

贯流泵模型装置能量特性相关试验分析

李 超¹, 袁 尧², 单陆丹³, 杨 帆¹, 许旭东²

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017;
3. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005)

摘要: 泵装置的各过流部件对装置性能有不同程度的影响, 采用物理模型试验方法对贯流泵装置能量相关特性进行研究, 分析出水流道型式、导叶体及转轮叶片数对泵装置能量性能的影响, 并对贯流泵装置与立式轴流泵装置进行能耗计算, 论证在特低扬程(2.0 m 以下)工况时, 贯流泵装置具有明显的高效节能优点。

关键词: 泵装置; 叶片数; 导叶; 流道; 模型试验

中图分类号: TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7839(2020)08-0042-04

Experimental analysis of energy characteristics of tubular pump model unit

LI Chao¹, YUAN Yao², SHAN Ludan³, YANG Fan¹, XU Xudong²

(1. College of Hydraulics, Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;
2. Jiangsu Institute of Water Resources and Hydropower Research, Nanjing 210017, China;
3. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Huai'an 223005, China)

Abstract: The flow components of the pump device have different degrees of influence on the performance of the device. The physical model test method was used to study the energy-related characteristics of the tubular pump device, and the influence of the water channel type, the guide vane body and the number of runner blades on the energy performance of the pump device was analyzed. The energy consumption calculation of the tubular pump device and the vertical axial flow pump device was carried out, which demonstrated that the tubular pump device had obvious advantages of high efficiency and energy saving under the working condition of ultra-low head (below 2.0m).

Key words: pump unit; blade number; guide vane; passage; model test

贯流泵装置具有结构紧凑, 开挖深度小, 平面尺寸小, 水力性能好, 装置效率高等特点, 按照结构型式分类, 可分为灯泡式贯流泵装置、轴伸式贯流泵装置和竖井式贯流泵装置^[1]。泵装置主要由叶轮、导叶体及进、出水流道组成, 这些部件对贯流泵装置性能都有不同程度的影响, 泵装置能量性能的高低不仅关系到能耗程度, 也影响着泵装置的安全稳定, 开展不同过流部件对泵装置能量性能影响程

度的研究就显得十分有意义^[2-4]。如孟凡等^[5]研究了导叶位置对双向贯流泵装置水力性能的影响; 张松等^[6]通过对贯流泵 S 形弯管和流道的优化设计, 有效提升了泵装置的能量性能; 梁豪杰等^[7]对贯流泵装置的叶轮和导叶进行了优化设计, 得到了低转速比高效水力模型; 孙振兴等^[8]对潜水轴流泵出水流道进行了优化设计, 有效降低了水力损失, 提高了泵装置的水力性能。

收稿日期: 2020-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(51609210), 扬州市校企合作科技资金项目(YZU201901), 江苏省科技厅创新能力建设计划(BM2018028)

作者简介: 李超(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水泵及泵装置水泵特性。E-mail: 1044175548@qq.com

通讯作者: 杨帆(1985—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事水泵及泵装置水泵特性的研究。

本文通过泵装置模型试验研究了出水流动型式、导叶体及转轮叶片数对泵装置能量性能的影响,并通过能耗分析论证了特低扬程(2.0 m 以下)时,贯流泵装置优于立式泵装置。

1 试验台及试验装置

贯流泵装置模型试验在扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室水力机械通用试验台上进行,试验台为一立式封闭循环系统,系统主管道直径为 0.5 m,总长度 60.0 m,系统水体总容积约 60.0 m³。试验台主要由汽蚀筒、压力水箱、气液分离筒、电磁流量计、辅助泵、调节闸阀、管路等组成。试验台效率测试的综合不确定度为 $\pm 0.39\%$ 。试验台示意图如图 1 所示。

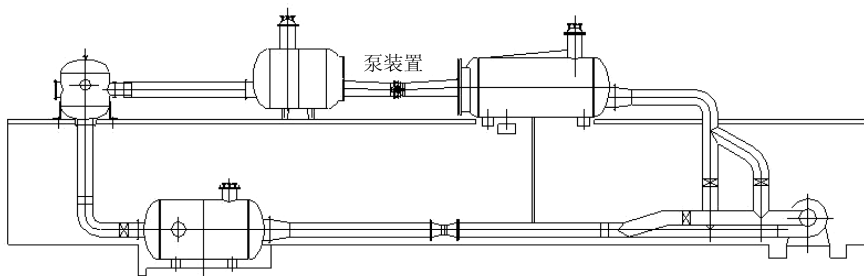


图1 试验台示意图

2 试验结果及分析

2.1 出水流动对泵装置性能的影响

虹吸式出水流动由扩散段、出水弯管段、上升段、驼峰段、下降段及出口段等部分组成。虹吸式出水流动可阻断出水池最高运行水位且断面方式简单可靠,因此在大型立式泵站中得到了广泛地应用^[9]。直管式出水流动形状简单,施工方便,在贯流泵装置中均采用直管式出水流动。目前,此 2 种出水流动对贯流泵装置能量性能影响的试验研究较少,通过物理模型试验研究了 2 种不同出水流动型式对贯流泵装置能量性能的影响,试验方案 A:采用直管式出水流动;方案 B:采用虹吸式出水流动。2 种出水流动的水平投影长度及进、出口断面的尺寸均相同,泵装置示意图见图 2。通过试验分析比较了 2 种出水流动对装置性能的影响。

不同方案的试验结果如图 3 所示。定义图 3 中某工况点,该工况点对应的流量为 Q_1 ,扬程 H_1 ,效率 η_1 ,在流量大于 Q_1 时,相同流量时方案 B 的装置扬程大于方案 A 的装置扬程,方案 B 的效率明显高于方案 A。在流量小于 Q_1 时,相同流量时方案 A

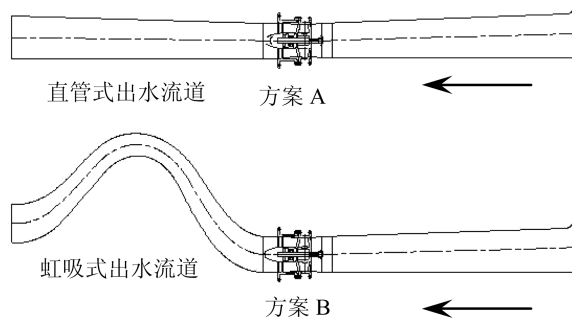


图2 泵装置单线图

的装置扬程大于方案 B 的装置扬程,方案 A 的效率略高于方案 B 的效率。

对仅出水流动不同的泵装置,装置效率的差异仅体现在出水流动的水力损失方面,出水流动水力损失与流量不成 2 次方关系,而与导叶体出口流态

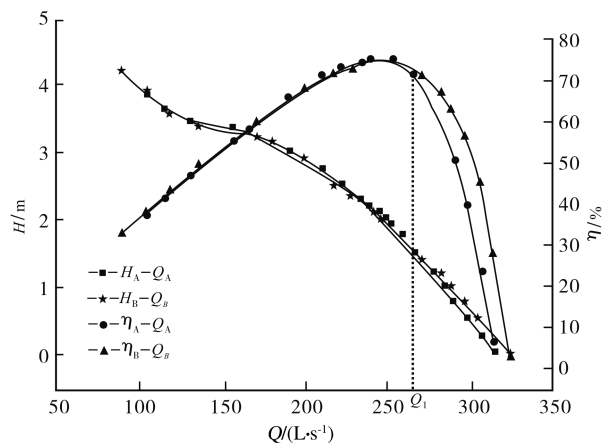


图3 不同出水流动的泵装置能量性能曲线

有关,不同工况时,导叶体出口的速度分布对出水流动水力性能影响均不相同,出水流动水力损失计算可表示为

$$\Delta h_{\text{out}} = h_y + h_j + h_r \quad (1)$$

式中: Δh_{out} 为出水流动总水力损失; h_y 为出水流动沿程损失; h_j 为出水流动局部损失; h_r 为环量损失。

式(1)中等号右边第一项与第二项之和的损失值与流量成二次方关系,而第三项为环量损失,损失值与导叶出口各点环向速度大小相关。在相同

流量(大于 Q_1)时,

虹吸式出水流道的沿程水力损失比直管式沿程水力损失大,局部损失大于直管式出水流道,试验结果表明虹吸式出水流道的总水力损失小于直管式出水流道的总水力损失,表明虹吸式出水流道的环量损失小于直管式出水流道。在低扬程时,虹吸式出水流道对环量的回收能力大于直管式出水流道。虹吸式出水流道比直管式出水流道回收环量的能力要强,压能恢复系数较高,因虹吸式出水流道和直管式出水流道在流道宽度和水平投影长度相同时,虹吸式出水流道的实际长度大于直管式出水流道,虹吸式出水流道的扩散更为平缓。本文所得结论与文献^[7]通过透明流道模型试验和数值模拟计算所得结论相同。

2.2 导叶体对泵装置性能的影响

首先为说明导叶体自身对贯流泵装置性能的影响,对有、无导叶体的贯流泵装置分别进行了能量性能试验,试验结果如图 4 所示。有导叶体时泵装置效率略高,当流量大于 Q_1 时,无导叶的泵装置效率较高,总体性能非常接近,与其他泵装置中反映出来的性能有很大的不同,文献^[8]对轴流泵泵段的试验,得出有、无导叶对轴流泵性能的影响非常明显,最高效率下降较大,而在贯流泵装置中变化不明显,主要因灯泡贯流泵装置中的灯泡体导叶体自身对灯泡贯流泵装置性能的影响不大,为了进一步研究导叶片形状对装置性能的影响,通过对贯流泵装置模型试验,分析了两副导叶对泵装置性能的影响,两副导叶体的叶片数相同。方案 A:导叶片为弯导叶;方案 B:导叶片为直导叶,试验结果如图 5 所示。

从图 5 可知,2 种导叶体对泵装置能量性能的影响差异性较大,方案 A 泵装置的最高效率点比方案 B 泵装置最高效率点偏向小流量工况;在高效工况往小流量方向偏移时弯导叶的性能明显优于直导叶,往大流量方向偏移时,直导叶水力性能则更优异。依据实际泵站的扬程,合理设计导叶体对提高泵装置效率起到重要的作用。在 2 种不同导叶体时,泵装置的轴功率曲线基本重合,表明转轮内部流动属于大雷诺数湍流,惯性力起主导作用,导叶体对转轮内部流动的影响较小,导叶体对泵装置能量性能的影响主要通过动能的回收及其回收过程产生的水力损失来改变装置高效区的分布。

2.3 叶片数对泵装置性能的影响

转轮叶片数对泵装置能量性能的影响是显著

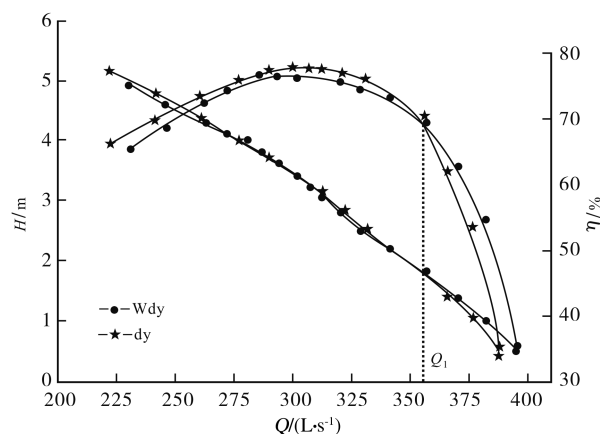


图 4 有无导叶体的泵装置性能曲线

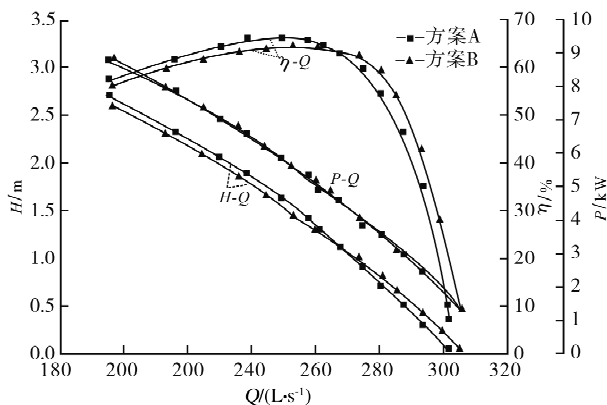


图 5 不同导叶体的泵装置性能曲线

的。通过物理模型试验研究了叶片数变化对贯流泵装置性能的影响,因仅改变转轮叶片数,反映的是叶栅稠密度的变化。试验方案 A:转轮叶片数为 3;方案 B:转轮叶片数为 4。试验结果如图 6 所示。

方案 B 泵装置的扬程、流量曲线斜率比方案 A 大,最优工况时方案 B 泵装置的流量相比方案 A 的流量仅相差了 1.39%,在最优工况向小流量偏移时,方案 B 泵装置的效率略高于方案 A,说明叶栅稠密度的变化对泵装置的效率影响较小。叶片数的适当增加,可降低叶轮的比转数,提高泵装置扬程。

3 泵装置的能耗比对分析

对贯流泵装置与普通立式轴流泵装置进行能耗分析,两套泵装置最高效率所处角度的外特性曲线如图 7 所示。在较低扬程时,假设两套泵装置提水量均为 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 时,在扬程 3.0 m、2.0 m 及 1.0 m 时,贯流泵与立式泵模型装置耗能的计算结果见表 1。泵站泵机组装置耗能(电能)可用下式表示:

$$E = \frac{rQH_1t}{102\eta_E} \quad (2)$$

式中: E 为耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q 为装置流量, m^3/s ; r

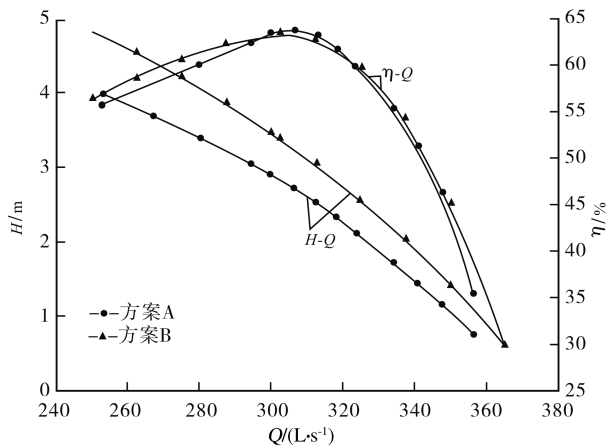


图 6 不同叶片数时装置性能曲线

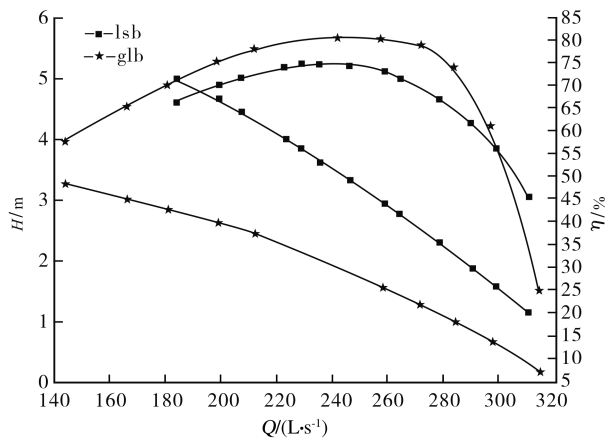


图 7 不同泵装置能量性能曲线

为水容重; H_t 为提水高度,m; t 为运行时间,h; η_E 为装置效率,%。

由表1的计算结果可得:在相同的提水量时,提水高度均为3.0 m时,立式轴流泵装置耗能比贯流泵的耗能减小了约9.7%,但在提水高度为2.0 m与1.5 m时,贯流泵装置的耗能明显低于立式轴流泵装置。贯流泵装置的进、出水流道相对平顺,而立式轴流泵装置流道弯曲,转角较大,贯流泵装置流道比较短,立式轴流泵装置流道比较长,从水力学原理分析可知,立式轴流泵装置流道的局部损失和沿程损失总和要比贯流泵装置的流道大。

4 结 论

贯流泵装置各过流部件对泵装置能量性能均有影响,合理地确定各过流部件是值得深入研究的问题。在低扬程工况时贯流泵装置采用虹吸式出水流道的水力损失小于直管式出水流道;有、无导叶体对灯泡贯流泵装置性能的影响较小,导叶片的形状影响其回收环量的能力,从而改变泵装置最优工况性能参数,但导叶体对转轮内部流动的影响

较小。叶栅稠密度的变化对泵装置的效率影响较小,适当增加叶片数,可降低转轮的比转数,提高扬程。对贯流泵装置和立式轴流泵装置的能耗计算,表明在特低扬程(低于2.0 m)时贯流泵装置的能耗明显低于轴流泵装置。

表 1 能耗计算表

类 别	提水高 度/m	流量/ (L · s ⁻¹)	效率/ %	提水时 间/h	耗能/ (kW · h)
贯流泵	3.0	170.4	66.62	1 630.2	12 263.86
立式轴流泵	3.0	256.8	73.08	1 081.7	11 179.56
贯流泵	2.0	236.6	79.54	1 174.04	6 847.66
立式轴流泵	2.0	287.8	62.15	965.18	8 763.71
贯流泵	1.5	262.5	79.62	1 058.2	5 130.58
立式轴流泵	1.5	302.5	53.08	918.28	7 695.93

参考文献:

- [1] 杨帆,刘超.低扬程泵装置的研究进展及展望[J].水利与建筑工程学报,2012,10(4):84-91.
- [2] 陈斌,李贞彬,张华,等.基于轮毂比的潜水轴流泵优化设计研究[J].中国给水排水,2019,35(23):91-95.
- [3] 谢华,黎臻,刘德祥,等.基于三维数值模拟的柳港泵站肘形进水流道优化设计[J].中国农村水利水电,2019(9):129-132.
- [4] 陶然,肖若富,杨魏.基于遗传算法的轴流泵优化设计[J].排灌机械工程学报,2018,36(7):573-579.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 梁豪杰,戴启璠,华学坤,等.低比转速高效贯流泵模型优化设计与试验研究[J].人民长江,2018,49(21):84-89.
- [8] 孙振兴,周勇胜,陈云帆,等.大型潜水泵站竖井式出水流道的水力性能研究[J].中国给水排水,2018,34(5):52-56.
- [9] 徐磊,颜士开,施伟,等.虹吸式出水流道水力性能数值计算湍流模型适用性[J].水利水运工程学报,2019(4):42-49.