

压力前池扩展角对涌波水位及断面横比降影响分析

李华江, 张法星, 张晓龙, 张力元, 雷茜茹

四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065

摘要

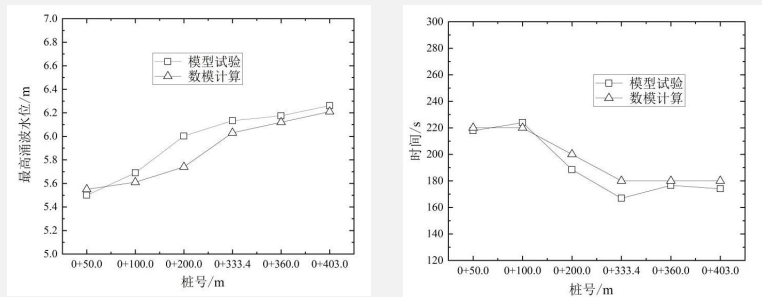
为探究压力前池的扩展角在水力过渡过程中对前池中涌波水位、断面横比降等的影响, 以某水电站无压引水渠-前池系统为研究对象, 采用非恒定 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 保证前池其他尺寸不变的前提下通过改变前池宽度来改变扩展角, 针对最后一台机组增负荷工况, 对压力前池非恒定流动进行了三维数值计算, 分析了 8° 、 10° 、 12° 三个扩展角下, 压力前池的内的水位变化过程及断面横比降。结果表明随着扩展角的增大, 前池断面的水位下降幅度有微小增加, 断面横比降略有增大, 采用三维 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型模拟压力前池的水力过渡过程是可行的。

计算方法

认为压力前池内的水流为不可压的三维湍流流动, 由连续方程和动量方程描述, **RNG $k-\epsilon$ 湍流模型** 适用于充分发展的紊流, 考虑压力前池流态, 引入 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型^[1] 封闭雷诺方程组, 在数值计算过程中, 采用**有限差分法**将控制方程离散为代数方程组而后进行数值求解。控制方程中对流项、湍动能和湍动能耗散率采用二阶迎风格式离散, 扩散项采用二阶中心差分格式, 计算残差值设为 10^{-6} 。网格划分采用平滑变化的**六面体结构化网格**, 网格总数约 85 万个。时间初始计算步长设为 0.01s, 在计算过程可自动调节。水面定义为自由液面边界, 采用 VOF^[2] 方法来追踪自由液面。

模型验证

对湾一水电站^[3] 引水隧洞甩负荷的水力过渡进行建模计算, 以验证前述方法的计算精度。机组全甩负荷时, 无压隧洞各断面的最高涌波水位、最高涌波水位到达时间数模计算结果与模型试验值的对比见图 1(a)、(b)。各断面最高涌波水位数模计算值与模型试验测量值的平均误差在 0.1m 左右, 最高涌波水位到达时间误差在 15s 以内。



(a) 各断面最高涌波水位对比 (b) 最高涌波水位到达时间对比
图 1 数模计算值与模型试验测量值的对比

计算工况

某水电站引水系统由无压引水渠道、压力前池、压力管道等建筑物组成。引水渠横断面为梯形, 上底边宽 27.0m, 下底边宽 8.0m, 边坡系数 1.5, 引水渠下游接 50.0m 长的扩展段, 扩展段后接压力前池, 前池纵向底坡由抖变平, 陡坡段长 50.0m, 平底段长 30.0m, 最大池深 12.0m, 前池横断面为矩形断面。压力管道半径 1.5m, 机组单机设计引用流量 $23.0\text{m}^3/\text{s}$, 装机 4 台。压力前池平底段高程 1700.0m, 压力管道进口高程 1702.5m。

在不改变扩展段长度和引水渠横断面尺寸的前提下, 通过改变压力前池断面的宽度来改变扩展角角度, 根据规范要求, 确定计算的的压力前池扩展角分别为 8° 、 10° 和 12° 。

水力过渡过程计算选择水电站最后一台机组增负荷工况, 上游边界条件设为水位边界, 设引水渠进口水位为 1710.0m, 下游边界条件设为流量边界, 假设机组负荷变化时压力管道内流量线性变化^[4], 增负荷时流量由 0 在 10.0s 内线性增为 $23.0\text{m}^3/\text{s}$ 。

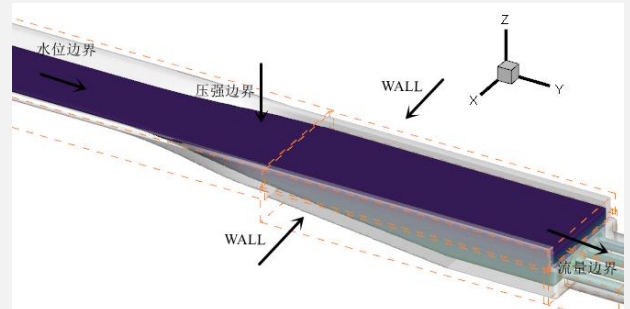
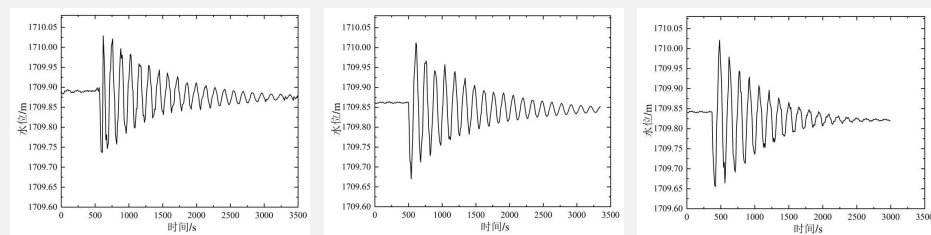


图 2 计算模型边界条件

结论

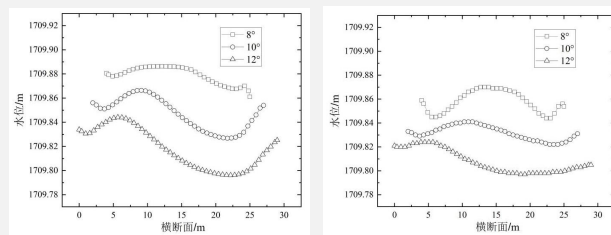
(1) 增负荷前后前池断面的涌波水位见图 3, 随着扩展角的增大, 前池的宽度扩大, 机组正常运行时的水位和增负荷导致的最低涌波水位依次降低, 8° 、 10° 、 12° 扩展角下前池断面增负荷后水位最低时的水深与增负荷前水深相比分别下降 1.52%、1.93%、2.03%, **即随着扩展角的增大, 增负荷导致的水位波动幅度相对增大**, 有压式进水口应保证在上游最低水位以下有足够的淹没深度, 以满足进水口不产生贯通式漏斗旋涡和不产生负压的要求, 8° 、 10° 、 12° 扩展角下增负荷导致的涌波水位最低时距离压力管道进口顶部距离分别为 7.24m、7.17m、7.14m, 满足淹没深度的要求, **计算得到的最低涌波水位可为压力钢管进口高度确定提供依据**。

(2) 增负荷前后前池断面的横向水位情况如图 4, 三台机组正常运行时, 8° 、 10° 、 12° 扩展角下前池断面横比降分别为 0.29%、0.31%、0.32%, 四台机组正常运行时, 8° 、 10° 、 12° 扩展角下前池断面横比降分别为 0.12%、0.16%、0.19%, **即横比降随扩展角的增大略有增大**, 扩展角为 8° 时前池断面的水面关于中轴面 (横断面 15m 位置处) 的对称性也好于 10° 和 12° 扩展角时, 这是因为扩展角越小, 前池宽度越小, 由于边壁约束等原因, 水面便会更加平稳。



(a) 前池断面涌波水位 (8°) (b) 前池断面涌波水位 (10°) (c) 前池断面涌波水位 (12°)

图 3 最后一台机组增负荷后各扩展角下前池断面水位波动



(a) 三台机组运行时 (b) 四台机组运行时

图 4 最后一台机组增负荷前后各扩展角下前池断面横向水位

参考文献

- [1] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1):201-225.
- [3] 张建梅. 水电站引水发电系统无压隧洞水力过渡过程研究[D]. 四川大学, 2005
- [4] [2]M. Hanif Chaudhry. 实用水力瞬变过程[M]. 程永光, 等译. 中国水利水电出版社, 2015.