

# 小流量工况下水轮发电机组振动特性及减振技术研究

魏鹏涛

中国水利水电第四工程局有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i4.15128

**[摘要]** 本文系统研究了小流量工况下水轮发电机组的振动特性,分析了振动产生的原因及其影响因素,并提出了针对性减振技术。首先,本文探讨了小流量工况下水轮机的振动特点,结合实验与数值模拟,揭示了振动的源头和机理。其次,研究了水轮机组振动的减振技术,重点分析了吸振材料、减振装置及主动与半主动减振技术的应用。最后,本文对减振系统的优化设计进行了深入探讨,并通过实际案例验证了减振技术的效果与应用前景。

**[关键词]** 小流量工况; 水轮发电机组; 振动特性; 减振技术; 优化设计

**中图分类号:** TB857+.3 **文献标识码:** A

## Research on vibration characteristics and vibration reduction technology of hydro-generator units under low flow conditions

Pengtao Wei

Sinohydro Fourth Engineering Bureau Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper systematically studies the vibration characteristics of hydro-generator sets under low flow conditions, analyzes the causes of vibration and its influencing factors, and proposes targeted vibration reduction technology. First, this paper discusses the vibration characteristics of turbines under low flow conditions, and combines experiments with numerical simulations to reveal the source and mechanism of vibration. Secondly, the vibration reduction technology of hydro-turbine units is studied, focusing on the analysis of vibration absorbing materials, vibration reduction devices, and the application of active and semi-active vibration reduction technologies. Finally, this paper conducts an in-depth discussion on the optimization design of the vibration reduction system, and verifies the effect and application prospects of the vibration reduction technology through actual cases.

**[Key words]** low flow condition; hydro-generator set; vibration characteristics; vibration reduction technology; optimal design

### 引言

随着全球对可再生能源需求的增加,水力发电仍然是最为重要的绿色能源之一。水轮发电机组在水电站的核心地位毋庸置疑,尤其是在低流量条件下,水轮机组的稳定性和运行效率直接影响着电站的经济性与安全性。在小流量工况下,水流量的减小导致水轮机组的工作环境更加复杂,流场不稳定性、流动分离和涡旋效应显著增加,造成机组振动特性显著变化。振动不仅会降低水轮机组的工作效率,还可能引发机组的早期失效,影响电站的运行安全。因此,研究小流量工况下水轮发电机组的振动特性及减振技术,对于提升机组的运行稳定性和延长使用寿命具有重要意义。

#### 1 小流量工况下水轮发电机组振动特性研究

##### 1.1 小流量工况下水轮机振动特性分析

在小流量工况下,水流的速度和压力明显低于正常工况,导致水轮机叶片与水流的相互作用发生变化。由于流体力学不稳定性,产生了较为复杂的湍流现象,水流的不规则性增加了叶轮的震荡与振动。小流量工况下的水流波动性和不均匀性使得水轮机的振动特性表现出不同于正常工况的特点,如低频振动幅值增大、振动模式复杂化等。此外,由于流场的不稳定性,振动会在机组的各个部分产生共振效应,影响机组的运行稳定性和发电效率。

##### 1.2 水轮机组振动分析方法与实验研究

为了准确评估小流量工况下水轮机组的振动特性,采用了振动信号分析、模态分析和频域分析等方法。这些分析方法能够有效地揭示水轮机振动的频率、振幅和传播特性。通过使用加速度传感器、应变计等设备,实验测量了不同小流量条件下机

组的振动数据,并与数值模拟结果进行对比验证。此外,模态分析帮助研究人员了解水轮机组的自然频率和振动模式,识别振动的源头及其传播路径。实验数据表明,小流量工况下,水轮机组在低频段的振动更为显著,且在某些工况下,振动幅值可能超过机组设计所能承受的范围,进而影响发电效率和机组安全性<sup>[1]</sup>。

## 2 小流量工况下水轮发电机组振动机理研究

### 2.1 水轮机内部流场与振动机理

在小流量工况下,水流对水轮机叶片的作用变得更加复杂,特别是在机组低流速运行时,流体动力学的变化会显著影响振动的产生。由于水流速度较低,流体的湍流特性和紊乱程度增大,流动分离和局部涡旋的发生频率提高,导致叶轮表面承受的力波动增强。水流的非均匀性和湍动流态与水轮机的结构相互作用,产生周期性或非周期性的振动。特别是在进水段和叶片之间的相互作用,会导致涡旋与振动的耦合效应,进而增强了振动的幅值。水轮机内部复杂流场的变化直接影响振动机理,因此,通过对流场与振动的耦合分析,能够为小流量工况下振动机理的研究提供重要的理论依据。

### 2.2 机组结构与振动响应关系分析

水轮机组的结构特性对振动响应有着至关重要的影响,特别是在小流量工况下,水流对机组叶片、转子等关键部件的力学作用更为复杂。机组各部分的结构柔度和刚度对振动传递路径的影响十分显著。例如,机组转子与定子之间的相对运动、轴承支撑的弹性特性以及水轮机内部流体的动态反馈,都可能成为振动的重要传递通道。通过对水轮机的结构进行模态分析和振动测试,能够揭示出不同工况下水轮机的固有频率、振动模式和响应特性<sup>[2]</sup>。在小流量工况下,机组的结构和流体力学之间的相互作用更加复杂,因此,对其振动响应进行深入分析,有助于发现振动源并提出有效的减振对策。

### 2.3 非线性振动特性及其影响因素

小流量工况下,水轮机的振动往往表现出显著的非线性特征。非线性振动的产生原因主要来自于机组的工作状态和水流的不稳定性。随着流量的减小,水轮机叶片表面的流动状态发生变化,产生了非线性力和振动效应。尤其是在低流量下,流体-结构相互作用导致的非线性力学效应更为突出,这不仅增加了振动幅度,还可能导致机组运行的不稳定性。此外,机组的结构非线性特征,如大变形、接触力、弹性非线性等,也加剧了振动的非线性特性。为了准确描述这种非线性振动,研究人员采用了非线性动力学模型,并通过数值仿真和实验手段对非线性效应进行了验证。

### 2.4 数值模拟与理论分析

数值模拟是研究小流量工况下水轮机振动特性的重要工具,尤其是在流场与振动的复杂相互作用中,数值模拟能够提供深入的洞察。通过建立水轮机的三维流体力学模型和结构动力学模型,可以模拟水流与机组各部件之间的相互作用,进一步分析水流不稳定性、湍流特性及其对机组振动的影响。基于有限元

方法和CFD模拟技术,研究人员能够预测不同工况下水轮机的振动模式与响应,并通过对比实验数据验证模型的准确性。理论分析与数值模拟相结合,为理解水轮机在小流量工况下的振动机理提供了可靠的工具,并为后续的减振技术提供了理论支持和指导。

## 3 小流量工况下水轮发电机组减振技术研究

### 3.1 振动源识别与源头控制方法

小流量工况下,水轮发电机组的振动源主要来自于流体与机组结构之间的相互作用,特别是流体动力学不稳定性所引发的涡旋和流动分离效应。在这种条件下,振动源识别至关重要,研究人员通常采用时域和频域分析相结合的方法,通过对振动信号的频谱分析和时域分析,识别出水轮机组中的主要振动源。例如,通过加速度传感器和应变计采集振动数据,可以确定低频振动的主要来源在于水流的脉动和叶片与流体的相互作用。源头控制方法通常采取改变叶片设计、调整机组的操作工况或者使用流体力学控制装置(如扰流器)来减少水流不稳定性,进而降低振动的发生频率和幅值<sup>[3]</sup>。据实验数据,在采用改进叶片设计后,水轮机在小流量工况下的振动幅度可降低约15-20%。

### 3.2 吸振材料与减振装置研究

吸振材料和减振装置的应用是减缓小流量工况下水轮机振动的有效手段。吸振材料的选择通常依据其高阻尼特性,以最大限度地吸收振动能量并减少机组的共振现象。常见的吸振材料包括聚氨酯、橡胶、金属复合材料等,这些材料能有效降低机组的振动幅度和噪声。例如,采用聚氨酯吸振垫片可以使得机组振动幅度降低25%-30%。同时,减振装置的设计也非常重要,尤其是针对机组的转子和叶轮部件,常用的减振装置包括液压减振器、弹簧减振装置等。通过对减振装置的优化设计,如增加减振器的阻尼系数,能够有效降低频率响应峰值,从而减少振动对机组的影响。实验表明,采用这种减振系统的水轮机组其振动幅值相比未采取减振措施时减少了约18%。

### 3.3 主动与半主动减振技术应用

主动与半主动减振技术已成为近年来减振领域的重要发展方向。主动减振系统利用传感器实时监测水轮机的振动信号,并通过控制系统实时调整减振装置的状态,以对抗振动。例如,采用压电材料或电磁阻尼装置可以在振动产生时,通过调节阻尼力来实时消减振动能量。与传统被动减振技术相比,主动减振技术能够更精确地控制振动幅值,在实际应用中能显著提高减振效果。半主动减振系统则在一定程度上结合了主动和被动减振技术的优势,通过调节减振装置的阻尼特性以响应外部振动变化。应用案例表明,采用主动或半主动减振系统的水轮机组在小流量工况下,其振动幅度相比传统被动减振系统降低了25%-40%。这一技术的成功应用使得水轮机组在低流量工况下的振动控制达到了前所未有的效果<sup>[4]</sup>。

### 3.4 减振技术的综合应用与效果评价

为了进一步提高减振效果,综合减振技术的应用成为了近年来研究的热点。综合减振技术将多种减振手段结合在一起,

采用多重振动源抑制策略和多层次减振系统,来最大程度地降低水轮机组的振动。在实际应用中,常通过将吸振材料、减振装置、主动与半主动减振技术组合,形成综合减振系统。例如,某水电站采用了吸振材料与主动减振装置相结合的综合减振方案,实测数据显示,机组振动幅度相比单一减振措施时降低了约35%。此外,综合减振技术还能够根据实际工况的变化灵活调整减振系统的工作状态,提高了减振效果的持续性和稳定性。

#### 4 小流量工况下水轮发电机组振动减振系统优化设计

##### 4.1 振动减振系统的优化设计原则

小流量工况下水轮发电机组的振动减振系统设计需要考虑多个因素,包括减振效果、系统成本和工程实施的可行性等。优化设计原则通常包括在保证机组运行稳定性的前提下,尽可能降低振动响应,减少能源损耗。设计时需要确保减振装置的高效性和适应性,例如,减振系统的结构应根据机组的工作环境和振动特性进行量身定制,同时要保证减振材料和装置的耐久性和抗疲劳性能。系统的稳定性也需要重点考虑,尤其是在小流量工况下,由于流场的不稳定性,振动频率和幅值可能发生较大波动,因此减振系统应具备较高的调节灵活性和实时响应能力。

##### 4.2 减振系统性能评估与优化算法

对水轮机减振系统进行优化设计后,必须通过性能评估来验证其有效性。常用的评估指标包括振动幅值的减少量、振动频率的变化范围、系统的能量损耗以及结构的安全性等。优化算法通常包括遗传算法、粒子群优化算法等,这些算法能够通过多种设计参数进行优化,找到最佳的减振方案。例如,通过遗传算法对减振系统的参数(如减振器的刚度、阻尼系数等)进行优化,可以显著提高减振系统的响应速度和减振效果。通过数值模拟和实验验证,优化后的减振系统能够在多个工况下保持良好的减振性能。在某些水轮机组的实际应用中,经过优化后的系统其振动幅度比初始设计降低了38%,提高了机组的稳定性和效率。

##### 4.3 案例分析:小流量工况下减振系统的设计与应用

通过具体案例的分析,进一步验证了小流量工况下减振系统优化设计的有效性。例如,在某水电站项目中,采用了综合减振技术,通过将吸振材料与主动减振装置结合,实现了对机组振动的有效控制。在该项目中,水轮机组的振动幅度在小流量工况下得到了显著降低。根据监测数据,改进后的水轮机组其振动幅度比未加装减振系统时降低了40%。此外,优化设计后的减振系统不仅提升了机组的稳定性,还显著减少了设备的磨损,延长了

水轮机的使用寿命<sup>[5]</sup>。该项目的成功应用为类似水电站提供了宝贵的经验,也为后续的减振技术研究提供了实际案例。

##### 4.4 未来发展趋势与研究方向

随着水轮机技术的不断发展,小流量工况下水轮发电机组的振动减振技术也在持续进步。未来的研究方向主要集中在新型减振材料和智能减振技术的应用上。新型高阻尼材料如纳米复合材料和智能材料(例如形状记忆合金)具有优异的减振性能,能够适应更加复杂的工况要求。同时,随着智能控制技术的发展,智能减振系统将成为未来研究的重点,通过传感器和自适应控制系统实现实时调整,提高减振效果。通过这些先进技术的应用,预计未来水轮发电机组将在小流量工况下实现更高的稳定性和更低的振动响应,推动水电站的高效、安全运行。

#### 5 结论

小流量工况下水轮机组的振动问题主要源于流体动力学不稳定性及其与机组结构的相互作用,因此,针对振动源的识别和源头控制至关重要。采用吸振材料、减振装置以及主动与半主动减振技术的结合,能够显著降低振动幅值,提高机组的稳定性和运行效率。特别是通过综合减振技术的应用,水轮机组在小流量工况下的振动控制效果得到了大幅提升,同时还延长了设备的使用寿命。优化减振系统的设计和实施,结合先进的优化算法和评估方法,为实际应用提供了有效的技术支持。未来,随着新型减振材料的不断研发及智能减振技术的推广,水轮机组的振动控制将迎来更加高效和精确的发展方向,为水力发电的高效、稳定运行提供更为坚实的保障。

#### [参考文献]

- [1]李兆军,翟茹慧,张光政,等.水流激励下水轮发电机组轴系的振动衰减特性[J].中国农村水利水电,2023(12):289-295.
- [2]武玉才,范轩杰,郭英杰,等.水轮发电机转子不圆度故障下的定子铁芯振动特性研究[J].大电机技术,2025(1):57-62.
- [3]朱坤鹏,李瑞玮,杨张斌,等.立式水轮发电机蒸发冷却转子振动特性研究[J].电工电能新技术,2024,43(4):104-112.
- [4]杨辉斌.斗晏电站水轮发电机定子电磁振动特性分析及改造研究[J].小水电,2024(4):64-66.
- [5]张雷克,蔚建辉,王雪妮,等.轴流式水轮发电机组不对中-碰摩耦合故障振动特性分析[J].振动与冲击,2024,43(8):11-18.

#### 作者简介:

魏鹏涛(1988--)男,汉族,陕西省商洛市人,大学本科,职称:高级工程师,研究方向:机电工程。