

不同正导叶几何参数下多级泵作透平功率-流量曲线研究

王世成^{1,2} 杨军虎¹ 徐国斌¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 重庆三峡学院环境与化学工程学院, 重庆 404100)

摘要: 为适应过程工业中生产调节对液力透平性能的影响,要求多级泵作透平的输出功率随流量的变化较小,即输出功率-流量曲线较平坦。基于欧拉方程,根据速度矩守恒,推导得到导叶式透平输出功率与几何参数的关系式。利用数学求导,判断出导叶几何参数对输出功率曲线平坦性的影响规律。以两级径向导叶离心泵作透平为研究对象,改变正导叶几何参数设计研究方案,通过 Fluent 软件数值计算并进行试验验证。研究表明:数值计算结果与理论推导相符,适当增大正导叶的喉部面积、出口安放角、叶片数或适当减小正导叶基圆直径都可以使输出功率曲线变平坦;设计工况点正导叶几何参数对功率曲线斜率(平坦性)影响由大到小为喉部面积、出口安放角、叶片数、基圆直径,斜率依次减小 0.17、0.11、0.05、0.03;适当增大喉部面积可以使透平效率提升 1.65 个百分点,高效点向大流量偏移。

关键词: 液力透平; 多级离心泵; 正导叶; 功率曲线

中图分类号: TH311; TK73

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)12-0166-07

OSID:



Influence of Positive Guide Vane Geometric Parameters on Power – Flow Curves of Multistage Pump as Turbine

WANG Shicheng^{1,2} YANG Junhu¹ XU Guobin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China)

Abstract: In the process industry, there are many cases where the residual energy liquid has a high-pressure head and low flow rate, it is necessary to use the multistage guide vane centrifugal pump as turbine (PAT) to recover the liquid residual energy. To adapt to the impact of production regulation on the performance of pumps as turbines in the process industry, multistage PAT is required to have a small variation in output power with the flow, i. e., a flatter output power – flow curve. Based on the Euler equation and according to the retention of the velocity distance, the relationship between the output power and geometrical parameters of the guide vane PAT was derived, the output power was related to the geometrical parameters of the guide vane (throat area, outlet angle, guide vane number, and base circle diameter) and the geometrical parameters of the impeller (blade outlet diameter, outlet width, blade outlet angle, and blade number). Using mathematical derivatives, the influence of geometric parameters of the guide vane on the flatness of the output power curve was determined. A two-stage PAT was used as the object research, and the research scheme was designed by changing the geometric parameters of the positive guide vane, which were experimented with and simulated by Fluent software. The computational results were consistent with the theoretical derivation, the output power curve can be flattened by appropriately increasing the positive guide vane throat area, positive guide vane outlet angle, positive guide vane blades number, or appropriately reducing the positive guide vane base circle diameter; at the design condition point, the order of influence of positive guide vane geometric parameters on the slope of the power curve was throat area, outlet placement angle, blade number, base circle diameter, and the

收稿日期: 2023-08-08 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52169019)、甘肃省高校产业支撑计划项目(2020C-20)和重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202301206)

作者简介: 王世成(1991—),男,博士生,重庆三峡学院实验师,主要从事液力透平理论与设计研究,E-mail: wangshicheng_Email@163.com

通信作者: 杨军虎(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事流体力学理论与设计研究,E-mail: lzyangjh@lut.edu.cn

slope of the power curve was reduced by 0.17, 0.11, 0.05 and 0.03, respectively; a proper increase in throat area can lead to an increase in multistage PAT efficiency by 1.65 percentage points and a shift in the high-efficiency point toward high flow rates.

Key words: pumps as turbines; multistage centrifugal pump; positive guide vane; power curve

0 引言

在过程工业中,存在许多余能液体具有较高压头、较小流量的场合,需利用多级导叶式离心泵反转作透平回收这部分液体余能,以满足回收高压、小流量余能的需求^[1-2]。液力透平将高压液体余能转换为轴的旋转机械能,带动发电机发电,驱动泵、风机或辅助电机做功^[3-6]。然而,实际过程工业的产量随着生产要求调节,液力透平的流量也随之变化^[7]。为了透平机组回收能量的稳定性,要求多级离心泵作透平的输出功率随流量的变化较小,即输出功率-流量曲线较平坦。

保证液力透平的输出功率-流量曲线较平坦,需要研究透平输出功率-流量曲线的影响因素。对于多级离心泵作透平,文献[8]将正导叶的进口设计为正冲角进口,冲角为 2°,正导叶出口设计为无撞击出口,通过数值模拟得到多级泵作透平效率提升 2.15%。文献[9]研究了多级泵作透平首级正导叶数对性能的影响,得到正导叶数较少时效率高,但是压力脉动也较大的结论。对于多级离心泵的研究,文献[10]设计了不同进口宽度的导叶,数值计算结果表明导叶进口宽度会影响多级泵的扬程和效率。文献[11]基于正交试验得到性能较优两级离心泵径向导叶参数组合,扬程提高 1.24 m,效率提高 4.00%,其中导叶喉部面积是对性能影响最大的参数。文献[12]提出多级离心泵的导叶数与叶轮叶片数之间存在最优组合关系,设计时应采用互质形式。文献[13]指出径向导叶基圆与叶轮间隙较小时,多级离心泵的效率与扬程较高。

现有研究基本是单因素对透平、泵性能的影响,未有文献报道正导叶几何参数对多级泵作透平输出功率-流量曲线平坦性的影响。本文采用理论推导、数值模拟和试验验证相结合的方法,探究多级导叶式泵作透平正导叶几何参数对输出功率-流量曲线平坦性的影响规律。

1 理论分析

1.1 导叶式液力透平输出功率推导

透平输出功率计算公式为^[14-15]

$$P = P_{in} \eta$$
$$P_{in} = \rho g Q H$$

其中

$$\eta = \eta_h \eta_v \eta_m$$
$$\eta_h = \frac{H_{th}}{H} \times 100\%$$

式中

$$P$$
——输出功率, W
$$P_{in}$$
——输入功率, W
$$\eta$$
——效率, %
$$\rho$$
——密度, kg/m³
$$g$$
——重力加速度, m/s²
$$Q$$
——流量, m³/s
$$H$$
——压头, m
$$\eta_h$$
——水力效率, %
$$\eta_v$$
——容积效率, %
$$\eta_m$$
——机械效率, %
$$H_{th}$$
——理论压头, m

将式(2)~(4)代入式(1)可得

$$P = \rho g Q H_{th} \eta_v \eta_m$$

一般认为多级泵作透平各级压头相同,根据欧拉方程单级理论压头可表示为^[16-17]

$$H_{th} = \frac{1}{g} (u_2 v_{u2} - u_1 v_{u1})$$

式中

$$u$$
——圆周速度, m/s
$$v_u$$
——圆周速度分量, m/s

下标 2 表示叶轮进口,下标 1 表示叶轮出口,下同。假定透平叶轮进、出口无滑移,叶轮进出口速度三角形如图 1 所示^[18-19],由图 1 可知

$$v_{u1} = u_1 - v_{m1} \cot \beta_1$$

式中

$$v_m$$
——轴面速度, m/s
$$\beta$$
——相对液流角, (°)

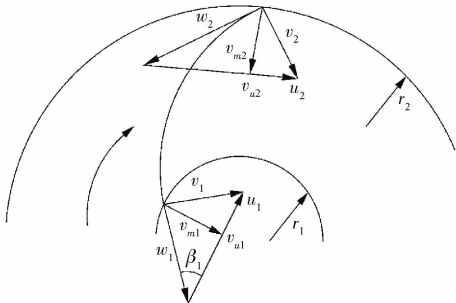


图 1 叶轮进出口速度三角形
Fig. 1 Impeller inlet and outlet velocity triangle

对于理想流体,导叶出口与叶轮进口间满足速度矩守恒^[14],则

$$v_{u2} r_2 = v_{u3} r_3 = \text{const}$$

式中

$$r$$
——半径, m

下标 3 表示导叶出口,下标 4 表示导叶进口,下同。
将式(7)、(8)代入式(6)可得

$$H_{th} = \frac{1}{g} \left(u_2 \frac{v_{u3} r_3}{r_2} - u_1^2 + u_1 v_{m1} \cos \beta_1 \right) \quad (9)$$

其中
$$u = \frac{\pi D n}{60} \quad (10)$$

$$v_{m1} = \frac{Q}{\pi b_1 D_1 \psi_1} \quad (11)$$

$$\psi_1 = 1 - \frac{Z_0 S_{u1}}{\pi D_1} \quad (12)$$

式中 n ——叶轮旋转速度, r/min
 b ——叶轮宽度, m
 D ——直径, m
 ψ ——排挤系数
 Z_0 ——叶轮叶片数
 S_{u1} ——叶轮叶片出口厚度, m

图 2 为导叶出口速度三角形,由图 2 可得导叶出口圆周分速度为^[18-19]

$$v_{u3} = v_3 \cos \alpha_3 \quad (13)$$

其中
$$v_3 = \frac{Q}{Z_1 A_3} \quad (14)$$

式中 v_3 ——导叶喉部液体流动速度, m/s
 α_3 ——导叶出口安放角, (°)
 Z_1 ——导叶叶片数
 A_3 ——导叶出口处喉部面积, m²

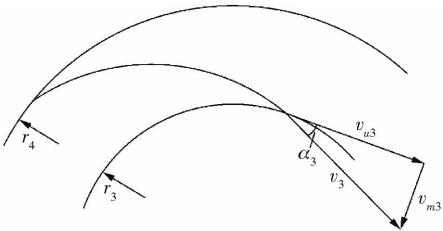


图 2 导叶出口速度三角形

Fig. 2 Guide vane outlet velocity triangle

将式(10)~(14)代入式(9),可得单级理论压头为

$$H_{th} = \frac{\pi n}{60g} \left[\frac{D_3 \cos \alpha_3}{Z_1 A_3} + \frac{D_1 \cot \beta_1}{b_1 (\pi D_1 - Z_0 S_{u1})} \right] Q - \frac{\pi^2 D_1^2 n^2}{3 \ 600g} \quad (15)$$

令
$$\frac{D_3 \cos \alpha_3}{Z_1 A_3} = k_1 \quad (16)$$

$$\frac{D_1 \cot \beta_1}{b_1 (\pi D_1 - Z_0 S_{u1})} = k_2 \quad (17)$$

将式(15)~(17)代入式(5),得到多级泵作透平的单级功率为

$$P = \frac{\pi \rho n \eta_m \eta_v}{60} (k_1 + k_2) Q^2 - \frac{\rho \eta_m \eta_v \pi^2 D_1^2 n^2}{3 \ 600} Q \quad (18)$$

1.2 导叶几何参数对功率-流量曲线平坦性影响

将 Q 看作自变量,将 P 看作因变量,因变量对自变量求导,求得的导数即为曲线斜率。将式(18)对流量 Q 求导,有

$$\frac{dP}{dQ} = \frac{\pi \rho n \eta_m \eta_v}{60} (k_1 + k_2) Q - \frac{\rho \eta_m \eta_v \pi^2 D_1^2 n^2}{3 \ 600} \quad (19)$$

液力透平中,一般认为容积效率 η_v 和机械效率 η_m 与比转数有关,那么 $\rho \pi n \eta_m \eta_v$ 可认为不随透平流量而变化。 Q 、 k_1 、 k_2 和 D_1 决定功率-流量曲线的斜率,其中流量 Q 与斜率成正比, k_1 值由导叶几何参数 A_3 、 α_3 、 Z_1 、 D_3 确定, k_2 值由叶轮几何参数 D_1 、 b_1 、 β_1 、 Z_0 及 S_{u1} 确定。

由于篇幅限制,本文只研究导叶几何参数 k_1 对多级泵作透平功率-流量曲线平坦性的影响。分别将式(19)对导叶几何参数求导,得到透平功率对流量和导叶几何参数的二阶混合偏导数,判断偏导数值的正负即可得到斜率随各几何参数的单调性变化。显然

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 P}{\partial Q \partial A_3} < 0 \\ \frac{\partial^2 P}{\partial Q \partial \alpha_3} < 0 \\ \frac{\partial^2 P}{\partial Q \partial Z_1} < 0 \\ \frac{\partial^2 P}{\partial Q \partial D_3} > 0 \end{cases} \quad (20)$$

对于导叶来说,要使功率-流量曲线变平坦,需增大喉部面积 A_3 、出口安放角 α_3 、叶片数 Z_1 或减小基圆直径 D_3 。

2 方案设计与结果分析

2.1 方案设计

考虑到数值计算经济性等,选取某厂两级径向导叶式离心泵作透平为研究对象 YX,该泵设计流量 Q 为 85 m³/h,单级扬程 H 为 80 m,转速 n 为 2 950 r/min。导叶主要几何参数:正导叶数 Z_1 为 8、出口安放角 α_3 为 5.5°、基圆直径 D_3 为 0.263 m、导叶外径 D_4 为 0.324 m、喉部径向宽度 a_3 为 0.013 5 m、喉部轴向宽度 b_3 为 0.017 m;叶轮主要几何参数:叶片数 Z_0 为 7,叶片进、出口直径 D_2 、 D_1 分别为 0.252、0.108 7 m,叶轮进、出口宽度 b_2 、 b_1 分别为 0.015 5、0.019 8 m。

图 3 为正导叶示意图。在正导叶几何尺寸合理范围内,采用控制变量法设置 4 组研究方案:方案 A 为增加正导叶喉部面积 A_3 、方案 B 为增大正导叶出口安放角 α_3 、方案 C 为增加正导叶叶片数 Z_1 、方案

D 为减小正导叶基圆直径 D_3 。其中,方案 A 通过改变叶片型线的方式改变 A_3 ,同时保持导叶出口角不变,适当改变 D_4 ;方案 B 通过改变叶片型线的方式改变 α_3 ,并保持 A_3 不变,适当改变导叶外径 D_4 ;方案 C 改变 Z_1 后 A_3 会随之发生变化,采用调整 b_3 的方式来保持喉部面积恒定,且采用 Z_1 与 Z_0 互质的形式;方案 D 为改变 D_3 ,且改变 D_3 后 A_3 不变。各研究方案的正导叶参数如表 1 所示,A1、B1、C1、D1 为各方案增加的使功率曲线陡峭的对照组。

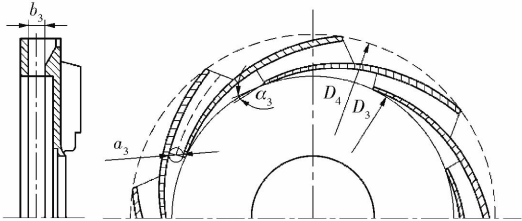


图 3 正导叶示意图
Fig. 3 Diagram of positive guide vane

表 1 各方案正导叶几何参数

Tab. 1 Geometric parameter of positive guide vane for schemes

方案	A_3/m^2	$\alpha_3/^\circ$	Z_1	D_3/m	a_3/m	b_3/m	D_4/m
YX	0.001 836	5.5	8	0.263	0.013 5	0.017 0	0.324 0
A1	0.001 700	5.5	8	0.263	0.012 5	0.017 0	0.322 8
A2	0.001 972	5.5	8	0.263	0.014 5	0.017 0	0.325 2
A3	0.002 108	5.5	8	0.263	0.015 5	0.017 0	0.326 4
B1	0.001 836	4.0	8	0.263	0.013 5	0.017 0	0.324 8
B2	0.001 836	7.0	8	0.263	0.013 5	0.017 0	0.323 2
B3	0.001 836	8.5	8	0.263	0.013 5	0.017 0	0.322 4
C1	0.001 836	5.5	6	0.263	0.020 6	0.014 9	0.324 0
C2	0.001 836	5.5	9	0.263	0.011 4	0.017 9	0.324 0
C3	0.001 836	5.5	10	0.263	0.009 8	0.018 7	0.324 0
D1	0.001 836	5.5	8	0.266	0.013 5	0.017 0	0.327 0
D2	0.001 836	5.5	8	0.260	0.013 5	0.017 0	0.321 0
D3	0.001 836	5.5	8	0.257	0.013 5	0.017 0	0.318 0

2.2 数值计算及试验验证

利用 Pro/E 软件,绘制原型透平 YX 模型。几何模型由环形进水室、级间间隙、环形压出室、口环、叶轮、腔体及径向导叶组成。使用 ICEM 及 Fluent 软件进行混合网格划分,泵腔和口环尺寸较小,使用 ICEM 划分结构网格,其他部分使用 Fluent - Meshing 划分高质量非结构网格。边界层网格满足 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的计算要求,导叶及叶轮壁面平均 $y^+ < 50$ 。导叶及叶轮进行了适当加密,透平进口和出口进行了适当延伸^[20]。原型透平 CFD 模型如图 4 所示。

使用 Fluent 软件进行定常数值计算^[21],采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。叶轮壁面和前后腔靠近叶轮

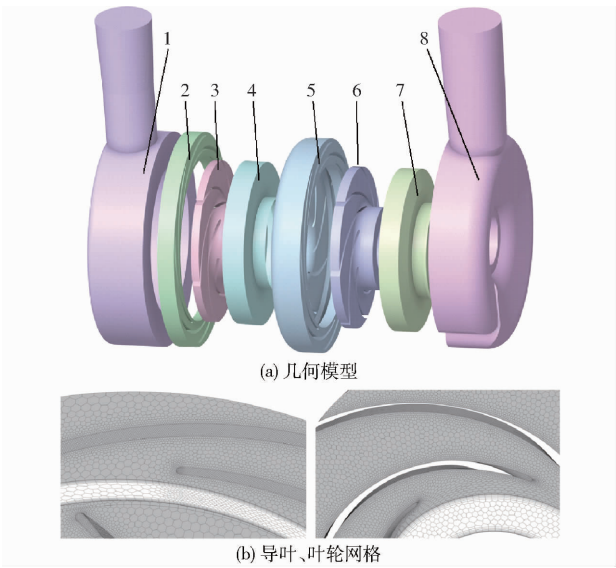


图 4 CFD 模型

Fig. 4 CFD model

1. 吸入室 2、5. 导叶 3、6. 叶轮 4、7. 腔体 8. 压出室

的面设置为旋转壁面,其他部件均设置为静止域,壁面采用速度无滑移条件。根据加工精度壁面粗糙度设置为 0.05 mm。工作介质为 25℃ 清水。进口边界为速度进口,出口边界条件为静压出口,余压设置为 0.5 MPa,残差收敛精度为 10^{-5} 。原型透平设计工况点的网格无关性测试如表 2 所示,可以看出随着网格数的增加透平压头逐渐趋于平稳。当方案 3 网格数在 5.16×10^6 以上时,压头变化小于 0.5%,综合考虑精度及计算资源,确定网格 3 作为计算网格,其他研究方案网格数与此相当^[22]。

表 2 网格无关性测试

Tab. 2 Grid independence test

方案	网格数	压头/m
1	3 637 854	260.18
2	4 596 749	263.35
3	5 163 348	267.58
4	6 085 721	268.27
5	7 125 813	267.96

在透平试验台进行试验,验证数值模拟的准确性,试验现场及试验原理图如图 5 所示。工作原理为电机驱动增压泵提供透平所需的高压液体,高压

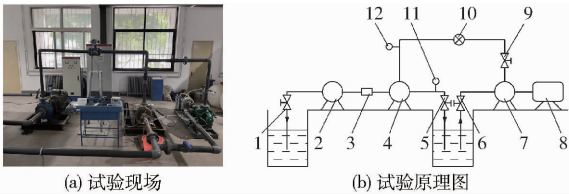


图 5 透平试验台

Fig. 5 Test of pump as turbine

1、5、6、9. 阀门 2. 磁粉制动器 3. 扭矩仪 4. 液力透平 7. 增压泵 8. 电机 10. 流量计 11、12. 压差传感器

液体经过透平后的输出功率被磁粉制动器消耗。在透平的进、出口安装压差传感器以测量进、出口压差,透平进口管路中安装电磁流量计测量透平进口流量,透平出口使用扭矩仪测得转速和扭矩^[23-24]。

电磁流量计型号为 MF200-101,量程 0.904 4~217.03 m³/h,精度为 ±0.1%;扭矩传感器型号为 DYN-200,量程为 0~800 N,精度为 ±0.1%;压差传感器型号为 ABGCP-1800/3351DP7S23B-M 2,量程为 0~10 MPa,精度为 ±0.2%。经过测试及计算,试验台流量、压头、功率与效率的综合不确定度分别为 ±0.52%、±0.46%、±0.65%、±1.08%。不确定度均在 GB/T 3216—2016 中 1 级验收等级的容许值范围内,说明本研究的试验方法和测试结果具有较高的可信度。

原型透平数值模拟结果与试验结果如图 6 所示。可以看出试验结果与数值模拟结果变化趋势一致。数值计算的效率高于试验值,原因主要是数值计算中忽略了轴承、轴封等机械损失。在高效点,功率、压头、效率的试验结果与数值模拟结果误差在

3% 内,在误差允许范围,因此本文采用的数值计算方案可以预估透平性能。

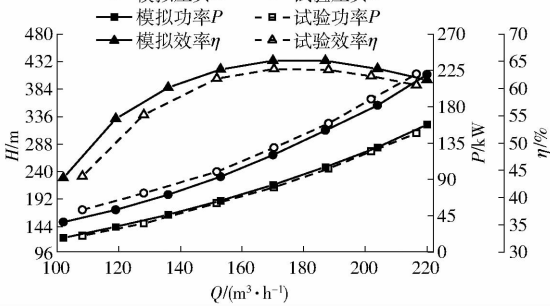


图 6 原型透平数值模拟与试验性能曲线
Fig. 6 Performance curves of prototype PAT obtained by experimental and numerical results

2.3 模拟结果分析

将数值模拟的各方案的功率、效率-流量性能曲线结果绘制于图 7。

从图 7a 可以看出,功率曲线斜率均随正导叶喉部面积 A_3 的增加而明显减小,符合理论分析,但减小的幅度也在逐渐变缓。另外, A_3 增大后,透平最高

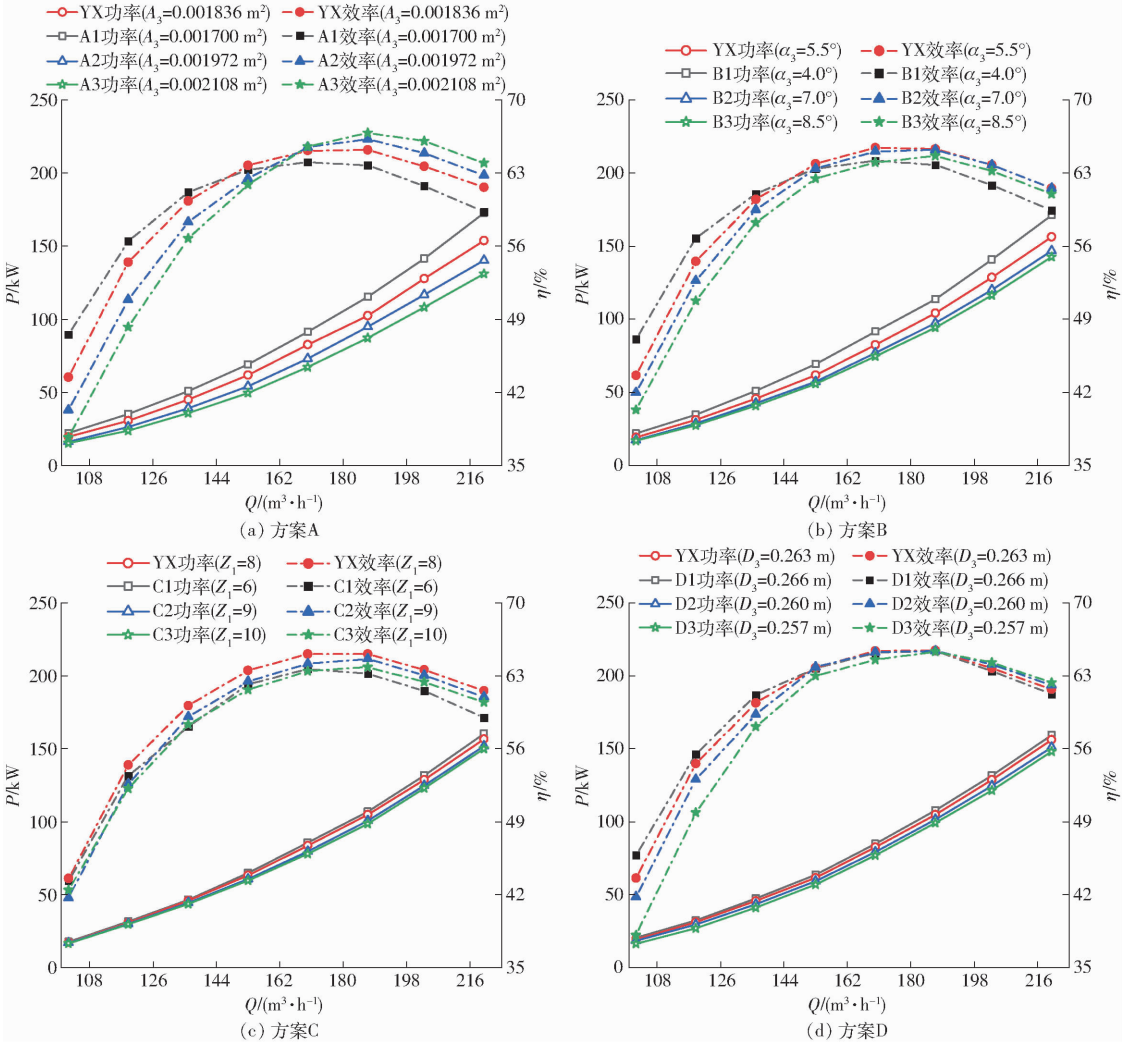


图 7 各方案功率、效率性能曲线
Fig. 7 Power and efficiency curves of research schemes

效率逐渐增大,增幅在逐渐变缓,高效点偏向大流量。因此,对研究对象而言,存在最佳 A_3 在使功率曲线更平坦的情况下透平效率最高。

从图 7b 可以看出,随着正导叶出口安放角 α_3 的增大,功率曲线斜率逐渐减小,功率曲线变平坦,符合理论分析。但是,随着 α_3 增大,曲线斜率减小幅度在不断变小。另外,小流量工况透平效率明显降低。

由图 7c 可以看出,正导叶叶片数 Z_1 增加后,功率曲线斜率稍有减小,曲线变平坦,符合理论分析。但曲线斜率减小幅度在不断变小,且 Z_1 增加或减小后在全工况范围透平效率均降低,高效区变窄。

由图 7d 可以看出,减小正导叶基圆直径 D_3 后透平功率曲线的斜率均逐渐降低,符合理论分析。但是随着 D_3 的减小,功率-流量性能曲线斜率变化较小。另外,在高效区附近,效率相差不大;在小流量工况下,透平效率明显降低。

采用原型透平数值模拟 YX 的高效点(设计工况点) $170\text{ m}^3/\text{h}$ 处功率曲线斜率来判断各方案曲线平坦性变化。表 3 为各研究方案的功率曲线斜率与最高效率,可以看出计算结果与理论分析相符,方案 A、B、C、D 的功率曲线斜率都变小。但是,各参数对功率曲线斜率的影响程度不同。其中方案 A 功率曲线变化显著,斜率减小 0.17;方案 B 功率曲线斜率稍有变化,减小 0.11;方案 C、D 功率曲线斜率基本不变,分别减小 0.05、0.03。由此说明在高效点对功率-流量性能曲线平坦性影响最大的正导叶几何参数为喉部面积,其次为正导叶出口安放角,对功率-流量性能曲线平坦性影响较小的正导叶几何参数为叶片数和基圆直径。

与原型透平 YX 相比,方案 A 最高效率有所提升,提升 1.65 个百分点;方案 B、C、D 最高效率均下降,分别下降 0.79、1.24、0.06 个百分点;方案

D 最高效率下降较少。由此得出适当增加正导叶喉部面积,透平的最高效率增大;适当增加正导叶的出口安放角、叶片数或适当减小正导叶基圆直径,透平的最高效率均减小。

表 3 各方案功率曲线斜率和最高效率
Tab.3 Slope of power curve and best efficiency for research schemes

方案	dP/dQ	$\eta/\%$
YX	1.39	65.27
A1	1.49	64.13
A2	1.30	66.27
A3	1.22	66.92
B1	1.48	64.17
B2	1.32	65.21
B3	1.28	64.48
C1	1.42	63.82
C2	1.37	64.79
C3	1.34	64.03
D1	1.41	65.26
D2	1.37	65.52
D3	1.36	65.21

3 结论

(1)基于欧拉方程,推导出了导叶式液力透平输出功率-流量曲线斜率(平坦性)与几何参数的关系。

(2)对于多级径向导叶泵作透平,适当增大正导叶的出口安放角、叶片数、喉部面积或适当减小正导叶基圆直径都可以使透平功率曲线变平坦,本文中两级透平功率曲线斜率依次减小 0.17、0.11、0.05、0.03。

(3)对于多级径向导叶泵作透平,正导叶喉部面积对功率曲线斜率影响最大;适当增大喉部面积可以使透平效率提升,本文中两级透平效率提升 1.65 个百分点,高效点向大流量偏移。

参 考 文 献

[1] SOUZA D, ANDRÉ L, CLAUDIO J. Pump-as-turbine for energy recovery in municipal water supply networks. A review[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(11): 489–511.

[2] 杨军虎,许亭. 气液两相介质的多级液力透平特性[J]. 兰州理工大学学报, 2015,41(2):45–50.
YANG Junhu, XU Ting. Performance of multistage hydraulic turbine with gas-liquid two-phase media[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015,41(2):45–50. (in Chinese)

[3] 王晓晖,杨军虎,郭艳磊,等. 反转泵液力透平速度滑移机理[J]. 机械工程学报, 2018,54(24):189–196.
WANG Xiaohui, YANG Junhu, GUO Yanlei, et al. Research on slip phenomenon of pumps as turbines [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(24):189–196. (in Chinese)

[4] 陈杰,花亦怀,苏清博,等. 中国首套 LNG 液力透平系统开发与工业化测试[J]. 天然气工业, 2016,36(5):98–105.
CHEN Jie, HUA Yihuai, SU Qingbo, et al. Development and industrial tests of first LNG hydraulic turbine system in China [J]. Natural Gas Industry, 2016,36(5):98–105. (in Chinese)

[5] 廖远桓. 成品油管道余压发电用液力透平研究[J]. 流体机械, 2022, 50(5):91–98,104.
LIAO Yuanhuan. Research on hydraulic turbine for residual pressure power generation in product oil pipeline [J]. Fluid

- Machinery, 2022, 50(5):91–98,104. (in Chinese)
- [6] WANG T, WANG C, KONG F Y, et al. Theoretical, experimental, and numerical study of special impeller used in turbine mode of centrifugal pump as turbine[J]. Energy, 2017, 130: 473–485.
- [7] 杨军虎,马琦航,罗钰铜,等. 液力透平几何参数对压头-流量曲线的影响[J]. 农业机械学报, 2019,50(5):167–172. YANG Junhu, MA Qihang, LUO Yutong, et al. Influence of geometric parameters on the head-flow curve of pump as turbine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(5):167–172. (in Chinese)
- [8] 苗森春,张佳伟,王晓晖,等. 正导叶进出口角对多级液力透平性能的影响[J]. 水力发电学报, 2023,42(3):60–69. MIAO Senchun, ZHANG Jiawei, WANG Xiaohui, et al. Influence of inlet and outlet angles of positive guide vane on the performance of multi-stage hydraulic turbines[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023,42(3):60–69. (in Chinese)
- [9] 柴立平,黄鑫,邹文鹏,等. 导叶数对多级离心泵反转式透平性能的影响[J]. 中国农村水利水电, 2018(5):181–185. CHAI Liping, HUANG Xin, ZOU Wenpeng, et al. The influence of number of guide vanes on performance of inverted turbine of multistage centrifugal pumps[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(5):181–185. (in Chinese)
- [10] JIANG X P, WANG C, WU J, et al. Effect of diffuser inlet width on cantilever multistage centrifugal pump[J]. DYNA, 2017, 92(1):63–70.
- [11] 曹卫东,刘光辉,刘冰. 两级离心泵径向导叶水力优化[J]. 排灌机械工程学报, 2014,32(8):663–668. CAO Weidong, LIU Guanghui, LIU Bing. Hydraulic optimization of radical guide vanes in two-stage centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(8):663–668. (in Chinese)
- [12] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.
- [13] 汪家琼,孔繁余. 多级离心泵叶轮与导叶水力性能优化研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013,41(3):92–96. WANG Jiaqiong, KONG Fanyu. Hydraulic performance optimization study on impeller and diffuser of multi-stage centrifugal pump[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(3):92–96. (in Chinese)
- [14] 张克危. 流体机械原理[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [15] GÜLICH J F. Centrifugal pumps[M]. Springer Berlin, Heidelberg, 2010.
- [16] 王桃,孔繁余,袁寿其,等. 前弯叶片液力透平专用叶轮设计与实验[J]. 农业机械学报, 2014,45(12):75–79. WANG Tao, KONG Fanyu, YUAN Shouqi, et al. Design and experiment of special impeller for forward-curved blade hydraulic turbine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(12):75–79. (in Chinese)
- [17] 王晓晖,杨军虎,夏正廷,等. 泵反转液力透平速度滑移的计算与分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(9):64–68. WANG Xiaohui, YANG Junhu, XIA Zhengting, et al. Calculation and analysis of velocity slip of pump as turbine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017,45(9):64–68. (in Chinese)
- [18] 史广泰,杨军虎. 离心泵用作液力透平叶轮出口滑移系数的计算方法[J]. 农业工程学报, 2014,30(13):68–77. SHI Guangtai, YANG Junhu. Calculation method of exit slip coefficient of hydraulic turbine with centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(13):68–77. (in Chinese)
- [19] 史广泰,杨军虎,苗森春. 离心泵作液力透平叶轮出口滑移系数的解析计算方法及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11):66–73. SHI Guangtai, YANG Junhu, MIAO Senchun. Analytical method and validation for determining slip factor at impeller outlet of centrifugal pumps as turbines[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(11):66–73. (in Chinese)
- [20] LIN T, ZHU Z, LI X, et al. Theoretical, experimental, and numerical methods to predict the best efficiency point of centrifugal pump as turbine[J]. Renewable Energy, 2021,168:31–44.
- [21] 赵伟国,李清华,亢艳东. 离心泵叶片吸力面粗糙带抑制空化效果研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6):169–176,214. ZHAO Weiguo, LI Qinghua, KANG Yandong. Effect of suppressing cavitation of rough zone on suction surface of centrifugal pump blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6):169–176,214. (in Chinese)
- [22] 史凤霞,杨军虎,王晓晖. 含气率对液力透平影响的非定常分析[J]. 航空动力学报, 2017,32(9):2265–2272. SHI Fengxia, YANG Junhu, WANG Xiaohui. Unsteady analysis of effect on hydraulic turbine under variable gas content[J]. Journal of Aerospace Power, 2017,32(9):2265–2272. (in Chinese)
- [23] BARBARELLI S, AURELIO M, FLORIO G. Experimental activity at test rig validating correlations to select pump running as turbines in micro hydro plants[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 149:781–797.
- [24] JIANG B X, YANG J H, WANG X H, et al. Optimization of pumps as turbines blades based on SVM-HDMR model and PSO algorithm[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(7):742–747.