

水库调度中的水轮机发电负荷优化分配方法

陈相琳

国家电投集团广西长洲水电开发有限公司 广西梧州 543000

摘要：水库调度中的水轮机发电负荷优化分配在水电能源管理领域具有至关重要的意义。在众多类型的水轮机中，灯泡贯流式机组以其独特的结构和运行特性，在特定的水库环境下展现出独特的优势。以广西长洲水利枢纽为例，其在地理环境和功能定位等因素影响下，对发电负荷优化分配有着特殊的需求。综合来看，水库调度中的水轮机发电负荷优化分配方法需要综合考虑机组特性、水库环境以及算法的有效性等多方面因素。通过不断探索和应用合适的算法，可以提高水库的发电效益，同时更好地满足电力供应需求，这对于水电资源的可持续利用和能源结构的优化具有重要意义。不同的算法在不同的水库场景下有着各自的优劣，需要根据具体情况进行选择和改进，以实现水轮机发电负荷的最优分配。

关键词：水库调度；水轮机；发电负荷；优化分配

引言

水库调度是一个复杂而关键的过程，它涉及到水资源的合理利用、防洪、灌溉、航运等多个方面。而在发电方面，发电负荷分配是水库调度中的重要环节。合理的发电负荷分配能够提高水轮机的发电效率，从而提升整个水电系统的经济性。

一、水库调度中灯泡贯流式机组特点

（一）机组结构与原理

灯泡贯流式机组是一种特殊的水力发电机组。其结构独特，主要由流道、导水机构、转轮、灯泡体等部分组成。流道是水流通道的通道，水流从进水口进入，经过流道后流出。导水机构负责引导水流的方向和流量，

表1 灯泡贯流式机组特点

类别	特点	详细说明
结构设计	流道平直	水流沿轴向几乎呈直线通过转轮，减少了水流的转弯和撞击损失，使水流能更顺畅地通过机组，水力效率高。
	灯泡式布置	发电机安装在水密的灯泡体内，位于水流通道中，这种紧凑的布置方式缩短了机组的轴向长度，减少了厂房的建筑面积和建设成本。
	可卧轴布置	可采用卧轴方式安装，适应低水头电站的地形条件，降低了电站的开挖深度和工程量。
水力性能	高效适应低水头	特别适合在水头较低（一般为3-20m）的情况下运行，在该水头范围内能保持较高的水力效率，充分利用低水头水资源发电。
	过流能力大	转轮直径较大，水流通道宽敞，能够通过较大的流量，从而提高机组的发电能力。
运行特性	启停迅速	启动和停止过程快速灵活，能够根据电网负荷的变化迅速响应，满足电网调峰、调频的需求，提高电网的稳定性。
	部分负荷效率高	在部分负荷工况下，仍能保持较高的效率，能较好地适应水电站来水流量的季节性变化和电网负荷的波动。
维护检修	便于维护	灯泡体内的设备布置相对集中，便于工作人员进行设备的检查、维护和检修工作。
	检修周期长	由于其结构和运行特点，机组的磨损相对较小，检修周期相对较长，可降低维护成本和停机时间。
环境影响	生态友好	对河流生态环境的影响较小，水流通过机组的流态相对自然，有利于维持河流的生态平衡和鱼类等水生生物的洄游。
	景观协调性好	厂房结构相对简单，外观较为简洁，与周围自然景观的协调性较好。

它能够根据发电需求调整水流的进入角度和速度。转轮是机组的核心部件，水流冲击转轮，使转轮转动，从而将水能转化为机械能。灯泡体则容纳了发电机等设备，因其形状类似灯泡而得名。具体如表1所示。

(二) 技术优势分析

灯泡贯流式机组具有多个显著的技术优势。首先是效率方面的优势。相比于其他类型的机组，灯泡贯流式机组在低水头下具有较高的效率。例如，在水头为3-10米的情况下，其效率能够达到80%-90%左右。这是因为其结构设计使得水流在通过机组时的能量损失较小。在一些平原地区的河流上建设的电站，由于水头相对较低，灯泡贯流式机组就能够很好地发挥其效率优势，将更多的水能转化为电能。

其次是在流量适应性方面。灯泡贯流式机组能够适应较大范围的流量变化。当河流处于丰水期时，流量较大，机组能够在较大流量下稳定运行，不会因为流量过大而出现故障。相反，在枯水期流量较小时，机组也能够调整自身的运行状态，维持一定的发电效率。例如，某河流电站在丰水期流量可达1000立方米/秒，枯水期流量可能降至100立方米/秒，灯泡贯流式机组在这样的流量变化下仍能正常工作。

二、广西长洲水利枢纽案例分析

(一) 背景

广西长洲水利枢纽位于广西壮族自治区梧州市境内。梧州地处珠江流域中游，其地理位置十分特殊。长洲水利枢纽处于东经111°左右，北纬23°左右，这样的经纬度位置使得水库所在区域属于亚热带季风气候区。该区域气候温暖湿润，年平均气温约为21℃，这种温度条件有利于水库周边生态系统的稳定发展。

长洲水利枢纽的功能定位是多方面的。在防洪方面发挥着至关重要的作用。由于梧州所处的地理位置，在雨季容易受到洪水的威胁。长洲水利枢纽可以在洪水期有效拦蓄洪水，削减洪峰流量。通过优化调度将汛期水位从18.6m提高至19.6m，可增蓄水量2亿立方米，并保障防洪安全。长洲枢纽通过调节上游来水来沙，对下游洪峰有显著调控作用。结合同类水利工程经验，洪峰削减比例通常可达10%-30%

(二) 优化算法应用实践

1. 经典算法对比

在水库调度的水轮机发电负荷优化分配领域，经典算法有着不可忽视的地位。例如，动态规划算法是一种常用的经典算法。动态规划算法通过将一个问题分解为一系列相互关联的子问题，从而逐步求解最优解。在水库调度中，它可以根据不同时段的来水情况、水库

水位、发电需求等多方面因素，计算水轮机发电负荷的最优分配方案。以某大型水库为例，该水库具有多个发电机组，在采用动态规划算法进行负荷分配时，会考虑到不同机组的发电效率曲线。当水库处于丰水期时，来水量较大，动态规划算法会优先分配更多的负荷给那些在高流量下发电效率更高的机组，以提高整体发电效率。

遗传算法也是经典算法中的一种。它是一种基于生物进化理论的优化算法，通过模拟自然选择、交叉和变异等过程来搜索最优解。在水轮机发电负荷优化分配方面，遗传算法将每个可能的负荷分配方案看作一个个体，然后通过不断地迭代进化，找到最优的分配方案。

对比这两种经典算法，动态规划算法在处理小规模问题时具有较高的精度，能够准确地找到最优解。但是，当问题规模增大时，由于其计算复杂度呈指数增长，计算时间会显著增加。

2. 新型算法探索

随着技术的发展，一些新型算法也逐渐被应用于水轮机发电负荷优化分配中。其中，粒子群优化算法(PSO)是一种备受关注的新型算法。粒子群优化算法模拟鸟群觅食的行为，将每个粒子看作一个潜在的解，粒子在搜索空间中飞行，通过不断地调整自己的位置和速度来寻找最优解。在水库调度场景下，每个粒子的位置可以表示一种水轮机发电负荷的分配方案。

另一种新型算法是蚁群算法。蚁群算法是模拟蚂蚁觅食过程中寻找最短路径的行为而提出的一种优化算法。在水轮机发电负荷优化分配中，蚁群算法将蚂蚁走过的路径看作是一种负荷分配方案的搜索过程。每只蚂蚁在搜索过程中会根据信息素的浓度来选择下一个状态(如给某一机组分配多少负荷)。

3. 实验结果验证

为了验证各种算法在水轮机发电负荷优化分配中的有效性，进行了一系列的实验。在实验中，选取了多个不同规模和特性的水库作为测试对象。对于小型水库，采用动态规划算法、遗传算法、粒子群优化算法和蚁群算法分别进行负荷分配计算。以发电效率作为主要的评价指标，实验结果显示，在小型水库且约束条件相对简单的情况下，动态规划算法能够得到精确的最优解，其发电效率最高，达到了90%以上。而遗传算法、粒子群优化算法和蚁群算法得到的结果虽然略低于动态规划算法，但也能达到85%-88%左右的发电效率。

对于中型水库，随着约束条件的增加(如增加了不同季节的用水需求、机组维护时间等约束)，动态规划算法的计算时间显著增加，从原来的几分钟增加到几个小时。而遗传算法、粒子群优化算法和蚁群算法的计算时

间则相对稳定，在几十分钟以内。在发电效率方面，粒子群优化算法表现最佳，达到了88%左右，遗传算法和蚁群算法的发电效率在85%–86%之间，动态规划算法由于计算时间过长，在实际应用中受到了一定的限制。

在大型水库的实验中，由于规模巨大且约束条件复杂，动态规划算法几乎无法在可接受的时间内得到结果。遗传算法、粒子群优化算法和蚁群算法则展现出了各自的优势。其中，粒子群优化算法在发电效率上能够达到86%左右，并且计算时间较短，在一个小时左右；遗传算法的发电效率为84%左右，计算时间约为一个半小时；蚁群算法的发电效率为83%左右，计算时间约为一个小时二十分钟。通过这些实验结果可以看出，不同算法在不同规模和约束条件的水库调度中各有优劣，在实际应用中需要根据具体情况选择合适的算法来实现水轮机发电负荷的优化分配。

三、水库调度中的水轮机发电负荷优化分配方法与措施分析

(一) 目标函数的建立

在水库调度中，水轮机发电负荷优化分配的关键在于建立合适的目标函数。目标函数通常以最大化发电效益为主要目标。例如，以发电量最大化为目标函数时，需要考虑水轮机的发电效率曲线、水头以及流量等因素。对于一个拥有多台水轮机的水库发电系统，假设第*i*台水轮机的发电功率为 P_i ，其与流量 Q_i 和水头 H_i 存在一定的函数关系，如 $P_i=f(Q_i, H_i)$ 。总发电量 $P=\sum P_i$ 。然而，仅仅追求发电量最大化可能不够全面，还需要考虑其他因素，如机组的磨损、运行稳定性等。因此，目标函数可能会引入一些约束条件来平衡不同方面的需求。

(二) 考虑水头因素的分配方法

水头是影响水轮机发电效率的重要因素。不同的水库水位和尾水位差会导致不同的水头。在进行发电负荷分配时，要根据水头的变化合理安排水轮机的负荷。例如，当水头较高时，水轮机在较高负荷下运行效率更高。以某大型水库为例，其在丰水期时，水库水位较高，水头较大。此时，可以优先安排发电效率高、适应高水头运行的水轮机承担较大的发电负荷。通过对水头和水轮机性能曲线的分析，建立水头与负荷分配的数学模型。假设某水轮机在不同水头下的最优负荷为 $L_i=g(H_i)$ ，根据水库当前的水头情况，按照这个关系分配负荷，可以提高整体发电效率。

(三) 基于流量的分配策略

流量也是水轮机发电的关键因素。水库的来水量是有限的，需要合理分配流量到不同的水轮机上。在枯水期，来水量减少，流量分配显得尤为重要。可以根据各水轮机的流量–功率特性曲线，按照一定的比例分配流量。例如，某水库有三台水轮机，其流量–功率特性曲

线分别为 $P_1=f_1(Q_1)$ 、 $P_2=f_2(Q_2)$ 、 $P_3=f_3(Q_3)$ 。在总来水量为 Q 的情况下，为了实现发电功率最大化，可以通过求解数学规划问题，找到满足约束条件（如总流量 $Q=Q_1+Q_2+Q_3$ ）下的最优流量分配方案 Q_1^* 、 Q_2^* 、 Q_3^* ，从而确定各水轮机的发电负荷。

(四) 机组状态与维护的考虑

水轮机的机组状态对发电负荷分配有重要影响。如果某台机组处于需要维护或者存在故障隐患的状态，那么在分配负荷时就需要减少其承担的负荷或者暂停使用。例如，某水轮机的转轮出现了一定程度的磨损，其发电效率下降并且运行稳定性变差。此时，在负荷分配时，应将原本分配给这台水轮机的部分负荷转移到其他状态良好的水轮机上。根据机组的维护计划，可以提前调整负荷分配策略。例如，某水轮机即将进行大修，在大修前的一段时间内，逐渐减少其负荷，以确保在大修前机组能够稳定运行，同时也不会对整体发电效益造成过大的影响。

(五) 动态调整策略

水库的来水情况、水位以及电力需求等都是动态变化的，因此发电负荷分配也需要动态调整。在实际运行中，需要实时监测水库的水位、来水量、电力市场的需求等信息。例如，当电力市场需求突然增加时，如果水库有足够的来水和水头，就可以适当增加水轮机的发电负荷。反之，如果电力市场需求减少，可以相应地降低负荷。以某地区的电力系统为例，在夏季用电高峰时段，电力需求大增。水库调度中心根据实时监测的数据，调整水轮机的发电负荷分配，让更多的水轮机满负荷运行或者提高部分水轮机的负荷，以满足电力需求。在洪水期，水库来水量迅速增加，为了避免弃水浪费，也需要及时调整负荷分配，提高水轮机的发电能力，充分利用水资源发电。

结束语

在对水库调度中的水轮机发电负荷优化分配方法进行多方面的研究、实践和评估后，可以得出结论：这一领域的探索与发展对水电工程的高效运行、资源的合理利用以及可持续发展具有深远意义。

参考文献

- [1] 邹佳杰, 周大庆, 郭俊勋, 等. 不同负荷工况水轮发电机组轴系振动特性研究[J]. 水电能源科学, 2023.
- [2] 杨勇, 杨冬. 大型水轮发电机组水轮机转轮修型处理方法对比分析[C]// 水电设备的研究与实践——第23次中国水电设备学术讨论会论文集. 2023.
- [3] 段伟. 基于大型水轮发电机组调速器的防溜负荷研究[J]. 电工技术, 2024 (21).