

导叶时序对多级液力透平压力脉动的影响

王晓晖¹, 蒋虎忠¹, 白小榜², 苗森春¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 重庆水泵厂有限责任公司, 重庆 400000)

摘要:为研究导叶时序对多级液力透平性能的影响,以两级径流式液力透平为研究对象,建立以首级导叶周向位置为基准,依次将次级导叶周向旋转 10° 的5种时序方案。基于RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对不同导叶时序位置引起的内流瞬态特性进行了研究。结果表明:导叶时序对液力透平外特性曲线有一定影响,但对各过流部件压力脉动影响更为显著;各监测点处压力脉动主频幅值随着导叶交错角度的增大呈现出不同的规律,当交错角度为 40° 时液力透平内压力脉动降幅最大,首、次级叶轮出口和次级导叶过渡段主频幅值相比 0° 方案分别降低了11%、51%和16%;导叶时序对首、次级导叶出口压力脉动几乎无影响。

关键词:多级液力透平;时序效应;压力脉动;动静干涉;导叶

中图分类号:TK734 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.06.005

[引用本文格式]王晓晖,蒋虎忠,白小榜,等.导叶时序对多级液力透平压力脉动的影响[J].热能动力工程,2023,38(6):40-47.
WANG Xiao-hui, JIANG Hu-zhong, BAI Xiao-bang, et al. Influence of guide vane clocking on pressure pulsation of multistage hydraulic turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6):40-47.

Influence of Guide Vane Clocking on Pressure Pulsation of Multistage Hydraulic Turbines

WANG Xiao-hui¹, JIANG Hu-zhong¹, BAI Xiao-bang², MIAO Sen-chun¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China, Post Code:730050;
2. Chongqing Pump Industry Co., Ltd., Chongqing, China, Post Code:400000)

Abstract: In order to study the effect of guide vane clocking on the performance of multi-stage hydraulic turbines, taking the two-stage radial-flow hydraulic turbine as the research object, five clocking schemes were established in which the circumferential position of the first-stage guide vane was used as the benchmark, and the secondary guide vane was rotated by 10° in the circumferential direction successively. Based on the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, the transient characteristics of the inner flow caused by different guide vane clocking positions were studied. The results show that the guide vane clocking has a certain influence on the external characteristic curve of the hydraulic turbine, but it has a more significant influence on the pressure pulsation of the flow components; the main frequency amplitude of the pressure pulsation at each monitoring point presents different laws with the increase of the guide vane staggered angle. When the staggered angle is 40° , the pressure pulsation reduction amplitude in the hydraulic turbine is biggest, the main frequency amplitudes of the primary and secondary impeller outlet and the secondary guide vane transition section are reduced by 11%, 51% and 16% respectively compared with the 0° scheme; the guide vane clocking has almost no effect on the pressure pulsation at the outlet of the primary

收稿日期:2022-06-02; 修订日期:2022-07-16

基金项目:国家自然科学基金(51569013);甘肃省杰出青年基金(20JR10RA203);河南省博士后科研启动项目(2021-181)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51569013); Outstanding Youth Fund of Gansu Province (20JR10RA-203); Postdoctoral Research Program of Henan Province (2021-181)

作者简介:王晓晖(1986-),男,兰州理工大学副教授。

and secondary guide vanes.

Key words: multistage hydraulic turbine, clocking effect, pressure pulsation, rotor – stator interference, guide vane

引 言

时序效应是指改变转子与静子或静子与静子的相对周向位置引起性能变化的一种现象^[1-2]。对时序效应的研究最早起源于压气机,时序对压气机等气力机械性能影响的研究较为广泛。任晓栋等人^[3]研究了 1.5 级跨声压气机内部时序效应,结果表明,减小导叶和静叶的轴向间隙可以寻求最佳时序位置,使压气机效率最高。Kusterer 等人^[4]研究了时序效应对涡轮时均效率的影响,结果表明,时序效应对时均效率影响的程度与静子间的叶片数比值有关。近年来,时序效应对水力机械的性能影响研究已逐渐成为该领域的一个热点问题。彭小娜等人^[5]研究了不同导叶时序位置下离心泵叶轮叶片载荷的变化,结果表明,时序效应对叶片压力面载荷影响较大,对吸力面载荷影响甚微。谈明高等人^[6]结合计算流体力学(CFD)和有限元法(FEM)研究了节段式多级离心泵叶轮的时序位置对振动性能的影响,结果表明,将次级叶轮与首级叶轮交错布置后,多级泵整体振动水平明显下降。

近年来,国内外学者针对单级液力透平的时序效应开展了卓有成效的研究。Guan 等人^[7]研究了单级导叶式液力透平内时序效应产生机理,结果表明,导叶和蜗壳内能量变化是导致时序效应产生的主要原因。柴立平等人^[8]研究了导叶时序对多级液力透平的首级性能影响,结果表明,当导叶两叶片中间位置与蜗壳进口中心面重合时其回收水头最高,透平内压力脉动幅值最小。近年来节能降耗引起世界各国的普遍重视,液力透平被广泛应用于液体余压能的回收,多级液力透平相比单级液力透平回收水头更高^[9-11],主要应用在耗能较大的石油化工、海水淡化等行业中,时序对其运行稳定性的影响不可忽略。目前,国内外有关时序对多级液力透平性能影响方面的研究鲜有报道,开展多级液力透平导叶时序效应研究有重要理论意义和工程应用价值。

本文以两级径流式液力透平为研究对象,模拟

次级导叶 5 个不同周向位置时液力透平内部流场变化情况,从而分析导叶时序对多级液力透平内流瞬态特性的影响。

1 数值模拟方法

1.1 计算模型

选取流量 230 m³/h、单级水头 138.5 m、转速为 2 980 r/min 的两级液力透平为研究对象。主要结构参数:叶轮进口直径为 296 mm,出口直径为 170 mm,叶片数为 6;正导叶进口直径为 170 mm,出口直径为 396 mm,叶片数为 7;反导叶进口直径为 403 mm,出口直径为 306 mm,叶片数为 7。

1.2 数值计算方法

将液力透平流体域分为 6 个部分,分别为进水室、首级导叶、首级叶轮、次级导叶、次级叶轮、出水室,采用 CREO 软件对每个部分单独建模。流体计算域如图 1 所示。

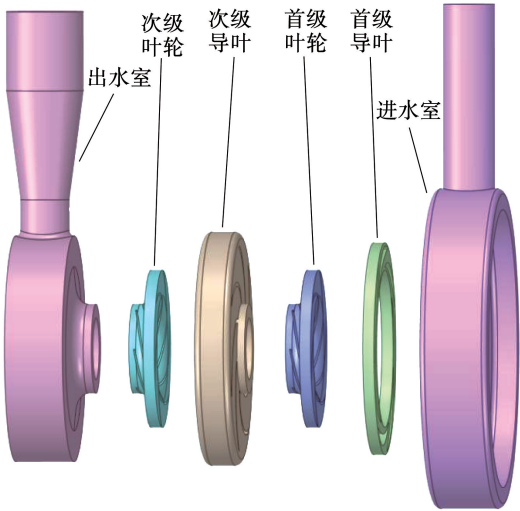


图 1 流体计算域
Fig.1 Fluid computing domain

采用 ANSYS FLUENT MESHING 对液力透平流体域进行非结构化多面体网格划分。对多套不同密度的网格进行了网格独立性验证,以额定流量下水头的预测结果达到稳定为标准来判断网格独立性,最终确定整个计算域网格总数量为 213 万。其网格

无关性验证如图 2 所示。部分网格结构如图 3 所示。

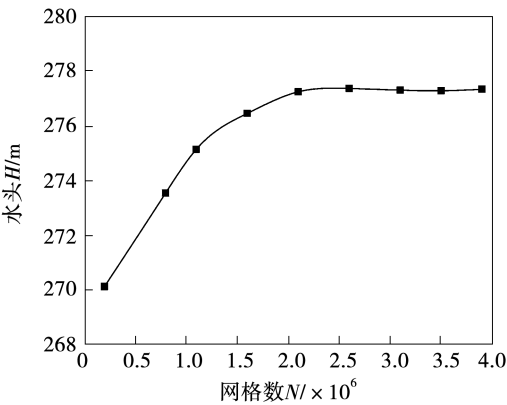


图 2 网格无关性验证

Fig.2 Mesh independence verification

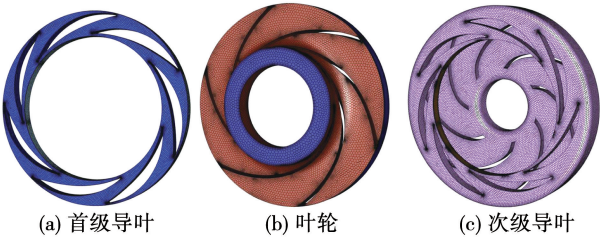


图 3 部分网格结构

Fig.3 Partial mesh structure

采用 ANSYS FLUENT 对液力透平内流场进行定常与非定常数值模拟,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 SIMPLEC 算法,边界条件设置为压力进口和质量流量出口。固壁采用无滑移边界条件,近壁区采用标准壁面函数,收敛精度设置为 10^{-5} 。

采用多参考系模型 (MRF) 进行定常计算,采用滑移网格模型 (SMM) 进行非定常计算,非定常计算的初始条件为定常计算的结果。取叶轮每旋转 3° 所需时间为时间步长,即为 1.68×10^{-4} s。非定常计算总时间是叶轮旋转 8 个周期所需时间,取第 8 周期数据进行数据分析。

2 研究方案

2.1 导叶时序方案

以首级导叶周向位置为基准,对次级导叶周向位置进行交错布置,次级导叶交错布置角 θ (导叶出口边与基准位置间的夹角) 如图 4 所示。因首级导

叶与次级导叶叶片数均为 7,考虑到叶片厚度及加工误差影响,两叶片夹角为 50° 。故共设计 5 种交错角度计算方案,交错角度分别为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 和 40° ,将 5 种方案分别命名为 E0, E10, E20, E30, E40。

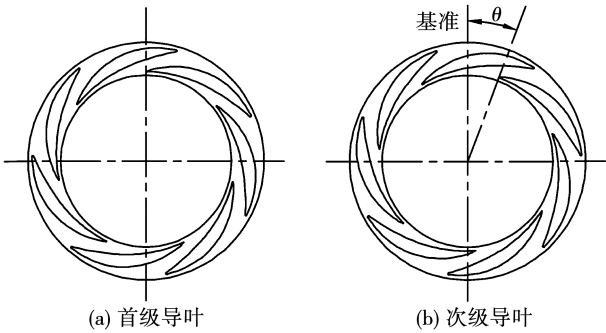


图 4 次级导叶时序位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of secondary guide vane timing position

2.2 监测点选取

为研究导叶时序对液力透平内瞬态特性的影响,在透平内设置监测点。选取动静干涉较为明显的首、次级导叶出口位置作为压力脉动监测点,记为 Y1, Y2。在距离叶轮中间平面 50 mm 和轴线 72 mm 处设置首级和次级叶轮出口压力脉动监测点 L1 和 L2。在次级导叶过渡段设置监测点 T1 (距次级叶轮中心平面 22 mm、轴线 214 mm)。各监测点具体位置如图 5 所示。

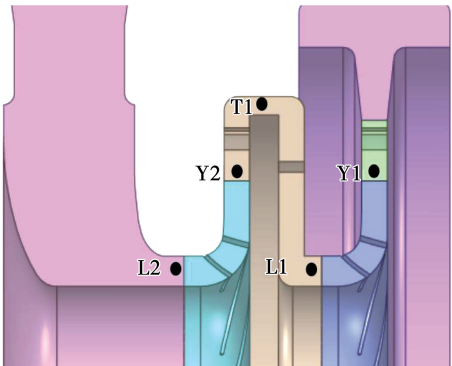


图 5 监测点设置

Fig.5 Setting of monitoring points

3 导叶时序对压力脉动的影响

对图 5 中监测点进行非定常压力脉动监测,为了直观反映透平内压力脉动变化情况,引入无量纲

压力脉动系数 $C_p^{[12]}$ 。

$$C_p = \frac{2(p - \bar{p})}{\rho u_1^2}$$

(1)

式中: p —监测点瞬时静压,Pa; $\bar{p}$ —监测点平均静压,Pa; ρ —介质密度,kg/m³; u_1 —叶轮进口圆周速度,m/s。

3.1 首级导叶和叶轮出口压力脉动分析

图6和图7分别为首级导叶出口(监测点Y1)和首级叶轮出口(监测点L1)的压力脉动时域图及频域图,图中横坐标转频倍数为压力脉动频率 f 与转频 f_n 的比值。由于液力透平转速为2 980 r/min,则转频 f_n 为49.667 Hz,叶频 f_b 为298 Hz。由图6和图7可以看出,在不同时序位置下首级导叶出口和叶轮出口压力脉动时域和频域曲线变化规律基本相同,说明不同导叶时序位置对首级导叶和叶轮出口处压力脉动影响较小。不同导叶时序方案下首级导叶和叶轮出口处压力脉动呈显著周期性规律,并且在1个周期内出现了6个峰值,这与叶轮叶片数相关。从图7可以看出,不同导叶时序位置下首级导叶和叶轮出口处主频幅值与1倍叶频相同,首级导叶和叶轮出口压力脉动幅值分别为0.041和0.014。此外,不同方案下压力脉动在2倍和3倍叶频均存在明显波峰,这表明首级导叶和叶轮出口压力脉动幅值主要受叶频影响。

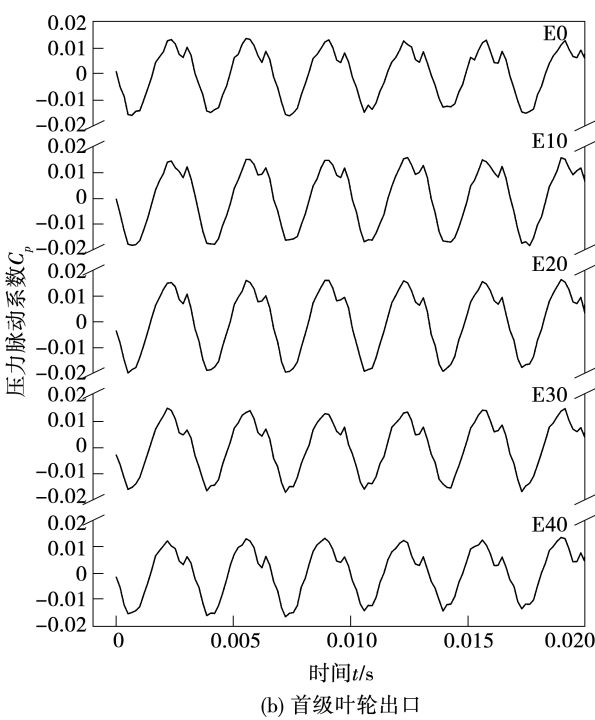
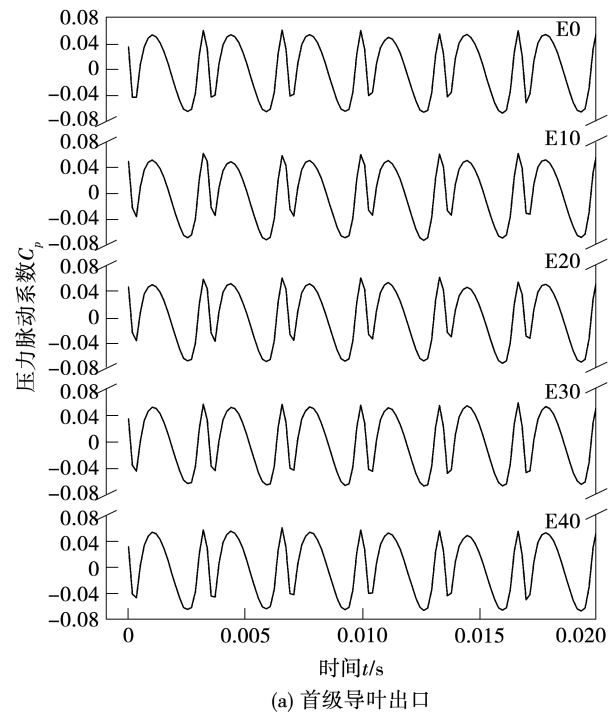


图6 首级导叶和叶轮出口压力脉动时域曲线
Fig. 6 Pressure pulsation time domain curves of primary guide vane and impeller outlet

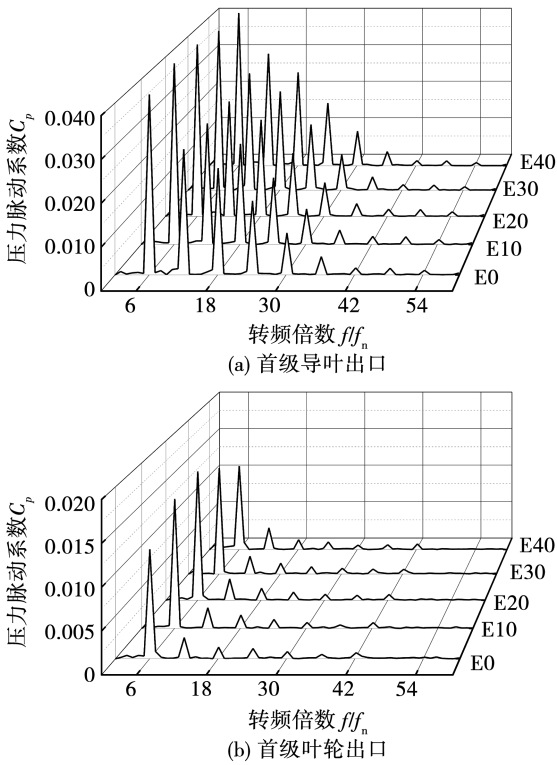


图7 首级导叶和叶轮出口压力脉动频域曲线
Fig. 7 Pressure pulsation frequency domain curves of primary guide vane and impeller outlet

通过对比 5 种导叶时序方案发现,各方案首级导叶出口压力脉动幅值几乎无变化;方案 E30 首级叶轮出口压力脉动幅值相比方案 E0 增加了 8%;而方案 E40 首级叶轮出口压力脉动幅值达到最小值 0.011,相比方案 E0 降低了 11%。这表明,导叶时序位置对首级叶轮出口处的压力脉动有显著影响。

3.2 次级导叶和叶轮出口压力脉动分析

图 8 和图 9 分别为次级导叶和叶轮出口(监测点 Y2 和 L2)压力脉动时域及频域变化情况。从图 8(a)可以看出,各方案下次级导叶出口时域特性曲线具有相同的周期性变化规律。对比不同导叶时序方案发现,随着导叶交错角度的增大,次级导叶出口处压力脉动幅值无明显差异,与方案 E0 相比,其余时序方案均发生了相位偏移现象。从图 8(b)可以看出,不同方案下次级叶轮出口处压力脉动时域特性曲线差异明显,且各方案周期性规律均不明显。其中方案 E30 幅值变化最小,最大压力脉动幅值为 0.006,仅为无时序方案 E0 最大幅值的 45%。

从图 9(a)可以看出,不同方案下次级导叶出口主频压力脉动幅值明显,且随导叶交错布置角度增加,次级导叶出口主频压力脉动幅值增加,从 0° ~ 20°增加较为显著,20° ~ 40°增加缓慢。从图 9(b)可以看出,随导叶交错角度的增加,不同方案下次级叶轮出口处压力脉动频域特性曲线差异显著,方案 E30 主频幅值达到最小值 0.001,相比无时序方案 E0 主频幅值降低 85%;方案 E40 主频幅值相比无时序方案 E0 降低 51%;其他时序方案也在一定程度上减小了主频幅值,主要原因是次级导叶周向位置的改变使得流入出水室内流体流态有所改善,出水室内旋涡减少,从而降低了次级叶轮出口处压力脉动主频幅值。

3.3 次级导叶过渡段内压力脉动分析

图 10 和图 11 分别为次级导叶过渡段内(监测点 T1)压力脉动时域图及频域图。从图 10 可以看出,不同时序方案下,次级导叶过渡段内压力脉动时域特性曲线差异明显,不同方案下时域图周期性规律也较为明显。方案 E0 测点 T1 压力脉动幅度最小,方案 E20 压力脉动幅度最大。从图 11 可以看

出,在不同导叶时序位置下,次级导叶过渡段内压力脉动幅值主频与叶频相同,即叶频通过频率占主导地位,方案 E40 主频幅值最小,方案 E20 主频幅值最大。不同方案下 2 倍和 3 倍叶频压力脉动幅值也较明显,但其幅值大小均不同。

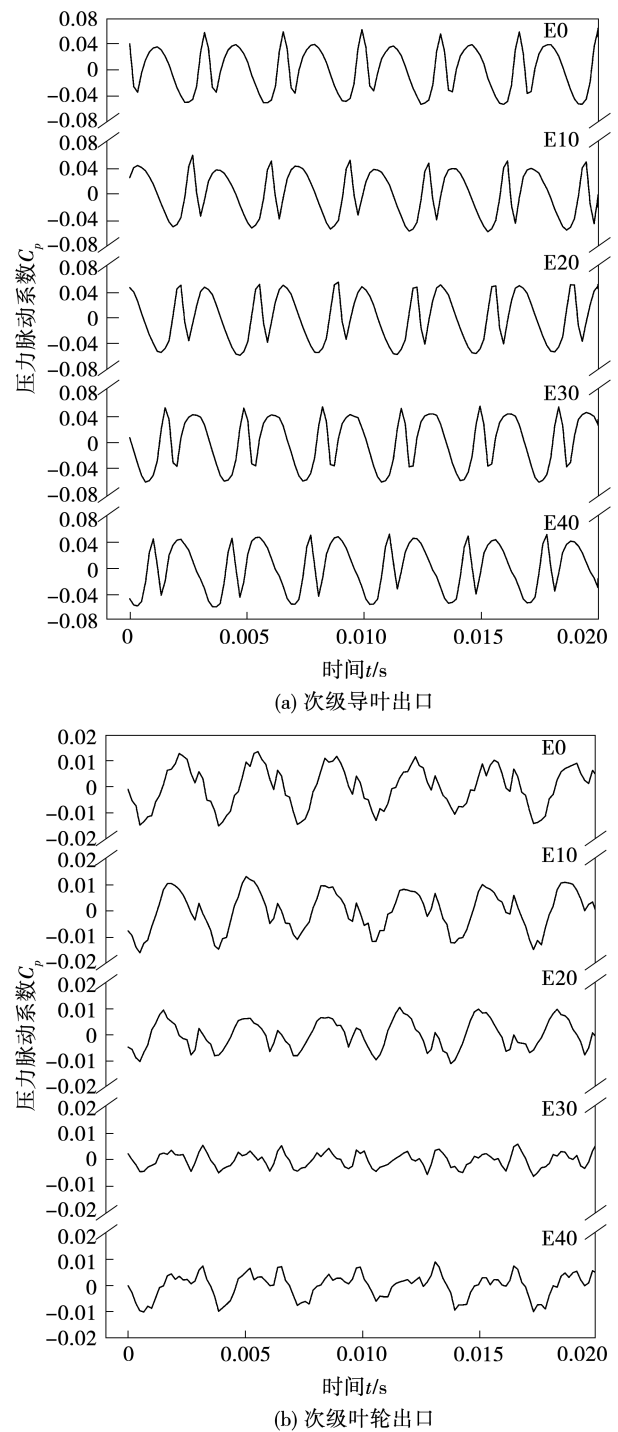


图 8 次级导叶和叶轮出口压力脉动时域曲线

Fig. 8 Pressure pulsation time domain curves of secondary guide vane and impeller outlet

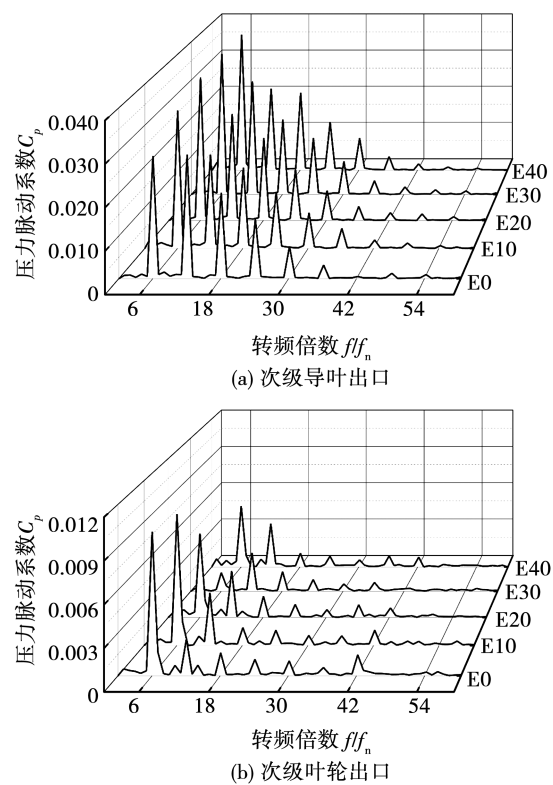


图 9 次级导叶和叶轮出口压力脉动时域曲线
Fig. 9 Pressure pulsation time domain curves of secondary guide vane and impeller outlet

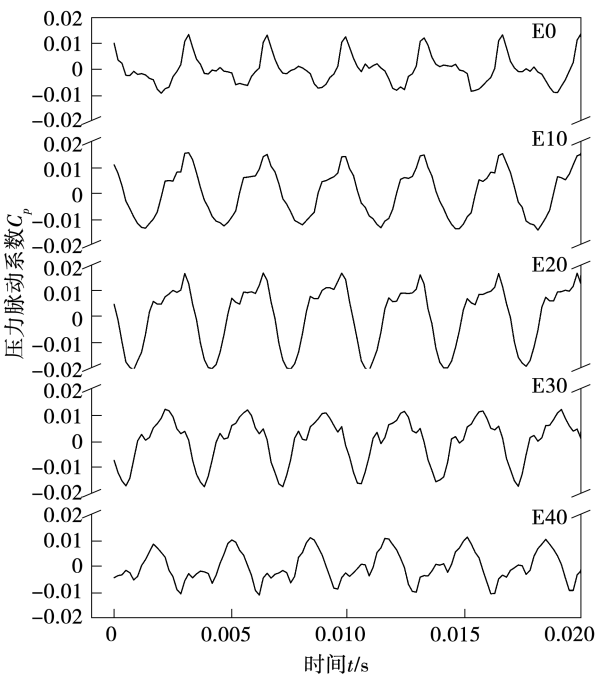


图 10 次级导叶过渡段内压力脉动时域曲线
Fig. 10 Pressure pulsation time domain curves of secondary guide vane transition section

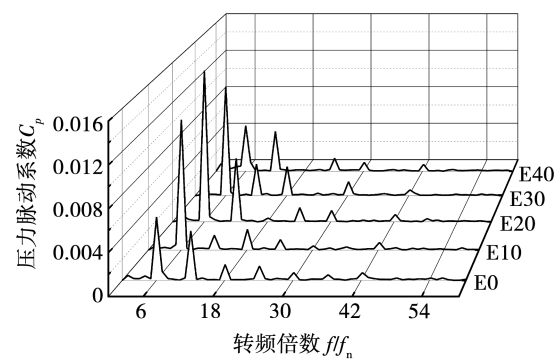


图 11 次级导叶过渡段内压力脉动频域曲线
Fig. 11 Pressure pulsation frequency domain curve of secondary guide vane transition section

对比不同导叶时序位置下次级导叶过渡段内压力脉动时域特性曲线和频域特性曲线可以得出,随着导叶交错角度的增大,过渡段内压力脉动幅值呈现先增大后减小的趋势。方案 E30 主频脉动幅值最大,较方案 E0 主频幅值增大 92%;方案 E40 主频脉动幅值最小,为 0.049,较方案 E0 主频幅值减小了 16%。这表明,导叶时序可以降低次级导叶过渡段内的压力脉动。

4 导叶时序对流场分布和外特性的影响

4.1 内流场分析

图 12 为方案 E0 和 E30 出水室中间平面速度及流线分布。由图可见,两种方案下出水室内流动规律基本相同,出口位置均存在高速区,且均有旋涡产生。方案 E30 相比无时序方案 E0 出水室内流动更加均匀且旋涡面积有所减小,这也是 E30 次级叶轮出口压力脉动明显较低的主要原因。

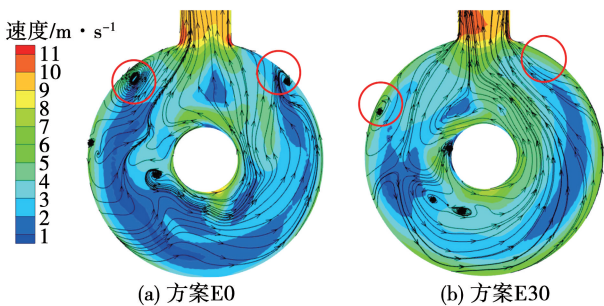


图 12 出水室速度及流线分布
Fig. 12 Velocity and streamline distribution in the outlet chamber

图 13 为方案 E0 和 E40 次级导叶过渡段内速度分布及轴面流线图。由图可见,两种方案下流线差异明显,无时序方案 E0 在腔体和导叶流道内均有不同大小的旋涡形成,而方案 E40 在相同位置流动更加均匀。综上分析可知,通过改变导叶时序特征,可改变流道内部速度分布,从而改变了透平内压力脉动幅值大小。

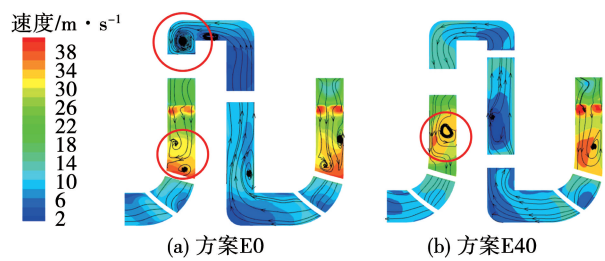


图 13 透平内速度分布及轴面流线图

Fig.13 Velocity distribution and axial surface streamline diagram in turbine

4.2 外特性分析

图 14 是不同方案下液力透平外特性曲线。图中 Q_d 为透平设计流量, Q 为不同运行流量。由图可见,不同方案下水头和效率差异较明显。在设计工况下,5 种方案对应的效率分别为 79.34%, 78.10%, 79.85%, 78.15% 和 77.85%, 水头分别为 277.2, 279.4, 276.1, 278.5 和 280.3 m。其中方案 E30 效率最高,相比方案 E0 提高了 0.51%; 方案 E10 水头最高,相比方案 E0 提高了 0.79%。

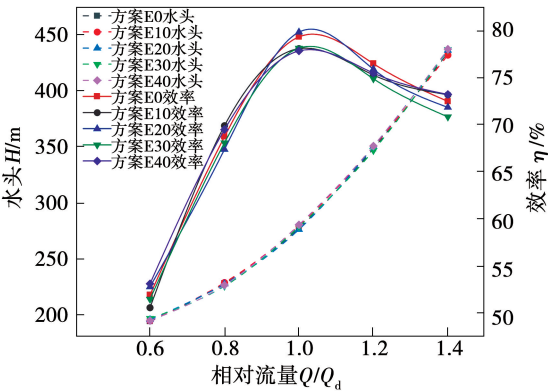


图 14 5 种方案下外特性对比

Fig.14 Comparison of external characteristics in 5 schemes

5 结 论

(1) 次级导叶时序对液力透平内不同位置压力脉动特性影响不同,对首、次级导叶出口压力脉动特性几乎无影响,对次级导叶过渡段内和首、次级叶轮出口压力脉动影响较大。方案 E40 透平内整体压力脉动降幅最大,在首、次级叶轮出口处主频幅值相比无时序 E0 方案分别降低了 11% 和 51%; 在次级导叶过渡段处较方案 E0 主频幅值降低了 16%。

(2) 次级导叶时序对次级导叶和出水室内流场分布有一定影响,导叶相位的变化使次级导叶流道和出水室内旋涡减小,流动更加均匀,从而影响了透平内压力脉动强度。

(3) 次级导叶时序对液力透平回收水头和效率有一定影响,不同导叶时序方案下对应的水头和效率差异不超过 2%。

参考文献:

[1] 刘厚林,崔建保,谈明高,等. 离心泵内部流动时序效应的 CFD 计算[J]. 农业工程学报,2013,29(14):67-73.
LIU Hou-lin, CUI Jian-bao, TAN Ming-gao, et al. CFD calculation of clocking effect on centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 67-73.
[2] 席光,刘磊,姜华,等. 离心压缩机级内静叶时序效应的数值研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(9):1495-1498.
XI Guang, LIU Lei, JIANG Hua, et al. Numerical investigation of stator clocking in a centrifugal compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(9): 1495-1498.
[3] 任晓栋,顾春伟. 1.5 级跨声压气机中时序效应的研究[J]. 航空动力学报,2010,25(4):891-896.
REN Xiao-dong, GU Chun-wei. Investigation on clocking effect of 1.5-stage transonic compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 891-896.
[4] KUSTERER K, MORITZ N, BOHN D, et al. Transient numerical investigation of rotor clocking in 1.5 stage of an axial test turbine with a blade-to-vane ratio of 1.5[C]// Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2010.
[5] 彭小娜,朱相源,李国君,等. 导叶时序位置对离心泵叶片载荷影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(3):192-198,223.
PENG Xiao-na, ZHU Xiang-yuan, LI Guo-jun, et al. Numerical pre-

diction of clock effect of diffuser in volute on blade loading in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2019,37(3):192-198,223.

[6] 谈明高,戴菡葳,刘厚林,等. 多级离心泵叶轮时序对振动性能影响的数值研究[J]. 振动与冲击,2015,34(24):117-122.

TAN Ming-gao,DAI Han-wei,LIU Hou-lin,et al. Numerical simulation on the effect of impeller clocking position on vibration of multistage centrifugal pumps[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(24):117-122.

[7] GUAN Hong-yu,JIANG Wei,WANG Yu-chuan,et al. Numerical simulation and experimental investigation on the influence of the clocking effect on the hydraulic performance of the centrifugal pump as turbine[J]. Renewable Energy,2021,168:21-30.

[8] 柴立平,张舜鑫,陈亮,等. 导叶时序效应对液力透平性能影响的研究[J]. 中国农村水利水电,2019(1):169-175.

CHAI Li-ping,ZHANG Shun-xin,CHEN Liang,et al. Research on the effect of guide vane cocking effects on hydraulic turbine performance[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(1):169-175.

[9] 林通,朱祖超,李晓俊,等. 离心泵作透平性能预测研究综述及展望[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(6):562-568.

LIN Tong,ZHU Zu-chao,LI Xiao-jun,et al. Performance prediction of centrifugal pump as turbines-a review and prospect[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021,39(6):562-568.

[10] 李延频,张利红,张自超,等. 叶片包角对水轮机模式多级液力透平性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(8):757-763.

LI Yan-pin,ZHANG Li-hong,ZHANG Zi-chao,et al. Influence of blade wrap angle on performance in T-mode multistage hydraulic turbine[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2021,39(8):757-763.

[11] LIU Ming,TAN Lei,CAO Shu-liang. Performance prediction and geometry optimization for application of pump a turbine:a review[J]. Frontiers in Energy Research,2022,9:1-16.

[12] 叶长亮,王福军,李怀成,等. 高扬程两级双吸离心泵时序效应研究[J]. 水利学报,2018,49(7):858-868,876.

YE Chang-liang,WANG Fu-jun,LI Huai-cheng,et al. Investigation on the clocking effect of a double-entry two-stage double suction centrifugal pump with high head[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(7):858-868,876.

(刘颖编辑)