

开阀时间对混流泵停机过程瞬态水力特性的影响研究

陈会向¹, 吴伟松¹, 王楚怡², 冯建刚¹, 黄富佳³, 夏臣智³, 阚 阚⁴, 徐 辉¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 南水北调(江苏)数智科技有限公司;
4. 河海大学电气与动力工程学院)

摘要:为研究真空破坏阀开启时间对混流泵机组停机过程瞬态水力特性的影响,建立了泵机组全过流几何模型,将实际的真空破坏阀装置简化为一个具有等效流通面积的球阀模型,采用动网格技术实现了球阀启闭与转轮旋转的耦合。通过设置提前开阀、联动开阀、延迟开阀3种控制方案,开展了停机瞬态过程的三维数值模拟,从外特性、压力脉动特性和内流特性3个角度探究了开阀时间对停机过程水力稳定性的作用机制,结合熵产理论揭示了停机过程中的能量耗散规律。研究结果表明:不同控制方案下外特性参数、压力波动、内流场变化等方面呈现相似的演变趋势,但在时间进程和变化幅值上存在差异;开阀时间对机组瞬态特性具有显著影响,相较于联动开阀方案,提前开阀方案虽能降低转矩与轴向力的峰值,但可能引发更为剧烈的初始水力冲击,而延迟开阀方案则会延缓工况转换,导致转矩、轴向力的反向极值分别增大至联动开阀方案的1.26倍和1.21倍,并加剧虹顶压强的脉动幅值;延迟开阀导致转轮区域能量损失显著升高;综合而言,联动开阀方案能在保证停机效率的同时,最有效地抑制水力振荡、降低载荷冲击与能量损耗,是实现平稳停机的最优策略。

关键词:混流泵机组;停机过程;水力特性;球阀;三维数值模拟;熵产理论

Research on influence of valve opening time on transient hydraulic characteristics of a mixed-flow pump during shutdown process//Chen Huixiang¹, Wu Weisong¹, Wang Chuyi², Feng Jiangang¹, Huang Fujia³, Xia Chenzhi³, Kan Kan⁴, Xu Hui¹(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. South-to-North Water Diversion (Jiangsu) Shuzhi Technology Co., Ltd.; 4. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University)

Abstract: To investigate the effects of opening time of vacuum breaking valve on transient hydraulic characteristics of a mixed-flow pump unit during the shutdown process, a full-flow geometric model of the pump unit was established. The actual vacuum breaking valve device was simplified into a ball valve model with equivalent flow area, and the coupling of ball valve opening-closing motion and impeller rotation was realized by the dynamic mesh technology. Three schemes with different valve opening times were designed, namely the advanced opening scheme, the synchronous opening scheme, and the delayed opening scheme. Three-dimensional numerical simulations of the shutdown transient process were carried out. The influence mechanism of valve opening time on hydraulic stability during the shutdown process was explored from three aspects: external performance, pressure fluctuation characteristics, and internal flow characteristics. Combined with the entropy production theory, the energy dissipation law during the shutdown process was revealed. The results show that the external performance parameters, pressure fluctuation and internal flow field evolution present similar variation tendencies under different valve opening schemes, while differences exist in temporal evolution process and variation amplitude. The opening time of the valve exerts remarkable impacts on the transient performance of the unit. Compared with the synchronous opening scheme, the advanced opening scheme reduces the peak values of torque and axial force, yet it may induce more severe initial hydraulic impact. In contrast, the delayed opening scheme delays the operating condition transition, which makes the reverse extreme values of torque and axial force increase to 1.26 times and 1.21 times those of the synchronous opening scheme, respectively, and amplifies the pressure fluctuation amplitude at the siphon crown. Moreover, the delayed opening scheme significantly increases the hydraulic energy loss in the impeller region. In summary, the synchronous opening scheme can effectively suppress hydraulic oscillation, reduce load impact and energy loss while maintaining favorable shutdown efficiency, which is the optimal strategy for stable shutdown of the pump unit.

基金项目:国家自然科学基金项目(52476028,52379086);江苏省创新支撑计划国际科技合作项目(BZ2023047)

作者简介:陈会向(1989—),女,副教授,博士,主要从事水力机械过渡过程研究。E-mail:chenhuixiang@hhu.edu.cn

通信作者:冯建刚(1976—),男,教授,博士,主要从事泵站工程水力学研究。E-mail:jgfeng@hhu.edu.cn

泵站作为水利工程建设中的关键设施,承担着区域防洪、除涝、灌溉、调水、供水等重要任务^[1-2]。在现代社会,泵站在保障水资源可利用性、促进农业发展和维持城市正常运转等方面起着至关重要的作用。然而,技术落后、机组效率低下等问题严重威胁着部分泵站的稳定运行与供水安全^[3]。因此,对现有泵站进行更新和改造是必要且紧迫的。

泵站在过渡过程中的安全稳定运行是保障其功能实现的关键。水泵机组在启动、停机和流量调节等过渡过程中,常常出现最不利工况。其中,由突然停电或操作引发的瞬态水力现象尤为复杂和危险,此时产生的剧烈压力波动与瞬态负荷^[4-5]会显著增加机械故障、结构破坏及水锤事故的风险,严重危及机组安全^[6-8]。在停机过程中,作为核心停机装置的真空破坏阀的作用至关重要。当泵机组停机时,真空破坏阀迅速开启,向泵体内补入空气,破坏可能形成的真空,从而有效防止飞逸反转、抬机以及巨大的反向水锤压力,对泵站部件起到关键性的保护作用。因此,深入研究真空破坏阀的运动规律与控制策略对泵站停机过渡过程的影响,对于优化泵站的运行与控制具有重大意义。

目前,国内外学者在泵及泵站过渡过程研究方面已取得显著进展。在瞬态特性研究方面,Tsukamoto等^[9]对离心泵启动过程的瞬态特性进行了开创性的试验与理论研究;Zhang等^[10]对比了自吸泵在不同启动速度下的瞬态性能;Kan等^[11]则利用熵产理论量化了轴流泵在不同运行模式下的能量损失。随着计算机技术与计算流体动力学方法的成熟,三维非定常数值模拟已成为研究过渡过程的高效可靠手段。例如:Kan等^[12]成功模拟了轴伸贯流泵机组的飞逸过渡过程;Chen等^[13]结合数值模拟与原型试验,深入探究了抽水蓄能机组启动过程中的水力特性。然而,现有研究多集中于启动过程或水泵水轮机的瞬态特性^[14-15],对于混流泵机组停机过程,特别是真空破坏阀控制策略的精细化研究仍相对有限。江如春等^[16]指出真空破坏阀是保障虹吸式出水流道安全的关键设备。饶天华等^[17]通过数值模拟分析了真空破坏阀的进口直径与开启压力对其水锤防护效果的影响。这些研究充分证实了真空破坏阀在瞬态防护中的有效性与重要性,但现有研究多停留在定性分析,针对其控制参数的系统性定量研究尚属空白,特别是在采用三维CFD动网格技术精确模拟真空破坏阀的开启过程以及对比分析

不同控制策略对瞬态流场及水力稳定性的影响方面,仍缺乏深入的探索。

基于此,本文以某立式混流泵机组为研究对象,基于ANSYS Fluent平台,采用SST $k-\omega$ 湍流模型及动网格技术,对其停机过渡过程进行了三维非定常数值模拟。与已有研究不同,本文重点关注停机过程中真空破坏阀的控制策略,通过固定机组转速开始下降的时刻,设定阀门的开启时间,系统性地探讨提前开阀、联动开阀与延迟开阀3种控制方案对机组内外特性、压力脉动等瞬态特性的影响规律,以期揭示不同控制策略下泵机组停机过程的瞬态响应机制,为优化泵站停机控制策略、保障机组安全稳定运行提供理论依据。

1 数值模拟方法及模型

1.1 控制方程及求解方法

采用CFD数值模拟方法计算泵机组停机过渡过程;考虑水体的不可压缩性,采用纳维-斯托克斯方程^[18]对其进行求解,基本方程中主要考虑连续性方程和动量守恒方程;采用结合了 $k-\varepsilon$ 模型与 $k-\omega$ 模型优势的SST $k-\omega$ 两方程模型^[19]作为三维数值模拟的湍流模型。

在求解器设置方面,本文采用PISO算法进行压力-速度耦合,与SIMPLE和SIMPLEC算法相比,该算法能更好地同时满足动量方程与连续性方程,不仅可以加快收敛速度,而且在瞬态问题的计算中具有优异的稳定性^[20]。参考压力值设定为一个标准大气压,壁面设置为无滑移壁面,时间步长设置为0.00133333s。每个时间步内的残差收敛标准设定为 10^{-6} ,最大迭代次数为20,重力加速度为 9.81 m/s^2 。

为精确模拟停机过渡过程中的瞬态特性,本文构建了球阀模型,以达到实际泵装置中真空破坏阀的效果。同时,将全流道计算域划分为静止域、转轮旋转域及球阀运动域,各域之间通过交界面进行数据传递。将转轮和球阀设置为刚体,其转速随时间的变化规律用函数定义,该函数通过用户自定义函数(UDF)中的宏进行编译和加载。转轮旋转与球阀启闭两种运动在时间与物理上协同作用,实现耦合,运动指令通过UDF在时间上同步,网格更新在步骤上顺序执行,而最终的物理相互作用通过在同一时间步内求解统一控制方程得以实现。

1.2 转轮转速力矩平衡方程

在水泵启动过程中,水泵的转速时刻发生变化,

其转速变化满足力矩平衡方程:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_H - M_f \quad (1)$$

式中: J 为机组转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 为转轮角速度, rad/s ; t 为时间, s ; M_H 为转轮叶片所受到的力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; M_f 为转轮叶片所受到的阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。由于轴承及轮盘摩擦较小,本文忽略这两部分对转轮转动的影响。

1.3 熵产理论

建立水力损失与熵产之间的关系,利用熵产理论对水泵的能量耗散进行量化评估,准确预测流动过程中的能量损失。由于水的比热容较高,通过传热产生的熵产可忽略不计。

单位体积总熵产率为:

$$\dot{S}_D''' = \dot{Q}/T \quad (2)$$

式中: \dot{S}_D''' 为单位体积总熵产率, $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; \dot{Q} 为能量耗散率, W/m^3 ; T 为开尔文温度, K 。

雷诺时均流动的总熵产率包括由时均速度引起的直接熵产率和由脉动速度引起的湍流熵产率^[21-24]。此外,壁面区域存在高速度梯度,会产生较强的壁面效应,从而造成熵产。Duan等^[25]提出了一种适应性广、计算精度高的壁面函数来计算近壁面处的熵产率:

$$\dot{S}_w'' = \tau_w u_w / T \quad (3)$$

式中: \dot{S}_w'' 为由壁面剪切应力引起的壁面熵产率, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; τ_w 为壁面剪切应力, Pa ; u_w 为近壁面第一层网格中心速度, m/s 。

总熵产可由各熵产率分别对计算域进行积分后求和得出,用水力损失直观表示能量损失:

$$h_{ep} = TS/\dot{m}g \quad (4)$$

式中: h_{ep} 为水力损失, m ; S 为熵产, W/K ; \dot{m} 为质量流量, kg/s 。

1.4 泵站计算模型

以某立式混流泵机组及全过流系统为研究对象,计算模型严格遵循原型泵站的几何尺寸,比例为1:1。完整的计算域包括进水池、肘形进水流道、转轮、导叶、虹吸式出水流道以及出水池。泵站运行水位设定为设计水位,其中进水侧水位为7.1 m,出水侧水位为13.1 m。进水池的进水面设置为压力进口,出水池的出水面设置为压力出口,进出水池的自由液面均采用明渠边界条件,进出水池及空气库的顶部均设置为压力进口,压力设置为0。泵机组及过流部件的主要设计参数包括:转轮直径3150 mm、球阀直径650 mm、叶片角度 -4° 、叶片数4、导叶数6、设计扬程6 m、设计流量 $37 \text{ m}^3/\text{s}$ 、转轮额定转速125 r/min、主机组转动惯量 $38410 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。各区域

均采用六面体结构网格,泵站模型计算域如图1所示,具体部位的网格如图2所示。

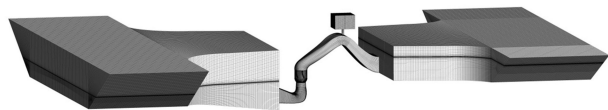


图1 泵站模型计算域

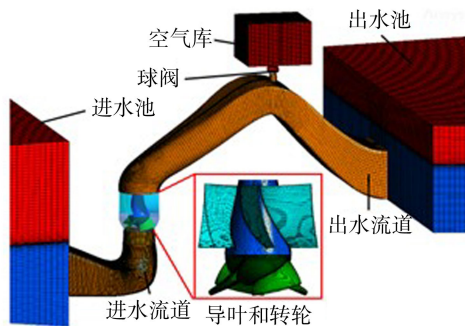


图2 泵站模型网格

为探究在停机过渡过程中泵机组内部的压力脉动特性,在进出水流道及转轮和导叶区域共设置12个压力脉动监测点和1个虹顶测点,压力脉动监测点P-IC1~P-IC4位于机组进水流道,P-IM1和P-IM2位于叶片上,P-GV1和P-GV2位于导叶区域,P-OC1~P-OC4位于机组出水流道,虹顶测点P-siphon位于虹吸式出水流道与球阀连接处。测点的具体位置如图3所示。

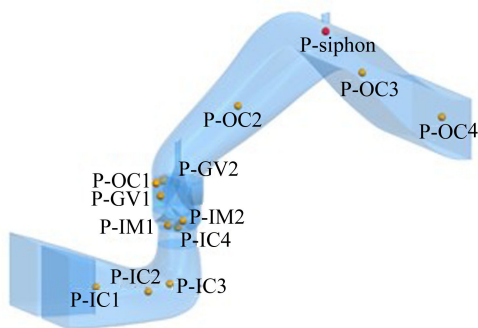


图3 机组流道测点位置示意图

1.5 网格无关性验证

采用ICEM软件对所建模型进行网格划分,并应用理查德森外推法进行网格无关性验证,采用网格收敛指数GCI来定量判断网络的计算结果是否收敛,评估验证网络的准确性^[26-28]。设立相同划分策略的3套网格方案,网格数量递增,尺度递减。根据美国机械工程师协会的建议,网格细化因子 r 应该大于1.3。3套网格的数量分别为322.55万、741.84万和1629.84万。分别选取水头和效率作为收敛性分析的变量,3套网格皆在设计工况下进行数值模拟计算。根据网格无关性验证,水头和效率作为分析变量时的网格收敛指数分别为2.21%

和 1.67%，说明网格已符合收敛标准（小于 3%）^[29]。综合考虑模拟精度与计算成本，最终确定网格总数为 741.84 万。

1.6 数值模拟验证

选取水泵效率、扬程系数和流量系数对模型试验和数值模拟结果进行对比。图 4(a) 对比了 6 个不同流量工况下的效率值，可以看到水泵效率的模拟值与试验值变化趋势较为一致，且在整个工况范围内吻合良好。图 4(b) 对比了扬程系数的模拟值与试验值，其模拟曲线与试验曲线基本重合。该结果表明，本文所采用的数值模型、网格策略及参数设置能够准确地预测泵机组的实际外特性，为后续停机瞬态过程的模拟研究提供了可靠依据。

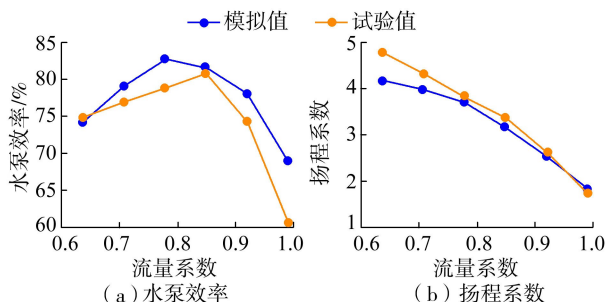


图 4 试验和模拟结果对比

2 不同开阀时间控制方案下机组停机过程水力特性

2.1 停机控制方案

转轮均以额定转速 125 r/min 运行至 5.6 s，此时电动机断电，转轮转速开始下降。设置 3 种开阀时间控制方案（表 1）：提前开阀方案（方案 S1），球阀在 0.5 s 到 0.6 s 打开；联动开阀方案（方案 S2），球阀在 5.5 s 到 5.6 s 打开；延迟开阀方案（方案 S3），球阀在 10.5 s 到 10.6 s 打开。

表 1 3 种控制方案下的特征时刻 单位：s

方案	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8
S1	0.5	3.0	5.5	7.5	10.0	10.5	16.5	25.0
S2	0.5	3.0	5.5	8.0	10.5	11.0	17.0	25.5
S3	0.5	3.0	5.5	8.0	11.5	12.0	19.0	29.0

同时，为了便于后续的对比如分析，在每种方案下分别取 8 个特征时刻，具体如表 1 所示。在 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻，转速均为额定转速；在 t_4 时刻，转轮转速降至额定转速的 50%；在 t_5 和 t_6 时刻，转轮转速接近零值，在 t_5 时刻，转轮仍为正转，在 t_6 时刻，转轮为反转；在 t_7 时刻，转轮转速达到最大反转转速；在 t_8 时刻，转轮转速为 0，标志着水泵机组停机的完成。

对转轮旋转状态的界定依据如下：设定机组初始额定旋转方向为正转，其角速度值为正。在瞬态

计算过程中，通过耦合求解的 UDF 实时监测转轮的角速度。当监测到的角速度数值由正过零转为负时，判定机组进入反转状态，即水轮机工况。因此，文中提及的“正转”“反转”“零转速点”均有明确的、基于求解器输出数据的量化依据。

2.2 不同控制方案下气液两相的变化规律

以 8 个时刻下的气液两相分布图（图 5）为依据，对 3 种控制方案下的气液两相变化规律进行分析。

以方案 S2（图 5(b)）为例对虹吸式出水通道内的空气体积分数变化进行分析。在 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻，机组维持额定转速运行，球阀处于关闭状态，空气无法进入流道； t_3 时刻后，球阀开启，空气开始进入流道；直至 t_4 时刻，转轮转速降至额定转速的 50%，由于流道中仍有较大的正向流速，空气进入流道后在出水通道下降段上部形成空气囊，同时出水通道下降段水面快速下降；在 t_5 和 t_6 时刻，转速趋零，此时下降段水面已经降至出水池水面位置，上升段水面位于虹顶处，出水通道内水流已被空气切断，形成断流；在达到最大反转转速的 t_7 时刻及后续减速过程中，出水通道上升段水面位置逐渐下降，直至 t_8 时刻；在 t_8 时刻，上升段水面稳定在进水池水面位置，流道内外压力达到平衡，停机过程基本结束。

当球阀开启时刻滞后于转轮降速过程时，出水通道中的气液两相分布情况如图 5(c) 所示。在方案 S3 中，球阀直至 10.6 s 才开启。在阀门开启后的 t_5 时刻，空气才少量进入流道中，此后的过程与方案 S2 相同，直至 29 s 时，出水通道中的气液分布才算稳定。

方案 S1（图 5(a)）在机组尚处于稳定运行的 0.6 s 时刻即开启球阀，实现预充气。在 $t_2 \sim t_3$ 期间，电机未断电，转轮保持额定转速旋转，出水通道内逐渐形成堰流状态，其中自由液面的存在产生了潜在的失稳可能：自由表面波动的风险、周期性涡脱落可能诱发的结构振动，以及系统流体动力特性改变带来的耦合失稳可能性，这是与方案 S2 不同的地方，而 t_5 时刻后的过程基本与方案 S2 一致，并在几乎相同的时刻完成停机。

综上所述，通过对 3 种控制方案的对比可知：方案 S3 因补气进程滞后，导致停机达到稳定所需的时间最长；方案 S1 虽然能通过预充气的方式让空气提前进入流道，但实现停机的时间基本与方案 S2 一致，且其过程中会出现堰流现象，影响机组稳定运行；相比之下，方案 S2 最为可控和稳定。

2.3 不同控制方案下机组外特性分析

3 种控制方案下的停机过程外特性变化如图 6 所示。由图 6 可知，3 种方案在转速、虹顶测点压

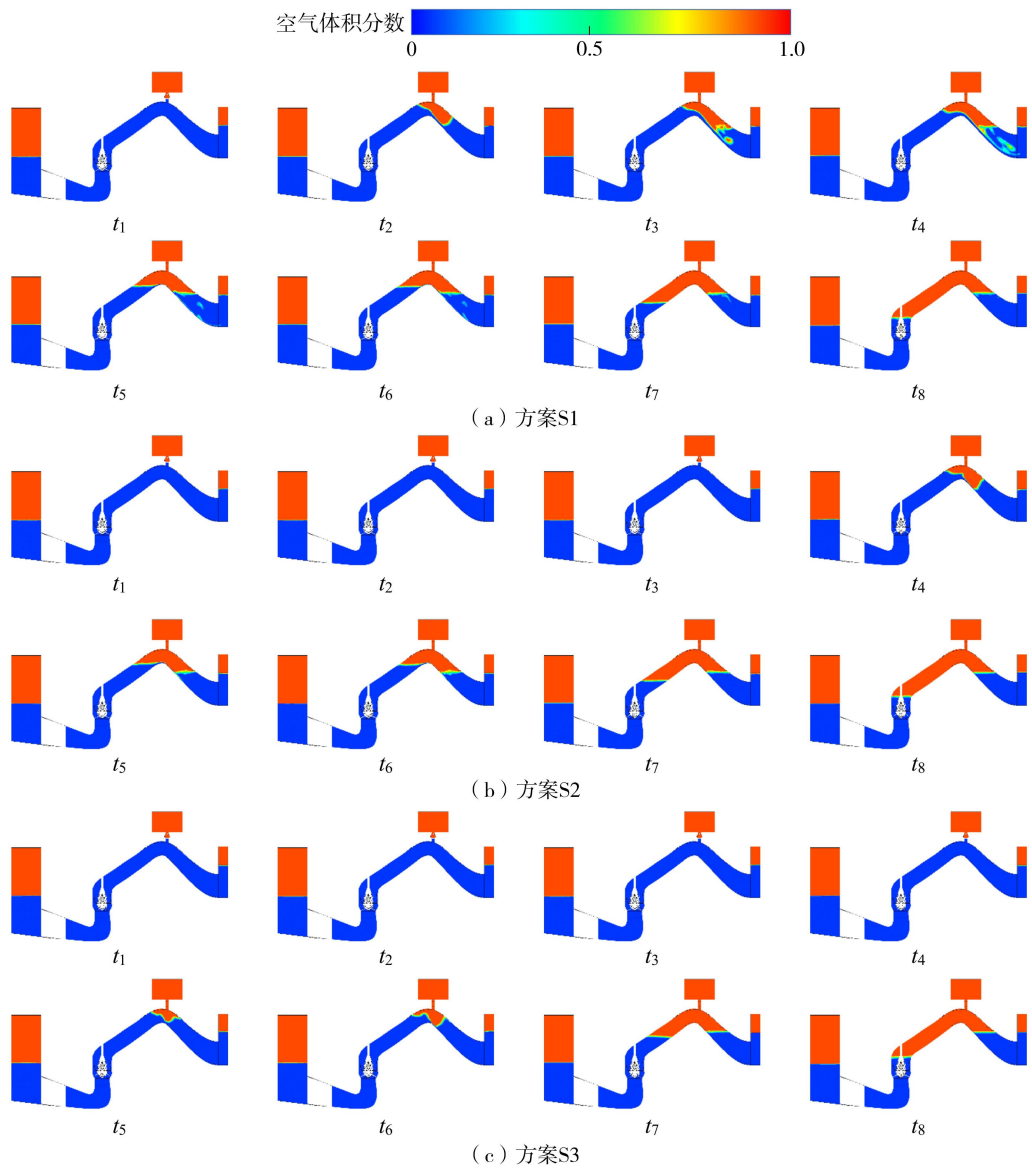


图5 3种控制方案下的气液两相分布

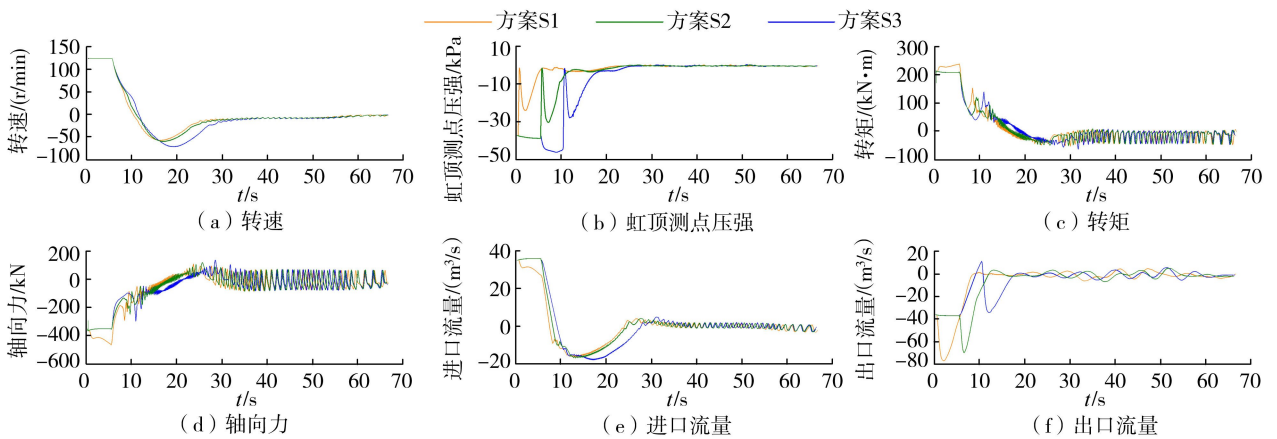


图6 3种控制方案下的外特性变化对比

强、转矩、轴向力与进出口流量等参数上变化趋势相近,但在响应速度、极值大小与过渡过程平稳性方面存在差异。

以方案 S2 为例,进口流量于 8.2 s 变为 0,机组

转速于 10.9 s 变为 0,最大反转转速于 17 s 达到 -58.9 r/min ,为额定转速的 47%。5.6 s 时机组开始停机,此时电机断电且空气阀同时开启,停机过程依次经历水泵工况、制动工况、水轮机工况。5.6~

8.2 s 为停机过程中的水泵工况,在此期间,进口流量迅速下降,由于虹吸式出水流道的几何特性,其下降段水面在球阀打开时迅速下降,导致出口流量先增大后减小。虹顶测点压强在开阀瞬间升至外界大气压,之后随着流态变化,虹顶测点处恢复真空,伴随着振动其真空值逐渐减小。叶片转矩和轴向力在水泵工况下均迅速下降。8.2~10.9 s 为停机过程中的制动工况,此时进口流量为倒流,转轮转速仍为正转并迅速减小,虹顶测点压强逐渐增大,真空度随之减小。在此期间,转矩和轴向力由迅速减小转为迅速增大。10.9 s 后,停机过程进入水轮机工况,由于空气已经截断水流,出水流道内的回流水体逐渐减少,进口流量及反转转速先增大后减小直至为0。转矩和轴向力均绕零值做一定程度的振荡直至稳定。

方案 S3 将开阀时间延后至 10.6 s,其进口流量于 9.1 s 变为 0,机组转速于 11.5 s 变为 0,最大反转转速于 19 s 达到 -71.2 r/min ,为额定转速的 57%。比较发现,在 5.6 s 之前,方案 S3 和方案 S2 的曲线几乎重合,由于 5.6 s 时电机断电,但球阀仍未打开,在后续的 5 s 内,转速持续减小,虹顶测点压强增大,出口流量减小,直到球阀打开,方案 S3 的各参数变化趋势才和方案 S1 一致,但转矩、轴向力的反向极值分别为方案 S2 的 1.26 倍和 1.21 倍。

方案 S1 提前了开阀时间,实现了预充气,其进

口流量于 7.4 s 变为 0,机组转速于 10 s 时变为 0,最大反转转速于 16.5 s 达到 -56.9 r/min ,为额定转速的 45%。由于在 0.6 s 时就将球阀打开,导致和方案 S2 相比,方案 S1 各项数据的响应和变化都有一定程度的提前。在 0.6~5.6 s 期间,球阀打开的同时转轮还维持额定转速,这使得方案 S1 的转矩、轴向力以及出口流量出现了更大的幅值。

对比发现,3 种控制方案的各项外特性参数均在停机过程中出现剧烈波动,但方案 S1 和 S3 的波动程度更大,且方案 S3 实现停机过程所需的时间更长,相比之下,方案 S2 最稳定和高效。

2.4 不同控制方案下压力脉动特性分析

在机组流道中设置 12 个压力脉动监测点,具体位置见图 3。在机组停机过程计算中,获取 3 种控制方案下监测点的压力脉动值,得到机组流道压力脉动变化情况,如图 7 所示。

由图 7 可见,不同区域测点的压强变化呈现不同的趋势,而相同区域测点的变化趋势相近,但波动幅度不同。进水流道内的压力脉动整体较弱,其压强变化主要呈轻微波动;而出水流道内各监测点压强变化较为剧烈,变化幅度更大。进出水流道这 8 个监测点中,靠近转轮进口区域的监测点 P-IC4 与靠近导叶出口区域的监测点 P-OC1 的压力脉动最为强烈。

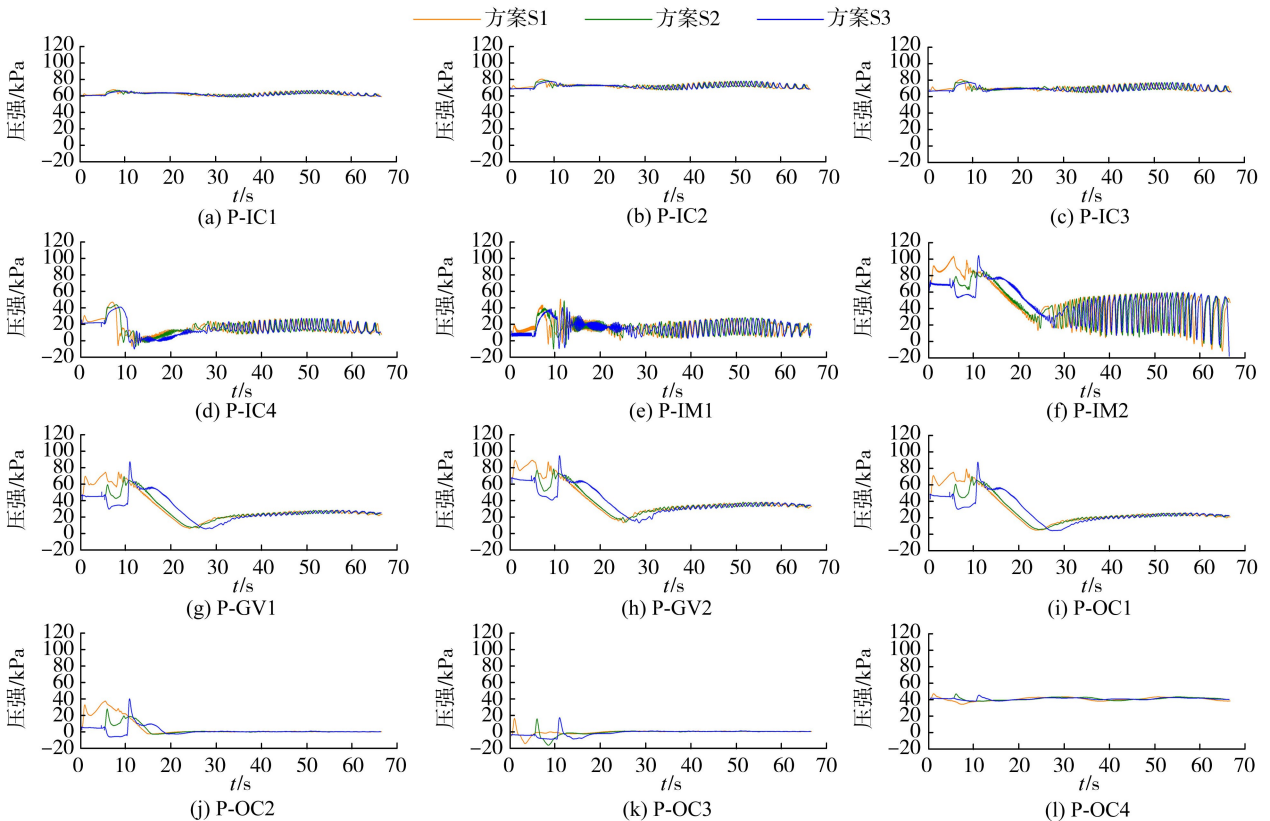


图 7 3 种控制方案下不同监测点压力脉动变化对比

以方案 S2 为例进行分析, P-IC1~P-IC3 这 3 个测点位于进水流动道内, 压强的初始值均在 60~80 kPa 之间, 且都是在电机断电后有轻微的增大, 增大幅值不超过 80 kPa, 随后缓慢减小, 最后稳定在初始值附近。P-IC4 和 P-IM1 测点压强增大的幅度和前 3 个测点相比更大, 比 P-IM2、P-IGV1、P-IGV2 和 P-OC1 这 4 个测点更加缓和, 但这 4 个测点的压强在增大后有一段较长的减小过程, 最后均不同程度地绕零值波动。P-OC2~P-OC4 测点的压强则在轻微波动后稳定于零。

对于 3 种控制方案, 方案 S1 的压强最先开始变化, 5.6 s 前, 方案 S2 和 S3 的压强变化曲线保持一致, 5.6 s 后, 方案 S2 的压强变化趋势和方案 S1 开始的变化趋势一致, 方案 S3 由于此时球阀还未打开, 压强的变化较方案 S2 更为滞后。综上所述, 方案 S3 的各测点压强变化最为剧烈, 幅值最大, 以测点 P-GV2 为例, 在 10 s 前后的压强变化阶段, 方案 S3 的最大和最小压强分别为方案 S2 的 1.22 倍和 0.78 倍, 方案 S1 的变化剧烈程度和方案 S2 近似, 且更先达到稳定。

2.5 停机过程中内流特性分析

为更好地了解不同开阀时间在停机过程中对机组内流特性的影响, 分别对 3 种控制方案下不同时刻机组转轮区域和导叶区域的流速、压强、湍动能以及熵产率变化进行进一步对比分析。具体变化如图 8 所示。

如图 8(a) 所示, 3 种控制方案下整个流场的流速随着时间的推移逐渐减小, 导叶区域的流动逐渐趋于静止, 转轮仅在叶片附近存在一些细微水流流动, 在 t_5 时刻, 3 种控制方案均在叶片的吸力面处形成了块状的高速区, 随着时间的推移, 转轮开始反转, 水泵机组由制动工况进入水轮机工况, 高速区逐渐减小, 最后变成紧贴叶片吸力面的条状。对比 3 种控制方案, 方案 S1 通过早期补气主动重构流场, 在 t_2 时刻即削弱转轮出口高速核心区, 并于 t_3 时刻完成高速区从吸力面向压力面的翻转, 实现了气液两相流态的平稳切换; 方案 S3 由于补气的滞后, 高流速区域的大小明显小于前两种方案; 而方案 S2 的流场演变介于其他两种方案之间, 过渡更为连续。

图 8(b) 为停机过程中的压强变化。停机初期, 方案 S1 即在叶片压力面及下游导叶区域构筑高压缓冲区, 实现了压强的前瞻性调平。方案 S2 呈现过渡特征。至反转阶段, 方案 S3 在叶片吸力面侧形成明显的条状低压区, 在机组实现停机时, 在叶片吸力面侧的压强比前两种方案更低。

湍动能场的演化揭示了机械能耗散路径的差异。如图 8(c) 所示, 额定工况下, 湍动能仅分布于导叶头部动静干涉区域。方案 S1 通过气相引入, 在导叶区预先构建了能量缓冲机制。当转速降至 50% 时, 方案 S2 和 S3 出现湍流真空, 能量以势能形式危险积聚; 而方案 S1 则在叶片压力面与导叶流道中部形成新的湍流区, 实现能量的渐进式耗散。在

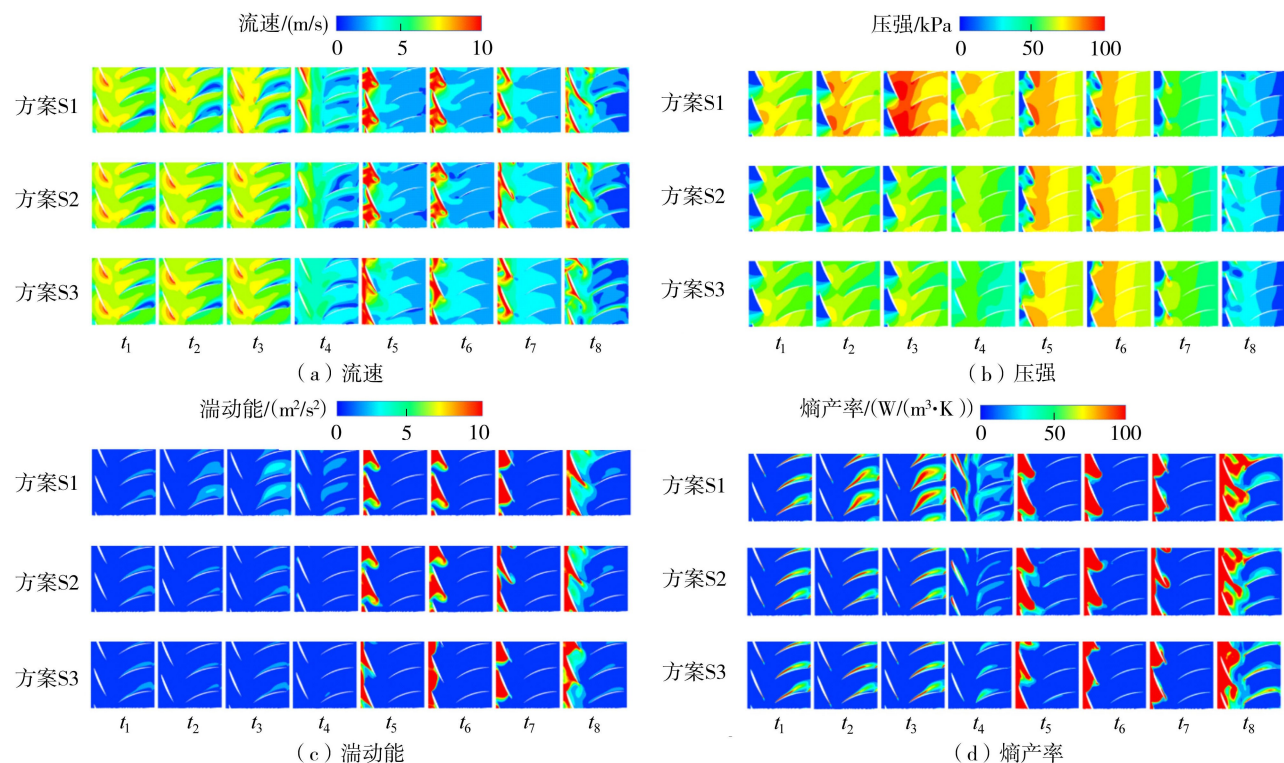


图 8 3 种控制方案下特征时刻内流场变化对比

正转接近零转速时刻,所有控制方案均在叶片吸力面出现大尺度分离引发的高湍流区,但方案 S3 呈现明显的受限失稳特征,预示着后续更剧烈的能量释放。

从热力学层面看,熵产率场揭示了不可逆损失的本质。如图 8(d) 所示,方案 S1 通过主动激发并扩大熵产区,系统性地提升了流场等效阻尼。在正转接近零转速时刻,各方案均于叶片吸力面达到熵产峰值,但方案 S1 展现出完全发展的耗散特征,而方案 S3 则表现为集中且受限的失稳状态。高熵产区从正转吸力面向反转压力面的翻转,标志着驱动机制的切换,方案 S1 在此过程中实现了更均匀、更可控的能量耗散分布。

上述分析表明,控制策略的本质差异体现在能量处理方式上:方案 S1 通过压强调平、湍流损失稳和熵产预设实现能量的分级耗散;方案 S2 在多数阶段表现出适中的过渡特性;方案 S3 则因缓冲缺失,导致能量集中释放,引发剧烈飞逸。从热力学角度看,方案 S1 将停机过程从熵产高度集中、峰值巨大的危险过程,优化为熵产分布均匀、峰值平滑的可控过程,展现出最优的流场主动管理能力。

然而,虽然方案 S1 通过前瞻性流场管理,获得了最优的内流稳定性与能量耗散品质,但其代价是引发了显著的初始水力冲击,将风险前置。相比之下,方案 S2 虽未追求极致的流场有序性,但通过同步响应机制,在转轮降速起始时刻协同介入,有效规避了方案 S1 的初始冲击与方案 S3 的极端反转载荷,是实现泵机组安全停机的最优控制策略。

3 结论

a. 在 3 种不同开阀时间控制方案下,机组停机过程中的外特性参数、压强波动与能量损失的演变趋势总体一致,但其动态响应的的时间进程与变化幅值存在明显差异。

b. 在停机过渡过程中,提前开阀方案凭借预充气的机制,有效促进了空气的均匀分布,获得了最有序的气液界面与更优的瞬态流场品质,但因此引入了较大的初始水力冲击;联动开阀方案在停机完成时间与稳定性之间取得了最佳平衡;而延迟开阀方案则显著延缓了工况转换进程,导致转矩、轴向力的反向极值分别增大至联动开阀方案的 1.26 倍和 1.21 倍,增大了压力脉动强度。

c. 延迟开阀方案导致转轮区域在关键制动反转阶段的能量耗散最为显著,其熵产率远高于提前开阀与联动开阀方案。综合内部流场稳定性与外部载荷特性可知,联动开阀是平衡停机效率、载荷控制

与能量损耗的最优策略。

d. 本文研究在模型简化与参数维度上存在一定局限:基于不可压缩流与刚性壁面假设,结论更侧重于宏观水力稳定性评估,对极端水锤压力的预测需后续引入流固耦合模型;聚焦于阀门开启时间,将动作简化为瞬时,未来可拓展至包含开启速度在内的多维优化。

参考文献:

- [1] Tse H. Challenges for pumping station design in water industries: an overview of impacts from climate change and energy crisis[J]. *Water Research*, 2024, 253: 121250.
- [2] 徐辉, 谢锋, 张睿, 等. 城市污水提升双层泵站阶梯消能工水力特性分析及改善[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(5): 81-89. (Xu Hui, Xie Feng, Zhang Rui, et al. Analysis and improvement of hydraulic characteristics of step energy dissipators in double-layer pumping stations for urban sewage lifting[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(5): 81-89. (in Chinese))
- [3] 周璐, 张健, 孟凡继, 等. 泵站水电转换系数的 BP 神经网络模型[J]. *水利经济*, 2024, 42(6): 71-75. (Zhou Lu, Zhang Jian, Meng Fanji, et al. BP neural network model of hydroelectricity conversion coefficient of pumping station[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, 42(6): 71-75. (in Chinese))
- [4] Wang Wenjie, Tai Geyuan, Pei Ji, et al. Numerical investigation of the effect of the closure law of wicket gates on the transient characteristics of pump-turbine in pump mode[J]. *Renewable Energy*, 2022, 194: 719-733.
- [5] Li Deyou, Fu Xiaolong, Wang Hongjie, et al. Evolution mechanism of a prototype pump turbine after pump power-off[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(10): 106109.
- [6] Li Q, Xin L, Yao L, et al. Flow characteristics analysis of load rejection transition process in pumped storage unit based on cavitation model[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2024, 17(9): 2005-2015.
- [7] Li Zhenggui, Xu Lixin, Wang Dong, et al. Simulation analysis of energy characteristics of flow field in the transition process of pump condition outage of pump-turbine[J]. *Renewable Energy*, 2023, 219: 119480.
- [8] 郑源, 赵雪莹, 周文杰, 等. 空化诱导的离心泵叶轮区流动特性与压力脉动分析[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(10): 244-251. (Zheng Yuan, Zhao Xueying, Zhou Wenjie, et al. Analysis of flow characteristics and pressure pulsation in impeller region of centrifugal pump induced by cavitation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(10): 244-251. (in Chinese))
- [9] Tsukamoto H, Ohashi H. Transient characteristics of a

- centrifugal pump during starting period [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1982, 104(1): 6-13.
- [10] Zhang Yuliang, Zhu Zuchao, Zhao Yanjuan, et al. Comparative experiments on a self-priming pump delivering water medium during rapid and slow starting periods [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2021, 45(4): 1007-1019.
- [11] Kan Kan, Zhao Feng, Xu Hui, et al. Energy performance evaluation of an axial-flow pump as turbine under conventional and reverse operating modes based on an energy loss intensity model [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(1): 015125.
- [12] Kan Kan, Zheng Yuan, Chen Huixiang, et al. Numerical simulation of transient flow in a shaft extension tubular pump unit during runaway process caused by power failure [J]. *Renewable Energy*, 2020, 154: 1153-1164.
- [13] Chen Huixiang, Liu Hanzhong, Kan Kan, et al. Analysis of hydraulic characteristics during low head start-up transition of pumped storage units based on entropy production theory [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 102: 114042.
- [14] 边少康, 张小莹, 李刚, 等. 重力流关阀规律及空气阀优化研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 55-61. (Bian Shaokang, Zhang Xiaoying, Li Gang, et al. Study on valve-closure law of gravity flow and optimization of air valve [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 55-61. (in Chinese))
- [15] 黄时锋, 周文萍, 程佳秋. 输水系统水泵失电工况出口阀关闭规律的优选 [J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(3): 56-60. (Huang Shifeng, Zhou Wenping, Cheng Jiaqi. Optimization research on closure law of outlet valve under power failure condition in water conveyance system [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34(3): 56-60. (in Chinese))
- [16] 江如春, 王荣国, 宋佳. 大型泵站虹吸式流道真空破坏阀关键技术研究应用 [J]. *水利建设与管理*, 2023, 43(10): 38-41. (Jiang Ruchun, Wang Rongguo, Song Jia. Research and application of key technologies for vacuum breaker in siphon flow channel of large pumping station [J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2023, 43(10): 38-41. (in Chinese))
- [17] 饶天华, 秦战生, 刘绍谦, 等. 真空破坏阀对虹吸断流管道的水锤防护效果 [J]. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(12): 1243-1248. (Rao Tianhua, Qin Zhansheng, Liu Shaoqian, et al. Water hammer protection effect of vacuum break valve on siphon cut-off pipeline [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(12): 1243-1248. (in Chinese))
- [18] Cavazzini G, Houdeline J B, Pavese G, et al. Unstable behaviour of pump-turbines and its effects on power regulation capacity of pumped-hydro energy storage plants [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 399-409.
- [19] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [20] Issa R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. *Journal of Computational Physics*, 1986, 62(1): 40-65.
- [21] Xu Zhe, Zheng Yuan, Kan Kan, et al. Flow instability and energy performance of a coastal axial-flow pump as turbine under the influence of upstream waves [J]. *Energy*, 2023, 272: 127121.
- [22] 周罗香, 张志兵, 孙政, 等. 基于熵产理论的水泵水轮机驼峰区内部水力损失特性研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 62-67. (Zhou Luoxiang, Zhang Zhibing, Sun Zheng, et al. Study on internal hydraulic loss characteristics of pump-turbine hump region based on entropy generation theory [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 62-67. (in Chinese))
- [23] Shen Simin, Qian Zhongdong, Ji Bin. Numerical analysis of mechanical energy dissipation for an axial-flow pump based on entropy generation theory [J]. *Energies*, 2019, 12(21): 4162.
- [24] Kock F, Herwig H. Local entropy production in turbulent shear flows: a high-Reynolds number model with wall functions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(10/11): 2205-2215.
- [25] Duan Lu, Wu Xiaolin, Ji Zhongli, et al. The flow pattern and entropy generation in an axial inlet cyclone with reflux cone and gaps in the vortex finder [J]. *Powder Technology*, 2016, 303: 192-202.
- [26] Stern F, Wilson R V, Coleman H W, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations, part 1: methodology and procedures [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(4): 793-802.
- [27] Roy C J. Grid convergence error analysis for mixed-order numerical schemes [J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(4): 595-604.
- [28] Trivedi C, Cervantes M J, Gandhi B K. Investigation of a high head Francis turbine at runaway operating conditions [J]. *Energies*, 2016, 9(3): 149.
- [29] Wilson R V, Stern F, Coleman H W, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations, part 2: application for RANS simulation of a cargo/container ship [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(4): 803-810.

(收稿日期: 2025-11-08 编辑: 俞云利)