

新疆波波娜水电站高水头水轮机转轮流－固耦合刚强度计算

姜凌宇 陈立波 薛未 马宏禄 张海兴 王发亮

(新疆新华波波娜水电开发有限公司, 新疆 和田 848000)

【摘要】 本文对新疆波波娜水电站高水头水轮机转轮采用有限元的流－固耦合刚强度计算, 同时对水轮机转轮在各种运行工况下的应力和位移进行校核评判。

【关键词】 高水头; 水轮机转轮刚强度; 流－固耦合有限元计算

新疆波波娜水电站为引水式电站, 其电站装机容量 150MW, 额定水头 242 米, 保证出力 34.8MW, 额定转速: 428.6r/min, 飞逸转速: 700r/min, 叶片数: 15 个 +15 个, 导叶数: 24 个, 多年平均有效发电量 6 亿 kW·h 以上。水轮机转轮叶片材料: 04Cr13Ni5Mo, 屈服强度: $R_{p0.2}=620\text{MPa}$, 许用应力 (正常运行): $[\sigma]=1/5R_{p0.2}=124\text{MPa}$, 许用应力 (飞逸): $[\sigma]=2/5R_{p0.2}=248\text{MPa}$

一、理论基础

水轮机运行工况的 CFD 定常流动分析模型:

水轮机工作介质水视为不可压, 是不可压三维湍流内流问题。在有关的文献中已出现了大量的大涡模拟 (LES) 和以雷诺平均方程 (RANS) 为基础的雷诺应力模型、 $k-\varepsilon$ 系列模型等方法, 在对真机的模拟中, 采用大涡模拟在现阶段还不现实, 主要是大涡模拟要求网格尺度小于含能尺度而大于耗散尺度, 与惯性子区尺度同一量级, 这要求计算域内的网格密度足够密, 尤其在湍流活跃的剪切区、逆压梯度区和近壁区, 湍流的多尺度特性所要求的网格密度是目前计算机无法承受的。而雷诺平均方程为统计模型, 对计算资

源的要求远远小于大涡模拟, 因此, 在目前的条件下, 本研究采用了以雷诺平均方程为基础的湍流模型, 计算中采用了 SST $k-\omega$ 模型。

本研究计算了旋转转轮内的流动, 在旋转坐标系下, 雷诺平均 N-S 方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(w_i)=0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(w_i w_j) = -\frac{\partial p}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{(\mu + \mu_t)}{\rho} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \right] + f'_i \quad (4)$$

$$\vec{u} = \vec{w} + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (5)$$

$$\vec{F}' = -2\vec{\omega} \times \vec{w} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{f} \quad (6)$$

其中 P 为压力, ρ 为水的密度, u_i 、 w_i 绝对速度和相对速度分量, f'_i 为体积力分量, $\vec{\omega}$ 为转轮旋转角速度, μ 为粘性系数, μ_t 为湍流粘性系数, 由 SST $k-\omega$ 湍流模型加以封闭。

在本研究中, 采用有限元法对叶片强度进行计算。在以位移法为基础的有限元分析中, 结构被近似地离散为在有限个节点处相连接的单元集。如果每一个单元上的“力－位移”关系可以得到, 那么通过运用常规的矩阵方法, 可以组集而得到整个结构上的“力－位移”关系, 从而达

到求解的目的。

二、基于流固耦合的转轮叶片静态强度分析

有限元模型的建立及边界条件的确定：

对于混流式水轮机内流场计算及转轮结构场计算，文中分别建立流场计算和结构场计算的三维几何模型。流场计算和结构场计算的模型及流固耦合面如图 2-1 所示。

混流式水轮机流场计算域包括蜗壳、固定导叶、活动导叶、转轮及尾水管等部件。以蜗壳进口全压及其速度方向为入口条件，以尾水管出口平均静压作为流场计算的出口条件。通过整体流道 CFD 计算，使得计算得到的内流场更加准确，为后续的结构场计算提供更为准确的叶片表面压力载荷。约束条件为转轮上冠与主轴法兰的连接面上给定固定约束。转轮所受载荷包括惯性力和表面力，惯性力包括转轮自身重力和旋转引起的惯性力，表面力主要是流体流动所产生的作用在流固交界面上的水压力，该压力从全流道流场计算的结果中获得。首先要进行内流道全流场的 CFD 定常计算，根据流场分析计算得到叶片表面及上冠下环过流面的压力分布；将这些压力载荷加载在结构场计算中，进行结构场强度计算，并得到水轮机转轮的应力分布。通过 CFD 定常计算

得到最大出力下的工况点转轮流固耦合面的压力分布如图 2-2 所示。



图 2-1 水轮机内流道全流场模型

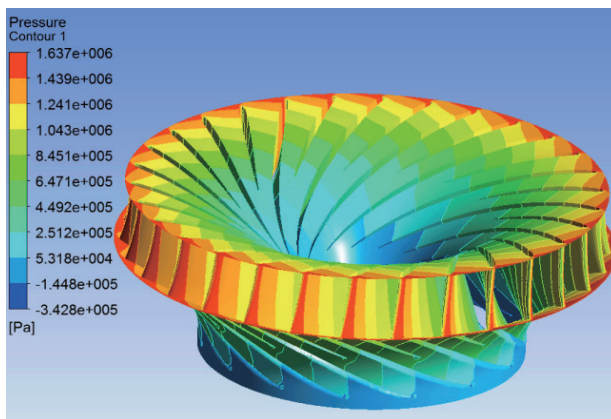


图 2-2 转轮叶片表面压力分布图

表 2-3 为计算工况下的最大等效应力值，图 2-4 为计算工况下的转轮叶片的等效应力分布图。从表和图中可以看出，波波娜电站水轮机组的转轮在正常工况下运行时的最大等效应力为 119MPa。

表 2-1 转轮静应力和变形计算结果

负荷情况	最大应力 [MPa]	最大总变形 [mm]	止漏环最大径向变形 [mm]
最大水头最大出力工况	119（叶片出水边靠近下环处）	0.268	0.0977
最大水头飞逸工况	125（叶片出水边靠近上冠处）	0.756	0.219

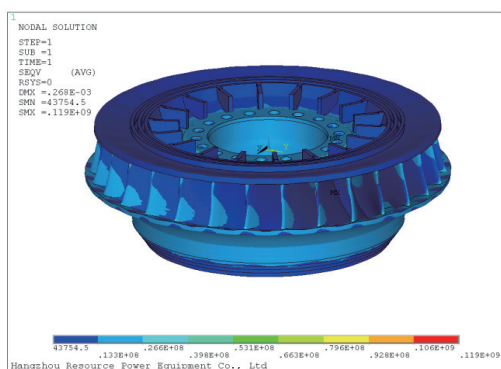


图 2-3 转轮等效力云图

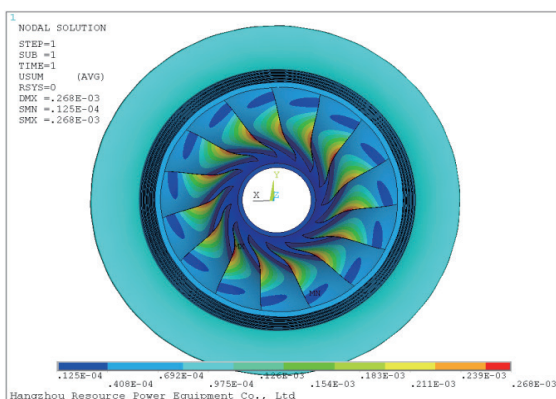


图 2-4 转轮总变形云图

工况 2：最大水头飞逸转速下

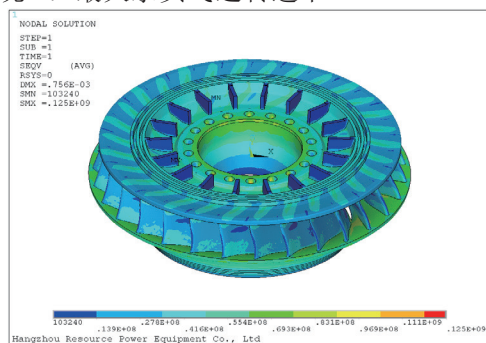


图 2-5 转轮等效力云图

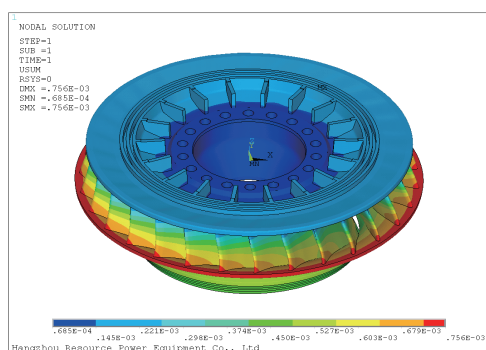


图 2-6 转轮总变形云图

结论：

水轮机转轮叶片材料为钢板 04Cr13Ni5Mo，其屈服强度为 620MPa，按合同要求正常工况运行时许用应力不超过屈服强度的 1/5，为 124MPa；飞逸工况下时需用应力不超过屈服强度的 2/5，为 248MPa。

从计算结果表明，在正常工况运行时和最大水头飞逸工况时，水轮机转轮的最大应力都远小于许用应力，因此，该转轮可保证安全运行。

参考文献：

[1] 余永清，吴亚军，陈瑞瑞，桂绍波. 重力场对贯流式水轮机性能的影响预测 [J]. 人民长江，2020，51（1）：221-224.

[2] 施卫东，郭艳磊，张德胜，孟凡有，蒋文军. 大型潜水轴流泵转子部件湿模态数值模拟 [J]. 农业工程学报，2013，29（24）：72-78.

[3] 崔军玲，余波，廖翔，刘育，李文浩. 基于流固耦合的低水头混流式水轮机转轮叶片静力分析 [J]. 水力发电，2017，43（3）：77-80.

[4] 岳志伟，郑源，阚阚，陈宇杰，李东阔，臧伟. 基于流固耦合的某抽水蓄能电站可逆式水轮机转轮强度和模态分析 [J]. 水电能源科学，2017，35（2）：181-184.

[5] 阚阚，郑源，赵连辉，乔木，张策，尉青连. 基于流固耦合的混流式水轮机转轮强度分析 [J]. 水电站机电技术，2015，38（2）：9-11.