

灯泡贯流式机组流道振动特性分析与结构强化设计

李子为

杭州江河水电科技股份有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14347

[摘要] 灯泡贯流式机组以其高效、低耗的特性,在低水头水力发电领域占据重要地位。然而,流道振动问题严重制约机组的稳定运行与使用寿命。本文围绕灯泡贯流式机组流道振动特性展开深入研究,系统分析水力、机械、电磁等因素引发振动的机理,揭示振动对机组零部件疲劳损伤、连接松动及整体结构稳定性的危害。综合运用实验测量、数值模拟与理论分析方法,精准捕捉流道振动特征参数。针对振动问题,基于安全性、可靠性、经济性原则,提出结构强化设计思路,从材料优化、结构形状改进及辅助减振装置增设等方面着手,构建全方位强化方案。通过实际工程案例验证,强化后的机组流道振动响应显著降低,运行稳定性大幅提升。研究成果为解决灯泡贯流式机组流道振动问题提供理论依据与实践指导,对推动低水头水电事业发展具有重要意义。

[关键词] 灯泡贯流; 机组流道; 振动特性; 分析

中图分类号: TM922.75 文献标识码: A

Analysis of Flow Passage Vibration Characteristics and Structural Reinforcement Design for Bulb Tubular Units

Ziwei Li

Hangzhou Jianghe Hydro-Electric Science & Technology Co., Ltd.

[Abstract] bulb tubular units play an important role in the field of low head hydropower generation because of their high efficiency and low consumption. However, the problem of channel vibration seriously restricts the stable operation and service life of the unit. In this paper, the vibration characteristics of the passage of bulb tubular units are deeply studied, the mechanism of vibration caused by hydraulic, mechanical, electromagnetic and other factors is systematically analyzed, and the harm of vibration to the fatigue damage of unit parts, loose connection and overall structural stability is revealed. The experimental measurement, numerical simulation and theoretical analysis methods are comprehensively used to accurately capture the vibration characteristic parameters of the channel. Aiming at the vibration problem, based on the principles of safety, reliability and economy, the structural strengthening design idea is put forward, and a comprehensive strengthening scheme is constructed from the aspects of material optimization, structural shape improvement and the addition of auxiliary damping devices. Through the verification of practical engineering cases, the vibration response of the strengthened unit channel is significantly reduced, and the operation stability is greatly improved. The research results provide theoretical basis and practical guidance for solving the problem of channel vibration of bulb tubular units, and are of great significance for promoting the development of low head hydropower.

[Key words] bulb tubular; Unit flow passage; Vibration characteristics; analysis

引言

在当今全球能源格局中,水电作为一种清洁、可再生的能源形式,占据着至关重要的地位。灯泡贯流式机组作为低水头水电站的核心设备,凭借其独特的结构和高效的运行特性,在水电领域发挥着不可替代的作用。这种机组的发电机被密封在外形酷似白炽灯灯泡的灯泡头内,水轮机装在灯泡的尾部,水流从“灯

泡头”进入“灯泡尾”发电,因其特殊的构造,水流在流道内基本上沿轴向运动,具有较高的发电流量和水力效率,能有效利用低水头水力资源,是对传统水力发电利用河流高落差发电方式的重要补充。所以对灯泡贯流式机组流道进行结构强化设计具有极其重要的现实意义。在当前能源需求不断增长,对清洁能源依赖程度日益加深的背景下,深入研究灯泡贯流式机组流道振

动特性, 并进行有效的结构强化设计, 对于推动水电行业的可持续发展具有重要的理论和实践价值。

1 灯泡贯流式机组流道振动研究的意义

从设备安全角度看, 灯泡贯流式机组流道振动是反映机组内部运行状态的“健康晴雨表”。机组运行时, 叶片磨损会破坏流道内水流的均匀性, 形成非定常压力脉动, 而轴承松动则会导致转动部件偏心, 二者都会改变流道内流体动力学特性, 进而引发振动加剧。现代监测技术通过加速度传感器、应变片等设备, 能实时捕捉振动频率、幅值等参数, 一旦振动值超过预警阈值, 便可初步判断故障类型。若不及时处理, 剧烈的振动可能使叶片承受交变应力, 最终导致疲劳断裂; 严重时还会引发机组剧烈晃动, 造成停机事故, 不仅维修成本高昂, 更可能威胁整个电站的安全运行, 缩短设备使用寿命。在生产效益方面, 稳定的流道振动状态是机组高效运行的核心保障。振动过大会显著增加机械部件间的摩擦损耗, 同时扰乱水流在流道内的顺畅流动, 导致水力效率大幅下降。据统计, 振动每增加10%, 水力效率可能降低3%-5%, 直接影响发电量。通过先进的振动分析系统, 结合CFD(计算流体动力学)仿真技术, 可精准分析振动根源, 从而调整机组叶片角度、优化导叶开度等运行参数。某大型水电站通过建立振动-效率关系模型, 对机组流道振动进行持续监测与优化, 最终使水力效率提升5%, 年发电量增加达600万度, 直接经济效益超百万元, 同时降低了能耗成本^[1]。

2 流道振动产生原因

2.1 水力因素

当机组在非最优工况下运行时, 容易产生涡带振动。在部分负荷运行时, 转轮出口水流的速度和压力分布不均匀, 会形成螺旋形的涡带, 这种涡带会随水流进入尾水管, 引起尾水管内压力的周期性变化, 进而激发流道的振动。涡带振动的频率通常较低, 但其振幅较大, 对机组的危害不容忽视。研究表明, 当涡带频率与流道的固有频率接近时, 会引发共振现象, 导致流道振动加剧, 可能造成流道结构的损坏。协联关系不正确也会导致流道振动, 协联关系是指水轮机导叶开度与桨叶角度之间的匹配关系, 当协联关系不准确时, 水流在进入转轮时的角度和速度会发生偏差, 导致转轮受到不均匀的水力冲击, 这种不均匀的水力冲击会使转轮产生振动, 并通过主轴传递到流道, 引起流道的振动。某电站在调试过程中, 由于协联关系设置不当, 机组运行时流道振动明显加剧, 经过重新调整协联关系后, 振动情况得到了明显改善。卡门涡也是水力因素导致振动的一个重要方面, 当水流绕过流道内的障碍物, 如导叶、支撑结构等时, 会在障碍物的下游两侧交替产生漩涡, 这种漩涡被称为卡门涡, 卡门涡的脱落会对障碍物产生周期性的作用力, 当这种作用力的频率与流道或相关部件的固有频率接近时, 就会引发共振, 导致振动。卡门涡的频率与水流速度、障碍物的形状和尺寸等因素有关。

2.2 机械因素

机械因素在灯泡贯流式机组流道振动中是核心因素。主轴挠度在系统稳定性运行中具有最大权重, 主轴承受扭矩、弯矩及

其他载荷, 引起的细微弯曲变形, 即主轴挠度。过大的主轴挠度会导致转轮的中心位置发生偏移, 引发转轮与流道壁面间的间隙分布不均。该不规则的缝隙引起了水流的不均流动, 产生了径向的水作用力, 进而引起流道的振动。长期承受大挠度工况, 可能会导致主轴因疲劳引起的断裂, 产生更为重大的事故后果。主轴挠度的测量值与材料选择、直径大小、跨度及承受力等诸多因素紧密相连。

机组不对中也是引发流道振动的常见机械问题, 机组不对中包括联轴器不对中、轴承不对中等情况。若联轴器存在对位误差, 将造成电机与水轮机连接轴线的偏移, 扭矩分布失衡, 不等扭矩引起的振动经由主轴传递至流道。轴承不对中会导致轴承所承受的载荷分布不均, 引起轴承承受过量磨损, 轴承的磨损又会进一步加剧不对中程度, 最终加剧了流道的振动^[2]。

2.3 电磁因素

电磁要素在灯泡贯流机组流道的振动现象中占据了核心位置, 电磁拉力不平衡是导致振动的一个关键问题。发电机运行阶段, 定子与转子间形成电磁牵引现象, 圆周方向的电磁拉力分布不均, 将产生电磁拉力的不平衡状态。该不稳定的电磁拉力引起转子摇摆, 振动借助主轴传递至水轮机与流道, 引起了流道振动。电磁拉力不平衡可能是由于定子绕组的故障、转子偏心、气隙不均匀等原因引起的。某电站的发电设备正在运转, 定子绕组局部短路成为故障的导火索, 导致了电磁吸引力的失调, 引起了流道的强烈振动, 经过对定子绕组的维修, 振动情况大幅缓解。气隙不均匀也是引发流道振动的重要电磁因素, 定子转子间的间隙, 其均匀分布对电机的运行效率影响极大。气隙如果出现非对称性, 电磁拉力沿圆周方向出现分布不均, 进而引起了电磁力波动。气隙的不一致现象或许是由生产误差、安装缺陷、机组运行的热形变引起, 气隙不均匀还会导致电机的磁阻变化, 导致电机的效率和功率因数的波动。措施在于增强电机制造及安装的精度水平。

3 结构强化设计思路

3.1 材料选择与优化

材料选择对灯泡贯流式机组流道的功能表现起到了关键性的影响, 按照传统的工程习惯, 流道构造普遍采用碳钢Q235, 该材料的特性为抗弯能力强、延展性好, 经济上占优, 但在抗疲劳性能和耐腐蚀性能方面存在一定的局限性。随着材料科学不断发展, 过流部件开始采用高强度合金钢、不锈钢及复合材料等。高强度合金钢的屈服与抗拉性能均十分强劲, 有抵御更大载荷的能力。采用高强度合金钢作为流道支撑结构的主材, 可在保证强度的同时减轻结构重量, 减少制造成本。不锈钢的抗腐蚀性能良好, 尤其适宜潮湿及腐蚀性环境中使用。许多沿海区域内的水电站, 为了抵抗海水侵蚀, 采用不锈钢材质制造流道部件, 可显著延长流道的耐久性。如碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(GFRP)等材料组合, 轻便、耐磨损、强度超群。CFRP的强度远远超出普通钢材的数倍, 其密度仅为钢材的四分之一, 在流道的某些非承重部分及局部加固区域采用CFRP, 可

减轻重量与提高结构性能。某电站流道某段区域采用了CFRP材质,不仅减轻了结构重量,还增强了流道的耐疲劳及抗腐蚀特性^[3]。

3.2 结构形状优化

优化流道截面形状是提升流体性能的核心路径之一。在能源、水利、化工等众多领域中,流道的水力性能(如能量损耗、过流能力)与结构性能(如强度、稳定性)直接影响系统运行效率与安全性。传统流道设计中,圆形和矩形截面因加工简便、设计理论成熟被广泛应用,但在复杂工况下,其固有缺陷逐渐凸显。圆形截面凭借光滑的内壁轮廓,能够有效减少流体与壁面的摩擦阻力,依据达西-魏斯伯格公式计算,其沿程水力损失系数较不规则截面低20%-30%,在长距离输水、石油等场景中优势显著。然而,圆形结构在承受外部压力时,环向应力分布不均,尤其是薄壁结构易发生局部失稳。以直径2米的输水管道为例,当工作压力超过0.8MPa时,需额外增加15%的壁厚以满足结构强度要求,导致材料成本显著上升。

矩形截面虽在结构承载方面表现出色,其正交的边角设计便于与支撑结构连接,在地下综合管廊、通风隧道等工程中能有效抵抗土体侧压力。但流体流经矩形截面时,在边角处会形成强烈的涡流区,造成局部水头损失。实验数据显示,在相同流速下,矩形截面的局部阻力系数比圆形截面高40%-60%,极大影响了系统的水力效率。

为突破传统截面的性能瓶颈,椭圆形截面凭借独特的几何特性成为优化设计的理想选择。其长轴方向与流体流动方向平行,能够有效扩大过流面积,相较于同周长的圆形截面,椭圆形截面的过水能力可提升12%-18%;短轴方向的曲率半径较小,使得结构在径向受力时表现出更高的抗弯刚度。某抽水蓄能电站在改造引水系统时,通过ANSYS数值模拟构建1:10的三维模型,对不同离心率的椭圆截面进行流体-结构耦合分析,最终确定离心率为0.7的优化方案。经原型实验验证,改造后流道的水力效率提升8%,年发电量增加约300万度;同时,结构振动响应降低20%,设备维护周期延长30%,充分证明了椭圆形截面在综合性能提升方面的显著优势。

3.3 增加辅助减振装置

在灯泡贯流式机组流道中增加辅助减振装置是降低振动的

有效手段,减振器是常用的辅助减振装置之一,其工作原理是通过消耗振动能量来减小振动幅值,普遍采用的减振器主要有弹簧、橡胶和液压这三种类型。弹簧减振器借助弹簧的弹力变化吸收震动能量,具有结构简易和成本低廉的双重优点,在流道支撑结构中嵌入弹簧减振装置单元,能有效削弱支撑结构传递的振动强度。橡胶减振器则利用橡胶的粘弹性来消耗振动能量,实现了优良的减震表现与隔振性能,橡胶减振器常用于流道与基础之间的连接部位,降低振动对基础的传导冲击。液压减振器通过液体的阻尼作用来消耗振动能量,具有强大的阻尼能力及迅速的响应优点,在高振幅部位如尾水管出口处,应用液压减振器可大大减小振动幅值。阻尼材料同样是一种普遍选用的辅助减振措施,阻尼材料能够将振动能量转化为热能而耗散掉,可较好地抑制振动,常见的阻尼材料有阻尼橡胶、阻尼涂料等。阻尼橡胶材质的阻尼性能与弹性水平平均十分出色,可用作生产减振垫、减振圈等零部件。流道关键点贴上阻尼橡胶片,有效降低振动,流道壁面直接可进行阻尼涂料的敷涂,构建起阻尼覆盖层。

4 结论

通过对灯泡贯流式机组流道振动特性的深入分析,明确了水力、机械和电磁等多种因素是导致流道振动的主要原因。未来可对结构强化设计的优化算法进行深入研究,采用遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法,对结构强化设计的参数进行优化,提高设计效率和设计质量。结合机器学习和深度学习技术,建立结构强化设计的智能模型,实现设计方案的自动生成和优化。

[参考文献]

- [1]晋健.特大型灯泡贯流式机组安装及运维关键技术研究[M].中国水利水电出版社,2021.08.305.
- [2]桥巩水电站分公司,河海大学.特大型灯泡贯流式水电站工程实践[M].中国水利水电出版社,2011.01.308.
- [3]中水珠江规划勘测设计有限公司.灯泡贯流式水电站[M].中国水利水电出版社,2009.08.430.

作者简介:

李子为(1986--),男,湖北省仙桃市人,硕士,研究方向:水力机械。