蔺家坝灯泡贯流泵机组水力性能及结构分析

秦钟建[1]，伍 杰[1]，张仁田[2]
（1.中水淮河规划设计研究有限公司，安徽 蚌埠 233001；2.江苏省水利勘测设计研究院有限公司，江苏 扬州 225009）

摘 要：蔺家坝泵站作为我国首座采用齿轮箱传动的大型灯泡贯流泵机组的泵站，为使水泵装置具有较优的水力性能，采用CFD仿真技术对该灯泡贯流泵机组的流道进行了优化设计和计算，并与水泵装置模型试验结果进行了比较；重点分析了灯泡体的支撑结构、叶片调角机构、主轴密封装置、轴承布置、齿轮箱及同步电动机等主要设备的结构设计. 结果表明：CFD仿真技术应用于灯泡贯流泵机组的水力性能优化是可行的，蔺家坝泵站采用大型灯泡贯流泵机组，在设计净扬程2.4 m工况下，水泵装置效率达到78%，且气蚀性能良好，技术参数均达到了南水北调东线工程的要求；大型齿联传动灯泡贯流泵机组的成功运行，为国内其他大流量低扬程泵站的机组选型、设计及制造提供了可借鉴的经验.

关键词：泵站；灯泡贯流泵；齿轮箱；水力性能；结构
中图分类号：TV68 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-6254(2009)03-0177-04

Analysis of hydraulic performance and structure for Linjiaba Bulb Tubular Pump Set

Qin Zhongjian[1], *Wu Jie*[1], *Zhang Rentian*[2]
(1. China Water Huaihe Planning, Design and Research Co., Ltd., Bengbu, Anhui 233001, China; 2. Jiangsu Surveying & Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Linjiaba Pump Station is the first station which adopts large-scale gear-driven bulb tubular pump set. In order to obtain optimum hydraulic performance of the pump set, its hydraulic loss was calculated by Computational Fluid Dynamics (CFD), and the results were compared with the model pump set test. The structures of bulb tubular pump supports, vane angle adjustment, main shaft seal apparatus, bearing arrangement, gearbox and synchronous motor were analyzed. The conclusion indicates that, the testing efficiency of the model pump set is 78%, the cavitation characteristic is fine at the net head(2.4 m) of pump station, and its hydraulic performances reach the index of the eastern route project of the South-to-North Water Diversion. The application of large-scale gear-driven bulb tubular pump set provides reference for type selection, design and manufacture of other pump stations of low lift and large flow capacity.

Key words: pumping station; bulb tubular pump; gearbox; hydraulic performance; structure

收稿日期：2009-04-13
基金项目：国家科技支撑计划重大项目(2006BAB04A03)
作者简介：秦钟建(1979—)，男，江苏如皋人，工程师(hwqzj@126.com)，主要从事泵站水力机械设计研究.
伍 杰(1964—)，女，湖南涟源人，教授级高工(wjhwsjy@163.com)，主要从事水力机械设计研究.

万方数据

大型灯泡贯流泵机组具有优良的水力性能，但其结构复杂，国内外建成并正式运行的大型灯泡贯流泵泵站也较少，其中以日本新川河口泵站（D = 4.2 m）、荷兰艾莫伊登泵站（D = 4.0 m）及中国的淮安三站（D = 3.19 m）较为典型. 淮安三站作为国内首次采用的大型灯泡贯流泵机组，其未能达到设计所要求水平. 近些年来，中、小型贯流泵的研究、试验及应用等方面积累了不少经验，但对于大型灯泡贯流泵，在设计、制造等方面经验仍不能满足实际工程需求.

蔺家坝灯泡贯流泵机组通过国际技术合作，成功完成了机组的生产、制作、安装和试运行，试验结果表明机组各项性能指标良好，并一次性通过试运行验收. 本研究对该泵站机组的综合特性、CFD 仿真优化设计及其主要设备的结构进行分析，为未来泵站机组选型、设计及制造提供可借鉴的参考.

1 泵站主要设计参数

蔺家坝泵站是南水北调东线工程的第九级泵站，位于江苏省徐州市铜山县境内. 泵站为大（Ⅰ）型一等工程，设计调水流量 75 m^3/s，泵站特征水位及净扬程见表 1[1].

表 1 泵站特征水位及净扬程

Tab. 1 Characteristic level of water and net head of pumping station m

工况	进水侧水位	出水侧水位	净扬程
设计	33.90	33.30	2.40
最低	30.20	31.80	0.10
最高	31.70	33.30	3.10
平均			2.08

蔺家坝泵站采用后置式机械全调节灯泡贯流泵机组 4 台套（备用 1 台套），水泵叶轮直径为 2 850 mm，单泵设计流量 25.0 m^3/s，配套电动机功率为 1 250 kW. 水泵与电动机通过行星齿轮箱联接传动，齿轮箱传动比为 6.25. 日立锡泵制造有限公司为主设备供应商，由该公司负责灯泡贯流泵成套机组设计、制造、国外关键部件和设备引进、安装指导等工作.

2 机组水力性能分析

2.1 流道 CFD 计算

为预测水泵装置水力性能，利用 CFD 仿真技术优化蔺家坝灯泡贯流泵装置过流部件的型线，模拟分析流道内的压力场和流速场，计算出流道水力损失. CFD 仿真计算采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型，将水泵装置划分为 4 部分（见图 1），并以 50%，80%，100% 和 120% 的额定设计流量计算水泵装置及进水流道（A ~ B 断面）、灯泡体（C ~ D 断面）和出水流道（D ~ E 断面）各部分的水力损失值. 水力损失结果见表 2，优化后设计流量工况时内部流场见图 2[2-4].

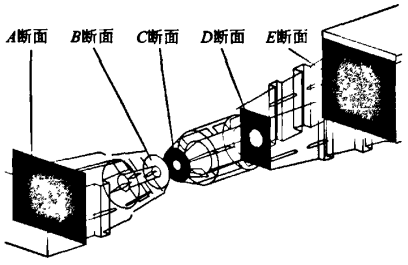


图 1 机组分界断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pump set interface

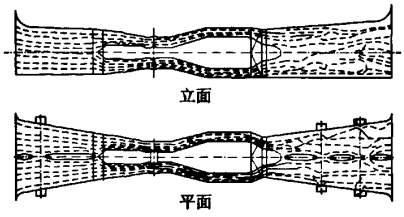


图 2 灯泡贯流泵装置内部流场

Fig. 2 Flow field pattern of internal flow in bulb tubular pump set

表 2 CFD 计算得到不同流量水力损失值

Tab. 2 Hydraulic loss of CFD simulation for different flow capacity

设计流量百分比/%	总水力损失值/m	进水流道（A ~ B）		灯泡体（C ~ D）		出水流道（D ~ E）	
		水力损失值/m	水力损失比/%	水力损失值/m	水力损失比/%	水力损失值/m	水力损失比/%
50	0.09	0.02	22.22	0.04	44.44	0.03	33.33
80	0.22	0.04	18.18	0.10	45.45	0.08	36.36
100	0.32	0.07	21.88	0.14	43.75	0.11	34.38
120	0.52	0.10	19.23	0.20	38.46	0.22	42.31

万方数据

CFD 计算结果表明：灯泡体段水力损失约占总水力损失的 45%，且灯泡体支撑对水流影响较小，并可通过优化支撑结构过流断面的形状，将其对水流的影响控制在最小范围内；进水侧流道断面由矩形渐变成圆形段水流流态较平顺，其水力损失占流道总损失的 0.2%，而出水侧流道断面由圆形渐扩成矩形段，水流流态有一些紊流，通过优化灯泡体尾部形状，将其水力损失降低到最低程度，约占流道总水力损失的 8%；大型灯泡贯流泵的流道总水力损失值较小，约 0.3～0.4 m，较适合应用于大流量、低扬程的泵站，有利于提高水泵装置效率，降低运行能耗.

2.2　水泵装置模型试验

水泵装置模型完全模拟原型泵装置（见图 3），试验在日本日立土浦产品研究所闭式试验台进行.

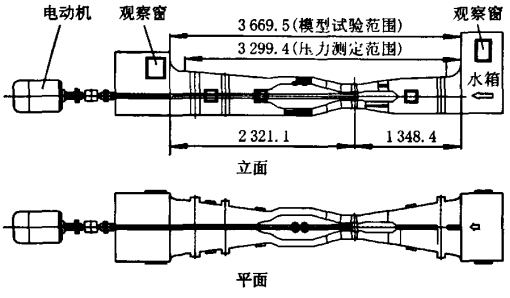


图 3　水泵装置模型外形

Fig. 3　Outside drawing of model pump set

水泵装置模型试验按照试验大纲的要求完成了水泵装置的综合特性测试，根据装置模型能量测试结果换算成原型泵装置的性能曲线（见图 4）[5]. 从图 4 可知，设计工况水泵装置效率为 78%，平均和最高扬程工况水泵装置效率均达到 75% 以上，水泵装置综合效率较立式高 5% 左右.

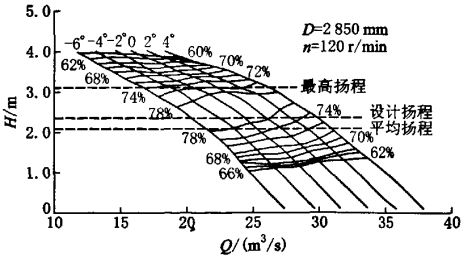


图 4　原型泵装置性能曲线图

Fig. 4　Characteristic curves of prototype pump set

水泵装置模型试验表明：利于 CFD 技术进行机组的仿真计算，并以此预测出的水泵装置特性与模型试验结果基本一致，所得结果也是可信的. 因此进行流道水力性能优化是必要的[6]；灯泡贯流机组水力性能较优，应用于大流量、低扬程泵站具有较高的装置效率，性能指标满足南水北调工程泵站设计要求[7,8].

3　机组结构分析

3.1　支撑结构

该站采用后置灯泡贯流泵机组，水泵、电动机及齿轮箱等设备沿同一轴线布置在灯泡体内，总装配图如图 5 所示.

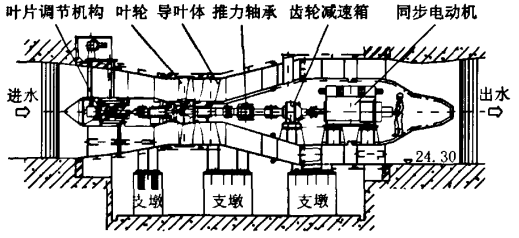


图 5　灯泡贯流泵机组总装配图

Fig. 5　General assembly drawing of bulb tubular pump set

机组外壳及灯泡体均为分段、上下分半的金属结构，承受着机组的自重和运行时的各种载荷，根据载荷的传递要求，叶片调角机构、扩散锥管及灯泡体处均设有辐射状支撑结构. 机组支撑系统具有足够可靠性的强度、刚度，并满足抗振动等特性要求，能安全、有效地将机组所承受的载荷传递给混凝土基础.

3.2　叶片调角机构

水泵工况调节采用机械全调节. 调节机构通过蜗轮、蜗杆传动机构，将其伺服电动机的垂直旋转驱动转换为平动驱动，再通过杠杆作用来实现叶片角度调节，在电源切断的情况下仍能维持原叶片角度，叶片调角机构示意图如图 6 所示.

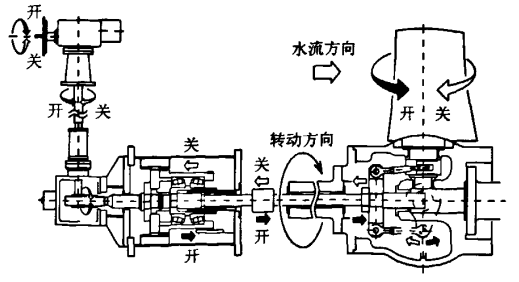


图 6　叶片调角机构示意图

Fig. 6　Schematic diagram of vane angle adjustment

操作机构布置在进水侧，伺服电动机布置在水

万方数据

泵外部,其管理维护方便.叶片操作机构的组合轴承采用稀油润滑,为保证调节机构具有良好的工作环境设有通风设备.

3.3 主轴密封装置

机组主轴密封装置由两部分组成:一部分为停机密封(围带密封),由围带座、围带和轴护罩组成.机组停机时,围带内充入0.5 MPa的压缩空气,使围带抱紧轴护罩,防止水流外溢;另一部分为无接触式间隙密封(迷宫密封),由转动密封体和轴护罩组成,密封体上设减压迷宫,起密封作用.叶轮进、出水侧各设一套轴封装置.机组起动时,先将围带密封内的压缩空气完全释放,正常运行时,迷宫密封允许有少量漏水,因此在轴封装置处均设有挡水环、集水器及排水管等.

3.4 轴承布置

机组转动部分的径向力由设备自身的导轴承承受,导轴承采用油脂润滑;轴向力由水泵的组合推力轴承承受,推力轴承布置在水泵叶轮与齿轮箱之间,采用稀油润滑并设冷却水进行冷却,保证机组在最大载荷时,轴承润滑油的温升不超过设计值.

3.5 齿轮箱

机组的齿轮箱为行星齿轮减速箱,输入轴(n = 750 r/min)与输出轴(n = 120 r/min)在同一轴线上,转速比为6.25,额定传动功率1 250 kW,由英国DAVID BROWN公司提供.为了满足齿轮箱的润滑要求,每台齿轮箱均设1套稀油站润滑系统,同时为了确保稀油站的工作油温不超过40 ± 2℃,稀油站设有冷却水系统.

3.6 同步电动机

机组主水泵驱动电动机为T 1250 - 8/1180型卧式同步电动机,湖南湘潭电机股份有限公司提供.主要技术参数:额定功率1 250 kW,额定转速750 r/min,额定电压10 kV,额定电流85 A,功率因数0.9(超前),效率95%,并配有微机型励磁系统.电动机冷却采用密封自循环通风方式,即电动机定子外部有密封空间,此空间内装有空气冷却器(水冷)和风机,电动机排出的热风在风机作用下,经空气冷却器冷却后再吸入电动机,如此循环可以冷却电动机.

4 结 论

1)蔺家坝泵站采用大型灯泡贯流泵机组,在设计净扬程2.4 m的工况下,水泵装置效率达到78%,且具有良好的气蚀性能,机组各项性能指标均达到南水北调东线工程的要求.

2)在机组设备选型及结构设计过程中,采用与国外技术合作、引进先进的设备及关键部件等措施,使得主机组顺利实施,并一次性通过泵站试运行验收.

3)大型齿联传动灯泡贯流泵机组的成功运行,为国内其他大流量、低扬程泵站的机组选型、设计及制造提供了可借鉴的经验.

参考文献(References)

[1] 中水淮河规划设计研究有限公司.南水北调东线工程蔺家坝泵站工程初步设计报告[R].安徽:中水淮河规划设计研究有限公司,2004.

[2] (株)日立工业设备技术.模型泵水力元件性能试验(CFD)报告书[R].江苏:日立锡泵制造有限公司,2006.

[3] Caridad J,Kenyery F. CFD analysis of electric submersible pumps (ESP) handling two-phase mixtures [J]. *Transaction of the ASME: Journal of Energy Resource Technology*, 2004, 126(2): 99 - 103.

[4] Li Yaojun, Wang Fujun. Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2007, 19(6): 705 - 711.

[5] (株)日立工业设备技术.模型水泵预备试验结果报告[R].江苏:日立锡泵制造有限公司,2006.

[6] 吕建新,许跃华.大型灯泡贯流泵CFD计算[J].排灌机械,2007,25(5):17 - 19.
Lü Jianxin, Xu Yuehua. CFD calculation for large-scale bulb tubular pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(5): 17 - 19. (in Chinese)

[7] 陈松山,严登丰,陆伟刚,等.低扬程水泵装置起动过渡过程分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2003,24(5):47 - 50.
Chen Songshan, Yan Dengfeng, Lu Weigang, et al. Analysis on transient process in low-head pumping installation during starting period[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2003, 24(5): 47 - 50. (in Chinese)

[8] 张仁田,邓东升,朱红耕,等.不同型式灯泡贯流泵的技术特点[J].南水北调与水利科技,2008,6(6):6 - 9.
Zhang Rentian, Deng Dongsheng, Zhu Honggeng, et al. Technical features of two bulb tubular pumps [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, 6(6): 6 - 9. (in Chinese)

(责任编辑 赵 鸣)

万方数据