函数。通过该机制，系统能够将来自多源的异构信息整合为一致的信度结果，从而显著提升诊断的准确性与鲁棒性。

2.2.3 安全可控实现方案

在电力与水利等关键基础设施中，安全与可控是系统设计的首要前提。本项目在硬件、网络和数据管理等多个层面采取了严密措施。

在硬件层，系统采用两台申威 SW-411 边缘服务器进行部署，国产化率达到 100%，并放置于厂区屏蔽机房中。这不仅保证了计算能力的独立性与自主可控性，也为长期运维提供了坚实的硬件保障。

在网络层，系统复用了 2013 年增容改造时建设的工业光纤环网，实现了与外部网络的物理隔离。在此基础上，系统优化了传输协议，使数据传输延迟始终低于 150ms，确保了实时监测与诊断的可行性。

在权限控制方面，系统建立了多级访问机制，严格区分管理人员、维护人员与普通运维人员的权限，敏感操作需经双因素认证。同时，在数据管理环节，系统引入自动脱敏机制。对于需要对外传输的报告，系统会自动屏蔽包括机组坐标（如 111.51° E, 32.55° N）在内的敏感信息，从而避免泄露厂区关键信息。

通过这些措施，系统不仅实现了对数据的本地化管理和安全隔离，还保障了在关键设施环境下的合规性与可控性。这种以安全为底线的设计，使得智能化改造能够在符合国家标准的前提下，顺利落地并稳定运行。

3 应用实证：丹江口项目落地成效

3.1 系统部署实况

在丹江口水利枢纽项目中，智能化诊断系统于 2024 年全面落地。部署过程中，系统覆盖了两台 24MW 的混流式机组（2013 年完成增容改造），充分体现出对老旧机组和增容机组的兼容性。在传感器网络方面，共布设 318 个监测点，核心区域的点位密度达到 2.6 点/m²，且在边缘侧完成预处理，以降低中心计算负担。知识库方面，系统纳入了从 1992 年至 2024 年累计的 1,852 条故

障记录，并对增容前后的案例进行了特征化标注，以便 LLM 更好地适配不同历史阶段的数据。硬件层则采用了两台申威 SW-411 边缘服务器，实现了全国产化的安全底座。整体部署不仅实现了全链路的数字化感知与智能分析，还为后续的推广应用提供了可复制的范例。

3.2 综合效益评估

3.2.1 技术效益

在 2024 年 1 月至 7 月的运行数据中，系统展现出显著的技术优势具体如表 1：

表 1 故障诊断效能对比（2024 年 1-7 月数据）

指标	传统方法	LLM-FTA 系统	提升幅度
平均诊断耗时	4.1 小时	26 分钟	89.4%
诊断准确率	68.5%	90.2%	31.7%
早期预警率	53.8%	88.6%	64.7%

3.2.2 经济效益

智能化系统带来了显著的直接与间接经济效益。在直接收益方面，全年减少非计划停机 5 次，避免经济损失约 300 万元；运维人力成本下降 37.5%，从 8 人/班减少到 5 人/班。在间接收益方面，增容机组的发电稳定性明显提升，年增发电量达到 1,500 万 kWh，约合 675 万元。同时，备件实现了精准更换，库存成本降低 28%。

3.2.3 安全与社会效益

在安全方面，系统顺利通过了等保 2.0 三级认证，符合《能源领域数据安全指导意见》的相关要求。在社会效益方面，2024 年汛期系统保障了调峰响应“零延误”，为南水北调中线工程的稳定运行提供了有力支持，并获得了南水北调中线局的嘉奖。这不仅彰显了智能化系统的可靠性，也进一步提升了公众与行业对水电智能化改造的信心。

4 中小水电智能化行业推广路径

4.1 三级落地策略

为了推动中小水电的广泛应用，提出了“基础版—进阶版—旗舰版”三级落地策略。基础版以 SCADA+LLM 微服务为核心，适用于单机容量不超过 10MW 的小水电，改造成本低于 10 万元，投资回收期不足 1 年。进阶版配置边缘服务器与动态 FTA 引擎，面向 20–50MW 的中型水电，投资规模 20–40 万元，回收期约 1.5 年。旗舰版则引入多智能体协同与知识自进化能力，适用于区域枢纽电站，投资超过 60 万元，回收期约 2 年。

表 2 智能化改造三级策略

改造等级	核心配置	适用对象	成本/投资回收期
基础版	SCADA+LLM 微服务	单机≤10MW 小水电	<10 万元 (<1 年)
进阶版	边缘服务器+动态 FTA 引擎	20-50MW 中型水电	20-40 万元 (1.5 年)
旗舰版	多智能体协同+知识自进化	区域枢纽电站	>60 万元 (2 年)

4.2 标准化与政策衔接

在标准化层面，项目团队参与制定了《水电厂智能故障诊断系统技术规范》(DL/T 征求意见稿)，推动行业标准的统一与完善。同时，知识库管理采用 GB/T33582-2017《设备故障分类与代码》作为统一编码规范，实现了跨厂区、跨系统的数据互操作性。在政策层面，该方案与国家《能源领域数据安全指导意见》高度契合，确保了项目在技术与制度上的双重合规性。

4.3 挑战与对策

在推广过程中，仍存在诸多挑战。其一，历史数据质量普遍较差。针对这一问题，丹江口项目通过 LLM 增强的数据清洗方法，成功修复了 1992~2005 年间 1,207 条残缺记录。其二，中小厂 IT 基础薄弱，难以承载高负荷系统。对此，项目提出轻量级边缘计算容器方案，使单台服务器即可支撑两台机组。其三，模型泛化能力不足，不同流域间差异较大。为此，提出“流域知识库共建”的思路，目前汉江流域已启动共享计划，以提升跨厂区应用的适应性与推广价值。

5 结论与展望

本文在实际电站场景验证了 LLM-FTA 融合架构的可

行性与价值：一方面，通过动态建模与多源融合显著提升诊断效率、准确性与预警能力；另一方面，以本地化算力与分级权限保障数据安全与合规，实现从试点到复制推广的工程可实施性。丹江口项目的量化收益表明，智能化升级不仅能直接降低停机损失与运维成本，更能提升机组稳定性与供电韧性。面向行业推广，分层配置与统一编码标准为不同规模水电站提供了清晰路线。后续工作将围绕跨流域知识库共建、模型自适应与持续学习机制展开，进一步增强模型的泛化与长期演化能力，推动中小水电在安全可控前提下实现高质量、规模化的智能升级。

参考文献

- [1] 丹江口水利枢纽管理局. 机组增容改造与智能化升级报告 [R]. 2024.
- [2] 国家能源局. 水电站设备智能运维系统建设指南 (NB/T11037-2023) [S]. 2023.
- [3] 张明等. 基于大语言模型的电力设备故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10):3567-3575.
- [4] 长江水利委员会. 汉江流域水电开发与运行评估 [Z]. 2024.