

# 水力发电系统中的能效提升与技术创新

郑欢

140622\*\*\*\*\*2614

**摘要:**在全球能源结构转型与“双碳”目标推进的背景下，水力发电作为清洁可再生能源的重要组成部分，其运行效率与技术升级日益受到关注。传统水电系统在能量转换、调度响应与设备运行中仍存在优化空间。本文聚焦水力发电系统的能效瓶颈与技术演进路径，探讨从水轮机优化、智能调控到系统集成的多维度创新策略。通过分析能量利用效率的提升机制与新型技术的融合应用，提出推动水电系统向高效化、智能化、可持续化发展的综合路径，为水电行业的技术升级提供理论支持与发展方向。

**关键词:**水力发电；能效提升；技术创新；水轮机优化

**DOI:** 10.69979/3060-8767.25.11.026

## 引言

水力发电相比传统火力发电而言，具有高度清洁、无碳的效果，因而这类绿色发电对于我国的双碳战略实现具有特别重要的意义。随着能源需求持续增长与环境保护要求日益严格，提升水电系统的整体能效已成为行业发展的核心议题。尽管水电技术已相对成熟，但在实际运行中，仍面临水能利用率不高、负荷响应滞后、设备老化、调度灵活性不足等问题，制约了其潜力的充分发挥。特别是在多能互补、电网智能化的大背景下，传统水电系统亟需通过技术创新实现效率跃升与功能拓展。当前，数字化、自动化与新材料技术的快速发展为水电系统优化提供了新的可能。本文围绕能效提升的关键环节，探讨技术创新在水轮机性能、运行控制、系统协同等方面的应用路径，旨在构建更加高效、灵活、可持续的现代水力发电体系。

## 1 水力发电系统能效瓶颈的识别与分析

### 1.1 水能转换过程中的能量损失机制

水力发电的本质是将水流的势能与动能转化为电能，但在这一能量转换链条中，存在多个环节的能量损耗。首先，在引水系统中，水流通过压力管道、蜗壳等结构时，因摩擦、涡流和局部阻力造成水头损失，直接影响进入水轮机的有效能量。其次，在水轮机内部，水流冲击叶片时存在冲击损失、脱流现象和尾水管涡带，导致部分动能未能有效传递。此外，机械传动过程中，主轴、轴承等部件的摩擦也会消耗部分机械能。最后，在发电机端，电磁转换效率并非100%，存在铜损、铁损等电气损耗。这些损失虽在设计阶段已被考虑，但在实际运行中，因水质变化、泥沙磨损、空蚀等问题，损失

程度可能进一步加剧。

### 1.2 机组运行偏离最优工况的问题

水轮发电机组在设计时通常设定一个最优工况点，即在此流量与水头组合下，机组效率最高。然而，在实际运行中，由于来水波动、电网负荷变化及调度指令调整，机组往往长期运行在非最优区间。例如，在枯水期水头偏低或丰水期流量过大时，机组可能处于低效区运行，导致单位水耗电能增加。此外，部分老旧电站缺乏灵活调节能力，难以根据实时水情动态调整运行方式，造成“大马拉小车”或“超负荷运行”现象。这种工况偏离不仅降低发电效率，还可能加剧设备振动、磨损与空蚀，影响机组寿命。因此，如何通过运行策略优化，使机组尽可能接近高效区运行，成为提升能效的关键。

### 1.3 水库调度与电力需求匹配的滞后性

水库调度是影响水电系统整体效率的重要环节。传统的调度模式多基于经验或固定规则，缺乏对电力市场变化、天气预报与电网需求的实时响应能力。例如，在用电低谷期仍维持高水位运行，导致弃水；或在高峰负荷时因调度滞后无法及时加大出力，错失发电时机。此外，梯级水电站之间若缺乏协同调度，可能出现上游放水过快而下游无法消纳的情况，造成水能浪费。调度与需求的不匹配，本质上是信息传递与决策机制的滞后。要提升能效，必须打破“以水定电”的被动模式，转向“以电调水”的主动策略。通过引入预测模型与优化算法，实现水库调度与电力需求的动态耦合，最大限度利用水资源，减少弃水损失，提升系统整体运行效益。

## 2 水轮机性能优化与关键设备升级

### 2.1 水轮机叶片设计的流体动力学改进

水轮机叶片是能量转换的核心部件，其几何形状与表面特性直接影响水流的流动状态与能量捕获效率。通过计算流体动力学（CFD）模拟，可对叶片的型线、角度、曲率等参数进行优化设计，减少水流分离与涡流产生，提升水力效率。现代设计趋向于采用非对称、变厚度、三维扭曲叶片，以适应复杂水流条件。同时，叶片表面的光滑度与抗空蚀涂层也对性能有显著影响。优化后的叶片不仅能在额定工况下提高效率，还能在部分负荷下保持较好的稳定性。此外，针对不同水头段（高、中、低水头），可定制化设计混流式、轴流式或贯流式叶片，实现“一机一策”的精准匹配。通过流体动力学的深入研究与仿真验证，水轮机叶片的性能边界不断被突破，为能效提升提供基础支撑。

## 2.2 导水机构与过流部件的效率提升

导水机构（如导叶）负责调节进入水轮机的水流方向与流量，其调节精度与密封性能直接影响机组效率。传统导叶在启闭过程中易产生间隙泄漏，导致部分水流未参与做功。通过优化导叶密封结构、采用自适应调节机构，可减少漏水量，提升水流利用率。同时，蜗壳、尾水管等过流部件的流道设计也至关重要。合理的蜗壳断面形状可使水流均匀分布于转轮入口；优化的尾水管扩散段能有效回收动能，减少出口动能损失。近年来，部分电站通过加装导流板、优化尾水管喉部尺寸等方式，显著提升了整体水力性能。这些改进虽不改变主机结构，但通过“微创新”实现“大效益”，是提升系统效率的重要途径。

## 2.3 新型材料在关键部件中的应用探索

传统水轮机部件多采用铸钢、不锈钢等材料，虽具备一定强度，但在抗空蚀、耐磨损方面仍有局限。随着材料科学的发展，高分子复合材料、陶瓷涂层、纳米改性合金等新型材料逐步应用于关键部位。例如，在叶片表面喷涂碳化钨或镍基合金涂层，可显著延长抗空蚀寿命；在轴承部位使用自润滑复合材料，可减少摩擦损耗与维护频率。此外，轻质高强度材料的应用也有助于降低转动惯量，提升机组响应速度。这些材料不仅提升了设备的耐久性，还间接提高了运行效率与可用率。尽管部分新材料成本较高，但其在延长检修周期、减少停机损失方面的优势，使其在长期运行中具备经济可行性。材料创新正成为推动水轮机性能跃升的重要驱动力。

## 3 智能控制与运行调度技术的融合

### 3.1 基于实时数据的机组运行优化策略

现代水电站普遍配备传感器网络，可实时采集水头、流量、振动、温度等运行参数。通过对这些数据的分析，可动态调整机组运行方式，使其始终处于高效区间。例如，根据实时水头变化自动调整导叶开度与转轮转速，避免效率下降；在多机组电站中，依据各机组效率曲线智能分配负荷，实现“优机多发、劣机少发”。这种基于数据驱动的优化策略，打破了传统固定运行模式的局限，提升了系统整体效率。同时，数据积累也为后续模型训练与算法优化提供了基础，推动运行管理向智能化演进。

### 3.2 自适应调节系统对负荷变化的响应能力

电网负荷波动要求水电具备快速响应能力。传统调节系统响应速度慢，难以满足现代电网对调频、调峰的需求。自适应调节系统通过引入模糊控制、神经网络等智能算法，能够根据负荷变化趋势提前调整机组出力，实现平滑、快速的功率调节。例如，在电网频率下降时，系统可自动判断并迅速增加出力，起到“一次调频”作用。这种主动响应能力不仅提升了电站的市场竞争力，也增强了电网稳定性。通过自适应技术，水电站正从“被动执行”向“主动支撑”转变，功能定位不断拓展。

### 3.3 智能监控与故障预警系统的集成应用

智能监控系统可对机组运行状态进行全方位监测，结合历史数据与机器学习模型，识别异常征兆，提前预警潜在故障。例如，通过振动频谱分析判断轴承磨损趋势，或通过温度变化预测发电机过热风险。预警信息可推送至运维人员，便于提前安排检修，避免突发停机。系统还可自动生成运行报告与维护建议，提升管理效率。通过集成监控、诊断与决策功能，智能系统实现了从“事后处理”向“事前预防”的转变，保障了机组的高效、稳定运行。

## 4 多技术协同下的系统集成创新

### 4.1 水电与储能系统的联合运行模式

水电本身具备一定的调节能力，但与新型储能技术（如抽水蓄能、电池储能）结合后，可进一步提升灵活性。在电力富余时，利用多余电量驱动水泵将水抽至上库，实现能量储存；在用电高峰时释放发电，增强调峰能力。这种“水电 + 储能”模式不仅提高了水资源的利用效率，还增强了电站参与电力市场的竞争力。例如，某流域水电站搭配抽水蓄能电站后，在汛期可将多余水量转化为储能电量，枯水期释放补充供电缺口，避免水资源浪费。此外，混合系统可平抑新能源波动，在风电、

光伏出力骤降时快速响应，助力构建稳定可靠的清洁能源体系，保障电网供电连续性。

#### 4.2 数字化平台对全厂运行的协同管理

通过构建统一的数字化管理平台，集成监控、调度、维护、安全等多个子系统，实现全厂信息共享与协同决策。管理人员可通过可视化界面掌握整体运行状态，快速响应异常，比如当机组温度、水压出现异常时，平台自动报警并推送至相关责任人。平台还可支持远程运维与移动办公，运维人员无需现场值守即可查看设备参数，通过移动端接收检修任务，提升管理效率。同时，平台能对运行数据进行分析，预测设备故障风险，提前安排维护，减少非计划停机时间，是实现水电系统智能化、集约化管理的核心载体。

#### 4.3 水电系统在多能互补格局中的角色重构

在风光水火储一体化背景下，水电不再仅仅是发电单元，更成为系统调节的“稳定器”与“平衡器”。通过参与调频、调压、黑启动等辅助服务，水电的价值得到全面提升，比如在电网频率波动时，水电可快速调整出力，维持频率稳定。其灵活调节能力为新能源消纳提供支撑，当风电、光伏大发时，水电适当减发预留负荷空间；当新能源出力不足时，水电增发补能，推动能源系统向低碳、高效方向发展，助力实现“双碳”目标下的能源结构转型。

### 5 推动水电技术创新的支撑体系构建

#### 5.1 政策引导与行业标准的协同推进

政府应出台支持水电技改、智能化升级的政策，比如对开展数字化改造、储能配套的水电站给予财政补贴或税收减免，降低创新成本。同时，制定绿色水电评价标准，从能效水平、生态保护、碳排放等维度明确指标要求，引导行业向高效、低碳方向发展。此外，可建立水电技术创新试点机制，选取典型电站开展示范项目，总结经验后在全国推广，形成政策与标准相互支撑的发展格局。

#### 5.2 研发投入与产学研合作机制建设

加大科研经费投入，设立水电技术创新专项基金，重点支持新型储能、数字化管理、生态友好型水电技术的研发。鼓励高校、科研院所与企业联合攻关，比如高校负责基础理论研究，科研院所开展技术试验，企业主

导成果转化，形成“研发—试验—应用”闭环。同时，搭建产学研合作平台，定期组织技术交流会议，促进各方资源共享，突破关键核心技术，如高效水轮机、智能监控系统等，加速成果转化，推动水电技术迭代升级。

#### 5.3 人才培育与技术转化能力提升

加强水电领域复合型人才培养，在高校开设水电智能化、新能源协同等相关专业课程，培养既懂水电技术又掌握数字化、储能知识的人才。企业可开展内部培训，邀请专家讲解新技术应用，提升工程技术人员对新技术的理解与应用能力。同时，建立技术转化激励机制，对成功将科研成果应用于实际项目的团队给予奖励，打通技术创新“最后一公里”，确保新技术能快速落地，提升水电工程的整体效益。

### 6 结论

水力发电系统的能效提升是一项系统工程，涉及设备性能、运行控制、系统集成与外部支撑等多个层面。通过优化水轮机设计、引入智能调控技术、推动多能协同与数字化管理，可显著提升水电的能量利用效率与运行灵活性。未来，随着新材料、人工智能与能源互联网技术的深度融合，水电系统将向更加高效、智能、可持续的方向演进。构建完善的政策、研发与人才支撑体系，是实现技术突破与产业升级的关键保障。在能源转型的大背景下，技术创新将成为推动水电高质量发展的核心动力。

#### 参考文献

- [1] 吕振波,田彦法,李利,等.某地源热泵能源站节能调适与能效提升[J].能源研究与管理,2023,15(02):140-147.
- [2] 刘天雄,黄鑫,闫震伍,等.面向水力发电的自流式减压供水技术与智能调配方法研究[J].中国设备工程,2025,(09):26-28.
- [3] 龚雪峰.节能降耗技术在水利水电工程设计中的应用[J].水上安全,2024,(03):79-81.
- [4] 王嘉媛,李洋,李媛,等.关于风电、光伏发电与水力发电结合的研究[J].中国设备工程,2023,(10):263-265.
- [5] 李建波.大渡河智慧型水力发电企业战略研究[D].华北电力大学(北京),2018.