

大型立式轴流泵装置叶轮选型模型试验分析

谢传流 汤方平 刘超 杨帆 石丽建 段小汇
(扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225100)

摘要: 轴流泵叶轮选型不当会导致泵站运行工况的偏离,降低使用效率,增大机组振动,影响泵站的高效、安全和稳定运行,合理地进行轴流泵叶轮的选型,对轴流泵的运行具有实际意义。以立式轴流泵模型试验为基础,分析了轴流泵叶轮的选型办法,在传统选型办法基础上增加了以泵站的流量加权平均值、效率加权平均值和临界汽蚀余量加权平均值作为参考的泵站选型办法,可以更加合理地优选出适合泵站运行的水泵叶轮。优选出方案3叶轮,此时泵装置在叶片安放角 6° 时,流量为 398.5 L/s ,扬程为 6.07 m ,效率达到 75.5% ,临界汽蚀余量达到 7.4 m ,设计点性能最优,高效区较宽,同时泵装置流量加权平均值为 414.25 L/s ,效率加权平均值为 71.385% ,临界汽蚀余量加权平均值为 8.435 m ,综合性能最优。

关键词: 立式轴流泵; 叶轮; 泵站; 选型; 模型试验

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0094-06

Model Test Analysis of Impeller Selection in Large Vertical Axial Flow Pumping System

XIE Chuanliu TANG Fangping LIU Chao YANG Fan SHI Lijian DUAN Xiaohui
(School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

Abstract: The selection of impeller of axial flow pump has a direct impact on the flow, head, and efficiency of the pump device; whether the impeller matches the actual working conditions of the axial flow pump device is the most important part as far as the design and energy saving are concerned. The improper selection could result in deviation of operating conditions of pump, the reduction of service efficiency, and the increase of unit vibration; consequently further influenced the efficiency, safety and stable operation of the pump station. Thus it is of great significance to choose a proper type of impeller for the operation of axial flow pump. Based on the vertical axial flow pump model test, the method of selection of pump impeller was analyzed; on the basis of the traditional method, the method with reference to the weighted average flow rate, weighted average efficiency and weighted average NPSH of the pump station was added. Finally, test program 3 was chosen: the blade placement angle was 6° , the flow rate was 398.5 L/s , the head was 6.07 m , the efficiency was 75.5% , the NPSH was 7.4 m , the performance was the optimal at design points, the high efficiency area was wide, the weighted average flow rate was 414.25 L/s , the weighted efficiency was 71.385% , the weighted average NPSH was 8.435 m , and the overall performance was the best. The chosen program 3, given the guaranteed design parameters of the pump device, can give full play to the pump more effectively and generate greater economic and social benefits, thus providing reference for future similar projects.

Key words: vertical axial flow pump; impeller; pumping station; selection; model test

收稿日期: 2016-10-15 修回日期: 2017-02-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(51376155、51609210)、中国博士后科学基金项目(2016M591932)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)和江苏省科研创新计划项目(KYZZ16_0492)
作者简介: 谢传流(1988—),男,博士生,主要从事双向轴流泵叶轮优化设计研究,E-mail: m18352764807@163.com
通信作者: 汤方平(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事流体机械设计、复杂工程系统优化设计等研究,E-mail: tangfp@yzu.edu.cn

引言

立式轴流泵是农业排灌、城市给排水、火电厂输送循环水等工程优先选用的泵型^[1],在我国已建的 300 多座大型泵站中,大部分采用了该泵型^[2]。对于该类泵型,泵站管理人员积累了长期的管理经验,熟悉泵站的运行状况,对泵站发生的各类状况能够及时、应急的处理,能够保证泵站高效、有序的运行,延长泵站的使用寿命。然而轴流泵装置选用不同的叶轮,水泵的参数变化比较大,轴流泵流量-扬程曲线、流量-效率曲线变化斜率比较大,稍许偏离设计工况,就可能导致极大的经济损失,甚至造成安全隐患。因此选用适合水泵运行的叶轮显得尤为重要。目前普遍认为模型试验花费的时间较长,对于水泵叶轮的选型都是在已有模型叶轮泵段试验的基础上,基于已经公布的轴流泵系列型谱优选出比较合适的叶轮对整体泵装置进行流体仿真数值模拟,然后对优选出的水泵叶轮进行模型试验。而对比数值计算与模型试验来看,因有一定的误差,通过这种方式进行水泵叶轮的选型很难确定符合泵站设计参数的叶轮,优选出的叶轮仅能逼近设计点参数,偏离设计点参数将制约泵站作用的发挥。因此探求一种合理的方式进行水泵叶轮的选型十分必要。

段正忠等^[3]通过分析水泵选型在泵站工程设计中的作用,发现选型的合理性直接关系到泵站工程的投资、建成后的运行费用和供水安全。选型的基本依据是泵站工程规划中所确定的设计参数,即所在泵站的流量、扬程及其变化规律。关醒凡等^[4]通过对南水北调工程大型轴流泵选型中值得注意的几个问题进行分析,发现模型泵配上装置进行模型泵装置试验,在对装置内流动状态和水力损失不十分清楚的情况下,可以作为验证装置性能的一种手段。兰才有等^[5]通过对南水北调东线工程水泵机组选型方法的探讨,发现关于水泵选型方面的文献大多仅涉及某一性能参数的分析。吴桂民^[6]通过对水泵的类型及其特点的比较分析,提出应根据泵站工作性质对水泵的类型、结构、台数进行综合考虑选出最佳方案。李小芳等^[7]通过设计软件进行水泵选型,节约了成本。魏旭等^[8]通过对水泵站水泵选型设计和工况的分析得出对于设计流量、扬程变幅较大的泵站,水泵参数选择应兼顾不同工况点。严登丰等^[9]通过对某供水泵站工程进行水力模型的选择和模型试验,得出了适合泵站经济运行的水力模型。

本文在制作优化后的进、出水流动模型的基础上,不变更模型装置进、出水流动道的前提下,通过更

换不同型号的模型叶轮和与叶轮相匹配的导叶进行模型试验,分析设计参数和不同叶轮的试验数据,选出优秀且适合泵站设计参数的水泵叶轮。

1 工程概况

某泵站规划为城市排涝泵站,兼顾抽排和自排功能。总设计抽排流量 91.7 m³/s,水泵选用 7 台套水泵叶轮直径为 1 720 mm 的立式半调节轴流泵,配套电动机为立式同步电动机,单机功率 1 250 kW;泵站进水流道采用钟形进水流道, DN2000 出水钢制弯管、扩散管接混凝土流道进压力水箱。

泵站的特征水位、净扬程及规划设计流量见表 1。考虑平均扬程下涵洞水力损失 0.5 m、最高扬程水力损失 0.3 m、设计扬程下水力损失 0.4 m,关注泵装置设计扬程 6.07 m、平均扬程 3.64 m、最高扬程 7.17 m 时的性能,因轴流泵马鞍区机组运行不稳定^[10],最高运行扬程不允许到马鞍区。

表 1 泵站设计参数
Tab. 1 Design parameters of pump station

参数	数值	
	进水池	出水池
设计水位/m	3.10	8.77
防洪水位/m	7.07	10.65
最高运行水位/m	4.10	9.97
最低运行水位/m	2.60	4.10
平均水位/m	3.10	6.24
设计扬程/m	5.67	
最高扬程/m	6.87	
平均扬程/m	3.14	
设计总流量/(m ³ ·s ⁻¹)	91.7	
单机设计流量/(m ³ ·s ⁻¹)	13.1	

2 模型试验验证

2.1 泵装置试验系统

在不变更优化后的泵装置进、出水流动模型的基础上,通过更换不同组合的针对性叶轮、导叶模型进行泵装置试验研究,模型泵总装图、进出水流道如图 1~3 所示。泵装置试验在扬州大学测试中心的高精度水力机械试验台上进行,试验台为立式封闭循环系统,如图 4 所示。在该试验台上针对不同水泵水力模型进行了泵装置能量性能试验和汽蚀性能试验。

本文在传统轴流泵水力模型选型办法^[11-12]的基础上选用不同型号模型泵叶轮,其设计扬程介于 4.2~7.1 m 之间。名义叶轮直径 $D_1=300$ mm,实际叶轮直径 $D_2=299.8$ mm。5 副模型叶轮均用黄铜材料经数控加工成型,如图 5a~5e 所示。2 副模型导叶

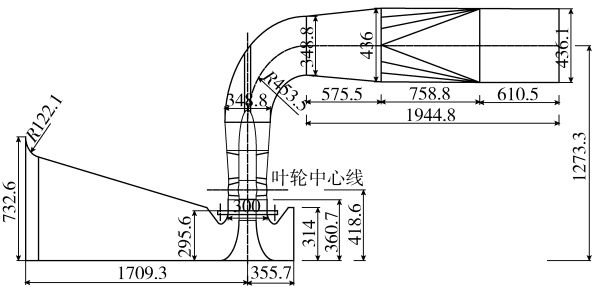


图 1 某泵站水泵装置模型流道及总装图(单位:mm)

Fig. 1 Model flow channel and assembly diagram of pump station of a pumping station

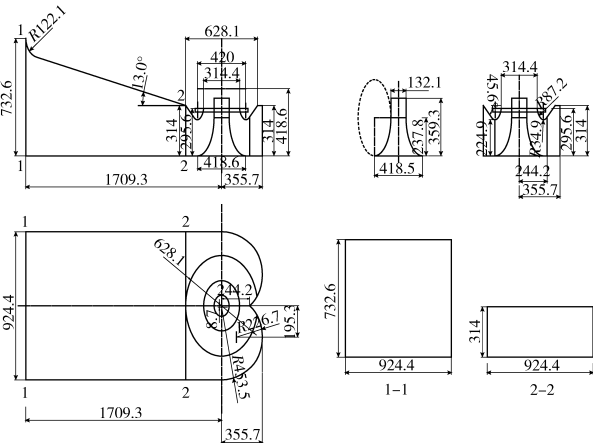


图 2 某泵站水泵装置模型进水流道图(单位:mm)

Fig. 2 Inlet flow diagram of pump station model of a pump station

用钢质材料焊接成型,导叶叶片数均为7,如图5f、5g所示。进水流道采用钢板焊接制作,进水流道采用目前应用广泛的钟型进水流道^[13],出水流道采用圆变方弯管出水,模型泵叶轮室开有观察窗,便于观测叶片处的水流和汽蚀。模型泵装置经安装检查,导叶体与叶轮室定位面轴向跳动为0.10 mm,叶轮轮毂外表面径向跳动为0.08 mm,叶顶间隙控制在0.20 mm以内。不同试验方案的组合如表2所示。



(a) I号模型叶轮实物图



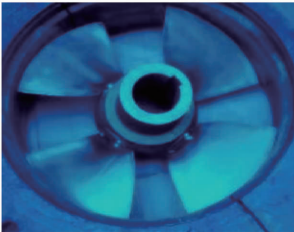
(b) II号模型叶轮实物图



(c) III号模型叶轮实物图



(d) IV号模型叶轮实物图



(e) V号模型叶轮实物图



(f) I号模型导叶实物图



(g) 2号模型导叶实物图

图 5 模型叶轮和导叶实物图

Fig. 5 Physical pictures of model impeller and guide vanes

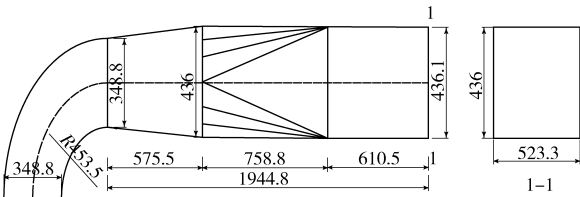


图 3 某泵站水泵装置模型出水流道图(单位:mm)

Fig. 3 Outlet flow diagram of pump station model of a pumping station

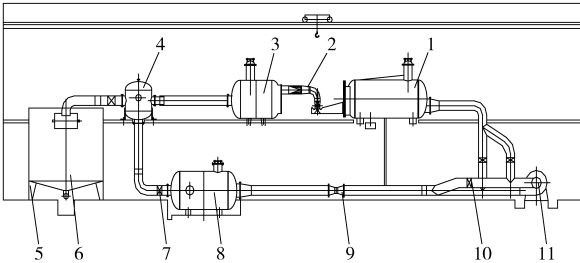


图 4 高精度水力机械试验台

Fig. 4 High-precision hydraulic machinery test bed

1. 进水箱 2. 受试泵装置及驱动电动机 3. 压力出水箱 4. 分叉水箱 5. 流量原位标定压力传感器 6. 流量原位标定装置 7. 工况调节闸阀 8. 稳压整流筒 9. 电磁流量计 10. 系统正反运行控制闸阀 11. 辅助泵机组

2.2 测试方法

泵装置模型试验测试内容如下:5副叶轮分别在5个叶片安放角下的泵装置模型能量性能试验;5副叶轮分别在5个叶片安放角下5个特征扬程点的汽蚀性能试验。

试验执行 GB/T 18149—2000《离心泵、混流泵和轴流泵水力性能试验规范(精密级)》和 SL140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》^[14],每个叶片安放角的性能试验点不少于18点,临界汽蚀余量按保持流量等于常数,改变有效汽蚀余量直至效率下降1%。

表 2 不同叶轮和导叶的配合方案

Tab.2 Scheme of different impellers and guide vane

试验方案 序号	叶轮型号	导叶号	叶轮轮毂比	叶轮设计 扬程/m
1	I	1	0.483	7.1
2	II	1	0.467	6.5
3	III	2	0.433	6.3
4	IV	2	0.400	5.5
5	V	2	0.400	4.2

2.3 模型泵装置试验结果及分析

模型泵装置试验测试了 5 副叶轮分别在 5 个叶片安放角下的能量性能和各叶片角度下不同流量点的汽蚀性能。根据试验结果绘制出针对泵站的水力模型综合特性曲线如图 6 ~ 10 所示。

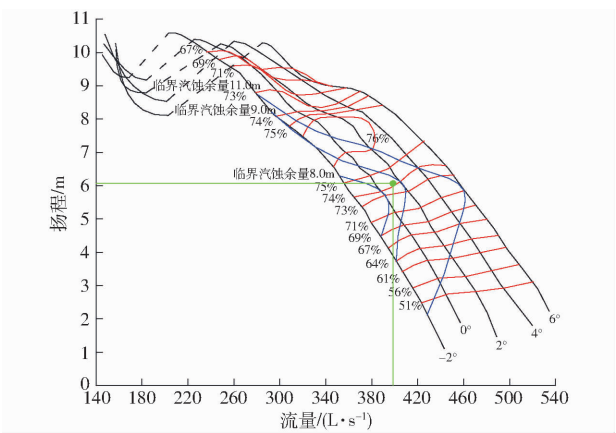


图 6 试验方案 1 综合特性曲线

Fig.6 Integrated characteristic curves of test program 1

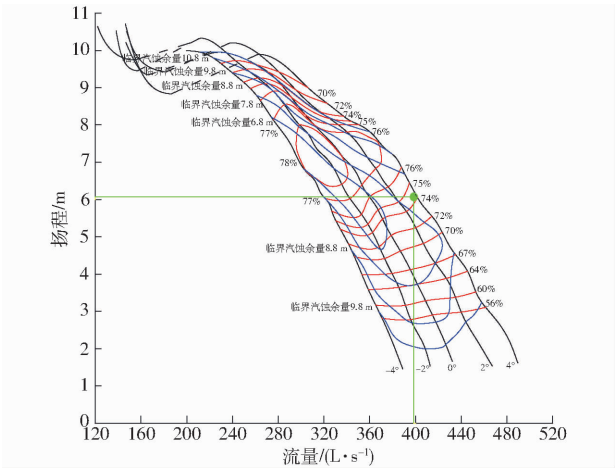


图 7 试验方案 2 综合特性曲线

Fig.7 Integrated characteristic curves of test program 2

关于水泵效率的计算方法,国内外学者提出了很多,比较经典的有多种 Moody 式^[15]、Ackeret 式^[16]、Hutton 式^[17]和江苏省水利勘测设计研究院张仁田等^[18]提出的建议公式,但通过计算公式得到的水泵效率与实际存在一定的误差。本文通过模型试验得到的水泵效率准确度较高。原型和模型水泵在满足一定几何相似、运动相似、动力相似的前提

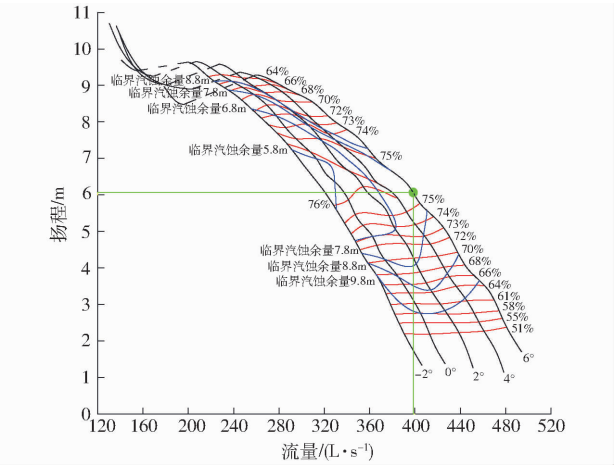


图 8 试验方案 3 综合特性曲线

Fig.8 Integrated characteristic curves of test program 3

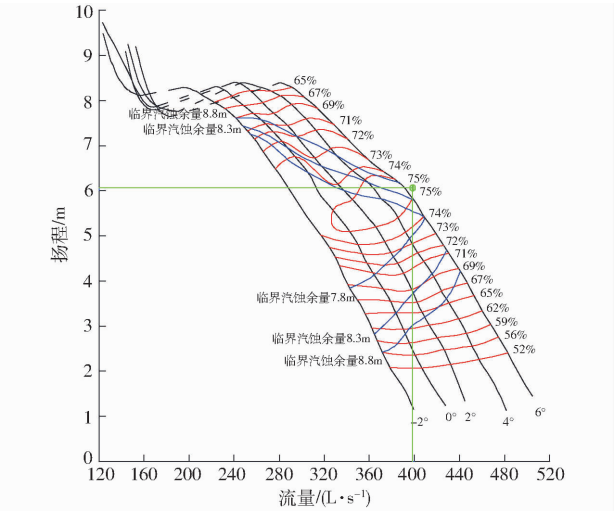


图 9 试验方案 4 综合特性曲线

Fig.9 Integrated characteristic curves of test program 4

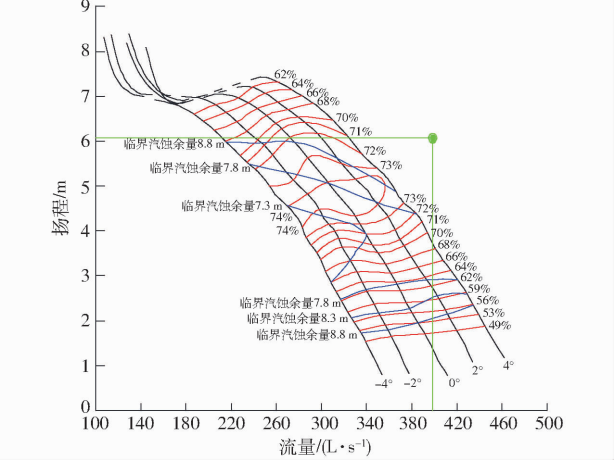


图 10 试验方案 5 综合特性曲线

Fig.10 Integrated characteristic curves test program 5

下,可以近似进行等效率换算,通过模型泵装置同一工况点的参数进行比较确定适合泵站运行的叶轮。通过换算原型泵参数到模型泵得到对应参数如表 3 所示。原型和模型水泵的流量、扬程、轴功率近似满足^[19]

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^3 \frac{n_p}{n_m} \tag{1}$$

$$\frac{H_p}{H_m} = \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^2 \left(\frac{n_p}{n_m}\right)^2 \tag{2}$$

$$\frac{N_p}{N_m} = \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^5 \left(\frac{n_p}{n_m}\right)^3 \tag{3}$$

式中 D ——叶轮直径, m N ——轴功率, kW
 n ——水泵转速, r/min
 Q ——流量, L/s H ——扬程, m
下标 p、m 表示原型泵、模型泵。

表 3 原型泵和模型泵设计点换算

Tab.3 Design point conversion between prototype pump and model pump

	叶轮直径	转速 n /	流量 Q /	扬程
	D /m	($r \cdot min^{-1}$)	($L \cdot s^{-1}$)	H /m
原型泵	1.72	250	13 100	6.07
模型泵	0.30	1 433.33	398.5	6.07

由图 6~10 可得,在设计流量 398.5 L/s,扬程 6.07 m,方案 4 和 5 设计点超出试验数据部分,从图 9 和图 10 中的特性曲线变化趋势也可以看出,临界汽蚀余量均较大,效率偏低,相比于方案 1、2 和 3,方案 4 和 5 不适合该泵站的运行。方案 1~3 对应的叶片安放角度、临界汽蚀余量和模型泵装置效率如表 4 所示。

表 4 不同方案设计点对应叶片安放角度和临界汽蚀余量
Tab.4 Blade placement angle and critical NPSH at different design points

方案 序号	叶片安放角度 $\beta/(^{\circ})$	临界汽蚀余量/ m	效率 $\eta/\%$
1	1.5	8.7	74.1
2	4.0	7.5	74.2
3	6.0	7.4	75.5

通过方案 1~3 对比分析可得,方案 3 设计点临界汽蚀余量最小,汽蚀比转数达到 1 133,优势明显,水泵设计点效率达到 75.5%,水泵运行处于高效区,且高效区较宽,具有明显的经济效益。方案 4 和方案 5 运行角度过大,水泵临界汽蚀余量较大,水泵高效区偏到小流量区域,从设计扬程单个参数来看选择方案 3 更有利于泵站的经济运行。为更进一步确定适合泵站运行的叶轮,本文采用下文所述方法进行分析。

3 立式轴流泵装置加权平均选型方法

为兼顾不同工况的水力特性^[20],泵站根据往年的水位监测情况,可以分析出近几年各工况运行水位所占的比重,通过对泵站各工况运行状况进行比

重加权分析,更加有利于优选出适合泵站运行状况的叶轮,提高泵站的最大利用率,节约能源。

效率加权平均值公式为

$$\eta(x) = \sum w_{1i} \eta_i(x)$$

临界汽蚀余量加权平均值公式为

$$N_{PSH_c}(x) = \sum w_{2i} N_{PSH_{ci}}(x)$$

流量加权平均值公式为

$$Q(x) = \sum w_{3i} Q_i(x)$$

式中 w_{1i} 、 w_{2i} 、 w_{3i} ——不同运行工况所对应的权重, %

$\eta_i(x)$ ——不同运行工况所对应的效率, %

$Q_i(x)$ ——不同运行工况所对应的流量, L/s

$N_{PSH_{ci}}(x)$ ——不同运行工况所对应的临界汽蚀余量, m

x ——特征运行工况扬程, m

立式轴流泵装置各运行工况所占权重约为平均扬程(3.64 m)的 35%;设计扬程(6.07 m)的 50%;最高扬程(7.17 m)的 15%。

立式轴流泵装置方案 1~3 各工况运行特征参数如表 5 所示,各参数加权平均值如表 6 所示。

表 5 方案 1~3 各运行工况所对应的特征参数
Tab.5 Characteristic parameters of programs 1~3 under operating conditions

方案 序号	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	扬程 H /m	效率 $\eta/\%$	临界汽蚀余量/ m
1	450.0	3.64	59.0	11.0
	398.5	6.07	74.1	8.7
	370.0	7.17	76.2	10.9
2	450.0	3.64	61.0	9.4
	398.5	6.07	74.2	7.5
	375.0	7.17	77.5	9.8
3	460.0	3.64	64.0	9.8
	398.5	6.07	75.5	7.4
	360.0	7.17	74.9	8.7

表 6 方案 1~3 各参数加权平均值
Tab.6 Weighted average of parameters of programs 1~3

方案 序号	流量加权平均值 $Q/(L \cdot s^{-1})$	效率加权平均值 $\eta/\%$	临界汽蚀余量 加权平均值/m
1	412.25	69.130	9.835
2	413.00	70.075	8.510
3	414.25	71.385	8.435

从表 6 可以看出,方案 3 的流量加权平均值最大,效率加权平均值最大,临界汽蚀余量加权平均值最小,在满足泵站各设计参数的条件下,流量加权平均值最大说明过流多,可以更好地发挥排涝泵站的

作用,效率加权平均值最大说明泵站可以节约更多的能耗,经济性较好,汽蚀余量加权平均值最小说明泵装置叶轮具有更好的抗汽蚀性能,能减少泵站因汽蚀造成的破坏,减少机组的检修,降低泵站的噪声,从而为泵站的运行管理提供了一个良好的环境。本文仅列出重点关注扬程的加权平均参数,在泵站统计资料完整的条件下,可以进一步通过所有运行工况进行加权平均,从而对泵站叶轮选型进行更为详尽的分析和更有力的指导。

4 结论

(1)在不变更模型泵装置进出水流道的基础上,通过更换不同的叶轮和导叶进行模型试验,经过实践,所耗时间较少。通过更换不同的叶轮和导叶进行模型试验所得到的数据准确、可靠、参考价值高,更有利于选择合适泵站运行的轴流泵装置水力模型。

(2)通过泵装置模型试验可知,方案 3 泵装置在叶片安放角 6° 时,流量 398.5 L/s ,扬程 6.07 m ,效率达到 75.5% ,临界汽蚀余量达到 7.4 m ,设计点性能最优,高效区较宽,方案 3 泵装置流量加权平均值为 414.25 L/s ,效率加权平均值为 71.385% ,临界汽蚀余量加权平均值为 8.435 m ,满足此次泵站设计要求,同时也是一种综合性能较优的泵装置,值得推广应用。

(3)在传统轴流泵叶轮选型办法的基础上,通过加权平均选型的方法进行轴流泵装置叶轮的选型,可以在保证轴流泵装置设计参数的基础上,更有效发挥泵站高效、安全和稳定运行的作用,保证泵装置在长时效的范围内产生更大的经济和社会效益。

(4)加权平均选型办法可以从多个方面考虑叶轮的综合性能,补充了传统选型办法仅考虑单个参数和单个工况点的不足,是一种新颖的、符合泵站实际运行的综合性办法。

参 考 文 献

- 1 刘超. 水泵与水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- 2 周济人,汤方平,石丽建,等. 基于 CFD 的轴流泵针对性设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(8):42-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150807&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.007.
ZHOU Jiren, TANG Fangping, SHI Lijian, et al. Specific design and experiment of axial-flow pump based on CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015, 46(8):42-47. (in Chinese)
- 3 段正忠,李援农. 灌溉泵站设计参数的确定及水泵选型[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(5):78-80.
DUAN Zhengzhong, LI Yuannong. Determination of design parameters and pump selection for irrigation pumping station[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(5):78-80. (in Chinese)
- 4 关醒凡,黄道见,刘厚林,等. 南水北调工程大型轴流泵选型中值得注意的几个问题[J]. 水泵技术,2002(2):13-16.
- 5 兰才有,仪修堂,段桂芳,等. 南水北调东线工程水泵机组选型方法探讨[J]. 排灌机械,2004,22(1):1-7,12.
LAN Caiyou, YI Xiutang, DUAN Guifang, et al. Study on selection of water pump-unit on the east route of south-north water diversion project[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004,22(1):1-7,12. (in Chinese)
- 6 吴桂民. 水泵选型方法[J]. 煤炭技术,2009,28(5):17-19.
WU Guimin. Pump selection method[J]. Coal Technology, 2009,28(5):17-19. (in Chinese)
- 7 李小芳,张书琦. 水泵选型应用软件的设计[J]. 科技信息,2013(15):296-297.
- 8 魏旭,黄兴,路兵华. 某水源地取水泵站水泵选型设计和工况分析[J]. 净水技术,2015(增刊1):114-117.
WEI Xu, HUANG Xing, LU Binghua. Pump design and working condition analysis in water intake pumping station[J]. Water Purification Technology,2015(Supp.1):114-117. (in Chinese)
- 9 严登丰,李彦军,胡德义,等. 青草沙水库原水取水泵站模型试验[J]. 净水技术,2011(3):13-19.
YAN Dengfeng, LI Yanjun, HU Deyi, et al. Model test of raw water intake pumping station in Qingcaosha Reservoir[J]. Water Purification Technology, 2011(3):13-19. (in Chinese)
- 10 程千,冯卫民,周龙才,等. 前置导叶对轴流泵马鞍区工况回流涡特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4):8-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160402&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.002.
CHENG Qian, FENG Weimin, ZHOU Longcai, et al. Effects of inlet guide vane on characteristics of backflow vortex in hump region of axial flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):8-14. (in Chinese)
- 11 汤方平,谢伟东,伍杰. 轴流泵水力模型同台测试结果及选型分析[J]. 排灌机械,2006,24(6):15-19.
TANG Fangping, XIE Weidong, WU Jie. Experimental results on the same test-bed and selection analysis for hydraulic model of axial-flow pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006,24(6):15-19. (in Chinese)
- 12 汤方平,刘超,成立,等. 低扬程水泵选型新方法[J]. 水利水电科技进展,2001(4):41-43,70.
TANG Fangping, LIU Chao, CHENG Li, et al. A new method for low-lift water pump selection[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001(4):41-43,70. (in Chinese)

- test[J]. Journal of Southeast Guizhou Vocational College of Technology for Nationalities, 2007,3(1):16–18. (in Chinese)
- 11 邓振镛,李栋梁,郝志毅,等. 我国高原干旱气候区作物种植区划综合指标体系研究[J]. 高原气象, 2004,23(6): 847–850.
DENG Zhenyong, LI Dongliang, HAO Zhiyi, et al. Study on integrative index system of crop ecological suitable planting division in arid climate condition of altiplano region[J]. Plateau Meteorology, 2004,23(6):847–850. (in Chinese)
- 12 高桂芹,郭丽霞. 2005 年唐山市夏播玉米空秆、畸形穗气象因素分析[J]. 玉米科学, 2006,14(增刊 1): 119–120,122.
GAO Guiqin, GUO Lixia. Analysis of the cause of meteorological formation of barren stem crooked fringe on summer maize of Tang-shan in 2005[J]. Journal of Maize Sciences, 2006,14(Supp. 1):119–120,122. (in Chinese)
- 13 刘哲,唐日晶,赵祖亮,等. 黄淮海地区玉米品种适宜性精细区划研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(8): 281–288.
LIU Zhe, TANG Rijing, ZHAO Zuliang, et al. Regionalization of maize cultivars cultivated in Huang-Huai-Hai plain of China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):281–288. (in Chinese)
- 14 CARLOS L, WEI J, FAST T, et al. Classification of maize environments using crop simulation and geographic information systems[J]. Crop Science, 2005, 45(5): 1708–1716.
- 15 SETIMELA P, CHITALU Z, JONAZI J, et al. Environmental classification of maize-testing sites in the SADC region and its implication for collaborative maize breeding strategies in the subcontinent[J]. Euphytica, 2005, 145(1–2): 123–132.
- 16 CHENU K, COOPER M, HAMMER G L, et al. Environment characterization as an aid to wheat improvement: interpreting genotype-environment interactions by modelling water-deficit patterns in North-Eastern Australia[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(6): 1743–1755.
- 17 王思嘉. 玉米品种多环境测试站点的布局方法研究——以吉林省为例 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
WANG Sijia. Spatial distribution of multi-environment trial station for maize varieties—a case study of Jilin province [D]. Beijing: China Agricultural University,2015. (in Chinese)
- 18 李震,洪添胜,曾祥业,等. 基于 K -means 聚类的柑橘红蜘蛛图像目标识别[J]. 农业工程学报,2012,28(23):147–153,299.
LI Zhen, HONG Tiansheng, ZENG Xiangye, et al. Citrus red mite image target identification based on K -means clustering[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 147–153,299. (in Chinese)
- 19 汪虎. 玉米品种级种植区划算法研究及系统实现[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
WANG Hu. Maize varieties and planting division algorithm and system implementation [D]. Beijing: China Agricultural University,2010. (in Chinese)
- 20 YAO Xiaochuang, ZHU Dehai, YE Sijin, et al. Spatial interpolation methods study based on geostatistics for the grasshopper population[J]. Sensor Letters, 2014, 12(3):645–650.
- ~~~~~

(上接第 99 页)

- 13 常景彩,王志强,李兴平,等. 大型泵站新型钟形进水流道流动特性的研究[J]. 水力发电学报,2011,30(1): 165–169, 179.
CHANG Jingcai, WANG Zhiqiang, LI Xingping, et al. Study on hydraulic characteristics of new bell suction duct in large-scale pumping stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 165–169,179. (in Chinese)
- 14 张德胜,王海宇,施卫东,等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11):139–145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141122&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.022.
ZHANG Desheng, WANG Haiyu, SHI Weidong, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation with multiple flow rates in scaled axial flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(11):139–145. (in Chinese)
- 15 DAVIS C V. Handbook of applied hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1952:555–556.
- 16 PFLEIDERER C. Die kreiselpumpen für flüssigkeiten und gase[M]. New York: Springer Verlag,1961:168.
- 17 HUTTON S P. Component losses in kaplan turbines and the prediction of efficiency from model tests[M]. New York: Institution of Mechanical Engineers,1954: 168–228,743–746.
- 18 张仁田,张平易,阎文立,等. 大型泵站系统性能参数的换算方法[J]. 农业机械学报,1999,30(2):50–54.
ZHANG Rentian, ZHANG Pingyi, YAN Wenli, et al. Research on conversion method of performance parameters for large-scale pumping station system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1999,30(2):50–54. (in Chinese)
- 19 刘竹溪,刘景植. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- 20 杨帆,谢传流,刘超,等. 轴流泵装置运行工况对肘形进水流道水力性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(2): 15–21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160202&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.002.
YANG Fan, XIE Chuanliu, LIU Chao, et al. Influence of axial-flow pumping system operating conditions on hydraulic performance of elbow inlet conduit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(2):15–21. (in Chinese)