

# 灯泡贯流式水轮机组发电运行中的振动与噪声控制研究

周杨杰

广西长洲水电开发有限公司 广西梧州 543000

**摘要:** 灯泡贯流式水轮机组在水力发电领域中占据着重要的地位。随着水电事业的不断发展,对于灯泡贯流式水轮机组的性能要求也日益提高。其中,机组的振动与噪声问题成为了研究的重点之一。灯泡贯流式水轮机组振动与噪声控制研究具有重要的意义。通过深入研究机组运行负荷、水头变化等因素对振动和噪声的影响,并采取有效的控制措施,可以提高机组的运行稳定性和可靠性,延长机组的使用寿命,从而提高整个水电站的发电效率和经济效益。本文旨在概括性地阐述灯泡贯流式水轮机组振动与噪声控制相关研究的主要内容。

**关键词:** 灯泡贯流式;水轮机;发电运行;振动

## 引言

灯泡贯流式水轮机组是一种广泛应用于低水头水力发电工程中的重要设备。在全球范围内,随着对可再生能源需求的不断增长,低水头水力资源的开发利用日益受到重视。振动与噪声是灯泡贯流式水轮机组运行过程中不可忽视的问题。从振动方面来看,过度的振动可能导致机组部件的疲劳损坏,缩短机组的使用寿命。

### 一、机组运行负荷对振动的影响

#### (一) 负荷变化引起的振动特征

在灯泡贯流式水轮机组运行过程中,负荷变化会引起一系列的振动特征。当负荷突然增加时,机组的转轮受力情况会迅速改变。

负荷降低时同样会引起振动特征的改变。当负荷从较高水平降低时,水流在转轮内的流动状态会发生紊乱。例如,一些机组在负荷从80%降低到50%时,由于水流的惯性,在转轮内会形成局部的漩涡和回流。这些漩涡和回流会干扰转轮的正常旋转,使转轮产生不平衡力,进而引发振动。这种振动在方向上主要表现为垂直方向和轴向的振动,垂直方向振动幅值可能达到0.1-0.3mm,轴向振动幅值在0.05-0.2mm之间。而且这种振动往往伴随着一定的噪声增加,噪声分贝数可能会上升5-10dB。

#### (二) 不同负荷下的振动规律分析

在低负荷运行时,灯泡贯流式水轮机组的振动呈现出特定的规律。一般来说,低负荷(如10%-30%额定负荷)下,由于水流流量较小,转轮内的水流分布不均匀。

在中等负荷(30%-70%额定负荷)运行时,机组的振动情况有所不同。此时水流流量相对较为适中,转轮

内的水流状态相对稳定。例如,在50%额定负荷运行时,转轮各叶片受到的水流作用力较为均匀,振动主要来源于转轮与固定部件之间的间隙水流的影响。这种情况下,轴向振动相对较为明显,振动幅值在0.1-0.3mm之间,振动频率在10-30Hz之间,相对低负荷时更为稳定。

高负荷(70%-100%额定负荷)运行时,虽然水流量大且稳定,但机组也会出现振动现象。由于水流的高速冲击,转轮的受力情况较为复杂。如在90%额定负荷运行时,转轮除了受到水流的正向冲击力外,还会受到水流的脉动压力。这使得转轮产生高频振动,振动频率可达到30-50Hz,而振动幅值在0.05-0.2mm之间。

#### (三) 负荷调整对振动的抑制效果

合理的负荷调整能够对灯泡贯流式水轮机组的振动起到抑制作用。当机组出现较大振动时,如果是由于低负荷下水流不均匀引起的振动,可以尝试逐步增加负荷。

如果是高负荷下的振动问题,适当降低负荷可能会有抑制效果。比如,在某机组95%负荷运行时出现高频振动,将负荷降低到80%后,由于水流的脉动压力减小,转轮的受力情况得到改善。此时,高频振动的幅值从0.2mm左右降低到0.1mm以下,振动频率也从40-50Hz降低到30-40Hz之间。不过,负荷调整需要谨慎进行,因为过度调整负荷可能会影响发电效率,需要综合考虑振动抑制效果和发电效益之间的平衡关系。在负荷调整过程中,还需要密切监测机组的其他运行参数,如油温、瓦温等,以确保机组的安全稳定运行。

## 二、水头变化对机组振动的作用

### (一) 水头波动导致的振动现象

水头波动是灯泡贯流式水轮机组运行中常见的现象,

它对机组振动有着显著的影响。当水头波动时，水流的能量和流速会发生变化，进而引发机组的振动。

从原理上讲，水头波动会使进入水轮机转轮的水流状态不稳定。不稳定的水流会对转轮叶片产生不均匀的作用力。根据流体力学原理，作用力的不均匀会导致转轮产生偏心运动，从而引发整个机组的振动。这种振动现象在机组的轴承、机架等部位表现得较为明显。例如，在上述水电站的监测数据中显示，水头波动期间，机组轴承处的振动幅值从正常状态下的0.05毫米增加到了0.1毫米，并且振动频率从稳定时的50赫兹变为了50-60赫兹之间的波动频率。

水头波动还会影响水轮机内部的压力分布。当水头升高时，水轮机内部压力增大；当水头降低时，压力减小。这种压力的快速变化会引起水轮机部件的弹性变形，进一步加剧机组的振动。例如，水轮机的蜗壳在水头波动时，由于内外压力差的变化，会产生微小的形变，这种形变传递到整个机组结构上，成为机组振动的一个激励源。

### （二）高低水头下的振动特性对比

在高水头情况下，灯泡贯流式水轮机组的振动具有一些特定的特性。高水头意味着水流具有较高的能量和流速。此时，水流对转轮叶片的冲击力较大。根据相关研究，当水头达到某一较高值（如30米以上）时，转轮叶片所承受的冲击力比低水头（10米以下）时要高出约50%。这种较大的冲击力会使转轮产生较大的振动幅值。具体如下表1所示。

表1 高低水头下的振动特性对比

项目	高水头情况	低水头情况
水流能量	高	低
冲击力	大，比低水头高出约50%	小，但水流不均匀性明显
振动幅值	大	相对较小，0.05-0.08毫米波动
振动频率	高，80-100赫兹	低且不稳定，40-60赫兹频繁变化
振动模态	高频振动模态易被激发	-
对外部干扰敏感性	抵抗能力强	敏感，易受河道内漂浮物、泥沙含量变化影响

高水头下的振动频率也相对较高。由于水流的高速冲击和水轮机内部流态的变化，机组振动频率会向高频方向偏移。在高水头运行时，机组的主要振动频率可能在80-100赫兹之间，而低水头运行时，主要振动频率可

能集中在50-60赫兹。这是因为高水头下水流的惯性和能量传递速度更快，更容易激发水轮机结构的高频振动模态。

低水头情况下，机组振动的特性则有所不同。低水头时水流能量相对较低，对转轮叶片的冲击力较小，但水流的不均匀性可能更加明显。这种不均匀性会导致转轮受力的不平衡，虽然振动幅值相对较小，但振动的随机性可能更大。例如，在一些低水头电站的运行数据中显示，低水头运行时，机组振动幅值在0.05-0.08毫米之间波动，且振动频率不稳定，在40-60赫兹之间频繁变化。

低水头下，由于水流速度较慢，水轮机内部的流态对外部干扰更为敏感。例如，当河道内有漂浮物或者泥沙含量变化时，低水头机组的振动特性会发生明显变化，而高水头机组由于水流能量高，对这些外部干扰的抵抗能力相对较强。

### （三）水头优化设计降低振动策略

为了降低水头变化对机组振动的影响，优化水头设计是一种有效的策略。在水电站的规划设计阶段，需要精确计算水头的变化范围。通过对河流多年的水文数据进行分析，确定最小水头、最大水头以及平均水头等关键参数。例如，某新建水电站在规划时，对其所在河流30年的水文资料进行详细分析，得出最小水头为8米，最大水头为32米，平均水头为20米。根据这些数据，可以合理设计水轮机的选型和运行参数。

合理选择水轮机的额定水头是关键的一步。额定水头应根据水电站的实际水头情况进行优化。如果额定水头选择过高，在低水头运行时，机组效率会大幅下降，同时振动也会加剧；如果额定水头选择过低，在高水头运行时，机组可能会出现过载运行的风险，也会导致振动问题。例如，一个水头变化范围为10-25米的水电站，经过模拟计算和实际运行验证，将额定水头设定为18米时，机组在整个水头变化范围内的振动最小，且运行效率较高。

采用可调式导叶也是一种有效的水头优化设计策略。可调式导叶可以根据水头的变化自动调整开度，从而优化进入水轮机的水流状态。在高水头时，适当减小导叶开度，可以降低水流速度和冲击力，减少机组振动；在低水头时，增大导叶开度，提高水流的通过能力，保证水轮机的稳定运行。

在水电站的运行管理中，实时监测水头变化并进行相应的运行调整也是必要的。通过安装高精度的水头监

测设备，及时获取水头信息。当水头发生较大变化时，调整机组的运行工况，如调整负荷、转速等。例如，当水头突然升高时，可以适当降低机组负荷，以减少水头变化对机组振动的影响。

### 三、灯泡贯流式水轮机组发电运行中的振动与噪声控制措施分析

#### （一）机组结构优化

灯泡贯流式水轮机组的结构设计对其振动与噪声有着重要影响。在机组的转轮设计方面，采用先进的水力设计技术，优化转轮叶片的形状和数量。例如，通过计算流体动力学（CFD）模拟分析，确定最佳的叶片进口和出口安放角。一些成功的案例表明，合理的叶片安放角能够使水流在转轮内的流动更加平稳，减少因水流冲击和脱流引起的振动。某水电站在对灯泡贯流式水轮机组进行改造时，将转轮叶片的进口安放角调整了3度，结果在相同工况下，机组的振动幅值降低了约15%。

在轴承系统方面，采用高精度的轴承，并且合理设计轴承的支撑结构。对于灯泡贯流式水轮机组而言，其承受的径向和轴向力需要通过轴承有效地传递到基础上。优质的轴承能够减少摩擦，降低因摩擦力不均匀而产生的振动。优化轴承的润滑系统也至关重要。合适的润滑油黏度和稳定的供油压力，可以确保轴承在高速运转时处于良好的润滑状态。例如，某机组将原来的普通滑动轴承更换为新型的油膜轴承，并优化了润滑系统，使得轴承处的振动水平显著降低，噪声也减少了约10分贝。

#### （二）运行参数调整

运行参数的合理调整对控制灯泡贯流式水轮机组的振动和噪声具有积极意义。首先是转速的控制，转速与机组的振动频率密切相关。通过精确的调速系统，将机组转速稳定在设计值附近。当转速偏离设计值时，可能会引发共振现象。

其次是负荷的调节。在机组运行过程中，负荷的变化会引起水流状态的变化，从而影响机组的振动和噪声。应根据机组的性能曲线，合理分配负荷。当机组处于低负荷运行时，由于水流的不稳定，容易产生振动和噪声。此时，可以采用负荷优化分配策略，将负荷在多台机组之间进行合理分配，避免单台机组长时间处于低负荷运行状态。例如，一个拥有多台灯泡贯流式水轮机组的电站，通过智能控制系统实现了负荷的动态分配，当总负荷较低时，将负荷平均分配到各台机组上，使得每台机组的运行负荷率保持在30%以上，有效降低了因低负荷运行引起的振动和噪声。

#### （三）基础与支撑系统改进

灯泡贯流式水轮机组的基础和支撑系统为机组提供稳定的支撑，其性能直接关系到机组的振动情况。在基础设计方面，应确保基础具有足够的刚度和强度。根据机组的重量、运行时产生的动载荷等因素，精确计算基础的尺寸和配筋。

对于支撑系统，采用隔振元件能够有效隔离机组振动向基础和周围结构的传递。常见的隔振元件如橡胶隔振器、弹簧隔振器等。在选择隔振元件时，需要考虑其隔振频率、承载能力等参数。

#### （四）水流状态优化

水流状态对灯泡贯流式水轮机组的振动和噪声有着关键影响。在进水口方面，应保证进水口的水流平顺，避免出现漩涡和紊流。通过优化进水口的形状和尺寸，设置合理的拦污栅和导水结构，可以改善进水口的水流条件。

在尾水管方面，尾水管的形状和尺寸会影响水流的出流状态。合理的尾水管设计能够提高水流的能量转换效率，同时减少尾水管内的压力脉动。一些研究表明，采用新型的尾水管型线，如X型尾水管，能够有效降低尾水管内的压力脉动幅值。

### 结束语

随着水电行业的不断发展，灯泡贯流式水轮机组的应用越来越广泛。然而，振动和噪声问题一直是影响机组性能和寿命的关键因素。通过对振动和噪声的深入研究，可以提高机组的运行效率，减少能源损失。

### 参考文献

- [1] 江小金. 灯泡贯流式水轮机运行稳定性分析研究[J]. 电力设备管理, 2023(14): 292-294.
- [2] 蔡志斌, 吴观东, 吴衍勋, 等. 贯流式水轮机动静匹配作用下压力脉动特征分解与分析[J]. 大电机技术, 2024(4): 10-18.
- [3] 张士昂, 李昊, 张蓓, 等. 基于声固耦合算法的贯流式水轮机轴系振动特性研究[J]. 机械设计, 2023, 40(S01): 105-109.
- [4] 周军长, 李若松. 大型灯泡贯流式水轮发电机组全面监测系统的设计与研究[J]. 自动化应用, 2023, 64(5): 234-238.
- [5] 刘康荣, 孙小兵. 灯泡贯流式水轮发电机组振动原因分析及应对措施[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(10): 19-21.