

淮安三站灯泡贯流泵装置优化研究

戴启璠, 梁豪杰, 孟小敏, 王文通

(江苏省灌溉总渠管理处, 江苏 淮安 223200)

摘要: 淮安三站建成于 1996 年, 是当时国内最大的灯泡贯流泵。自建成之日起就存在启动困难、超功率、振动大等现象, 不仅导致该站不能正常运行, 而且影响了贯流泵在南水北调工程的应用。本文在分析淮安三站存在的问题的基础上, 从 6 个方面对淮安三站原有泵装置进行优化。采用 CFD 数值模拟、模型试验、现场测试的方法研究了优化后泵装置的性能。结果证明, 优化后的淮安三站灯泡贯流泵装置性能优良, 满足泵站运行要求。

关键词: 贯流泵; 装置; CFD 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TV675 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2016) 10-0038-04

Study on the optimization of bulb tubular pump system in Huaian3rdstation

DAI Qifan, LIANG Haojie, MENG Xiaomin, WANG Wentong

(Main Irrigation Channel Management Division of Jiangsu Province, Huaian 223200, Jiangsu)

Abstract: Huaian 3rd station was built in 1996, which is the largest bulb tubular pump station. Since the date of completion, it exhibited phenomena such as start-up difficulties, overpower, vibration and more. This not only blocked the station from normal operation, but also impaired the application of cross flow pump in the South to North Water Transfer Project. Based on analysis of existing problems of Huaian 3rd station, this paper optimizes the original pump installation from 6 aspects. Using CFD numerical simulation, model test and field test, the performance of the optimized pump unit is studied. The results show that the optimized performance of the bulb tubular pump system of Huaian 3rd station is good, and meets the requirements of the pumping station.

Key words: tubular pump; device; CFD numerical simulation; model test

1 工程概况

淮安三站建成于 1996 年 12 月, 是江水北调第二梯级淮安枢纽中的第三座抽水站, 位于淮安市淮安区南郊, 其作用为抽引江都站送来的长江水入灌溉总渠, 继续北送, 为农业灌溉提供水源。共安装 2 台套可逆后置定浆式灯泡贯流泵, 水泵水轮机型号为 32WGN-42, 电动发电机型号为 TDFWG1700/400-44/3250, 单机功率 1700kW, 转

轮直径 3.19m, 总装机容量 3400kW, 设计总流量 66m³/s。泵装置结构如图 1 所示, 机组为伞式布置, 水泵电机用一根主轴直接刚性连结, 采用伞式两支点结构, 电机取消上导轴承, 其下导轴承与推力轴承合为一体, 水泵径向导轴承置于靠近转轮体处。电机定子采用贴壁结构, 采用冷却器加风机的空气密闭循环冷却, 并通过灯泡体外壁由河水带走部分热量。水泵电机上部各有一个进人孔,

收稿日期: 2016-08-04

作者简介: 戴启璠 (1964-), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事水利工程管理工作。

水泵部分的重量由座环和后导叶体承担, 电机的重量由电机管型柱承担, 电机管型柱固定在流道底部的钢筋混凝土上。主要技术参数见表 1^[2]。

表 1 淮安三站主机主要技术参数		
	水泵工况	水轮机工况
最大水头 (m)	4.5	2.2
设计水头 (m)	4.2	1.8
最小水头 (m)	4.0	1.7
设计流量 (m ³ /s)	33	31.85 (最大出力时流量)
设计点效率	88%	
额定转速 (rpm)	136.4	136.4
配套功率 (kW)	1700	400kW (最大水头时容量)

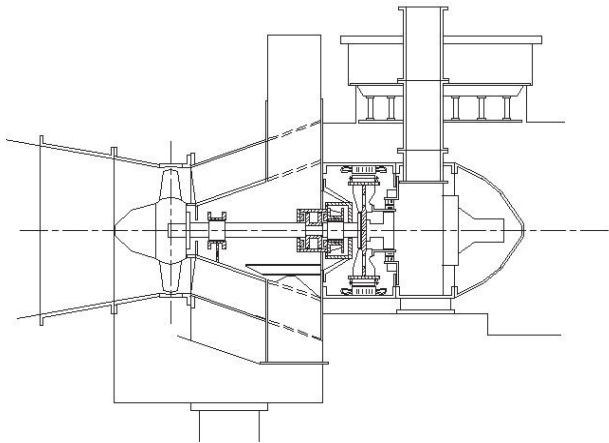


图 1 淮安三站原泵装置结构图

2 存在问题

淮安三站投运以来, 一直存在启动困难和超功率问题。自 1997 年 6 月投运至 1999 年 9 月, 当上游水位在 9.7m 以内, 站下游水位在 6.0m 以上, 电网电压调整在 6.4 ~ 6.9kV, 1 号机抽水启动 38 次, 成功 13 次; 2 号机抽水启动 30 次, 成功 19 次。由于经常启动失败, 启动过程中亚同步时间过长, 导致转子启动绕组端部联接片开焊。为此, 于 1999 年 10 月将铜焊改为联接效果更好的银焊, 同时增大联接片的尺寸, 在 2000 ~ 2003 年间机组的启动性能有明显改善。但自进入 2004 年度以来, 机组启动成功率迅速下降, 与以往相比, 在同样的水头下经常启动失败。2004 年 6 ~ 7 月, 站下游水位在 6.0m 上, 站上游水位仅 9.5m, 1 号、2 号机抽水工况均不能正常启动。

淮安三站主机在抽水状态下, 超功率现象十

分严重。据统计^[4]在 2001 ~ 2012 年间, 1 号机抽水超功率台时占到总运行台时的 75.3%, 2 号机抽水超功率台时占到总运行台时的 94.03%。2008 ~ 2012 年间, 1 号机和 2 号机抽水超功率台时与总运行台时比均超过 99%。在抗旱紧张时刻, 下游水位常会低于 5.5m (设计水位为 6.0m), 严重偏离设计工况, 超功率情况更加严重, 但为服从抗旱大局, 仍然坚持运行, 但是为了保证机组安全, 当电机功率超过 2200kW 时, 便停止运行。这就造成了一个非常尴尬的局面, 作为一个调水的泵站, 越是抗旱紧张用水的时候, 越是开不了机。另外, 长时间的超功率运行, 使得机组振动加大, 性能迅速下降。

3 存在问题的原因分析

(1) 真机效率修正值过大, 导致电机配套功率偏小, 机组启动困难, 运行中超功率

模型泵设计点的效率是 81.4%, 厂家给出的真机效率为 88.4%, 设计院的设计说明书中的水泵效率也是 88.4%, 按照这个效率推算的电动机功率 1600kW 就够了。从理论上说, 因为边界层效应, 原型泵的效率应当高于模型泵的效率, 并且有很多效率修正公式。但事实上, 由于模型泵和原型泵不能做到真正几何相似, 比如真机进出水口处的拦污栅、闸门门槽在模型装置中并没有体现, 通常真机效率修正值按 2% 考虑, 保险的做法是不修正。无论如何, 真机效率修正值 7% 太大了。从淮安三站建成到南水北调东线工程建设, 十几年的时间, 尽管技术在进步, 但是贯流泵效率达到 88% 还是不容易的, 更何况淮安三站流道还有一些问题。因此, 真机效率修正值过大是一个问题。根据实际测量, 淮安三站的效率大概在 65% ~ 70% 之间, 配套的电机功率应该在 2000kW 左右, 选用 1700kW 电机, 超功率是必然的。

(2) 设计不合理

淮安三站的 nD 值为 435, 而同一级的淮安一站的 nD 为 410, 淮安二站 nD 为 422.1。由此看出, 淮安三站的 nD 偏高, 实际运行扬程偏低, 偏离高效区最远, 抽水效率必然会有较大幅度下降, 这不是贯流泵本身效率低, 而是 nD 值没有选好, 是选型设计问题。偏高的 nD 值, 对发电工况的负面影响更大。最大发电水头 2.2m 时的单位

转速 $n_1' = 293\text{rpm}$, 设计水头 1.8m 时的单位转速 $n_1' = 324\text{rpm}$, 最大发电水头时的模型效率仅为 $\eta = 45\%$, 设计水头时的参数已跑到特性曲线以外, 估计模型效率不到 35%。所以偏高的 nD 值对发电工况的负面影响远远超过水泵工况。由于三站的发电时间比抽水时间长, 长期在恶劣工况下运行, 使机组性能迅速下降。

(3) 没有考虑水泵水轮机双向运行的特殊性

由于淮安三站的转轮是完全按水泵工况设计的, 对水泵的出水边, 即水轮机的进水边没有作任何修形, 所以水轮机工况的叶型很差 (进水边头部很小, 且没有叶形; 出水边, 即水泵工况的进水边又太厚)。由于单位转速比较高, 超出贯流式水轮机的正常运行范围, 特别是机组在水轮机工况的正常气蚀部位 (叶片出水边背面外缘三角区) 与水泵工况的气蚀部位 (叶片进水边背面外缘三角区) 是相同的, 所以淮安三站转轮叶片的气蚀破坏程度较一般轴流泵要严重。此外, 泵叶片的气蚀破坏区较轴流泵还多了一个, 发生在水轮机工况的叶片进水边背面的外缘部位。正常情况下, 该部位不应该产生较重的气蚀破坏, 因为该处是水泵和水轮机两个工况的高压区。由于水轮机工况的叶片头部叶型不好, 单位转速 n_1' 过大, 运行工况恶劣, 所以才造成该处产生较为严重的气蚀破坏。

(4) 泵装置存在结构方面缺陷

采用 Fluent 软件对淮安三站灯泡贯流泵进行数值模拟, 分析了机组内部的水流运行状态以及机组过流部件水力损失的构成。采用模型装置作为计算装置, 其中叶轮直径 300mm, 转速 1450rpm。经计算, 在 $Q=340\text{L/S}$ 时, 进水流道收缩段损失 0.116m, 叶轮扬程 5.581m, 导叶损失 0.284m, 灯泡体加出水流道损失 0.717m。由此可见, 在现有泵装置各过流部件中, 灯泡体段 (包括灯泡体和灯泡体的支撑) 水力损失最大, 导叶体段的水力损失也较大, 而进水流道收缩段和出水流道的损失相对较小。灯泡体上部有水泵进人孔和电机进人孔, 水流在经过这两个进人孔时出现绕流现象, 底座支撑处流态不稳定, 尾部有小范围的脱流。

(5) 土建方面存在问题

由于进水断面偏小, 在设计工况下, 进水流速

已大于 1m/s。出口流道长度偏短, 灯泡体尾部距出口工作闸门只有 1.45m, 水流动能尚未充分回收就已损失。因此, 与同类泵站相比, 淮安三站的进出口水力损失偏大。

4 泵装置的优化

在对淮安三站原泵装置存在问题充分分析的基础上, 对原有泵装置做了 6 个方面的优化: ①将原来的电机水泵共用一根主轴, 改为电机水泵各用一根轴, 每根轴各有两点支撑, 既增加了机组的稳定性, 也便于检修; ②水泵进人孔布置下部, 这样避免了水流连续绕过水泵进人孔和电机进人孔, 形成“8”字形绕流, 并且在电机进人孔前后增加导流板, 以改善电机进人孔前后的水流流态; ③在电机尾部增加导流锥, 以改善出口水流流态; ④研发了新的水力模型装置; ⑤在上游工作门上设置 8 块小拍门, 将原来的绳股式启闭机更换为启门速度更快的油压启闭机, 以减小启动过程中的水流阻力; ⑥增加了变频调速装置, 用于调节流量和改善启动性能。优化后的泵装置结构如图 2 所示。

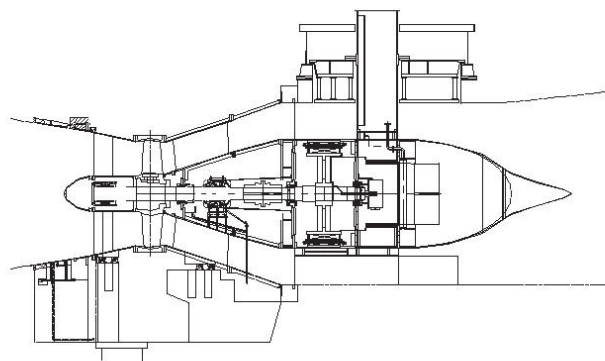


图 2 优化后的泵装置结构图

5 优化后泵装置的性能

为了检验淮安三站优化后泵装置的性能, 分别采用数值模拟、模型试验、现场试验的方法研究了优化后泵装置的水力性能。

数值模拟采用三维定常不可压缩雷诺时均 N-S 方程和湍流模型来描述泵装置内部流场的湍流流动。采用 ICEM-CFD 对各计算区域进行网格划分。灯泡体段结构复杂, 采用正交性、适应性较好的六面体核心非结构网格划分; 转轮、前导叶体、

后导叶体均采用六面体结构化网格划分。整个计算域的网格总数为 5744148, 并进行网格无关性检验。图 3 是淮安三站优化后泵装置三维图, 图 4 是采用 CFD 计算的水泵能量特性曲线。

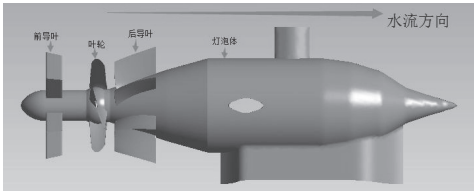


图 3 淮安三站水泵三维图

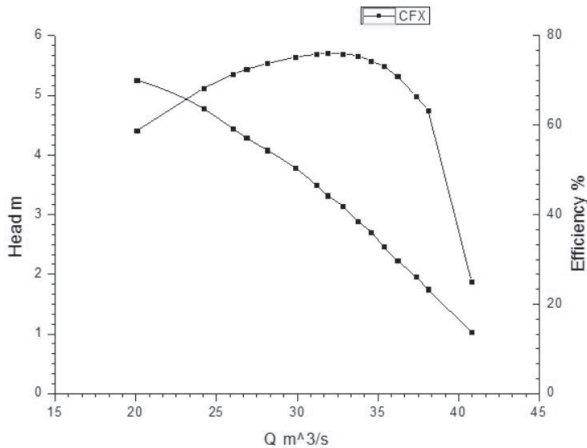


图 4 采用 CFD 计算的水泵能量特性曲线

模型试验是在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心水力试验台上进行的。试验台效率综合允许不确定度优于 $\pm 0.32\%$, 随机不确定度在 $\pm 0.1\%$ 以内, 原型泵叶轮直径 3.1m, 模型叶轮直径 0.30m, 模型比 10.33。全部过流部件几何相似, 尺寸按同一模型比确定。模型泵装置由进水流道、前导叶、水泵叶轮、后导叶、灯泡体和出水流道装配而成, 进、出水流道以钢板焊接制作; 为满足糙度相似, 钢制流道内壁加涂层。模型组件制作如图 5 所示。



图 5 模型组件

图 6 和图 7 是优化后泵装置的能量特性曲线。试验结果表明, 装置在水泵工况和水轮机工况下均可安全、稳定的运行, 能够满足淮安三站运行的要求。

优化后泵装置的现场试验是 2016 年 6 月 10 日至 15 日结合 2 号机试运行进行的。水位差是

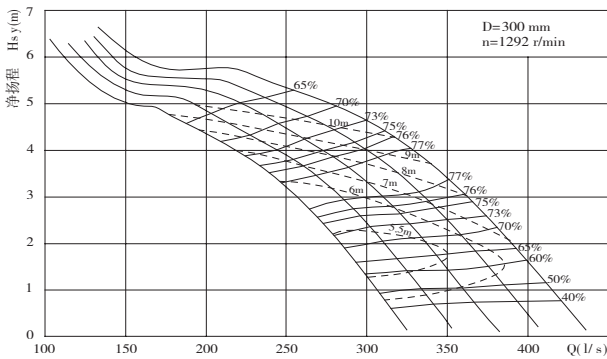


图 6 模型装置泵工况能量特性曲线

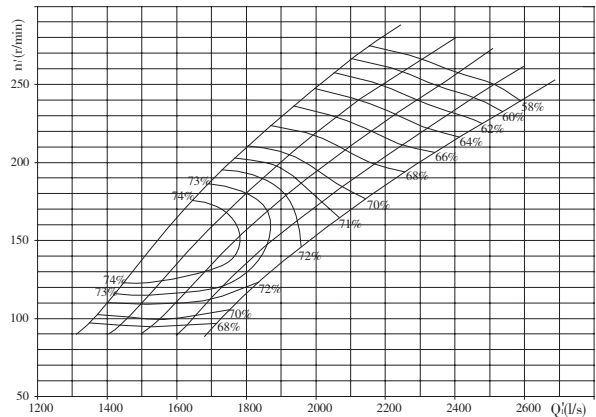


图 7 模型装置水轮机工况能量特性曲线

通过读取固定在上下翼墙上的水位尺得到的, 电机功率直接读取高压柜上的功率表, 流量是用 ADCP 多普勒流速剖面仪在下游引河中测量的。受现场水文条件限制, 泵站扬程变化较小, 所测量的工况点较少, 但总体趋势与 CFD 计算和模型试验一致, 见图 8。从微机励磁装置中的录波模块可以看到, 机组第一次启动时 (扬程 2.63m), 仅 4.2s 就牵入同步, 电机功率 1310kW, 机组效率 74%, 电流、电压、温度、振动在设计范围内, 与原泵装置相比, 性能显著改善。

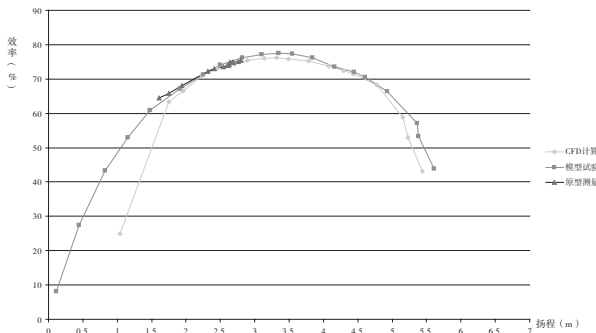


图 8 2 号机扬程 - 效率关系曲线

(1) 淮安三站原来所存在的问题并不是因为选用贯流泵而造成的, 是由于泵装置的结构不合理造成的, 在低扬程段选用贯流泵是合理的。

(3) 在贯流式泵站设计中, 要仔细分析进出水流道、前后导叶体、灯泡体、转轮、支撑件对水泵效率的影响, 应当按全流道水力装置的效率确定配套电机的功率。

淮安三站,但是,淮安三站改造后的效率并不低于这些泵站。因此,在低扬程段选用贯流泵是合理的。

- [1] 江苏省水利勘测设计研究院有限公司. 江苏省世行贷款项目淮安第三抽水站工程设计说明 [R]. 南京: 江苏省水利勘测设计研究院有限公司. 1995.6.
- [2] 天津发电设备厂. 32GWN-42 贯流定浆水泵水轮机产品安装使用维护说明书 [R]. 天津: 天津发电设备厂. 1996.10.
- [3] 江苏省水利勘测设计研究院有限公司. 淮安三站改造工程初步设计报告 [R]. 南京: 江苏省水利勘测设计研究院有限公司. 2014.10.
- [4] 江苏省灌溉总渠管理处. 淮安三站安全鉴定报告汇编 [R]. 淮安: 江苏省灌溉总渠管理处. 2009.3.

(责任编辑:王宏伟)