

皂河站主机组更新改造探析

吴良宇, 仝 超, 徐川江

(江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 皂河站经过多年运行, 电机绝缘老化严重, 水泵长期处于低效区运行, 出现叶片汽蚀严重、转叶油缸和叶轮头漏油等, 2004 年安全鉴定为三类设备, 2 台机组于 2010 ~ 2012 年进行更新改造, 在改造中对电机定转子线圈进行现场更换, 对水泵模型、叶片、转叶油缸、密封等进行优化改造, 效果良好, 运行稳定。

关键词: 电机; 线圈; 水泵; 叶片; 改造

中图分类号: TV122

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 12-0060-05

Exploration and analysis on the renewal and transformation of the main unit of Zao River Pumping Station

WU Liangyu, TONG Chao, XU Chuanjiang

(Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, Jiangsu)

Abstract: After years of operation, the motor of Zao River Pumping Station was insulation aging seriously, and the pump was running in the inefficient zone for a long time, which appeared the problems of serious blade erosion, oil leakage in the rotating cylinder and impeller head. In 2004, the equipment was identified as three types of equipment in the safety appraisal, and two units were upgraded from 2010 to 2012. The stator and rotor coils of the motor were replaced on site, and the pump model, blade, rotary vane cylinder, seal, etc. had been optimized and improved with good effect and stable operation.

Key words: motor; coil; water pump; blade; transformation

1 工程概况

江苏省皂河抽水站(以下简称皂河站)位于江苏省宿迁市,是江苏江水北调第六梯级泵站,也是南水北调东线工程的第六梯级泵站,工程 1978 年 11 月开工兴建,1987 年 3 月通过验收。皂河站安装 2 台 6HL-70 立式全调节混流泵,主泵叶轮直径 5700 mm,单机流量为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,是亚洲单机流量最大的混流式泵站,被称为“亚洲第一泵”,配套电机型号 TL7000-80/7400,总装机容量 14000 kW。站身采用半堤身式块基结构,钟形进水流道,双螺

旋蜗壳式出水室,平直管出水流道,采用快速闸门断流。

2 改造缘由

皂河站经过多年运行,主机组陆续出现各类问题。

2.1 主电机

(1) 绝缘老化严重,威胁安全运行。整相绕组电流增加率 A、B 相分别大于标准 10.08% 和 27.25%;三相绕组的电容增加率 A、B 相分别大于

收稿日期: 2018-04-21

作者简介: 吴良宇(1972—),男,本科,工程师,主要从事泵站运行和管理工作。

标准 43.75% 和 25.38%, 整相绕组的 $\text{tg}\delta$ 值不符合要求。

(2) 内冷却器为铜管冷却器, 出现一定程度的氧化锈蚀, 铜管壁厚大部分变薄, 已不足原壁厚的 70% ~ 80%。

(3) 上下油缸等部位的测温元件失灵, 对电机安全运行造成极大隐患。

(4) 集电环表面产生凹凸不平的沟槽, 碳刷磨损严重。

2.2 主水泵

(1) 长期处于非设计工况运行。水泵初始设计扬程 6 m, 根据统计资料分析, 实际运行净扬程多在 3.5 ~ 4.5 m 之间 (见图 1), 远低于泵设计扬程, 造成水泵长期处于低效区运行。当实际扬程小于泵的设计扬程, 水泵在偏离设计工况下运行时, 会使叶片入口冲角加大, 在叶片正面进口边产生脱流与漩涡。在这种情况下, 由于流量的增加使泵的空蚀余量加大, 装置空蚀余量减小, 加速了叶片正面的汽蚀破坏。

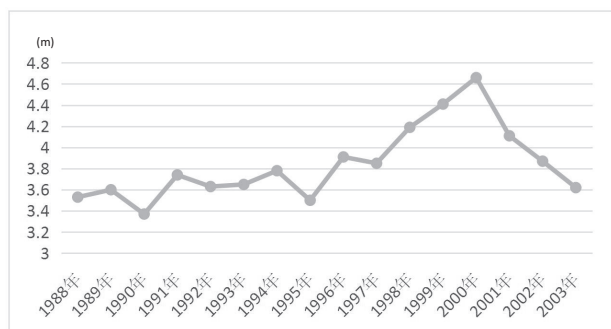


图 1 水位时间曲线

(2) 装置效率下降。自 1988 年投入运行以来, 由于长期偏工况运行及不时的杂物堵塞形成空吸, 水流挟气, 汽蚀严重。水泵性能达不到设计要求, 流量减少, 功率上升, 装置效率严重下降。根据图 2, 皂河抽水站的效率呈逐年下降的趋势。1988 ~ 1990 年平均效率约为 65%, 2002 ~ 2003 年

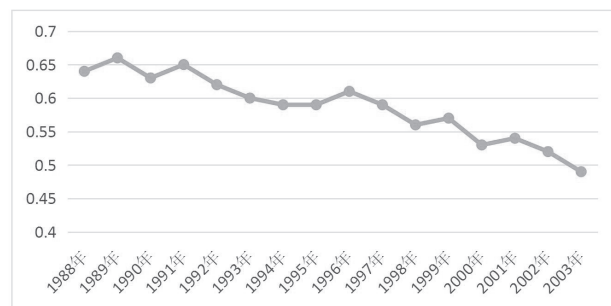


图 2 泵站效率时间曲线

平均效率为 51%, 下降了 14 个百分点。已达不到原设计工程效益, 低于规程中规定 $\geq 60\%$ 的要求。水泵在叶片角度 -3° 时多年平均实测流量为 $83.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 与设计流量相差 13.2%。

(3) 泵叶片、转轮室、导叶等过流部件的空蚀严重, 主泵经长期水流、泥沙冲刷及汽蚀的破坏, 叶片正面进水侧形成一条宽 300 mm、深 25 ~ 40 mm 的汽蚀带, 平均每片叶片进口边一侧汽蚀面积 4140 cm^2 , 占叶片正面总面积的 9.52%, 汽蚀蚀坑深度一般为 8 ~ 12 mm, 最深的蚀坑已达 16 mm 以上, 在汽蚀区与叶片之间已经形成一明显的弧形台阶, 叶片进口边的厚度已不足 30 mm, 汽蚀已达到 IV 级, 属严重汽蚀侵蚀。转轮室表面可见连绵不断的锈蚀蚀泡, 蚀泡直径不等, 平均密度在 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 内有 30 ~ 40 个, 点蚀坑直径 10 ~ 20 mm, 蚀坑深度 8 ~ 15 mm, 锈蚀面积达 25% 以上, 由于点蚀坑的形成, 加剧了锈蚀的发展。由于长期磨损、叶片汽蚀以及叶型变化, 致使叶轮失去平衡, 加速了轴颈及轴承的磨损, 加之机组长期在非设计工况下运行, 致使运行中机组振动加剧和噪声增大。

(4) 叶片间隙超标。表 1 是 2 号泵叶片与转轮室内壁间隙数据, 叶片平均间隙达到 5.39 mm, 超过规定间隙 34.75%。

(5) 叶调机构问题。叶片调节操作机构采用刮板式油缸, 因原有油缸内壁不圆及密封结构不完善等问题, 2 # 泵叶片调节机构漏油状况逐渐恶化, 从测试结果看, 平均泄漏量每年递增 5.21 L/min 。2001 年平均泄漏量已达到 70 L/min , 超过标准^[1]规定允许泄漏量 (经换算为 38.4 L/min) 达 82.3%。而水泵运行扬程一般在 3.5 ~ 4.5 m 之间, 远未达到设计扬程 6 m, 所以在设计工况下油缸泄漏量要比上述数值大得多。调节不到位, 叶片设计可在 $+2^\circ \sim -18^\circ$ 范围内调节, 但由于叶片调节机构的原因, 在正常叶片调节范围内, 叶片角度无法调整到位, 最大只能调到 -2° 运行。叶片长期在负角度下运行, 在叶片正面进口边形成冲击旋涡, 这在一定程度上加剧了叶片进口边的汽蚀破坏。主泵受油器及叶片调节器内各种绝缘垫片均已损坏, 油压只能调到 2.1 MPa (额定为 2.5 MPa), 在调节过程中油泵噪声高达 98dB, 且伴随剧烈振动。

(6) 叶轮头漏油。检查时可见叶片根部上部有 10 cm 长左右的渗油带, 下部有 20 cm 左右的漏油

表 1 皂河站 2 号水泵叶片间隙数据

叶片号	上测点 (出口) (mm)	中测点 (mm)	下测点 (进口) (mm)	平均 (mm)
1 号叶片	5.50	5.50	6.06	5.69
2 号叶片	5.00	5.10	5.40	5.17
3 号叶片	4.94	5.15	5.00	5.03
4 号叶片	5.10	5.60	6.28	5.66
平 均	5.11	5.34	5.69	5.39

带,漏油量达 15 ~ 20 滴 /min。根据贮能罐回油箱每年添加 2 ~ 2.5 t 透平油判断,叶轮头漏油较严重。

(7) 顶盖漏水量大,排水频繁。原因之一是动静环磨损严重造成水泵运行时水封效果不理想,原因之二是大轴水下部分锈蚀严重(轴颈部位已呈现明显沟痕,磨损深度大于 0.60 mm),且空气围带老化致使水泵停运时空气围带止水效果不好。

(8) 由于无清污设施,下游拦污栅又时常遭杂物堵塞,造成栅前后水位差高达 1.5 ~ 3.0 m,以正常运行水位▽ 18.5 ~ 19.5 m 计,栅后水位最低时仅有▽ 15.5 ~ 16.2 m,低于叶轮中心高程▽ 16.5 m,叶轮中心淹没深度大大减少,造成泵装置汽蚀余量下降,加剧了汽蚀的发生和发展。

3 更新改造内容

针对主电机和主水泵存在的问题,根据大型泵站技术改造原则和对策^[2],2010 年开始对主机组进行更新改造,2012 年改造完成。

3.1 主电机更新改造

(1) 主电机定转子线圈进行现场更换。定转子线圈实行工厂制造,严格按预先制定的方案和流程现场更换和绝缘处理^[3]。难点是做好定子线圈更换施工现场防尘和保温,搭设防尘棚和施工平台,线圈烘干时密切关注温度变化。

(2) 冷却器铜管更换和其它缺陷部件维修。

3.2 主水泵更新改造

(1) 设计扬程优化。1975 年骆马湖整治工程补水项目规划确定皂河站设计扬程为 6 m,根据历年抽水运行资料分析站上多年平均水位 21.85 m,站下多年平均水位 18.41 m,现状平均净扬程为 3.58 m。与规划扬程比较,现状多年运行平均扬程偏低。

根据最新的规划和初设^[4-5],确定皂河站设计净扬程为 4.78 m,最大扬程为 5.80 m,最小扬程为 1.26 m,平均扬程为 4.68 m。

(2) 水泵模型比选。皂河站的蜗壳式导叶混流泵所采用的转轮模型限于当时我国的研究水平等原因,采用 20ZLB-70 型轴流泵转轮经改造后而成。通过叶片出口的扭曲和转轮出口导流锥的导向及导叶的作用使水流从轴向变成水平径向出流,轴流泵叶片作为混流泵使用,在一定程度上影响了泵的效率。

根据 3 组叶轮模型装置的对比试验结果,优选最适合的水力模型(HB55 模型)。确保改造后水泵在只更换叶片的前提下,水泵性能参数满足要求,保证机组运行的稳定性,并尽量提高水泵机组的运行效率。

表 2 是 20ZLB-70 模型和 HB55 模型在平均扬程和设计扬程时主要参数对比表,从中可以看出,HB55 模型比 20ZLB-70 模型在同一叶片角度时不仅流量大而且效率也高,在 -2° 和 -4° 时表现尤其明显。根据模型试验研究报告,20ZLB-70 模型最高效率 68.18%,对应的叶片角度为 -4°,扬程 6.68 m,原型流量 74.94 m³/s; HB55 模型最高效率 71.45%,叶片角度 -4°,扬程 6.26 m,原型流量 75.8 m³/s。

(3) 水泵叶片更换。按照对比试验优选的模型叶片设计实型泵叶片,新叶片的柄部结构和尺寸与原叶片一致,叶片轮毂比与原叶片相同。确保改造后水泵的叶轮转动中心直径为 5700 mm(球径 6580 mm),设计转速为 75 r/min,水泵设计净扬程 4.78 m,单机设计流量 100 m³/s,叶片调节角度范围为 0° ~ -18°。新叶片与原叶片相比进行了以下优化。

叶型:取消叶片重叠部分设计,减少叶片背面水流冲击造成气蚀的可能性。

表 2 2 个水泵模型主要性能参数

叶片安放角度	水泵模型	平均扬程 (4.68m)		设计扬程 (4.78m)	
		原型流量 (m ³ /s)	效率 (%)	原型流量 (m ³ /s)	效率 (%)
-4°	20ZLB-70	82.9	61.42	82.5	62.09
	HB55	85.5	67.19	84.9	67.60
-2°	20ZLB-70	94.1	60.83	93.7	61.35
	HB55	97.3	65.32	96.7	65.71
0°	20ZLB-70	107.5	61.43	107.0	61.80
	HB55	109.3	61.89	108.6	62.42

材料: 新叶片采用 ZG06Cr13Ni4Mo 不锈钢单片整铸, 具有比原铸钢叶片抗汽蚀性能更好、抗锈蚀能力更强、可焊性更好等特点。

重量: 水泵叶片单件重量近 7.25 t, 4 只叶片重量比原水泵叶片减轻约 3 t。

工艺: 叶片型面采用五轴联动数控机床加工, 并用激光测量仪检测型面坐标, 型面的几何形状和表面精度得以充分保证, 比之前的加工工艺有很大提高。

(4) 油缸的改造。将横向密封条、轴向密封条、固定叶密封条、密封环下面的橡胶垫条和橡胶环, 用相同尺寸的钢件置换, 弹簧装配在槽底部, 大大增强了弹簧的浮力。更换上述零件上面的各橡胶密封条, 并在上述零件两侧增开密封槽, 嵌入密封胶条, 防止各密封槽侧面的泄漏。

(5) 修复轮毂体。对轮毂体的外表面进行机加工处理, 除锈处理, 表面的缺陷进行焊补, 轮毂体过流部分保证与试验用的模型泵相似。轮毂体外球面与叶片内球面间隙均匀, 最大正角度时非球面部分间隙控制在 1 ~ 2 mm, 保证叶片转动灵活, 在整个调节角度范围内不产生干涉、卡阻现象。并对轮毂体做静平衡试验 (参加叶轮静平衡试验的主要部件有叶片、转轮体、拨叉等, 重约 85 t), 叶轮体轮毂上口外圆单位不平衡重量为 0.7 kg < 允许不平衡重量 (21.7 kg), 满足规程要求。

(6) 泵轴的修复。对泵轴密封 (空气围带) 部位的轴颈堆焊不锈钢层, 用堆焊的方法大大提高轴档的表面硬度, 提高其耐磨性及抗锈蚀性能, 延长其使用寿命。

(7) 其他。机械密封动静环维修、空气围带更新和水导轴承维修等, 在原拦污栅前 100 m 处增

加一道拦污栅, 并配置清污机, 重新制作流道进水口处拦污栅, 减少因杂物涌堵造成水位差过大而使水泵发生汽蚀。

4 改造效果

4.1 技术参数对比

表 3 是主电机改造前后技术参数对照表, 从中可以看出无论是电气参数还是机械参数都有明显改善。

表 3 主电机更新前后技术参数表

技术参数 (单位)	改造后	改造前
额定功率 (kW)	7000	
额定电压 (kV)	10	
定子额定电流 (A)	472	475
额定励磁电流 (A)	443	495
额定励磁电压 (V)	225	243
空载励磁电压 (V)	98	115
空载励磁电流 (A)	282	315
最大转矩倍数	2.71	2.16
牵入转矩倍数	1.085	1.29

4.2 水泵刮板式油缸油压试验及叶片动作试验

油压试验是检验叶片轴密封、下盖与轮毂体之间密封、油缸与轮毂体之间密封、调节杆与油缸之间密封的可靠性等, 2# 泵油缸试验状态为无负载工况、高压腔 2.5 MPa, 叶片负角度转向时内泄漏 27 L/min, 叶片正角度向转动时泄漏为 23 L/min, 外

泄漏 1 ~ 3 L/min。叶轮体装配完成后叶片转动试验正常, 未产生干涉、卡阻现象。

4.3 试运行情况

2011 年 5 月完成 2 # 机组改造, 2012 年 5 月完成 1 # 机组改造, 并分别按规程进行试运行, 结果见表 4, 可以看出机组效率在 66.4% 以上, 平均

5 结语

由于皂河站水泵是亚洲单泵流量最大的混流泵, 经过多年的运行, 电机和水泵存在很多问题, 尤其是水泵叶片汽蚀和转叶油缸的问题, 利用难得的改造机会, 对电机定转子线圈进行现场更换,

表 4 水泵试运行记录

编号	时间	叶片角度 °	上游水位 m	下游水位 m	扬程 m	功率 kW	流量 m ³ /s	效率 %
2#	2011.5.25	-3	21.69	18.66	3.03	4500	110.0	72.6
		-6	21.68	18.65	3.03	3710	83.0	66.4
		-8	21.69	18.67	3.02	3130	75.0	70.9
1#	2012.5.25	-14	22.49	19.33	3.16	2114	46.3	67.8
		-12	22.49	19.28	3.21	2534	55.7	69.1
		-10	22.48	19.23	3.25	2907	65.6	71.9
	2012.5.26	-8	22.47	19.02	3.45	3405	74.6	74.1
		-6	22.47	18.92	3.55	4149	82.3	69.0
		-3	22.46	18.81	3.65	5259	101.0	68.7
		-1	22.46	18.63	3.83	6062	115.0	71.2

效率为 70.2%。

机组水平振动为 5 ~ 9 μm , 垂直振动为 6 ~ 8 μm , 水泵下导摆度为 0.100 mm (≤ 0.350 mm)。

4.4 近几年机组运行情况

根据 2013 ~ 2017 年运行情况, 1 # 机组累计运行 9481 台时, 2 # 机组累计运行 6014.3 台时, 累计抽水量 38.54 亿 m^3 , 平均流量 69.09 m^3/s , 扬程为 3.50 m ~ 4.82 m, 平均扬程 4.29 m, 效率达 62% ~ 74%, 比改造前提高 10% 以上, 具体特征值见表 5。

表 5 2013 ~ 2017 年机组运行特征值

特征值	上游水位 m	下游水位 m	扬程 m	流量 m^3/s	效率 %
最大值	23.27	18.85	4.82	122.00	0.74
最小值	22.26	17.70	3.50	33.90	0.62
平均值	22.68	18.40	4.29	69.09	0.67

彻底解决绝缘老化问题, 优化水泵的设计扬程, 选择更适于混流泵的转轮模型, 将水泵叶片更换为不锈钢材质, 并对转叶油缸进行改造和优化, 同时也对水泵其它部件进行改造和优化。经过更新改造, 主机组运行平稳, 叶片调节可靠, 未发现叶轮头渗漏油, 故皂河站主机组的更新改造是成功的, 达到预期效果。

参考文献:

- [1] GB8564-88 水轮发电机组安装技术规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [2] 储训, 陈履. 大型泵站建设和更新改造对策[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000.
- [3] 吴良宇, 徐川江, 刘刚. 电机线圈现场装配及绝缘处理[J]. 设备管理与维修, 2017(12): 85-86.
- [4] 水利部. 南水北调工程总体规划[R]. 2002.
- [5] 水利部淮河水利委员会, 水利部海河水利委员会. 南水北调东线工程规划(2001 年修订)[R]. 2002.