

# 高水头水轮机导水机构强度校核及疲劳寿命预测方法改进

李子为

杭州江河水电科技股份有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6363

**[摘要]** 本文就高水头水轮机导水机构予以研究,着重于如何改善其强度校核及疲劳寿命预测方法。文章开篇阐述高水头水轮机导水机构的研究背景与意义,表明其在高水头水轮机中的重要地位,接着细致剖析导水机构的结构特征与受力情况,探寻影响疲劳寿命的要素,并形成创新的疲劳寿命预测模型。通过实例来证实该模型的有效性。文章结尾总结研究成果且对后续研究方向加以展望,进而为提升高水头水轮机导水机构的可靠性与安全性给予理论支撑。

**[关键词]** 高水头水轮机; 导水机构; 强度校核

中图分类号: TK73 文献标识码: A

Improvement of strength check and fatigue life prediction method for high head turbine guide mechanism

Ziwei Li

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

**[Abstract]** This paper studies the guide mechanism of high head turbine, focusing on how to improve its strength check and fatigue life prediction method. At the beginning of this paper, the research background and significance of the guide mechanism of high head turbine are described, indicating its important position in high head turbine. Then, the structural characteristics and stress conditions of the guide mechanism are carefully analyzed, the factors affecting the fatigue life are explored, and an innovative fatigue life prediction model is formed. The effectiveness of the model is verified by an example. At the end of the paper, the research results are summarized and the future research directions are prospected, which can provide theoretical support for improving the reliability and safety of high head turbine guide mechanism.

**[Key words]** high head turbine; Water distributor; Strength check

## 1 前言

高水头水轮机是水电站的核心设备之一,其稳定、可靠运行十分关键,导水机构作为高水头水轮机的关键部件,承担着调节水流进入转轮的任务,其强度与疲劳寿命和机组的安全运行及使用寿命直接相关。传统的强度校核和疲劳寿命预测方法存在一定局限性,难以精确考虑导水机构在实际运行工况下的性能,改进高水头水轮机导水机构强度校核及疲劳寿命预测方法具有重要的现实意义。

## 2 导水机构结构特点与受力分析

### 2.1 导水机构主要部件组成

高水头水轮机的导水机构包含导叶,导叶臂,连杆,控制环,顶盖,底环这些部件,导叶作为其中的关键部分,形状常为翼型,这样的形状可有效地引导水流,减小水力损失。导叶的数量及其布置形式决定于机组设计参数和水力性能需求,往往会匀称地分布在转轮周围,导叶臂把导叶和控制环关联起来,将控制环的

运动传送给导叶,从而实现对接叶开度的调整。导叶臂和导叶通过销轴结合,保证导叶能够灵活转动。连杆被用来关联各个导叶臂,这样就能让全部导叶一起运动,使得水流调节一致又稳定,控制环属于导水机构的操作部件,通过操作机构(譬如接力器)来控制,实现调节导叶开度的目的,顶盖和底环分别处于导叶的上下两边,二者除了起到支撑和固定导叶的作用之外,还会和导叶一同形成水流通流道,以确保水流可以顺畅流动。

### 2.2 导水机构受力情况分析

水流作用于导水机构而产生的水力载荷,属于主要受力源之列,机组运行时,水流以一定速度和压力撞击导叶,从而形成水压力,水压力的大小与水头,流量,导叶开度等因素关联紧密,处于高水头工况时,水压力会变得更大,这就对导叶的强度和刚度提出了更高要求。水头提升的时候,水流对导叶的冲击力将会增大,倘若导叶强度缺少,也许会出现塑性变形甚至折断情况,机械载荷重点涵盖导叶自身重量,通过导叶臂和连杆传递的力

矩等等, 导叶自身重量会在其转动轴所在之处生成弯矩, 影响导叶转动的灵活性。对于大型高水头水轮机而言, 导叶自重所产生的弯矩不可轻视, 要是导叶转动轴设计存在问题或者缺乏良好的润滑条件, 就有可能致使导叶转动艰难, 严重情况下甚至会发生卡涩现象。

### 2.3 受力对导水机构性能影响的研究

复杂的水力载荷与机械载荷会使导水机构部件产生应力集中现象, 应力集中大多出现在部件几何形状突变之处, 导叶根部, 导叶臂与导叶相连接之处, 连杆接头部位等都是如此。当应力超出材料强度极限之时, 就会发生塑性变形甚至断裂, 这会给机组的安全运行带来严重影响。导叶受水力载荷和机械载荷共同作用时, 其根部较易出现应力集中情况, 长时间运行过程中, 应力集中部位慢慢会产生疲劳裂纹, 裂纹不断扩展, 最后可能致使导叶断裂, 导叶若断裂, 机组便无法正常运行, 而且可能引发更为严重的机械故障, 使转轮, 顶盖等部件受损, 从而造成极大的经济损失。

## 3 导水机构强度校核方法改进

### 3.1 传统强度校核方法评估

传统的强度校核方法大多依靠材料力学和弹性力学理论, 该方法先形成导水机构部件的力学模型, 算出部件在不同工况下的应力分布状况, 再将算出的应力与材料许用应力作对比, 以此判定部件是否符合强度要求, 其流程一般包含如下步骤: 第一, 创建导水机构部件的几何模型, 往往会采用简化的几何形状, 而像导叶的倒角, 圆角这些细节特征则会被忽略掉。第二, 针对模型实施网格划分, 把连续的几何模型离散成数量有限的单元, 从而得以开展数值计算。赋予边界条件和载荷, 边界条件包含固定约束, 位移约束等, 载荷依照机组的运行工况而定, 水压力, 机械力等, 通过求解有限元方程, 得到部件在不同工况下的应力分布, 再将其与材料的许用应力作对比, 以此判定部件是否满足强度要求。

### 3.2 改进的强度校核方法提出

利用先进的有限元分析软件塑造导水机构部件的高精度几何模型的时候, 要充分顾及部件的细节特征, 导叶的倒角, 圆角, 螺栓孔等等。这些细节特征好像很微小, 但是在实际受力的时候也许会造成应力集中, 这样就会给部件的强度带来重要的影响, 对模型实施恰当的网格划分能够提升计算的精确度, 在应力集中的区域以及关键部位, 用比较密集的网格划分, 进而精确地捕捉应力的变化; 在其他的区域, 就用比较稀疏的网格划分, 以此来减少计算的工作量, 在施加边界条件和载荷的时候, 采用更为准确的水力载荷模型, 把水流的脉动和涡流效应也考虑进来, 还要考虑机械载荷的动态改变情况, 通过计算流体力学 (CFD) 的方法来模拟水流在导叶之间的流动状况, 得到导叶表面的压力分布情况, 再把这个压力分布作为有限元分析的载荷输入进去。

## 4 导水机构疲劳寿命预测方法改进

### 4.1 影响疲劳寿命的因素研究

载荷的大小、频率和波形给导水机构的疲劳寿命造成重要影响, 高水头水轮机运行的时候, 导水机构要承担交变的水力和机械载荷。载荷幅值越大, 频率越高, 疲劳损伤的聚集也就越快, 疲劳寿命就越短, 如果机组频繁地启动停止或者负荷大幅波动, 那么导水机构承担的载荷幅值和频率都会变大, 疲劳损伤将会加剧。而且, 载荷波形小, 疲劳裂纹的扩展速度也会受到影响, 带有冲击特点的载荷会造成裂纹尖端应力过度集中, 使得疲劳裂纹更快地扩展; 但相对较稳定的载荷波形对裂纹扩展产生的影响更小一些。

材料的力学性能、微观组织与表面质量等要素对疲劳寿命有着明显的影响, 材料的强度, 韧性, 硬度等力学性能指标决定了其抵抗疲劳破坏的能力, 一般而言, 强度较高且韧性良好的材料往往具备较长的疲劳寿命。材料微观组织包含的晶粒大小, 相形成等因素会影响疲劳裂纹产生与扩展的机制, 细小且均匀的晶粒能够阻止裂纹扩展, 以此来改善材料的疲劳寿命; 而粗大的晶粒或者不理想的相形成却会造成裂纹产生并扩展, 就表面质量来说, 表面粗糙度, 划痕, 腐蚀等瑕疵均有可能成为疲劳裂纹的起源之处, 进一步缩减疲劳寿命。比如导叶表面如果存在划痕或者腐蚀坑洼, 在交变载荷的作用下, 这些瑕疵之处很容易出现应力集中的情况, 进而引发疲劳裂纹。

### 4.2 构建改进型疲劳寿命预测模型

传统的疲劳寿命预测模型多数依照单轴疲劳理论, 很难精准地预测导水机构在复杂多轴应力状态下的疲劳寿命, 在实际运行的时候, 导水机构的部件往往处于多轴应力状态, 导叶根部就会同时遭受拉应力, 剪应力以及弯曲应力的作用。改进后的模型按照多轴疲劳理论, 把应力张量各个分量对疲劳损伤的贡献纳入考量范围, 通过制定多轴疲劳损伤准则, 如最大主应力准则, 临界平面准则等, 去计算多轴应力状态下的疲劳损伤, 以此来预测疲劳寿命。最大主应力准则认为, 一旦最大主应力抵达某个临界值, 材料就会出现疲劳破坏; 临界平面准则则是考虑应力在特定平面上的分布状况, 看作疲劳裂纹将会在某个特定的临界平面上产生并拓展。

把损伤力学用在疲劳寿命预测模型里, 要考量材料疲劳时损伤的汇集及其发展状况, 损伤力学通过界定损伤变量来说明材料的受损情况, 载荷循环次数增多时, 损伤变量会逐步变大, 当它抵达某一临界值的时候, 材料就发生损坏。采用概率统计法, 把载荷, 材料性能等参数的随机性纳入考量范畴, 形成疲劳寿命的概率分布模型。在实际运行当中, 载荷的大小, 频率, 材料的力学性能等均存在一定随机性, 这样的随机性会引发疲劳寿命的不确定现象, 借助概率统计工具, 蒙特卡洛模拟之类的, 考量这些参数的随机性, 算出导水机构在不同置信度之下的疲劳寿命, 进而提升预测成果的可靠度。

### 4.3 模型验证与实际应用效果

要验证改进模型是否准确, 需针对导水机构部件展开疲劳试验, 以获取不同工况之下的疲劳寿命数据, 疲劳试验往往会在专用的疲劳试验机上执行, 试验机模拟导水机构实际运行所受

之力的情况,对试件施加交变载荷,并且记下试件发生疲劳损坏之时的循环次数,把试验所得的数据同改进模型的预测结果予以比较,从而考察模型正确与否。结果表明,改进模型对于导水机构部件疲劳寿命的预估更为精确,其预测误差比传统模型小很多。在一次疲劳试验当中,针对导叶试件开展不同载荷幅值下的疲劳试验,传统模型预测误差平均高于30%,但是改进模型的预测误差被掌控在了10%以内,这便证明了改进模型具有有效性和准确性。

把改进之后的疲劳寿命预测模型用到高水头水轮机的运行维持当中,按照机组的实际运行工况以及导水机构疲劳寿命的预测成果,制订恰当的检修计划和维持策略,通过随时监测机组的运行参数,水头,流量,导叶开度等,并融合疲劳寿命预测模型,立即评定导水机构的疲劳损坏情况。要是疲劳寿命靠近设计寿命,就预先安排检修,替换疲劳损坏严重的部件,防止机组发生故障,遵照疲劳寿命预测成果来改善机组的运行方法,合理安排机组的启停次数,防止机组长时间在恶劣工况下运行,以此提升机组的可靠性和可用率。

## 5 实例分析

为了更好地验证改进方法是否有效,本文把某高水头水轮机的导水机构当作研究对象展开实例分析,此水轮机属于混流式,它的水头处于200-300米之间,额定流量达100立方米/秒,导叶共有24片,通过对这个导水机构实施细致的结构分析与受力计算,并综合利用经过创新的强度核查方法以及疲劳寿命预估模型,来评定该导水机构的强度和疲劳寿命。

### 5.1 强度校核实例

利用有限元分析软件导入导水机构的高精度几何模型,要充分考虑到导叶,导叶臂,连杆这些部件的细节特征,在对模型执行网格划分的时候,对应力集中区域采用比较密的网格,而在其他区域则采用相对疏一些的网格,最终形成的网格模型大概包含100万个单元。

按照水轮机的实际运行工况施加对应的水力载荷和机械载荷,其中水力载荷依照CFD模拟所得导叶表面压力分布来施加,机械载荷包含导叶自身重量,连杆所传力矩等等,边界条件涵盖导叶转动轴约束,顶盖和底环的固定约束等情况。

通过有限元分析算出导水机构各个部件的应力分布状况,结果表明,处于最大水头工况时,导叶根部最大应力为250MPa,小于材料许用应力300MPa;导叶臂结合处最大应力为200MPa,同样处于材料许用应力范围之内,这体现出在此工况下,导水机构强度符合设计要求,并且,把材料的非线性和损伤发展纳入考

量范围之后,对导水机构的长期运行强度实施评定,结果显示,在20年设计使用期限内,导水机构的损伤聚集水平偏低,可以安全运行。

### 5.2 疲劳寿命预测实例

监测水轮机实际运行参数,从中获取导水机构的载荷谱,该载荷谱包含因水头改变,流量起伏,导叶开度变动等产生的交变载荷,通过对载荷谱实施统计分析,确定载荷的幅值,频率及波形特点。

借助创新过的疲劳寿命预测模型,融合载荷谱以及材料的疲劳性能参数来预测导水机构的疲劳寿命,预测结果表明,正常运行工况时,导叶的疲劳寿命接近30年,导叶臂的疲劳寿命大约为28年,二者都比水轮机20年的设计寿命要高,这显示出在当下的设计与运行条件下,导水机构的疲劳寿命处于可靠水平。

要深入考量影响疲劳寿命的关键要素,便展开了敏感性分析,结果显示,载荷幅值和频率对疲劳寿命的影响非常突出。载荷幅值扩大10%的时候,导叶的疲劳寿命会减小大约20%;载荷频率扩大10%时,疲劳寿命减少约15%,材料的微观组织以及表面质量对疲劳寿命也有着重要意义,通过改善材料性能并创新表面处理工艺,可有效地加强导水机构的疲劳寿命。

## 6 结语

本文就高水头水轮机导水机构强度校核及疲劳寿命预测方法展开创新研究,在细致剖析导水机构结构特性与受力情况以后,给出依托有限元分析和多轴疲劳理论的改进方法。经过实例验证,这种改进方法可更为精准地评定导水机构的强度和疲劳寿命,可以让水轮机组更加稳定地长时间运行。

### [参考文献]

- [1]刘凯峰,熊水玲,张德怡,等.考虑负载扰动的水轮机状态数字孪生评估仿真[J].计算机仿真,2025,42(04):220-224+416.
- [2]林希.水轮机在水泥厂冷却塔中的应用[J].水泥,2025,(3):67-69.
- [3]董晓宁,王勇刚.混流式水轮机现代化更新改造技术[J].东方电气评论,2025,39(01):27-31.
- [4]韩文福,桂中华,满哲,等.模型水轮机空化现象智能识别方法[J].水利水电科技进展,2024,44(06):13-19.
- [5]付晓龙.抽水蓄能机组过渡过程压力脉动形成机理及转轮水推力控制研究[D].哈尔滨工业大学,2021.

### 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。