

高扬程大功率离心泵浑水模型试验研究

陈莹 孟晓超 张海平 张建光 马兵全

(中国水利水电科学研究院, 北京, 100038, chenying@iwhr.com)

摘要: 磨损与空蚀是水力机械在含沙水流条件下运行时的主要破坏方式, 对于高扬程大功率的离心泵而言, 该种破坏方式更为突出, 但如何在离心泵使用前就确定其运行条件及运行表现既是研究的重点又是难点。因而在牛栏江-滇池补水工程高扬程大功率的离心泵研制或使用之前, 本文通过模型试验来观察其在含沙水流条件下的运行表现, 掌握其运行性能、规律, 从而为真机的制造和运行提供极为有力的帮助。对高扬程大功率离心水泵在清、浑水条件下的能量、空化、压力脉动等性能进行了对比, 分析出了其在不同运行条件下的性能及其规律, 从而为真机的制造和运行奠定了基础, 并且文中针对高扬程大功率离心水泵在浑水条件下的试验方法及对技术难点的处理, 给今后相关工作提供有益的参考。

关键词: 高扬程 离心式水泵 模型试验 浑水性能

1 概述

牛栏江—滇池补水工程是一项水资源综合利用工程, 是滇中调水的近期重点工程。其近、远期工程任务为: 2020年重点向滇池补充生态水量, 改善滇池水环境, 并在昆明发生供水危机时, 提供城市生活及工业用水。2030年主要任务为曲靖市生产、生活供水, 其次与金沙江调水工程共同向滇池补水, 并作为昆明市的后备水源提供供水安全保障。众所周知, 在含沙水流中运行的水力机械, 均会不同程度的受到泥沙磨损与空蚀的破坏, 特别是含沙量很高, 通流部件的空蚀和泥沙磨损问题比较突出, 而且往往表现为空蚀和磨损联合破坏。泥沙磨蚀破坏使水泵效率下降, 振动加剧并造成比较频繁的停机检修, 达不到规定的大修间隔, 造成很大的经济损失, 直接影响到工程的安全可靠运行。为保证牛栏江引水工程的安全稳定运行, 对开发的牛栏江水泵模型的清水和浑水试验工作, 旨在研究高扬程大功率水泵的性能及应用条件对其性能的影响, 并借此进一步探索离心泵模型浑水试验的方法及技术方案。

表1 牛栏江-滇池引水工程水泵设计参数

设计引用流量	23m ³ /s
最大扬程下引用流量	20m ³ /s
最大扬程	233.3m
设计扬程	219.3m
最小扬程	185.85m

2 试验系统配置及试验条件

2.1 试验系统配置

本次试验在中国水利水电科学研究院水力机械实验室 TP3 试验台进行。试验台配备有试验台配

有高精度的高精度的负荷传感器、差压传感器和流量计等试验仪器和原位标定系统、高性能的数据采集和处理系统，先进的 PLC 控制系统，各试验参数的测量精度和运行稳定性满足 GB 和 IEC 有关规程的要求，可满足水轮机和水泵模型的浑水试验要求，其浑水试验含沙浓度最高可达 50 kg/m^3 ，试验台模型清水效率综合误差小于 $\pm 0.2\%$ ，浑水效率综合误差小于 $\pm 0.4\%$ ，是目前达到国际先进水平的试验台。试验台循环系统包括：水库、循环水泵、电磁流量计、压力箱、模型机组、尾水箱、管路系统和称重桶等，根据模型试验及流量标定的需要，循环系统可以封闭或开敞运行。试验前后对试验参数相关的仪器设备进行原位标定，参与检验和标定的计量器具均由中国计量院检定合格。试验数据自动采集，由试验数据处理系统自动存储处理后，计算机直接打印出试验结果。

试验台测试功能齐全，可完成水轮机、水泵及水泵水轮机的浑水能量试验、空化试验、压力脉动试验、飞逸、蜗壳压差、轴向水推力、水泵水轮机四象限特性、磨损等各方面特性的模型试验，最高试验水头 $H_m=60\text{m}$ ，最大试验流量 $Q_m=1000\text{l/s}$ ，测功电机 $P_e=300\text{kW}$ ，试验转速 $n_m=0\sim 3000\text{r/min}$ ，试验模型转轮试验范围 $D_m=250\sim 500\text{mm}$ 。

试验机组为立式单吸单级离心泵，模型过流表面采用不锈钢材料制造，转轮为锡青铜材料加工，机组进出口测量断面设有取水口，试验水泵模型的主要参数为：泵轮直径 $D_m=450\text{mm}$ ，转轮叶片数 $z=9$ ，水泵出口直径 $D=278.6\text{mm}$ ，进口直径为 910.7mm ，比转速 $n_s: 106.43$ 。

2.2 试验条件

本次试验包括清水和浑水特性试验，试验严格按照 IEC60193: 1999，GB/T15613 水轮机、蓄能泵和水泵-水轮机模型验收试验等规程的有关规定进行。试验的水温控制在 $15\sim 25^\circ\text{C}$ ，在此温度范围内最大的运动粘滞系数 $\nu=1.395\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ，雷诺数计算得 $Re=5.78\times 10^6$ ，试验条件满足 IEC 的相关规定。根据真机的实际运行条件，选择试验流量范围 $0\sim 0.25\text{m}^3/\text{s}$ ，最大扬程 60m ，最大功率 100 kW ，试验转速 1200r/min 。

由于要进行浑水试验，水中含沙后常规的机械密封就无法使用，因此采用聚氨酯橡胶皮圈进行主轴密封，在相对的两个橡胶圈中注入高压水，保持高压水的压力略大于机组内的压力，起到密封作用。

浑水试验用沙全部来自牛栏江引水工程泵站所在的水库，根据规划提供的泥沙分析，牛栏江河流泥沙主要集中在主汛期 $6\sim 9$ 月，占全年来沙量的 85% 以上，水库多年平均含沙量 0.72 kg/m^3 ，历年平均取水含沙量见表 2，故浑水试验时选择三个不同的含沙浓度 0.2kg/m^3 、 0.8 kg/m^3 、 0.9kg/m^3 进行试验，以上浓度均为实测值。

表 2 水库历年平均取水含沙量

水库运行年限	水库初始运行		水库运行 10 年		水库运行 30 年	
水库水位（m）	1790.00	1766.13	1790.00	1766.13	1790.00	1766.13
多年平均取水含沙量（ g/m^3 ）	111.6	157.8	114.2	168.7	118.1	184.5
多年汛期平均取水含沙量（ g/m^3 ）	140.5	198.7	143.8	212.4	148.7	232.3

由于试验机组是高扬程水泵，最大流量仅为 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ ，浑水试验时泥沙的沉积率较高，为解决这一问题，专门在尾水罐尾部安装一小型搅拌泵，使得系统中的水和沙充分混合，保持确定的含沙浓度。试验中分别从进水口和出水口取水以测定含沙浓度，取样的浑水用滤纸过滤后将滤出的泥沙烘干，用天平称出重量后计算含沙浓度。

3 浑水特性试验及结果分析

水泵模型的浑水试验包括能量试验、空化试验和压力脉动试验。

3.1 能量试验

水泵能量试验在恒定转速 1200r/min 下进行，试验时尾水箱通大气，在清水和浑水条件下从零流量开始渐开导叶完成能量特性试验。效率试验从小流量做起，出口阀门调至关闭状态，同时，采集流量、扬程、扭矩及转速数据即可测取流量、扬程、转速、轴功率计算泵的效率并绘制出 $H \sim Q$ 、 $\eta \sim Q$ 曲线。重复以上步骤，依次开大出口阀门直至做到大流量点为止，性能曲线对于离心泵取 15 个以上工况点，并合理的分布在曲线上。

比较清水试验和两个含沙浓度的浑水试验结果，从试验数据来看，本次试验范围内含沙水流对机组效率影响不大，含沙浓度小时对最优效率基本没有影响，含沙量增大时略有所下降。从整条效率曲线上可以看出，总体的趋势是，与清水试验相比效率在小流量工况有所降低，大流量工况略有增大。

从试验结果看，在首次进行含沙浑水试验时，试验初期的浑水效率比较清水结果略有上升，但随着试验时间的增加效率又呈下降趋势。分析看来，是由于试验用沙较细，泥沙平均粒径为 0.027 mm，中值粒径为 0.008 mm，在含沙浓度 0.2kg/m³ 的条件下短时间运行，对水泵的通流部件表面起到了抛光的作用，降低了过流表面粗糙度，效率提高。可见，水泵通流部件的表面粗糙度和型线误差对水泵水力效率影响很大。对高扬程离心泵，因泵轮流道具有较高的相对流速，且流道狭长，其表面粗糙度和翼型误差对水力损失影响更为显著。但当浑水试验继续进行，机组在含沙水流中长时间运行，粗糙度和型线误差增大将导致泥沙颗粒对流道表面的撞击机率增大，加速水流紊乱和产生旋涡，使水力损失增大，效率转为下降趋势。所以在高扬程水泵真机的加工制造中，应注意降低表面粗糙度，提高通流部件的加工精度。

表 3 模型水泵典型工况点清水能量试验结果

试验点号	H(m)	Q(l/s)	Q ₁₁ (l/s)	η (%)
1	46.42	6.51	4.72	10.45
2	46.44	20.83	15.1	33.33
3	46.55	59.19	42.84	62.29
4	39.55	156.70	123.05	87.36
5	31.87	194.61	170.24	82.99
6	27.36	210.90	199.11	77.11

表 4 模型水泵典型工况点浑水能量试验结果

(S=0.2 kg/m³)

试验点号	H(m)	Q(l/s)	Q ₁₁ (l/s)	η (%)
1	46.53	6.16	4.45	9.77
2	46.39	20.26	14.69	29.02
3	46.69	60.68	43.85	63.07
4	39.62	156.34	122.66	87.54
5	32.21	193.97	68.78	83.78
6	27.62	210.49	197.79	77.83

(S=0.8 kg/m ³)				
试验点号	H(m)	Q(l/s)	Q ₁₁ (l/s)	η (%)
1	46.41	6.61	4.79	10.44
2	46.28	24.46	17.75	33.74
3	46.59	59.71	43.20	62.46
4	39.50	157.24	123.55	87.45
5	32.25	193.79	168.51	83.75
6	27.34	210.33	198.65	77.14

3.2 空化试验

对于高扬程离心泵，根据美国垦务局经验，当扬程高于122 m时，应严格避免空蚀，由于空蚀和磨损使高速旋转的泵轮内部流态恶化，引起通流部件压力脉动和噪音，会严重危害机组的安全运行和动行环境，因此掌握高扬程离心泵的空化性能是十分重要的。空化试验能量工况在尾水箱通大气条件下，然后封闭尾水箱，逐步抽真空降低尾水箱内压力来减小水泵的空化系数，使水泵发生空化，直至效率下降了0.5%为止，临界空化系数值采用σ_{0.5}，σ_{0.5}指与无空化工况效率相比，效率降低0.5%时的空化系数。空化试验试验转速：n=1200r/min，试验过程中保持转速不变。空化试验前系统在真空度15m的条件下封闭运行20~30分钟，以保证水中携带的气泡尽量溢出，满足试验水中含气量的要求，减少对水泵空化性能的影响。

空化试验包括初生观测和临界空化试验，清水初生观测时采用目测法结合空化噪声的方法来确定。空化发生和气泡溃灭的过程中，会产生高频的声辐射，采用水听器可以很好的检测这一过程。水泵机组发生空化时，振动加剧并出现很大的噪声，叶片出现气泡，本次试验中以 3 个转轮叶片表面开始出现可见气泡时所对应的空化系数为初生空化系数来进行记录。为能了解掌握高扬程大功率水泵的清浑水空化性能，了解水流夹沙对临界空化的影响，选取含沙浓度为 0.2kg/m³,0.8 kg/m³ 的情况进行试验并于清水性能进行比较。清水、浑水的空化试验结果呈以下规律：浑水试验中相同工况点的临界空化系数 σ_{0.5} 比清水试验时略有增大，含沙量增大时临界空化系数也有所增大。在接近最优工况区域内，含沙浓度的变化对空化性能的影响并不明显，在小流量区域其影响是十分明显的。

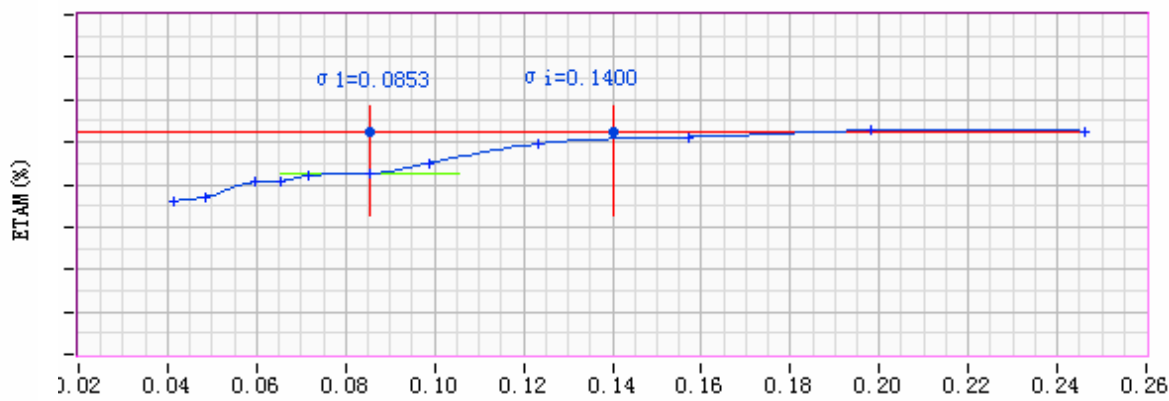


图 1 临界空化试验过程图

表 5 水泵典型工况点清水空化试验结果

Qp(m ³ /s)	Hp(m)	σ _{0.5}	NPSH _{0.5} (m)
6.67	232.72	0.0853	28.11

7.00	230.79	0.0536	17.32
7.68	220.30	0.0561	17.30
8.00	215.10	0.0586	17.64

表 6 水泵典型工况点浑水空化试验结果

S=0.2kg/m ³			
Qp(m ³ /s)	Hp(m)	$\sigma_{0.5}$	NPSH _{0.5} (m)
6.67	235.24	0.0822	27.07
7.00	232.11	0.0541	17.58
7.65	221.95	0.0535	16.62
S=0.8kg/m ³			
Qp(m ³ /s)	Hp(m)	$\sigma_{0.5}$	NPSH _{0.5} (m)
6.67	235.84	0.1005	33.18
7.68	221.34	0.0616	19.09
8.00	214.81	0.0596	17.92

3.3 压力脉动试验

试验转速 $n=1200\text{r/min}$ ，个别工况降转速；采用 112A22 型动态压力传感器安装在水泵机组的各测点处，试验前通过 903BO2 型动态压力校验仪（精度 $\pm 0.2\%$ ）进行标定。试验数据采用 FFT 分析软件进行幅频特性分析，经 FFT 分析的分频幅值(峰—峰值)获得最大的 3 个频率及其对应的分频幅值。混频双振幅幅值取值方法采用 97%置信度，H 为相应的试验扬程。压力脉动测点一处在进口直锥段距进口 225mm 处，另一处位于导叶与进口之间，每个位置相对安放两个压力脉动传感器。浑水试验选取 $0.8\text{kg/m}^3, 0.9\text{kg/m}^3$ 的含沙浓度进行对比。

从试验结果来看，在整个试验工况范围内压力脉动幅的变化规律在清水、浑水条件下是一致的，随着含沙浓度的增加相同工况下压力脉动幅值略有增大，但频率无明显变化。在整个运行范围内，无明显的水力激振，主要表现频率 $f=9f_n$ 符合一般规律。在超过设计的最大扬程后，含沙量对水泵性能的影响就会变得很明显，压力脉动的幅值陡增。

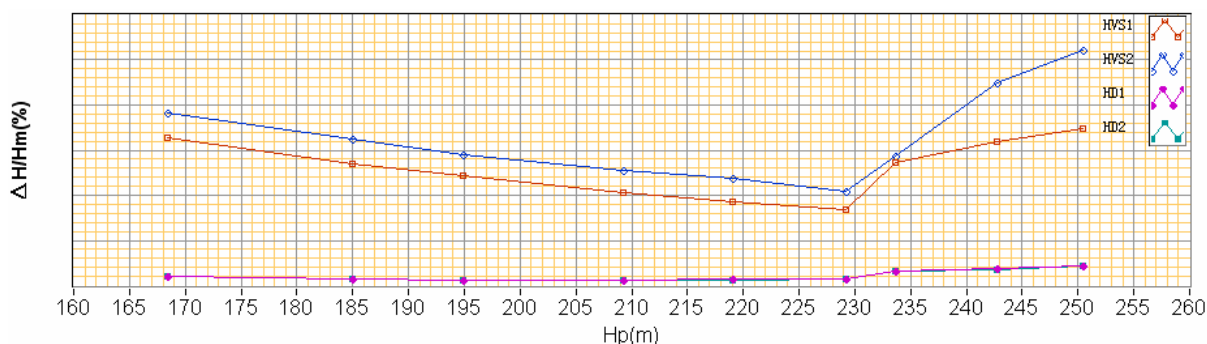


图 2 水泵模型清水试验压力脉动幅值与扬程关系

4 结语

- (1) 根据试验结果来看,该高扬程大功率离心泵在牛栏江引水工程的运行条件下,效率、空化压力脉动、零流量等性能指标均能满足真机运行要求。浑水试验对比表明,真机制造时降低过流表面的粗糙度对水泵的效率影响显著,长期在含沙水流中运行,水泵的空化性能较清水中恶化,由于空化的加剧,相应的压力脉动幅值也随之增大。
- (2) 针对不同含沙浓度条件下的试验结果,可以看出在试验的几个浓度下,水泵性能随含沙量的增加呈相对线性变化,但试验时只依据牛栏江水泵运行的条件选取了几个较小的含沙浓度,要获得水泵性能大幅下降,趋于破坏的临界条件,还需进一步进行试验研究。
- (3) 浑水试验过程中,为保证主轴密封采用聚氨酯橡胶圈加高压水的方式,试验过程中应密切关注高压水的水压,对于流量小的模型机组,浑水实验时应另外考虑加搅沙泵,其安装位置以不影响模型机组流态为宜,这些浑水试验的方法和经验给相关工作提供借鉴意义。

参考文献

[1] 孟晓超, 张建光, 陈莹等. 牛栏江-滇池补水工程水泵模型试验报告[R]. 2010.

Abstract: Erosion and cavitations were the most popular failure mode of hydrologic machine, especially for the high head and large power centrifugal pump, so it is necessary to observe the performance of pump in silt-laden water flow by physical model test. This paper tested the performance of high head and large power centrifugal pump in clear and slit-laden water flow, and compared the energy, cavitations and pressure pulse in the both water flow. It is useful to get the performance of pump under different conditions, and helpful to guide the manufacture and running of the machine. The test methods used in this paper is valuable to the similar work.

Key word: high head, centrifugal pump, model test, silt-laden flow performance