

水力机械空化特性及控制策略研究

龚高石

天津市国威给排水设备制造有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i2.12426

[摘要] 空化是流体动力学中的一种复杂现象,不仅会导致设备振动、噪声增加,还可能引发严重的空蚀破坏,严重影响水力机械的安全稳定运行。通过理论分析、实验测量和数值计算相结合的方法,系统研究水力机械空化的初生、发展及动力特性,提出针对性的空化控制策略,不仅能丰富水力机械空化理论,还为工程实践中空化问题的预测与控制提供科学依据和技术支撑,对提高水力机械运行效率、延长设备使用寿命具有重要意义。本文就从水力机械空化基础理论进行分析,结合水力机械空化流动实验技术以及水力机械空化流动数值计算方法,探究控制策略。

[关键词] 水力机械; 空化特性; 控制策略

中图分类号: S941.61 **文献标识码:** A

Research on cavitation characteristics and control strategies of hydraulic machinery

Gaoshi Gong

Tianjin Guowei Water Supply and Drainage Equipment Manufacturing Co., Ltd.

[Abstract] Cavitation is a complex phenomenon in fluid dynamics, which not only leads to equipment vibration and increased noise, but also may cause serious cavitation damage, seriously affecting the safe and stable operation of hydraulic machinery. By combining theoretical analysis, experimental measurement, and numerical calculation, this study systematically investigates the inception, development, and dynamic characteristics of cavitation in hydraulic machinery, and proposes targeted cavitation control strategies. This not only enriches the theory of cavitation in hydraulic machinery, but also provides scientific basis and technical support for the prediction and control of cavitation problems in engineering practice, which is of great significance for improving the operating efficiency of hydraulic machinery and extending the service life of equipment. This article analyzes the basic theory of cavitation in hydraulic machinery, combines experimental techniques for cavitation flow in hydraulic machinery and numerical calculation methods for cavitation flow in hydraulic machinery, and explores control strategies.

[Key words] hydraulic machinery; Cavitation characteristics; Control Strategy

引言

水力机械是国民经济各部门不可或缺的能量转换装置,发挥着至关重要的作用。从电力生产到农业灌溉,从城市供水到船舶推进,水力机械的应用无处不在,其性能的稳定与高效直接关系到国家能源安全、农业生产效率、城市生活便利以及交通运输的畅通无阻。然而,在实际运行过程中,空化现象成为制约水力机械安全稳定运行的一大难题。空化不仅会导致机械部件的严重侵蚀,缩短设备使用寿命,还可能引发强烈的振动和噪声,影响设备的整体性能和运行效率。因此,深入研究水力机械空化特性及控制策略,对于揭示空化机理、预防空蚀破坏、优化设备设计、提高设备性能和延长使用寿命具有重大的理论意义和工程应用价值,是推动水力机械技术进步和产业升级的关键所在。

1 水力机械空化基础理论

水力机械空化基础理论是理解并应对水力机械运行中空化现象的关键所在。空化现象,是指在水力机械中,当流体局部压力降至某一临界值以下时,流体中的蒸汽泡或气体泡迅速形成、发展与溃灭的过程。这一现象广泛存在于各类水力机械中,其类型多样,主要包括叶型空化、偏离最优工况后产生的空化等。叶型空化通常发生在叶片表面附近,由于流体动力效应导致局部压力降低,进而引发空化。偏离最优工况后产生的空化,是由于水力机械运行在非设计工况下,流体流动状态恶化,局部压力进一步降低,从而促进空化的发生与发展。

空化产生的物理过程复杂,涉及流体的热力学、动力学以及多相流等多个领域。其影响因素众多,包括流体的物理性质、水

力机械的结构参数、运行工况以及流体动力特性等。空化的发展不仅与流体动力紧密相关,还会直接影响到水力机械的能量特性。随着空化的加剧,流体流动状态进一步恶化,水力机械的能量损失增加,效率降低。

空化引起的流体动力效应,如空蚀、振动和噪声等,不仅会导致水力机械部件的加速磨损,缩短设备使用寿命,还可能引发强烈的振动和噪声污染,影响设备的稳定运行和周围环境。因此,深入研究水力机械空化基础理论,揭示空化机理,对于预防空蚀破坏、优化设备设计、提高设备性能和延长使用寿命具有重要意义。

2 水力机械空化流动实验技术

水力机械空化流动实验技术能提供直观、精确的数据支持,帮助我们深入理解空化流动的特性和规律。首先,非正常空化多场实验测量平台是整个实验系统的核心。该平台集成先进的传感器技术和数据采集系统,能够实时监测水力机械内部流体的压力、速度、温度等多项信息。通过高精度的压力传感器和加速度传感器,可以捕捉到空化发生时的压力脉动和振动噪声等关键参量,为空化流动的定量分析提供可靠数据。同时,该平台还配备高速摄像机等可视化设备,能够直观地观察到空化流动形态的变化,为空化流动的定性分析提供有力支持。除了非正常空化多场实验测量平台外,数据采集与处理系统也是实验不可或缺的一部分。该系统能够实时采集实验过程中的各类数据,并进行高效、准确的分析和处理。通过专业的数据处理软件,我们可以对采集到的数据进行滤波、降噪等预处理操作,从而提高数据的准确性和可靠性。

在实验方法与步骤方面,需要根据实验目的和条件,合理设计实验方案。包括确定实验工况、选择适当的测量参数和仪器、以及制定详细的实验步骤等。在实验过程中,严格遵守操作规程,确保实验的安全性和准确性。同时,需要密切关注实验现象的变化,及时记录关键数据,便于后续的分析 and 处理。

通过展示空化流动形态、压力脉动、振动噪声等参量的测量结果,可以直观地了解到空化流动的特性。通过对实验结果进行定量和定性分析,可以揭示空化流动的规律和机理。例如,通过分析压力脉动的频谱特性,来判断空化发生的类型和强度;通过对比不同工况下的振动噪声数据,评估空化对水力机械性能和安全稳定运行的影响。

3 水力机械空化流动数值计算方法

水力机械空化流动的数值计算方法,能够在复杂的流体动力学环境中模拟和分析空化现象,提供深入的见解。在数值计算中,选择合适的模型是至关重要的。针对水力机械空化流动,通常采用基于密度的DCM和RCD湍流模型等数值计算模型。

DCM是一种有效的处理空化现象的数值方法。该模型通过引入一个额外的方程来描述流体密度的变化,从而能够更准确地模拟空化过程中的气液两相流动。DCM模型的基本原理在于,当流体局部压力降至饱和蒸汽压以下时,流体中的液体部分开始汽化,形成蒸汽泡。这些蒸汽泡在流体中随流动而发展,进而影

响整个流场的特性。DCM模型能够捕捉到这种密度变化,从而更真实地反映空化流动的实际情况。其适用范围广泛,特别适用于处理具有复杂几何形状和流动条件的水力机械空化问题。

RCD湍流模型是另一种常用的数值计算模型,专门用于处理湍流流动中的空化现象。RCD模型通过引入一个湍流耗散项来修正湍流方程,从而能够更准确地模拟空化过程中的湍流流动。该模型的基本原理在于,空化发生时,流体中的湍流强度会发生变化,进而影响流场的稳定性和能量转换效率。RCD模型能够捕捉到这种湍流强度的变化,从而更准确地预测空化对水力机械性能的影响。其特别适用于处理高雷诺数条件下的空化流动问题,如高速水力发电装置和泵类设备等。

在数值计算过程中,遵循一系列详细的方法和步骤。首先,需要对计算区域进行网格划分,确保网格的质量和分辨率满足计算要求。网格划分的好坏直接影响到计算结果的准确性和计算效率。其次,需要设置合理的边界条件,以模拟真实的流体动力学环境。边界条件的设置需要根据实验数据和实际情况进行调整和优化。最后,我们需要选择合适的求解算法进行数值计算。求解算法的选择需要考虑到问题的复杂性和计算资源的限制。数值计算过程中的关键技术和难点在于如何处理空化过程中的气液两相流动和湍流流动。采用先进的数值方法和算法,如多相流模型、大涡模拟等,以更准确地模拟空化现象。同时,需要对计算结果进行验证和分析,以确保数值计算方法的准确性和可靠性。这通常包括与实验结果进行对比、分析计算结果的稳定性和收敛性等。通过展示空化流动的速度场、压力场、涡量场等计算结果,可以更深入地了解空化流动的特性和规律,为水力机械的设计和 optimization 提供有力的支持。

4 水力机械空化特性研究

水力机械空化特性研究是深入理解和有效应对水力机械中空化现象的核心。空化初生及发展机理的研究,对于揭示空化现象的起源和演变过程具有重要意义。通过实验观测和数值计算相结合的方法,可以详细研究空化初生阶段的演变过程和发展机理。在这一阶段,空化的形成受到多种因素的影响,如流体压力、温度、流速以及水力机械的结构和材料等。通过系统分析这些因素,可以揭示空化初生阶段的规律和特性,为后续的空化控制提供理论基础。

空化流动特性的研究聚焦于空化过程中流场结构的变化和特性。当空化发生时,流体中的蒸汽泡或气体泡会随流动而发展,形成复杂的流场结构。这些结构的变化不仅影响流体的动力学特性,还直接关系到水力机械的性能和稳定性。因此,需要通过先进的测量技术和数值计算方法,详细研究空化流动过程中流场结构的变化,揭示其内在的物理机制和规律。同时,分析空化流动对水力机械性能和稳定性的影响,评估空化现象对设备效率和安全运行的潜在威胁。

空化动力特性的研究更侧重于空化引起的流体动力效应,如空蚀强度、振动频率和噪声水平等。空化过程中,蒸汽泡或气体泡的溃灭会释放巨大的能量,导致流体对水力机械部件的强

烈冲击和侵蚀。空蚀的强度和分布不仅会影响设备的寿命和性能,还可能引发严重的安全事故。此外,空化还会引起水力机械的振动和噪声,对设备的稳定运行和周围环境造成干扰。因此,需要深入探讨空化动力特性与空化流动特性的关系,揭示空化过程中流体动力效应的产生机制和影响因素。

在具体的研究过程中,需要综合运用实验观测、数值计算和理论分析等多种方法。通过实验观测,获取空化现象的直接证据和关键数据;通过数值计算,可以模拟和预测空化现象的发展过程和影响;通过理论分析,可以揭示空化现象的内在机制和规律。通过深入研究空化初生及发展机理、空化流动特性和空化动力特性等方面的问题,可以为水力机械的设计、优化和运行提供科学依据和技术支持,推动水力机械技术的持续进步和发展。

5 水力机械空化抑制方法与控制策略

5.1 空化抑制方法

为了有效应对空化现象带来的挑战,科研人员和实践工程师们已经开发出多种空化抑制方法,降低或消除空化对水力机械性能和稳定性的不利影响。首先,改变几何参数。通过调整水力机械叶片的形状、角度和厚度等几何参数,可以改变流体在叶片表面的流动状态,从而降低局部压力降和空化发生的可能性。这种方法具有实施简便、成本相对较低的优点,尤其适用于已有设备的改造和优化。然而,其效果受限于设备的原始设计和结构限制,且可能需要经过多次试验和调整才能达到最佳效果。其次,优化流动设计。通过对水力机械内部的流动进行精细设计和优化,减少流体中的涡旋、回流和分离等现象,从而降低空化的发生风险。这通常涉及对流体动力学方程的深入理解和计算流体动力学技术的运用。优化流动设计可以提高水力机械的效率、稳定性和抗空化性能,但实施成本较高,且需要专业的设计团队和先进的计算资源支持。此外,还有一些其他空化抑制方法,如采用特殊材料、改变运行工况等。这些方法各有优缺点,适用范围也各不相同。例如,特殊材料可以提高水力机械部件的抗空蚀性能,但成本较高;改变运行工况虽然可以降低空化风险,但可能影响设备的整体效率和性能。

5.2 空化控制策略

水力机械空化控制策略的制定,需紧密结合空化现象的特性和实际的控制需求。空化是水力机械运行中常见的物理现象,其发生和发展受到多种因素的影响,包括流体压力、流速、温度

以及水力机械的结构设计等。因此,针对空化现象的控制策略,必须综合考虑这些因素,实现有效的空化抑制。空化控制通过改变流体动力学条件或优化水力机械设计,降低空化发生的可能性或减轻其影响。包括调整流体压力分布,减少局部低压区的形成;优化水力机械叶片的形状和角度,从而改善流体流动状态,减少涡旋和分离现象;以及采用抗空蚀材料,提高水力机械部件的耐久性。

在实施空化控制策略时,首先,对水力机械进行全面的空化特性分析,明确空化发生的位置、程度和影响因素。通过实验观测、数值模拟等手段,获取空化现象的详细数据。其次,根据分析结果,制定针对性的空化控制方案。包括调整运行参数、优化设计、采用新材料等多种措施。接着,对控制方案进行数值模拟和实验验证,以评估其可行性和效果。最后,将经过验证的控制方案应用于实际水力机械中,并进行持续监测和调整,以确保空化得到有效控制

6 结语

综上所述,水力机械空化特性及控制策略的研究,对于提升水力机械的性能和稳定性具有重要意义。通过对空化初生、发展及动力特性的深入探究,能更好地理解空化现象的内在机制,为制定有效的控制策略提供了理论基础。同时,结合实际应用需求,提出的空化控制策略不仅有助于降低空化对水力机械的损害,还能提高设备的运行效率和可靠性。

[参考文献]

- [1]赵越,曹卫华,滕海波,等.水力机械空化实时检测技术研究[J].大电机技术,2024(03):69-76.
- [2]徐洪泉,朱雷,何磊,等.基于高速摄影的水力机械空腔膨胀收缩特性试验研究[J].水力发电,2023,49(8):94-98+113.
- [3]李晓超,谢威威,张浩,等.水力机械磨蚀研究综述[J].人民珠江,2021,42(11):99-105+111.
- [4]尹庭赞.水力机械云空化流动机理研究[D].江苏大学,2021.
- [5]高旭娜,袁建刚,蒋斐,等.水力机械空化初生的分子动力学模拟[J].热能动力工程,2019,34(08):43-49.

作者简介:

莫高石(1970--),男,汉族,湖南人,本科,副高级工程师,研究方向:阀门、倒流防止器等给排水设备开发。