

导叶关闭规律对水电站流道压力分布特性影响

陈玉¹, 张洋², 欧邦虎³, 王煜¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 宜昌市水利水电勘察设计院有限公司, 湖北 宜昌 443002; 3. 蒙江水力发电总厂, 贵州 都匀 558000)

摘要:水电站过渡过程中,不同导叶关闭规律对流道压力值及分布特性有较大影响,特别对引水道短、断面尺寸大的坝后式水电站,可能造成同一断面的压力不均问题,危及水电站的安全。为探求不同导叶关闭规律对坝后式水电站流道压力空间分布特性的影响,以典型坝后式水电站三峡右岸水电站为研究对象,通过水电站过渡过程全流道压力特性三维数值模拟及自定义的压力特性差异分析法,对比不同导叶关闭规律下的水电站流道典型断面压力空间分布差异。结果表明:采用三段导叶关闭规律更能限制转轮最大转速,而采用两段导叶关闭规律使得流道同一断面的压力分布更为均匀,从而对流道有利,能保证水电站的安全稳定运行。

关键词: 坝后式水电站过渡过程; CFD 三维流体计算; 导叶关闭规律; 压力空间分布; 压力特性差异分析法

中图分类号:TV737

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)06-0135-09

Effect of guide vane closure pattern on pressure distributing characteristics of hydropower station flow passage

CHEN Yu¹, ZHANG Yang², OU Banghu³, WANG Yu¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Yichang Water Conservancy and Hydropower Survey & Design Institute Ltd, Yichang 443002, China;

3. Mengjiang Hydropower Plant, Duyun 558000, China)

Abstract: Different guide vane closure ways have great influence on pressure value and pressure distributing characteristics of the flow passage during the transient process of the hydropower station, especially for hydropower stations at dam toe with short penstock and large cross section, which may cause the uneven distribution of pressure on the same cross section and is harmful for the safety of hydropower station. To explore the effect of different guide vane closure laws on pressure spatial distributing characteristics of hydropower station at dam toe flow passage, this paper takes the Three Gorges Right Bank Hydropower Station, a typical hydropower station at dam toe, as the researching object, and uses three-dimensional numerical simulation along with self-defined Analysis on Pressure Distributing Characteristics Difference, to compare and study pressure spatial distributing characteristics within different guide vane closure law. The results showed that the maximum rotating speed will get restriction when applying three-stage guide vane closure law. The pressure distribution at the same cross section will be more even when applying two-stage guide vane law, which will be beneficial to the flow passage and ensure the steady and safe operation of the hydropower station.

Key words: transient of hydropower station at dam toe; CFD three-dimensional fluid calculation; guide vane closure law; pressure spatial distribution; analysis on pressure distributing characteristics difference

1 研究背景

优化导叶关闭规律作为水电站常用的调保措

施,对水电站过渡过程中有效控制流道压力及机组转速变化具有重要的作用^[1]。如江西力川龙头寨水电站将原运行的一段导叶关闭规律改变为两段导

收稿日期:2019-05-24; 修回日期:2019-07-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51409151)

作者简介:陈玉(1995-),男,湖北汉川人,硕士研究生,主要从事水电站过渡过程的研究。

通讯作者:王煜(1976-),女,贵州榕江人,博士,教授,硕士生导师,主要从事水力学及河流动力学的研究。

叶关闭规律,解决了水流惯性、机组惯性和调节性能三者的矛盾,达到了电能质量最佳、水工建筑和机组造价最省的目的^[2]。同时,不当的导叶关闭规律,可能会引起引水道钢管破裂、造成反水锤叠加使机组上抬、机组振动和噪音、机组飞逸破坏等。如巴布亚新几内亚 Ok Menga 水电站的两台机组由于过渡过程中阀门快速关闭引起尾水管液柱分离,造成尾水管直锥段爆炸^[3]。

目前对于导叶关闭规律对水电站过渡过程的影响研究主要采用一维特征线法^[4-5],或是一维近似解析法^[6],或是一维降阶数学处理法^[7]。一维水力过渡过程的计算,将流道简化为简单管,以断面中心点压力作为断面压力值,忽略了同一断面不同位置间压力差值。特别是对于引水道短、流道尺寸大的坝后式水电站,过渡过程中流道同一断面不同部位可能存在较大的压力差值,这种压力差值会造成流道局部破坏,以及机组振动和噪音,给水电站的安全运行带来威胁。随着计算流体动力学(CFD)^[8]技术在水电站过渡过程中的运用越来越成熟^[9-16],三维数值模拟计算的优势体现的也更加明显:较一维数值模拟计算,通过三维数值模拟计算得到的结果更能反映水电站过渡过程中流道空间的压力变化及分布特性,对于准确分析和评价过渡过程中水力机组及其流道的安全更为有效;与模型试验相比,三维数值模拟计算更能减少研究成本,反映出同样细致精确的水力特性。

在前人研究的基础上,本文以三峡右岸水轮发电机组水力过渡过程作为研究对象,通过构建水电站全流道三维数值模型,以不可压缩三维 N-S 方程为理论基础,借助 Fluent 计算软件及动网格技术,深入分析不同导叶关闭规律对水电站流道压力分布的影响。研究结果可为水电站的安全运行和管理提供参考。

2 研究对象及方法

2.1 研究对象

本文以三峡右岸水轮发电机组水力过渡过程作为研究对象,进行导叶关闭规律对坝后式水电站流道压力特性影响研究。三峡右岸水电站引水道轴长 122.677 m,内径 12.4 m,压力管道断面当量直径与长度的比值最大达到了 0.916,是典型的短引水道、大管径坝后式水电站^[17]。其水轮机型号为 A858a-36.6,基本参数如下:转轮直径 $D = 10.4$ m,叶片数为 15,固定导叶和活动导叶数均为 24,飞

轮转矩 $GD^2 = 450\ 000\ \text{t} \cdot \text{m}^2$ 。在额定工况下,其主要参数如下:出力为 710 MW,流量为 973.47 m³/s,水头为 85.0 m,转速为 75.0 r/min (7.85 rad/s),上游水位为 149 m,下游水位为 62 m。

2.2 坝后式水电站全流道三维数值模型

2.2.1 数学模型 采用不可压缩三维 N-S 方程对水轮机流道内复杂的三维水流进行数值模拟。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(p u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(p v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(p w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

式中: u 、 v 和 w 为速度矢量 \mathbf{u} 在 x 、 y 和 z 方向的分量, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; p 为流体微元上的压强, Pa; μ 为动力黏度, Pa·s; S_u 、 S_v 、 S_w 为动量守恒方程中的广义源项。

方程采用有限体积法进行离散,压强、速度采用 SIMPLEC 方法耦合,采用 Spalart-Allmaras 模型进行内部紊流计算。

对于水轮发电机组的运动过程,采用转轮平衡方程:

$$M_t - M_g = J \frac{d\omega}{dt} \quad (5)$$

式中: M_t 为水轮机的主动力矩, N·m; M_g 为水轮机的阻抗力矩, N·m; J 为机组转动部分的转动惯量, t·m²; ω 为机组转动的角速度, rad/s, $\omega = 2\pi n/60$; $d\omega/dt$ 为机组角加速度, rad/s²; t 为计算时间, s。在水电站的过渡过程中,当发电机组丢弃掉负荷之后,其外部负载 M_g 相应降低为 0。而当转轮转速达最大值后,数值模拟过程中的主动力矩 M_t 会变为负值,机组出力即为其制动力,以减小转轮转速避免飞逸。

对于稳定工况下的求解,即过渡过程还未开始时的计算,转轮转速为额定转速,其值为已知的确定值。基于整个模型围绕着 Z 轴进行旋转,可以直接在 Fluent 的计算结果报告中提取到转轮室叶片的扭矩,再根据 $N = M \cdot \omega$ 进行水轮机出力的求解;而对于过渡过程的计算,即三维非定常湍流的计算,由于在 Fluent 中选取的时间步长较小,可以直接基于方程式(5)由一阶的积分公式求解,即 $\omega_i = \omega_{i-1} + M_i \cdot dt/J$,根据 $i-1$ 时刻的转速来推求 i 时刻的转速,依次迭代,完成过渡过程的转速求解。

2.2.2 边界条件 过渡过程中流道压力改变是水击现象作用的结果,而水击产生的根本原因在于水体的惯性和可压缩性,故水电站过渡过程中研究的水体域为可压缩流。若将 Fluent 软件中的速度进口 (velocity - inlet) 边界条件用于可压缩流,则可能导致非物理结果^[18]。因此,本文以水电站进水口断面为进口边界,采用断面平均压强为压力进口 (pressure - inlet) 边界条件;以尾水管出口断面为出口边界,采用断面平均压强为压力出口 (pressure - outlet) 边界条件,并给定了进、出口断面的湍流强度及水力直径。

为了保证流体通量能够顺利在相连流体区域流通,将各区域的接触面设置为交界面 (interface) 以进行数据的直接交换。对于过水系统中的压力管道、蜗壳、导水机构、转轮和尾水管与水流接触的内壁,以及转轮体上的轮毂和叶片、泄水锥及导水机构的导叶等其他固体与流体的接触面均设为固壁边界条件 (wall),在壁面处采用无滑移的边界条件,近壁区则采用标准壁面函数。

2.2.3 网格划分 本文采用非结构化网格进行网格划分,进水口进口边界距离尾水管出口边界水平投影长度约为 180 m,轴向投影长度约为 100.5 m。基于对流场的初步判断,结合网格划分质量要求、数值计算的收敛情况及网格无关性的精度验算,将水电站的发电机组过水系统整个计算域分割为 6 个子区域,分别为压力管道区 (含进水口部分)、蜗壳区、固定导叶区、活动导叶区、转轮室区、尾水管区 (如图 1)。总共形成 197.54×10^4 个控制体单元及 35.01×10^4 个单元节点,其中最大网格大小为 0.263 m^3 ,最小网格大

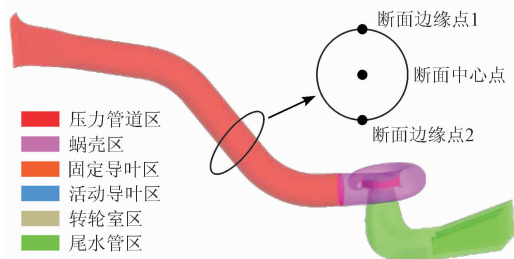


图1 三峡右岸水电站发电机组过水系统三维模型图

2.2.5 模型验证 对水电站过渡过程的数值模拟,实质上是对水电站整个过流系统非稳态三维非定常过程的数值模拟。为加速非稳态计算过程的收敛,需要对水电站额定工况下的整个过水系统进行三维定常湍流的数值模拟计算,并以收敛的稳态结果来对非稳态的计算进行流场的初始化。

小为 $9.41 \times 10^{-6} \text{ m}^3$,平均网格大小为 0.0182 m^3 ,各区域网格单元划分情况如表 1 所示。

表1 计算区域网格节点数及控制单元数分布情况

流道区域	网格节点数	控制单元数
压力管道区	63788	365380
蜗壳区	40861	227129
固定导叶区	36342	204207
活动导叶区	112024	623740
转轮室区	64014	363205
尾水管区	33083	191698

2.2.4 计算工况 针对水电站过渡过程的安全性评价,通常采用水电站设计水头及最大水头下甩负荷工况进行流道最大压力值和机组最大转速值安全性校核。本文以水轮机在设计水头下甩全部负荷 (710 MW) 为计算工况。同时,为探求不同导叶关闭规律对流道压力分布产生的差异,本文在三峡右岸水电站现行的三段折线式导叶关闭规律的基础上,拟定一段直线式及两段折线式导叶关闭规律,分别对其过渡过程中流道三维压力分布及机组转速特性进行数值模拟计算。3种导叶关闭规律的水轮机导叶开度随时间变化曲线如图 2 所示。为实现对不同导叶关闭规律的模拟,本文采用了 Fluent 软件中的动网格技术,将所有的活动导叶拟作刚体,以 Z 轴为旋转中心轴,通过写入的 UDF 自定义编程函数,控制网格转动角速度,进而模拟导叶的关闭规律。动网格的更新采用弹簧近似光滑法与局部网格重构组法相结合。

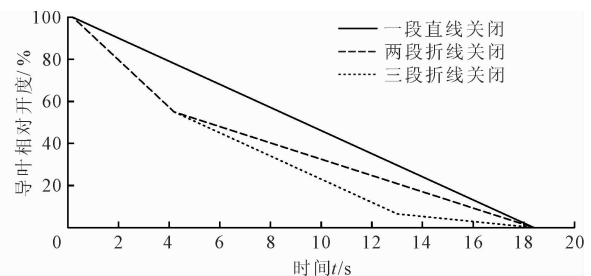


图2 3种导叶关闭规律的导叶开度与关闭时间关系曲线

根据收敛后的稳态计算结果,提取转轮室区的扭矩可得 $M = 9.42 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}$,进而可以计算出相应的水轮机功率为 $N = M \cdot \omega = 740 \text{ MW}$,对比三峡右岸水电站额定工况下的出力 710 MW,二者间的误差为 4.2%。

完成非稳态的所有迭代计算后,在 Function

Hooks 中选择 Output 文件,导出三段导叶关闭规律下的转轮转速变化(时间步长为 0.005 s,计算时步为 3 680),与三峡右岸水电站转轮实际的变化情况(实际转轮转速变化的具体数值来源于哈尔滨电机厂有限责任公司的调节保证计算报告)进行对比,如图 3 所示。进一步求解二者之间的误差,可知相对误差在 ± 0.03 范围之内。

图 3 中,纵坐标轴 β 为转速的相对值,即转轮转速与额定转速的比值;衡量误差为计算转速与实际转速的相对误差,即 $\varepsilon = (\beta_{\text{计算}} - \beta_{\text{实际}}) / \beta_{\text{实际}}$ 。

结合稳态计算工况下的出力比较以及非稳态工况下的转速变化比较,误差均较小,可认为本文拟定的三维数值模拟计算模型结果可信。

2.3 压力特性差异分析法

为了量化水电站过渡过程中流道同一断面上不同部位的压差差异,本研究采用自定义的“压力特性差异分析法(Analysis on Pressure Distributing Characteristics Difference)”,其通过选定分布于同一断面不同位置的监测点,计算各监测点的压力变化过程,统计监测点压力差值在导叶关闭时间上的累

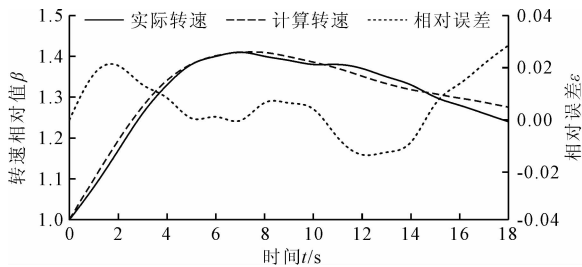


图3 转轮实际转速与计算转速比较图

3 结果与分析

3.1 水轮机转速瞬变规律

当导叶分别采用一段直线关闭、两段折线关闭及三段折线关闭规律时,在导叶关闭初始时刻,由于水轮机主动力矩的作用,转轮转速快速上升;随着导叶的关闭,流道中水体流量减少,水轮机的主动力矩也呈现出下降趋势,因而转轮转速也相应地降低。在转轮转速下降的过程中,转速仍然呈现出一定的波动趋势,表明过渡过程中流场存在不稳定现象。3种导叶关闭规律的转速随时间变化曲线见图 5。由于导叶关闭规律的差异,对比图 5 中同一时刻 3 种不同的导叶关闭规律下的转轮转速值,可发现三者存在明显的差别:导叶一段直线关闭规律下水轮机转速在整个过渡过程中明显高于两段折线关闭及三

积效应,获得该断面在导叶关闭过程中所有监测点压差极值的叠加值,以此作为该断面的“压力影响因子(Pressure Influenced Factor, PIF)”,用以评价该断面在水电站过渡过程中垂直水流方向的断面横向压差对其稳定性的影响。

当 PIF 值越小时,说明该断面在导叶关闭过程中其压力分布越均匀,由于压力差导致的局部破坏可能性越小,更能保证水电站的稳定安全运行,反之亦然。例如,针对水电站压力钢管段某一断面,选定该断面面积中心测点及外周对称分布的两个测点作为压力差异监测点,如图 1 所示。其断面压力影响因子可表示为:

$$PIF = \sum_{t=0}^{t=t_{all}} (P_{\max} - P_{\min}) \quad (6)$$

式中:PIF 为监测断面压力影响因子,Pa,可用图 4 中阴影面积表示。为方便求和计算,PIF 的计算压力选取单位时间内的时均压力值,不考虑可能存在的脉动压力值。 P_{\max} 、 P_{\min} 为测点在同一导叶关闭过程中,单位时间(1 s)内的时均压力值的最大值及最小值,Pa。

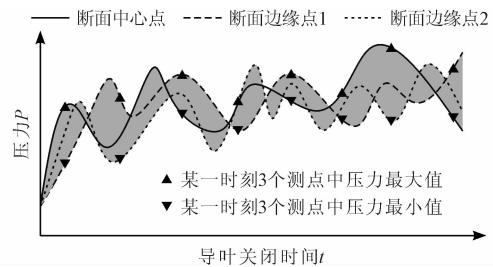


图4 测点压力随时间变化曲线示意图

段折线关闭规律;因导叶两段折线关闭规律在第一个折点前的关闭方式与三段折线关闭规律相同,故该阶段二者的转速变化过程完全一样。在第一个折点过后,两段折线式导叶关闭规律下转轮转速的上升值明显高于三段式关闭规律。具体分析这 3 种导叶关闭方案可知,导叶的关闭速度越快,相应的转轮转速上升也越快。过渡过程中,分别采用一段直线、两段折线及三段折线关闭规律情况下,得出水轮机转速的最大值分别为 108.159、106.832、105.875 rad/s,较额定转速分别上升了 44.2%、42.5%、42.2%。从数值结果上分析比较可知,相较于一段直线及两段折线关闭规律,导叶三段折线关闭规律在水电站过渡过程中具有较好的转速控制特性。

3.2 流道压力空间分布差异性

3.2.1 压力管道区域 对于三峡右岸水电站这种

典型的直径与长度比值较大的引水道,仅计算断面中心点压力值,可能出现极值弱化现象。为了综合考虑在压力管道上各断面的压力三维空间分布,本文取沿压力管道长度的中心断面(如图 6(a))为过渡过程压力瞬变规律监测断面,并从顶部、中心、底部分别提取断面上不同部位的 3 个测点的压力变化过程进行压力管道上同一断面不同部位的压力瞬变规律对比分析。

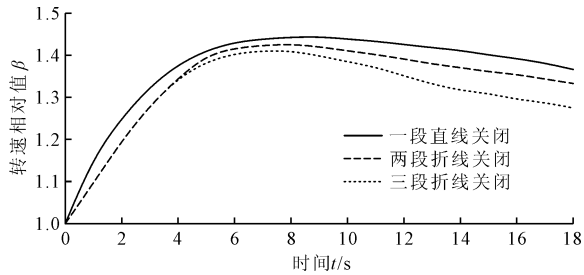


图 5 3 种导叶关闭规律的转速随时间变化曲线

如图 6(b)~6(d) 所示,在一段式、两段式及三段式导叶关闭规律下,这 3 个测点的压力随时间变化曲线几乎呈现重合的趋势,进一步比较各导叶关闭规律在同一时刻下断面测点最大压力及最小压力差值极值,并用样条曲线连接绘制出压差极值随时

间变化曲线。由图 6(b)~6(d) 可知,对应这 3 种导叶关闭规律,断面测点压力差值 $\Delta P(\Delta P = P_{\max} - P_{\min})$ 的最大值不超过 250 Pa,即不超过 0.025 m 水柱,在同一断面上的不同测点没有表现出明显的压力差异。

3.2.2 蜗壳区域 在一维特征线法的物理模型中,蜗壳被简化为与压力钢管连接的变断面等价管。然而由于水流从压力管道进入蜗壳时,不但有断面面积的变化,同时还存在断面过流流量的变化,因此蜗壳进口断面的流场较压力管道的流场更为复杂,特别是在水轮机发生流量急剧变化的过渡过程。为此,为探求过渡过程时蜗壳不同部位的压力瞬变规律,取蜗壳进口断面作为压力变化监测断面,并在进口断面上从顶部至底部依次选取 3 个压力监测点,如图 7(a) 所示。

当导叶分别采用一段式、两段式及三段式关闭规律时,测点压力随时间变化曲线也几乎呈现出重合趋势,如图 7(b)~7(d) 所示。进一步分析压差极值随时间变化曲线,可知同一时刻下断面测点压力差值的最大值不超过 3000 Pa,即 0.3 m 水柱,也未显示出明显的压力分布差异性。

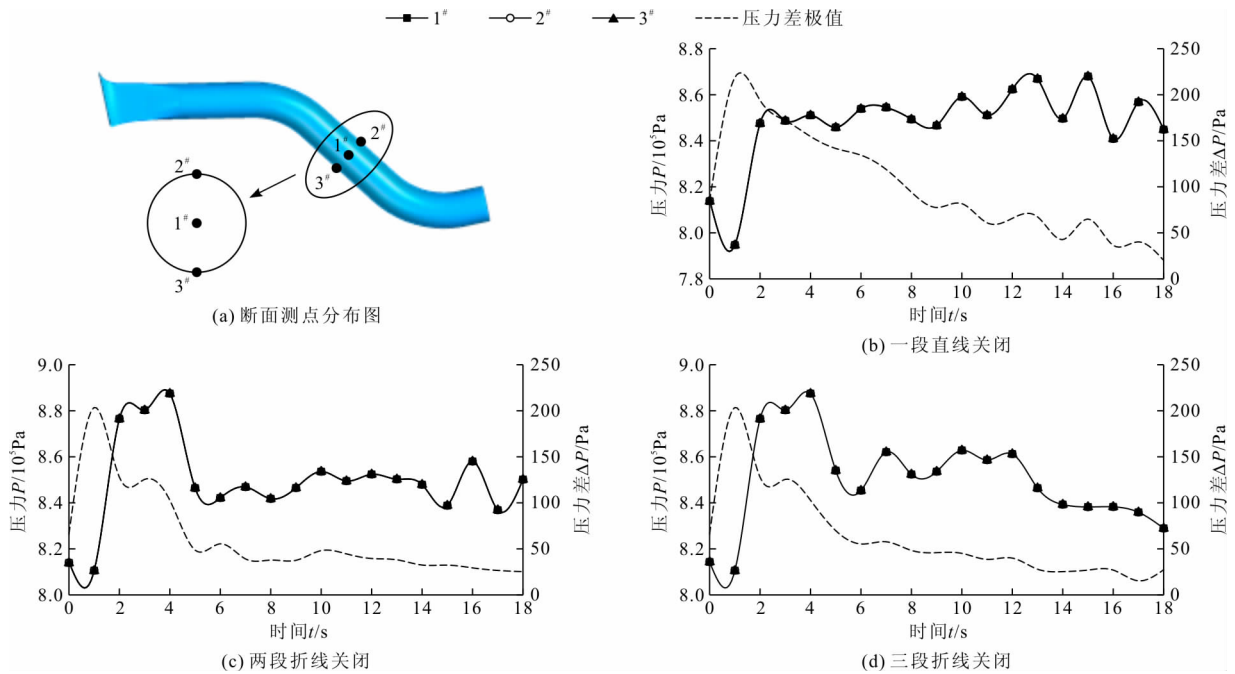


图 6 压力管道中心断面测点分布及 3 种导叶关闭规律的各测点压力随时间变化曲线

3.2.3 导叶区域 在采用一维特征线法对水轮机流道进行水击过程压力计算时,通常将水轮机导叶简化为阀门结构。然而反击式水轮机导叶是环向均匀分布于转轮外缘,由于导叶关闭时间及关闭规律

的不同,往往在不同的导叶位置产生不同的压力瞬变规律。为监测坝后式水电站过渡过程中导叶压力变化的空间差异,选取活动导叶外缘环向断面为监测断面,其中在外缘断面上对称选取 4 个监测节点,

如图8(a)所示,7[#]测点位于蜗壳进口断面的内缘,8[#]、9[#]、10[#]测点沿其圆周顺时针方向均匀分布,并且此4个测点在竖直方向上均位于导叶中间平面上。

水流运动受到蜗壳不对称结构及活动导叶不规则空间扭曲面结构的影响,在3种不同导叶关闭规律下测点压力随时间变化呈现出一定的差异,如图8(b)~8(d)所示。与蜗壳断面压力分布相比,当水流流入导叶区域时,水流只能通过导叶的间隙流

动,断面面积急剧收缩,导致压力较蜗壳断面出现下降。而对比同种导叶关闭规律下活动导叶外缘断面各测点间的差异,其压力随时间变化趋势相同,在导叶关闭初始时刻呈现快速增长的趋势;尔后因为流量的减少及水体阻力的增加,这种增长趋势有所减缓;而在关闭后期由于流场不稳定的影响,又出现了小幅度的波动,空间分布差异性较为明显,压力最大差值达 6.79×10^4 Pa。

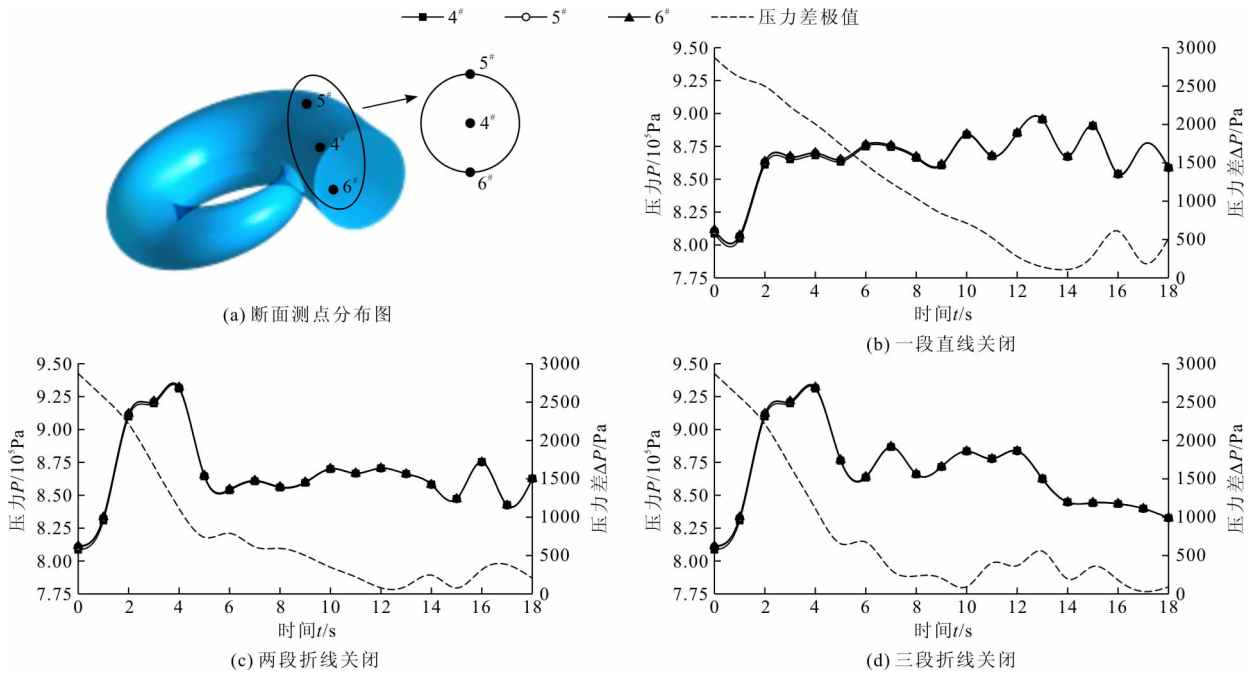


图7 蜗壳入口断面测点分布及3种导叶关闭规律的各测点压力随时间变化曲线

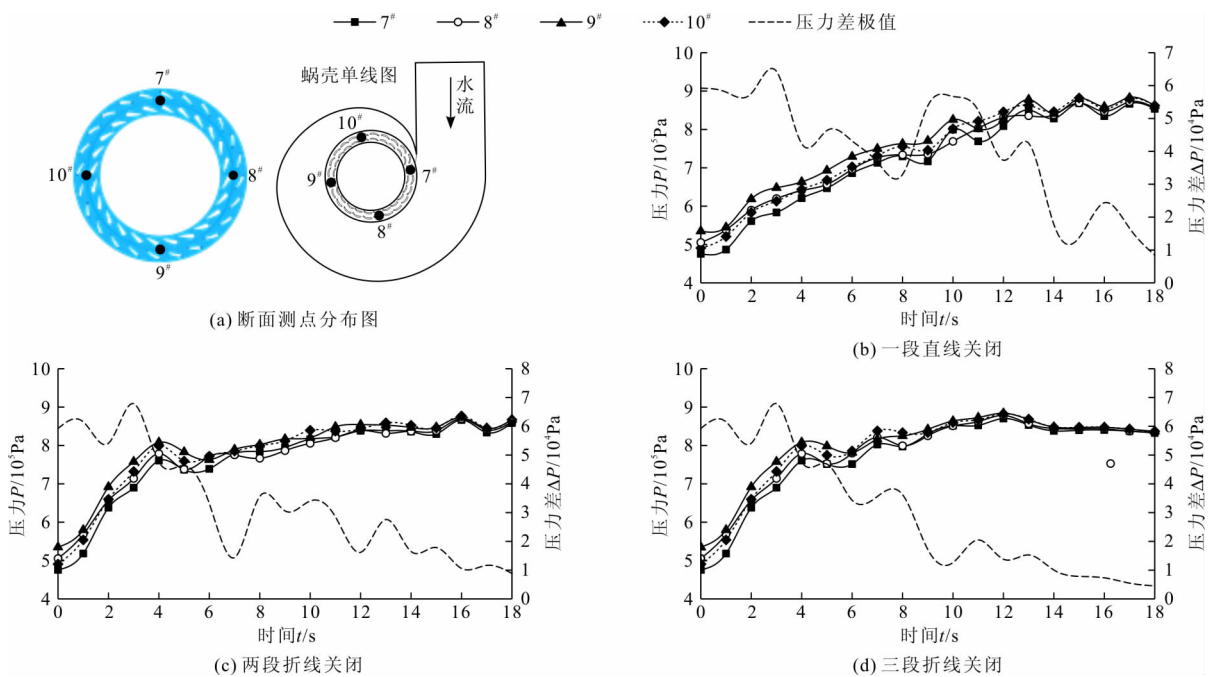


图8 活动导叶外缘环向断面测点分布及3种导叶关闭规律的各测点压力随时间变化曲线

3.2.4 转轮区域 在水电站过渡过程中,转轮区域产生与引水道相反的水击波传递过程,当水轮机突然甩负荷、导叶迅速关闭截断水流时,在转轮区域内将会出现迅速的压力瞬变过程。为监测转轮区域的压力瞬变过程,选取转轮出口断面作为转轮区域的监测断面,并在断面不同位置上设置了 3 个测点,如图 9(a)所示,11[#]测点位于转轮出口断面的中点处,12[#]与 13[#]测点关于 11[#]测点为对称,并且分布在其左右两侧。

水流从导水机构间隙进入转轮区域,与转轮叶片发生碰撞,水头损失较大;水流随着转轮体共同进行高速转动,同时转轮叶片又对水流有一定的拒水作用,这种水流的复杂三维运动在转轮体中形成了一系列的涡流,进而转轮出口断面这 3 个测点随着导叶关闭,其压力分布特性各异,产生了明显的压力分布差异。在 3 种不同的导叶关闭规律下,转轮出口断面已经出现了负压区,断面压力差值最大值达 2.40×10^5 Pa,如图 9(b)~ 9(d)所示。与转轮出口断面中心 11[#]测点对称的 12[#]及 13[#]测点的压力分布并不呈现对称变化的规律,不满足力矩平衡的条件,可能产生额外的力矩增加水头损失,影响转轮的正常运行。同时,12[#]及 13[#]测点的压力值明显大于 11[#]测点,若采用断面中心的压力值代替整个断面的极值,会出现极值弱化的现象,在转轮出口断面可能出

现流道局部破坏,这些都不利于水电站的稳定安全运行。

3.2.5 尾水管区域 水电站过渡过程中,尾水管区域水流形成强烈紊流及压力脉动,对水轮机及流道产生安全威胁。为监测尾水管区域压力瞬变规律,对于尾水管出口断面较大且布置有中墩的水电站,选取尾水管肘管出口与中墩起始位置相接的断面作为压力监测断面。尾水管区域监测断面测点分布如图 10(a)所示,在尾水管肘管段出口断面中心位置设置测点 14[#],左侧中墩与左侧边墩的中间位置处设置测点 15[#],在右侧中墩与右侧边墩的中间位置处设置测点 16[#]。

尾水管区域紧接着转轮区域,水流的流动受到转轮体的影响,也产生了较大的负压区,压力差异特性明显。同一测点,随着导叶的关闭,压力变化波动起伏较大,反映出流场的不稳定性。尾水管内部存在大量的涡流,水流与中墩碰撞后能量损失极大,断面压力分布不均,流动紊乱,同一断面不同测点的压力差值最大值达到了 2.81×10^4 Pa(图 10(b)~ 10(d))。尾水管断面选定的对称分布的测点,其压力随时间变化并未出现明显的对称性质,各测点间产生的压力差异将造成水流在尾水管中流动的紊动性,可能与机组产生共振以增强机组的振动,进一步可能产生强烈的噪音。

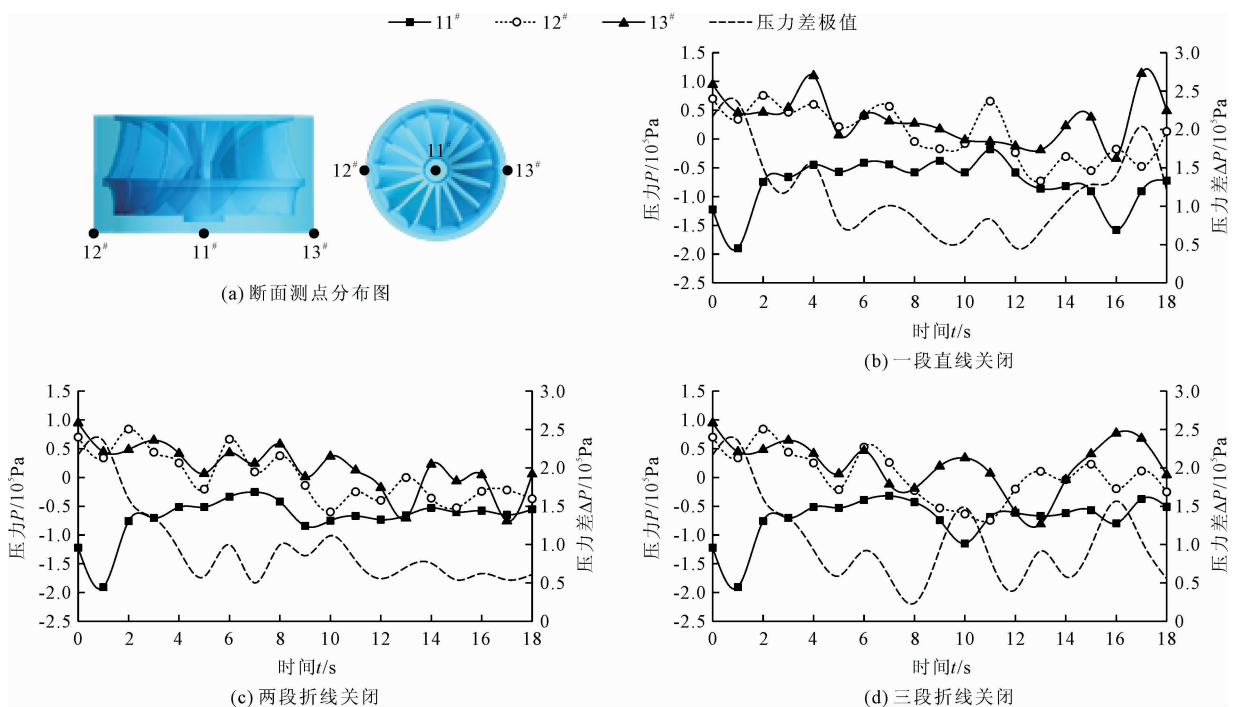


图 9 转轮出口断面测点分布及 3 种导叶关闭规律的各测点压力随时间变化曲线

3.3 流道不同区域压力空间分布差异性比较分析

根据压力特性差异分析法,不同导叶关闭规律下,三峡右岸水电站流道不同断面上的压力分布差异以压力影响因子表征,如表2所示。由表2可知,压力管道中心断面和蜗壳入口断面的压力影响因子

明显小于其他断面,说明这两个断面压力空间分布差异不明显;活动导叶外缘断面、转轮出口断面及尾水管肘管段出口断面的压力空间分布差异较大,可能引起水流局部湍动加强,增加水头损失,同时造成局部结构破坏。

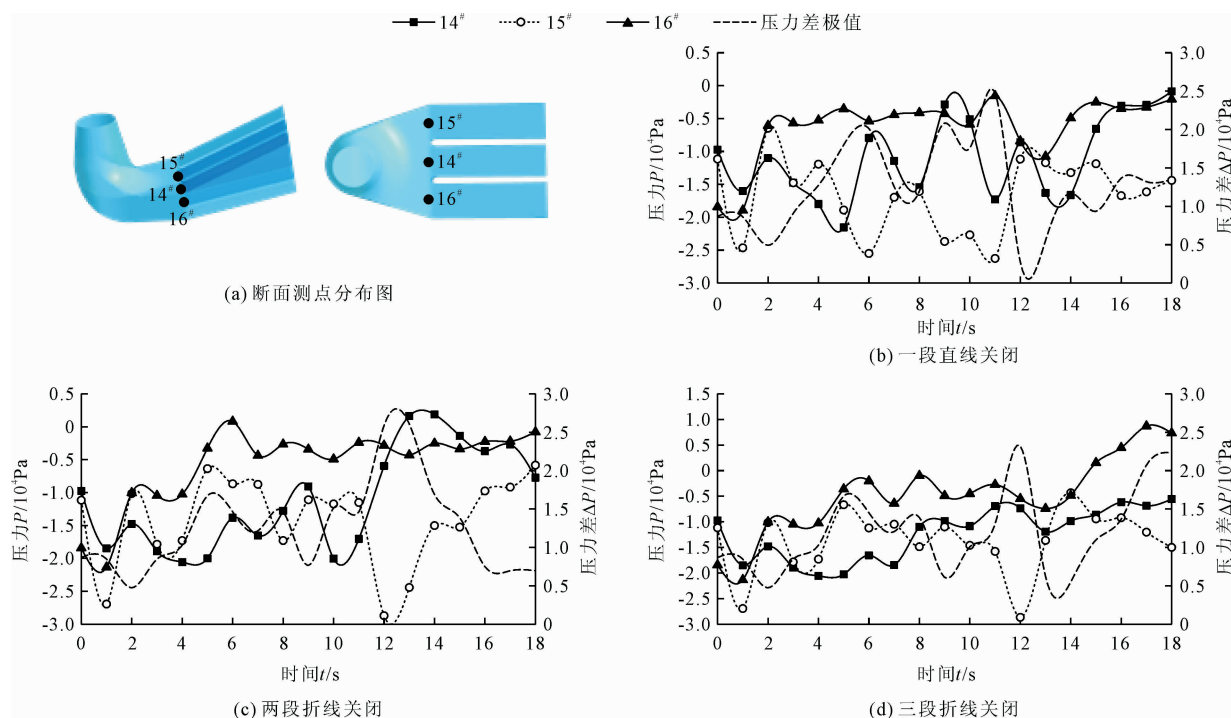


图10 尾水管肘管段出口断面测点分布及3种导叶关闭规律的各测点压力随时间变化曲线

表2 3种导叶关闭规律的各断面压力影响因子

Pa

导叶关闭规律	压力管道中心断面	蜗壳入口断面	活动导叶外缘断面	转轮出口断面	尾水管肘管段出口断面	总压力影响因子
一段直线式	1818.2205	20238.155	730618.83	2.06×10^6	228435.73	3042520.9
两段折线式	1115.0005	14102.5605	588170.08	1.72×10^6	232569.99	2553617.6
三段折线式	1129.6280	13311.3755	526081.30	1.87×10^6	214186.13	2620698.4

根据不同导叶关闭规律下的压力影响因子得出,导叶采用一段直线关闭规律时,蜗壳入口断面的压力空间差异最小;当导叶采用两段折线关闭规律时,压力管道中心断面及转轮出口断面的压力空间差异最小;当导叶采用三段折线关闭规律时,活动导叶外缘断面及尾水管肘管段出口断面的压力空间差异最小。可见,不同的导叶关闭规律对流道压力空间分布特性有较大影响。表2中通过计算不同导叶关闭规律下的流道各监测断面压力影响因子的累加值,得出其总压力影响因子,用于量化导叶关闭规律对水电站流道压力空间分布差异的整体影响。结果

表明,当导叶采用两段折线式关闭规律时,计算得到的总压力影响因子值最小。说明三峡水电站采用两段折线式关闭规律较一段式和三段式关闭规律,流道各区域相同断面的压力分布最为均匀,空间差异性最小,可有效减小由于压力空间差异性而造成的局部水流紊动以及流道局部失稳,有利于水电站的安全稳定运行。

4 结论与讨论

(1) 当采用不同的导叶关闭规律时,水电站流道的不同区域则产生了不同的压力分布特性:水电

站压力管道及蜗壳入口区域的压力空间分布差异性较小,而活动导叶、转轮出口及尾水管肘管段区域的压力空间差异性较大。说明采用断面压力均值表示坝后式水电站流道压力瞬变特性有一定的局限性,可能造成断面压力极值的弱化,给水电站的稳定安全运行带来潜在威胁。

(2)坝后式水电站采用三段折线式关闭规律,相较于一段直线式和两段折线式关闭规律,可有效限制转轮转速上升的最大值,有利于防止水力过渡过程中发生机组飞逸破坏。

(3)在坝后式水电站甩全负荷过渡过程中,当采用两段折线式导叶关闭规律时,相较于一段直线式和三段折线式导叶关闭规律,能使得流道同一断面压力空间分布差异最小,有利于防止流道局部结构破坏,保障水电站的安全稳定运行。

在水力过渡过程中往往伴随着高频的压力脉动,但本文主要比较水力过渡过程中不同导叶关闭规律下水电站流道时均压力空间分布差异,忽略了这种高频脉动,可能与流道实际水流现象存在略微偏差,但不影响压力特性差异分析。

参考文献:

- [1] 王煜,田斌. 对水轮机导叶最优关闭规律的探讨[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007,29(2):113-115+132.
- [2] 唐红. 引水式电站水轮机调保两段关闭计算[J]. 甘肃水利水电技术, 2007,43(2):128-129.
- [3] CHAUDHRY M H. 实用水力瞬变过程:第三版[M]. 程永光,杨建东,赖旭,等译. 北京:中国水利水电出版社, 2015.
- [4] 洪振国. 水电站混合型调压井水力特性数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(2):162-167.
- [5] 贾岩,张晓宏,刁雪芬,等. 水电站尾水调压室断面面积敏感性分析研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(6):129-133.
- [6] 马善定,汪如泽. 水电站建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996.
- [7] KISHOR N, SAINI R P, SINGH S P. Simulation of reduced order hydro turbine models to study its hydraulic transient characteristics[C]// 9th International Multitopic Conference. IEEE INMIC, 2005.
- [8] LI Jian, YU Jun, WU Yadian. 3D unsteady turbulent simulations of transients of the Francis turbine[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2010,12(1):012001.
- [9] 李金伟,刘树红,周大庆,等. 混流式水轮机飞逸过渡过程的三维非定常湍流计算[C]// 中国水电设备学术讨论会. 2007.
- [10] 周大庆,吴玉林,刘树红. 轴流式水轮机模型飞逸过程三维湍流数值模拟[J]. 水利学报, 2010,41(2):233-238.
- [11] 夏林生,程永光,张晓曦,等. 灯泡式水轮机飞逸过渡过程3维CFD模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014,46(5):35-41.
- [12] LI Yiming, SONG Guiqiu, YAN Yunlei. Transient hydrodynamic analysis of the transition process of bulb hydraulic turbine[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 90:152-158.
- [13] 杨志炎,程永光,夏林生,等. 灯泡式水轮机甩负荷过渡过程三维数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018,51(10):854-860+875.
- [14] LIU Jintao, LIU Shuhong, SUN Yuekun, et al. Three dimensional flow simulation of load rejection of a prototype pump-turbine[J]. Engineering with Computers, 2013, 29(4):417-426.
- [15] 齐继贺. 混流式水轮机尾水管涡带及压力脉动数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(3):168-172.
- [16] 孟小瑞. 基于CFD混流式水轮机转轮空化及涡旋流动数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(2):173-177.
- [17] 李伟刚,宫让勤. 三峡右岸水电站水轮机过渡过程计算分析[J]. 大电机技术, 2009(1):34-37.
- [18] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.