

电力技术

抽水蓄能电站的水力学原理与工程应用研究

刘洋

中能建国际建设集团有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i2.7710

[摘 要] 本文系统阐述了抽水蓄能电站的水力学原理及其在工程实践中的应用。首先介绍了抽水蓄能电站的基本工作模式与发展概况，接着深入剖析其涉及的水力学关键原理，包括水流能量转换、水泵水轮机特性、输水系统水力过渡过程等。随后详细探讨工程应用方面，涵盖站址选择的水力学考量、输水系统设计布置、机组选型与运行优化等内容，并结合实际案例分析了水力学问题的解决策略及工程效益。研究表明，精准把握水力学原理对抽水蓄能电站高效、安全运行意义重大，且随着技术发展，其在新能源消纳与电力系统稳定中作用愈发凸显。

[关键词] 抽水蓄能电站；水力学原理；能量转换；输水系统；工程应用

Study on hydraulics principle and engineering application of Pumped storage power station

LIU Yang

CHINA ENERGY INTERNATIONAL GROUP CO., LTD

[Abstract] This paper systematically expounds the principle of hydraulics of pumped storage power station and its application in engineering practice. Firstly, the basic working mode and development situation of pumped storage power station are introduced, and then the key principles of hydraulics are deeply analyzed, including water flow energy conversion, pump turbine characteristics, hydraulic transition process of water transmission system. Then, the engineering application is discussed in detail, covering the hydraulics consideration of site selection, the design and layout of water transmission system, unit selection and operation optimization, and the solution strategy of hydraulics problems are analyzed combined with the actual cases. The research shows that the accurate grasp of the hydraulics principle is of great significance to the efficient and safe operation of pumped storage power stations, and with the development of technology, its role in the consumption of new energy and power system stability is becoming more and more prominent.

[Key words] pumped storage power station; hydraulics principle; energy conversion; water transmission system; engineering application

一、引言

随着全球能源结构加速转型，可再生能源接入电网比例不断攀升，电力系统对灵活调节电源的需求日益紧迫。抽水蓄能电站作为大规模储能设施，兼具调峰、填谷、调频、调相及紧急事故备用等多重功能，是保障电力系统安全稳定运行与促进清洁能源消纳的关键支撑技术。其核心技术涵盖水力学、机械、电气等多学科领域，而水力学原理贯穿于电站规划、设计、施工及运行全生命周期，深刻影响着电站性能与效益。深入探究抽水蓄能电站水力学原理及应用，对推动行业技术进步、提升工程质量具有重要现实意义。

二、抽水蓄能电站工作原理与发展态势

2.1 基本工作模式

抽水蓄能电站利用电力负荷低谷时的过剩电能，驱动水泵将下水库水抽至上水库储存，此过程电能转化为水的势能；待电力负荷高峰，水从高水位上水库经水轮机放回下水库发电，势能再度转换为电能回馈电网。通过这种循环作业，实现对电能的时空调节，有效平衡电力供需矛盾。

2.2 全球发展概况

近几十年，抽水蓄能电站在全球范围蓬勃发展。欧美发达国家率先大规模建设，如美国胡佛水坝抽水蓄能工程，历经长

期运行优化，在电网稳定性保障方面成效显著；日本因能源匮乏且电力需求多样，其抽水蓄能装机占比颇高，技术精细化程度领先，像葛野川抽水蓄能电站，单机容量与综合效率位居世界前列。国内抽水蓄能电站起步稍晚，但发展迅猛，自上世纪末进入快速建设期，从早期的十三陵等示范项目，逐步拓展至各大区域电网，当前在建与规划规模均位居世界首位，成为能源战略布局重点。

三、水力学关键原理剖析

3.1 水流能量转换机制

抽水蓄能核心在于能量转换。水泵工况下，电机带动叶轮高速旋转，对水流做功，依据伯努利方程，叶轮进口处水流低速高压，出口处高速低压，通过叶轮机械增压，水流获得足够动能与压能克服重力与管路阻力，实现电能向水势能及动能转化；发电工况则逆向操作，水流冲击水轮机转轮，转轮受力转动驱动发电机，水流能量逐步降低，转化为电能（文章中如图1所示），此过程严格遵循能量守恒定律，能量转换效率受叶轮与转轮设计、水流流态、转速等多因素交互影响。

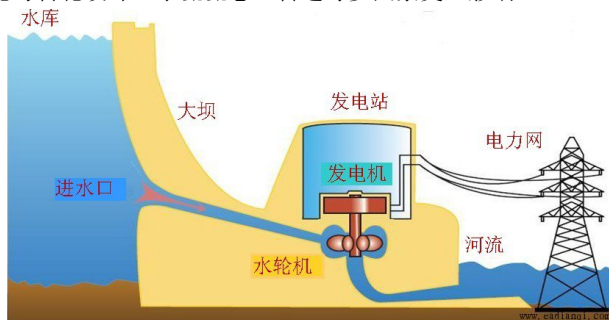


图1 水力发电

3.2 水泵水轮机特性曲线

水泵水轮机性能由其特性曲线表征，包括流量 - 扬程 ($Q - H$)、流量 - 效率 ($Q - \eta$) 等曲线族。以 $Q - H$ 曲线为例，水泵工况时，随流量增大，扬程先缓降后骤减；发电工况则相反，流量增加，水头（扬程）相应减小。效率曲线呈抛物线状，存在最佳工况点，偏离此点效率降低，源于流道内水力损失变化，如摩擦损失、冲击损失随工况偏离而增大，精准匹配工况至高效区是电站优化运行关键，需借助调速系统、导叶调节维持机组高效稳定。

3.3 输水系统水力过渡过程

输水系统涵盖引水隧洞、压力管道、调压室等复杂结构。启动、停机及工况切换引发水力过渡过程，涉及水击、调压室涌浪等现象。水击因流速突变致压力急剧波动，依儒科夫斯基公式，水击压力增量与流速变化率、管道特性相关，可能损坏管道设备；调压室利用其水体惯性缓冲水击，涌浪高度受调压室面积、阻抗系数制约，精确计算与合理设计可保障输水安全，常采用特征线法数值模拟过渡过程，优化结构参数以抑制不利波动。

四、工程应用关键环节

4.1 站址选择的水力学要素

站址优选是项目根基，水力学角度聚焦水源充足性、水头特性与地形适配度。上下水库需具备稳定可靠水源补给，确保循环水量需求；水头高度决定能量转换潜力，宜选地形高差大

且集中区域，像高山峡谷地带，能降低工程造价并提升发电效率，如我国南方多丘陵山区，依托地势落差成功布局诸多电站；地质条件关乎水库渗漏与边坡稳定，水力学要求地层透水性弱，经钻孔勘探、水文地质测试综合评估，规避渗漏隐患，确保长期蓄水安全。

4.2 输水系统设计与布置

输水线路依地形地貌规划，力求短直减少水头损失，常采用隧洞穿越山岭，内壁经混凝土衬砌减糙；压力管道依承压选材质，高强度钢用于高水头段，设计按内水压力、外荷载组合工况核定壁厚，通过设置伸缩节、镇墩化解应力应变；调压室形式多样，简单式、阻抗式按需选用，位置靠近厂房，其尺寸经水力学计算精确定，协同机组运行缓冲水击，保障输水平稳。

4.3 机组选型与运行优化

机组选型匹配电站规模与水头范围，低水头选混流式，高水头用可逆式水泵水轮机，依据模型试验确定最优参数，确保高效运行；运行阶段借助监控系统实时采集流量、压力、振动等参数，基于大数据分析与智能算法，动态调整机组工况，避开水力不稳定区，实现负荷快速响应，某电网内抽水蓄能电站通过智能运维，机组启停灵活度提升 30%，综合效率提高 5%，显著增强电网调节效能。

4.4 水力学与生态环境协同考量

抽水蓄能电站建设运营需兼顾生态环境，水力学层面紧密关联生态保护修复策略。水库蓄水改变区域水文情势，影响下游河道生态基流，借助水力学流量演算模型，精细核算不同时段下泄生态流量，结合下游水生生物繁殖期、栖息地需水特性，利用节制闸、生态放水管等设施实现精准放水（文章中如图2所示），维持河道基本生态功能，避免鱼类洄游受阻、河岸植被退化等生态损伤；上、下水库面波动受风生流、吞吐流等水动力因素左右，为防控水体富营养化与岸坡侵蚀，依水力学环流理论优化库岸线设计，布置生态护坡、人工湿地，削减波浪能量、净化面源污染，如天荒坪抽水蓄能电站周边湿地生态系统借水力学原理合理构建，有效净化入库水质，成为生态友好型工程范例；对于电站施工期废水排放，利用水力学沉淀、扩散原理设计多级沉淀池、引流沟渠，管控悬浮物扩散范围与沉淀效率，降低施工活动对周边水域生态冲击，达成工程建设与生态环境和谐共生，拓展抽水蓄能可持续发展空间。



图2 节制闸桥

在工业环境中，于变压器、开关柜、电缆等关键部位广泛部署智能电表、高精度传感器，实时捕捉电压、电流、温度、功率因数等参数。一旦监测到数据异常，系统借助智能算法迅速判断故障类型与位置，提前发出预警，运维人员可依据精准定位快速响应，在故障萌芽阶段处理问题，保障化工、钢铁等连续生产行业不停产。商业建筑内，智能监控系统与建筑管理系统集成，实时反馈用电异常，不仅能及时排查潜在电气火灾隐患，还能依据用电数据优化运营成本，通过峰谷电价策略，智能调控空调、电梯等设备运行时间，实现节能降费。民用小区里，智能电表将数据远程传输至物业管控平台，方便物业人员定期排查线路老化、过载等隐患，还能借助智能断路器实现远程分合闸调控，遇上紧急抢修可远程切断故障线路，降低运维人员现场作业风险，提升运维效率与安全性，弱化因设计差异带来的运维难题。

(六) 优化空间布局

商业建筑中，像商场与写字楼寸土寸金，空间利用极为关键。需精准勘察隐蔽空间、夹层的承载能力与尺寸，让配电柜、变压器等设备巧妙嵌入，既不影响整体装修风格，又留出足够散热风道，利用自然对流或小型排风扇维持合适温度，避免设备过热降效。工业场景下，依据工艺流程布局变配电设施，将配电室建在用电负荷集中区，缩短电缆长度，降低线路电阻损耗，还能减少电磁干扰对精密生产设备的影响。大型工厂按车间用电需求分区设置配电室，提升供电效率。民用小区讲究景观融合，把变配电设备安置于地下车库特定角落，或是打造独立景观小屋，做好绿化遮蔽，既契合小区规划美学，又满足居

民对居住环境美观舒适的诉求，还能留出充足空间方便后续运维检修。

结束语

综上所述，10kV 变配电系统设计的差异性分析揭示了不同应用场景下多样化的需求导向。从工业的严苛生产条件，到商业的运营体验考量，再到民用的生活品质追求，每个领域都为变配电系统设计划定了独特的边界条件。精准把握这些差异，是迈向高质量设计的第一步。随着技术迭代、用电模式更新，新的差异还会不断涌现。设计者唯有持续跟踪、深入钻研，将优化建议融入实践，才能让 10kV 变配电系统在各场景中高效运转，持续为社会的稳定与发展输送可靠电力，适应日新月异的用电环境。

[参考文献]

- [1]黄东尧.10kV 变配电系统设计的差异性分析[J].集成电路应用, 2022, 39(12): 316-317.
- [2]魏振培.10kV 配电系统的规划与设计分析[J].集成电路应用, 2022, 39(07): 120-121.
- [3]蒲天旺.10kV 变电所供配电系统的设计要点[J].造纸装备及材料, 2021, 50(02): 12-14.
- [4]蔡骥.10kV 供配电系统设计及对供电可靠性的影响分析[J].电工技术, 2021, (02): 75-77.
- [5]刘侠.基于 10kV 变配电所供配电系统的设计重点与难点分析[J].大众标准化, 2021, (02): 187-188.
- [6]朱清清.10kV 变配电所供电系统设计要点[J].电子元件与信息技术, 2020, 4(05): 149-150.

上接第 143 页

五、工程案例

5.1 某抽水蓄能电站水力学问题的攻克

在某座正在建设中的高水头电站施工期间，工程团队遇到了一个压力管道水力学方面的难题。具体来说，初始设计中的水击压力超出了管材所能承受的极限。面对这一挑战，工程团队进行了深入的 CFD（计算流体动力学）模拟分析，通过精确的计算和模拟，成功地定位了关键管段中水流加速的点。基于这些数据，他们采取了一系列有效的措施，包括增设旁通管以分流水流，以及优化止回阀的关闭规律。这些措施最终成功地将水击压力的峰值降低了 20%，从而确保了管道的安全运行。此外，针对上水库进出水口出现的漩涡流态紊乱问题，导致发电效率降低的情况，工程团队对进水口的体型进行了改造，并增设了消涡梁。这些改进使得流态变得均匀，流量系数提升了 15%，进而使得机组的发电出力得到了显著的增加。

5.2 工程效益的综合评估

电站投运后的评估结果表明，该电站通过在电力市场中进行调峰填谷操作，获得了相当可观的经济收益。在高峰时段的发电收入不仅覆盖了低谷时段抽水的成本，而且使得电站的年净利润超过了亿元。此外，该电站的系统调频响应非常迅速，能够将区域电网的频率偏差控制在 $\pm 0.1\text{Hz}$ 以内，有效减少了因频率不稳定造成的停电损失，折合起来每年可减少数千万元的损失。在新能源接入方面，该电站每年能够吸纳周边的风电和光伏弃电超过 5000 万千瓦时，这不仅有助于提升清洁能源的利用率，而且从电力供应、系统稳定性以及能源消纳等多个

方面，全面展现了抽水蓄能电站的综合效益。

六、结语与展望

抽水蓄能电站水力学原理深植于工程各层面，从基础理论能量转换、设备特性到复杂输水系统设计与整体运行管控，是决定电站成败关键。当下，伴随新能源大规模并网、电力体制改革深化，抽水蓄能迈向智能化、大容量、高参数发展路径，未来需深化多场耦合数值模拟精度，研发适应复杂工况新型机组，融合物联网、AI 构建智慧运维体系，持续拓展功能应用场景，在全球能源变革浪潮中锚定电力系统核心调节地位，护航绿色能源体系稳健前行。

[参考文献]

- [1]叶青, 黄昉.变速抽水蓄能机组迈向工程化应用[N].科技日报, 2024-10-08(005).DOI: 10.28502/n.cnki.nkjrb.2024.006192.
- [2]李祥, 喻蓓临, 张怀芝, 等.TBM 技术在抽水蓄能电站的应用现状与发展趋势[J].水力发电, 2024, 50(10): 65-68.
- [3]高溥瑞.某抽水蓄能电站进/出水口水力特性分析及体型优化[D].西安理工大学, 2024.DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.001558.
- [4]王奶生, 赵党军, 李院忠, 等.地质超前预报在抽水蓄能电站工程中的应用[J].水利水电技术(中英文), 2023, 54(S2): 85-92.DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.S2.016.
- [5]高学平, 袁泽雨.抽水蓄能电站地下水库建设进展及关键水力学问题[J].水利学报, 2023, 54(09): 1058-1069.DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20230164.
- [6]宋寅强.某抽水蓄能电站下水库溢洪道水力学特性试验研究[D].西安理工大学, 2020.DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2020.001481.