

慎江泵站特低扬程大流量竖井贯流泵 装置外特性试验研究

陆伟刚¹, 周秉南¹, 夏辉², 徐磊¹, 徐波^{1*}

(1.扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009;

2.江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

摘 要:【目的】检验特低扬程大流量泵站中竖井贯流泵装置的水力性能, 了解泵站的真实运行情况。【方法】采用模型试验的方法, 研究了慎江泵站竖井贯流泵装置的外特性, 并分析数据提出了改进方案。【结果】泵装置的最高效率出现在叶片角 0°工况, 可达 77.57%, 此时泵装置流量为 220.5 L/s, 扬程为 1.95 m。在试验扬程范围内, 慎江泵站的装置汽蚀余量充裕, 不会产生汽蚀危害。在叶片角为 0°时, 最大扬程为 2.93 m 时, 飞逸转速相当于额定转速的 1.80 倍。原方案设计扬程工况下, 泵装置的流量偏小, 而且在最大扬程工况下的飞逸转速偏大, 对泵站安全运行不利。提出提高泵装置额定转速的优化方案, 验证得在新转速下泵装置设计扬程对应的能量特性、汽蚀特性以及飞逸转速特性均满足要求。【结论】竖井贯流泵装置水力性能优异, 装置效率高, 在特低扬程泵站中前景良好, 建议优先采用。

关键词: 泵装置; 模型试验; 竖井贯流泵; 外特性; 特低扬程大流量泵站

中图分类号: TV131.63; TV675

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020567

OSID:



陆伟刚, 周秉南, 夏辉, 等. 慎江泵站特低扬程大流量竖井贯流泵装置外特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 52-59.

LU Weigang, ZHOU Bingnan, XIA Hui, et al. Experimental Study on External Characteristics of Ultra-low Lift and Large-flow Shaft Tubular Pump[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 52-59.

0 引 言

【研究意义】竖井贯流泵装置是一种新的水泵装置形式, 其发电机组装置布置在开敞的竖井内, 防潮、通风条件好, 具有运行维护方便、机组结构简易、造价较低的优点, 一般应用于低扬程大流量泵站^[1-2]。随着竖井贯流泵装置的发展, 在特低扬程大流量泵站中也开始采用竖井贯流泵装置。慎江泵站属于特低扬程大流量泵站, 采用前置竖井贯流泵装置, 肩负着区域防洪排涝的重要任务, 工程安全极其重要。为确保泵站建成后在运行范围内能够安全、稳定以及高效运行, 通过模型试验研究来检验前置竖井贯流泵装置的外特性并提出改进措施。【研究进展】近年来, 许多学者对竖井贯流泵装置的内外特性展开了研究。刘君等^[1]利用数值模拟的方法对前、后置竖井贯流泵装置的内特性进行对比分析, 认为前置竖井贯流泵装置比后置竖井贯流泵装置具有更好的内特性。颜红勤^[2]介

绍了低扬程泵站竖井贯流泵装置主要参数的确定方法, 并利用这些参数对前、后置竖井贯流泵装置的外特性进行对比分析。谢荣盛等^[3]利用数值模拟的方法比较了竖井贯流泵和轴伸贯流泵的水力特性。陈佳琦等^[4]提出了一种竖井贯流泵装置进出水流道规则化的设计方法, 并展开了数值模拟和模型试验研究。徐磊等^[5-6]对邳州泵站竖井式贯流泵装置的内外特性进行研究, 得出其外特性性能优异的主要原因在于其具有优异的内特性。也有不少学者^[7-12]对竖井贯流泵装置的进出水流道进行优化设计, 并通过模型试验来检验其外特性, 验证了在低扬程大流量泵站中, 竖井贯流泵装置具有优秀的水力特性。而关于竖井贯流泵装置在特低扬程大流量泵站中的相关研究还是较少。朱红耕等^[13-14]研发了一种新型竖井贯流泵装置, 通过数值模拟得出该竖井贯流泵装置具有较高的水泵装置效率, 适用于低扬程泵站尤其是超低扬程的城市防洪泵站。徐磊等^[15-17]采用三维湍流数值计算的方法对不同类型进出水流道的竖井贯流泵装置进行了水力设计方案比较, 认为前置竖井贯流泵装置适宜在特低扬程泵站推广应用。陆伟刚等^[18]对竖井贯流泵装置进行模型试验研究, 认为对于特低扬程泵站, 竖井贯流式水泵能量特性较好。【切入点】前人的研究更多是通

收稿日期: 2020-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779215, 52079120, 51409227)

作者简介: 陆伟刚(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事泵站工程方面研究。E-mail: wglu@yzu.edu.cn

通信作者: 徐波(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事水工结构优化设计与工程水力学方面研究。E-mail: xubo@yzu.edu.cn

过数值模拟对竖井贯流泵装置的水力性能进行预测,对于竖井贯流泵装置的真实运行情况研究较少。本文以模型试验研究为切入点,研究竖井贯流泵装置在特低扬程泵站中的真实运行情况。【拟解决的关键问题】本文以慎江泵站为例,对前置竖井贯流泵装置在特低扬程大流量泵站中的外特性进行模型试验研究,并对外特性试验结果进行讨论与对比分析,最后提出优化方案并验证其可行性。研究成果对竖井贯流泵装置在特低扬程大流量泵站中的应用具有重要的参考价值和借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 工程概况

慎江泵站位于温州乐清市,是浙江省乐柳虹平原排涝工程的强排泵站。泵站设计净扬程 $H_{st}=0.98$ m,计及进口拦污栅污物水力损失,取装置设计扬程 $H_{sy}=1.38$ m;最高净扬程 $H_{stmax}=2.76$ m,计及进口拦污损失,取装置最高扬程 $H_{syman}=2.93$ m。泵站装设 2

台竖井贯流泵,单泵流量为 $20\text{ m}^3/\text{s}$,设计排涝流量为 $40\text{ m}^3/\text{s}$,水泵叶轮直径为 2.6 m ,水泵转速为 110 r/min 。泵站采用竖井双侧进水、平直管出水水道,顺水流向总长 39.32 m 。水道宽 7.2 m ,中隔墩厚度 1.0 m ,进、出口净宽 6.2 m ,快速闸门(带拍门)断流。

1.2 模型设计

慎江泵站原型泵叶轮直径 $D_n=2.6\text{ m}$,模型泵叶轮直径 $D_m=0.3\text{ m}$,模型比 $D_r=D_n/D_m=2.6/0.3=8.667$ 。原模型过流部件几何相似,尺寸按同一模型比确定。进出水道以钢板焊接制作;为满足糙度相似,钢制流道内壁加涂层。模型装置动力机与模型泵以伞齿轮传动(传动比 $1:1$),齿轮箱与模型泵之间装扭矩仪。流道模型见图 1、图 2,水泵装置模型见图 3。通过多方案比选及前期研究,水泵模型选择南水北调同台测试 TJ-07 模型,该模型叶片数 3,导叶数 5,轮毂尺寸 $d_h=98\text{ mm}$,并采用竖井贯流泵方案。试验选取原型泵转速 $n_n=110\text{ r/min}$ 。按 $n_m D_m=n_n D_n$ 条件,模型装置试验转速 $n_m=953.3\text{ r/min}$ 。

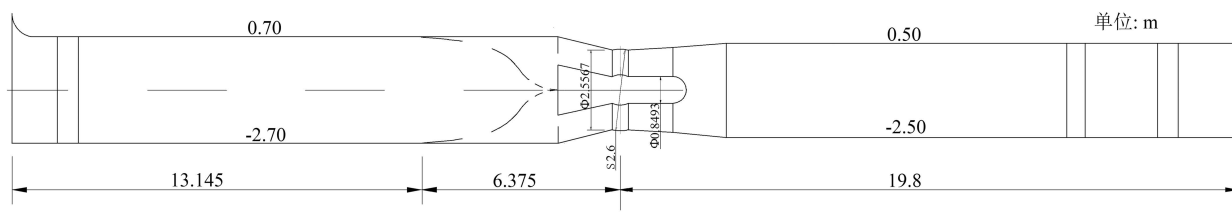


图 1 流道纵剖面

Fig.1 Longitudinal section of runner

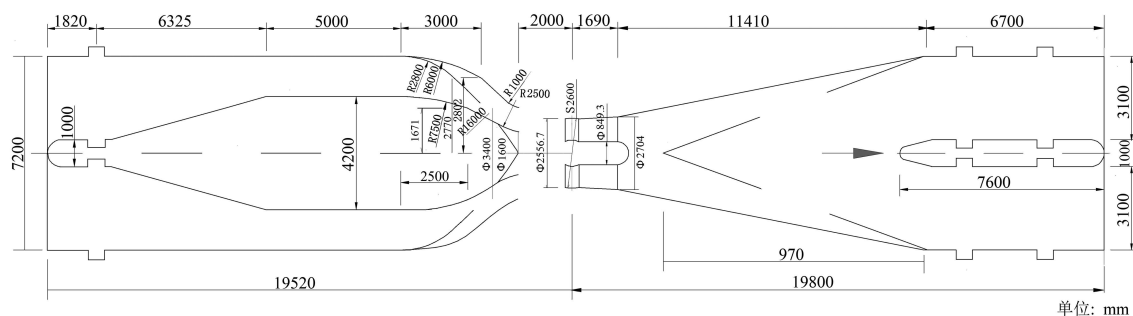


图 2 流道平面

Fig.2 Flow channel plan

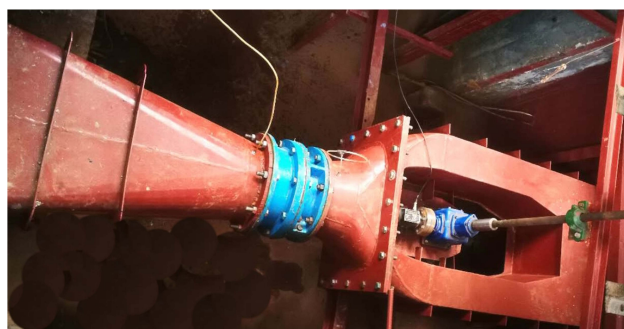


图 3 水泵装置模型

Fig.3 Model drawing of pump installation

1.3 模型试验系统

慎江泵站泵装置模型试验在扬州大学泵站试验

台进行。泵站试验台受试泵进出口过流设施可封闭可开敞,本项为常规能量特性、汽蚀特性、飞逸特性试验,根据任务要求,试验采用封闭布置。试验台为平面布置式,由水力循环系统、动力及控制系统和测量系统组成。水力系统包括: 80 m^3 开敞贮水池、 25 m^3 真空(压力)箱、 $2\text{ m}\times 2.0\text{ m}\times 4.0\text{ m}$ 移动式钢箱、 25 m^3 压力箱、 $\phi 500$ 回水管、 60 m^3 水量调节池等;动力设备除 40 kW 动力机外,另有 30 kW 贯流辅助泵及真空泵。试验台动力机系直流电动机,调速设备为 270 A (英) EURO THERM DRIVES LIMITED 公司 591C 直流装置,配 LC60BM-C15F 光电编码器反馈,转速控制精度 0.01% 。泵站试验台平面图如图 4 所示。

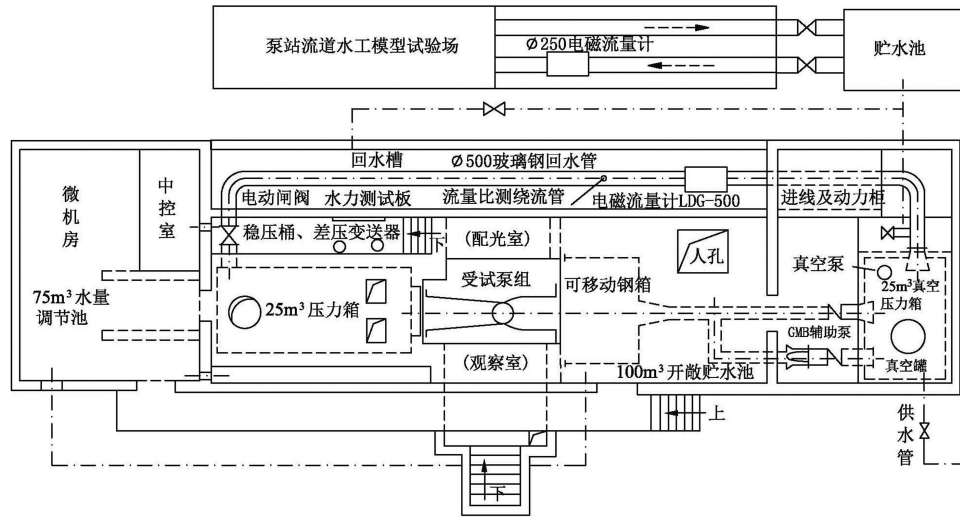


图4 泵站试验台平面布置图

Fig.4 Pumping station test bed layout

1.4 测试方法

在泵及泵装置外特性试验中,扬程、流量、转速、轴功率等测定通过传感器和数据采集卡、处理器及专用软件形成专用微机测试系统,试验数据自动采样和处理、显示、储存,其中汽蚀余量有图像显示功能。泵站试验台主要工作参数:扬程: -1~16 m; 流量: 0~0.8 m³/s; 动力机功率 40 kW, 转速 0~1 600 r/min。慎江泵站模型试验各参数测量仪器见表 1。

表 1 慎江泵站模型试验各参数测量仪器

Table 1 Various parameter measuring instruments in model test of Shenjiang pump station

测试参数	测量仪表
流量 Q	LDG-500 电磁流量计
泵装置扬程 H_{sy}	JC-E110A-EMS4A-92DA 电容式差压变送器
轴功率 P	马达天平测功机比测, 马达天平臂杆长 $L=0.974$ m
转速 n	JN338 型测功扭矩仪
泵叶轮中心压差 ΔH	JC-E110A-EMS4A-92DA 电容式差压变送器

除上述若干参数,水泵轴功率、泵装置效率、装置汽蚀余量以及飞逸转速通过下述方法进行测量。

1) 泵轴功率^[19]采用可靠的马达天平测功机比测,水泵轴功率(kW)计算式为:

$$P=2\pi(G-G_0)L/60=(G-G_0)n/1000, \quad (1)$$

式中: G 、 G_0 分别为负载条件和同转速无水空转条件马达天平砝码质量(kgf); L 为马达天平臂杆长(m)。

2) 模型装置效率。模型装置效率^[20]按下式计算并由微机系统显示、记录。计算式为:

$$\eta_{sy}=[\rho g Q H_{sy}/(P-P_0)] \times 100\%, \quad (2)$$

式中: ρ 为水体密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²); Q 为流量(m³/s); H_{sy} 为装置扬程(m); P 为输入轴功率(W); P_0 为空载功率(W)。

3) 泵装置有效汽蚀余量和临界汽蚀余量。装置有效汽蚀余量计算式为:

$$NPSH_a=p_a/(\rho g)+\Delta H-p_v/(\rho g), \quad (3)$$

式中: p_a 为当地的标准大气压(Pa); p_v 为试验水温下的饱和蒸汽压(Pa)。因 $p_a/(\rho g) \approx 10.33$ m, 水温摄氏 25 °C 时 $p_v/(\rho g) \approx 0.33$ m。

临界汽蚀余量(净正吸头) $NPSH_c$ 参照《水泵模型及装置模型验收试验规程》(SL140—2006) 规定^[21], 取泵效率下降 1% 时的有效汽蚀余量为临界汽蚀余量^[22] $NPSH_c$ 。

4) 飞逸转速。飞逸转速试验方法是: 拆除扭矩传感器与动力机联轴器的联接。开启辅助泵, 形成泵装置稳定反向水头, 水泵倒转; 实测倒转转速即为相应水头的飞逸转速。飞逸特性以单位飞逸转速 N_0 表示, 计算式为:

$$N_0=n_f D_m/H_m^{1/2}, \quad (4)$$

式中: n_f 为实测飞逸转速。每个叶片角度实测多组数据, 计算单位飞逸转速平均值。

5) 原模型流量、扬程、效率以及飞逸转速转换。泵站原模型流量、扬程^[23-25]计算式为:

$$Q_n=Q_m n_r D_r^3=Q_m D_r^2=75.11 Q_m, \quad (5)$$

$$H_n=H_m n_r^2 D_r^2=H_m, \quad (6)$$

式中: r 表示原模型比值; n 及 m 分别表示原型和模型。原模型装置效率采用等效率方法进行换算。原模型单位飞逸转速相同, 原型飞逸转速^[26]计算式为:

$$n_f=N_0 H_n^{1/2}/D_n. \quad (7)$$

1.5 误差分析

1) 流量测定精度。LDG-500 电磁流量计经上海工业自动化仪表研究所检定, 误差 $\delta_Q = \pm 0.24\%$, 取检定误差作为流量测定相对误差^[27]。

2) 扬程测定精度。JC-E110A-EMS4A-92DA 差压变送器不确定度小于 $\pm 0.1\%$ 。取变送器系统检定准确度作为系统误差, 则扬程测定误差 $\delta_H = \pm 0.1\%$ 。

3) 转速测定精度。591C 整流调速装置转速稳

定精度高于 $\pm 0.01\%$ ，转速的微机桌面显示值虽偶有约 $\pm (0.02 \sim 0.03)\%$ 波动，但实际转速并无变动。取转速测定精度为 JN338-200A 扭矩传感器二次仪表转矩不确定度。 $\delta_n = \pm 0.1\%$ 。

4) 扭矩、轴功率测定精度。JN338-200A 扭矩传感器扭矩仪经中国计量科学研究院检定，扭矩不确定度 $\delta_T = \pm 0.1\%$ ，扭矩和轴功率相对误差： $\delta_1 = \pm 0.1\%$ ； $\delta_p = (\delta_T^2 + \delta_n^2)^{1/2} = \pm (0.12 + 0.12)^{1/2} \% = \pm 0.14\%$ 。

5) 泵装置效率测试总误差。泵或泵装置效率测试系统误差系上述扬程、流量、功率误差合成^[28]： $\delta_n = (\delta_H^2 + \delta_Q^2 + \delta_P^2)^{1/2} = \pm (0.1^2 + 0.24^2 + 0.14^2)^{1/2} \% = \pm 0.295\%$

2 结果与分析

2.1 能量特性试验

对慎江泵站泵装置模型 5 个不同叶片角度下 ($\pm 4^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ 、 0°) 的能量特性进行测试，每个叶片角度下设置 13 个测量工况点。5 个叶片角度的最优效率工况见表 2。泵装置模型综合特性曲线见图 5，泵装置原型综合特性曲线见图 6，可以发现，在同一角度工况下，扬程随着流量减小而增大。

表 2 5 个叶片角最优效率工况

Table 2 Five blade Angle optimal efficiency conditions

叶片角/(°)	流量/(L·s ⁻¹)	扬程/m	装置效率/%	轴功率/kW
-4	177.3	1.92	76.86	4.34
-2	203.3	1.82	77.02	4.71
0	220.5	1.95	77.57	5.44
+2	230.0	2.15	77.00	6.30
+4	247.3	2.20	76.83	6.94

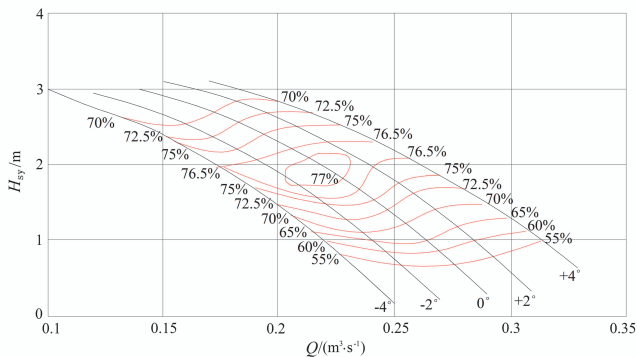


图 5 泵装置模型综合特性曲线 ($D_m=0.3\text{ m}$, $n_m=953\text{ r/min}$)

Fig.5 Comprehensive characteristic curve of pump unit model

慎江泵站 5 个叶片角度下，模型泵装置的最高效率在 76%~78%之间，随着叶片角度增大，泵装置最高效率先增大后减小。在叶片角为 0° 时，竖井贯流泵装置最高效率可达 77.57%，泵装置流量为 220.5 L/s，转换至原型泵装置流量为 16.56 m^3/s ，扬程为 1.95 m，说明竖井贯流泵装置在特低扬程泵站中可以获得较高的效率。由特性曲线可以看出， 0° 叶片角的扬程工

况被高效区覆盖范围最大，建议选用 0° 叶片角作为泵装置实际运行角度。在 0° 叶片角工况下，扬程达到设计扬程 1.38 m 时，泵装置效率为 70.69%，流量仅为 18.83 m^3/s 。慎江泵站在设计扬程工况下泵装置效率满足运行要求（大于 70%），但是流量偏小，需要提出改进措施以满足设计流量要求。

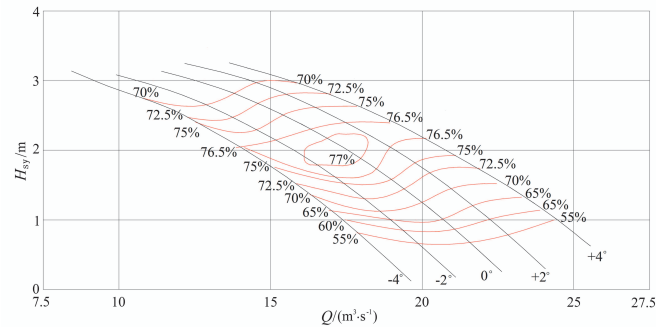


图 6 泵装置原型综合特性曲线 ($D_p=2.6\text{ m}$, $n_p=110\text{ r/min}$)

Fig.6 Comprehensive characteristic curve of pump prototype

2.2 汽蚀特性试验

模型泵装置的汽蚀试验采用定流量的能量法，取泵装置效率下降 1% 的汽蚀余量作为临界汽蚀余量。汽蚀特性试验在 $-4^\circ \sim +4^\circ$ 每个叶片角度设置 5 个流量工况点。泵装置原型设计净扬程和最高净扬程临界汽蚀余量见表 3；各叶片角扬程与原型临界汽蚀余量曲线见图 7。

表 3 泵装置原型设计净扬程和最高净扬程临界汽蚀余量

Table 3 Pump unit prototype design of net head and maximum net head critical cavitation allowance

叶片角/(°)	设计净扬程临界汽蚀余量/m	最高净扬程临界汽蚀余量/m
-4	4.5	3.7
-2	4.7	3.8
0	5.1	3.9
+2	5.6	4.0
+4	6.0	4.2

注 原型设计净扬程为 0.98 m；原型最高净扬程为 2.76 m。

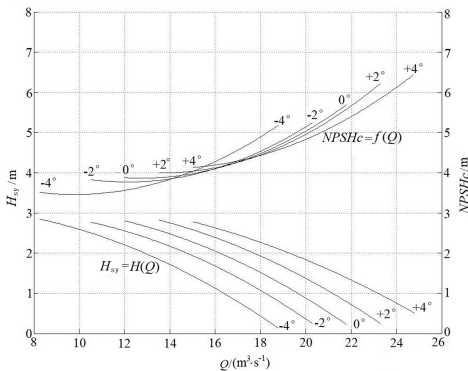


图 7 泵装置原型扬程与汽蚀特性曲线 ($D_p=2.6\text{ m}$, $n_p=110\text{ r/min}$)

Fig.7 Pump prototype head and cavitation characteristic curves

在试验结果的流量范围内，同一叶片角度下，临界汽蚀余量随着流量的增大而增大，与文献[19、25-26]

中的泵装置汽蚀特性试验规律一致。对比各叶片角度下的临界汽蚀余量,可以发现5个叶片角度下的临界汽蚀余量均远小于10 m(本试验的有效汽蚀余量大于10 m)。因此,试验扬程条件下,慎江泵站的装置汽蚀余量充裕,不会产生汽蚀危害。

2.3 飞逸特性试验

分别将水泵叶片角度调至 -4° 、 0° 、 $+4^\circ$ 试验角度,对水泵装置进行飞逸特性试验,试验测定模型泵作水轮机工况反转且输出力矩为0的转速。装置飞逸转速数据如表4所示。原型泵装置飞逸转速随扬程变化曲线如图8所示。

由表4可知,在 -4° 、 0° 、和 $+4^\circ$ 的试验角度下,原型泵装置的平均单位飞逸转速 N_0 分别为:398.7、

表4 装置飞逸转速数据

Table 4 Device runaway speed data

叶片角/ $^\circ$	平均单位飞逸转速 $N_0/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	最高扬程时原型泵飞逸转速 $N_f/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	与额定转速比值 λ	设计扬程时原型泵飞逸转速 $N_f/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	与额定转速比值 λ
-4	398.7	234.7	2.13	150.1	1.36
0	332.0	198.5	1.80	126.4	1.15
+4	268.9	171.8	1.56	102.4	0.93

注 原型设计扬程为1.38 m;原型最高扬程为2.93 m。

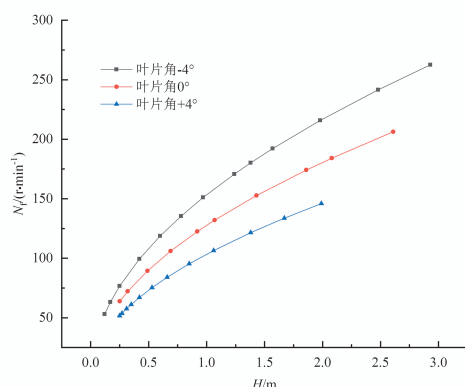


图8 原型泵装置飞逸特性曲线

Fig.8 Runaway characteristic curve of prototype pump device

2.4 运行方案调整

在 0° 试验角度运行方案下,慎江泵站装置扬程取设计净扬程0.98 m时,流量基本满足设计要求;但是,在设计扬程1.38 m时,叶片角 0° 运行方案的流量仅为 $18.83 \text{ m}^3/\text{s}$,流量偏小不满足设计流量的要求。而且,原型泵在 0° 叶片角工况下,最大净扬程2.76 m时,原型泵飞逸转速相当于额定转速的1.8倍,对泵站安全运行不利。为加大流量,并增加运行稳定性、安全性,适当增加转速是必要的。取转速 $n=120 \text{ r/min}$,原型性能曲线如图9;为作对比,取转速 $n=125 \text{ r/min}$,原型性能曲线如图10。

对比图9及图10,转速加大到125 r/min,虽然设计扬程流量比转速120 r/min稍有增大(叶片角 0° 增大 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$),但装置效率下降2.3%。为力求高效

332.0、268.9 r/min。同一个叶片角度下,飞逸转速随着扬程增大而增大。原型泵的飞逸转速随叶片角度增大而减小,在叶片角为 -4° 时原型泵的飞逸转速最大。本贯流泵也满足文献[19, 23, 26]所述的飞逸转速特性规律。叶片角为 0° 时,最高扬程对应的原型泵最大飞逸转速为198.5 r/min,相当额定转速的1.80倍;设计扬程对应的原型泵飞逸转速为126.4 r/min,相当额定转速的1.15倍。文献[18]中竖井贯流泵装置的最大飞逸转速接近额定转速的2倍,学者认为应该重视泵装置事故门的选型和设计。与之相比,慎江泵站原型泵的最大飞逸转速为额定转速的1.80倍,影响泵站安全运行,建议对泵装置结构或者电机的额定转速进行调整。

区接近设计扬程,取设计转速120 r/min,图11为120 r/min 原型综合特性曲线。原型泵运行方案调整前后数据对比见表5。

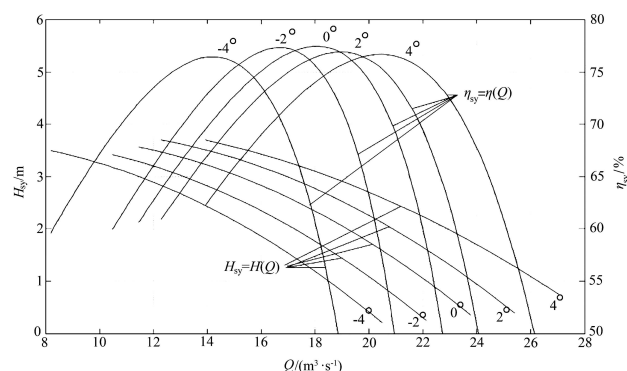


图9 原型性能曲线 ($D_p=2.6 \text{ m}$, $n_p=120 \text{ r/min}$)

Fig.9 Prototype performance curve

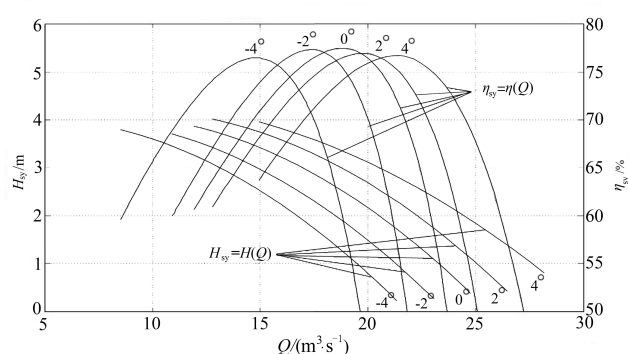


图10 原型性能曲线 ($D_p=2.6 \text{ m}$, $n_p=125 \text{ r/min}$)

Fig.10 Prototype performance curve

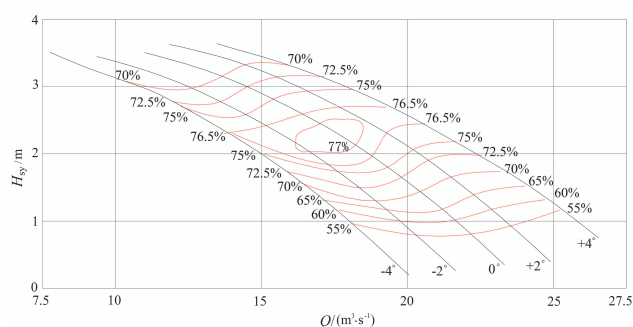
图 11 原型综合特性曲线 ($D_p=2.6$ m, $n_p=120$ r/min)

Fig.11 Prototype comprehensive performance curve

表 5 原型泵运行方案调整前后数据对比 (扬程 1.38 m)

Table 5 Comparison of data before and after adjustment of prototype pump operation scheme

参数	原额定转速/ (110 r·min ⁻¹)	新额定转速/ (120 r·min ⁻¹)
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	18.83	21.09
装置效率/%	70.69	71.46
临界汽蚀余量/m	4.75	5.62
飞逸转速与额定转速比值	1.80	1.65

水泵额定转速增加到 120 r/min, 叶片角为 0°, 设计扬程为 1.38 m 时, 流量为 21.09 m³/s, 装置效率为 71.46%, 满足水泵设计流量要求和效率要求。由图 9 及图 11 可知, 各叶片角度稳定运行扬程均可达 3.5 m 或更高, 能保证泵站全部扬程范围稳定运行。对比改进前, 装置流量增大 2.26 m³/s, 装置效率增大 0.77%, 满足设计流量和泵装置效率要求; 虽然原型泵的临界汽蚀余量增大 0.87 m, 但其值还是远远小于有效汽蚀余量, 不可能产生汽蚀危害; 最大扬程为 2.93 m 时, 原型泵的飞逸转速相当额定转速的 1.65 倍; 设计扬程为 1.38 m 时, 原型泵的飞逸转速相当额定转速的 1.05 倍。若考虑原型泵的摩擦损失和转动惯量等因素, 原型泵的真实飞逸转速将比换算得出的飞逸转速值略小, 可以满足水泵安全运行要求。

3 讨论

慎江泵站前置竖井贯流泵装置原运行方案装置效率较高, 水力特性良好, 但在设计工况下的流量偏小, 不能满足运行要求, 最大飞逸转速过大, 影响泵站安全运行。经过方案调整, 额定转速增加至 120 r/min 后, 泵装置效率有所增大, 水力性能优异, 能满足泵站稳定、安全运行。与文献[18]中的特低扬程竖井贯流泵装置模型试验研究对比, 汽蚀飞逸特性一致。本文的原型泵装置最优工况点效率为 77.57%, 比文献[18]中的原型泵装置最优工况点效率 80.9%低了 3.33%。主要是因为本文未考虑装置空载且采用原模型等效率进行效率换算, 而文献[18]中考虑了装置空载并且采用“分布效率换算法”进行原模型效率换

算, 如此换算相较于模型泵装置效率能提升 3%左右。因此, 若本文考虑装置空载且采用“分布效率换算法”进行原模型效率换算, 原型泵装置最优工况点效率可达 80%以上。慎江泵站竖井贯流泵装置具有较高的装置效率, 汽蚀飞逸特性优良, 适合在特低扬程泵站中应用。可为竖井贯流泵装置在特低扬程泵站中应用提供借鉴。

4 结论

1) 慎江泵站竖井贯流泵装置在叶片角为 0°时, 模型泵装置的最高效率可达 77.57%, 且 0°, 叶片角的扬程工况被高效区覆盖范围最大, 建议选用 0°建叶片角作为泵装置实际运行角度。

2) 0°叶片角方案在设计扬程工况下的流量偏小, 不满足单泵流量要求。

3) 转速为 120 r/min 工况下, 0°叶片角在设计扬程工况, 流量为 21.09 m³/s, 装置效率为 71.46%, 满足设计流量和泵装置效率要求, 并且汽蚀特性和飞逸转速特性均能满足水泵安全、稳定运行要求, 是一种可行的调整方案。

4) 装置扬程随着流量的增加而减小, 装置效率随着流量增加先增大后减小; 在试验流量范围内, 装置汽蚀余量随着流量增大而增大; 装置单位飞逸转速随叶片角度增大而减小, 在叶片角为-4°时装置单位飞逸转速最大; 同一叶片角度下的飞逸转速随着扬程增大而增大。

5) 竖井贯流泵装置具有较高的装置效率, 汽蚀飞逸特性优良, 在排涝泵站等特低扬程泵站中应用前景良好, 建议优先采用。

参考文献:

- [1] 刘君, 郑源, 周大庆, 等. 前、后置竖井贯流泵装置基本流态分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(S1): 32-38.
LIU Jun, ZHENG Yuan, ZHOU Daqing, et al. Analysis of basic flow pattern in shaft front-positioned and shaft rear-positioned tubular pump systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(S1): 32-38.
- [2] 颜红勤. 梅梁湖泵站竖井贯流泵装置主要参数的确定[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 91-94.
YAN Hongqin. Determination of main parameters for shaft tubular pumping system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 91-94.
- [3] 谢荣盛, 汤方平, 刘超, 等. 竖井与轴伸贯流泵装置水力特性比较[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 24-30.
XIE Rongsheng, TANG Fangping, LIU Chao, et al. Comparison of hydraulic performance between vertical shaft and shaft extension tubular pumping system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 24-30.
- [4] 陈加琦, 朱泉荣, 苏志敏, 等. 基于特征尺寸规则化的竖井贯流泵装置研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2): 101-111.
CHEN Jiaqi, ZHU Quanrong, SU Zhimin, et al. Shaft tubular pump

- units based on regularized design[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(2): 101-111.
- [5] 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 南水北调工程邳州站竖井贯流泵装置进出水流态分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 50-56.
- XU Lei, LU Linguang, CHEN Wei, et al. Flow pattern analysis on inlet and outlet conduit of shaft tubular pump system of Pizhou pumping station in South-to-North Water Diversion Project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 50-56.
- [6] 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 邳州站竖井式贯流泵装置模型试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 120-123.
- XU Lei, LU Linguang, CHEN Wei, et al. Model test for pit tubular pump system of Pizhou pumping station[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 120-123.
- [7] 孟凡, 裴吉, 李彦军, 等. 导叶位置对双向竖井贯流泵装置水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 135-140.
- MENG Fan, PEI Ji, LI Yanjun, et al. Effect of guide vane position on hydraulic performance of two-direction tubular pump device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 135-140.
- [8] 李四海, 陈松山, 周正富, 等. 竖井贯流泵装置压力脉动数值分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(7): 175-179.
- LI Sihai, CHEN Songshan, ZHOU Zhengfu, et al. Pressure fluctuation numerical analysis of shaft tubular pump device[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(7): 175-179.
- [9] 石丽建, 刘新泉, 汤方平, 等. 双向竖井贯流泵装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 85-91.
- SHI Lijian, LIU Xinquan, TANG Fangping, et al. Design optimization and experimental analysis of bidirectional shaft tubular pump device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 85-91.
- [10] 谢荣盛, 吴忠, 何勇, 等. 双向竖井贯流泵进出水流道优化研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 68-74.
- XIE Rongsheng, WU Zhong, HE Yong, et al. Optimization research on passage of bidirectional shaft tubular pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 68-74.
- [11] 夏烨, 汤方平, 石丽建, 等. 双向竖井贯流泵装置数值模拟及试验分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(7): 149-153.
- XIA Ye, TANG Fangping, SHI Lijian, et al. Numerical simulation and experimental analysis of bidirectional shaft tubular pump device[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(7): 149-153.
- [12] 王丽, 邹新胜, 徐磊, 等. 井头泵站竖井式贯流泵装置流态及性能分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 123-127.
- WANG Li, ZOU Xinsheng, XU Lei, et al. Flow pattern and performance analysis of shaft tubular pump system in jingtou pumping station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 123-127.
- [13] 朱红耕, 戴龙洋, 张仁田, 等. 新型竖井贯流泵装置研发与数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(5): 418-422.
- ZHU Honggeng, DAI Longyang, ZHANG Rentian, et al. Development and numerical analysis of new-type shaft tubular pumping system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(5): 418-422.
- [14] ZHU H G, ZHANG R T, ZHOU J R. Optimal hydraulic design of new-type shaft tubular pumping system[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(5): 052026.
- [15] 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 竖井贯流泵装置水力设计方案比较研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 207-215.
- XU Lei, LU Linguang, CHEN Wei, et al. Study on comparison of hydraulic design schemes for shaft tubular pump system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 207-215.
- [16] 张仁田, 朱红耕, 姚林碧. 竖井贯流泵不同出水流道型式的对比研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 197-201.
- ZHANG Rentian, ZHU Honggeng, YAO Linbi. Comparison of shaft-type tubular pump systems with different outflow structures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 197-201.
- [17] ZHANG Rentian, ZHU Honggeng, DAI Longyang. Development and application of a shaft-type tubular pumping system with a siphon discharge passage[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 1-6.
- [18] 陆伟刚, 张旭. 特低扬程竖井贯流泵装置水力特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 103-106, 125.
- LU Weigang, ZHANG Xu. Research on model test of hydraulic characteristics for super-low head shaft-well tubular pump unit[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 103-106, 125.
- [19] 孙丹丹, 陈世杰, 王斌, 等. 睢宁县凌城泵站轴流泵装置模型试验[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 126-130.
- SUN Dandan, CHEN Shijie, WANG Bin, et al. Model test of axial-flow pump unit for lingcheng pumping station in Suining County[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(2): 126-130.
- [20] 汤方平, 刘超, 王国强, 等. 平面S形流道双向轴流泵装置水力模型研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 50-53.
- TANG Fangping, LIU Chao, WANG Guoqiang, et al. Study on a reversible axial-flow pump installation with S-shaped conduit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 50-53.
- [21] 水泵模型及装置模型验收试验规程: SL 140—2006[S].
- Water pump model and device model acceptance test procedure: SL 140—2006 [S].
- [22] 石丽建, 付玲玲, 刘超, 等. 冲角对轴流泵叶轮水力性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 55-62.
- SHI Lijian, FU Lingling, LIU Chao, et al. Impacts of the angle of attack on hydraulic characteristics over the axial flow impeller[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 55-62.
- [23] 戴景, 戴启璠. 南水北调东线淮安二站泵装置模型试验研究[J]. 人民长江, 2016, 47(12): 95-98, 103.
- DAI Jing, DAI Qifan. Model test of Huai'an second pumping station of east route of south-to-north water diversion project[J]. Yangtze River, 2016, 47(12): 95-98, 103.
- [24] 谢传流, 汤方平, 刘超, 等. 大型立式轴流泵装置叶轮选型模型试验分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 94-99, 131.
- XIE Chuanliu, TANG Fangping, LIU Chao, et al. Model test analysis of impeller selection in large vertical axial flow pumping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 94-99, 131.
- [25] 刘润根, 马晓忠, 詹磊. 黄家坝 30° 斜式轴流泵装置模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 109-111.
- LIU Rungen, MA Xiaozhong, ZHAN Lei. Model test study of Huangjiaba 30 inclined axial flow pump device[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(2): 109-111.
- [26] 方进, 晏清洪. 滁河四级站混流泵装置模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(10): 213-217, 222.
- FANG Jin, YAN Qinghong. Model test of mixed flow pump devices for chuhe fourth pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower,

- 2017(10): 213-217, 222.
- [27] 张晨曦, 王新坤, 肖思强, 等. 射流三通组合的水力性能试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(09): 95-100.
- ZHANG Chenxi, WANG Xinkun, XIAO Siqiang, et al. Experimental study on hydraulic performance of the combination of jet tee[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(09): 95-100.
- [28] 孙壮壮, 张友明, 夏鹤鹏, 等. 不同工况下轴流泵转子径向力及其压力脉动分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 122-128.
- SUN Zhuangzhuang, ZHANG Youming, XIA Hepeng, et al. Analysis of rotor radial force and pressure fluctuation of axial flow pump water different flow conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 122-128.

Experimental Study on External Characteristics of Ultra-low Lift and Large-flow Shaft Tubular Pump

LU Weigang¹, ZHOU Bingnan¹, XIA Hui², XU Lei¹, XU Bo^{1*}

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: 【Background】 Shaft tubular pump is a new pumping device with its generator installed in an open shaft, which is moisture-proof and has good ventilation. It has several advantages including easy operation and maintenance, low cost, and simple structure. It is generally used in low-lift and large-flow pumping stations. The development in shaft tubular pump has made it a favorable choice for ultra-low lift and large-flow pumping stations like Shenjiang Pumping Station for regional flood and drainage control. 【Objective】 The purpose of this paper is to test in situ hydraulic performance of shaft tubular pump in ultra-low lift and large-flow pumping station. 【Method】 We took Shenjiang Pumping Station as an example; the external characteristics of its shaft tubular pump were studied using the method of model test, from which we propose plans to improve it. 【Result】 When the blade angle was 0°, the pump was most efficient, reaching 77.57%, with the flow rate and lift being 220.5 L/s and 1.95 m respectively. In the range of the lifts we tested, the pumping station had sufficient cavitation margin and did not cause cavitation damage. When the blade angle was 0° and maximum lift was 2.93 m, the runaway speed was 1.80 times the rated speed. The flow in the original design was too slow while its associated runaway speed under maximum lift was too large, not ideal for safe operation of the pumping station. An optimization scheme for increasing the rated speed of the pump was proposed. Verification against experimental data showed that the energy and cavitation characteristics, runaway speed all met the requirements. 【Conclusion】 The shaft tubular pump has a good hydraulic performance and efficiency, and it is potential for use in ultra-low lift pump stations.

Key words: pump unit; model test; shaft tubular pump; external characteristics; extra-low head and large flow pumping station

责任编辑：赵宇龙