

叶片包角对液力透平水力性能与压力脉动的影响

寇佳文¹, 汪程鹏², 王生辉¹, 杨一帆¹

(1. 海南大学 机电工程学院, 海南海口 570228; 2. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

摘要:为探究叶片包角对液力透平能量回收效率和运行稳定性的影响,采用UG建立流体域的三维模型,通过CFX软件将包角在 50° ~ 120° 区间内的液力透平在额定工况下进行数值计算并进行外特性分析,选择 75° 、 80° 和 85° 3个包角方案进行内流特性分析与压力脉动频谱分析。结果表明:液力透平的效率随包角的增大先增大后减小,在包角 80° 左右时效率最高;包角的改变对叶轮内部流场的影响较大,合适的包角可以降低叶轮工作流道内的湍动能,使高速流体冲击叶片后的能量转换更加充分;主频为 $7f_n$ 时蜗壳与隔舌处的压力脉动主要受动静干涉作用影响,主频为 $2f_n$ 时叶轮工作流道内主要受涡流影响,包角对蜗壳、叶轮的的压力脉动影响较大,对隔舌影响较小;包角为 80° 时,监测点rv5处的峰峰值与包角 85° 时相比降低了9.78%,显著提升了液力透平运行的稳定性。

关键词:液力透平;包角;内流特性;压力脉动;水力性能

中图分类号:TV734;TK720

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.08.006

[引用本文格式]寇佳文,汪程鹏,王生辉,等.叶片包角对液力透平水力性能与压力脉动的影响[J].热能动力工程,2024,39(8):49-57. KOU Jiawen, WANG Chengpeng, WANG Shenghui, et al. Effect of blade envelope angle on hydraulic performance and pressure pulsation of hydraulic turbines [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(8): 49-57.

Effect of Blade Envelope Angle on Hydraulic Performance and Pressure Pulsation of Hydraulic Turbines

KOU Jiawen¹, WANG Chengpeng², WANG Shenghui¹, YANG Yifan¹

(1. Mechanical and Electrical Engineering College, Hainan University, Haikou, China, Post Code: 570228;

2. The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR, Tianjin, China, Post Code: 300192)

Abstract: In order to explore the influence of blade envelope angle on the energy recovery efficiency and operational stability of hydraulic turbines, a three-dimensional model of the fluid domain was established using UG. The hydraulic turbine with envelope angle in the range of 50° to 120° was numerically calculated and analyzed for external characteristics under rated conditions using CFX software. Three sets of envelope angle schemes, namely 75° , 80° and 85° , were selected for internal flow characteristics analysis and pressure pulsation spectrum analysis. Research has found that the efficiency of a hydraulic turbine first increases and then decreases with the increase of the envelope angle, and the efficiency is highest at around 80° envelope angle; the change of the envelope angle has a significant impact on the flow field inside the impeller. An appropriate envelope angle can reduce the turbulent kinetic energy in the working flow channel of the impeller, making the energy conversion more complete after the high-speed fluid im-

收稿日期:2023-12-06; 修订日期:2024-01-15

基金项目:海南省省重点研发计划(ZDYF2021SHFZ057);天津市自然科学基金重点项目(20JCZDJC00460);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K-JBYWF-2021-T07, R-JBYWF-2021-T02)

Fund-supported Project: Hainan Provincial Key R&D Plan (ZDYF2021SHFZ057); Key Project of Tianjin Natural Science Foundation (20JCZDJC-00460); Special Fund for Basic Research Business Expenses of Central-level Public Welfare Research Institutes (K-JBYWF-2021-T07, R-JBYWF-2021-T02)

作者简介:寇佳文(1999-),男,海南大学硕士研究生。

通信作者:王生辉(1979-),男,海南大学教授级高级工程师。

pacts the blade. Under a main frequency of $7f_n$, the pressure pulsation at the volute and tongue is mainly affected by the interference of dynamic and static forces; under a main frequency of $2f_n$, the working flow channel of the impeller is mainly affected by eddy currents. The envelope angle has a greater impact on the pressure pulsation of the volute and impeller, and a smaller impact on the tongue. When the envelope angle is 80° , the peak to peak value at monitoring point rv5 decreases by 9.78% compared with that at the envelope angle of 85° , significantly improving the operational stability of the hydraulic turbine.

Key words: hydraulic turbine, envelope angle, internal flow characteristics, pressure pulsation, hydraulic performance

引 言

泵反转作透平在水利、石化等领域应用广泛^[1-2],对国家工业节能减排战略的实施具有重要意义。能量转换效率与运行稳定性是评判透平性能的重要指标,为改善其运行性能,相关学者对液力透平的结构、内流特性^[3-4]等方面做了大量研究。

叶轮作为液力透平的核心过流部件,在运行过程中,承载流场和能量的传递与转化,其设计的优劣,直接影响液力透平的整体性能^[5-6]。叶片的进、出口安放角是叶轮设计的关键参数。张自超等人^[7]研究了线性、下凹和上凸3种形式多段线,得出了共6种不同形式的叶片安放角分布规律,发现6种方案的扬程-流量曲线基本相同,下凹方案得到的液力透平整体效率较高,高效区较宽;王燕燕等人^[8]基于叶片包角和出口安放角对叶轮进行改进设计,利用三维流场数值模拟结果进行分析,得到最佳叶轮模型,提高了装置的运行效率;苗森春等人^[9]基于神经网络-遗传算法对液力透平进行了叶片型线的优化改进,在保证扬程不小于相应初始扬程的约束条件下,优化后的液力透平效率有显著提升;杨孙圣等人^[10]对液力透平内部功率损失分布分析表明,液力透平内部的功率损失主要集中在叶轮内部,长短叶片数量的增加改善了叶轮内部流动,减小了叶轮内部的功率损失。由此可见,叶片设计的合理性是影响流体机械性能的主要原因。目前,相关研究主要是叶片弯曲方向、型线等对液力透平回收效率的影响,关于叶片包角对液力透平机械性能变化规律影响的研究较少。

本文应用计算机辅助设计和数值模拟相结合的方法,合理调整叶片的包角,在液力透平外特性分析的基础上,对满足效率要求的包角方案进行压力脉动分析,综合考虑液力透平的能量回收效率与压力脉动特性,研究包角对液力透平性能的影响规律。

1 物理模型与定常计算

1.1 模型基本参数

研究对象为泵反转作透平,材质为结构钢。液力透平的主要参数:进口压力为1.2 MPa,额定扬程为130 m,额定转速为3 100 r/min,叶片数为7,包角为 80° 。液力透平的流体域主要由蜗壳、叶轮和尾水管组成,根据透平的主要物理参数建立三维流体域模型如图1所示。

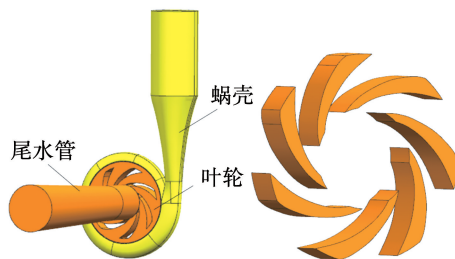


图1 流体域模型及叶轮模型

Fig.1 Fluid domain model and impeller model

1.2 网格划分

模型的进出口段形状规则,采用结构化网格,对蜗壳和叶轮采用适应性较好的非结构四面体网格进行划分,并对隔舌和叶片附近边界层网格进行局部加密。在设计流量工况下对5种方案进行了网格无关性检验,不同网格数下液力透平效率如图2所示。从图2中可以看出,当网格数大于470万后液力透

平的效率趋于稳定,因此流体域网格数确定为 470 万。

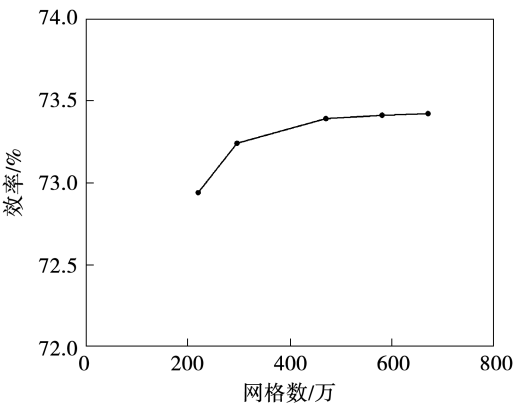


图 2 网格无关性分析
Fig. 2 Grid independence analysis

1.3 边界条件

在进行数值计算时,液力透平的运行工况均为额定工况。进口边界条件设置为压力入口(1.2 MPa),出口边界条件为静压出口(0.1 MPa),流体介质为 25 ℃ 的水,叶轮各壁面设置为旋转壁面,静止区域的壁面设置为无滑移壁面,动静交界面设置为瞬态转子,性能曲线的计算精度选取高精度,定义收敛残差(RMS)的值为 1×10^{-4} 。非定常计算以定常计算收敛后的结果为初始条件,考虑模拟计算的精确性,以叶轮每旋转 3°所用的时间为 1 个时间步,即 $t = 1.6 \times 10^{-4}$ s,取 7 个叶轮旋转周期为总计算时间,计算总时间为 0.134 4 s。转频为 $f_n = n/60$,叶频为叶片数乘以转频,即 $f = Z f_n$,选取叶轮运行稳定后的 4 个周期进行数据分析。

1.4 监测点布置

在叶轮单一工作流道区域内设置监测点 rv1 ~ rv6;蜗壳流道内的监测点为 sp1 ~ sp8;蜗壳隔舌处的监测点为 ls1 ~ ls5。流体域监测点布置如图 3 所示。

1.5 实验验证与外特性参数比较

由于透平内部流动复杂,可能会导致数值模拟结果与实际情况偏差较大,所以在自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所的能量回收一体机实验台上进行实验,将数值模拟与实验的外特性参数进行比较,以检验数值模拟结果的准确性。能量回收一体机实验测试平台如图 4 所示。

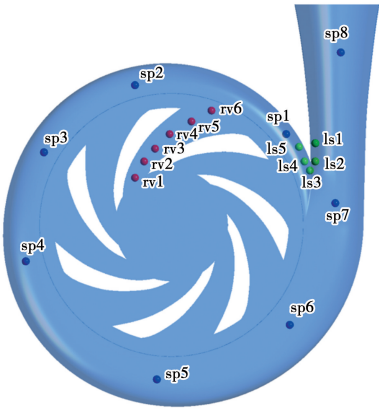


图 3 流体域监测点分布
Fig. 3 Distribution of monitoring points in fluid domain

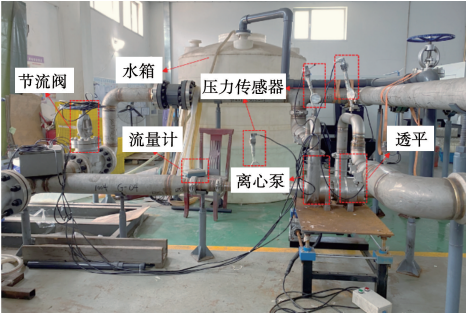


图 4 实验测试平台
Fig. 4 Test platform for measurement

在 $0.9Q_0 \sim 1.1Q_0$ 范围内选取 6 个工况点,将额定工况下数值模拟结果与实验结果进行对比,如图 5 所示。扬程的模拟结果与实验趋势基本一致。但数值模拟结果略高于实验结果,这是因为透平在运行过程中存在结构间的摩擦及流体的泄漏等因素^[11]。从图 5 可以看出,模拟与实验结果误差较小。因此,可以通过数值模拟的方法研究液力透平内部流动的机理。

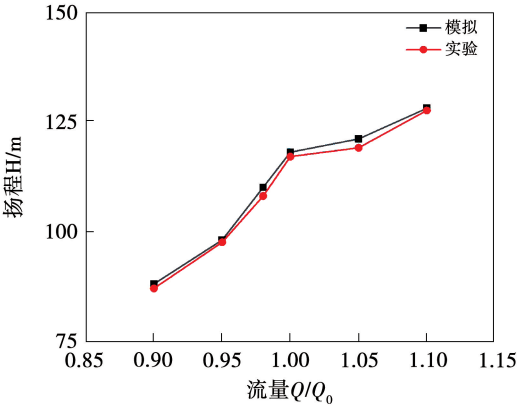


图 5 数值模拟与实验结果对比
Fig. 5 Comparison between numerical simulation and experimental results

1.6 参数定义

液力透平内部流动较为复杂,为了更加直观地观测其压力脉动特性,引入无量纲系数 C_p 来对瞬态压力值进行描述^[12],其定义为:

$$C_p = (p - \bar{p}) / 0.5\rho u^2 \tag{1}$$

$$u = \pi n D / 60 \tag{2}$$

式中: p —监测点的瞬时静压值,Pa; $\bar{p}$ —平均静压值,Pa; ρ —介质密度,kg/m³; u —叶轮外径圆周速度,m/s; n —叶轮转速,r/min; D —叶轮直径,m。

压力脉动的峰峰值可以反映透平装置运行过程中的稳定性。为了观测包角对透平运行稳定性的影响,引入压力脉动峰峰值的概念,即周期内信号的最高值和最低值之差^[13]。为便于对照,采用压力脉动混频幅值,即压力脉动峰峰值与实验扬程间的比值:

$$\Delta H = (A / \rho g H) \times 100\% \tag{3}$$

式中: A —压力脉动峰峰值,Pa; g —重力加速度,m/s²; H —扬程,m。

2 包角方案设计

额定工况下液力透平效率随包角增大的变化曲线如图 6 所示。

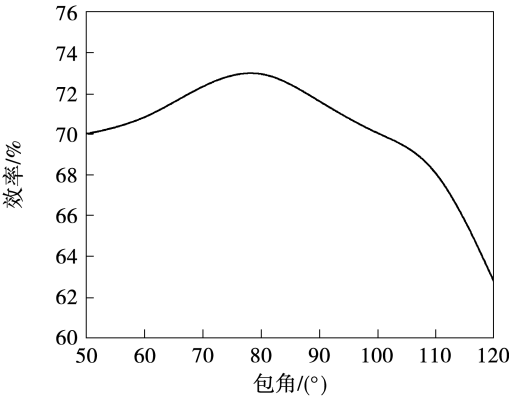


图 6 包角对液力透平效率的影响

Fig. 6 Effect of envelope angle on the efficiency of hydraulic turbines

随着包角的增大,效率先增大后减小,最高效率约为 74%,最低效率约为 62%。包角对液力透平的效率影响较大,存在一个最佳包角使得液力透平的效率最高。为探究包角对效率的影响规律,设计了 75°、80°和 85° 3 种包角方案,方案图如图 7 所示。在额定工况下对 3 组包角方案进行定常与非定常计

算。通过定常计算得出 3 组方案的能量回收效率分别为 72.48%、73.39%和 71.58%,随后对其计算结果进行内流特性与压力脉动分析。

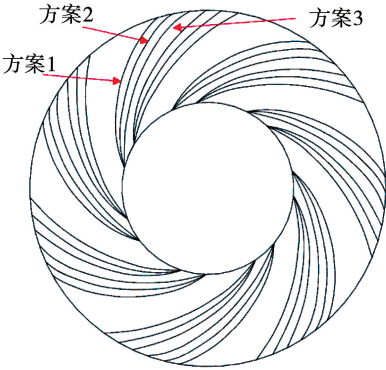


图 7 包角方案

Fig. 7 Envelope angle scheme

3 内流特性分析

湍动能表征湍流运动的强度,其数值大小及分布与流动产生的脉动扩散和粘性耗散的大小及范围直接相关^[14]。3 种包角方案的湍动能云图如图 8 所示。

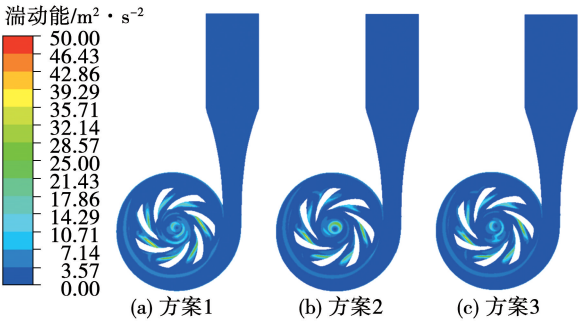


图 8 液力透平中心截面湍动能分布

Fig. 8 Distributions of turbulent kinetic energy on central section of a hydraulic turbine

从图 8 可以看出,3 种方案的湍动能主要分布在叶片的压力面一侧^[15],蜗壳区域湍动能较小,这是由于液体从蜗壳进入叶轮后冲击叶片,从而产生复杂的流动状态,导致在叶轮工作流道内能量损失较大,蜗壳区域由于液体流动比较稳定,因此湍动能较小。方案 1、方案 3 的湍动能分布差距较小。方案 2 的湍动能与其他两种方案相比,压力面的湍动能较小,较大的湍动能分布在叶轮的 中心区域,约为

25 m²/s²,在叶轮的中心区域可能存在漩涡、回流、二次流等不稳定的流动现象。通过 3 种包角方案对比可以看出,湍动能的大小与分布是透平效率发生变化的原因之一,选择合适的包角可以有效改善透平内部的湍动能,降低液力透平运行时因非稳定的流动现象导致的能量损失,从而提高效率。但是改变包角后,可能导致叶轮中心区域的湍动能增大,可以通过增加泄水锥等方法来进一步提高液力透平的能量回收性能。

液力透平中心截面的速度矢量分布如图 9 所示。从图 9 可以看出,尚有余压的液体流经蜗壳加速后,与叶片冲击进行能量转换,导致叶轮主要工作流道内的流动状态较为复杂;蜗壳流道内的流体流动稳定且速度分布均匀,3 种方案的最大流速均分

布在蜗壳与叶轮的交界面处;流体流进叶轮时受入流角、系统旋转和叶片弯曲等因素的影响,与叶片之间形成明显撞击,但由于 3 种方案的包角不同,导致叶片的弯曲程度不同,所以流体与叶片发生撞击后的速度分布有所差异,以叶轮靠近蜗壳隔舌处的叶片为例,方案 2 叶片附近的流体流速明显低于其他两种方案。这是因为速度较快的流体与叶片充分接触,流体的能量大部分转化为了叶轮的动能,提高了能量回收效率;方案 1 叶片的压力面仍然分布较多流速较大的区域,这一部分流体的能量没有与叶片进行充分的能量转换便流入叶轮的中心区域,造成了能量损失。因此,可以通过包角来改变叶片的弯曲程度,使流体与叶片进行更加充分的能量转换,提高液力透平的能量回收效率。

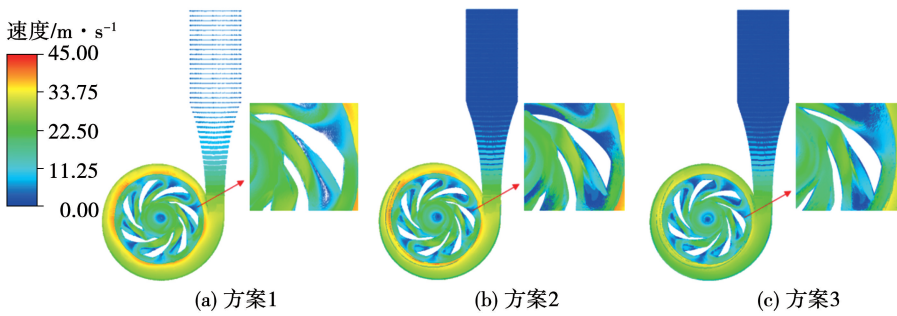


图 9 液力透平中心截面速度矢量分布

Fig.9 Velocity vector distributions of central section of a hydraulic turbine

4 压力脉动分析

4.1 蜗壳内压力脉动分析

在额定工况下流体的噪声可以近似看作是压力脉动引起的,可以通过压力脉动的幅值预判流体噪声的大小^[16]。蜗壳内 8 个监测点的压力脉动时域图及频域图如图 10 所示,从图 10(a)可以看出,叶轮运行稳定后,蜗壳内各监测点的压力值波动较小,且具有周期性,3 种方案压力值的大小、波动几乎没有变化。监测点 sp8 蜗壳入口处,尚有余压的流体经蜗壳加压后未与叶轮接触,所以压力值最高。沿液体的流动方向,流体与叶轮接触,压力能转化为叶轮的动能,因此,sp7 ~ sp5 压力值降低较多,约 0.4 MPa,随后 sp4 ~ sp1 监测点的压力值变化较小,这与

透平本身具有一定的转速有关。sp1 ~ sp8 监测点的压力值变化符合流体随蜗壳流动压力逐渐降低的规律。图 10(b)为蜗壳内 8 个监测点的压力脉动频域图。从图 10(b)可以看出:3 种包角方案的主频均为 7f_n,说明蜗壳内的压力脉动主要由转轮和蜗壳间的动静干涉引起^[17];3 种包角方案较大的压力脉动系数均分布在 sp1 ~ sp3 处,除叶片的倍频外分频成分很少,压力脉动系数的最大值发生在叶片包角 85°时的 sp2 处,压力脉动系数达到了 0.05 左右,压力脉动系数的最小值发生在叶片包角 80°时的蜗壳入口处,压力脉动系数仅为 0.005 左右。方案 2 sp1 ~ sp8 的压力脉动幅值均低于方案 1 和方案 3,说明选择合适的包角可以改善蜗壳周向位置的振动及噪声。

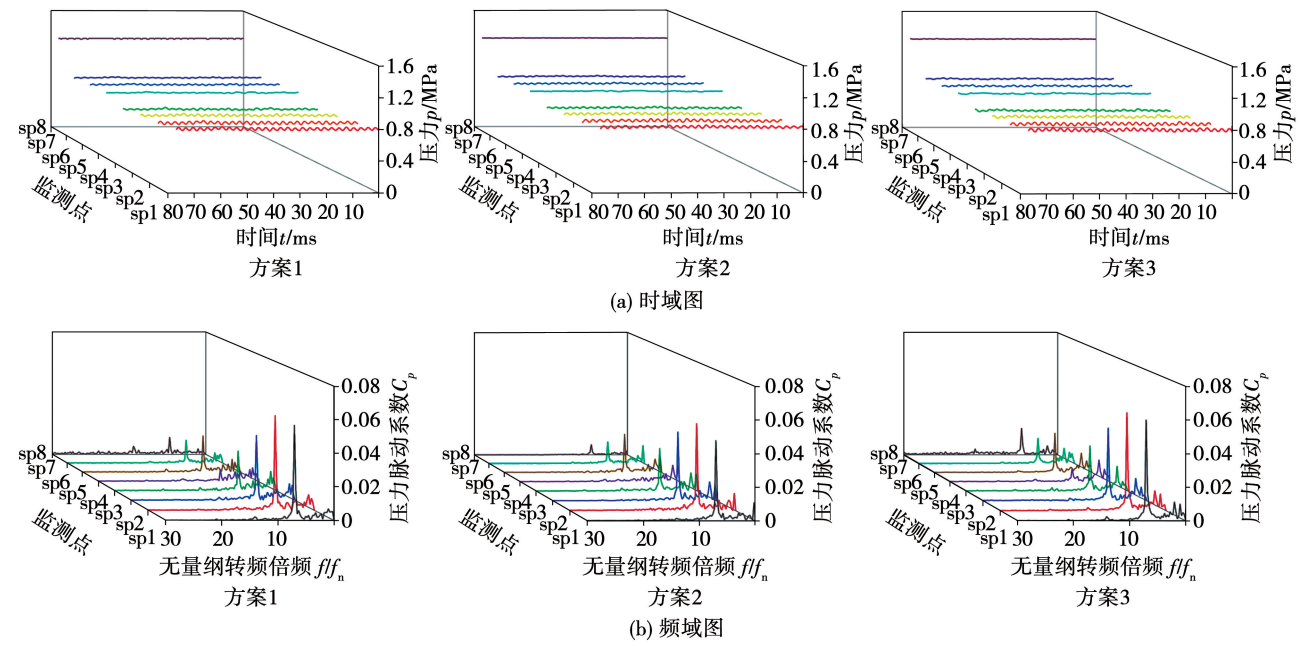


图 10 蜗壳内监测点时域与频域图

Fig. 10 Time domain and frequency domain diagrams at monitoring point inside the volute

表 1 蜗壳内压力脉动峰峰值(%)

Tab. 1 Peak to peak pressure pulsation inside the volute (%)

方案	sp1	sp2	sp3	sp4	sp5	sp6	sp7	sp8
1	4.29	3.97	3.33	2.55	1.85	2.34	1.95	0.72
2	3.97	3.35	3.37	2.85	1.68	2.41	1.39	0.65
3	4.27	4.10	3.52	3.10	2.09	2.85	2.01	0.83

蜗壳周向位置 8 个监测点的压力脉动峰峰值如表 1 所示。sp1 ~ sp4 的峰峰值逐渐减小。与 sp5 处相比,在 sp4 与 sp6 处,由于流体的流动方向发生改变,流动状态比较混乱,所以 sp4 ~ sp6 峰峰值先减小后增大,随后 sp6 ~ sp8 峰峰值逐渐减小。峰峰值的最大值发生在方案 3 的 sp1 处,值为 4.29%;峰峰值的最小值发生在方案 2 的 sp8 处,值为 0.65%。3 种方案对比,峰峰值的最大差值为 0.75%,发生在 sp2 处,所选 3 种方案的包角对蜗壳周向位置的峰峰值影响相对较小。

4.2 叶轮内压力脉动分析

叶轮单流道内压力脉动时域图和频域图如图 11 所示。从时域图可以看出,各点的压力在不同方案下均呈周期性变化,沿流动方向监测点 rv6 ~ rv1 的压力值逐渐降低,这是由流体冲击叶片发生了能量转换导致。方案 2 和方案 3 的 rv5 处,压力值的大小与方案 1 相比明显降低,说明包角发生变化后此处流体叶轮内部流动状态受影响较大。从频域图

可以看出,3 种方案下各测点频谱较宽,各点主频为 $2f_n$,与蜗壳不同,主频为 $7f_n$ 时叶轮流道内的压力脉动幅值较小,说明叶轮内的压力脉动主要受内部的涡流影响,受动静干涉作用影响较小。包角变化后,叶轮流道内的压力脉动信号较为复杂,与方案 1 相比方案 2 和方案 3,rv5 和 rv4 处的分频增加,高阶谐波个数增多,rv2 处分频减少。从监测点的频域曲线对比可以看出,3 种方案的压力脉动幅值有明显差异。与其他方案相比,方案 1 压力脉动比较剧烈。在 rv5 处压力脉动幅值约为 0.38,rv2 处压力脉动幅值也超出其他方案 0.1 左右。这是由于包角小,流道短,流体与高速旋转的叶片接触后发生相对剧烈的能量转换。方案 2 和方案 3 由于包角增大,改变了包角的弯曲程度,使叶轮的工作流道变长,在 rv5、rv2 处的压力脉动幅值下降较为显著。

叶轮单流道内 6 个监测点的压力脉动峰峰值如表 2 所示。

表 2 叶轮单流道内压力脉动峰峰值(%)

Tab. 2 Peak to peak pressure pulsation in a single flow channel of the impeller (%)

方案	rv1	rv2	rv3	rv4	rv5	rv6
1	13.83	16.25	16.61	27.35	13.51	6.54
2	14.65	15.28	17.15	20.59	9.04	7.10
3	13.57	16.01	20.68	24.05	18.82	5.72

由表 2 可知,3 种方案峰峰值的变化趋势相似,但是数值差异较大。最大峰峰值均出现在叶片包角为 75°时的 rv4 处,最大峰峰值为 27.35%。监测点 rv1 ~ rv4 峰峰值逐渐增大,随后 rv4 ~ rv6 峰峰值逐渐减小,最小峰峰值均出现在 rv6 处,最小值为叶片包角为 85°时的 5.72%。3 个方案的峰峰值最大相差 9.78%,出现在方案 2 和方案 3 的 rv5 处。通过

对比 3 个方案的峰峰值可以看出,包角对叶轮主要工作流道内峰峰值的影响较大,包角 80°时 rv4 和 rv5 处的峰峰值显著降低,与其他两组数据相比,提升了液力透平的运行稳定性。

4.3 隔舌处压力脉动分析

隔舌处压力脉动时域图和频域图如图 12 所示。

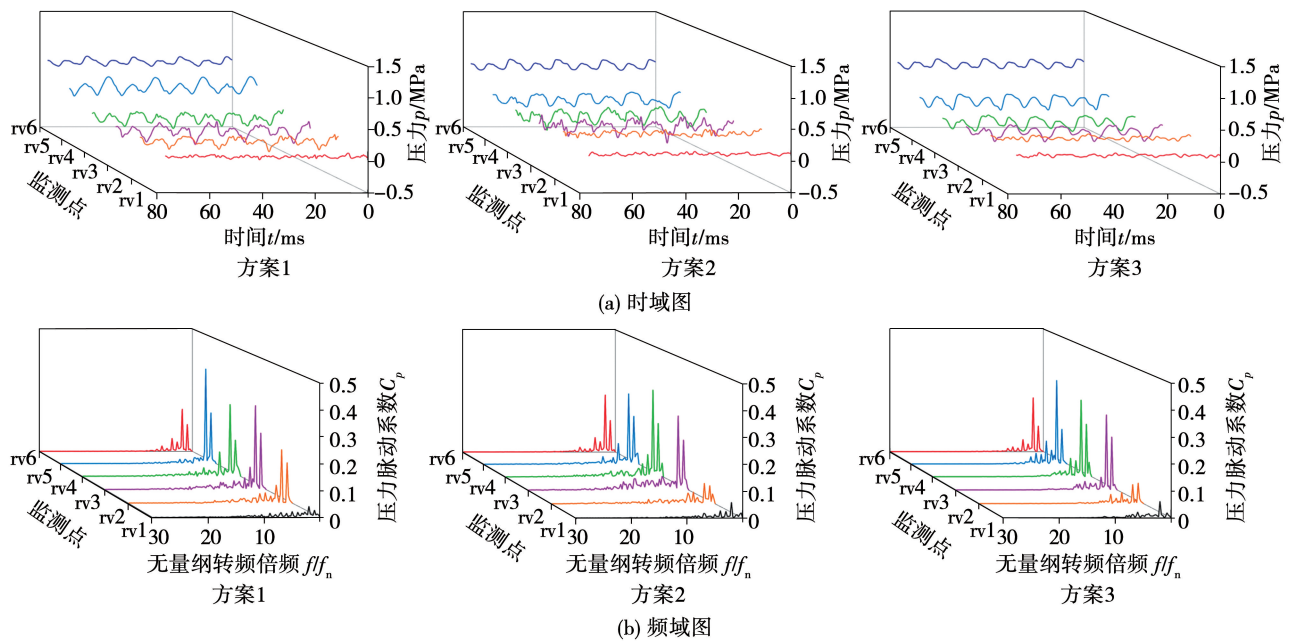


图 11 叶轮流道内监测点时域与频域图

Fig. 11 Time domain and frequency domain diagrams at monitoring point in impeller channel

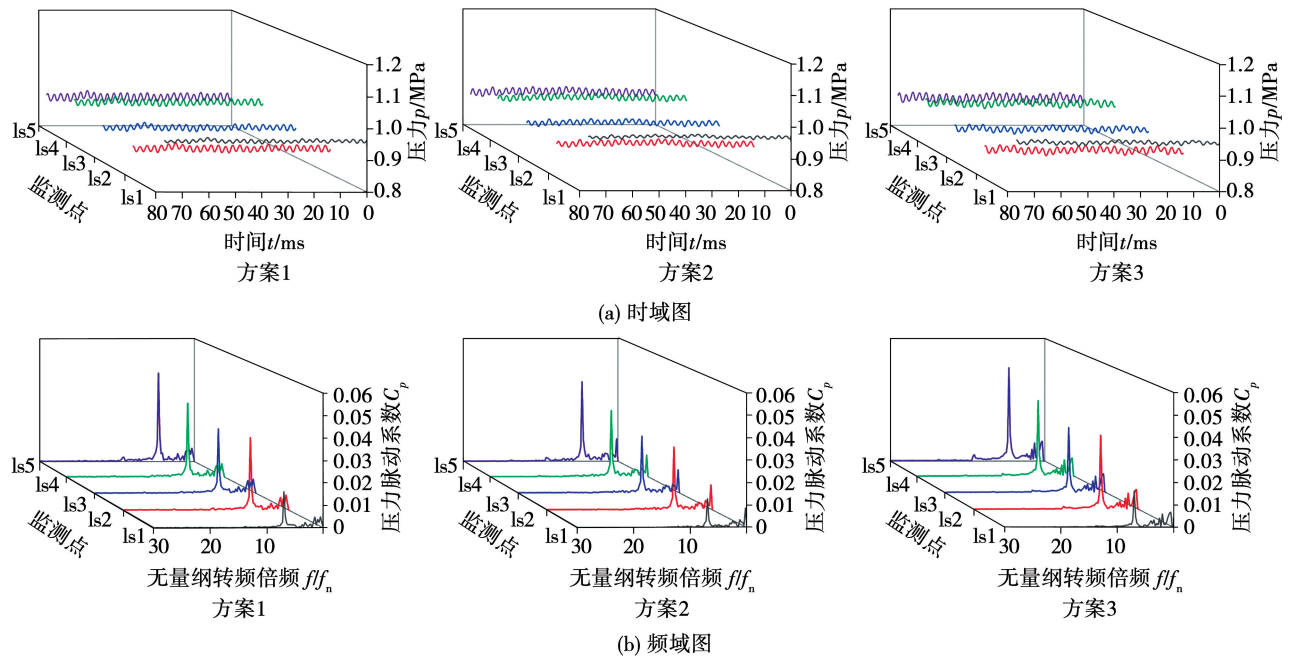


图 12 隔舌处监测点时域与频域图

Fig. 12 Time domain and frequency domain diagrams of pressure pulsation at monitoring point at the tongue

从时域图中可以看出,3 个包角方案监测点的压力值波动差别较小并呈现一定的周期性。从频域图可以看出:所有监测点的主频均为 $7f_n$,与叶片数一致,因此引起隔舌处压力脉动的主要原因是动静干涉作用。从图 4 可以看出,ls5 处的流道比较狭窄,流体流速较快,导致此处压力脉动幅值最大,ls1 处流体流动比较稳定,因此压力脉动较小。ls2 ~ ls4 3 个监测点位于隔舌处,通过压力脉动幅值可以看出,蜗壳周向位置靠近隔舌处的压力脉动相比隔舌与蜗壳入口处更加剧烈。通过 3 个方案时域图、频域图的对比发现,3 个方案压力值、压力脉动幅值基本一致,说明包角对液力透平隔舌处的压力脉动影响较小。

隔舌处 5 个监测点的压力脉动峰峰值如表 3 所示。3 个方案的监测点 ls1 ~ ls5 峰峰值逐渐增大,最小值为包角 80°时的 1.34%,最大值为包角 85°时的 3.35%,ls1 处的流动状态较为稳定。通过对比 3 个方案,同一监测点不同包角的压力脉动峰峰值差值最大为 0.5%,3 个方案的包角对隔舌处峰峰值的影响相对较小。

表 3 隔舌处压力脉动峰峰值(%)

Tab.3 Peak to peak pressure pulsation at the tongue(%)

方案	ls1	ls2	ls3	ls4	ls5
1	1.50	2.40	2.58	2.66	3.12
2	1.34	2.27	2.38	2.52	2.85
3	1.76	2.68	2.76	2.85	3.35

5 结 论

在进行实验验证模拟结果准确性的基础上,通过对额定工况下液力透平的数值计算结果进行外特性分析、内流特性分析与压力脉动分析得出以下结论:

(1) 50 ~ 120°区间内,液力透平的能量回收效率随包角的增大先增大后减小,在 80°左右时效率达到最高。

(2) 3 个包角方案中,包角 80°时效率最高。改变包角后,蜗壳内的湍动能与速度分布差异较小,这与 3 个包角角度的差值较小有关,但是叶轮内差异较大。叶轮的主要工作流道内存在较大的湍动能,并且速度分布的梯度较大。包角为 80°时,流体与叶片充分接触,在叶片附近区域流体流速较低,能量

转换更加充分,但在叶轮的 中心区域,湍动能较大,存在不稳定的流动状态导致能量损失。

(3) 动静干涉作用是影响蜗壳与隔舌压力脉动的主要因素,叶轮工作流道内的宽频脉动主要受复杂的涡流影响。包角对蜗壳、叶轮流道内部的压力脉动影响较大,对隔舌的压力脉动影响较小。选择合适的包角可以显著降低蜗壳与叶轮流道内的振动与噪声。

(4) 叶轮工作流道内受回流、漩涡等不良流动与剧烈的能量交换影响,峰峰值较大。蜗壳与叶轮内部同一监测点不同包角的峰峰值差异较大,隔舌处差异较小。包角为 80°时,监测点 rv5 处的峰峰值与包角为 85°时相比下降了 9.78%,显著提升了液力透平的运行稳定性。

参考文献:

[1] 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 Zuchao,LI Xiaojun,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.

[2] 王晓晖,杨军虎,史凤霞. 能量回收液力透平的研究现状及展望[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(9):742-747.
WANG Xiaohui,YANG Junhu,SHI Fengxia. Status and prospect of study on energy recovery hydraulic turbines [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32 (9): 742-747.

[3] 张德胜,祁 炳,赵睿杰,等. 海水淡化能量回收透平水力模型优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(7):649-654.
ZHANG Desheng,QI Bing,ZHAO Ruijie,et al. Optimization design of hydraulic model for seawater desalination energy recovery turbine[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2021,39(7):649-654.

[4] 李延频,蒋雨焯,张自超,等. 级间导叶数对水轮机模式液力透平性能的影响[J]. 中国农村水利水电,2021(7):113-118.
LI Yanpin,JIANG Yuxuan,ZHANG Zichao,et al. The influence of the number of guide vanes between stages on the performance of hydraulic turbine in turbine mode[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(7):113-118.

[5] 李 伟,施卫东,张德胜,等. 基于流固耦合方法的斜流泵叶轮强度分析[J]. 流体机械,2012,40(12):19-22.
LI Wei,SHI Weidong,ZHANG Desheng,et al. Strength analysis on impeller of mixed flow pump based on the fluid-structure interaction method[J]. Fluid Machinery,2012,40(12):19-22.

[6] 施卫东,王国涛,蒋小平,等. 流固耦合作用对轴流泵内部流场影响的数值计算[J]. 流体机械,2012,40(1):31-34.

SHI Weidong, WANG Guotao, JIANG Xiaoping, et al. Numerical calculation for effect of fluid-structure interaction on flow field in axial-flow pump[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(1): 31 – 34.

[7] 张自超,李延频,陈德新. 叶片安放角分布规律对液力透平性能影响研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(5): 125 – 134.

ZHANG Zichao, LI Yanpin, CHEN Dexin. Investigation on effects of impeller blade angle distributions on hydraulic turbine performance[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(5): 125 – 134.

[8] 王燕燕,赵伟国,韩向东,等. 基于叶片包角和出口安放角对叶轮的改进设计[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(7): 574 – 579.

WANG Yanyan, ZHAO Weiguo, HAN Xiangdong, et al. Improved centrifugal pump impeller design in terms of blade wrap and exit angles[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(7): 574 – 579.

[9] 苗森春,杨军虎,王晓晖,等. 基于神经网络 – 遗传算法的液力透平叶片型线优化[J]. 航空动力学报, 2015, 30(8): 1918 – 1925.

MIAO Senchun, YANG Junhu, WANG Xiaohui, et al. Blade pattern optimization of the hydraulic turbine based on neural network and genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(8): 1918 – 1925.

[10] 杨孙圣,孔繁余,薛玲. 长短叶片对液力透平性能的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 104 – 107.

YANG Sunsheng, KONG Fanyu, XUE Ling. Effect of splitter blade on the performance of pump as turbine[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 104 – 107.

[11] 王鹏,罗兴锜,谢航,等. 叶顶间隙对气液混输泵水力性能的影响研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2022, 37(2): 143 – 151.

WANG Peng, LUO Xingqi, XIE Hang, et al. Effect of tip clearance on hydraulic performance of gas-liquid two-phase pump[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37(2): 143 – 151.

[12] 赵勇,王鑫,王生辉,等. 海水淡化高转速泵作透平的压力脉动分析[J]. 水力发电学报, 2022, 41(4): 83 – 92.

ZHAO Yong, WANG Xin, WANG Shenghui, et al. Analysis of pressure pulsation in high rotating speed pump as turbine in sea-water desalination[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(4): 83 – 92.

[13] 王开杰,赵勇,王生辉,等. 轴流泵偏工况压力脉动和内流特性分析[J]. 水力发电学报, 2023, 42(5): 86 – 96.

WANG Kaijie, ZHAO Yong, WANG Shenghui, et al. Analysis of pressure fluctuation and internal flow characteristics of axial flow pumps under off design conditions[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(5): 86 – 96.

[14] 成涛,符杰,金永鑫,等. 离心泵仿生叶片的降噪特性研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(10): 41 – 50.

CHENG Tao, FU Jie, JIN Yongxin, et al. Study on noise reduction characteristics of bionic vane of ventrifugal pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(10): 41 – 50.

[15] WANG K J, KONG S L, MENG P Y, et al. Strategies employed in the design and optimization of pump as turbine runner[J]. Renewable Energy, 2023, 216: 1. 1 – 1. 11.

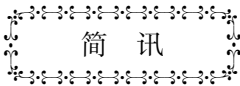
[16] 袁寿其,薛菲,袁建平,等. 离心泵压力脉动对流动噪声影响的试验研究[J]. 排灌机械, 2009, 27(5): 287 – 290.

YUAN Shouqi, XUE Fei, YUAN Jianping, et al. Experimental study on impact of pressure fluctuation on flow-noise in centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(5): 287 – 290.

[17] 张校文,汤方平,葛恒军,等. 涉及临界工况点的贯流泵装置外特性与压力脉动试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 184 – 191.

ZHANG Xiaowen, TANG Fangping, GE Hengjun, et al. Experiments on external characteristics and pressure pulsation of bulb tubular pump involving critical operating points[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 184 – 191.

(丛敏编辑)



简讯

东京电力公司和 Shoreline Wind 公司合作开发数字化海上风电业务

日本东京电力公司 (TEPCO) 正致力于大幅扩大其海上风能投资项目。TEPCO 可再生能源公司将 Shoreline Wind 公司的运维仿真软件集成到其海上风电项目的设计阶段,得到了一个数据框架的支持,从而在机组运行和维护期间充分了解成本、可用性和资源利用情况。并在运维规划中战略性地利用数据驱动输出,减少机组运行不确定性和提高可靠性,以支持海上风电运行项目。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)