

S形轴伸泵装置在某城市排涝泵站的应用与性能分析

黄佳卫¹ 赵苗苗² 王宏俊³ 沈波⁴

1 长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司, 上海 201900

2 苏州市水利设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215003

3 长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司, 上海 201900

4 长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司, 上海 201900

[摘要]为探索及预测某城区排涝泵站的最优叶片角度、运行性能及内部流动特征,采用CFD技术分别对S形轴伸泵装置不同叶片角度进行全流道数值模拟计算,获得了不同叶片角度下的性能曲线及泵装置内部流场。结果表明:在设计排涝流量下,叶片安装角度 -2° 时性能最优,泵装置扬程为2.04m,泵装置效率为75.16%,高效区广,满足《泵站设计规范》(GB50265-2010)要求,且进出水流动内部流线平顺,无旋涡产生,泵装置性能优异。

[关键词]低扬程; S形轴伸泵; 城市排涝; 数值模拟; 性能预测

DOI: 10.33142/hst.v6i9.10415

中图分类号: TV675

文献标识码: A

Application and Performance Analysis of S-shaped Axial Extension Pump Device in a Drainage Pump Station in a Certain City

HUANG Jiawei¹, ZHAO Miaomiao², WANG Hongjun³, SHEN Bo⁴

1 Shanghai Branch, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

2 Suzhou Water Conservancy Design and Research Institute Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215003, China

3 Shanghai Branch, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

4 Shanghai Branch, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

Abstract: In order to explore and predict the optimal blade angle, operating performance, and internal flow characteristics of a drainage pump station in a certain urban area, CFD technology was used to conduct full channel numerical simulation calculations on different blade angles of the S-shaped axial extension pump device, and the performance curves and internal flow field of the pump device at different blade angles were obtained. The results show that under the designed drainage flow rate, the performance is optimal when the blade installation angle is -2° , the pump device head is 2.04m, the pump device efficiency is 75.16%, and the high efficiency area is wide, meeting the requirements of the "Design Specification for Pump Stations" (GB50265-2010). The internal flow line of the inlet and outlet water channels is smooth, without vortex generation, and the pump device performance is excellent.

Keywords: low head; S-shaped shaft extension pump; urban drainage; numerical simulation; performance prediction

引言

城市防洪排涝工程是保障城市安全的减灾性工程^[1],而城市排涝泵站是城市防洪排涝的主要措施之一,其主要具有扬程低、流量大及运行时段短。通常采用卧式机组,包括竖井贯流泵装置、S形轴伸泵装置及潜水贯流泵装置等^[2]。本泵站设计标准为20年一遇,设计排涝流量为 $21\text{m}^3/\text{s}$,共四台机组,单机排涝流量为 $5.25\text{m}^3/\text{s}$ 。外河设计水位为5.50m,内河水位为4.00m;在考虑门槽及拦污栅等损失的情况下,设计扬程为1.80m,为典型的城市低扬程排涝泵站。宜采用结构形式简单、维修便捷的S形轴伸贯流泵装置^[3]。

S形轴伸泵装置应用较早,早期装置效率普遍较低,但随着学者的不断研究与优化,解决了装置性能欠佳的问题,装置最高效率超83%^[4]。S形轴伸泵装置由进水流道、叶轮、导叶、S形弯管及出水流道组成,水流在S形弯管内发生转向,此时水流环量较大,呈螺旋状运动。弯管段的水力损失及环量

回收是泵装置性能的主要影响因素^[5-9]。通过对泵装置进行四种不同叶片角度的数值模拟分析,验证流道设计的合理性,提供泵站运行最优叶片角度,同时预测泵站总体运行性能。

1 计算模型

1.1 几何建模及网格划分

采用UG NX软件对进水流道、S形弯管、出水流道进行实体建模,装置模型如图1所示,以ICEM软件进行流道网格剖分;水泵造型采用ANSYS TurboGrid软件对叶轮与导叶进行实体建模与网格剖分,同时考虑了水泵叶顶间隙的影响,叶顶间隙设置为0.1mm。

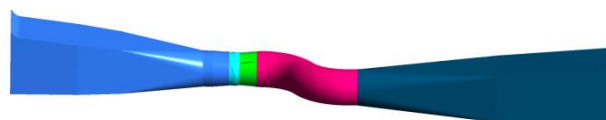


图1 S形轴伸泵装置三维模型

泵装置计算区域的网格单元数共计 3865952 个, 其中进水流道网格数 829080 个, 叶轮网格数 811120 个, 导叶网格数 899500 个, 弯管及出水流道网格数 1326252 个, 网格质量均满足计算要求, 网格划分及网格质量如图 2 和图 3 所示。各物理量的残差收敛精度均设置为 1.0×10^{-4} 且装置扬程的变化趋势已趋于定值, 即该工况下数值模拟计算满足收敛要求。

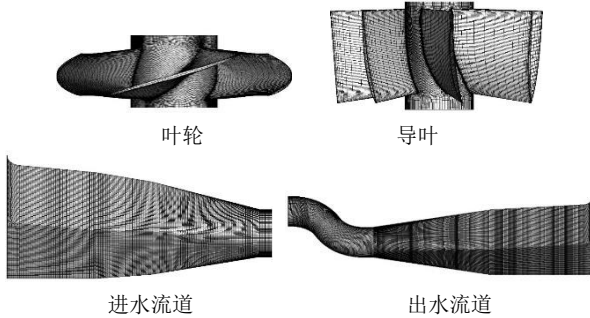


图 2 模型网格图 (a)

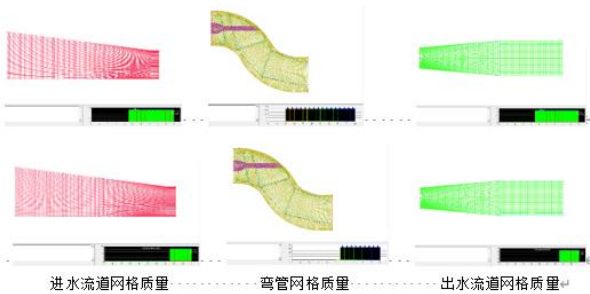


图 3 模型网格图 (b)

1.2 紊流模型及边界条件

泵叶轮内部流动是三维非正常紊流流动, 但是在水泵稳定运行后可认为叶轮相对运动是定常流动, 本次计算采用常规方法处理叶轮与进水流道、导叶之间动静耦合流动的参数传递。控制方程的离散采用基于有限元的有限体积方法。扩散项和压力梯度采用有限元函数表示, 对流项采用 high resolution。采用雷诺平均 N-S 方程与标准 k-ε 模型。

进水流道进口边界采用流量进口, 出水流道出口边界设置为一个标准大气压。叶轮直径为 300mm, 转速 1250r/min。泵装置进水流道、叶轮的轮毂与外壳、导叶体及出水流道均设置为静止壁面, 采用无滑移条件, 近壁区采用标准壁面函数。

2 泵装置内部流动特性

叶片角度越小, 泵装置性能曲线向小流量偏移。为选定本泵站最优的叶片安放角度, 采用 CFD 技术对 -4° 、 $+2^\circ$ 、 0° 、 -2° 四种叶片角度进行数值模拟, 每个叶片角度下分别计算流量由小到大 9 种工况, 共计 36 种工况进行计算, 得到了泵装置内流场的速度分布等信息。

2.1 泵装置流场分析

泵装置内部的三维流线是对泵装置性能的最直接体现, 装置内部流线越平顺, 泵装置性能优越。《泵站设计

规范》要求泵装置运行需位于高效区附近, 因此分别截取四种叶片角度最优工况的泵装置内部流线, 如图 4 所示。

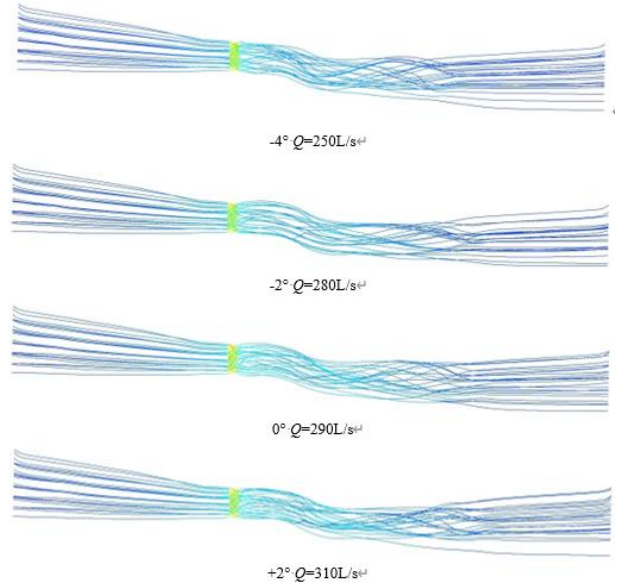


图 4 泵装置内部三维流线图

由上图可知: 进水流道渐缩到圆形断面, 内部流场的流线平顺, 在进水流道出口处, 流速较大, 经过导水帽流入叶轮室, 通过叶轮旋转做功及导叶回收压能和环量, 水流由于导叶吸收环量不充分, 水流呈螺旋状出流, 直至出水流道后半段, 流态才恢复平顺。

为了更深入全面地了解泵装置内部流态, 截取泵装置水平断面 $X=0m$ (图 5), 分析四种叶片角度的小流量、最优流量以及最大流量三种工况下的泵装置内部流动特性, 如图 5~8 所示。

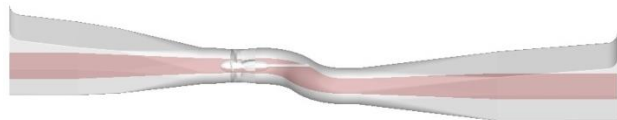


图 5 $X=0m$ 水平断面位置示意图

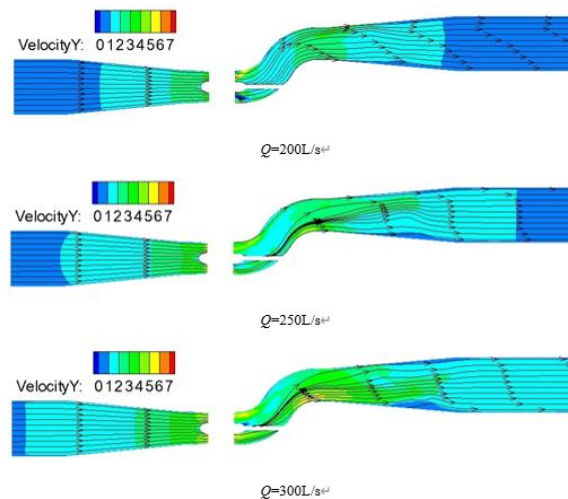


图 5 -4° 速度云图及流线

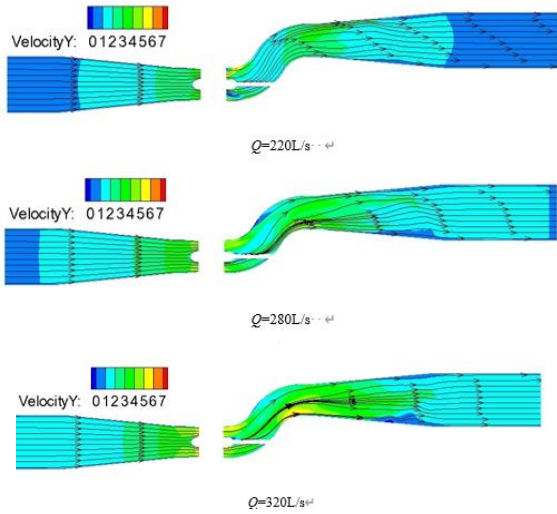


图6 -2° 速度云图及流线

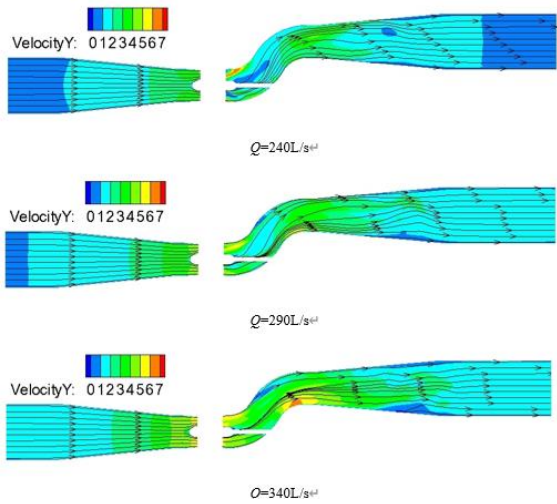


图7 0° 速度云图及流线

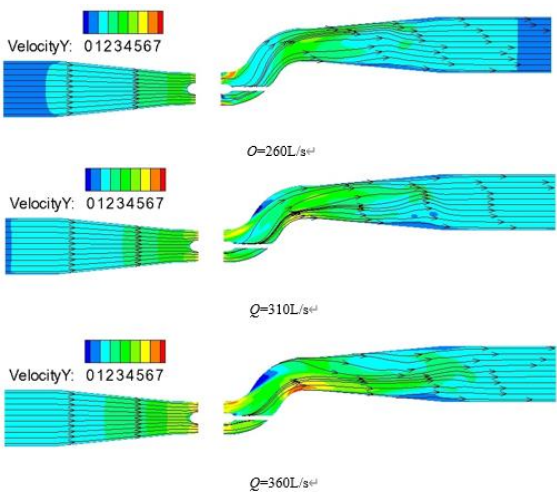


图8 +2° 速度云图及流线

在不同叶轮角度下,该断面的流线均无旋涡,流态较好。进水水道内部流线分布均匀,流速随着截面面积的减小逐渐增大,均匀变化。从流线角度看,流线在S形弯管

段分布较差。由于在S形弯管段水流呈螺旋状流出,导致弯管段速度分布不均,局部存在高速区,呈现外侧压力大,流速小,而内侧压力小,流速大的特征,且随着流量的增大,特征越发明显。

2.2 进水水道出口轴向速度分析

从断面X=0位置的流线分布可知,进水水道内部流线在各工况与各叶片角度下均分布均匀,流态良好。同时叶片旋转虽会对进水水道出口的流态造成影响,但影响较小,故本次仅分析叶片角度0°下进水水道出口断面的轴向速度分布。截取进水水道出口纵断面距叶轮中心线水平距离为-0.05m(图9),轴向速度云图如图10。

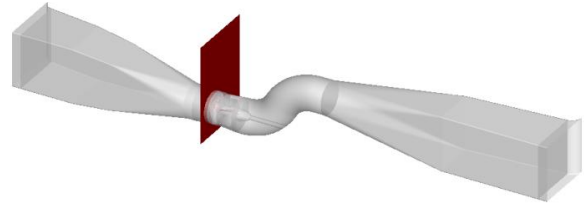


图9 进水水道出口断面截面位置示意图

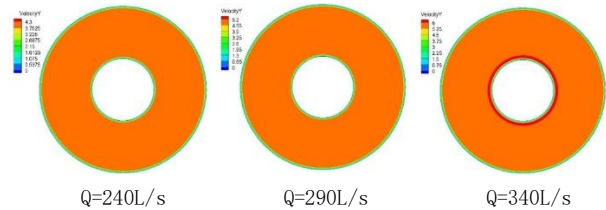
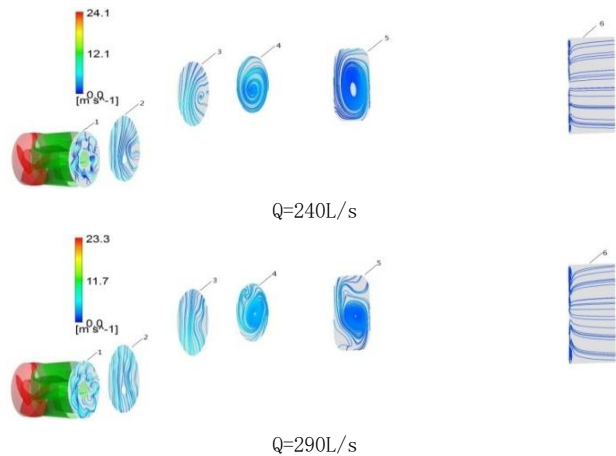


图10 0° 进水水道出口断面轴向速度速度云图

由图10可知:进水水道出口断面轴向速度在大流量、最优流量及小流量工况下均分布均匀,且对称分布,不同流量对轴向速度分布变化影响极小,故进水水道能够为叶轮提供良好的进水流态,保证泵装置运行性能。

2.3 出水水道流线与流量分析

为进一步分析出水水道内部的流动特征,取出水道多个控制断面进行流线与流量分析,由于-4°、-2°、0°与+2°下控制断面的流线基本相近,故仅给出叶片角为0°时小流量、设计流量与大流量工况下控制断面的流线与流量,如图11与12所示。



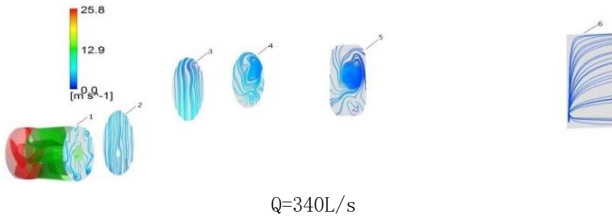


图 11 不同流量下水流道控制断面流线图

由图 11 可得，断面 1 为弯管的进口，同时也是水泵导叶的出口，水流从叶轮带来的剩余环量大，在小流量工况下尤为突出。此时进入弯管的水流轴向速度较大，在弯管径向约束作用下，未能形成横向二次环流的形态，在小流量情况下弯管中部断面 3 处偏向一侧出现较小的回旋区，而设计流量与大流量工况下横向二次环流形成位置偏后，并向直段延续发展，在弯管出口断面 4 及其后的直管断面 5 形成全断面的回旋。从不同的流量工况看，随着流量的减小，在小流量工况 (Q=240L/s) 断面回旋的形态更为明显；在设计流量 (Q=290L/s) 与大流量工况 (Q=340L/s) 时，弯管中部断面 3 的回旋形态并不明显，但是在弯管出口断面 4、直管断面 5，与较小流量的工况一样，均为全断面的回旋流动。

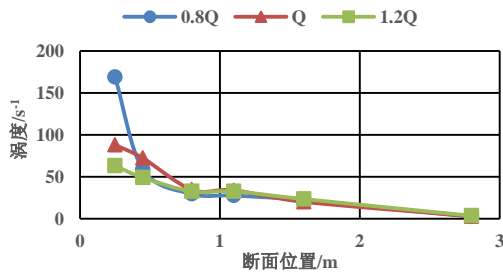


图 12 不同断面位置的流量图

由图 12 可知，在三个工况下，从导叶出口到出水流出断面旋涡强度均呈下降趋势，其中小流量工况下从断面 1 至断面 3 下降梯度最大；最高效率工况和大流量工况下断面 1 至断面 3 下降梯度相对较缓；3 个工况的断面 4 至断面 6 的涡度变化规律一致。弯管内总的水流涡旋强度从 S 形弯管进口断面 1 的最大值下降至 S 形弯管出口断面 3，基本稳定至断面 4。这种情况表明，S 形弯管抑制横向回旋流动，回收旋转动能的效果很好，尤其对于小流量工况，弯管回收旋转动能的效果更佳，对提高泵装置的运行效率极为有利。

3 流道性能分析

在选定水泵的情况下，泵装置性能主要取决于进水流道的水力性能。进水流道的出口就是叶轮室的进口，其轴向速度分布均匀度 V_{zu} 反映了进水流道的设计质量， V_{zu} 约接近 100%，表明进水流道的出口水流的轴向流速分布越均匀。同时若进水流道出口有横向流速存在，将会改变水泵设计进水条件，影响水泵的能量特性和气蚀特性，通常以速度加权平均角度 $\bar{\theta}$ 来衡量。 $\bar{\theta}$ 值越接近 90° ，出

口水流越接近垂直于出口断面，叶轮室的进水条件越好。计算式分别为：

$$V_{zu} = \left\{ 1 - \frac{1}{v_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2}{n}} \right\} \times 100\% \quad (1)$$

式中： V_{zu} ——流道出口断面轴向流速分布均匀度，%； \bar{v}_a ——流道出口断面轴向流速算术平均值； v_{ai} ——流道出口断面各计算单元的轴向速度，m/s； n ——出口断面上的计算单元个数。

$$\bar{\theta} = \frac{\sum v_{ai} \left[90^\circ - \arctan \frac{v_{hi}}{v_{ai}} \right]}{\sum v_{ai}} \quad (2)$$

式中： $\bar{\theta}$ ——流道出口断面轴向流速分布均匀度； v_{hi} ——流道出口断面各计算单元的横向速度，m/s。

水力损失是泵装置及其各部件性能发挥的最明显体现。根据伯努利能量方程及模型计算得到的流速场和压力场，预测各过流部件的水力损失，计算式为：

$$\Delta h = E_1 - E_2 = \left(\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + Z_1 - Z_2 \right) + \left(\frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} \right) \quad (3)$$

$$E_1 = \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad (5)$$

式中： E_1 为流道进口处的总能量； E_2 为流道出口处总能量。

3.1 进水流道水力性能分析

导出 36 个计算工况的进水流道出口断面的流速、进水角度及流道水力损失，与流量的关系曲线如图 13~15 所示。

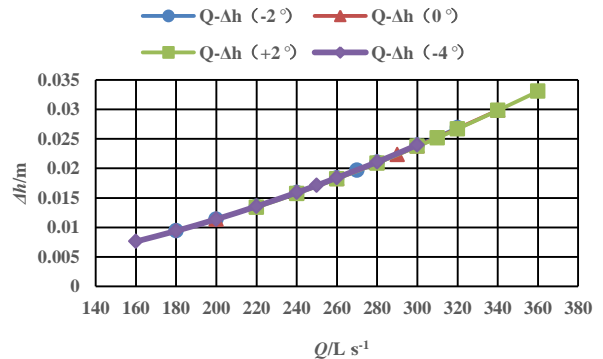


图 13 进水流道水力损失

由图 13 看出，四条进水流道水力损失随流量的变化曲线重叠在一起，故不同叶片角度下，相同流量的进水流道水力损失相差不大。水力损失随流量的增大而逐渐增大，变化范围较小，为 3.3cm。

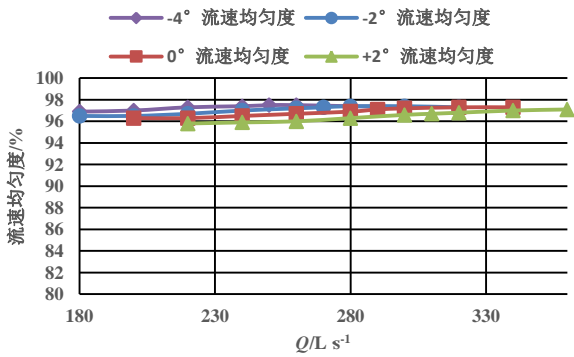


图 14 进水渠道出口断面轴向速度分布均匀度

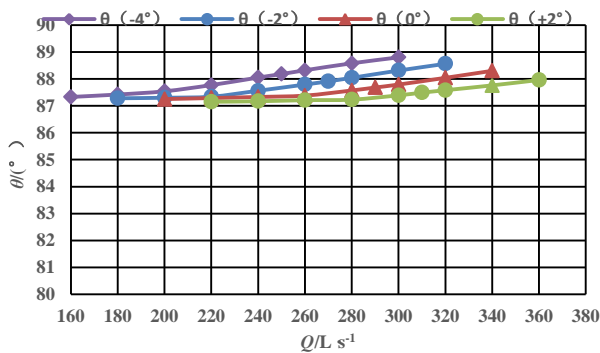


图 15 进水渠道出口断面速度加权平均角

由图 14 与 15 可知,不同叶片角度下,加权平均角均大于 87.2°,轴向速度均匀度均大于 95.8%,且轴向速度分布均匀度与速度加权平均角随着流量的增大而逐渐增大,但整体变化范围较小,轴向速度分布均匀度的变化范围为 1.3%,加权平均角的变化范围为 1.28°。可见,进水渠道内部流态较好。

3.2 出水渠道水力性能分析

同样的,对出水渠道的水力性能进行分析,计算结果如 16 所示。出水渠道水力损失随流量的增大而呈现一个先减小后逐渐增大的趋势,且水力损失最小值出现在泵装置效率最高区域附近。由于 S 形轴伸泵装置出水渠道几何特征较为复杂,水流从导叶流出后,螺旋状通过 S 形弯管,水流转向较大,水力损失较大,出水渠道水力损失变化范围为 81cm。

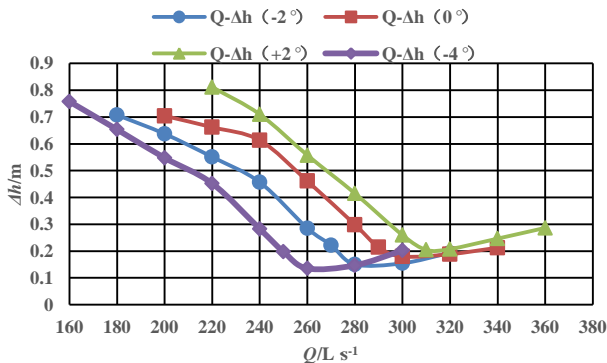


图 16 出水渠道水力损失

4 泵站性能预测

由于本泵站叶轮直径 1.55m,转速 184r/min,而数值模拟的叶轮直径为 300mm,转速 1250r/min。根据模型泵装置数值模拟计算得到数据,遵照水泵相似准则中流量、扬程、轴功率的换算公式,可得原型泵装置各工况运行数据,性能曲线如图 17 所示。

$$Q_P = Q_M \left(\frac{n_P}{n_M} \right) \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^3 \quad (6)$$

$$H_P = H_M \left(\frac{n_P}{n_M} \right)^2 \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \quad (7)$$

$$P_P = P_M \frac{\rho_P}{\rho_M} \left(\frac{n_P}{n_M} \right)^3 \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^5 \frac{\eta_{h,M}}{\eta_{h,P}} \quad (8)$$

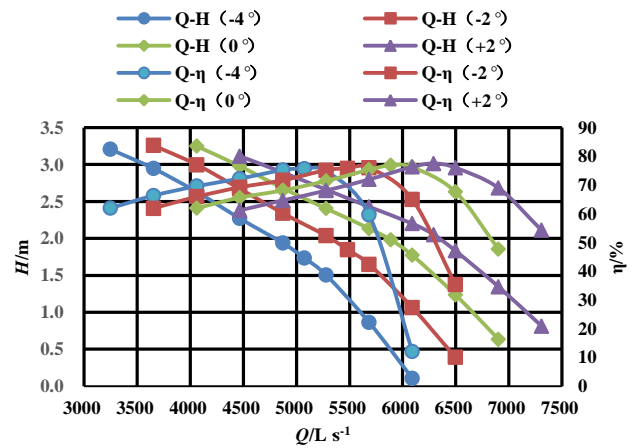


图 17 模型泵装置扬程、效率曲线

由图 17 可见:该泵站不同叶片角度最优工况的运行效率位于 76%附近,且随着叶片角度的增大,最优工况的效率略有上升,同时泵站运行效率大于 70%的流量区间大于 1.0m³/s,高效区较广,可应对多种运行工况。

在保证设计排涝流量的前提下,叶片角度为-4°时,扬程为 1.51m,泵站效率为 74.88%;叶片角度为-2°时,扬程为 2.04m,泵站效率为 75.16%;叶片角度为 0°时,扬程为 2.41m,泵站效率为 71.41%;叶片角度为+2°时,扬程为 2.66m,泵站效率为 68.09%,因此,本泵站叶片安放角应选用-2°最为适宜。

5 结论与展望

(1) 对泵装置进行了叶片安放角-4°, -2°, 0°, +2°的全流道数值模拟计算,根据计算结果,-4°最高效率点出现在 Q=5076L/s,扬程 H=1.73m,泵站最高运行效率为 75.70%;-2°最高效率点出现在 Q=5685L/s,扬程 H=1.65m,泵站最高运行效率为 76.03%;0°最高效率点出现在 Q=5888L/s,扬程 H=1.98m,泵站最高运行效率为 76.88%;+2°最高效率点出现在 Q=6294L/s,扬程 H=2.05m,泵站最高运行效率为 77.50%。在三个叶片安放角下装置

最高效率达到 76%以上,同时进出水流道内部流态良好,无旋涡产出。

(2)在保证泵站设计排涝流量的前提下,叶片角度为 -2° 最为适宜,此时泵站扬程为 2.04m,与设计扬程 1.80m 十分接近,泵站运行效率较高,达 75.16%,且有 0.2m 的富余扬程,以防施工工艺等因素造成的水头损失,进一步保障泵站运行安全。

(3)不同叶片角度下,泵站运行效率大于 70%的流量区间大于 $1.0\text{m}^3/\text{s}$,高效区广,能有效应对泵站突发的各种运行工况,保障城区防洪排涝能力,同时泵站最大扬程大于 3.0m,满足泵站最高扬程运行要求。

(4)在三维正向设计的大趋势下,各设计院基本可以完成泵站的三维模型,若水机专业设计人员能进行泵装置性能预测与分析,合理选用泵装置形式并且优化流道形式,将显著提高泵站设计可靠性,同时节约电力资源。

[参考文献]

- [1]陈晔,程实.平面 S 形轴伸泵在苏州市城市防洪工程中的应用[J].水利规划与设计,2012(4):39-40.
- [2]张松,黄佳卫,罗秀娜,等.扬州市安墩闸站 S 形轴伸泵装置选择及应用[J].江苏水利,2019(1):52-54.
- [3]张松,钱军,高慧,等.黄金坝泵站平面 S 形贯流泵装置物理模型试验分析[J].中国农村水利水电,2019(6):121-124.
- [4]刘超,杨帆,杨华,等.新型高效 S 形轴伸贯流泵装置项目研究[J].水力发电学报,2013,32(5):251-255.
- [5]刘超.轴流泵系统技术创新与发展分析[J].农业机械学报,2015,46(6):49-59.
- [6]刘超,杨帆,金燕,等.高效 S 形轴伸贯流泵装置内部流动特性研究[J].水力发电学报,2014,33(5):198-203.
- [7]刘超,张松,谢传流,等.高效 S 形轴伸泵装置优化设计与模型试验[J].农业机械学报,2017,48(12):132-140.
- [8]徐磊,刘超,王芃也,等.平面 S 形轴伸泵装置变转速水力特性[J].灌溉排水学报,2016,35(1):74-79.
- [9]戴启璠.大型低扬程泵装置现状及发展方向[J].江苏水利,2018(6):54-58.
- [10]湖北省水利水电勘测设计院.泵站设计规范:GB50265-2010[S].北京:中国计划出版社,2011.

作者简介:黄佳卫(1993.11—),男,汉族,毕业学校:扬州大学,现工作单位:长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司;赵苗苗(1992.3—),女,汉族,毕业学校:扬州大学,现工作单位:苏州市水利设计研究院;王宏俊(1980.11—),男,汉族,毕业学校:河海大学,现工作单位:长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司;沈波(1982.12—),男,汉族,毕业学校:河海大学,现工作单位:长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司。